

SOCIETAT CATALANA DE CIÈNCIES  
FÍSiques, QUÍMIQUES I MATEMÀTIQUES

Filial de l'INSTITUT d'ESTUDIS CATALANS

Secció de Física

PRIMER  
COL·LOQUI INTERNACIONAL  
D'ENERGIA SOLAR

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS

BARCELONA

1980



**I.º COL·LOQUI INTERNACIONAL  
D'ENERGIA SOLAR  
(Barcelona, febrer de 1977)**

**This One**



**7BXW-2YJ-JR5J**

*La Secció de Física agraeix la col·laboració de totes les persones i entitats que feren possible la celebració del I. Col·loqui Internacional d'Energia Solar.*

SOCIETAT CATALANA DE CIÈNCIES  
FÍSiques, QUÍMIQUES I MATEMÀTIQUES

Filial de l'INSTITUT d'ESTUDIS CATALANS

Secció de Física

PRIMER  
COL·LOQUI INTERNACIONAL  
D'ENERGIA SOLAR

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS

BARCELONA

1980

**ISBN: 84-7283-026-8**  
**Dipòsit Legal: B. 6389 - 1980**

## DISCURS D'OBERTURA

per

J. ALSINA I BOFILL

President de l'Institut d'Estudis Catalans

Si donem al mot «energia» el significat de capacitat d'obrar, és evident que la Secció de Física de la Societat de Ciències Físiques, Químiques i Matemàtiques, filial de l'Institut d'Estudis Catalans, ha demostrat tenir-ne bones reserves i, a més, esperit de realització en organitzar aquest Primer Col·loqui Internacional d'Energia Solar, l'èxit del qual podem donar com a segur des d'ara.

Hom s'ha encarat amb un tema cada dia més apassionant: el de l'obtenció d'energia, i l'ha dirigit cap a l'única font inexhaurible: el sol.

Tema apassionant i preocupant. Tothom sap que energia i desenvolupament formen una equació indestruïble. I tothom veu que el 90 per cent de l'energia que avui el món consumeix prové dels combustibles fòssils; per tant, irrecuperables.

D'aquestes dues obvietats, com del xoc de dues pedres fogueres, ha sorgit la idea ben clara que no podem deixar d'aprofitar la copiosa energia solar, la que ha forjat i vivificat el món i la humanitat i que ha de vivificar l'un i l'altra com una premissa insalvable mentre el món i la humanitat existeixin.

Tothom s'ha adonat que hem de tornar els ulls al sol. En les seves primeres etapes, l'home prou va saber valorar-ne el poder decisiu. Per això és ben vàlid de dir que el camí de l'home ha estat el camí del sol.

Però, avui això no és tan simple. Caldren grans esforços dels estudiosos i dels hàbils, dels investigadors i dels tècnics, per arribar a satisfer la necessitat cada dia més gran d'energia amb l'aprofitament d'aquesta vella i nova deu.

Els nostres físics han plantejat amb aquest Col·loqui un programa ambiciós. Han cercat i obtingut col·laboracions de primer ordre. Els en felicito efusivament perquè demostrin saber el que ens cal i demostrin que saben planejar les vies de comunicació i de discussió dels nous coneixements capaces de donar-los eficàcia.

Amb això són ben fidels a les idees de Prat de la Riba. Catalunya —deia Prat— no té ni pot tenir altra primera matèria sinó la tècnica. Això no ens condemna, però ens obliga. Vegeu Suïssa, que no en té cap tampoc i que és un dels països més rics del món. Seguint aquesta idea, Prat de la Riba creà l'Institut d'Estudis Catalans, que havia i ha hagut de promoure la investigació, i la Universitat Industrial, que havia de perfilar i difondre la tècnica.

Jo espero que aquest Col·loqui que ara inaugurarem tindrà la perfecta realització que el programa promet i que vindrà a ésser un nou pas en el camí que ha de dur la humanitat a resoldre el seu problema energètic. I també estic segur que els qui l'han pensat i organitzat, i els qui han d'intervenir-hi en nom de la nostra filial, la Societat de Ciències Físiques, Químiques i Matemàtiques, comparteixen el sentiment d'ésser la veu de la inquietud de Catalunya per tots els problemes que afecten el món d'avui i que afectaran el món de demà. Som un país petit, però ben afermat dins una vella cultura, configurat per les idees que són la base de la civilització i ben conscient que cap poble no pot defugir el deure i la glòria de contribuir a les nobles empreses que han d'assegurar la supervivència de la humanitat i la progressiva millora de les seves condicions de vida.

Senyors: com a president de l'Institut d'Estudis Catalans tinc l'honor de declarar obert el Primer Col·loqui Internacional de l'Energia Solar.



## OPPENING SPEACH

If we equal the meaning of the word «energy» with its capacity of work, it is evident that the Physics department of the Society of the Physical, Chemical and Mathematical Sciences, an affiliate of the Institute of Catalan Studies, has demonstrated to possess good reserves, and moreover, the necessary enterprising spirit at organizing this first International Symposium on Solar Energy, whose success we may already take for granted.

The Symposium has confronted a subject of ever increasing appeal: that of the obtainment of energy, and has directed it towards the only inexhaustible source: the sun.

How attractif subject. Everybody knows that energy and development form an inseparable equation; also, everybody sees that 90 % of the energy, currently being consumed, originates from fossil fuels, and is therefore irrecoverable.

From these two obvious premises there has emerged the clear realization that we ought not to stop from harnessing the copious solar energy, which has formed and sustained the world and mankind, and which will have to remain doing so for as long as both of them exist.

We have all perceived that we ought to turn our eyes to the sun. In this primary stage, man knew well how to value his power of decision. Therefore, it is truthful to say that the path of man has followed that of the sun. Nevertheless, that is not so simple in reality. Great efforts from the studied and the capable, the investigators and the technicians, will be necessary to satisfy the daily increasing energy necessity, with the harnessing of this source. Our physicians have set themselves an ambitious programme in this Symposium. They have searched and obtained first class contributions. I congratulate them effusively because they have proved to know what we really need, and layed out the communication and discusion methods capable of giving these efficacy.

In this way, they are being loyal to the ideas of Prat de la Riba. Catalunya, as Prat had often said, does not and can not have any other raw material besides its technology. This is not a sentence, but it presses upon us. Have a look at Switzerland's particular case, whilst being a country with no raw material either, it is one of the richest in the world. Following this idea, Prat de la Riba created the Institute of Catalan Studies, which was intended to promote, as it has actually done, the investigation activities, and the Industrial University, whose mission was that of profiling and diffusing technology.

I hope that this Symposium, which we presently inaugurate, will have the perfect realization that the programme offers, and that it will be a new step advanced in the path which has to take mankind to the solution of the energy problem; I am sure that those who have thought about it through organizing it, and those who have to intervene in the name of our affiliate, the Society of the Physical, Chemical and Mathematical Sciences, share the feeling of being the inquiring voice of Catalunya in all the pro-

blems which affect the world today and might affect it in future. Our country is small but well enrooted in an old culture formed by the ideas on which civilization finds its base; and what is more, conscious of the belief that no single town can avoid the duty and glory of contributing to the noble enterprises that have to secure mankind's survival, and the progressive improvement of its living conditions. Gentlemen: as president of the Institute of Catalan Studies, I have the honour of declaring open the First International Symposium on Solar Energy.

## PRESENTACIÓ DEL COL·LOQUI

per

FRANCESC SOLÉ I PLANAS

Secretari de la Secció de Física de la Societat Catalana  
de Ciències Físiques, Químiques i Matemàtiques

Aquest primer col·loqui internacional d'Energia Solar ha estat organitzat per la Secció de Física de la SCCFQM de l'Institut d'Estudis Catalans amb l'esperit d'oferir unes jornades científiques d'introducció i presentació a casa nostra de la problemàtica que envolta l'aprofitament de l'energia solar per l'home d'avui. Aquesta elecció ha estat també motivada perquè estem fermament convençuts que l'energia solar és una de les fonts energètiques de les anomenades no convencionals amb més esdevenidor per a la humanitat.

Tanmateix, hom ha cercat que dins un esperit rigorosament científic i forçosament prou especialitzat, les comunicacions apleguessin el ventall més ample possible d'aspectes, així com que aquestes fossin a l'abast del major nombre possible de persones.

No voldríem deixar passar l'avinentsa de retre ací i avui el nostre homenatge a l'Institut d'Estudis Catalans per la continuïtat menada en la seva tasca abnegada i sovint difícil, ateses les dificultats trobades durant els darrers quaranta anys. Aquesta continuïtat ha fet possible que avui una de les seves filials pogués escometre la realització del present Col·loqui, dins la millor tradició científica del nostre país.

En nom del Comitè Organitzador voldria expressar el nostre agraïment envers tots els qui amb llur desinteressada col·laboració i esforç han fet possible aquest col·loqui i molt especialment els conferenciants d'arreu que tan generosament han atès la nostra crida.

## PRESENTATION

This first International Symposium on Solar Energy, has been organized by the Physics Department of the SCCFQM of the Institute of Catalan Studies, with the aim to spend some scientific journals of introduction and presentation, in our country, of the problems surrounding the harnessing of solar energy by man today. This decision has been motivated as well by the fact of our being firmly convinced in solar energy, one of the so called non conventional energy sources, offering a better future for mankind.

At the same time the idea that the communication would gather the widest possible span of aspects, and, that they would be accessible to a majority of people, has been aimed within a rigorously scientific, necessarily specialized, spirit.

We wouldn't like to miss the opportunity, here and now, of paying homage to the Institute of Catalan Studies for the continuity it has kept in its dedicated and often difficult task, regarding the problems sustained in the last 40 years. This continuity has made it possible for one of its affiliates to undertake the realization of the current symposium in the best scientific tradition of our country. In the name of the organizing committee, I wish to express our appreciation to all those who, with diligent collaboration and effort, have made possible this symposium, and especially to the speakers who have so generously accepted our invitation.

**LES FONTS D'ENERGIA: NOVES PERSPECTIVES  
PER A CATALUNYA I LA RESTA DE L'ESTAT ESPANYOL**

pel

**DR. CARLES A. GASÒLIBA**

**Universitat Autònoma de Barcelona - Bellaterra, Catalunya**

## RESUM

Hom analitza el paper de l'energia en l'evolució de les societats industrials i el paper capdavanter de Catalunya en el si de la Península, tot tractant separadament la composició actual i l'evolució més recent de les fonts d'energia a Catalunya i a l'Estat espanyol, i considera les previsions oficials actualment existents. Sobre aquestes bases hom estudia la problemàtica del futur en el sector energètic, tot fent especial èmfasi en les possibilitats que ofereixen les fonts d'energia no convencionals i la necessitat de desenvolupar un marc de recerca adient que possibiliti de continuar explotant a tots els nivells (organismes públics, sector privat, universitat, etc.) les potencialitats existents a Catalunya.

## SUMMARY

The role of energy in the development of industrial societies, and the particular avant garde role played by Catalunya in the bosom of the peninsula, is here analyzed. The current composition and recent evolution of the sources of energy, in as far as Catalunya and Spain are concerned, are equally spoken, regarding the official prevision currently in existence. Upon these bases the future problems in the energy field are studied, putting a special emphasis in the possibilities that non conventional energy sources may offer, and the needs for the development of an adequate investigation frame which should enable the continuity of exploitation, at different levels (public organizations, private sector, university, etc.), of the existing potentialities of Catalunya.

La història del creixement industrial, que ha estat la causa principal del desenvolupament econòmic dels països que avui considerem com els més avançats, és, en darrer terme, la història del desenvolupament i l'aparició de noves formes d'energia. Com comenta l'economista i historiador anglès COLE, «el sistema econòmic sota el qual viuen actualment les zones més desenvolupades del món és aquell on predomina la producció a gran escala, que compra maquinària molt complicada i costosa i que *fa ús intensiu de la força motriu*».<sup>1</sup> Hem de recordar que el primer impuls de la Revolució Industrial a Anglaterra s'aconseguí gràcies a una coincidència de diversos factors, entre els quals destaca l'aprofitament d'energia hidràulica; àdhuc després de l'any 1750, les primeres fases de la Revolució Industrial es basaven principalment en la utilització de l'aigua com a font d'energia. L'invent més famós de Richard Arkwright —la «màquina contínua» per a filar cotó— fou anomenat *water-frame* («teler» que funciona amb «aigua») per aquesta raó. La localització primitiva de les primeres «fàbriques» angleses fou deguda a la recerca de les fonts d'energia hidràulica adequada; «hom pot veure encara les runes de les antigues fàbriques tèxtils a les Highlands d'Escòcia. La famosa fàbrica de Robert Owen, que fou creada pel seu sogre, David Dale, en societat amb Richard Arkwright, fou localitzada a New Lanark a causa de la proximitat dels salts d'aigua del riu Clyde, que constituïa la seva font d'energia originària (...), els turons dels voltants de Sheffield eren coberts de petites fàbriques que aprofitaven els torrents petits però ràpids per a impulsar grans martells que copejaven el metall per eliminar-ne les impureses i per donar-li la forma desitjada».<sup>2</sup>

Catalunya, àrea capdavantera en el procés industrialitzador europeu, mostra una tendència igual a aprofitar l'energia hidràulica tot situant les seves «fargues» i colònies a la capçalera dels rius catalans. Com destaca Pierre VILAR, encara és possible actualment

1. G. D. H. COLE, *Història de l'economia moderna*, Barcelona 1965, p. 15. (El subratllat és meu.)

2. *Ibid.*, pp. 22-28.

de constatar aquest fenomen que en altres països és un pur record històric. Així, diu aquest historiador de la Catalunya moderna, «un mapa de les preses hidràuliques directes utilitzades, a mitjan segle xx, per la indústria catalana pot estranyar de primer antuvi. Hom pensa en el Lancashire del segle XVIII, en els Vosges del segle XIX».<sup>3</sup>

Posteriorment a l'energia hidràulica sorgiren noves fonts que marcaren, cadascuna, noves etapes en els processos i fases d'industrialització: el carbó s'associà ràpidament al vapor com a forma d'energia; sorgí després l'energia elèctrica amb les seves formes primordials de producció —tèrmica i hidràulica—, i posteriorment la progressiva utilització del petroli com a font d'energia directa o bé a través de la producció elèctrica. Més recentment, hom ha assistit a la utilització progressiva i creixent del gas natural i de l'energia d'origen nuclear.

Segurament, ara no és el moment de recordar amb precisió dates i implantacions concretes, però voldria remarcar dos trets que crec fonamentals, o, si més no, significatius. El primer, de caràcter general, és que cada nou descobriment i aplicació de noves fonts i formes d'energia ha marcat una etapa de creixement, eixamplant les possibilitats i els horitzons del desenvolupament i del progrés econòmic. El segon, de caràcter particular, referit a Catalunya, és que el nostre país en la seva darrera etapa de societat primordialment industrial ha anat incorporant les noves formes d'energia malgrat de no gaudir, a vegades, dels recursos naturals o apropiats, i en aquest aspecte cal recordar que historiadors com Pierre VILAR o Jaume VICENS I VIVES ens mostren els estrangulaments del creixement de la indústria catalana en el segle XIX a causa de la manca de recursos adequats de carbó mineral.<sup>4</sup>

Malgrat aquesta manca de recursos, Catalunya ha estat l'àrea capdavantera a l'Estat espanyol en la utilització de noves formes d'energia i ha sabut pròporcionar-se de l'exterior la forma que li resultés rendible a través d'una adequada explotació del sistema productiu manufacturer utilitzador de la dita energia. Així tenim la implantació de la primera fàbrica utilitzant el vapor de forma significativa —«El Vapor» dels Bonaplata, el 1832— amb carbons importats de Newcastle, que, en paraules de Pierre VILAR, «omple ja de fum alguns carrerons de Barcelona des del 1780»; posteriorment s'aniran implantant noves formes d'energia pròpies —les hidràu-

3. Pierre VILAR: *Catalunya dins l'Espanya Moderna*, Barcelona, 1964, p. 363, vol. 1.

4. J. VICENS I VIVES: *Industrials i polítics (segle XIX)*, Barcelona, 1961.



liques— o importades, com ben recentment tenim el cas del gas natural, a la fi del decenni dels 60, i també peoner en la seva utilització a nivell d'estat, i de l'energia nuclear també vers la fi dels 60.

L'any 1975, i segons es mostra en el quadre adjunt, Catalunya utilitzà 9.604 milers de tec, amb una distribució en la qual imperaren com a fonts prioritàries d'energia els combustibles líquids (64,48 % del total), el gas (17,81 %) i l'electricitat (15,95 %); el carbó no emprat en la fabricació d'energia elèctrica, sinó com a font directa, només representà l'1,76 % del total. Aquesta distribució presenta disparitats amb la corresponent a la d'Espanya amb un major pes del gas i de l'energia nuclear. De fet, comparant-ho amb tres països diferents —Espanya, França i Gran Bretanya—, Catalunya presenta unes característiques pròpies i clarament diferenciades de la resta quant a l'exacta distribució de les seves fonts energètiques.

**ESTRUCTURA DEL CONSUM FINAL D'ENERGIA. CATALUNYA**  
(milers de tec)

	1974	1975	% variació 1975/74	1974	%	1975
Carbó	150	169	2,67	1,53		1,76
Electricitat	1.503	1.532	1,93	15,32		15,95
Gas	1.577	1.711	8,43	16,08		17,80
Manufacturat	182	187	2,75	1,86		1,94
Natural	790	907	14,81	8,05		9,44
Gasos líquats del petroli	605	617	1,98	6,17		6,42
Combustibles líquids	6.579	6.192	— 5,87	67,07		64,48
Petroli	313	282	— 9,90	3,19		2,93
Gasolina	1.294	1.400	8,19	13,19		14,58
Gas-oil	1.343	1.365	1,64	13,69		14,22
Fuel-oil	3.629	3.145	— 13,34	37,00		32,75
<b>TOTAL</b>	<b>9.809</b>	<b>9.604</b>	<b>— 2,09</b>	<b>100,00</b>		<b>100,00</b>

FONT: C.O.C.I.N.B.

Tanmateix, si la distribució no és ben bé exacta, l'energia a Catalunya sí que té trets comuns amb els països esmentats i participa d'una problemàtica també comuna. Com a la major part de les societats industrialitzades, l'energia és una matèria importada en una proporció força considerable i centrada d'una manera primordial en els combustibles líquids. I és precisament pel cantó de l'energia, bé que no pas per les causes previstes, que s'han fet

palesos aquells advertiments sobre l'escassetat i la limitació dels recursos disponibles i sobre la necessitat d'aplicar nous criteris en la producció i la distribució d'aquells recursos. Aquesta tradició, que arrenca, d'una forma diguem-ne científica, de l'economista anglès del segle passat Robert MALTHUS, tingué una inesperada represa a través de l'informe conegut com l'informe del Club de Roma, aparegut l'any 1972.<sup>5</sup> Tot amb tot, la revisió del model de creixement que ha caracteritzat les economies occidentals més avançades no vingué per una presa de consciència d'aquesta problemàtica, que dramàticament exposava el Club de Roma, sinó per l'augment del preu dels productes petrolers des de l'octubre de 1973, que es multiplicà per més de cinc en menys d'un any i que, amb posterioritat, ha anat experimentant successius augments, bé que menys espectaculars que en el primer període esmentat.

El considerable augment del preu dels productes petrolers provocà el conegut trasbals en l'economia internacional i un canvi d'orientació del qual encara avui, tres anys i mig després, no es veu una sortida clara, fet lògic si tenim en compte que ha canviat radicalment un dels pilars sobre els quals recolzava el sistema productiu, àdhuc a nivell internacional: el de l'energia barata. Aquesta transformació radical ha tingut implicacions en molts àmbits del món econòmic, des dels fluxos financers internacionals fins a un alentiment efectiu del procés de creixement en una bona part de països (exceptuant els de l'OPEP, naturalment). Però ha afectat també, i és en aquest punt on centrarem la nostra atenció, el plantejament de tota la política energètica tant a nivell internacional com a nivell de país o d'àrees supranacionals concretes.

En aquest camp, cal esmentar els estudis successius que, sobre les necessitats energètiques, ha anat fent l'OCDE, referides bàsicament als països industrialitzats i la darrera versió dels quals ha aparegut molt recentment,<sup>6</sup> tot explicant també les revisions i els projectes que el dit organisme ha anat fent d'ençà del 1974.

En l'informe esmentat, es revisen les prediccions que hom féu el 1975 sobre la mateixa qüestió, i hom constata que, malgrat que hi ha hagut una baixa del creixement econòmic d'aleshores ençà, la situació ha empitjorat, primer de tot perquè tot increment unitari de creixement exigeix una despesa d'energia més elevada ara que no pas en la primera previsió; en segon lloc, perquè així com el 1975 hom pensava que l'any final de la previsió —el 1985— els

5. D. H. MEADOWS i col·lab.: *The Limits to Growth*, London, Pan Brooks L., 1972.

6. OECD: *World Energy Outlook*, Paris, 1977.

països de l'OCDE cobririen el 80 % de llurs necessitats energètiques amb fonts d'energia pròpies, ara aquest percentatge ha passat a ésser del 62,5 %, a causa principalment del fet que les tècniques de conservació d'energia i d'aïllament en les construccions i els habitatges no han tingut ni l'extensió en l'aplicació ni l'eficàcia esperades.

Aquesta menor eficàcia en el comportament de l'autosuficiència energètica per part dels països de l'OCDE es tradueix en el fet que, sota un supòsit de creixement del 3,6 % anual per al període 1974-1985, l'OCDE necessitarà importar, l'últim any, 1.750 milions de tones de petroli equivalent, o sigui 35 milions de barrils diaris, xifra que significarà un 34 % del total de les necessitats energètiques de l'OCDE, percentatge que, d'altra banda, no és massa més baix que el 37 % corresponent al 1974. Mirant els grans blocs econòmics del món occidental, el país que depèn menys de la importació de petroli continuarà éssent els Estats Units, amb el 20 % del total de la demanda d'energia (17 % el 1974), i el que més, el Japó, amb el 71 % (79 % el 1974). A un nivell intermedi i mostrant una gran millora, cal situar la Comunitat Econòmica Europea: 43 % el 1985, davant el 61 % el 1974, i els països en via de desenvolupament, 24 % davant el 47 per cent.

Les fonts d'energia més importants seran el carbó, el petroli, el gas natural i l'energia nuclear. La producció de carbó hom espera que s'incrementi en un 36 % entre els anys 1974 i 1985. Aquest increment serà degut a l'elevació dels nivells productors als Estats Units (50 %), al Canadà (135 %) i a Austràlia (67 %); aquests creixements tan forts hauran de compensar les baixes dels nivells de producció de carbó a Europa, especialment a la R.F. d'Alemanya (— 50 %) i a França (— 50 %). En conjunt, l'OCDE preveu que, per a la totalitat de països que aplega, el 1985 n'hauran d'importar 64 milions de tones, les quals provindran bàsicament dels països de l'Europa de l'Est.

El petroli és la font d'energia més llargament deficitària en el conjunt dels països de l'OCDE, que necessitaran el volum d'importacions abans esmentat, i que no podrà ésser eixugat substancialment malgrat el petroli d'Alaska i del Mar del Nord. També en aquest cas, les previsions de l'OCDE són menys optimistes que no pas ara fa dos anys. En la revisió a la baixa, hi han influït diversos factors, com el descens del nivell d'extracció de productes petrolers als Estats Units, les reticències noruegues a explotar més intensament les seves demarcacions al Mar del Nord i, àdhuc, el fet que, segons que sembla, la Gran Bretanya espera alentir el ritme de les

seves explotacions del Mar del Nord un cop hagi estabilitzat la seva delicada situació econòmica.

Pel que fa a les disponibilitats energètiques a través del gas natural, les perspectives són igualment menys optimistes que no fa un parell d'anys; en aquesta visió sembla que ha contribuït en gran manera el ràpid esgotament d'uns camps determinats dels EUA, els quals, en àrees molt extenses del sud-oest, han hagut d'anar al racionament i a una revisió total del proveïment energètic. En un pla global, mentre que dos països de l'OCDE —el Canadà i Austràlia— seran grans excedentaris de gas natural, les necessitats dels Estats Units i d'Europa Occidental s'hauran de cobrir important més de 152 mil milions de metres cúbics de gas natural provinent de l'àrea dels països dits del tercer món.

El desenvolupament de les centrals nuclears i de l'energia que té com a origen aquesta font, també ha estat més lent que el previst l'any 1975. Ara hom preveu que la potència instal·lada el 1985 serà de 325 GW, mentre que la prevista l'any 1975 era de 513. L'OCDE opina que és molt probable que les realitzacions, el 1985, encara siguin inferiors a aquestes, ja que tant la Comunitat Europea com el Japó s'han vist obligats a retallar successivament llurs programes nuclears a causa del nivell de contestació i recel que socialment aixeca aquest tema. És curiós de fer notar que la previsió actual de l'OCDE és inferior a l'existent el 1973, abans de la crisi energètica.

L'informe de l'OCDE reflecteix, en conjunt, una preocupació constant per l'èxit escàs de les polítiques energètiques que hom ha intentat de dur a terme des de la crisi energètica, i expressa una velada acusació als països més avançats per la manca d'actuacions realment operatives en aquest camp, on han predominat consideracions polítiques a curt termini sobre opcions que, en no ésser agafades a temps, poden estrangular tota perspectiva de creixement ulterior; en aquest sentit, l'OCDE posa l'accent sobre el fet que si s'haguessin contemplat unes taxes de creixement més elevades, com per exemple les que van ésser normals en el període 1960-1973, la demostració d'impotència per a superar el dèficit energètic hauria estat encara molt pitjor. També posa un punt d'alarma en el fet que, si la projecció es porta al 1990, el món occidental només podrà cobrir un dèficit energètic, llavors molt greu, si són incrementats molt substancialment els nivells d'extracció dels principals països productors de petroli, cal llegir OPEP, o bé que es produeixin descobertes molt significatives de nous camps petrolífers.

Pel que respecta a la situació concreta dins l'Estat espanyol,

no podem comptar encara amb unes dades fiables que mostrin una aproximació al nou estat de coses. A Espanya, el consum d'energia ha mantingut un creixement especialment intens en el decenni dels 60 i primers anys del 70, amb una línia expansiva només truncada els anys 1974 i 1975. Si el 1973 el creixement de la demanda d'energia en unitats físiques fou de l'11,5 %, el 1974 passà a ésser del 4,5 per cent i el 1975 el creixement fou pràcticament nul, 0,2 %. A Catalunya, l'evolució fou més greu, ja que, per primera vegada en molts anys, l'evolució de la demanda d'energia fou negativa, -2,1 per cent. Tant en l'un cas com en l'altre, trobem, com hem vist abans, una estructura basada en el petroli, més del 60 % del total dels recursos energètics, i el que és pitjor, sense comptar encara amb uns plans de reestructuració del sector energètic que afrontin d'una forma realista els dos fets bàsics —bé que interrelacionats— que afecten l'economia industrial del món d'avui: la situació d'estancament i àdhuc de recessió econòmica que travessem, i el progressiu encariment de l'energia, fet que planteja greus problemes de desequilibri en la balança de pagaments.

Hem dit que l'aproximació i la projecció futures de l'energia a l'Estat espanyol no era assentada sobre bases realistes, no que no existia, perquè cal tenir en compte que les previsions energètiques a llarg termini per a Espanya foren aprovades pel govern a l'inici de l'any 1975, i es concretaren en l'anomenat Plan Energético Nacional.<sup>7</sup> Aquest pla es projecta fins l'any 1985 i, quant a la demanda d'energia primària, considera que passarà dels 96 milions de tec del 1975, a 193-194 milions de tec, el 1985, segons si el creixement anual del PNB és del 5 o del 6 % al llarg d'aquest període. L'any 1985 hom calcula que el consum d'energia per habitant a Espanya variarà entre les 4,3 i les 4,9 tec, mentre que França superarà les 5 tec, Alemanya, les 6 tec i els EUA tindran un consum de l'ordre de les 10 tec.

Quant a l'oferta de les diferents energies primàries, les conclusions a què porten les previsions productores del sector de l'energia elèctrica són:

— El carbó incrementarà la seva participació fins a un màxim del 26,4 % el 1980, i baixarà després gairebé fins a un 16 % a la fi del període.

7. J. ALVAREZ VARA: «El Plan Energético Nacional», *Información Comercial Española*, número 501, maig 1975, pp. 33-48.

— La producció hidroelèctrica augmentarà el seu valor absolut fins al 15'5 %, el 1985.

— Hom preveu una gran disminució en la participació dels hidrocarburs, ja que del 40,2 % del 1975 passarà al 7,1 % el 1985.

Pel que toca a l'energia nuclear productora d'electricitat, hom pressuposa que tindrà un creixement regular fins a arribar a participar al total en un 60 % el darrer any del període considerat. A part aquest any, i fent excepció de les «províncies» no peninsulars, tots els augments d'energia seran coberts amb centrals nuclears.

El Pla Energètic considera que si no es porta a terme el programa nuclear caldrà produir energia addicional basada en el fuel-oil, el qual en part es reduiria en el cas que, com a contrapartida, fossin desenvolupats al màxim els recursos de carbó o els hidràulics. Però en ambdós casos, el fuel requerit per a generar l'energia elèctrica necessària per al 1985 seria de l'ordre de 38 i 30 milions de tm, respectivament, la qual cosa representa, en divises de valor 1975, la xifra de 2.600 i 2.100 milions de dòlars, respectivament; mentre que si es porta a terme el programa nuclear, el valor en divises del cost en primeres matèries nuclears serà d'uns 300 milions de dòlars. D'altra banda, les centrals termoelectriques absorbiran gairebé tota la producció de carbons tèrmics i continuarà havent-hi

---

#### EVOLUCIÓ PREVISTA DE L'ESTRUCTURA DE LA PRODUCCIÓ ELÈCTRICA

---

	1960	1970	1975	1980	1985
Carbó	12,80	23,10	18,40	26,40	15,90
Centrals hidràuliques	82,80	47,90	34,50	25,70	19,90
Comb. líquid i gas	4,40	27,40	40,20	17,10	7,10
Energia nuclear	—	1,60	6,90	30,80	57,10
<b>TOTAL</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

FONT: P.E.N.

---

un mercat de menys de 2 milions de tec anuals pel que fa al sector domèstic i d'altres sectors industrials. Per tant, la demanda restant haurà d'ésser coberta pel petroli i el gas natural, aquest darrer substituint en part el petroli a fi de diversificar al màxim el proveïment energètic.

Com a conseqüència dels estudis fets, hom va arribar a una estructura òptima del proveïment energètic de la manera següent:

	1960	1970	1973	1980	1985
Carbó	46,6	21,9	17,1	17,1	13,7
Centrals hidràuliques	24,6	15,5	12,0	9,1	8,2
Petroli	28,8	61,8	66,9	55,8	43,8
Gas natural	—	0,3	1,4	7,1	10,9
Energia nuclear	—	0,5	2,6	10,9	23,4
<b>TOTAL</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

FONT: P.E.N.

Per arribar a aquesta estructura i evitar al màxim la dependència de l'exterior quant a forniment de primeres matèries, el Pla considera oportú de fixar els objectius següents:

1. Limitar les taxes de creixement del consum d'energia, fent-la servir més racionalment.

2. Augmentar la producció del carbó espanyol a 20 milions de tec, el 1980.

3. Augmentar l'energia hidroelèctrica a una mitjana de 45.000 milions de kWh l'any 1985.

4. Substituir els productes petrolers en aquelles utilitzacions on, tant tècnicament com econòmicament, sigui viable, i donar a l'Estat espanyol la capacitat de refinament necessària per a satisfer les comandes interiors.

5. Crear la infraestructura que permeti d'incrementar el consum de gas natural fins a 10 milions de tec, el 1980, i a 21 milions, el 1985.

6. Augmentar la potència elèctrica nuclear fins a arribar a 24.000 MW, el 1985, per tal que cobreixi el 60 % de les necessitats elèctriques d'aquell any; i acompanyant-ho de la garantia en el forniment nuclear en totes les seves fases; analitzar la producció espanyola d'urani i, alhora, participar en explotacions exteriors que permetin de cobrir una part de les necessitats d'Espanya.

7. Potenciar les centrals tèrmiques de carbó abans del 1980.

8. Estimular progressivament el consum d'electricitat com més es vagi desenvolupant l'energia nuclear. La participació del consum d'energia primària en la generació d'electricitat passaria del 59 %, el 1975, al 41 %, el 1985.

9. Reduir la participació de les energies importades a menys del 50 %, el 1985, venint del 70 % del 1973.

Si es compleixen les previsions del Pla, el percentatge de potència electronuclear instal·lada a Espanya el 1985 pot ésser del 36,7 %, superior al 35,2 % instal·lat a la CEE i al 31,6 % dels EUA.

Pel que fa a les inversions totals que cal dur a terme per al

sector energètic, en el període d'aplicació del Pla, hom les calcula en 1.750.000 milions de pessetes del 1974. Aquesta inversió és 2,35 vegades superior a l'immobilitzat brut que tenia el sector en el moment que fou elaborat el Pla. Del total a invertir, la part corresponent al sector elèctric representa un 82,7 % i, dins les inversions elèctriques, les de les centrals nuclears s'emporten el 44,5 %.

### REVISIÓ DEL PLA ENERGÈTIC

Les previsions del pla aprovat a l'inici del 1975 han estat en període de revisió, a causa bàsicament del fet que les taxes de creixement anual del PNB, que hom pressuposava del 5 o el 6 %, i les previsions de l'augment de la demanda d'energia estimada, resultaren durant els anys 1975 i 1976 molt inferiors a les que, optimistament, foren calculades.

Les previsions de la demanda han d'ésser molt concretes, ja que tant els errors per defecte com per excés poden ocasionar una assignació diferent dels recursos. Si per un cantó les previsions establertes resulten massa altes, es pot produir, els anys a venir, un excés d'inversions que facin que l'oferta d'energia estigui molt per damunt de la demanda; i, per un altre cantó, si no es compleixen les previsions del Pla, pot passar que es recuperi ràpidament el nivell de demanda, amb la qual cosa resultaria perillós de no tenir la infraestructura adequada en el sector de l'energia que contrarestés aquella demanda amb una oferta adient.

Amb tot, cal reconsiderar la demanda de l'energia futura i, especialment, la de l'electricitat, ja que és en aquest subsector on hi hauria d'haver la majoria de les inversions previstes al Plan Energético Nacional. És per això que la millor manera de contrarestar una elevació possible en el nivell de la demanda d'energia elèctrica seria l'ampliació de les centrals tèrmiques convencionals, d'un cost per quilovat instal·lat molt inferior a les centrals nuclears i d'un període de construcció més curt, tot i que el cost del combustible als preus actuals sigui més alt.

De tota manera, però, no sembla aconsellable, davant la limitació actual del capital a Espanya, de llançar-se a un programa energètic previst per a una demanda d'energia i unes possibilitats de finançament, avui per avui, molt dubtoses.

Actualment, a petició de la Subdirecció de Planificació Energètica del Ministeri d'Indústria, un grup tècnic d'Unesa ha elaborat noves projeccions de la demanda per als anys vinents.



Així, doncs, ens trobem que encara avui dia en el pla oficial han estat ignorades les noves possibilitats de remodelar l'estructura energètica basant-se en la utilització de noves formes d'energia i també de la promoció de formes efectives d'estalvi d'energia, que és potser, a hores d'ara, l'aspecte d'alternativa energètica en què més interès han posat els països industrialment desenvolupats.

Malgrat tot, cal reconèixer que, en l'actualitat i àdhuc en un termini mitjà, la utilització de fonts energètiques no convencionals poc pes específic pot tenir en l'estructura global de l'oferta d'energia; per exemple, s'ha calculat, per part de l'OCDE, que les fonts energètiques alternatives a les tradicionals no podran produir, el 1985, més enllà de 70 milions de tep, la qual cosa significa una producció similar a la que proporcionarà enguany el petroli del Mar del Nord. Tot amb tot, hom no pot oblidar tampoc que el mateix organisme reclama l'atenció sobre el fet que la situació energètica a escala mundial pot ésser angoixant el 1990 i que cal intensificar la utilització de totes les alternatives possibles; també és cert que el progressiu increment de preus de les fonts energètiques tradicionals i l'esmentat problema de balança de pagaments estan fent rendibles i alhora interessants una munió de projectes que si més no als no entesos, com jo mateix, podien semblar de pura ciència ficció tan sols dos anys endarrera. Val a dir que, també des d'un angle tecnològic, la recerca, esperonada per les dites necessitats i possibilitats, ha efectuat notables progressos, perfeccionant sistemes que, cada vegada més, en faciliten la producció en acostar-se a preus que resultarien competitius amb els de les fonts energètiques convencionals.

El que ací es planteja, des d'una òptica nostra, és si cal esperar a la importació pura i simple d'aquestes formes d'energia o bé, com històricament hem vist que passava, podem actuar també com a capdavanters en una nova etapa, que cal preveure molt més difícil després del creixement que han experimentat les societats industrials, i Catalunya n'és una, els darrers quinze o vint anys.

En aquest aspecte, cal remarcar diverses línies d'aproximació als nous plantejaments que presenten el desenvolupament de les energies no convencionals, una sostinguda en l'esfera governamental, d'altres per les grans companyies i d'altres, finalment, per empreses, àdhuc petites empreses del sector privat, sense tenir la dimensió de multinacionals.

En el camp de l'energia solar, una de les principals, o potser la principal, font alternativa a les formes d'energia convencionals, podem posar exemples de tots els tipus abans esmentats. A la

R. F. d'Alemanya, els darrers cinc anys, el govern ha encarregat estudis a diverses empreses per a desenvolupar vint grans projectes en el camp de la tècnica dels generadors solars; al mateix país, el Ministeri Federal per a la Recerca i el Desenvolupament promocio-na, d'una manera paral·lela i relacionada, un «Estudi experimental per al desenvolupament de generadors solars terrestres». El govern francès, que ha estat promocionant des de fa molts anys la utilit-zació de fonts alternatives d'energia, ha posat recentment en marxa una gran planta basada en l'energia solar a la Cerdanya, concreta-ment a la població d'Odelló. Aquesta planta de tipus experimental serveix per a trobar i provar materials, tècniques i productes en diversos camps de l'energia solar i les seves aplicacions, cosa que explica que, en forma d'ofereints i de clients, ja participin en el projecte grans empreses industrials franceses, sovint de propietat estatal, com la Régie Renault o la Compagnie Française des Pétroles, però també de privades com Rhône-Poulenc, que es dedica a la recerca de fluids orgànics. Als Estats Units s'estan desenvolupant recerques sostingudes pel finançament i la col·laboració de l'agència federal, ERDA (Agència federal per a la Recerca i el Desenvolupa-ment Energètics), amb plans de finançament de més de 800 milions de dòlars per a la investigació de noves cèl·lules solars. És conegut el projecte de l'empresa Boeing per a la posada en òrbita d'esta-cions que permetin l'aprofitament de l'energia solar, projecte que sota el nom de POWERSAT, rebé a mitjan novembre passat el suport de la NASA. En altres nivells, investiguen en el mateix camp empreses nord-americanes com la Gulf, la General Electric o la Dow-Chemical.

Però no tots els projectes semblen exclusius de les companyies internacionals sostingudes pels governs de llurs països d'origen. En aquest sentit, països petits com Suïssa i en el pla exclusivament d'empresa privada, semblen tenir experiències importants i rendi-bles des del punt de vista econòmic i tecnològic.

Seguint un estudi de J. ROHNER, basat en estudis fets per l'as-sociació suïssa per a l'energia solar i per les Cambres de Comerç de la Confederació Helvètica, es mostra que en aquest país a la fi del 1976 hi havia quatre empreses, tres de mitjana dimensió i una de gran, comercialitzadores de sistemes de captació i utilització d'ener-gia solar. D'aquestes, algunes com Solar System Schares, són agru-pacions d'empreses ja existents i implantades en altres camps; d'al-tres, com S. A. Bersier, de Bulle, compten i exploten sistemes propis que fan que s'apliquin a projectes concrets com l'Hospital Suís Château-d'Oe. Però també grans empreses de la indústria suïssa

—caracteritzada pel seu avanç tecnològic i pel desenvolupament d'indústries multinacionals— estan dedicant una atenció seriosa a desenvolupaments tècnics aplicats a l'energia solar, com és ara Alusuisse.

D'aquests exemples, sens dubte parcials i sobre els quals els experts ací assistents poden dir moltes coses —a favor i en contra—, jo no voldria discutir-ne els detalls, ans només treure'n algunes conseqüències vàlides per a la nostra realitat.

En primer lloc, tots mostren un interès indubtable per part de les societats industrials més desenvolupades, des del govern i des d'empreses públiques i empreses privades, d'anar desenvolupant esquemes i tècniques que un dia arribin a ésser competitius, des d'un punt de vista tècnic i econòmic, amb les fonts d'energia tradicionals; i això per dos motius: un d'independència tecnològica i econòmica pel que fa a l'Estat, i un altre perquè el fet d'estar situat al capdavant de les energies alternatives servirà per a controlar nous mercats i fornir equipaments i tècniques a les indústries més rendibles, les indústries de tecnologia avançada.

Malauradament, el clima existent no és encara ací prou encoratjador. El Plan Energético Nacional, encara no revisat, mostra un excessiu interès en la substitució de l'energia procedent d'hidrocarburs per l'energia nuclear, opció que cal recordar que resulta més difícil de concretar en la realitat, com ho demostra el darrer estudi esmentat de l'OCDE. Tampoc el sector empresarial no ens ofereix una visió massa optimista. No coneixem en el camp de l'empresa pública amb recursos considerables, com és ara CAMPSA o empreses de l'INI, l'existència de projectes d'envergadura en aquest terreny. Les empreses productores d'energia en les formes diguem-ne tradicionals diversifiquen llurs projectes vers el futur en gas natural i centrals nuclears, fins al punt que una empresa productora d'energia elèctrica a Catalunya es vanava, no fa pas gaire temps, d'ésser l'empresa de l'àmbit europeu que major proporció d'energia elèctrica d'origen nuclear generaria a no gaire llarg termini, tot això (com és usual) amb equipament, tecnologia i proveïment nord-americà.

La centralització i els defectes de la institucionalització de la recerca i del desenvolupament, juntament amb l'esmentada desatenció dels organismes públics, no ens permeten de descobrir en aquest aspecte (el d'entitats de recerca) línies de desenvolupament interessants per a les nostres necessitats.

Permeteu-me, per a finalitzar, d'assenyalar que, des del meu punt de vista, és possible una aproximació adequada en l'anàlisi de

les fonts d'energia no tradicionals, la qual cosa permetria el desenvolupament i la realització de tècniques que encara són al nostre abast, pel fet que són prou noves a escala internacional. Encara som a temps d'elaborar, sense marginar les experiències i la col·laboració exterior, un pla de recerca i desenvolupament que apliqui i coordini diversos esforços i recursos en els àmbits esmentats —govern, institucions de recerca, empresa pública, sector privat— i, sobretot, que permeti de desenvolupar inquietuds, projectes i potencialitats dels quals certament aquest col·loqui avui ens mostra d'una forma palpable i positiva l'existència i les capacitats.

**PROGRAMAS DEL CENTRO DE ESTUDIOS  
DE LA ENERGÍA DEL MINISTERIO  
DE INDUSTRIA EN ENERGÍA SOLAR**

por

**A. MUÑOZ TORRALBO**

**Jefe de la Sección de Investigación del Centro de Estudios  
de la Energía, Ministerio de Industria, Madrid.**

## RESUMEN

Se presentarán las actividades en curso del Centro de Estudios de la Energía Solar. También serán presentados los programas cooperativos con la Agencia Internacional, así como los programas de difusión de la tecnología solar.

## RESUM

Hom presentarà les activitats en curs del Centro de Estudios de la Energía Solar. Els programes cooperatius amb l'Agència Internacional també seran presentats, i així mateix els programes propis, les activitats d'aplicació i els programes de difusió de la tecnologia solar.

## SUMMARY

The programs of the Centro de Estudios de la Energia in the field of solar energy utilization are presented.

The cooperative programs with the International Agency of Energy as well as our own related to the diffusion of solar technologies and their main applications will be also presented.

La gravedad de la crisis energética exige la consideración de un cierto número de medidas que alivien las balanzas de pagos de los países no bien dotados de combustibles fósiles.

Una medida única, global y definitiva, no existe, y la solución por lo menos momentánea a este problema ha de basarse en dos pilares fundamentales: la conservación y uso racional de las fuentes de energía existentes o «clásicas» y el empleo de las «nuevas» fuentes de energía (que paradójicamente son las más antiguas).

La conservación y uso racional de la energía es la única medida que puede dar resultados de ahorro energético de forma inmediata. A su promoción y difusión ha dedicado el Centro de Estudios de la Energía (CEE) su primer esfuerzo. Con respecto a las nuevas fuentes, si bien la energía geotérmica de alta entalpía y la energía eólica están siendo consideradas con interés y ocupan una cierta parte de la actividad de investigación del Centro, es la energía solar la que ocupa en la actualidad el lugar preponderante y a su promoción y difusión se dedica el mayor esfuerzo.

## DIFUSIÓN

El CEE ha llegado a la conclusión de que la energía solar, en cierto número de aplicaciones, puede contribuir en un próximo futuro a reducir la importación de combustibles fósiles. Sin embargo, si bien España es un mercado potencial para el material solar de la mayor importancia, los posibles usuarios y los industriales e instaladores españoles, que en un futuro próximo deberán fabricar e instalar los equipos solares, no están familiarizados con las posibilidades de aplicación y las bases de diseño o de configuración de sistemas, lo cual puede acarrear un retraso en el empleo de esta técnica y la aparición de una nueva colonización tecnológica que desgraciadamente comienza a hacerse notar.

Con la finalidad de conseguir este conocimiento generalizado se ha configurado una campaña de difusión de las realidades de la energía solar a distintos niveles.

La Tabla I indica cuáles son las acciones a realizar, que se comentan brevemente.

TABLA I	
PROGRAMA DE DIFUSIÓN	
DIFUSIÓN	— Boletín mensual de información sobre Energía Solar (solicitar a Centro de Estudios de la Energía, Agustín de Foxá, 29. Madrid-16)
	— Campaña de $\left\{ \begin{array}{l} \text{Prensa} \\ \text{Radio} \\ \text{T.V.} \end{array} \right.$
	— Manuales técnicos y monografías
	— Cursos sobre tecnología solar (Sevilla, Madrid, Palma, Barcelona, Valencia)
	— Difusión de información del Grupo de Energía Solar del Committee for the Challenges of Modern Society, de la OTAN (CCMS)

El Boletín mensual de información sobre Energía Solar pretende ser un vehículo de expresión de las actividades nacionales en el campo. El CEE no tiene con este boletín ningún afán de protagonismo y únicamente ofrece un marco para presentación de líneas de trabajo y difusión de información. El boletín se envía de forma gratuita a suscriptores calificados.

La campaña de información del gran público, la cual se lleva a cabo empleando los medios de comunicación social, puede en el plazo de un año crear una conciencia e información en el gran público, que es necesaria y previa para el comienzo de la aplicación efectiva de la energía solar en España.

Las monografías y manuales técnicos pueden ser de ayuda para los fabricantes e instaladores.

Los cursos programados servirán para familiarizar a técnicos e ingenieros con la tecnología solar y formar núcleos locales de expertos.

Finalmente y por medio del Boletín de Información sobre Energía Solar se difundirán los informes que, sobre sistemas solares funcionales, envía el CCMS de la OTAN. Estos informes realizados en formato standard están disponibles en nuestra oficina para consulta y reproducción.



## INVESTIGACIÓN

El CEE promueve la investigación en dirección a la consecución de sistemas que a corto plazo permitan un ahorro de combustibles fósiles de importación. Aún considerando que la investigación fundamental es del mayor interés para un país, debido a su vocación industrial, el CEE dirige sus esfuerzos a la promoción de tecnología que puede ser aprovechada por la industria a plazo corto o medio.

En este contexto, se ha estructurado la investigación este primer año de actuación en las líneas fundamentales que aparecen esquematizadas en la Tabla II.

TABLA II		
PROGRAMAS DE INVESTIGACIÓN		
INVESTIGACIÓN	Térmicas directas	— Programas de la Agencia Internacional de la Energía
		— Análisis de Aplicaciones Industriales
		— Demostraciones en Cooperación
		— Cooperación hispano-alemana
	Alta temperatura	— Programas de la Agencia Internacional de la Energía
		— Programa del M. I.

Con respecto a los programas de la Agencia Internacional de la Energía de Aplicaciones Térmicas directas de la Energía Solar, existen cinco líneas de investigación en las cuales se participa con diversos grados de intensidad.

La Tabla III indica estas líneas de investigación con los nombres originales de los programas.

Los tres primeros programas se llevan a cabo en el INTA y permitirán disponer a corto plazo tanto de métodos fiables para cálculo de sistemas solares como de un banco de ensayos en el cual los diversos colectores que fabrique la industria podrán ser ensayados.

Los programas 4.º y 5.º tienden a hacer disponible la información meteorológica imprescindible para el cálculo de los sistemas

solares y que en la mayoría de los casos es difusa y poco adecuada a la utilización que se persigue. Este programa se ejecuta por parte del Servicio Meteorológico Nacional.

---

TABLA III

---

TÉRMICAS DIRECTAS	
PROGRAMAS DE LA A.I.E.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.º Investigation of performance of Solar Heating and Cooling Systems.</li> <li>2.º Coordination of research and development of Solar Heating and Cooling Components.</li> <li>3.º Performance testing of Solar Collectors.</li> <li>4.º Development of an Insolation (Solar Radiation) hand Book and Instrumentation Package.</li> <li>5.º Use of existing Meteorological information for Solar Energy Applications.</li> </ol>

---

Además de los programas de la agencia, el CEE lleva a cabo en la actualidad un análisis de aplicaciones de la energía solar en la industria, que indicará en qué actividades y procesos y para qué zonas geográficas resulta de interés económico la aplicación de la energía solar. Los resultados de este estudio serán difundidos y servirán de base para acciones posteriores.

Por otra parte el Centro planea la ejecución de un cierto número de demostraciones funcionales de aplicación de la energía solar en colaboración con empresas nacionales, empresas privadas y organismos. En la actualidad se estudian la implantación de sistemas de agua caliente sanitaria solar en un hotel, una casa solar de cuatro alturas y alguna aplicación industrial.

Con respecto a los programas de alta temperatura ligados fundamentalmente a la generación de energía eléctrica, se participa muy activamente en dos programas de la Agencia; ambos tienen como fin la realización de plantas piloto de 500 kW, empleando distintos conceptos y que muy probablemente serán localizadas en Almería.

Asimismo el Centro ha iniciado un preestudio de una Central Solar totalmente nacional cuyos resultados se obtendrán muy en breve.

Este estudio servirá como base para la realización de una planta de 1 MW, la cual será patrocinada por el Ministerio de Industria y cuya localización está en estudio.

**THE PROSPECTS FOR THE UNCONVENTIONAL  
ENERGY SOURCES IN BRITAIN WITH PARTICULAR  
REFERENCE TO SOLAR ENERGY**

by

**C. M. BUCKLEY**

**Fellow, Science Policy Research Unit, University of Sussex, Brighton  
United Kingdom**

## SUMMARY

While it is technically feasible for Britain to achieve a small but significant contribution from unconventional energy sources by the year 2000, several factors may well militate against this. One of them is Britain's favourable indigenous energy situation.

## RESUM

Si és tècnicament factible a la Gran Bretanya d'aconseguir una contribució energètica petita, però significativa, amb fonts d'energia no convencional cap a l'any 2000, hi ha un bon nombre de factors que se li poden oposar ben bé. És molt i molt important la situació favorable d'energia natural de la Gran Bretanya.

The rise in oil prices since October 1973 has led to much controversy over the prospects for the new energy sources in Britain. Their advocates are usually outside the traditional fuel supply industries and government, and have tended to make optimistic claims on future contributions to the UK's energy balance. They point out that the level of R & D expenditure on such sources is a minute proportion of total energy R & D funding, and that higher resource commitments are necessary to ensure that the technologies are adequately proven for use when fossil fuels become scarce and expensive. On the other side *the fuel supply industries argue* that the capital costs of the new technologies are high, and that they are unsuitable for widespread application. It is very difficult to decide between the various claims and counterclaims, because there are very few real facts known about the economics of these new technologies, and in some cases there are doubts whether they will work efficiently on a larger scale.

A number of factors combine to make the evaluation of the new technologies difficult. At current levels of fuel prices, many of them are uneconomic. Their economic viability in the future, together with the decision on whether to allocate significant quantities of R & D funds to their development, depends crucially on long-term movements in fuel prices in the longer-term. It is necessary to depend on judgements on these longer term fuel prices.

The technical development of these sources in the future is also far from certain, and so any evaluation tends to be speculative. It is difficult to assess the effect that larger unit production (economies of scale effect) will have on costs, for example, and to what extent lower unit costs will result from the learning curve effect of long production runs of standardised equipments.

The choice of rate at which to discount the future flows of costs and benefits arising from the project is also crucial, particularly for projects which have high capital costs and long lead times. In the public sector in Britain a test discount rate of 10 % is used to evaluate all capital investment projects. This is to a large extent an arbitrary rate, and a lower rate (which might reflect more accu-

rately the Social Time Preference) would immediately improve the prospects for long term, highly capital intensive projects, like the construction of a tidal barrage (see below).

There is a tendency, too, when evaluating the unconventional energy sources to compare them with existing alternatives, and nuclear power (as an «expandable» source, not subject to depletion) is frequently chosen as the reference case in situations where the output of the non-conventional alternatives could be in the form of electricity. This is not a fair comparison as the current status of nuclear power is the result of major R & D expenditures in the past, which has not been the case with the newer technologies. It is important to decide whether any such comparisons are meaningful.

A number of difficulties arise when commercial introduction of such technologies is considered. The newer technologies often have no institutions responsible for promoting them in the fuel supply sector. The fuel industries themselves have ingrained technical and management philosophies which tend to act as forces to preserve the status quo. They are also, in some cases in the public sector, ruled by statutory obligations determined in the early post-war period (a very different energy supply situation) which are not necessarily suitable in the changing circumstances, and which can act against the introduction of non-conventional sources.<sup>1</sup>

To the extent that the prices prevailing in the energy market do not reflect the future scarcity values of the fuels then there would be a tendency for sub-optimal investment to take place in the non-conventional energy sources.<sup>2</sup> This is particularly applicable to those technologies, like solar water heating and windpower which depend for their introduction on individual decisions by the consumer.

A number of the new technologies will require back-up supplies from the gas and electricity industries reflecting the variability in supply — from season to season, day to day, and day with night. In the direct applications of solar power, in particular, the peak incidence of radiation does not coincide with peak consumption demands, and only limited progress has so far been made on long-term heat and energy storage. Although their utilisation would lead to

1. In Britain the electricity supply industry is statutorily obliged to produce electricity at minimum cost which may mitigate against schemes where substantial joint benefits result.

2. Gas prices have been low relative to competing fuels since 1967, and there has been much debate on whether prices should be raised to reflect long-run marginal costs.

fossil fuel savings they could also lead to greater margins of spare capacity in back-up fuel industries, with the consequently higher capital costs reflected in higher prices.

#### BRITAIN'S CURRENT ENERGY SITUATION

Before considering the more detailed prospects for the individual sources in Britain's future energy balance it is important to consider the current energy situation in Britain — the context in which the non-conventional energy sources will be competing for scarce R & D funds, and attempting to demonstrate their commercial viability.

TABLE I

UK's INLAND CONSUMPTION OF PRIMARY FUELS (mtce)

	1960	1970	1973	1975
Coal	196.7	154.4	131.3	118.1
Oil	65.5	145.6	159.4	134.4
Natural Gas	0.1	17.6	43.5	54.5
Nuclear/Hydro	2.6	12.0	11.9	12.7
<b>TOTAL</b>	<b>264.9</b>	<b>329.6</b>	<b>346.1</b>	<b>319.7</b>

SOURCE: Department of Energy, Digest of Energy Statistics.

In 1973, as Table I shows the UK's primary energy requirements were met 46 % from oil, 38 % from coal, 13 % from natural gas, and 3 % from nuclear and hydro-electric power. This was significantly different from the situation prevailing in 1960, and reflected the increasing penetration of cheap Middle Eastern and African crudes in the 1960's, the supplies of natural gas landed from the UK sector of the North Sea from 1967 onwards, and the growth of a small but significant nuclear power component. In 1969 the first oil discoveries were made in the UK sector of the North Sea, and these were due on-stream in the mid-1970's promising self-sufficiency by 1980. In this situation Britain was able to look forward to a relatively diversified primary fuel supply with little net reliance on energy imports.

The higher oil prices improved the prospects for North Sea oil

developments and for the other fuel industries, in particular coal which had a price advantage. There was considerable uncertainty, however, on price elasticities, and the scope for inter-fuel substitution.

In the period 1974-6 a number of measures were taken by the British government to ensure a diversified and secure energy supply base in the future.<sup>3</sup> In July 1974, a £1400 million investment programme was announced to increase production in the coal industry from about 120 million tons in 1975 to 130-150 million tons in 1985; a substantial exploration programme was also initiated. Also in 1974, a contract was signed to purchase natural gas supplies from the Norwegian sector of the Frigg field (which lies on the boundary line between Norway and Britain) in addition to supplies from the UK sector. Together with other contracts signed for gas supplies from the British sector the supply in 1980 will be double that in 1973, and will represent 23-25 % of UK primary energy consumption.

The development of the nuclear power component had received a set-back with technical and administrative difficulties on the Advanced Gas Cooled Reactors initially ordered in 1965, and due to enter service from 1970. Lower than anticipated growth rates in the 1960's, due in part, to the «gas effect» (the competition from cheap natural gas in particular markets) meant that despite late commissioning of the AGR's, the generating authorities enjoyed a substantial margin on spare capacity (exacerbated by a run of mild winters). In 1974 the government agreed a programme of 4000 MW of Steam Generating Heavy Water Reactors (SGHWR's). There are now considerable doubts whether these will be built as the result of surplus capacity in the electrical supply industry and the high costs involved in building such a small programme.

In addition to these measures priority was attached to the rapid development of North Sea oil resources and an energy conservation programme was introduced. Taking account of all these factors leads to the conclusion that Britain might well be in a energy «glut» situation in the 1980's. This might lead to complacency towards the need to secure longer term energy supplies and to attitudes on the development of the unconventional sources, and present a disincentive to the conservation of energy (though this obviously would depend on the prevailing level of energy prices).

3. These developments are covered in greater depth in J. H. CHESSHIRE, A. J. SURREY *et al.*, «Energy Policy in Britain - A Case Study of Adaptation and Change in a Policy System», in *The Energy Syndrome: Comparing National Responses to the Energy Crisis*, ed. L. N. Lindberg, Lexington Books, to be published, April 1977.



## ENERGY R &amp; D IN BRITAIN

In Britain before 1973 the emphasis in R & D work on energy was clearly oriented to nuclear power, with a very small level of expenditure on the non-conventional sources as Table II shows. For the UK, in 1973 only 4.3 % of public energy R & D funding was spent on the development of new primary sources of energy. Of this majority went on fusion power; only £376,000 was spent on R & D on all applications of solar power. 68 % of total public funding of energy R & D was on nuclear fission power (a total of £55 m.). Over half of this was being spent on the development of the Fast Breeder Reactor which since 1965 had accounted for a cumulative expenditure of £218 m., 40 % of total civil nuclear R & D over this period. This experience broadly reflects the R & D priorities of a number of other developed countries as demonstrated by their relative levels of R & D spending, and this is also shown in Table II.

Because of the very long lead times associated in general with R & D on energy technologies, the need for a strategy to guide R & D was recognised after the oil «crisis» and this led to the publication, in June 1976, of a discussion document entitled «Energy R & D in the United Kingdom» which was released through the Advisory Council on Research and Development for Fuel and Power.<sup>4</sup> ACORD is responsible for reviewing the research programmes of the nationalised fuel and power industries. It is chaired by the Chief Scientist at the Department of Energy (who is also incidentally Deputy Chairman of the United Kingdom Atomic Energy Authority) and it advises the Secretary of State for Energy.

The ACORD document was based on the premise that the downturn of indigenous oil and gas production —perhaps in the last decade of this century— could lead to the creation of an energy gap unless technologies had been developed by then to fill it. A number of scenarios on energy requirements were constructed, and all but one (the «limit-on-nuclear» view of the future is the exception) predicted a major expansion of nuclear power as the only way to fill the potential «energy gap». The major priorities for research emerging from the document were for nuclear power, and the most controversial area in Britain today has been the proposed development of the Fast Breeder Reactor.<sup>5</sup>

4. «Energy R&D in the United Kingdom. A discussion Document», ACORD, June 1976.

5. See, for example, J. SURREY, J. CHESSHIRE and N. DOMBEY, «The hazards of rushing to build a nuclear fast reactor», *The Times*, 28th June, 1976.

TABLE II

PUBLIC FUNDING OF ENERGY R & D IN 1973: THE UK COMPARED WITH USA, FR GERMANY, FRANCE AND THE NETHERLANDS  
(MILLION UNITS OF ACCOUNT,<sup>1</sup> PERCENTAGES IN BRACKETS)

	UK	USA	FR Germany	France	The Netherlands
Fast Breeders	73.5 (39.2)	264.5 (38.6)	72.2 (29.5)	75.7 (29.7)	20.0 (55.2)
High Temperature Reactor	10.5 (5.6)	7.4	71.2 (29.1)	13.2 (5.2)	1.1
Proven Reactors	21.6 (11.5)	30.1 (4.4)	8.7 (3.6)	39.6 (15.5)	0.3
Exploration and extraction of uranium and thorium	0.2	2.9	?	0	?
Other nuclear R & D	21.2 (11.3)	112.6 (16.4)	48.9 (20.0)	31.5 (12.3)	8.4 (23.2)
Total nuclear fission power	127.0 (67.7)	417.5 (60.9)	201.0 (82.0)	160.0 (62.7)	29.8 (82.3)
Developing indigenous fossil fuels	10.8 (5.8)	28.1	5.8	34.2 (13.4)	0.4
Coal Gasification	0	37.8 (5.5)	4.5	0	0.1
Coal Liquefaction	0.5	11.2	?	0.1	0.1
Hydrogen Fuel	0	?	?	1.0	0.1
Process Uses of Nuclear Energy	0	?	11.8 (4.8)	0.2	?
Other	0.6	?	0.6	?	?
Total: Substitute Fuels	1.1	49.0	16.9	1.3	0.3
Fusion	7.2 (3.8)	76.3 (11.1)	18.3 (7.5)	9.8	2.1
Geothermal	0	4.5	0.1	0.6	?
Solar	0.8	4.1	0.3	0.9	0.3
Other	0	?	?	0.1	0.1
Total: New primary energy sources	8.0	84.9	18.7	11.4	2.5
Transport and storage of energy	10.0 (5.3)	?	2.1	20.1	0.9
Energy utilisation	24.1 (12.8)	32.8 (4.8)	0.3	19.7	1.3
Other <sup>2</sup>	6.6 (3.5)	73.3 (10.7)	0.2	8.6	1.0
GRAND TOTAL	187.6 (100.0)	685.6 (100.0)	245.0 (100.0)	255.3 (100.0)	36.2 (100.0)

1. 1 European Unit of Account = £0.47 = \$0.98 = DM3.215 = F Fr5.88 = Guilders 3.355.

2. Includes R&D on environmental protection & energy systems studies.

Sources: Inventory of R&D on Energy in the Public Sector, EEC (XII/648/74), 1974; US data derived from Annex 1; J. SURREY and W. B. WALKER, «Energy R&D - a UK perspective», *Energy Policy*, June 1975.

The alternative energy technologies were also considered in this R & D overview, and its conclusions emphasised the importance of undertaking R & D to establish their ultimate potential and economic practicability. But a view commonly expressed about the document is that it is nuclear orientated. It pays lip service to the principle of conservation, and the development of alternative energy sources, but one doubts whether these will be major priority areas. The danger that a major resource commitment to nuclear power will in fact prevent necessary R & D work on utilisation technologies and the less conventional energy sources has been the cause for much concern.

In connection with the ACORD document, the Energy Technology Support Unit<sup>6</sup> has made estimates of the potential contribution of the unconventional energy sources to Britain's longer-term energy requirements. ETSU has estimated that their contribution could reach 45 million tons of coal equivalent in the year 2000 (or 13 % of *current* energy consumption) given «a successful conclusion to a vigorous R & D programme on each of the sources, resulting in approximate economic parity with the more conventional energy sources». The contributions anticipated from the individual sources, together with ETSU's assessment of the ultimate potential for growth beyond 2000 are given in Table III.<sup>7</sup>

The uncertainties, both technical and economic, associated with forecasts of this nature, are substantial. There is no guarantee that adequate R & D support will be forthcoming, or that all technologies will be supported. Whether or not economic parity with other

TABLE III

Source	Form of use	Approx. Annual mtce	Ultimate Potential for Growth beyond 2000
Solar (1) Solar heating	heat	5	large
(2) Fuels from plants	fluid fuel	3	uncertain
Geothermal	heat	4	modest
Wind	electricity	6 *	small
Tides	electricity	3-10 *	small
Waves	electricity	15 *	very large

\* Assuming about 30 % overall efficiency of electricity production and distribution.

6. ETSU was formed in 1975 to advise the Secretary of State for Energy on the new energy technologies.

7. W. MARSHALL (Chief Scientist to the Department of Energy), Keynote address to the Symposium on Renewable Sources of Energy, at the Royal Society of Arts, London, 16th June 1976. The proceedings are available from the Royal Society.

energy sources could be achieved depends crucially on the prices and prospects of the other fuels, and the progress of R & D programmes on other technologies like the Fast Breeder Reactor. The table probably serves no other purpose than demonstrating today's official/scientific perceptions of the relative potential of the newer energy sources, and very little significance should be attached to the numbers themselves.

This paper is not the place to comment in detail on the content and approach of this attempt at evaluating an R & D strategy for the energy sector, although we have commented on it elsewhere.<sup>8</sup>

Final decisions still have to be made on many aspects of the UK's energy R & D programme. It will be important to identify those research areas where Britain should make a major individual contribution, with a view to export markets, as well as home demand. In other areas collaborative ventures, some with the EEC and IEA may be one way of ensuring British participation in new technologies at relatively low cost. In other cases the decision will be to maintain a watching brief on technical developments abroad, to permit sensible licensing agreements to be concluded once the technology is proven. But it is important to emphasise that the document, in its major priorities, represents the views of important and influential groups in the energy field, and that in comparison the advocates of the unconventional energy sources have considerably less access to resources and influence.

#### THE INDIVIDUAL UNCONVENTIONAL ENERGY SOURCES

The rest of the paper will briefly consider the unconventional energy sources which may have some potential in Britain —wave-power, tidal power, geothermal power, direct solar applications, and wind power.

##### *Wave-power*

The prospects for the utilisation of wave-power are regarded most favourably in the ACORD document. The most suitable area of British coastline identified is off the north-west coast of Scotland. It is anticipated that the wave generators would be situated

8. C. M. BUCKLEY and J. H. CHESSHIRE, «UK energy resources - some key issues», *Chemical Engineer*, September 1976.

several kilometres offshore. Using an extraction efficiency of 25 %, it is assumed that half the present UK requirements for electricity might be generated in a stretch of ocean extending about 1000 km., if the most favourable sites were used.<sup>9</sup> It is estimated that the average power density along the UK west coast is 80 kw/metre.<sup>10</sup>

Although subject to significant seasonal variation wave power has the advantage that the potential peak level of energy generation coincides with peak electricity demand in the winter months, and thus avoids the mismatch which is a disadvantage of the direct use of solar energy. The ideal site for the establishment of these wave generators is, however, far removed from major centres of demand, and substantial system expenditure would be necessary.

Two important British innovations to extract the energy from the waves are currently being investigated. The Salter «duck» consists of a rocking boom with a front surface that rises and falls with the water of an oncoming wave, but which does not disturb the water behind. Cockerell has developed a connected series of rafts which have piston-operated pumps at each joint, and which progressively extract the energy of a wave as it moves down the line.

Government support for further research has been given initially of £ 1 m. over two years. The prospects at this stage are very uncertain on technical feasibility, as well as costs. The scale of the equipment would be large, and there would be problems of anchoring it in open seas; much thought needs to be given to the means of transferring the energy produced to the shore (as electricity, for example, or hydrogen) and on to the final consumer. There are potential environmental impacts, too which need careful analysis.

### *Tidal power*

In the Severn estuary there is one of the most suitable tidal power sites in the world with a high tidal range, and the potential for output capacities of between 1000 MW(e) and 5000 MW(e).<sup>11</sup> Proposals for a two reservoir system, which would permit storage, and enable electricity supplies to be tailored to demand have been advanced. The barrage is seen as a means of complementing the preferably constant output mode of thermal generating plant.<sup>12</sup>

9. ACORD, *op cit.*

10. I. GLENDENNING and B. M. COUNT, «Wavepower», in Royal Society of Arts, *op. cit.*

11. ACORD, *op. cit.*

12. T. L. SHAW, «Tidal Power» in Royal Society of Arts, *op. cit.* Reprinted in the *Chemical Engineer*, September 1976.

Tidal schemes have been considered in the past, and more recently studies of the potential of hydro power have been undertaken by the Central Policy Review Staff and the Advisory Council on Research and Development for Fuel and Power. They concluded that the costs were unlikely to be competitive with nuclear power in the future. The capital costs of the venture are estimated variously from £1000 m.-£2500 m. (SHAW) to £4000 m. (ACORD), and tidal power is the prime example of a project which suffers from the use of an arbitrary 10 % test discount rate.

The government has not sanctioned the necessary expenditure to undertake a feasibility study, but further studies are being planned to examine some of the technical uncertainties surrounding a scheme of this nature (including the problems of barrage closure, and of environmental impacts).

### *Geothermal power*

A preliminary assessment of the prospects for geothermal energy in the United Kingdom has been undertaken by the Energy Technology Support Unit.<sup>13</sup> They concluded that the geological uncertainties associated with the size and quality of the geothermal heat that exists in Britain were large, and that the major priority was to undertake an extensive geological survey of promising geothermal areas.

The average heat flux in Britain seems to be close to the world average (0.06 Watts/square metre). A number of examples exist of warm springs, with a discharge temperature of about 50°C, but the major area of interest surrounds hot rock technology. Hot rocks, often granite, are at higher than normal temperatures because of the presence of local heat sources, but lack sufficient permeability to permit water circulation. Two areas, in Durham and Cornwall, appear promising, and it is suggested that deep holes be drilled into impermeable rock with a higher than average thermal gradient, and that water be pumped down one hole, and returned to the surface via another, after ensuring that adequate opportunity existed for heat transfer.

The economics of the proposals are uncertain as are the markets for final use (likely to be for local low-grade heat, rather than for electricity production).

13. J. D. GARNISH, «Geothermal Energy: the case for research in the United Kingdom», *Energy Paper*, No. 9, HMSO, 1976. See also W. BULLERWELL, «Geothermal Energy: Geophysical and Geological Aspects», Royal Society of Arts, *op. cit.*

### *Solar power*

The possible direct applications of solar power are numerous, and substantial research programmes are being undertaken throughout the world. The US expenditure on solar energy R & D in 1976 is estimated at £35 m., and expenditure on Japan's Project Sunshine in 1976 is estimated at £18 m.<sup>14</sup> In Britain in 1973 expenditure on solar research was £376,000, the government is in the middle of finalising a research programme for the next four years costing £1 m. per year.<sup>15</sup> There will also be a British contribution to EEC research in this area.

The annual solar input to the United Kingdom is about half of that in the United States, and Australia. A large component of the solar radiation is in the diffuse form (fig. 1) and there is substantial variation in solar radiation levels from season to season, from day to day, and from day to night (fig. 2). The North-South variation is particularly pronounced in the winter months. These factors mitigate against its widespread utilisation in applications which require regular direct solar radiation, but mean that there may be major potential applications in space and water heating.

The technology required for water-heating applications is well-known, and there have been numerous applications in the United Kingdom.<sup>16</sup> Widespread penetration of water heaters depends primarily on their cost effectiveness, which will tend to occur with higher fossil fuel prices and cost benefits deriving from large scale production. The ACORD document estimated that under present-day conditions, a reduction in the installed cost of solar domestic water heaters by a factor of three would be required to achieve cost effectiveness.

Space-heating applications are being investigated at a number of locations, details of which are given in the UK-ISES publication. Better house design will improve the effectiveness of utilisation of solar energy, and to a large extent the penetration of solar heating in space heating applications depends on the rate of turnover of the housing stock (c. 2 % per annum).<sup>17</sup>

The major problem which is currently being researched is of long-term heat storage to overcome the mismatch between the inci-

14. UK Section of the International Solar Energy Society (UK-ISES), «Solar Energy: a UK assessment», May 1976.

15. *New Scientist*, 13 January 1977.

16. UK-ISES, *op. cit.* Also, J. C. McVIGGH, «Developments in Solar Energy Utilisation in the United Kingdom», ISES, Los Angeles, 1975.

17. ACORD, *op. cit.*

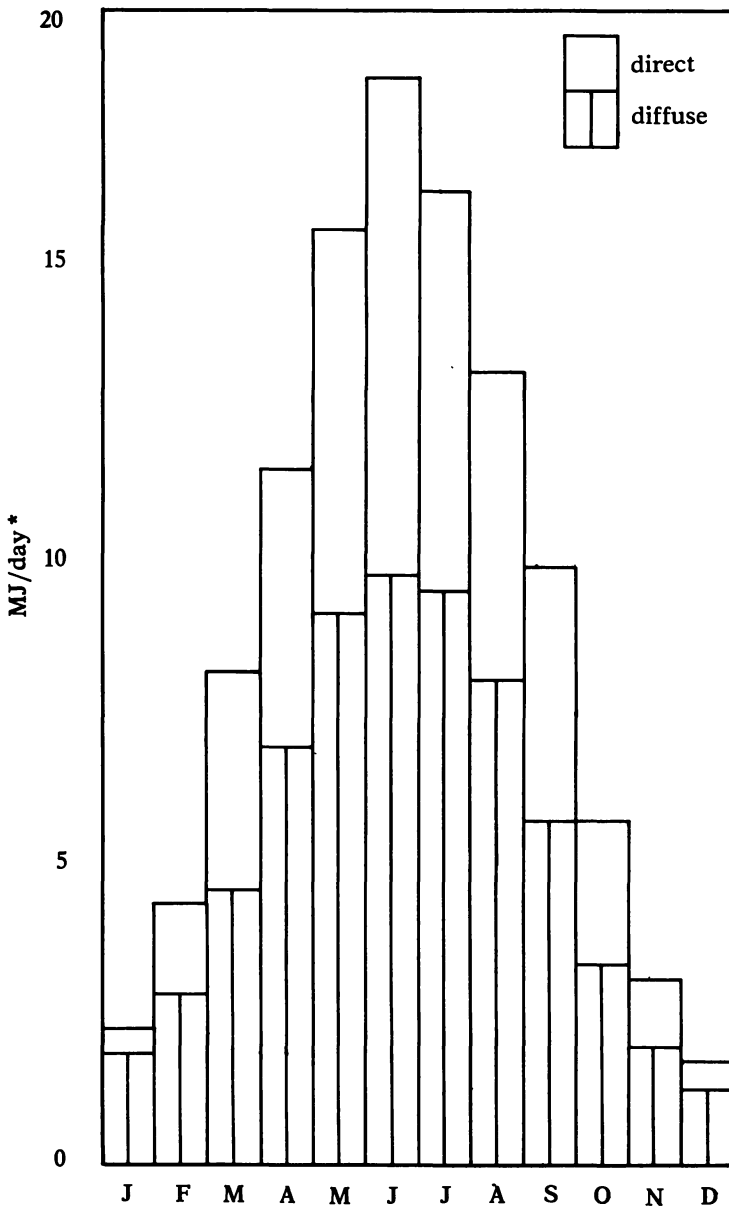


FIGURE 1

SOURCE: J. C. McVEIGH, «Developments in Solar Energy Utilisation in the United Kingdom», ISES, Los Angeles, 1975.

\* MJ=Mega-Joule.



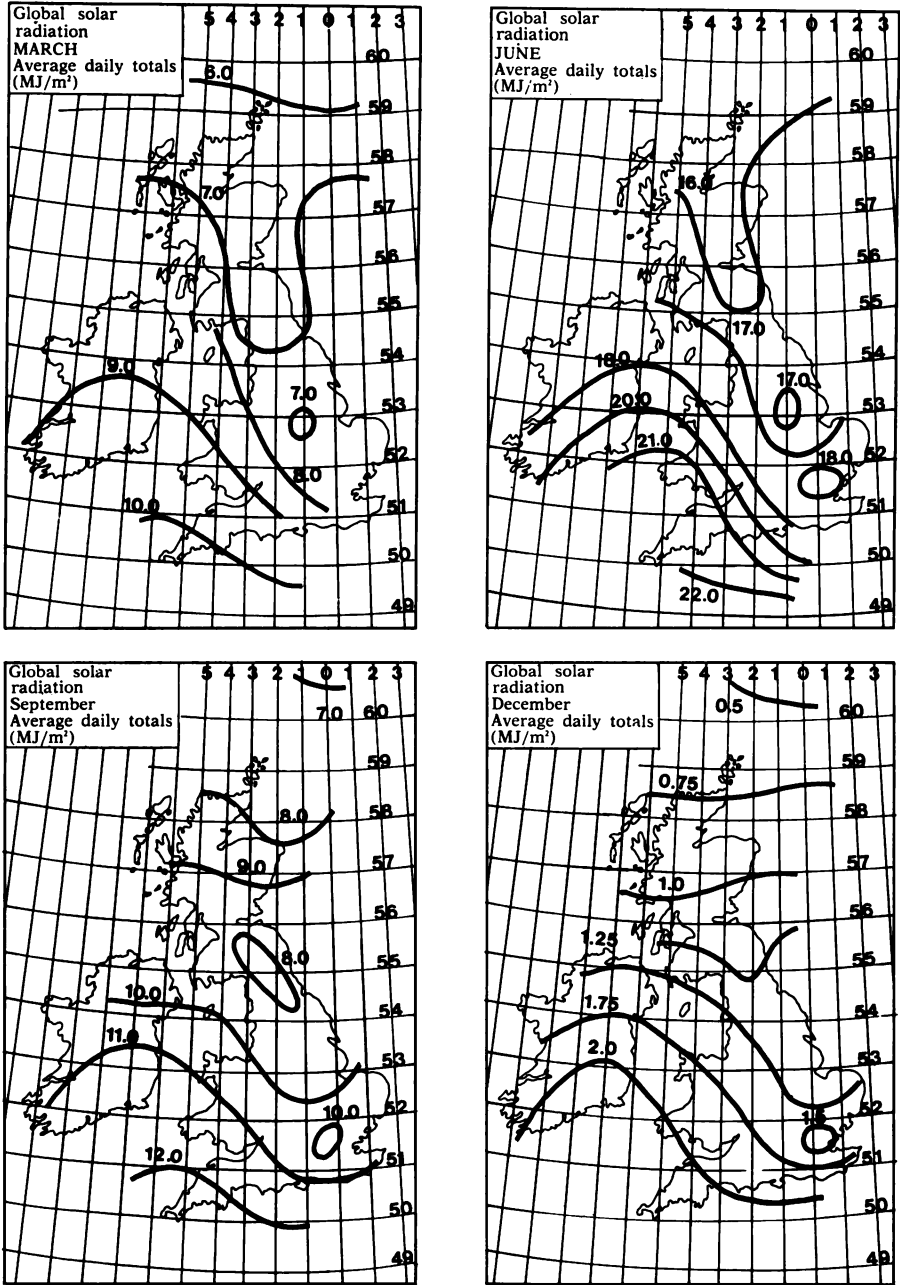


FIGURE 2. Monthly mean global irradiation for March, June, September, and December (MJ/m²).

dence of solar radiation and the requirement for heating, and although substantial progress is being made a satisfactory solution has not yet been achieved.

These two applications are likely to be most important in the domestic sector which accounts for about one quarter of UK energy consumption (see Table IV below).

TABLE IV

	m. therms							
	1960		1970		1973		1975	
Industry	21315	42.3	24689	42.6	25790	42.3	21951	39.3
Domestic	14425	28.5	14643	25.3	14917	24.4	14073	26.3
Transport	8812	17.4	11186	19.3	12876	21.1	12261	21.9
Others (inc. agric.)	5943	11.8	7435	12.8	7451	12.1	6959	12.5

SOURCE: Department of Energy, Digest of Energy Statistics, HMSO, 1976.

Within the domestic sector the Building Research Establishment<sup>18</sup> has estimated that 64 % of a typical household's energy consumption was devoted to space heating, 22 % to water-heating, 10 % to cooking, and 4 % to TV, lighting, etc. The technical potential for the use of solar energy in these applications is therefore considerable. Studies by ETSU given in the ACORD document show that with vigorous exploitation, but without the need for a major breakthrough in technology nor a major disturbance in lifestyles or institutions, solar energy in the domestic sector could contribute to UK energy supplies at up to the following levels:

	Year 2000	Year 2025
Domestic Water Heating	3 mtce	6 mtce
Domestic Space Heating	3 mtce	9 mtce

The International Solar Energy Society, not unsurprisingly, have more optimistic forecasts.<sup>19</sup> They assume, for example, that if 25 % of the domestic thermal load could be met by solar power then 6.2 % of UK 1972 gross consumption could be accounted for by solar energy. Savings of 10 % of gross industrial consumption and 12½ % in the «other users» category would lead to a 12 % saving of gross UK 1972 consumption (ie. 35 mtce), by 2020.

18. Building Research Establishment, «Energy Conservation: a study of energy consumption in buildings and possible mean of saving energy in housing», 1975.

19. UK-ISES, *op. cit.*

These are highly optimistic figures for the possible applications of low grade solar heat. Great uncertainties surround the prospects for the other more «direct» applications of solar power (as opposed to indirect applications like wind power) ie. photovoltaics, biomass fuels, and photochemical applications, all of which are admirably described in the UK-ISES publication. Considerable research is being devoted to these areas internationally, and there is great interest in the UK. ETSU see prospects for the utilisation of biomass fuels in the year 2000.

Photovoltaics are the most advanced area of research, but unit costs are still very high, and only application in remote or difficult sites with no mains supply are regarded as being currently economically feasible, although mass production could certainly lead to lower costs.

### *Wind power*

The utilisation of wind power does have the advantage that as an energy source it is at its peak at about the same time as maximum consumer demand and so avoids the mismatch between the peaks encountered in solar heating applications. But it is a very variable source of supply, and whether used as a supply source for the central electricity authorities, or for household supplies at a more local level, would require back-up supplies unless important technological breakthroughs are made in storage techniques.

The Central Electricity Generating Board have identified a few hill top sites where large wind generators could be installed to feed power into the grid, but they point out the visual disamenity of large wind generators in these sites, and prefer to treat the technology as an insurance standby should there be unforeseen developments in other elements of their supply system (for example nuclear power).<sup>20</sup>

At a local level a number of small (200 W to 2 kW approximately) wind generators have been installed,<sup>21</sup> and bigger units are being developed in Britain. A major potential application is foreseen in home heating<sup>22</sup> (using underfloor concrete stores, for example) as well as in mechanical applications (eg. pumping), which would lead to significant fossil fuel savings.

20. ACORD, *op. cit.*

21. J. C. McVEIGH, *op. cit.*

22. H. SHARMAN, «The Future of Wind Generation in Britain», Royal Society of Arts, *op. cit.*

## CONCLUSIONS

While it is technically feasible for Britain to achieve a small, but significant contribution from unconventional energy sources by the year 2000, a number of factors may well militate against this. Paramount is Britain's favourable indigenous energy situation which may lead to an energy «glut» over the next 15-20 years. Britain is therefore unlikely to be first country to develop and exploit these new technologies. Institutional factors, referred to earlier, may also act to reduce their penetration, as well as current pricing policies (especially of the gas industry) which do not accurately reflect long-term scarcity values.

Increased R & D funding seems justified in the light of the longer term energy uncertainties, including the risk of social and political constraints on the long-term build-up of nuclear power.

Given the wide range of new energy sources there is a strong case for agreed international specialisation and collaboration on R & D on particular energy sources according to comparative advantage and national priorities.

**APLICACIONES TÉRMICAS DE LA ENERGÍA SOLAR**

por

**D. TINAUT y F. RAMOS**

**Instituto de Óptica, C.S.I.C., Madrid.**

## RESUMEN

La conversión térmica de la radiación solar y su utilización directa en forma de calor ofrece las posibilidades más inmediatas de aplicación e industrialización de los sistemas de energía solar.

Se describen los sistemas de captación y almacenamiento térmico de la energía solar y su aplicación en instalaciones de calentamiento de agua y de climatización, estudiados en nuestra instalación experimental.

## RESUM

La conversió tèrmica de la radiació solar i la seva utilització directa en forma de calor ofereix les possibilitats més immediates d'aplicació i d'industrialització dels sistemes d'energia solar.

Hom descriu els sistemes de captació i d'emmagatzemament tèrmic de l'energia solar i llur aplicació en instal·lacions d'escalfament d'aigua i de climatització, estudiats a la nostra instal·lació experimental.

## SUMMARY

The thermal conversion of solar radiation and its direct utilization by means of heat offer the most immediate possibilities for industrialization of solar energy systems.

Solar energy collection and its thermal storage system associated with such a installation for heating and climatization of water are described using our experimental installation.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuestra sociedad en la época actual ha estado basado en el uso intensivo y creciente de energía que en un 98 % procede de los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural.

La reducción de los suministros de petróleo y simultáneamente el incremento de los precios ha hecho resurgir en los años setenta el interés por la utilización de nuevas fuentes de energía, entre las que la energía solar tiene un preeminente papel por su posible utilización de una manera ilimitada y como energía libre de contaminación.

La conversión térmica de la radiación solar y su utilización en forma de calor en el dominio de bajas temperaturas, es decir, captando la radiación sin concentración, ofrece inmediatas posibilidades de aplicación e industrialización de los sistemas de energía solar.

El porcentaje de combustible dedicado a la calefacción de viviendas y al calentamiento de aguas es elevado, alcanza un 25 % del consumo energético total. Las temperaturas requeridas no son muy elevadas y coincidentemente en estas bajas temperaturas se logra la máxima eficiencia del colector solar plano, que es el dispositivo básico en estas instalaciones. La coincidencia de estos factores da un potencial interés a las aplicaciones de la energía solar en arquitectura.

También en el dominio agrícola se realiza un aprovechamiento directo de la energía solar mediante el proceso de fotosíntesis. Asociando la destilación solar de aguas salobres con los procesos fotosintéticos de los cultivos, se puede llegar a determinar la combinación óptima de una instalación de invernadero con destilador solar incorporado, en función de los factores que influyen en el coste y productividad de estos sistemas.

## INSTALACIÓN PARA EL APROVECHAMIENTO TÉRMICO DE LA ENERGÍA SOLAR

Se ha programado una instalación con múltiples aplicaciones para el estudio y desarrollo de soluciones económicamente viables en este dominio.

En el croquis adjunto se representa esquemáticamente la disposición de las instalaciones.

Se pretende captar la energía a la menor temperatura compatible con las aplicaciones deseadas.

Se utilizan colectores planos contruidos con diversos materiales y configuraciones de diseño y se ha hecho un estudio comparativo de placas con diversos tratamientos superficiales para determinar su comportamiento como superficies absorbentes.

Después de una valoración energética de la radiación solar recibida sobre un plano horizontal en la superficie de nuestro país<sup>1</sup> se ha hecho el cálculo de la energía incidente sobre una superficie inclinada y con diferentes orientaciones. Esto ha permitido programar en ordenador la optimización según la curva de consumo de energía de las dimensiones e inclinación óptima de la superficie colectora.

En las páginas siguientes se presenta esquemáticamente las características de los sistemas de calentamiento de agua, calefacción y climatización de piscina, de nuestras instalaciones.

1. *Heliotechnique and Development*, Vol. 1, 1976, p. 145. Proceedings of the COMPLES International Conference Dhahran, Saudi Arabia.  
*O.P.A.*, Vol. 8, 1975.



INSTITUTO DE OPTICA C.S.I.C.

PLANTA EXPERIMENTAL DE ENERGÍA SOLAR (Arganda)

**Situación:**

Provincia: Madrid  
 Latitud: 40° 24'  
 Promedio de radiación: 3.700 Kcal/m<sup>2</sup> día

**Edificio Laboratorio**

**Colectores:**

Superficie total: 70 m<sup>2</sup>  
 Posición: Sur, en el suelo  
 Tipo: colector plano, agua, 1 vidrio  
 Configuraciones:  
 — 20 m<sup>2</sup> cobre - tubos  
 — 20 m<sup>2</sup> acero - doble lámina  
 — 30 m<sup>2</sup> aluminio - Roll bond

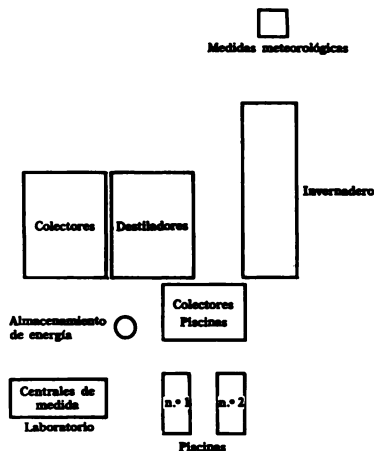
**Almacenamiento:**

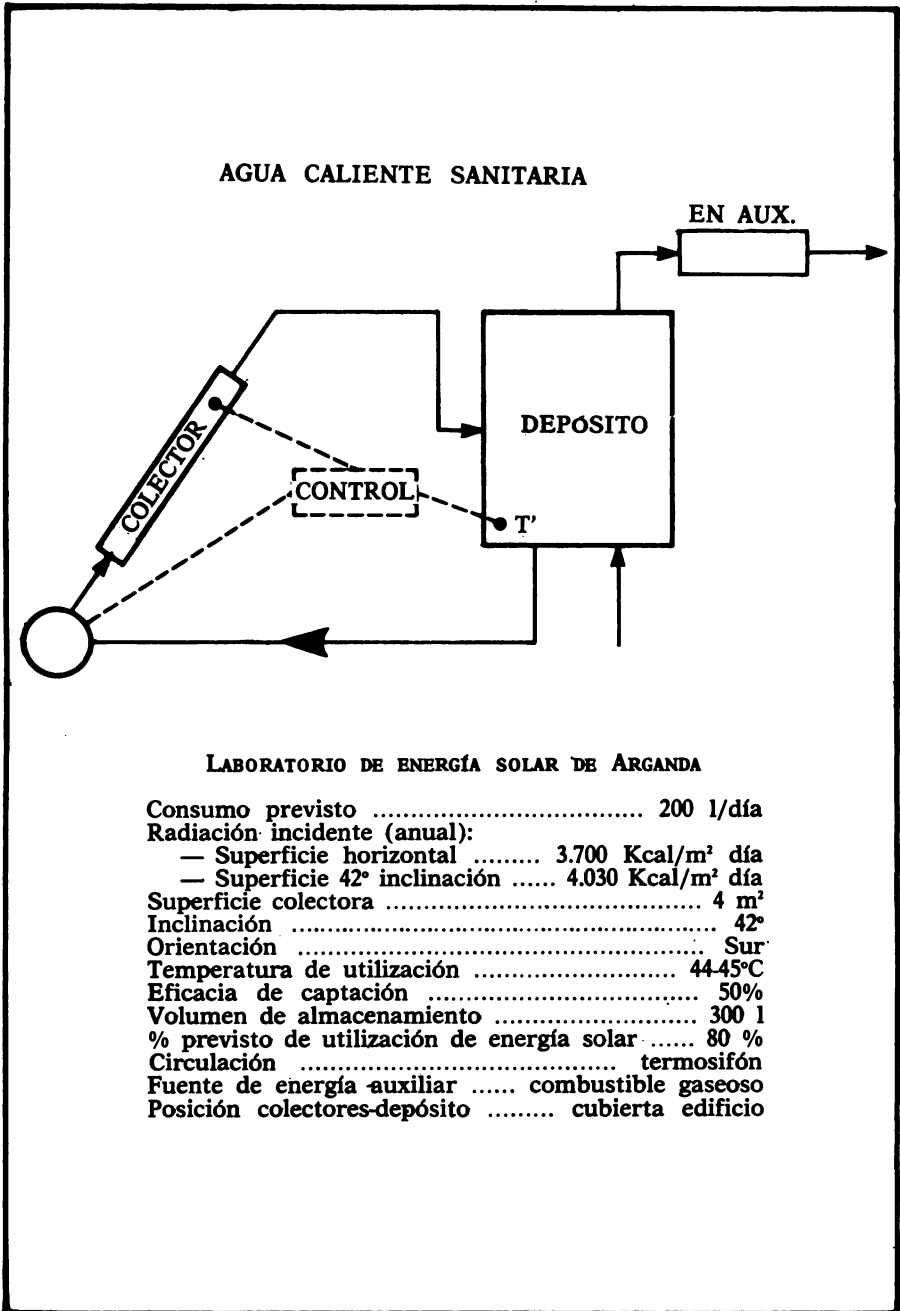
Agua, calor sensible  
 Volumen: 5.000 litros.  
 Situación: Subterráneo. Centro geométrico de la instalación

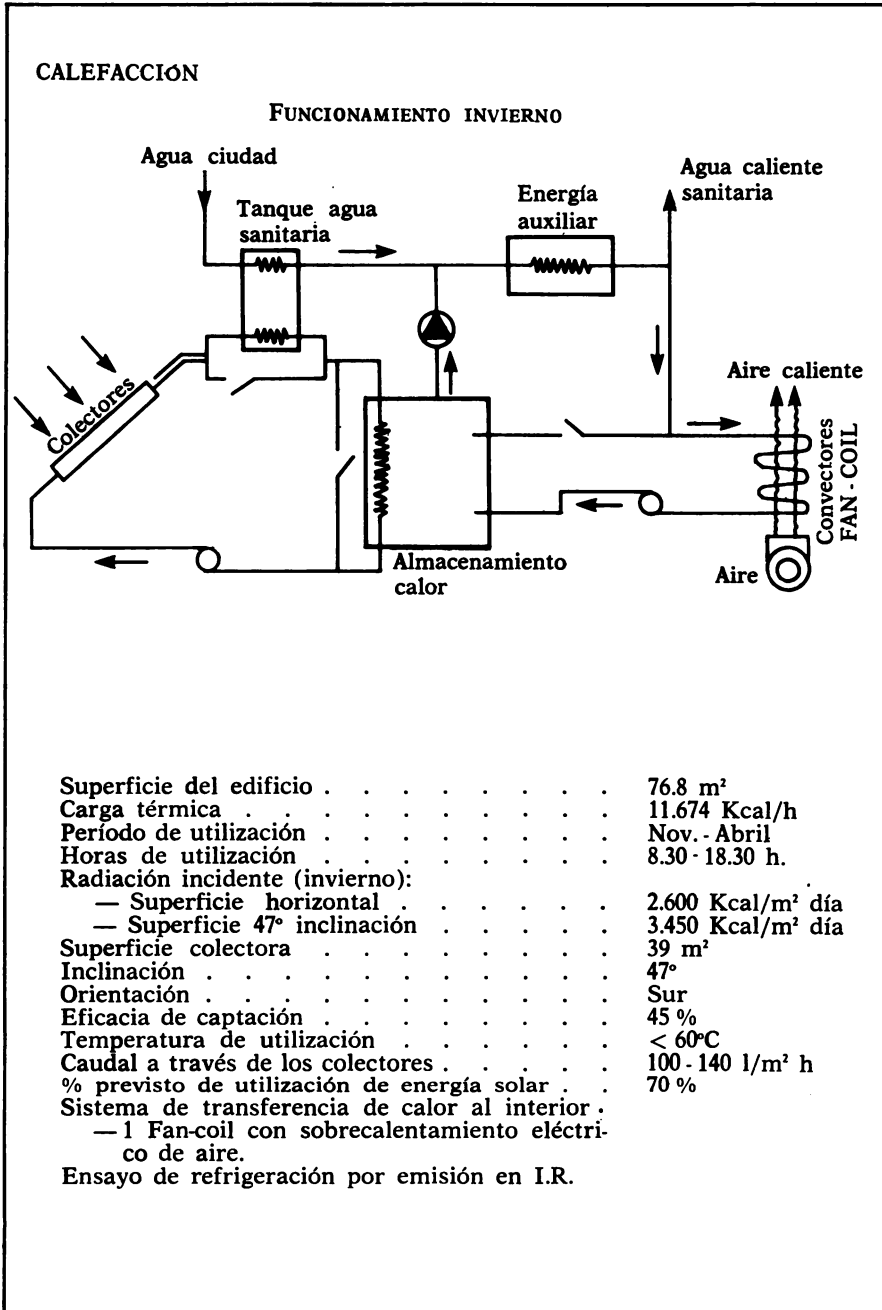
**Sistemas de control y toma de datos:**

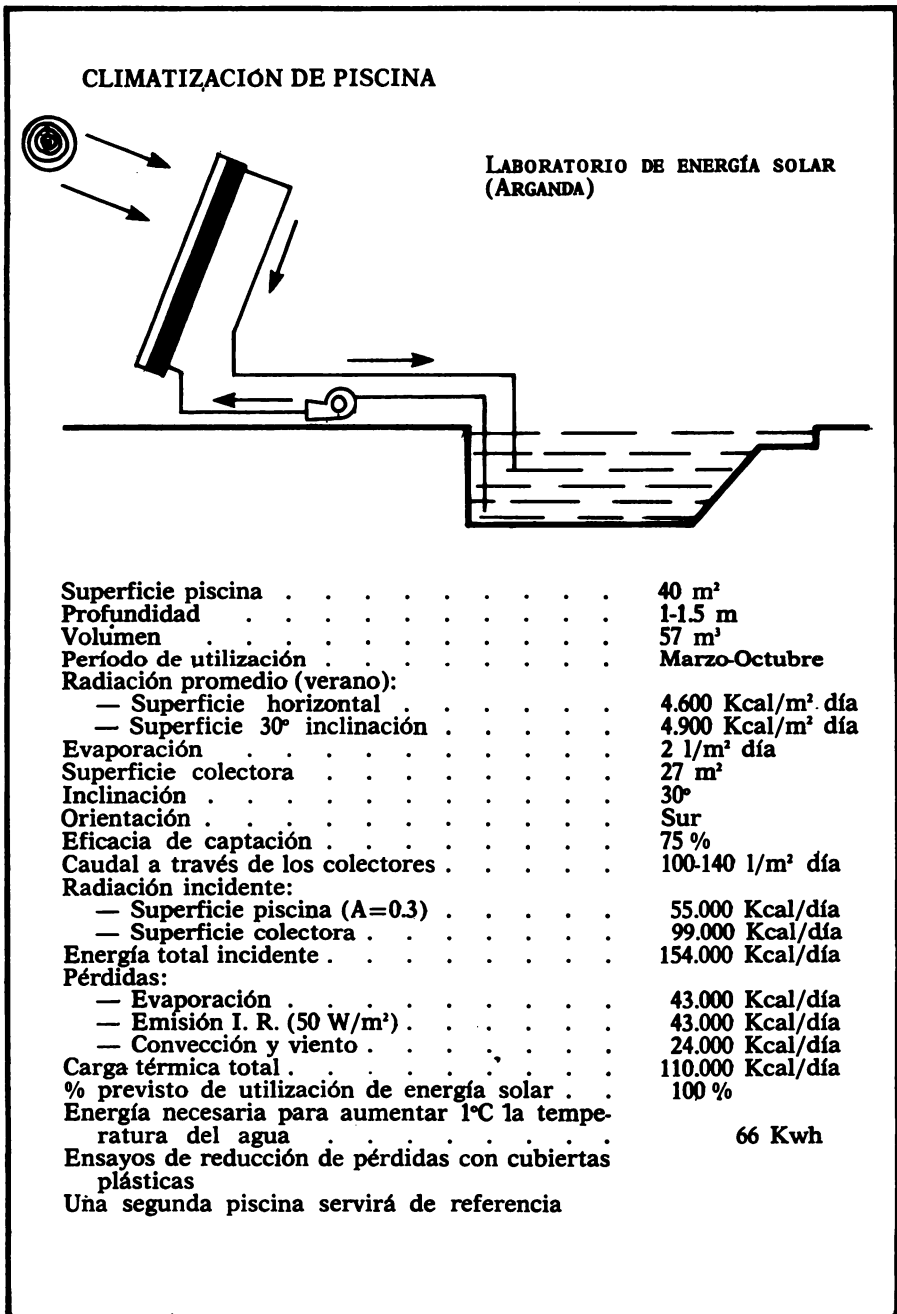
Central de medidas A.O.I.P: 20 terminales  
 Ordenador Hewlett Packard 9830 A - 8K

INSTALACIONES  
 DE  
 APROVECHAMIENTO  
 TÉRMICO









**ENERGIA SOLAR I ARQUITECTURA**

**per**

**RAFAEL SERRA I FLORENSA**

**Escola Tècnica Superior d'Arquitectura  
Universitat Politècnica de Barcelona**

## **RESUM**

**Hom presenta la relació entre el tipus d'arquitectura i el medi ambient en diferents països així com el possible aprofitament de l'energia solar en l'habitatge amb els mitjans tecnològics actuals i l'ample ventall de possibles solucions.**

## **SUMMARY**

**Technological possibilities of the use of solar energy in housing are presented considering architecture and environment points of view.**

## ENERGIA SOLAR I ARQUITECTURA

Avui, després de molts segles de construcció d'edificis, ens sembla que una nova descoberta ha obert camins a la tasca dels arquitectes més preocupats per l'adequació de llurs edificis a les necessitats de l'home. Per a molts d'ells, l'energia solar és, a més a més, una nova possibilitat de mantenir-se a l'avantguarda tecnològica i formal amb la novetat que això comporta.

En realitat, cal dir que no és res nou de parlar d'aprofitament del sol en els edificis, com no ho és de parlar, en termes més generals, de l'aprofitament de l'energia solar per l'home. Des de sempre l'energia del sol ha estat, directament o indirecta, la principal font de recursos de l'home i, alhora, el més important condicionant de la forma arquitectònica. Si fem omisió de l'arquitectura que RAPPORT anomena «d'estil», la més representativa segons els tractats clàssics d'arquitectura, veurem que la majoria dels edificis construïts compleixen aquesta dependència i ens cal arribar al nostre segle perquè hom obliidi l'important paper que l'aprofitament de l'energia solar, en particular, i la bona adequació a l'entorn climàtic, en general, ha tingut en el disseny dels edificis populars.

El que sí que es pot assenyalar, en canvi, és la represa de l'interès que avui hi ha pel control de l'energia en l'habitatge i, consegüentment, per la recerca de noves tècniques d'aprofitament, i alhora per la revaloració de certes tècniques ja existents.

És evident que, des dels temps primitius, els esforços de l'home pel millorament del seu habitatge tenen sobretot en compte el problema del control tèrmic; i la radiació solar com a font de llum i calor forma part important de tots els actes de la vida quotidiana, fins al punt de tenir un paper preponderant en la mateixa mitologia, com a expressió lògica de les grans preocupacions dels pobles.

Per aquestes raons creiem que qualsevol anàlisi del possible paper actual de l'energia solar en el disseny dels edificis hauria de començar per l'estudi de l'arquitectura popular en els diferents països al llarg dels segles. Considerem doncs, per a il·lustrar això, exemples concrets.

Els habitacles primitius del Mali, de forta inèrcia tèrmica i amb reduïdes obertures, aconsegueixen d'obtenir un règim tèrmic estable, malgrat les fortes variacions dia-nit pròpies del clima extremat i sec.

Certs habitatges birmans, amb les grans galeries que els envolten i amb els grans ràfecs de protecció de la incidència directa del sol, són propis del clima càlid humit.

Hi ha habitatges tibetans, amb grans superfícies vidrades (en realitat, cortines) que permeten l'entrada del sol i que es protegeixen de nit, per tal de reduir les pèrdues tèrmiques, amb petits ràfecs que només protegeixen de les precipitacions, sense obstaculitzar el pas del sol; aquests habitatges són propis del clima fred de muntanya amb molta radiació solar.

Un habitatge cubà, en un clima càlid humit, té galeries amb persianes que permeten la ventilació i aturen l'entrada del sol.

Els habitatges gallecs presenten la galeria típica de zones fredes, l'envitrallament de la qual permet el pas de la radiació solar que escalfa les parets que hi ha al darrera, les quals actuen com a volant tèrmic. Aquesta solució és equivalent a la de certes realitzacions actuals aplicades a habitatges solars que aprofiten l'efecte hivernacle.

Totes aquestes realitzacions de l'arquitectura popular i moltes altres que es podrien recollir haurien d'ésser estudiades més profundament per tal de poder fer un treball vàlid en l'àmbit del comportament energètic dels edificis.

Si volem analitzar, en canvi, la situació actual, observem una certa despreocupació pels problemes energètics en el disseny dels edificis, deguda, d'una banda, al baix cost de l'energia, fins fa poc temps, i, d'una altra, a unes tendències formals de l'arquitectura que eren i són el fruit d'un racionalisme mal entès. Tot això donà lloc a una arquitectura lleugera i dilapidadora d'energia, que l'actual crisi ha posat en qüestió, alhora que ha produït un interès acusat per fonts d'energia noves o renovades i, en particular, per l'aprofitament de l'energia solar.

N'ha estat la conseqüència el fet que han aparegut, davant aquest problema, diverses posicions, de les quals, des del punt de vista arquitectònic, cal considerar dues de principals, fins a un cert punt enfrontades.

Segons la primera d'elles, la més seriosa i científica, l'energia solar ha d'arribar a la seva aplicació en els edificis a partir d'una aprofundida investigació tecnològica, que, amb gran riquesa de mitjans, ja estudia avui els camins més complexos d'aprofitament



de l'energia del sol. Actualment aquesta investigació es fa deslligada pràcticament de qualsevol possible aplicació arquitectònica, almenys a curt termini. Podem incloure en aquesta línia l'especulació sobre l'aplicació en els edificis de transductors lumínics, d'elements concentrants de la radiació per a obtenir altes temperatures, etc., i, en un pla més global, la possibilitat de creació de grans centrals solars de producció d'energia elèctrica, amb captació des de terra o a l'espai i que, evidentment, ja no tenen ni poden tenir repercussió arquitectònica.

Un altre corrent, oposat a l'anterior fins a un cert punt, preconitza una utilització immediata de l'energia solar en els edificis, mitjançant sistemes simples, encara que siguin de baix rendiment, econòmics d'adquisició i de muntatge, lligat això amb propostes de salvaguarda ecològica amb reciclatge de les deixalles de l'habitatge.

Aquestes propostes, en certa forma contraculturals, són qualificades sovint d'ingènues, però potser són les que tenen més possibilitats per a fer reals els nostres anhels d'un habitatge més humà.

L'aplicació d'aquestes solucions en l'edifici ofereix tanmateix uns avantatges evidents, avantatges que no poden donar altres sistemes fonamentats en la centralització de la producció d'energia i el seu transport posterior. La mateixa natura dispersa de la radiació solar, que arriba pràcticament a tot arreu amb similar intensitat, fa que sigui lògic d'aprofitar-la «in situ» transformant-la en calor, en energia mecànica o en energia elèctrica al mateix lloc on ha d'ésser utilitzada; a més, resulta pràcticament gratuïta.

El que no és lògic és pretendre de concentrar la conversió d'energia radiant en altres tipus d'energia, mitjançant centrals solars, des de les quals calgués transportar de nou l'energia vers els usuaris. D'aquesta forma el control de les fonts energètiques restaria una altra vegada a les mans d'uns pocs, el sol i la seva energia deixarien d'ésser gratuïts i encara que els rendiments de conversió fossin superiors amb aquesta solució, que pot ésser més sofisticada tècnicament, les pèrdues degudes al transport els reduirien, ensems que aquest procés contribuiria a la contaminació general de l'ambient en forma de contaminació tèrmica.

Deixant ara de banda aquestes consideracions generals i passant a analitzar les possibilitats d'aplicació concreta en els edificis, podem resumir en un gràfic el conjunt d'aquestes aplicacions, podem veure que hi ha una diversitat de camins, i que el problema de llur difusió obeeix als baixos rendiments que normalment s'obtenen, els quals fan costoses les solucions a causa de les fortes inversions que comporten en relació amb les solucions més convencionals.

Considerant aquestes diverses solucions, creiem que les més simples i econòmiques són aquelles que tendeixen a utilitzar l'energia solar com a font de calor, per a calefacció o per a escalfar l'aigua sanitària. Evidentment, serà emprat l'efecte hivernacle per tal d'afavorir al màxim la captació d'energia, i la forma més fàcil de fer-ho consisteix a recollir, amb un element de gran inèrcia tèrmica (formigó, dipòsits d'aigua, etc.), l'energia radiant que travessa un doble vidre i utilitzar la calor emmagatzemada per a escalfar l'habitatge a les hores sense sol. Aquesta solució és l'aplicada als habitatges de **TROMBE**.

Solucions una mica més complexes, però molt més difoses per tot el món, són les que escalfen, mitjançant collectors solars plans, de fabricació més o menys industrialitzada, l'aigua que procedeix d'un gran dipòsit, on s'acumula, per a la seva utilització posterior per a calefacció o aigua sanitària. Similars a aquests són els sistemes que fan servir captors per a escalfar l'aire i emmagatzemen la calor en un dipòsit de pedres volcàniques.

Altres solucions més sofisticades i tecnològicament més complexes són les que utilitzen l'energia solar per a la refrigeració dels edificis en períodes de calor. Per a això es pot fer servir una bomba de calor accionada per energia mecànica procedent d'una prèvia conversió de l'energia solar (cost elevat per a un baix rendiment) o bé pel sistema més directe d'un circuit d'absorció on la font de calor en el generador procedeix de la radiació solar (sistema encara molt car per manca d'equips normalitzats). El gran avantatge d'aquests sistemes, en el moment que llur rendibilitat en farà possible la instal·lació, és el fet que llur rendiment màxim s'esdevé als moments de màxima insolació, que coincideix aproximadament amb els moments de màxima càrrega tèrmica en els edificis.

A més d'aquestes solucions plantejades, hi ha, com és lògic, moltes altres possibilitats, bé que per a fer-les realitzables avui haurien d'ésser derivades de les ja exposades. Com que, en aquest moment, no ens interessa de fer un repàs exhaustiu de totes, creiem més interessant d'examinar-ne la repercussió arquitectònica, especialment pel que fa a la integració amb la forma de l'edifici.

Considerem, en primer lloc, el cas més corrent de l'aplicació de l'energia solar a l'habitatge, que és la de resultats més dubtosos.

Consisteix en el simple afegit d'uns equips de captació d'acumulació de calor, sobre un edifici ja existent o sobre un en construcció, però sense cap lligam entre la forma i concepció de l'edifici i el fet de l'existència d'aquest equip.

Aquest cas és el de moltes realitzacions a Israel, als Estats Units,

al Japó, etc. Evidentment, la integració arquitectònica és nul·la i els resultats formals pèssims, però, a més a més, en no ésser concebut l'edifici segons un criteri global d'aprofitament de l'energia solar, els rendiments pràctics resulten molt baixos i la majoria de les vegades la utilitat del sistema es redueix a l'escalfament de l'aigua sanitària.

Un altre planteig, de més possibilitats, consisteix en la concepció total de l'edifici per a l'aprofitament de l'energia solar. Aquest és un planteig absolutista, realitzat de vegades per tècnics no arquitectes i d'altres vegades per arquitectes molt dedicats a aquest tema, la qual cosa comporta bàsicament una molt forta càrrega formal, tot l'edifici resulta concebut pensant en el sol i l'aparença final respon lògicament a aquest planteig. Tot són captors solars i no solament és la distribució de locals que s'ajusta a l'existència d'aquests, sinó que fins les finestres es veuen posposades i sovint resten només unes petites obertures de molt poc servei.

Els resultats són bons des del punt de vista energètic, l'habitatge no requereix en molts casos cap més font d'energia per a calefacció, però la relació de l'esforç amb el resultat sovint no és positiva i alhora es perden altres possibles qualitats de l'edifici i el mateix absolutisme del planteig fa que sovint es malmeti el medi natural que envolta l'habitatge i que l'aparença resulti molt deficient per un excés de rigidesa.

Un tercer planteig apareix tot sovint lligat amb les ja esmentades propostes de tipus contracultural, i en rares ocasions apareix en realitzacions arquitectòniques; és el de considerar l'habitatge com un element immersit en un entorn natural, amb equilibrades relacions ecològiques i amb un aprofitament màxim de les seves possibilitats energètiques.

Aquest planteig considera l'energia solar com una altra possible font d'energia i llum a utilitzar en l'habitatge, però sense oblidar tots els altres sistemes possibles d'aprofitament de les energies naturals per a l'individu (vents, salts d'aigua, etc.), i fins dels mateixos residus de l'habitatge, com són ara els gasos despresos dels pous morts, i d'altres.

Aquest planteig, malgrat el seu elevat grau d'utopisme, resulta el més suggeridor des del punt de vista arquitectònic, no solament perquè és el que ofereix millors possibilitats d'aprofitament ambiental i energètic, sinó que, a més a més, permet uns resultats formals més convincents que els planteigs anteriors. N'és un exemple l'habitatge de Steve BAER als Estats Units.

Hom podria també parlar d'un altre possible planteig d'aplica-

ció de l'energia solar a l'habitatge, que fóra el d'un total utopisme tecnològic, prop de la ciència-ficció; entenent l'edifici amb una supertecnificació que recull la tecnologia ja esmentada de les cèl·lules solars i dels dispositius concentradors que avui dia s'apliquen en altres camps, i suposant que s'incorporen als edificis com a fonts productores bàsicament d'electricitat i possiblement d'energia mecànica.

Aquest planteig no presenta avui cap realització arquitectònica i les propostes teòriques no existeixen pràcticament o són molt llunyanes a la realitat. Sigui com sigui, la integració arquitectònica d'un planteig d'aquest tipus implicaria, per a ésser possible, una tecnologia constructiva en general molt més evolucionada que l'actual, i, evidentment, l'aparença formal dels edificis fóra més acostada a la d'un vehicle espacial que no a la d'un habitatge actual.

Un comentari que caldria fer aquí, és que pràcticament tot el planteig de solucions arquitectòniques ha estat fet basant-nos en l'anàlisi d'habitatges unifamiliars, la qual cosa té les seves raons lògiques quan aquestes propostes provenen de països on l'habitatge tendeix a ésser d'aquest tipus, i de realitzacions a petita escala, de tipus artesanal. Tanmateix, tant les solucions concretes com els resultats arquitectònics són d'aplicació perfectament vàlida en casos d'edificis més grans, en agrupacions d'habitatges, en edificis comercials, d'oficines, etc.; àdhuc amb resultats tecnològics de vegades més convincents i més econòmics, sempre que no parlem d'edificis de gran dimensió, on els planteigs haurien d'ésser diferents.

Exposades ja, bé que superficialment, les diferents possibilitats de l'arquitectura davant la utilització de l'energia solar, hom pot treure certes conclusions de base per a pensar en el treball futur sobre aquest aspecte.

En primer lloc, és evident que per part dels arquitectes cal fer una investigació, o, si més no, tenir un coneixement més aprofundit, per tal de poder realitzar dissenys realment correctes i no simplement especulacions formals sobre uns fenòmens mal coneguts, com passa ara. Un edifici ben dissenyat comporta de tenir en compte no solament l'assolellament, sinó també l'aïllament, els vents, la inèrcia tèrmica dels materials, els bescanvis lumínics, etc. D'altra banda, de les propostes que hem vist abans, les que podríem dir-ne propostes integrals o ecològiques són les que ens poden servir més eficaçment d'ensenyança, al costat d'una nova anàlisi de les realitzacions de l'arquitectura popular, recull de possibilitats diverses que, afegides a les de la nostra tecnologia, poden representar el correcte camí de l'arquitectura d'avui.

**MODELISATION SUR ORDINATEUR D'UN SYSTÈME  
DE DISTILLATION**

par

**F. ROCARIES, P. GRANIER, B. N'DOYE**

**Laboratoire de Thermodynamique et Énergétique  
Centre Universitaire de Perpignan, Perpinyà, France**

## **RÉSUMÉ**

On étudie l'efficacité globale du distillateur en fonction du débit de l'eau d'alimentation au moyen d'une modélisation sur ordinateur.

## **RESUM**

Hom estudia l'eficàcia global d'un destil·lador en funció del cabal d'aigua d'alimentació, per mitjà d'una modelació en l'ordinador.

## **SUMMARY**

Computer modelisation of the overall efficiency of a distillator is presented. The most influencing parameters are taken into account.

A l'heure actuelle l'étude pratique des distillateurs solaires se résume à des expériences isolées sur des types de distillateurs très particuliers et dans des conditions d'expériences souvent fort éloignées les unes des autres. On peut ainsi difficilement, à l'heure actuelle, déterminer «à priori» pour un environnement météorologique donné le type de distillateur solaire le plus performant. Le but de notre programme est de modéliser les différents types de distillateurs actuellement existant sur le marché et d'essayer d'établir entre eux des comparaisons valables.

On peut raisonnablement admettre que les distillateurs modélisés de façon identique et bénéficiant des mêmes «conditions d'expériences» seront ainsi plus faciles à départager. Il est en effet possible grâce à l'ordinateur d'établir pour chaque type de distillateur des courbes de rendement dépendant des diverses géométries envisageables ainsi que de conditions atmosphériques aussi variées que l'on voudra. Le travail présenté ici avait pour but initial la modélisation d'un distillateur à ruissellement. Comme vous le verrez au cours de l'exposé, le passage de ce type de distillateurs aux distillateurs statiques, classiques ou à marches, se fait sans difficulté.

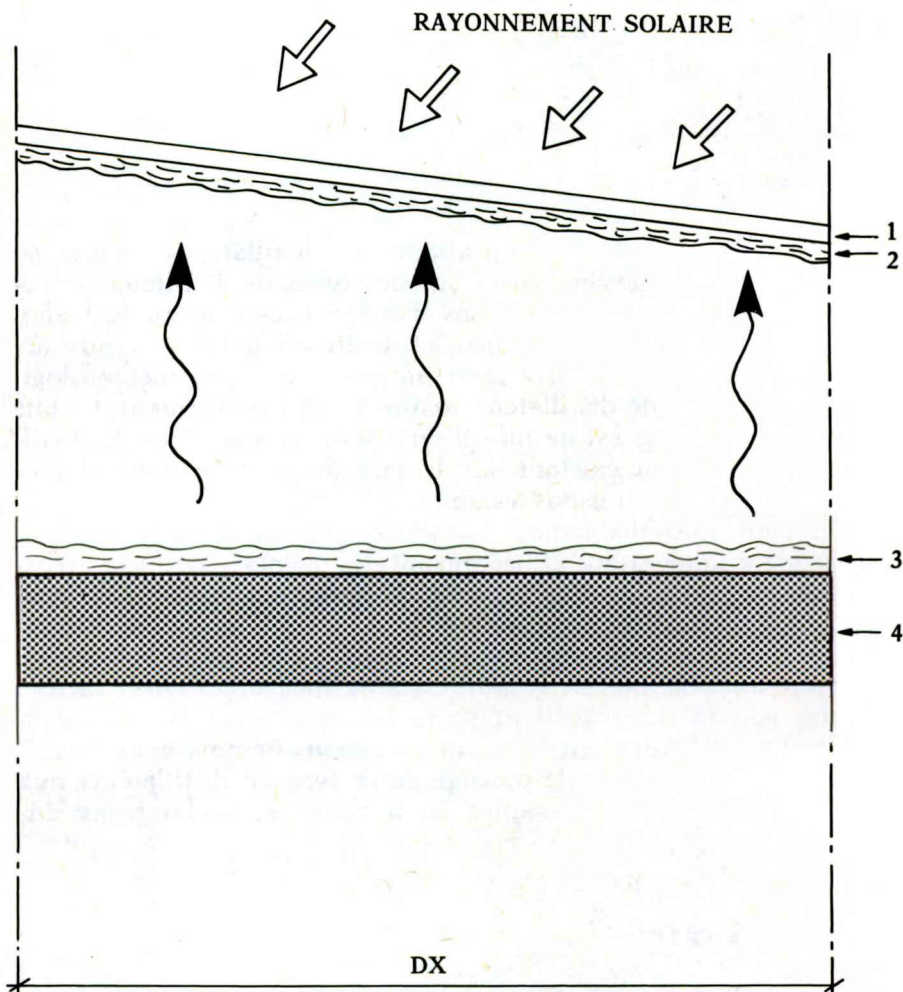
#### EXAMEN DU MODÈLE

Comme le montre la figure 1 le distillateur est décomposé en tranches de longueur  $DX$  et de largeur égale à la largeur totale du distillateur. (Les effets de bords étant par là même considérés comme négligeables.)

Le problème se présente donc comme unidimensionnel.

— Le rayonnement incident est représenté par deux composantes:

- a) le rayonnement direct dont nous connaissons à tout instant la direction et le module;
- b) le rayonnement diffus qui sera considéré comme un ra-



1.	Couverture
2.	Film de condensation
3.	Film de ruissellement
4.	Corps noir et isolant

FIGURE 1



onnement de module connu et de direction invariante quelle que soit l'orientation de la surface. Cette direction est prise égale à  $60^\circ$  par rapport à la normale à la surface.

Le distillateur est schématisé comme suit:

- a) une couverture transparente dont on donne les principales caractéristiques optiques et faisant avec l'horizontale un angle  $\beta_c$  connu.
- b) le film de condensation. Nous supposons que le condensat se présente sous la forme d'un film d'épaisseur continuellement variable. (Cela implique que la couverture présente une mouillabilité et une pente suffisantes).
- c) une enceinte dont on connaîtra la loi de variation de la hauteur moyenne d'une tranche.
- d) une lame d'eau salée ruisselante ou statique et dont on connaîtra l'épaisseur par le calcul.
- e) enfin un socle composé d'un plan noir dont on se donne le coefficient moyen d'absorption, et d'une isolation quelconque: le tout étant posé, ou non, à même le sol.

Dans le cas d'un distillateur statique, le plan noir est horizontal et l'on se donne la quantité d'eau à distiller introduite. Dans le cas d'un distillateur à ruissellement, on connaît la pente du plan noir ainsi que le débit imposé.

#### DIFFERENTS TYPES DE DISTILLATEURS MODELISÉS

Nous pouvons subdiviser les deux grands types de distillateurs en plusieurs sous-catégories très intéressantes.

##### *Distillateurs statiques:*

- classiques: la hauteur moyenne de la tranche est continuellement variable;
- à marches: la hauteur moyenne de l'enceinte est constante;

##### *Distillateurs à ruissellement (figure 2):*

- Les distillateurs à co-courant où saumure et distillat coulent dans le même sens.

## DISTILLATEURS À RUISSELLEMENT

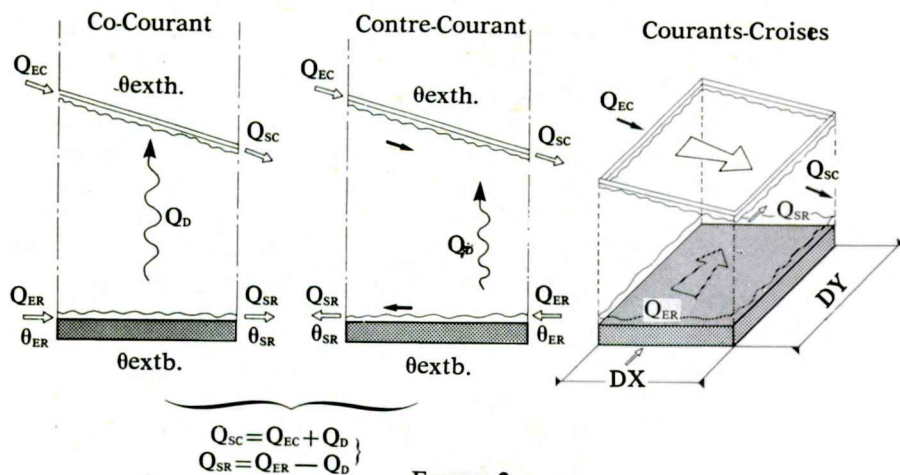


FIGURE 2

— Les distillateurs à contre-courant où saumure et distillat coulent en sens inverse.

— Les distillateurs à courants croisés. Ce dernier cas a la particularité de se présenter comme un problème bidimensionnel, ce qui complique énormément le découpage en tranches.

Il n'est soluble que dans des configurations géométriques très particulières qui tendent à le ramener à nos modèles unidimensionnels. Dans un premier temps, nous n'avons pas programmé ce problème.

#### ÉTUDE DU SCHÉMA ÉLECTRIQUE ÉQUIVALENT À LA TRANCHE D'UN DISTILLATEUR

Le schéma électrique représenté à la figure 3 simule en fait le système thermique que constitue notre tranche de distillateur. C'est à partir de ce modèle que sont calculées les températures intermédiaires des différents milieux. Le but poursuivi dans ces calculs est essentiellement la connaissance du taux d'évaporation, ou plus précisément du débit d'eau migrant de la surface d'évaporation vers la surface de condensation, ainsi que la connaissance de la température moyenne de fluide ruisselant à la sortie de la « tranche », cela à partir de paramètres d'entrée tels la puissance solaire effective-

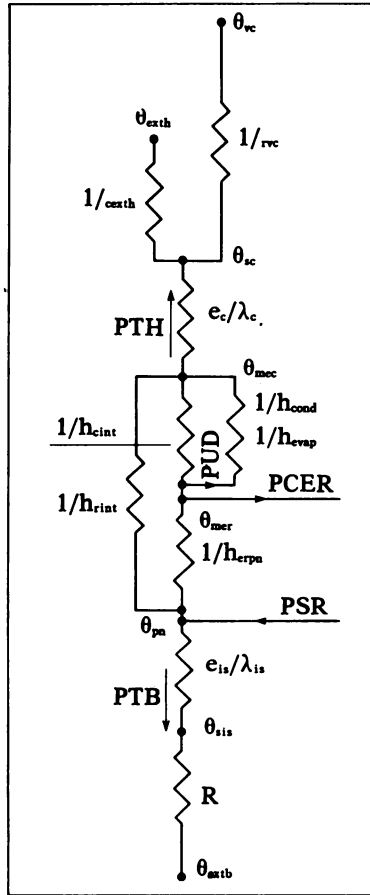


FIGURE 3. Schéma électrique équivalent du bilan thermique d'une tranche de distillateur (modèle unidimensionnel).

NOMENCLATURE DES VARIABLES DE LA FIGURE 3

- $e_c$ : épaisseur de la couverture
- $e_{is}$ : épaisseur de l'isolation
- $h_{cexth}$ : coefficient de transfert thermique par convection forcée couverture-air ambiant (vent)
- $h_{cint}$ : coefficient de transfert thermique par convection naturelle dans l'enceinte
- $h_{cond}$ : coefficient de transfert thermique par condensation
- $h_{cvpn}$ : coefficient de transfert thermique par convection (forcée ou naturelle) eau-plan noir
- $h_{cvap}$ : coefficient de transfert thermique par évaporation
- $h_{rint}$ : coefficient de transfert thermique par rayonnement dans l'enceinte
- $h_{rvc}$ : coefficient de transfert thermique par rayonnement vers la voûte céleste
- PCER: puissance cédée à l'eau de ruissellement (chaleur sensible)
- PUD: puissance utile de distillation
- PSR: puissance solaire effectivement reçue par le plan noir
- PTB: pertes thermiques vers le bas
- PTH: pertes thermiques vers le haut
- R: résistance thermique isolation-milieu extérieur (résistance de contact, de convection et/ou de rayonnement)

*Lettres grecques:*

$\theta_{extb}$ : température extérieure inférieure  
 $\theta_{exts}$ : température extérieure supérieure  
 $\theta_{moe}$ : température moyenne de l'eau de condensation  
 $\theta_{mei}$ : température moyenne de l'eau de ruissellement  
 $\theta_{pn}$ : température de la surface du plan noir  
 $\theta_{sc}$ : température de la surface externe de la couverture  
 $\theta_{si}$ : température de la surface externe de l'isolation  
 $\theta_{vc}$ : température équivalente de la voûte céleste  
 $\lambda_c$ : coefficient de conductivité thermique de la couverture  
 $\lambda_{is}$ : coefficient de conductivité thermique de l'isolation

ment absorbée par le plan noir, la température d'entrée de l'eau à distiller, le débit de ruissellement et enfin les conditions aux limites (températures de la voûte céleste et du sol, par exemple).

Les potentiels électriques sont analogues aux températures, les intensités à des flux de chaleur par unité de surface, les résistances électriques étant équivalentes aux résistances thermiques. La commodité de cette analogie se traduit par le fait qu'il est possible d'affiner le modèle par simple modification ou adjonction de résistances, sans pour cela changer quoi que ce soit au programme principal puisque nous avons réalisé cette analogie thermique dans un sous-programme original appelé TRANCH. La plupart des résistances internes vont dépendre des potentiels aux bancs (convection, rayonnement, condensation, évaporation). Il va donc falloir atteindre ces valeurs par un processus itératif qui n'est réalisable que grâce à l'utilisation de l'ordinateur (figure 4).

## TRANSMISSION DE LA PUISSANCE SOLAIRE

La partie de la puissance solaire incidente recueillie sur le corps noir est calculée par un programme spécifique appelé HABS. C'est une simple application des lois de FRESNEL (optique géométrique) au système optique constitué par les trois milieux semi-transparentes que sont la couverture, l'eau, et l'air. Il existe des programmes beaucoup plus précis utilisant pour réaliser ces calculs des méthodes probabilistiques (méthode de Monte-Carlo) mais ces programmes exigent une connaissance parfaite des propriétés radiatives des milieux traversés. De plus, leur précision nous semble superflue devant les hypothèses simplificatrices que nous avons été amenés à faire pour mener à bien les autres calculs.

Expression des divers coefficients d'échange thermique

1. Coefficients d'échange thermique par rayonnement

$$h_r = f_1 (\epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot \theta_1 \theta_2) = \sigma \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} (\theta_1^2 + \theta_2^2) (\theta_1 + \theta_2)$$

2. Coefficient d'échange thermique extérieur par convection forcée (vent)

$$h_{c1} = f_2 (V) \alpha V + \beta \quad \begin{array}{l} \alpha = 3,8 \\ \beta = 5,7 \end{array}$$

3. Coefficient d'échange thermique intérieur par convection naturelle

$$h_{c2} = f_3 (\theta_1, \theta_2, d, s) = A \frac{(\Delta T)^B}{(100d)^C} \Theta \cdot \Sigma \quad \begin{array}{l} A = 114 \\ B = 0,310 \\ C = 0,07 \\ \Delta T = \theta_1 - \theta_2 \\ \Theta = 1 - 0,0018 \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - 283 \end{array}$$

$$\Sigma = 1 - 0,017 \frac{s - 45}{90}$$

4. Coefficient d'échange thermique par condensation

$$h_{cond} = f_4 (\theta_1, \theta_2, d) \frac{A v_c R_c^B \lambda_m}{d} \quad \begin{array}{l} A = 0,00516 \\ B = 0,6 \\ R_c = G_{r_c} \cdot P_{r_c} \end{array}$$

5. Coefficient d'échange thermique par évaporation

$$h_{evap} = f_5 (\theta, \theta_2, d) \frac{A' v_c R_c^{B'} \lambda_m}{d} \quad \begin{array}{l} A' = 2,77 \\ B' = 0,34 \\ R_c = G_{r_c} \cdot P_{r_c} \end{array}$$

6. Coefficient d'échange thermique par convection forcée entre plan noir et film d'eau de ruissellement

$$h_{rpa} = f_6 (\theta_1, \theta_2, \bar{U}) = \frac{A \cdot R_{rpa}^B P_{r_c}^C \lambda_e}{D} \quad \begin{array}{l} A = 0,664 \\ B = 0,5 \\ C = 0,33 \end{array}$$

FIGURE 4

## EXAMEN DE L'ORGANIGRAMME (figure 5)

La structure de notre programme est des plus simples. Il ne comporte en effet que deux boucles imbriquées.

1.° La première boucle, qui est une boucle temporelle, représente l'écoulement d'une journée. Nous avons arbitrairement choisi de faire débiter le jour au lever du soleil. Dans un premier temps la fin de cette boucle est la tombée de la nuit, mais nous avons prévu d'étudier le cas de la distillation nocturne par la restitution des calories contenues dans le socle.

2.° Une boucle d'espace qui va nous permettre de suivre l'écoulement du condensat sur toute la longueur du distillateur, et cela par pas de longueur DX.

Examinons maintenant le fonctionnement de notre programme. Dans la première tranche, nous connaissons la température d'entrée de l'eau ainsi que le flux solaire utile. Nous pouvons donc donner une première évaluation de la température de l'eau. A partir de cette première évaluation, nous pouvons calculer les autres températures intermédiaires jusqu'aux limites qui elles sont connues, et nous retournons ensuite à la température de l'eau de ruissellement. Si cette température est égale ou très proche de la première évaluation, nous arrêtons notre calcul ; sinon, nous réitérons. Pour la tranche suivante, nous pourrions calculer la température d'entrée et nous recommencerons jusqu'à l'extrémité du distillateur. Puis nous refaisons une nouvelle boucle de temps.

En fin de journée, l'ordinateur a stocké la quantité totale d'eau distillée, la puissance nécessaire à cette fin, la puissance incidente sur le distillateur, et la puissance absorbée réellement par le corps noir. On peut en tirer alors les rendements qui nous intéressent. Soient l'efficacité interne moyenne, qui est le quotient de l'énergie nécessaire à la distillation par l'énergie ayant réellement atteint le corps noir, et l'efficacité globale moyenne, qui est, elle, le quotient de l'énergie nécessaire à la distillation à l'énergie solaire incidente. En comparant ces deux valeurs on peut d'ailleurs atteindre le rendement optique de notre système.

Nous sortons aussi la quantité d'eau effectivement distillée par  $m^2/\text{jour}$ .

A ce propos, et pour conclure, il conviendrait de faire une remarque qui a son importance. En effet, si pour un distillateur statique la notion de surface est primordiale, il n'en est rien pour un distillateur à ruissellement. Dans le cas d'un distillateur à ruissellement, c'est la distance parcourue par l'eau qui devient essentielle.

ORGANIGRAMME GÉNÉRAL

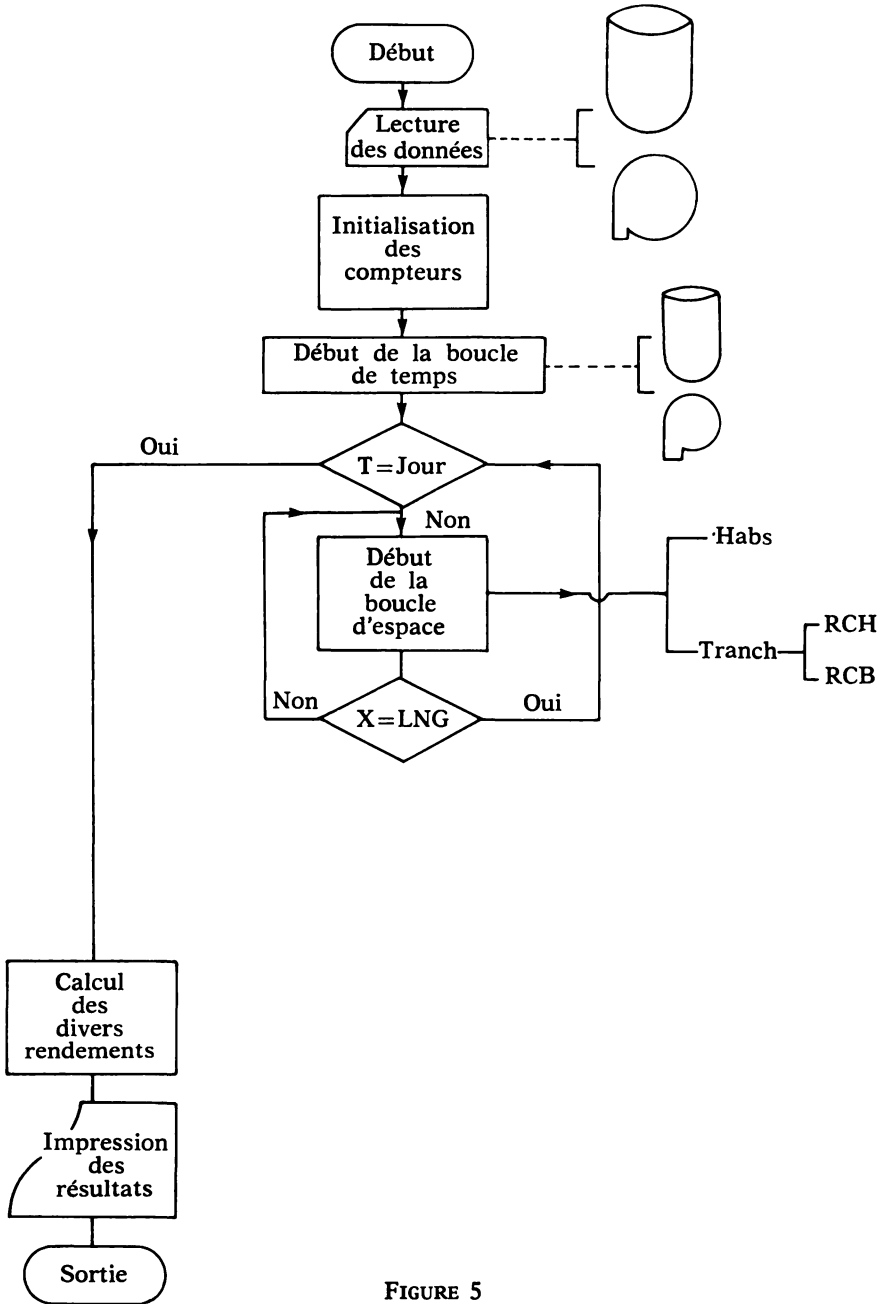


FIGURE 5

Ainsi, on peut très bien concevoir deux distillateurs à ruissellement, de même surface de même inclinaison, mais de longueurs d'écoulement différentes, et on s'aperçoit que le plus long est le loin le plus efficace. Il conviendrait donc de définir une quantité d'eau distillée par mètre linéaire pour les distillateurs à ruissellement.



**UTILITZACIÓ DE TÈCNIQUES LLEUGERES  
EN LA CLIMATITZACIÓ ARTIFICIAL**

per

**E. PUJOL**

**TELSTAR, S. A., Terrassa, Barcelona**

## RESUM

Perspectives de la utilització massiva de sistemes de climatització artificial que comportin una relació energia/cost òptima. En particular es tracta del sistema d'obtenció de «fred» per mitjans no mecànics (compressor), sinó utilitzant tècniques de re-fredament evaporatiu i d'absorció del vapor d'aigua.

També hi serà tractat el sistema d'absorció per generadors escalfats amb concentradors solars «Fresnel».

## SUMMARY

Prospective studies for the massive utilization of artificial climatization systems that would bring an optimum relation energy/cost are discussed.

Particular attention is paid on systems working without mechanical parts like compressors that means working with evaporation and absorption techniques to produce cooling. Absorption system working with solar generators by means solar energy concentration with Fresnel lenses will be also discussed.

La utilització de superfícies habitades és pràcticament impossible sense fer-hi una climatització completa.

El desequilibri que es produeix en els habitatges «compactes» en què les càrregues són degudes a l'ocupació, il·luminació artificial, etcètera fa indefugible de modificar-hi les condicions tèrmiques de l'aire d'una manera adient.

La definició del grau de confort mínim, hom el situa a temperatures compreses entre 18 i 26°C. Per a arribar a aquests graus, caldrà, doncs, o bé absorbir o bé cedir calor a l'aire en funció de les condicions exteriors.

Ultra això, i per a complicar encara més el problema al tècnic en climatització, els edificis d'elevada càrrega superficial tèrmica són cada vegada més «tèrmicament oberts», és a dir, amb tancaaments poc aïllants, per la qual cosa els efectes de l'exterior resulten més evidents dintre.

Si bé hem arribat al punt en què ja disposem de totes les eines tècniques al nostre abast per a obtenir qualsevulla temperatura, ens veiem, per necessitats de concepte, motivats a emprar sistemes que no consumeixin grans quantitats d'energia.

És evident que l'aïllament tèrmic passiu, els sistemes de reflexió solar a les façanes, etc., han donat bons resultats en la compensació de les aportacions de l'exterior. Però les càrregues interiors esdevenen tot un altre problema.

El sistema de climatització «pesant» demana la utilització de sistemes de refrigeració mecànica, amb compressors cars, complicats i de baix rendiment termodinàmic global, així com la utilització d'un mitjà portador de calor, com ara gasos que demanen instal·lacions de fabricació complexes i perilloses.

La calefacció demana cremar derivats del petroli amb sistemes cars, complexos i no sempre fàcils de regular per tal d'evitar l'emissió de contaminants a l'atmosfera.

L'alternativa que avui vull introduir és la de repensar tot el concepte de les instal·lacions de climatització per fer-les més racionals, simples i econòmiques en «energia» i no tan solament que gastin menys energia, sinó també que aquesta tingui una procedència fàcilment controlable.

Pensem que una instal·lació de climatització convencional consumeix de l'ordre de 0,05 CV/m<sup>2</sup> de superfície habitable. L'experiència assolida en tècniques lleugeres fa pensar que aquest valor pot ésser reduït fins a una desena part, tot eliminant els sistemes de compressió.

Les possibilitats tècniques no són gaire nombroses. Podem pensar a servir-nos dels sistemes d'absorció, ja coneguts en les tècniques de refrigeració. És una solució que cal tenir en compte, però tenim al nostre abast tècniques molt més senzilles i fins i tot més «instintives» des d'un punt de vista tècnic.

Què entenem, doncs, per climatització? En definitiva, la climatització és tot procediment que permet de modificar la temperatura de l'aire, d'ajustar la humitat al grau necessari i d'assegurar l'entrada al lloc de climatització d'una part d'aire de ventilació a fi de mantenir el grau d'oxigen en proporcions raonables.

Veiem, doncs, que en el fons el problema es redueix a modificar la temperatura de l'aire, ja sia per absorció o bé per cessió de calor.

Vegem primer el sistema de «cedir» calor a l'aire a fi d'augmentar-ne la temperatura.

Evidentment, en sistemes clàssics cremem combustibles líquids o gasosos o bé utilitzem energia elèctrica, dissipada en efecte Joule. Si considerem que els sistemes de conversió fototèrmica ja són prou a punt com per a pensar-ne la utilització sistemàtica, podrem fer un desglossament fonamental:

- a) Sistemes de temperatura moderada: aquests són les plaques planes que permeten d'obtenir temperatures de l'ordre dels 60°C i rendiments de 400 W/m<sup>2</sup>.
- b) Sistemes de temperatura mitjana. Ací hom aprofita l'efecte concentrador d'un sistema de FRESNEL, fent pujar la temperatura del mitjà portador de calor fins a prop de 130° C i amb rendiments de l'ordre de 1.800 W/m<sup>2</sup>.
- c) Sistemes d'alta temperatura que citem de memòria i que no són utilitzats en climatització. Són els anomenats forns solars que permeten d'arribar al voltant de 4.000° C.

Tots els sistemes de calefacció es basen en circuits clàssics, és a dir: d'un captador, un sistema d'acumulació en la fase de líquid, un sistema de tubs amb una bomba de recirculació i un sistema de regulació i de control.

El fluid emprat podrà ésser aigua o un altre qualsevol en funció de la finalitat a aconseguir.

La pressió de servei també podrà ésser l'atmosfèrica o bé la de saturació del vapor del líquid, si hom treballa a una temperatura superior a la d'ebullició normal. Tenim, doncs, assegurat el manteniment «cap avall» de la temperatura de l'aire. Veurem, doncs, la manera de limitar-la cap amunt, tot refredant-lo. Ací el problema ja és més complex. Les solucions hi són, i en parlarem.

Pensem que la base de tot sistema d'absorció de calor que no empli tècniques pesants és la utilització sistemàtica de l'elevada calor de vaporització de l'aigua.

En efecte, l'aigua és el mitjà «rècord» que tenim al nostre abast. La seva calor estàndard, de l'ordre de les 600 kcal/kg, permet de rebaixar la temperatura per mitjà de vaporitzacions adiabàtiques.

Aquesta propietat de l'aigua pot ésser utilitzada tant per a fer-la autorefredar, com per a refredar l'aire que hi és en contacte.

Parlarem, doncs, dels dos processos fonamentals:

#### A) *Refredament evaporatiu de l'aigua*

Aquest procediment és emprat sistemàticament per a rebaixar la temperatura de l'aigua en sistemes de refredament, en circuit obert. Les unitats són clàssiques i es denominen «torres de refredament».

El principi bàsic és de fer circular una fina pluja d'aigua contra un corrent d'aire normalment forçat amb un ventilador. Una part d'aigua, del 2 al 4 %, és evaporada, i refreda la resta d'aigua. Aquesta aigua pot ésser reutilitzada.

Si prenem una torre convencional, i prenem aire d'entrada a 30°C, 45 % HR, la TH de saturació és de 21°C. La majoria de torres «s'apropen» uns 3°C. L'aigua de sortida de la torre serà al voltant de 24°C. Si prenem un clima molt sec i càlid de 33°C, 15 % HR, la temperatura de sortida de l'aigua serà de 19°C.

En tot cas, aquesta aigua és molt difícil de fer servir com a refredador, si es tracta de climatització, perquè la seva temperatura és encara massa alta. La podem fer servir com a aigua de procés, per a refredar unitats que cedeixin calor.

#### B) *Refredament evaporatiu de l'aire*

Si prenem el mateix cas i el considerem des de la banda de

l'aire, veiem sobre el diagrama psicromètric que, a més de saturar-se en vapor d'aigua, la temperatura de l'aire ha baixat.

Prenguem unes condicions desèrtiques de l'ordre de 33°C i 15 % HR. Per simple vaporització d'aigua arribarem a fer baixar la temperatura de l'aire fins a 16°C.

Si prenem unes condicions interiors de 25°C i 58 % RH, tindrem un salt de temperatura de l'aire de 9°C.

La quantitat de calor absorbible és de

$$Q = 9^{\circ}\text{C} \times 0,3 \text{ kcal} \times (\text{m}^3 \times ^{\circ}\text{C})^{-1} \times 1 \text{ m}^3 = 2,7 \text{ kcal/m}^3$$

Comparem-ho amb un procediment normal:

Per a absorbir 3.000 kcal/hora la potència és de l'ordre de 750 W. Per a absorbir 3.000 kcal/h per refredament evaporatiu, ens caldrà moure 1.111 m<sup>3</sup>/hora, cabal que demana una potència de ventiladors de vora 80 W.

80 contra 750, la relació de consum és d'1 a 9,3

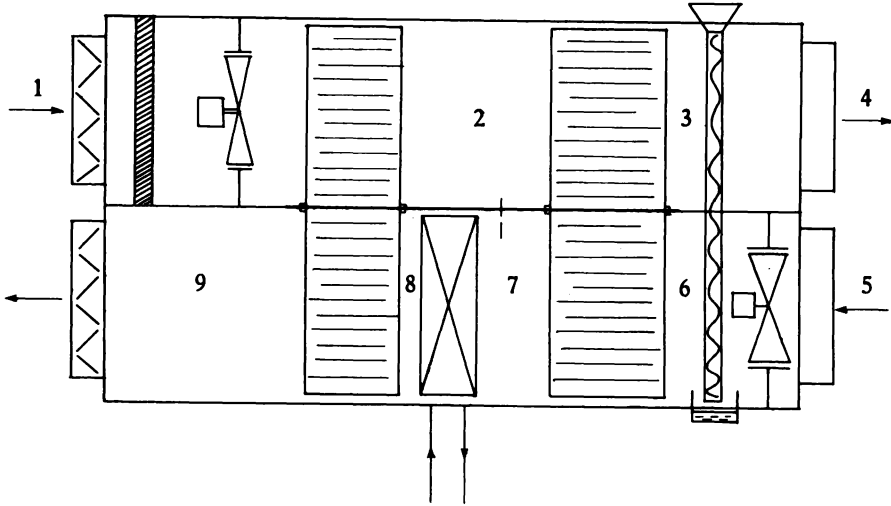
Ara, aquest procés és només utilitzable en climes secs. Si prenem les condicions de Barcelona, és a dir, 31°C, 69 % HR, per evaporació, l'aire pot ésser refredat fins a 26°C. Si l'introduïm fins al local i el deixem escalfar fins a 28°C, la humitat serà de l'ordre del 83 % HR. Això ja és fora de totes les condicions de confort usuals.

Veurem que ja tenim solució per a aquest problema, i sense fer ús de mitjans «durs».

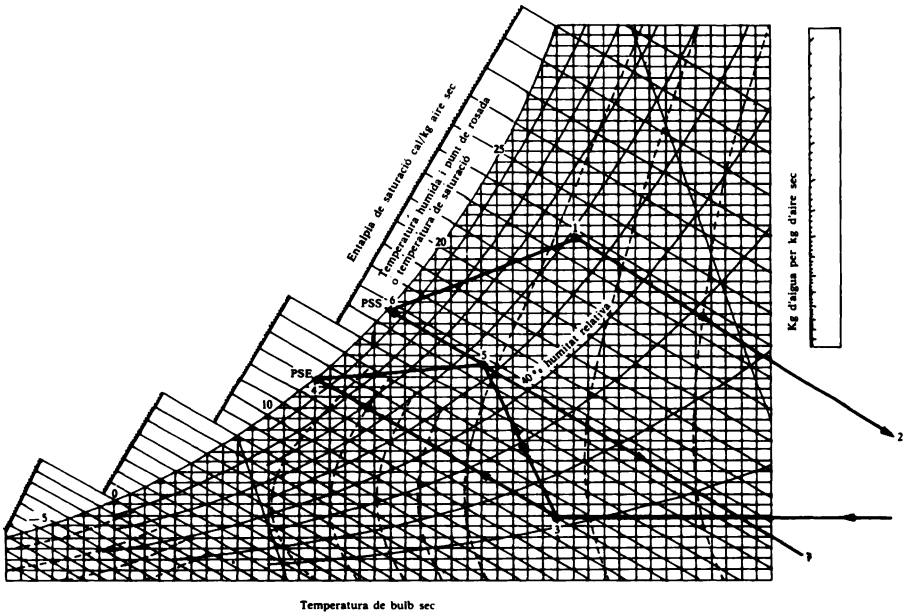
Cal fer menció aquí que el sistema de climatització per refredament evaporatiu pot ésser instal·lat i de fet s'installa a moltes zones del centre dels EUA, i més a prop tenim l'experiència del govern algerià que ha desenvolupat «climatitzadors compactes» que per mitjà d'aquest sistema climatitzen hospitals, locals públics i fins i tot habitatges, a un cost de primera instal·lació de l'ordre d'1/3 del sistema convencional i a 1/12 respecte al cost de manteniment.

Ja hem vist les limitacions que tenim, i ara veurem què podem fer-hi. La història del procediment és ja llunyana i la introduïrem a tall d'anècdota. Pels anys trenta, el govern suec va cercar un procediment simple de limitar el grau d'humitat en zones tancades. En efecte, el govern de Suècia té grans magatzems subterranis de material estratègic que cal que sigui conservat a humitat baixa. El concurs corresponent fou guanyat per Carl MUNTERS amb un procediment que després ha demostrat tenir moltes més aplicacions.

Hem vist que la limitació que teníem era l'elevada humitat de l'aire. Si podem eliminar-ne una part, podrem refredar més l'aire introduït.



ESQUEMA UNITAT SECS 2.200 m<sup>3</sup>/hora



Temperatura de bulb sec

El procediment descrit per MUNTERS consisteix a absorbir la humitat de l'aire sobre un medi de clorur de liti i després regenerar-lo per un corrent d'aire rescalfat. El medi és disposat sobre un tambor rotatori i per aquesta raó procés i regeneració es fan d'una manera contínua.

Basant-se en aquest principi, hom ha desenvolupat una unitat de climatització que descrivim:

L'aire de l'exterior, calent i humit (1), passa per una primera «roda», on la seva humitat baixa fins a vora de 3 g/kg (2). Pel fet de la deshidratació la temperatura de l'aire puja fins a vora de 60°C.

Després passa per una segona roda on la temperatura és abaixada fins a vora de 29°C (3), per bescanvi amb l'aire de sortida.

A partir d'aquest punt i per humidificació, la temperatura baixa fins a 13°C (4).

Ja podem, doncs, fer entrar en la zona l'aire tractat (condicions: 24°C, 55 % HR).

A la sortida humidifiquem l'aire fins a saturació i rebaixem així la temperatura fins a 17,5°C (6). Aquesta font de fred és utilitzada a la segona roda.

Després l'escalfem fins a 80°C, per mitjà d'un sistema de col·lector Fresnel (8).

L'aire rescalfat passa per la primera roda i elimina la humitat dipositada per l'aire d'entrada.

L'aire que surt del sistema, és aproximadament en unes condicions de 8°C i 60-80 % HR (9).

Hem vist, doncs, que la unitat pot enviar aire a 13°C sense fer ús de cap mitjà mecànic.

Un dels constructors d'equips d'aquest tipus féu construir un xalet doble, l'una part proveïda d'un sistema convencional, i l'altra, d'un sistema lleuger.

La relació de potència absorbida és d'1 a 8, i el xalet lleuger no necessita cap més instal·lació que la unitat de tractament i un col·lector solar Fresnel de 70 m<sup>2</sup>. La potència absorbida és de l'ordre d'1 CV. Amb aquesta unitat hom assegura la climatització en tota època de l'any sense més font que aquest forniment elèctric modest.

Sembla plausible de pensar que aquestes unitats seran disponibles al mercat d'aquí a dos o tres anys, salvant naturalment la barriera que representen els fabricants d'unitats convencionals i que,



de moment, barren el pas mantenint preus molt inferiors als raonables, fins que arribin a uns acords amb els grups tècnics que han desenvolupat aquest procés.

Veiem, doncs, que el tècnic en climatització ja tindrà la possibilitat de fer instal·lacions racionals, tot assegurant un confort raonable a un preu energètic pràcticament nul.



**LA SERRE SOLAIRE**

par .

**P. DENIS, P. JOURDAN**

**Centre d'Études Nucléaires de Grenoble  
Laboratoire de Méthodes Nouvelles de Mesures de Rayonnements  
Grenoble, France**

et

**J. P. CHIAPALE, J. DAMAGNEZ**

**Institut National de Recherche Agronomique  
Station de Bioclimatologie  
Centre de Recherches Agronomiques d'Avignon, France**

## **RÉSUMÉ**

- a)* Effet du rayonnement infrarouge sur les plantes.
- b)* Filtrage de l'infrarouge et stockage de la chaleur issue du filtrage.
- c)* Chauffage nocturne effectué au moyen du stock.

## **RESUM**

- a)* Efecte de la irradiació infraroja sobre les plantes.
- b)* Filtració de l'infraroig i emmagatzemament de la calor provinent de la filtració.
- c)* Escalfament nocturn per mitjà de l'energia emmagatzemada.

## **SUMMARY**

In the paper several factors upon plants are presented namely:

- a)* Effect of infrared irradiation upon plants.
- b)* Filtration of the infrared, and storage of the resulting energy.
- c)* Nocturnal heating by means of the stored energy.

Le spectre solaire s'étend, pour des énergies non négligeables, de 0,3 à 3 $\mu$ . Il est formé de trois parties: le rayonnement ultraviolet, qui, en énergie, ne représente que 5 % du total; le visible, environ 45 %; l'infrarouge, 50 % (figure 1).

Les plantes vertes fixent le carbone contenu dans le CO<sub>2</sub> atmosphérique au moyen de la fonction chlorophyllienne, pour laquelle l'énergie contenue dans un certain nombre de bandes spectrales est nécessaire. Or ces bandes sont toutes situées dans le proche ultraviolet et le visible. La partie infrarouge du spectre solaire est convertie en chaleur, elle crée un réchauffement de la plante et provoque l'évapotranspiration de celle-ci. Si l'énergie solaire infrarouge absorbée est trop importante, la plante flétrit et ferme ses stomates pour éviter la perte d'eau. Cette contrainte limite la croissance de la culture et si l'échauffement est trop important, le flétrissement est irréversible et la plante meurt.

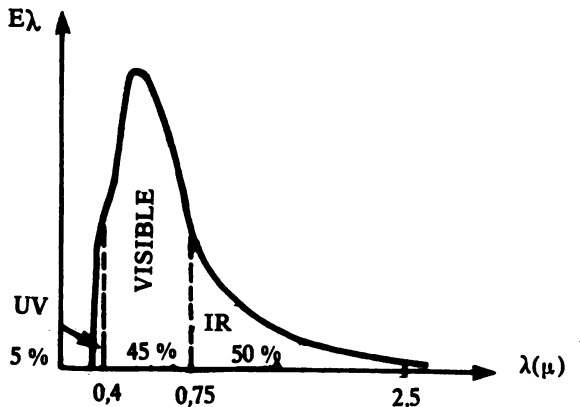


FIGURE 1. Répartition spectrale de l'énergie solaire incidente.

## I. LA SERRE ET SON EFFET

La serre isole la plante de l'espace ambiant. Son rôle est de créer un microclimat autour de celle-ci.

Durant la nuit, la serre protège la plante du froid et maintient sa température au-dessus de la valeur critique inférieure qui lui est propre.

Par contre, durant la journée, le rôle de la serre est plus complexe. Elle doit laisser passer le plus possible de lumière visible et ultraviolette qui contiennent les longueurs d'ondes nécessaires à la fonction chlorophyllienne. La partie infrarouge crée un échauffement, généralement trop élevé, de la plante. Il s'ensuit une consommation d'eau très importante de celle-ci et un danger au cas où sa température dépasserait une valeur limite. Il faut alors refroidir la plante, ce qui est généralement réalisé par ventilation, soit naturelle au moyen d'ouvrants, soit artificielle au moyen de ventilateurs prenant l'air à l'extérieur de la serre.

De plus, une remarque importante s'impose. En absence de ventilation forcée, les mouvements de l'air restent peu importants sous une serre et la plus grande partie des échanges thermiques se font par radiation. La température de la plante est fortement liée à la température radiative de son couvert et à la température radiative du sol; ceux-ci sont eux-mêmes liés par radiation également. Il s'ensuit que la température du végétal est à peu près indépendante de la température de l'air sous la serre, phénomène qui explique bien le gouffre énergétique provoqué par le chauffage par aérothermes.

## II. CONCEPTION D'UNE SERRE RATIONNELLE

De ce qui précède, on peut conclure que la commande de la température d'un végétal doit être faite par radiation en pilotant la température du couvert et celle du sol.

La couverture de la serre doit laisser passer au mieux le rayonnement visible et ultraviolet; par contre, dès  $0,75\mu$ , elle doit arrêter l'infrarouge. Il faut donc filtrer la lumière incidente. Le filtrage convertit en énergie thermique la plage énergétique, située entre  $0,75$  et  $3\mu$ , du spectre solaire.

Puisque l'énergie thermique est chère, il est tout indiqué de stocker cette énergie et de la réutiliser la nuit pour «chauffer» la serre.

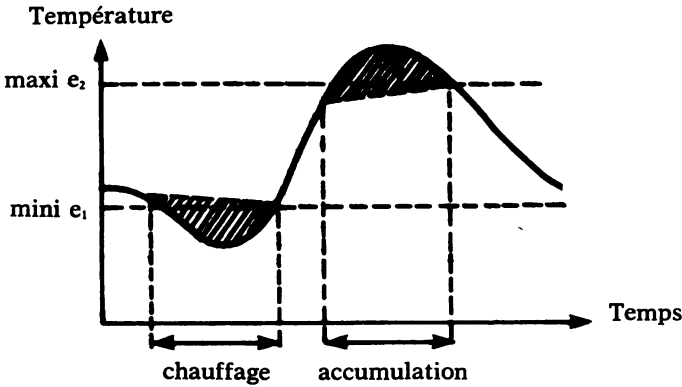


FIGURE 2. Évolution de la température de la paroi de la serre.

Si on réalise une serre ayant ces caractéristiques, elle présentera les avantages suivants:

1.° Pas de contrainte thermique exercée sur la plante lorsque le soleil brille à l'extérieur de la serre, partant, une diminution des charges de ventilation et une diminution également de la consommation d'eau. Celle-ci peut atteindre de 60 à 70 % par rapport aux besoins hydriques de pleine terre.

2.° Restitution par radiation pendant la nuit de calories stockées durant le jour. Si la réserve de calories est insuffisante, il est possible de brancher un chauffage d'appoint utilisant le même circuit de distribution. L'eau chaude peut également être renvoyée dans des gaines plastiques au sol et la double paroi de l'enceinte utilisée à fin d'isolation thermique (figure 2).

### III. LA SERRE SOLAIRE

Certes, toutes les serres sont solaires; mais par ce vocable, nous entendons une serre utilisant rationnellement l'énergie solaire. Combinant les diverses remarques faites plus haut, nous arrivons au schéma suivant (figure 3):

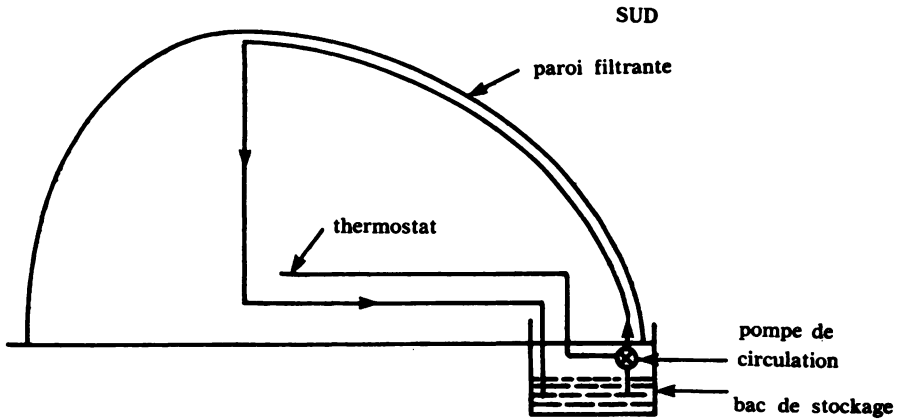


Figure 3

Une serre constituée d'une enveloppe à double paroi. Entre les deux faces de cette enveloppe, circule un liquide caloporteur. La partie infrarouge du spectre solaire est arrêtée soit par les faces de la paroi qui constituent le filtre et qui cèdent les calories au liquide, soit par le liquide qui est lui-même filtrant, soit une combinaison des deux systèmes.

Le liquide caloporteur issu du bac de stockage arrive aux panneaux filtres recouvrant la serre par une conduite et retourne au bac de stockage par une autre conduite. Lorsque le soleil brille, le liquide s'échauffe et entraîne la montée en température du bac. Durant la nuit, au moment où le chauffage de la serre est nécessaire, le fluide caloporteur est remis en circulation. Il chauffe le couvert qui rayonne sur la plante ou est envoyé dans des gaines plastiques disposées au sol.

Une mesure de la température de la plante commande l'arrêt et la mise en marche de la circulation du fluide caloporteur. Au cas où les conditions météorologiques sont défavorables, un chauffage d'appoint fournit les calories nécessaires au fluide caloporteur.

L'absence de condensation contre la face interne du couvert permet si besoin est de contrôler l'humidité relative de l'air sous la serre.



## IV. RÉSULTATS

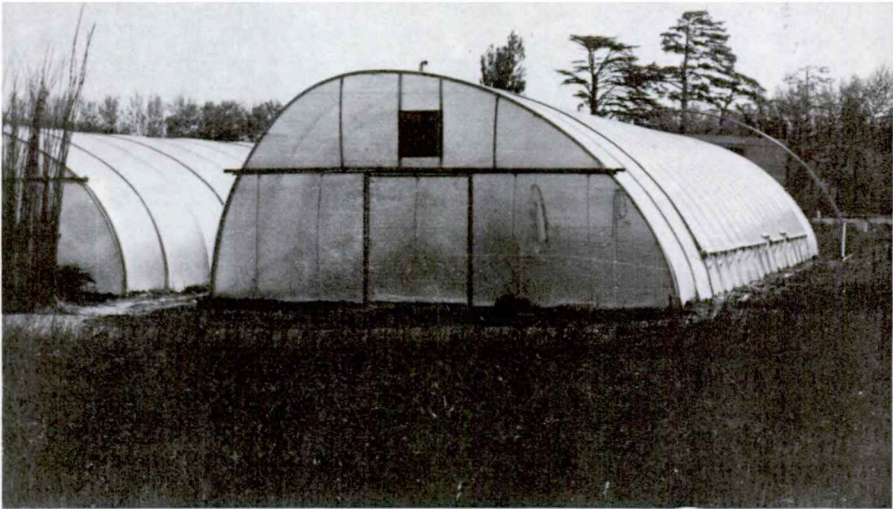
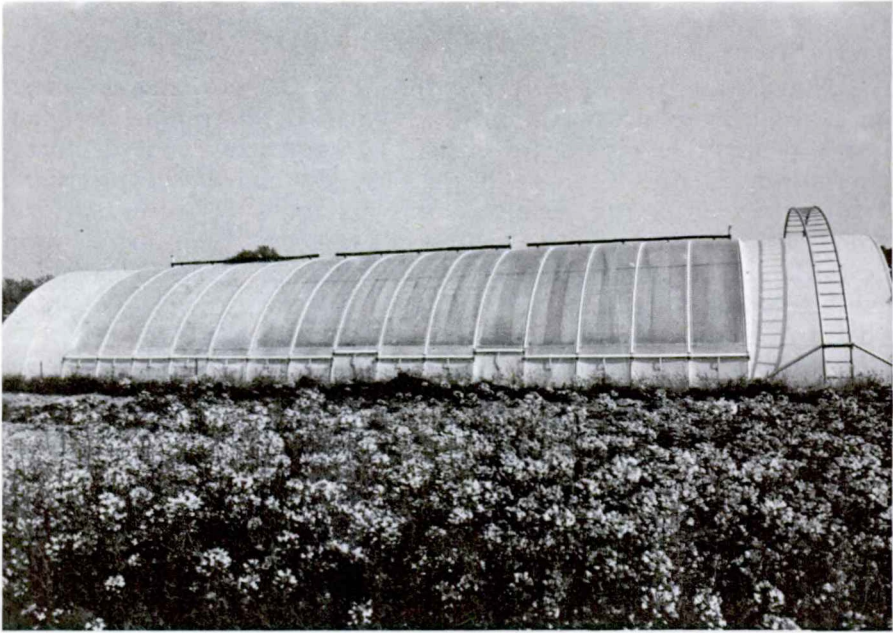
Nous avons réalisé un prototype de 150 m<sup>2</sup>, orienté est-ouest, de façon à avoir un maximum de rendement thermique des panneaux pendant la période hivernale. Les panneaux sont de méthacrylate de méthyl. Le reste de la serre est couvert de plastique. Trois filtres différents, répartis sur trois zones de même surface, ont été utilisés. De l'eau, une solution de CuCl<sub>2</sub> à 1 % et une solution de CuCl<sub>2</sub> à 2 %. La longueur d'onde de coupure de ces trois filtres est différente; il importait de connaître l'effet du point de coupure du filtre sur le comportement de la plante.

Les photos 1 et 2 donnent une idée de la face et de la coupe de la serre. La photo 3 a été prise avec une culture de tomates, et la photo 4, prise sous une serre annexe, montre les bacs de stockage et certains équipements annexes regroupés pour la commodité des mesures. La température du fluide stocké étant relativement basse, l'isolation thermique est très rudimentaire.

Lors des premiers essais, les économies suivantes de chauffage ont été réalisées (figure 4):

	Hiver nov. déc. janv.	Printemps fév. mars. avril	Été
Énergie solaire reçue Kcal·m <sup>-2</sup> ·jour <sup>-1</sup>	1 500	3 200	5 700
Énergie stockée Kcal·m <sup>-2</sup> ·jour <sup>-1</sup>	600	1 300	2 300

FIGURE 4



PHOTOS 1 et 2. Vue générale de la serre.



PHOTO 3. Culture de tomates.

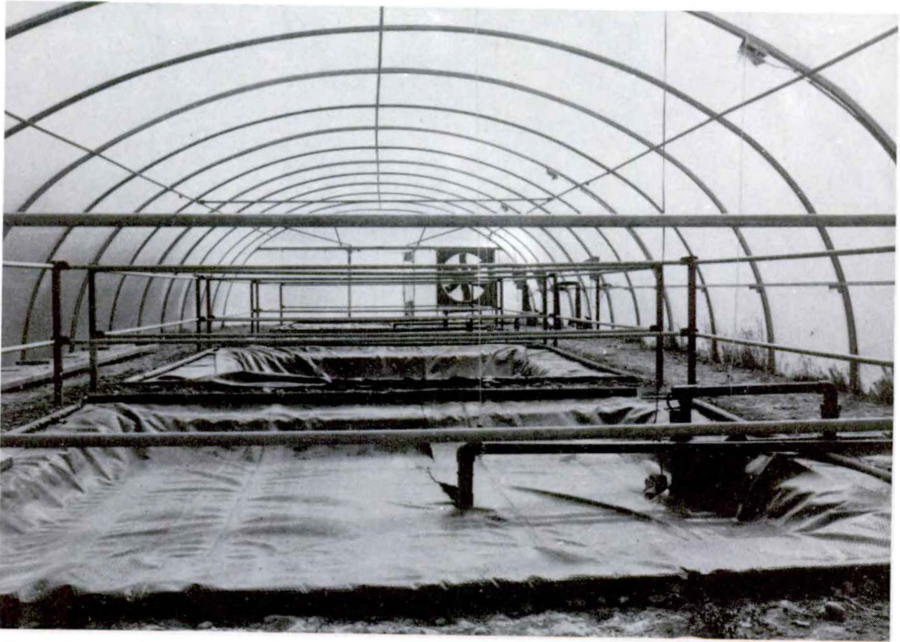


PHOTO 4. Bacs de stockage.

**ÉTUDE THÉORIQUE DU CHAUFFAGE DES GAZ PAR  
RAYONNEMENT SOLAIRE À HAUTES TEMPÉRATURES**

par

**GABRIEL OLALDE, A. SUWONO, J. L. PEUBE, M. DAGUENET**

Laboratoire C.N.R.S. d'Energétique solaire, Odelló, France  
Laboratoire de Thermodynamique et Energétique du Centre  
Universitaire de Perpinyà, France

## **RÉSUMÉ**

On étudie le chauffage des gaz par rayonnement à hautes températures à travers d'un matériau poreux. On calcule analytiquement et numériquement la distribution des températures dans le fluide et le matériau solide.

## **RESUM**

Hom estudia l'escalfament dels gasos per irradiació a altes temperatures a través d'un material porós. Hom calcula analíticament i numèricament la distribució de les temperatures en el fluid i en el material sòlid.

## **SUMMARY**

The heating of gases by means of high temperature irradiation through a porous material, is studied.

Distribution of temperatures in the solid material and in the fluid are numerically and analytical computed.

## 1. INTRODUCTION

Nous étudions le problème du chauffage d'un gaz non absorbant dans un flux radiatif concentré fourni par le foyer d'un four solaire.

Une telle étude trouve son intérêt aussi bien en chimie (par exemple pour la production d'hydrogène) qu'en thermodynamique (par exemple pour les centrales hélioélectriques).

Les gaz sont, en général, peu absorbants, de sorte que nous les faisons traverser un milieu poreux qui leur offrira une grande surface de contact. En pratique, nous plaçons une des faces du milieu poreux devant le foyer et nous établissons un courant de gaz à travers cette surface. Le gaz se réchauffe à l'intérieur du milieu poreux.

Nous supposons que le gaz est transparent au rayonnement et traverse un lit granulaire homogène contenu dans un récipient de section suffisante pour que les effets des parois latérales puissent être négligeables. Nous supposons aussi le régime permanent, les propriétés physiques constantes, le flux de gaz dirigé dans le même sens que le flux de chaleur (figure 1).

## 2. MISE EN ÉQUATIONS ET RESOLUTION DU PROBLÈME

Il faut résoudre le système différentiel suivant:

— pour le fluide

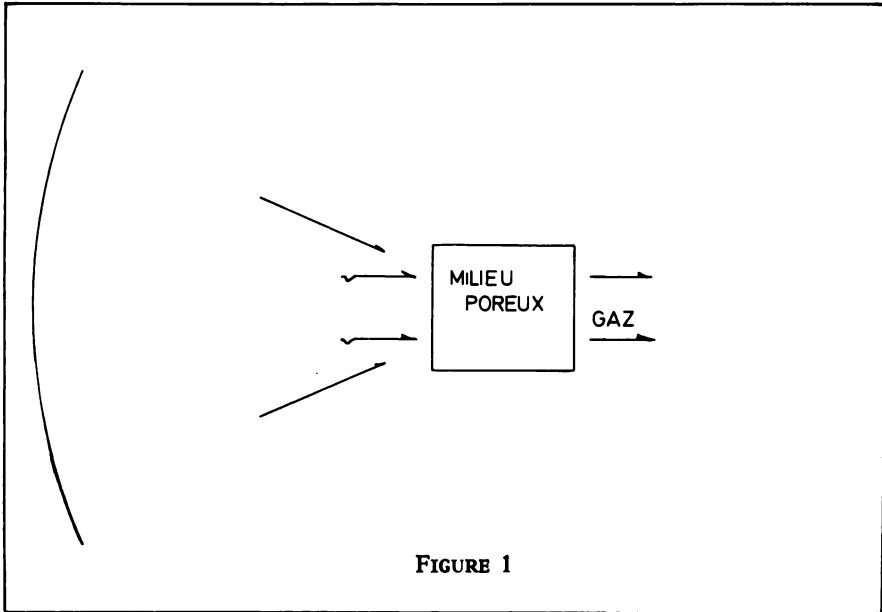
$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \frac{\alpha}{\xi C_p \rho u} (T - \theta) + \frac{\lambda_F}{C_p \rho u} \frac{d^2\theta}{dx^2}, \quad (1)$$

où

$\theta$  = température du fluide

$T$  = température du solide

$\epsilon$  = parasite



$\xi$  = longueur caractéristique

$S$  = aire de la section droite du lit

$C_p$  = chaleur spécifique du fluide à pression constante

$\rho$  = densité

$\mu$  = vitesse moyenne d'écoulement

$\alpha$  = coefficient moyen de convection du fluide aux corpuscules solides

$\chi$  = cote comptée à partir de la section d'entrée

$\lambda_F$  = conductibilité thermique du fluide

— pour le solide:

$$\lambda_s^* \frac{dT}{dX'} = \frac{\alpha}{\xi} (T - \theta), \quad (2)$$

où

$\lambda_s^*$  = représente la conductivité apparente du milieu avec les conditions aux limites:



$$X=0 \quad \theta=\theta_0 \quad \frac{dT}{dX} = -\frac{q_0}{\lambda_s^*} \quad \text{où } q_0 = \text{énergie nette}$$

$$X \rightarrow \infty \quad \theta_\infty = T_\infty.$$

Il est intéressant de rendre adimensionnel le système précédent [équations (1) et (2)].

Posons:

$$T^+ = \frac{T - T_\infty}{T_\infty}; \quad \theta^+ = \frac{\theta - \theta_\infty}{\theta_\infty}; \quad X^+ = \frac{X}{D};$$

$$P = \frac{C_p \mu}{\lambda_F}; \quad Nu = \frac{\alpha D}{\lambda_F}; \quad Re = \frac{D \mu \rho}{\mu}.$$

Il vient:

$$\frac{d^4 T^+}{dX^{+4}} - Pr Re \frac{d^3 T^+}{dX^{+3}} - 6 Nu \left( \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{\lambda_F}{\lambda_s^*} \right) \frac{d^2 T^+}{dX^{+2}} + 6 \frac{\lambda_F}{\lambda_s^*} Re Pr Nu \frac{dT^+}{dX^+} = 0; \quad (3)$$

$$\theta^+ = T^+ - \frac{\lambda_s^*}{6 \lambda_F Nu} \frac{d^2 T^+}{dX^{+2}}. \quad (4)$$

Cherchons une solution générale de  $T^+$  de la forme  $T^+ = e^{pX^+}$ . En utilisant la méthode de calcul numérique de BAIRSTOW il vient:

$$T^+ = \frac{q_0^+}{p} \exp(pX^+), \quad (5)$$

$$\theta^+ = \frac{q_0^+}{p} \left( 1 - \frac{\lambda_s^* p^2}{6 F Nu} \right) \exp(pX^+), \quad (6)$$

où  $p$  est la racine négative (qui seule a un sens physique) du système d'équations (3)-(4).

$$q_0^+ = \frac{q_0 D}{\lambda_s T_\infty},$$

$q_0$  étant la solution de l'équation

$$q_0^4 + \beta q_0^3 + \gamma q_0^2 + \delta q_0 - \frac{a p}{E \sigma} = 0.$$

Dans laquelle  
 $a$  = facteur absorption  
 $E$  = facteur émission  
 $q$  = énergie donnée  
 $\beta, \gamma, \delta$  = paramètres en fonction de  $Re, Nu$ , propriétés physiques du fluide et solide, température ambiante.

Nous représentons sur la figure 2 les variations de  $T^+$  et  $\theta^+$  lorsque  $Re=50$  et lorsque  $Re=100$ .

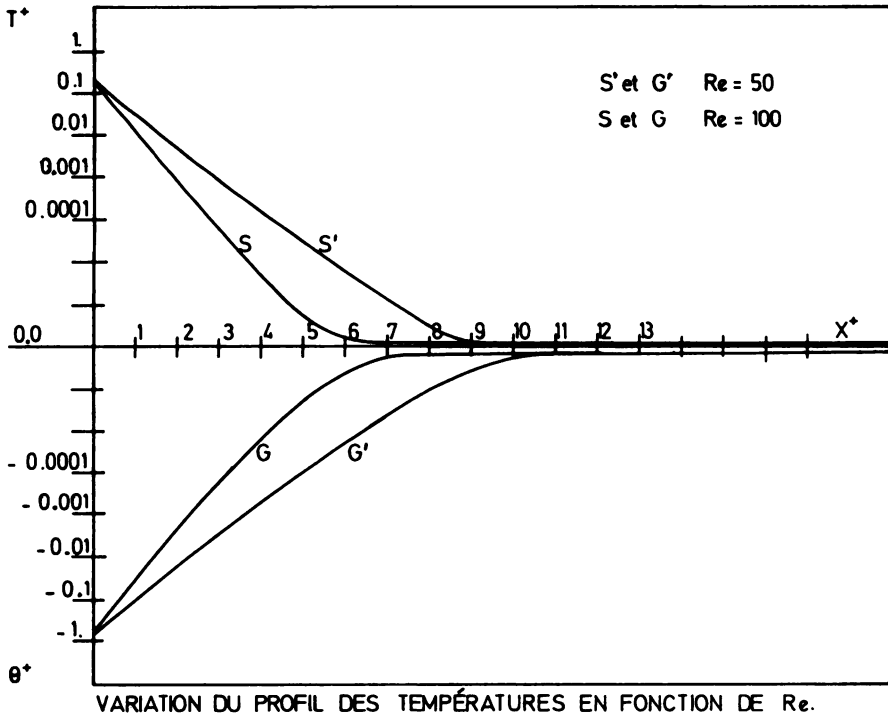


FIGURE 2

### 3. CONCLUSIONS

Nos calculs permettent, en principe, de déterminer les conditions expérimentales pour porter un gaz à une température donnée. En fait, en supposant le matériel poreux infiniment long, nous négligeons les pertes d'énergie par la face de sortie. Pour cerner de plus près la réalité, nous étudions actuellement le problème du chauffage du gaz dans un milieu poreux de dimension finie.

### BIBLIOGRAPHIE

1. J. D. VERSCHOOR, P. GREEBLER, «Heat Transfer by Gas Conduction and Radiation in Fibrous Insulations», *A.S.M.E.* August 1952.
2. B. LARVIN, S. CHURCHILL, «Heat Transfer by Radiation through Porous Insulations», *A.I.Ch.E. Journal*, December 1959.
3. DAIZO KUNI and J. M. SMITH, «Heat Transfer characteristics of porous rocks», *A.I.Ch.E. Journal*, Vol 7 March 1961.
4. Gerard CHARET, *Cours d'Analyse Numérique*, Société d'Enseignement Supérieur, 75005 Paris.
5. P. DUMBTZ, «Conductivité thermique des matériaux pulvérulents et granulaires», *R.G.T.*, n.º 55, Juillet 1966.



**OPTIMISATION DE L'UTILISATION DES CAPTEURS  
SOLAIRES**

par

**J. P. MADERN**

**SOFÉE, Perpinyà, France**

## **SUMMARY**

**With examples and data, the autor analyze the main factors on profit of solar energy using photothermic panels.**

## **RESUM**

**Hom analitza amb exemples i dades, els factors principals en l'aprofitament de l'energia solar mitjançant la utilització de panells fototèrmics.**

Pour pouvoir utiliser l'énergie solaire reçue sur un capteur, et l'utiliser au mieux de ses possibilités, c'est à dire en perdant le moins possible de l'énergie incidente, il est nécessaire:

- d'une part, de déterminer la puissance utile surfacique extraite du capteur (puissance qui dépend du rendement)
- d'autre part, de déterminer le niveau calorifique de l'utilisation recherchée.

*L'énergie incidente:* Je rappellerai ici la définition de Perrin DE BRICHAMBAUT.

L'éclairement énergétique solaire d'une surface réceptrice, comme son irradiation au cours de la journée, est directement lié à la position du soleil (hauteur angulaire et azimut) à l'instant considéré, ou à sa trajectoire diurne le jour envisagé. Interviennent ainsi particulièrement les paramètres caractéristiques:

- du lieu: la latitude  $\varnothing$
- de l'époque de l'année: la déclinaison du soleil  $\delta$

Par ciel clair, et pour une hauteur du soleil déterminée, les diverses composantes du rayonnement solaire sont définies par:

- le trouble atmosphérique ( $\beta$ )
- l'épaisseur d'eau condensable ( $w$ )
- la pression atmosphérique (altitude  $z$ )
- l'épaisseur réduite d'ozone ( $e$ )
- l'albédo du sol ( $\alpha$ )

Par ciel moyen, partiellement nuageux, ces divers facteurs deviennent secondaires par rapport à la quantité, à la répartition et aux types de nuages existants.

Nous sommes bien loin de disposer des valeurs exactes «in situ», heure par heure et jour par jour, et il nous faut nous contenter de moyennes qui, selon les moyens techniques dont nous disposons, peuvent être une valeur journalière ou une valeur mensuelle.

L'expérience nous a prouvé qu'au bout de 5 ans d'observations en un même lieu, on pouvait utiliser des chiffres mensuels qui étaient suffisants pour limiter à moins de 10 % l'erreur rapportée sur un an d'utilisation.

*Puissance surfacique:* L'excellente étude de l'Electricité de France sous la signature de Monsieur CHOUARD nous donne une méthode simple et pratique pour les capteurs plans à eau.

Il donne la formule suivante:

$$P_{\mu} = \alpha P - \beta (T_m - T_e),$$

avec

$P_{\mu}$ : puissance utile surfacique extraite par le fluide ( $W/m^2$ );

$P$ : flux solaire incident global ( $W/m^2$ );

$T_m$ : température moyenne du fluide dans le capteur ( $^{\circ}C$ );

$T_e$ : température d'air extérieur ( $^{\circ}C$ );

$\alpha$ - $\beta$ : coefficients traduisant les propriétés optiques du capteur et les pertes globales de celui-ci, coefficients fonctions de la géométrie de l'absorbeur, du débit du fluide, et des températures.

Le rendement  $\rho$  du capteur, égal par définition à  $\frac{P_{\mu}}{P}$ , peut donc s'écrire:

$$\rho = \alpha - \beta \frac{T_m - T_e}{P}.$$

Si  $P < \frac{\beta}{\alpha} (T_m - T_e)$ , le rendement  $\rho$  est négatif: les pertes du capteur deviennent supérieures au gain. On convient alors d'annuler le débit d'extraction du fluide afin de ne pas refroidir l'eau dans le capteur, et ainsi  $\rho = 0$  (figure 1). (Fonction de la régulation du circuit de captation solaire.)

L'expression complète du rendement que nous utiliserons est donc la suivante:

$$\text{Si } \alpha P - \beta (T_m - T_e) > 0: \rho = \alpha - \beta \frac{T_m - T_e}{P}.$$

$$\text{Si } \alpha P - \beta (T_m - T_e) \leq 0: \rho = 0.$$

La valeur du flux solaire  $P = \frac{\beta (T_m - T_e)}{\alpha}$  apparait comme un



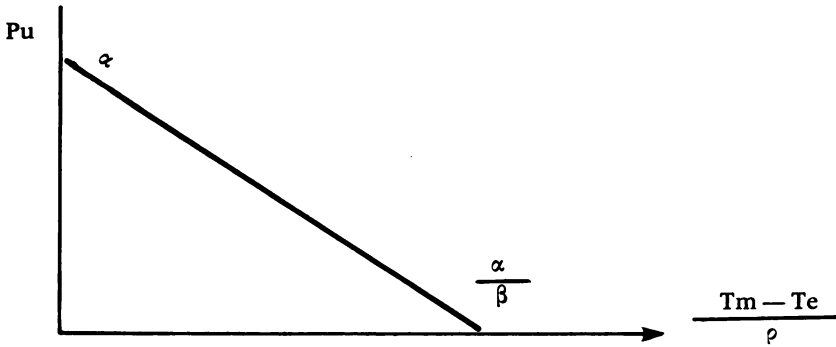


FIGURE 1. Puissance surfacique extraite d'un capteur solaire.

seuil en dessous duquel le rendement est nul quel que soit  $P$ . C'est ce caractère *essentiellement discontinu* du rendement instantané du capteur qui rend délicate l'évaluation d'un rendement mensuel (ou annuel) moyen, car le flux  $P$  varie au long de l'année dans de très larges limites.

La courbe de rendement du capteur est donc établie sur cette base, et après avoir fait varier les divers paramètres, on arrive à établir pour le capteur étudié une courbe unique qui, pour être approximative, est suffisamment exacte pour une utilisation directe par les thermiciens.

À titre d'exemple, nous reproduisons ci-dessous la courbe établie par les services EDF des Renardières pour un capteur SOFEE:

le chiffre  $\frac{\Delta T}{P}$  est établi de la façon suivante:

$$\frac{\text{Température entrée du fluide dans l'insolateur} + \text{température sortie de l'insolateur}}{2};$$

du chiffre obtenu on soustrait la température ambiante: on a la valeur  $\Delta T$ .

Le chiffre obtenu est divisé par l'énergie incidente  $P$ : on obtient un chiffre inférieur à l'unité qu'il faut multiplier par  $10^3$  pour obtenir un index compris entre 0 et 100.

Ce sont ces chiffres qui figurent en abscisses sur le tableau ci-joint. On rapporte donc le chiffre trouvé sur l'abscisse et au point

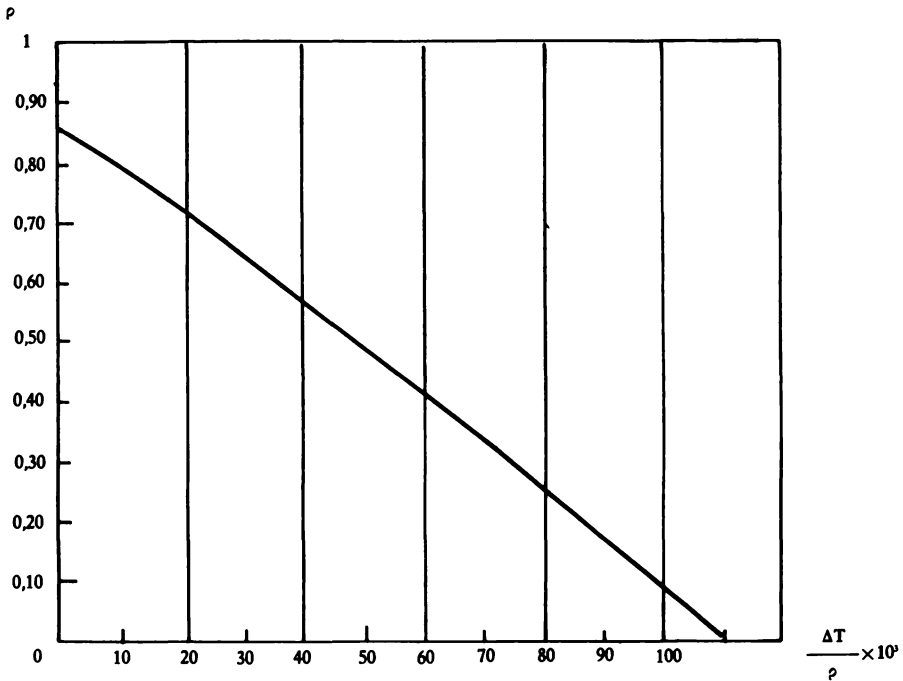


FIGURE 2

d'intersection avec la courbe on peut lire, en ordonnées, le rendement.

On s'aperçoit aussitôt que plus la température moyenne du capteur est proche de la température extérieure, plus le rendement est élevé.

Or, la température de sortie du capteur est conditionnée par la puissance de l'énergie incidente, la température d'entrée du fluide et la vitesse de passage d'eau dans le capteur.

L'énergie incidente est ce qu'elle est, nous n'y pouvons rien.

Par contre, nous pouvons jouer sur la température d'entrée de l'eau et le capteur. Notre but: obtenir une température de sortie compatible avec l'utilisation désirée.

*Eau chaude sanitaire:* Si nous désirons de l'eau chaude sanitaire à 50°C, il est évident que si nous sortons du collecteur à 70°C le rendement sera plus faible que si nous sortons à 50°C.

Nous devons donc étudier une vitesse de circulation de l'eau

dans le capteur qui soit basée sur la moyenne des valeurs de l'énergie incidente, chiffre corrigé par le rendement du capteur.

On étudie de façon précise le diamètre des canalisations, le débit de la pompe, les hauteurs manométriques, etc... tout ceci n'étant qu'un calcul classique de pertes de charge.

On joue en même temps sur la température d'entrée d'eau dans le collecteur; ici aussi il est bien évident que l'idéal est de faire rentrer l'eau dans le capteur à une température égale à la température ambiante.

C'est facile: il faut, soit dimensionner l'échangeur avec un  $\Delta T$  très important, 40 ou 50°C par exemple, soit tout simplement supprimer l'échangeur.

*Un exemple:*

Chauffe-eau à échangeur classique 10°C de  $\Delta T$ .

Sortie du capteur: 60° C; entrée: 50°C.

Température ambiante: 20°C.

$$\text{soit: } \frac{(60+50)}{2} - 20 = 35.$$

$$\text{Énergie incidente } 800 \text{ W/m}^2: \frac{35}{800} = 0,043 \times 10^3 = 43,$$

en rapportant 43 en abscisse nous lisons 52 % de rendement en ordonnée.

Chauffe-eau à échangeur large ou sans échangeur,

sortie du capteur: 60°C,

entrée: 20°C.

Température ambiante: 20°C,

$$\text{soit: } \frac{(60+20)}{2} - 20 = 20.$$

$$\text{Énergie incidente } 800 \text{ W/m}^2: \frac{20}{800} = 0,025 \times 10^3 = 25.$$

Nous lisons: rendement 67 %.

Ainsi avec un même capteur, pour une puissance de 900 W/m<sup>2</sup> nous recueillons:

- dans le 1.er cas       $800 \times 0,52 = 416$  Watts utiles
- dans le 2.ème cas     $800 \times 0,67 = 536$  Watts utiles

En chauffage central, il en est de même. Et c'est donc dans le choix des corps de chauffe qu'il faut ici être très prudent.

Selon la batterie de capteur installée et la vitesse de circulation d'eau choisie, on peut déterminer la température espérée de sortie des capteurs.

Si l'on travaille avec des radiateurs, on prédétermine celle-ci à 50°C. De même pour des convecteurs. Pour les grilles de sol, on peut descendre à 35°C. Mais attention: pour ces valeurs, toujours choisir une température de retour proche de 25°C si l'on désire chauffer l'ambiance de l'habitation à 20°C.

Si ces règles ne sont pas respectées, on n'optimise pas l'utilisation du matériel mis en oeuvre et le bilan de rentabilité s'en ressent.

### *Problèmes spécifiques*

Bien sûr, pour les chauffe-eau, des considérations d'ordre économiques entrent en jeu:

- a) un grand échangeur coûte plus cher qu'un petit ;
- b) sans échangeur le tartre peut boucher les circuits.

Autant d'affirmations infirmées par la technique, tant il est vrai que c'est le capteur solaire que coûte cher par rapport à l'échangeur et pour le tartre, les vrais spécialistes de l'eau utilisent depuis longtemps des procédés magnétiques qui semblent idéalement conçus pour les circuits de chauffe-eau solaires!

Bien sûr pour le chauffage central des considérations économiques et techniques entrent en jeu!

- a) Des corps de chauffe à  $\Delta T$  de 30°C coutent plus chers qu'à 10°C de  $\Delta T$ .
- b) Des stockages à zone froide sont délicats à concevoir.

Ici, aussi la réponse est simple: on ne fait des objections semblables que lorsqu'on n'est pas allé au fond du problème soit par manque d'application, soit par manque de connaissances.

Je vous demande de vous rapporter aux exposés techniques que j'ai fait en d'autres circonstances et notamment à l'École Polytechnique de Lausanne (Suisse).

### *Capteurs solaires*

Je ne voudrais pas terminer le présent exposé sans souligner que le capteur solaire lui-même est aussi à construire et à sélectionner selon l'utilisation recherchée.

Il n'y a pas de capteur solaire universel.

Dès le départ d'une étude, il faut disposer une gamme complète de capteurs.

Chaque appareil, pourvu qu'il soit techniquement et technologiquement bien conçu, présente un point certain d'optimisation.

Un capteur plan à lame d'eau continue ne peut résister, par sa conception, à une forte pression, mais s'il n'y a pas de contrainte spéciale sur ce plan, il est certain qu'il sera très largement supérieur pour travailler sur flux solaire diffus que tout autre appareil.

Encore faut-il savoir que selon qu'il s'agit d'un diffus permanent ou d'un diffus temporaire (succession de nuages et de soleil) sa capacité en eau, donc l'épaisseur de la lame, est prépondérante.

Si la pression d'eau est un élément déterminant, le capteur à tube sera préférable. Encore faut-il que l'espacement entre tube soit-il équilibré en fonction de la conductibilité du métal.

Si les températures de travail doivent être comprises entre 80 et 120°C, le capteur plan est à proscrire et le léger concentrateur cylindro-parabolique est tout indiqué.

Si les températures sont supérieures, il faut que les absorbeurs soient recouverts d'un noir sélectif. Si les ambiances/service sont élevés, il faut avoir des vitrages doubles.

Au contraire, si le  $\Delta T$  est faible et surtout s'il y a prépondérance d'énergie diffuse, il vaut mieux un seul vitrage.

Je n'entrerai pas dans le détail dans cet exposé succinct. J'ai simplement voulu souligner que si l'héliothermie est aujourd'hui une réalité, il ne faut à aucun moment croire qu'il s'agit d'une chose simple.

La marge entre la réussite et l'échec est peut-être plus faible en héliotechnique qu'en aucune autre technique.

Une très grande discipline et une rigueur vigilante sont les conditions essentielles de la réussite du développement réel des utilisations thermiques de l'énergie solaire.



**THE STATE OF SOLAR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS  
IN THE FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY**

by

**DR. I. WALLNER**

**Geschäftsführer der Arbeitsgemeinschaft Solarenergie, ASE.  
Essen, Federal Republic of Germany**

## **SUMMARY**

The activities of the West German industry in the solar energy program are presented.

## **RESUM**

La indústria alemanya davant el programa d'expansió de l'energia solar.



## GENERAL INTRODUCTION

As recently as five years ago, the utilization of solar energy in our country could not even be discussed. Only companies involved in the space program were conducting developmental research. However, three years ago, serious work began on the use of solar energy for water and space heating.

The reason for the sharply increasing interest in the use of solar energy was and remains the price policy of the oil exporting countries. Perhaps already we shall be grateful—but certainly future generations—that the tripling of oil prices in October 1973 created a shock effect which led to increased efforts to become more independent from energy imports.

The threatening depletion of these oil reserves and the still unclear effects of other energy sources—for instance, nuclear fission—have also led to intensified research and development, among other areas also in the field of solar energy.

When considering the utilization of solar energy, we in the Federal Republic of Germany must take into consideration that solar energy is an unreliable energy source; this fact has, of course, implications for the different techniques and application possibilities of solar energy. In order to give you a clearer picture of the climatic situation, I would like to make the following preliminary remarks:

The amount of solar energy which falls on the earth's surface is—taken on a yearly average—eighteen-thousand times greater than the annual energy requirement of the earth's inhabitants. In a densely populated and energy intensive country which receives little solar radiation—such as the Federal Republic of Germany—this proportion is reduced to fifty times greater. Nevertheless, even this is an inconceivably large quantity of energy.

In spite of this, to date a still insurmountable barrier remains for the economically feasible utilization of solar energy: it is the fact that there are large daytime and seasonal variations in solar insolation. Solar energy is an unreliable energy source particularly in our maritime, northern regions.

Compared with an overcast January day, on a sunny June day 50-times the energy (8 as compared with 0.16 kWh/m<sup>2</sup> and day) and 30-times the power (600 as compared with 20 W/m<sup>2</sup>) are radiated onto our country. In the first slide (Slide 1), you can see the situation in which our country finds itself as compared with the situation in other countries on the earth.

Slide 14 shows the average number of sunshine hours in our country stated in hours per year. From this slide, you can already make comparisons with your own country. The maximum values are 2000-1900 hours per year.

In the next slide (15), which shows the values for the USA, you can see that the best values reached in the Federal Republic are only as high as the lowest values in the USA.

Furthermore, we must take into consideration the fact that the time period in which solar energy is available does not correspond to that in which a large quantity of energy is needed (2).

For instance, electricity could only be produced in our country during the noonday hours on a few summer days. On a few further reasonably favorable days, this would also be theoretically possible. Thus, this form of solar energy utilization is not a feasible alternative for the Federal Republic.

However, in our country solar energy can play a role in water and space heating when certain technical «tricks» and «indirect methods» are used. The unreliability of the sun as an energy source could be compensated by utilizing large energy storage units or supplementary energy sources. The climatic conditions require that all possibilities for the utilization of solar energy be carefully thought through, also from the scientific perspective. This has already been largely done. Many facilities designed for water and space heating, but also for air-conditioning and generation of electricity in sunny countries have been constructed; I would like to mention a few examples. Opinions about the degree to which solar energy can satisfy the energy demand in our country—seen both from the technical and economic perspective—remain divided.

I have already mentioned that solar energy does not represent an alternative to nuclear energy for the generation of electricity. It is also understandable that electricity will be necessary for the utilization of solar energy, although, of course, only in small quantities. Thus, those who fight the expansion of the electric generation network also make more difficult the utilization of this inexhaustible energy source.

In a sense, however, solar energy *can* pose an alternative to heating with oil. With respect to the Federal Republic, this represents one of the major opportunities for solar facilities. 60 to 70 % of the energy requirement for industry, trade, agriculture, transportation, and domestic use is heating energy. If one considers only the domestic sector, which will demand the highest proportion of energy in the next decade, this sector uses 90 % of its energy as heating energy. With the increasing scarcity, price, and environmental damage of the high-grade energy sources used until now —energy sources such as natural oil and natural gas— it will be necessary in the future to use these high-grade primary energy sources for high-grade useful energy and less for low-grade useful energy. In this case, valuable oil would no longer be used in such quantities for heating purposes. In the future, it will be more urgently needed for fertilizers, insulation materials, textiles, drugs, synthetics, food-stuffs, construction materials, etc.

For some industrial companies, for the Federal Ministry of Research, and for a steadily growing number of home owners or people interested in building a home, this fact is clear: heating with the sun has a future.

During about only three years, in our country important companies concerned with electrical and mechanical engineering, with chemistry, with the space program, and with energy technology have launched extensive development programs in all areas of solar technology; this research has been initiated with the support of the Federal Ministry of Research and Technology (BMFT). Sixteen large companies have united their efforts in the Arbeitsgemeinschaft Solarenergie e.V. (ASE — a joint working group for solar energy). The goal of this group is to promote the investigation, testing and development of new possibilities for the use of solar energy. These goals also include joint work on mutually interesting technical projects, dissemination to the public of information on the possibilities for utilizing solar energy, and *promotion of international collaboration*. Based upon the results of basic research, upon the «know-how» which grew out of the technical development, and upon the experience gained during practical use of solar facilities, these companies plan, supply and construct components for solar systems, as well as complete systems. They analyse energy problems and calculate the economic feasibility.

In this area, many research and development projects have been furthered by the Federal Ministry of Research and Techno-

logy. R & D projects are generally only partially subsidized, in most cases by 50 %. Governmental expenditures for solar energy have risen from 1.5 million DM in 1974 to 6 million DM in 1975 and *12 million DM in 1976*. The financial ceiling foreseen in the program is 14 million DM per year.

As of August 1976, a total of 24 solar energy projects were being subsidized by the Federal Government:

- System studies (15).
- Solar-thermal conversion
  - solar houses and demonstration projects (2)
  - complete systems (2)
  - components.
- Solar-mechanical conversion for electricity generation and water pumping (15).
- Photovoltaic conversion (14).
- Photochemical conversion (1).

A country anticipating the future utilization of solar energy must have the means to measure the solar radiation and related parameters in all of its climatic regions and at potential solar energy utilization sites. Furthermore, the design and evaluation of solar energy systems and components require certain essential solar radiation and weather data. A solar data collecting network will be established consisting of a number of small stations set up in meteorologically typical regions. The instrumentation of the stations set up in meteorologically typical regions. The instrumentation of the stations will be standardized by international co-operation with-in the International Energy Agency. This data collection project will also be funded by the Federal Government.

The Federal Government does not only give financial support. It also provides opportunities for international cooperation. In this respect it is particularly gratifying that the finalization of a cooperative agreement with *your* country is near at hand. Based upon this agreement, a test center for solar systems will be built in the vicinity of Almería; in the future, German companies will be able to cooperate with Spanish groups in research and development in the area of solar energy utilization.

Ladies and gentlemen, after this general survey, I would now like to turn to individual technical areas related to the use of solar energy. I will only give technical details in a few cases. However, should you desire particular information, I would suggest that

you correspond with me. I would be happy to send you the requested information or to bring you in contact with the companies which can be of assistance to you. In this connection I would like to mention that you can obtain a small brochure today which will give you additional information. Now let me begin with the most visible part of a solar system: the collector.

## COLLECTORS

Concentrating systems are indispensable in all cases in which high temperatures are necessary (higher than about 130°C). This is, for instance, the case with thermal power generation from solar energy. In principle, the concentrating systems have one characteristic which seriously handicaps them in Central Europe: they are not able to concentrate the diffuse celestial radiation onto the absorber surface. For this reason, the M.A.N. company has devoted its attention to the development of concentrating collectors for use in small solar power stations primarily located in sunny countries.

In this pilot facility (slide 16), cylindrical parabolic mirrors are used. The water which is to be heated flows through a black-coated steel pipe located in the focal line of these mirrors. These collectors can be produced inexpensively, and, depending on the required output, they can be multiplied section by section. The constant realignment of the mirrors in the direction of the sun is carried out electrically by simple solar sensors and mechanical adjustment motors which use only a small percentage of the energy produced. The steam which is produced is stored in an insulated energy storage unit from which the required energy can be extracted at the desired power level, either when it is needed or during the night.

Two different types are being tested as steam engines: a conventional 10 to 100 kW linear-piston steam engine and a new and economical 10-30 kW rotary-piston steam engine according to the screw expansion principle. In the experimental facility, the waste heat of the steam engines is alternatively passed to an absorption unit which provides cooling. The refrigeration unit could air-condition a large house. In the winter, the refrigeration unit can be reversed and used for heating as a heat pump.

Since a large proportion of the electricity produced in the southern countries is used to run air-conditioning units, the absor-

ber-refrigeration units which can use waste heat are particularly significant here. A desalination plant which uses the surplus steam energy could also be linked up to the facility.

This small solar-thermal power plant is being developed for different sizes. Depending on the number of collectors, an output of 15 - 1000 kW will be produced. This slide shows a 50 kW facility with whose output pumps are used to irrigate a desert area and the adjoining work and living quarters are provided with electricity and air-conditioning. Depending on the size of the facility and based upon series production, it is estimated that the cost of electricity from such facilities will be about 10-30 German Pfennige/kWh; thus, at least for remote areas, one can hope for the achievement of economic feasibility.

Since the proportion of diffuse radiation in the global radiation falling upon our country is particularly high the efforts of industry to find applications for solar energy are directed primarily on the development of flat-plate collectors.

In addition to the already «classical» flat-plate collectors, which I do not want to describe further, collectors based on the heat pipe principle and using vacuum technology have been developed.

The difference between the heat pipe collector developed by DORNIER (Slide 3) and the classical collector is in their method of heat transmission. The extruded aluminium profiles, which have a blackened surface, assume the function of the absorber. The pipe on the underside is evacuated and contains a small amount of a readily evaporable fluid; this pipe transports collected heat away from the absorber to a heat exchanger at the top. This system has the advantage that the heat is only transported in one direction.

Furthermore, heat losses from the collector (for instance, at night) are thereby automatically almost totally avoided. In addition, the low heat capacity of the collector enables rapid heating-up.

The ERNO company has developed a vacuum-insulated collector for which the area over and under the absorber surface is almost completely evacuated. Convective heat losses are thereby almost entirely eliminated. A further consequence of this design is that the collector is extremely flat (about 5 cm).

In another design (Slide 4), vacuum insulation is achieved by evacuated glass pipes which are closely aligned next to each other over the absorber surface. This vacuum collector was developed by PHILIPS.

## HOT WATER PREPARATION

Ladies and Gentleman, as Slide 2 already showed, the summer season in the Federal Republic is particularly favorable for the utilization of solar energy for heating water. Favorable conversion efficiencies can already be reached with relatively simple collectors, since the collector operates in the low-temperature range for a large proportion of the water which is to be heated; furthermore, the ambient temperature is relatively high during the summer months. Also important when considering the amortization and political economics associated with the use of solar water heating is the fact that conventional oil-fired boilers only operate at a very low efficiency level during the summer. A relatively large quantity of heating oil can be saved when the oil-fired boilers are inactivated and replaced by a few collectors. If oil prices continue to rise, this method of heating water during the summer months will become particularly interesting from the economic perspective.

Based upon the practical experience gained, I would like to give a few details:

The total collector surface area for a 4-person household with higher-than-average hot water consumption is about 6 to 8 m<sup>2</sup>; the hot water storage tank should hold between 300 and 600 l. During longer overcast periods—even during the summer—supplementary heating of the water will be necessary. Utilization of the oil-fired boiler for this purpose is not reasonable, since the heat loss from the boiler during the warm-up phase would largely cancel out the useful solar energy contained in the preheated water. During the summer months, electrical energy represents the most suitable form of supplementary energy. The amount of energy needed for supplementary heating is low when the storage tank has been out-fitted with an electric heating coil.

During the heating season, the oil-fired boiler represents the most suitable form of supplementary heating, since electricity is a form of line-bound energy and should not be used to take up the energy slack during winter months with low insolation levels.

This slide (5) shows the individual components of such an integrated system:

Collectors, storage tank, oil-fired boiler, heat exchanger for the collector circuit and for the boiler, as well as the electric heating coil for supplementary heating during the summer months.

An experimental facility equipped with 3 m<sup>2</sup> BBC-collectors and a 150 l storage tank; 140 l of hot water are taken daily from the

storage tank, a figure which corresponds to the normal daily hot water requirement for two persons.

The next slide (6) gives the energy balance for this experimental facility. When water shall be supplied at a temperature of 45°C, 80 % of the hot water requirement can be supplied by solar energy between May and September; taken on a yearly average, 50 % of the hot water requirement can be covered. These values depend on the overall design of the system, the annual variation in insolation conditions, and above all, on the habits of the hot water users. Since you are «closer to the sun» in your country, you will, of course, achieve substantially better results with such a system.

With respect to the saving in fuel oil, one can say that —depending on the efficiency of the oil-fired boiler, the system design and the habits of the hot water users annual savings of 100 to 200 liters per square meter collector surface area can be achieved. Naturally these savings will be higher in your country. These relatively high savings are possible because of the relatively low summertime efficiency of conventional water heating systems such as oil-fired boilers. The proportion of oil which can be saved during the heating season is very small —about 10 to 15 % of the value given above— since the conventional hot water preparation system operates with high efficiency during this period of low insolation. Thus, solar hot water preparation is particularly interesting from the economic standpoint in those areas, in which fossil-fired heating systems operate with a low degree of efficiency during the summer months.

#### SPACE HEATING

With respect to space heating in our country, we must devote particular attention to developing effective systems appropriate to our climatic conditions. This advanced technology has particular advantages when used in countries receiving more sunshine.

As you can see in this slide (2), the conditions for using solar energy for space heating are not very good in our country; the period in which solar energy is abundantly available does not correspond to the period in which space heating is most required. The insolation during the months from November to February is very low; but about 60 % of the heat demand for space heating occurs during this same period. Long-term storage of excess heat collected by the solar collectors during the summer months for



use during the peak heating period will not be feasible for some time to come, since this type of storage is too expensive. Therefore, space heating with collectors will —for the present— be essentially limited to covering the space heat demand during the transitional months. For the most part, this function will be taken over by a conventional heating system during the peak heating period. The prospects for solar space heating, when viewed from the perspective of its economic feasibility, are not as good as they are with solar hot water preparation. For each square meter collector surface, one will achieve lower annual energy savings.

When solar collectors are used for space heating, we must, of low-temperature heating systems is necessary if one wants to utilize the highest proportion of the «collected» solar energy, unless highly efficient collectors are used. Experience to date has shown that a collector surface area of about 0,3 to 0.4 times the actual living surface area which is to be heated would be required to cover the heating demand during the transitional heating season. In order to guarantee a reserve capacity for a few days, we also provide for a storage tank with a water capacity of 5 to 15 m<sup>3</sup>, in addition to the solar collectors.

For the period during which solar energy cannot contribute to satisfying the heat demand, a conventional heating system —such as an oil-fired heating system— is the most reasonable alternative.

Solar energy can be further exploited when heat pumps are used.

As long as the storage tank or the collector provides a temperature level adequate for the surface heating system, the heat pump is not taken into operation. When the feed-in temperature to the surface heating system drops below the required level, the heat pump is taken into operation. In this case the solar storage tank is cooled down to 5°C. If the insolation level is so low that even the heat pump can no longer cover the heat demand, the oil-fired boiler is taken into operation.

This system is used in the solar house developed by the DORNIER company and the electric utility company RWE.

The slide (8) shows the mounting of the Dornier heat pipe collectors. To date, the following annual energy balance has been achieved during operation (Slide 9): this annual energy balance shows clearly that with this system 55 % of the energy requirement can be satisfied by solar energy and another 15 % by the electrically operated heat pump. The remaining requirement must be provided by an oil-fired boiler.

One can summarize the results for solar assisted space heating in the Federal Republic as follows:

— if one employs collectors and a heat pump, 55 % of the heat demand can be covered by solar energy; 15 % of the energy demand will be covered by electrical energy, which is required to operate the heat pump. The remaining 30 % is provided by conventional energy sources.

— if only collectors are employed, about 40 % of the heat demand can be covered by solar energy, and the remaining 60 % must be provided by additional energy sources.

In addition to the house which I have just shown you, there are a number of additional solar houses. Some serve research purposes, but others are already equipped with series-produced systems.

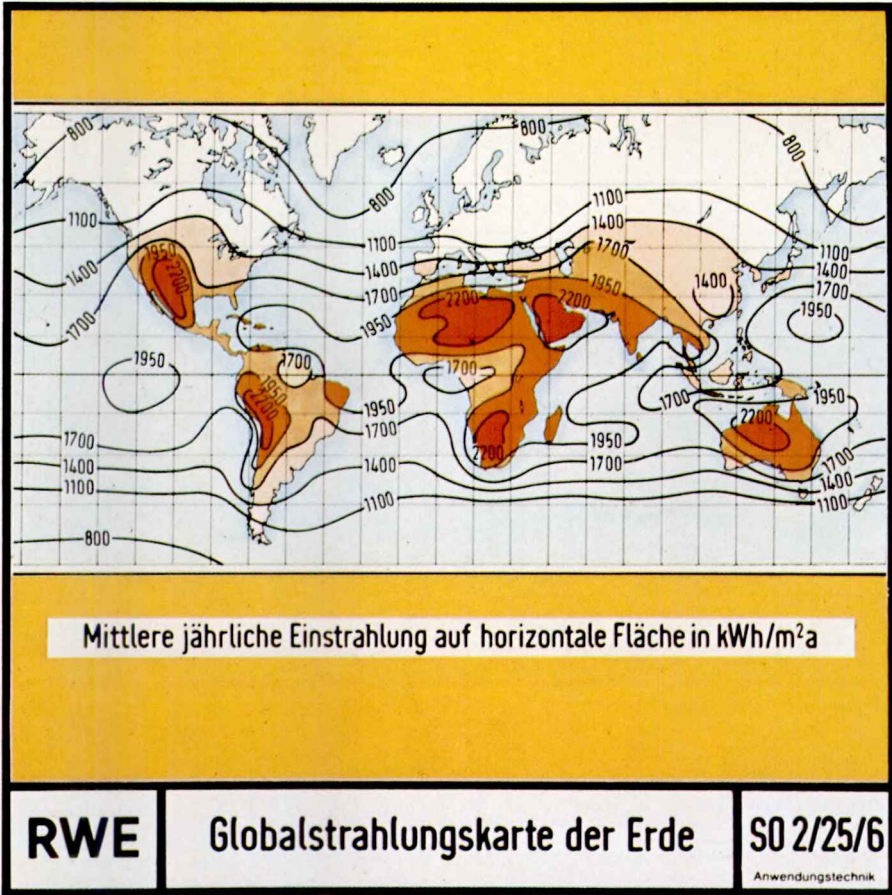
You will probably be particularly interested to know that, for instance, the companies MBB, BBC and Philips have agreements with companies producing pre-fabricated houses; one can already buy houses from these companies which are equipped with solar systems for heating water. Based upon practical experience gained to date, one can, of course, also buy complete systems for conventionally-built houses. The following slides (10, 17, 19) should give you a preliminary impression of such houses.

#### THE UTILIZATION OF SOLAR ENERGY IN OPEN-AIR SWIMMING POOLS

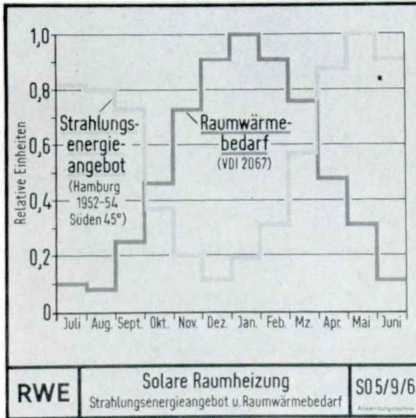
In our country, the use of solar energy for swimming pools is particularly favorable, since the heat demand occurs at the same time as the availability of solar energy. In August 1976, the largest solar facility of this type constructed to date in the Federal Republic was taken into operation. This facility is in Wiehl, a small town in the vicinity of Cologne (Slide 11).

The facility in Wiehl consists of an open-air swimming pool and a multi-purpose hall. The large solar collector array for heating the swimming pool water is located on the roof of the multi-purpose hall. This installation was planned and constructed by the BBC company.

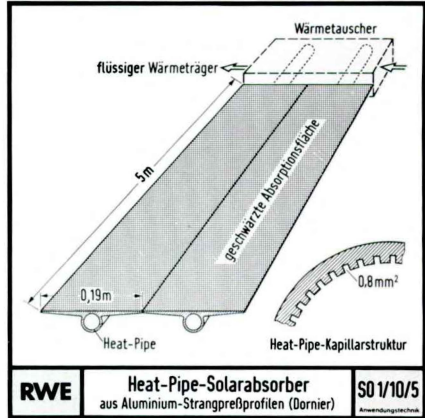
A small solar collector array for heating shower water will be installed on the roof of the warming hall.



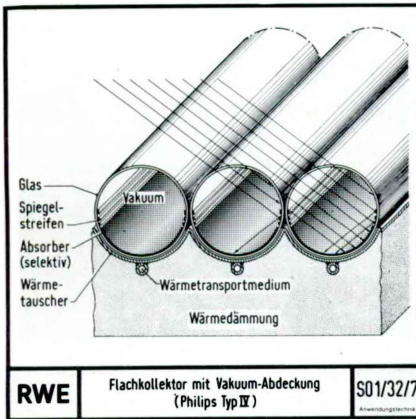
SLIDE 1



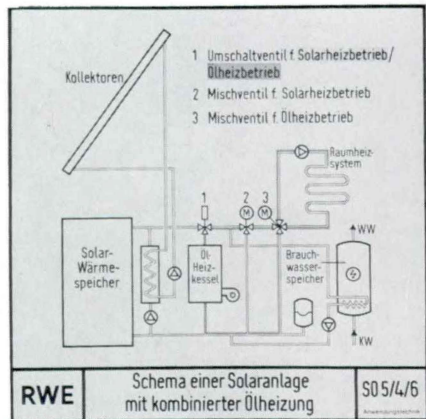
SLIDE 2



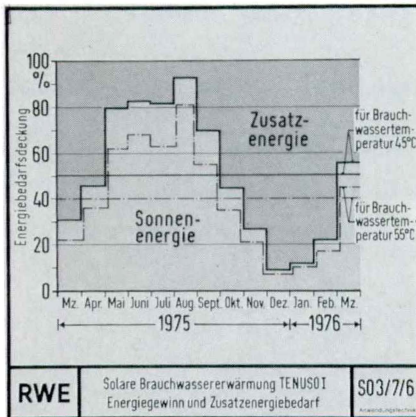
SLIDE 3



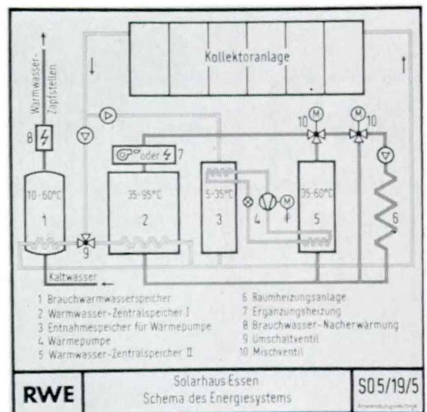
SLIDE 4



SLIDE 5



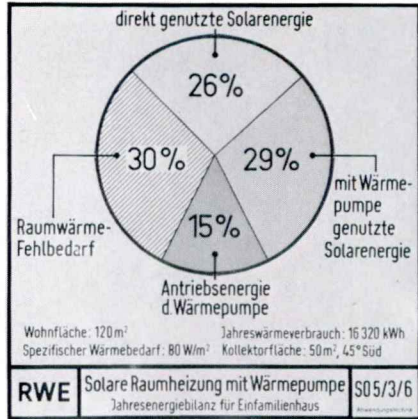
SLIDE 6



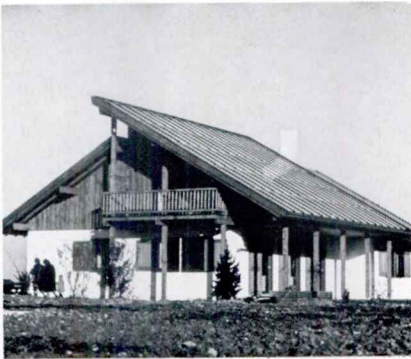
SLIDE 7



SLIDE 8



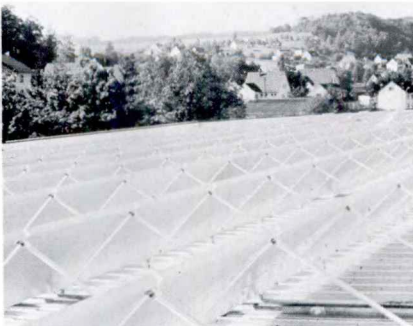
SLIDE 9



SLIDE 10



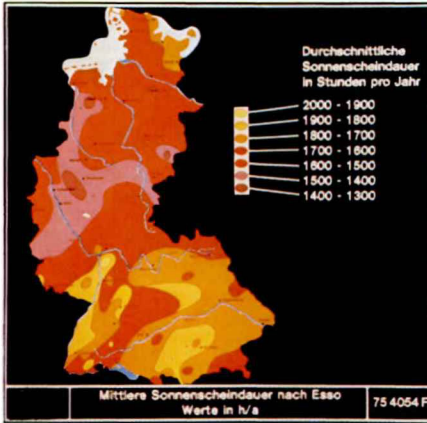
SLIDE 11



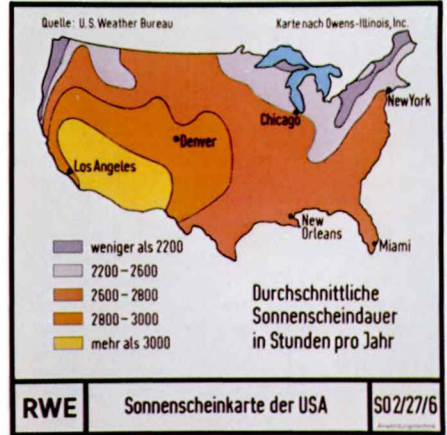
SLIDE 12



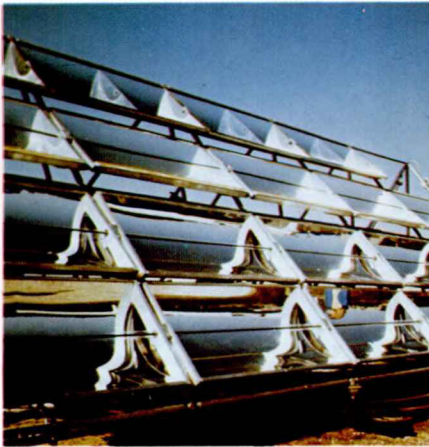
SLIDE 13



SLIDE 14



SLIDE 15



SLIDE 16



SLIDE 17



SLIDE 18



SLIDE 19

The multi-purpose hall is used as an ice skating ring during the winter. The refrigeration unit which was installed for producing ice and providing heat can also be used for heating the water of the outdoor swimming pool during the summer. This would be necessary when the solar collector system cannot supply sufficient heat due to unfavorable weather conditions. In order to heat the pool water, the refrigeration unit—which now operates as a heat pump—extracts heat from the ground surrounding the multi-purpose hall.

The open-air swimming pool consists of 4 basins which have a total water surface area of 1460 m<sup>2</sup>. The three large basins are equipped with a covering system which will reduce the heat requirement for these basins by 40 to 50 %. In addition, this open-air swimming pool utilizes for the first time a heat recovery system in which heat is extracted from the pool water used to rinse the filters. A 30 % reduction in the energy demand is expected. Finally, the non-swimmers' pool is lined with dark-blue tiles, because these tiles show a high degree of absorptance for global radiation. The heat demand for the non-swimmers' pool is thereby reduced by 50 %. Thus, one can expect a heat demand for the swimming pool at Wiehl which is about one-third the normal level.

The large collector array on the roof of the multi-purpose hall consists of 1100 collectors with about 1500 m<sup>2</sup> absorber surface area (Slide<sup>18, 12</sup>).

The roof sheathing of the multi-purpose hall is aluminium. Since the underside of the collectors is also made of aluminium, global radiation is reflected from these surfaces. Part of this reflected radiation strikes the collectors and thus increases its absorption.

One can estimate the efficiency of the collector system installed in Wiehl. During the five-month swimming season, the efficiency is about 55 %. This means that for each square meter absorber surface, 2 kWh of useful energy are collected each day. This high efficiency is due to the fact that the radiant energy is converted into heat in the temperature range of only 26 to 30°C.

In addition to the collectors an earth-heat pump is being used to cover the heat demand of the swimming-pool or the multi-purpose hall.

Before I conclude my presentation of the total facility, I would like to make a remark concerning the energy situation: if one takes into consideration that the heat stored in the ground is solar energy, the heat supplied to the open-air swimming pool in Wiehl is largely solar energy. In fact, solar energy in this sense ac-

counts for 90 % of the supplied heat. Electric energy is only required for operating the motors, the regulation equipment, etc.

#### AIR CONDITIONING

Solar-assisted air conditioning is a particularly sensible application of solar energy. Although air conditioning is not as necessary in the Federal Republic as it is in sunnier countries, realistic concepts have been developed which provide for a combination of heating and cooling. If heat energy is available—for instance, solar energy—absorber systems have an advantage, since they can use heat directly. Calculations have shown that the additional cost for a system combining heating and cooling would not be more than 10 %. On the other hand, this combination extends the number of hours during which this system can be utilized. Since time constraints prevent me from going into further details here, I would like to mention again that individuals interested in these details are welcome to contact me later.

On the subject of

#### PHOTOVOLTAIC ENERGY PRODUCTION

I would like to give you just a short overview which will, I hope, give you an introduction into the state-of-the-art in our country.

Due to their utilization in the space program over the past 10 to 15 years, solar generators were repeatedly able to demonstrate their suitability for producing electricity.

AEG-Telefunken has become a respected manufacturer of reliable and progressive energy systems for the space program through its successful participation in numerous satellite programs, such as the German satellite «AZUR» or the Canadian communications satellite «CTS».

Their high level of technological «know-how» was also shown in the mission of the solar probe «HELIOS», which was launched in December 1974.

Following the development of space applications, projects for terrestrial application have either been realized or begun.

Promising research results are already available today. For



instance, AEG has developed a modular generator concept which would allow construction of generators from the watt to the multi-kilowatt range, depending on the number of generator blocks used.

This slide (13) shows the construction of modules for operating a water pump.

Of course, the particular advantages of photovoltaic systems lies in their independence from infra-structures.

Therefore, possible areas in which such a system in the watt to kW-range could be utilized are measuring stations on land and sea, for instance small weather stations, then facilities for communications engineering and also transportable and stationary radio stations, not to mention signal stations such as beacon signals and light buoys.

Applications in the power range between 1 and 10 kW are larger facilities for communications engineering for instance stationary broadcasting stations and decentralized small radio and television broadcasting stations, as well as in lighthouses, airport lighting and radar facilities. Another application in this range could be electrically self-sufficient single-family dwellings.

Applications in the high power range between 10 and 500 kW could be decentralized radar stations or self-sufficient power stations used for civilian purposes during emergencies.

In the developing countries, such systems could be used to supply electricity for community facilities in small towns, for water pumping stations, for water preparation facilities, and for community receiving stations.

However, before large-scale application can be realized, many technological and economic problems must be solved. The solution of these problems will require long-term and continuous developmental research.

A preliminary step in this direction was already taken towards the end of last year. Photovoltaic solar generators with large area solar cells could be manufactured of an unconventional silicon base material; the *efficiency level of these cells is 10 %!*

Solar generators of this type offer the possibility that reasonably priced systems can be developed through concentrated developmental research.

This research result provided an excellent and promising technological basis for future contributions to the terrestrial use of solar energy.

This has been an overview of the state-of-the-art from the

standpoint of hardware, which is, of course, based on scientific know-how.

In conclusion, I would still like to mention one additional aspect which is also receiving intensive attention and which represents an important concomitant. This is the question of collector capability and international agreement in this sector.

In order to enable users of collectors to compare the different collector types, a common basis for evaluation is necessary. An important aspect is the objective measurement of thermal output. Based upon criteria developed in the USA, the companies within the ASE have developed a test procedure; this test procedure is presently being tested in many laboratories throughout the world under the auspices of the International Energy Agency and the research program of the European Community.

In addition to these criteria, criteria which will enable evaluation of thermal and mechanical characteristics are also being established. Among other reasons, such criteria are necessary, so that the user can have confidence in this new technology.

Ladies and gentlemen,

the question of energy preparation in our country is not an «either-or» question. The question «oil or solar energy» or «electricity or solar energy» will not be the subject under discussion. On the contrary, multiple systems will be proposed; for instance, «oil as a storable energy source to cover peak-period demand» and «electricity as auxiliary energy for the operation of solar systems».

In my presentation, I could only give an overview of the state of solar energy technology in the Federal Republic. Furthermore, all figures were with reference to our country. Utilization of present systems will thus yield substantially better results in your country. If you should have a particular interest in any of the aspects of my talk, please let me know.

**EL INVERNADERO IDEAL**

por

**ADRIANO TRIMBOLI**

**Presidente de Patentes Simplex Aerotérmicas, S. A., Zaragoza**

## RESUMEN

Se describen invernáculos solares con control automático de temperatura, humedad y cromatismo.

## RESUM

Hom descriu hivernacles solars amb control automàtic de la temperatura, la humitat i el cromatisme.

## SUMMARY

Solar houses provided with automatized controls such as: temperature, humidity and chromatic gain are described.

A la vista de las características generales de los *invernaderos clásicos*, nos vemos inducidos a pensar en el *invernadero ideal*, que a continuación tratamos de describir.

Patentes Simplex Aerotérmicas, S. A., en su característica de empresa para el desarrollo de ideas nuevas, métodos de mejora en sistemas térmicos y aprovechamiento de la energía solar, en cuya temática y técnica tiene probada experiencia, ha llegado a la concepción técnica de un *invernadero idóneo para cualquier cultivo, con aprovechamiento de la radiación solar*.

Se ha investigado sobre materiales plásticos idóneos que permitirán la transmisión del espectro solar en su más alto nivel, a la vez que actúan de colectores solares, por los cuales circulará el fluido en toda su superficie laminar, cuya función podemos definir como sigue:

- a) Fluido tratado químicamente, de propiedad selectiva para una mayor absorción de la radiación solar ;
- b) Fluido frío ; su función es preservar el ambiente del calor exterior ;
- c) Fluido colorante, acondicionador de la luz, que llega al interior.

a) *Fluido tratado químicamente ; de propiedad selectiva para una mayor absorción de la radiación solar.*

Este fluido selectivo circula a través de los módulos solares «Polisol», absorbiendo la radiación solar, permitiendo a su vez el paso de la luz. La función es transportar el calor absorbido a un contenedor de sales entéticas, que a su vez absorbe el calor recibido y lo emite en el momento adecuado o de necesidad térmica en el ambiente (por ejemplo, durante la noche).

Todo este sistema se activa automáticamente por mediación de bombas, que hacen circular el fluido a través de las baterías de los fancolls o serpentines empotrados en el suelo, hasta obtener la temperatura requerida, siendo controlada ésta por termostatos. Si el

nivel de calor obtenido por mediación del sistema solar no es suficiente para cubrir las necesidades térmicas de invernadero, se pone en marcha automáticamente una fuente de energía convencional (fuel).

*b) Fluido frío; su función es preservar el ambiente del calor exterior.*

El sistema de refrigeración se basa en la circulación de un fluido enfriador que circula a través de toda la superficie de colectores solares (de que consta el invernadero); éste se calienta y retorna a un depósito de sales que absorben el calor y, por tanto, el fluido vuelve al circuito enfriado; ahora bien, si el nivel de refrigeración obtenido en este proceso no es el deseado, podremos alcanzarlo con una fuente auxiliar o unidad de enfriamiento alimentada con energía convencional.

*c) Fluido colorante, acondicionador de la luz que llega al interior.*

Partimos de que la característica base del invernadero son los módulos solares, en plástico translúcido incoloro; como se indica en el apartado 3, la intensidad del espectro solar varía en relación con el material de que está formado el invernadero y el color del mismo. Nuestro sistema permite poner en el circuito el fluido con el color idóneo para el producto a cultivar, por ejemplo, verde o azul para plantas ornamentales, de flores, etc.

#### APLICACIÓN DE MÓDULOS CAPTADORES DE LA RADIACIÓN SOLAR «POLISOL» A LOS INVERNADEROS.

A continuación se exponen las características de estos módulos solares «Polisol», así como las pruebas efectuadas en orden a su aplicación como material de cubierta y protección para invernaderos.

La primera prueba llevada a cabo consistió en determinar la conductividad térmica, para lo cual se construyeron unos cajones con distintos materiales, y una dimensión de 1 m<sup>3</sup>, en cuyo interior se situaron termógrafos contrastados, algunos de cuyos datos más significativos se relacionan a continuación.

Se aprecia similitud entre el «Polisol» y el vidrio en cuanto a temperaturas mínimas, y una superioridad del vidrio en cuanto a máximas. El «Polisol» por su parte, presenta una oscilación considerablemente inferior tanto en lo que se refiere a máximas como a mí-

nimas, lo cual es de un considerable interés para zonas de clima continental con temperaturas nocturnas bajas y una elevada temperatura durante el día.

Todavía más interesante resulta la conversión nocturna del calor que supone una economía cierta en calefacción, no siendo tan importante la protección a las altas temperaturas diurnas en el invernadero, que pueden ser paliadas mediante un circuito refrigerante.

La cuantificación media de estas diferencias es del orden de 17°C inferior para las máximas diurnas con respecto al vidrio, y de 5 a 6°C de diferencia superior respecto a las mínimas nocturnas.

Estudiado su espectro de reflexión, recogemos en la tabla siguiente los valores obtenidos, los cuales dan idea de un alto porcentaje de absorción, a la vez que bajo de transmisión, como cabía esperar de un material con doble pared y con una separación de 4 mm, que es la probeta utilizada en el presente estudio.

Longitud de onda en $\mu\text{m}$	% Reflexión	% Transmisión	% Absorción
410	28,5	6,1	65,4
460	27,1	8,0	64,9
510	25,8	8,6	65,6
560	25,3	11,7	63,0
610	25,1	14,1	60,8
660	25,1	16,2	58,7

#### DISPOSICIÓN DE LAS PLACAS SOLARES SOBRE UNA ESTRUCTURA DE INVERNADERO

El sistema de ensamblaje es rápido y fácil de montar: los módulos se apoyan sobre perfil angular de hierro o madera, donde se alojan los colectores, quedando fijados por un cubrejuntas atornillado y desmontable, según se ve en la figura 3.

Lógicamente la orientación y el diseño es el factor primordial al hablar del invernadero solar, dependiente de cada zona o situación geográfica de la instalación; los ángulos de inclinación de las placas solares varían, y aun en cada temporada; por ejemplo: a una instalación en el paralelo 35° latitud N, en invierno (octubre-marzo) corresponden 60° y en verano (abril-septiembre) 45°; de aquí se deduce que un invernadero debe proyectarse para las dos teóricas temporadas (según se observa en la figura 1). La orientación idónea siempre será sur-este referida al eje de un túnel o caseta invernadero. El gráfico de la figura 2 nos indica el ángulo de inclinación de las placas solares en cada caso.

## GRAFICO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

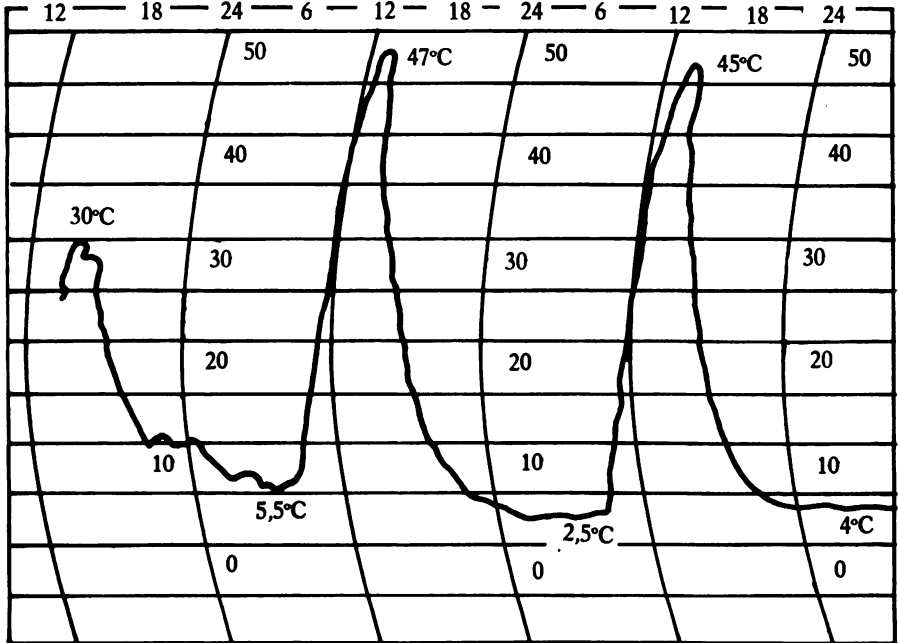


FIGURA 1. Vidrio hortícola 4 mm.

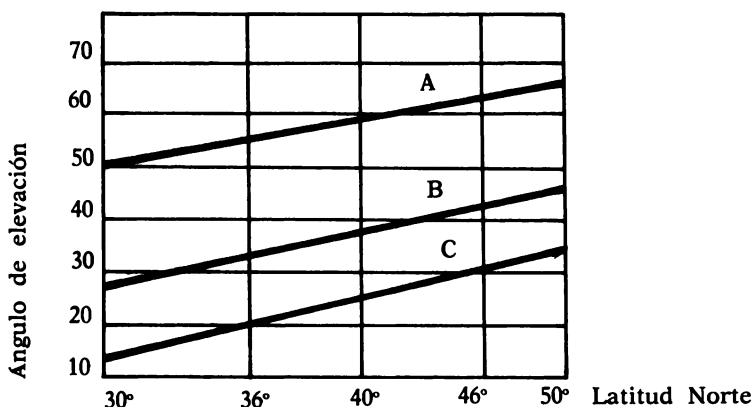
## INVERNADERO SOLAR DE PAREDES FILTRANTES

En el espectro solar las longitudes de las luces útiles a la fotosíntesis de las plantas están todas en la luz visible. La irradiación de infrarrojos, por su parte, solamente contribuye a aumentar la temperatura en el interior del invernadero y, en consecuencia, aumenta también la necesidad de agua por parte de los cultivos.

La intensidad de la radiación es tal que se precisa limitar la temperatura para evitar daños a las plantas, durante las horas del día; pero durante la noche, al descender la temperatura exterior, se precisa a su vez calentar el invernadero, para mantener la temperatura en su interior al nivel deseado.

Para absorber los rayos infrarrojos, evitando así los consiguientes daños, se pensó utilizar un filtro selectivo que también sirviese de pared al invernadero (el aporte de energía solar del infrarrojo corresponde al 50 % de energía total) y dejando todavía fil-





- A) Máxima insolación invierno.
- B) Máxima insolación verano.
- C) Máxima insolación durante todo el año.

FIGURA 2. Gráfico de elevación de las cubiertas de invernaderos.

trar las longitudes de ondas visibles biológicamente, tan útiles para el desarrollo de los cultivos. Se ha dotado entonces al invernadero, de paneles plásticos «Polisol» que están constituidos por dos paredes filtrantes y en cuyo interior circula un líquido químico transportador de calor.

Durante el día, este líquido recoge toda la energía solar infrarroja bajo forma de calor que se acumula y se almacena en un contenedor. Por la noche este líquido caliente se pone en circulación y calienta así el invernadero.

Los resultados obtenidos hasta ahora son muy satisfactorios.

Este sistema abastece el 40 % de la media del consumo total de la energía solar (600 Kcal/h m<sup>2</sup> por día en invierno, 1.300 Kcal/h m<sup>2</sup> por día en primavera y 2.300 Kcal/h m<sup>2</sup> en verano). Al ser estas últimas excedentes, podrán ser aprovechadas para refrescar el invernadero, alimentando a un acondicionador de aire por absorción.

Para algunas regiones como las mediterráneas y para algunos tipos de cultivos no será entonces necesario añadir al sistema ningún aparato de alimentación energética para los días nublados. El invernadero será completamente autosuficiente.

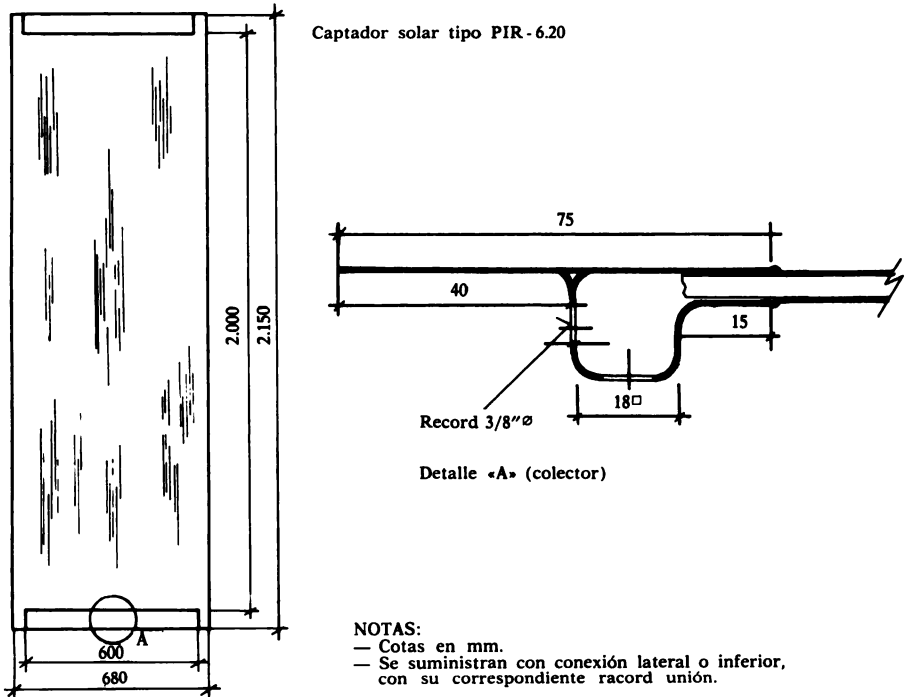


FIGURA 3

Además, como ya hemos dicho, al absorber los rayos infrarrojos reducimos el consumo de agua en un 65 % con relación a la temperatura exterior, lo cual resulta muy importante para las zonas escasas de agua.

A este propósito se pensó acoplar este tipo de invernadero a los procesos de desalinización del agua de mar para la producción de viveros en zonas áridas.

Se ha tomado también en cuenta la posibilidad de acoplar cultivos en invernaderos solares a las acuaculturas aprovechando la lámina freática como volano térmico.

El prototipo montado en Zaragoza está previsto para tres circuitos:

1. Circuito de verano (enfriamiento).
2. Circuito de invierno (calefacción)
3. Circuito cromático (posibilidad de cambio de color para favorecer cultivos particulares).

Todos con regulación electrónica, programador y bomba de circulación alimentada por fotocélula solar.

Queda así demostrada la autosuficiencia energética del invernadero solar; su sencillez no precisa de ninguna estructura particular y su bajo coste se mantiene al mismo nivel del de los invernaderos tradicionales equipados con acondicionadores.

---

**PRUEBAS «POLISOL» PARA INVERNADEROS**

---

Tipo de prueba	Unidad de medida	Norma DIN	Características
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	53.479	1,2
Módula de elasticidad	Kp/cm <sup>2</sup>	53.455	22.000
Módulo de dispersión superficial 23 °C, 10 <sup>4</sup> h, 180 Kp/cm <sup>2</sup>	Kp/cm <sup>2</sup>	53.444	16.000
<i>Pruebas a tracción</i>			
Tensión de alargamiento $\sigma$ 1,0	Kp/cm <sup>2</sup>	53.455	450-500
Alargamiento a $\sigma$ 1,0	%	53.455	3,5
Límite de carga de alargamiento	Kp/cm <sup>2</sup>	53.455	600-700
Alargamiento al límite de carga de alargamiento	%	53.455	6-7
Resistencia a torsión	Kp/cm <sup>2</sup>	53.455	650-700
Alargamiento a torsión	%	53.455	80-120
Carga unitaria de rotura a tracción 23° C, 10 <sup>4</sup> h	Kp/cm <sup>2</sup>	53.444	450
Límite de carga a flexión	Kp/cm <sup>2</sup>	53.452	900-1050
Temperatura máxima	°C		135
Índice de refracción			1,586
Transparencia	%		89

---



**ÉTUDE DE L'ANISOTROPIE DE DILATATION DES  
SUPPORTS EN GRAPHITE UTILISÉS DANS LA  
FABRICATION DES THERMOÉLÉMENTS**

par

**SAUVEUR BENET, BENIGNO ARMAS,\* ROLAND BERGE,  
JEAN-LOUIS DEJARDIN, MICHEL FOURNIER, GÉRARD VASSALLS**

**Centre Universitaire, Perpinyà  
Laboratoire de Physique Statistique et Rhéologie,  
Perpinyà, France**

\* C.N.R.S., Laboratoire des Ultra-Réfractaires, Font Romeu-Odelló, (France).



## INTRODUCTION

Dans la fabrication de thermoéléments de Borure de Silicium par décomposition chimique d'halogénures en phase vapeur sous pression réduite sur un front chaud (C.V.D.) on se heurte à des difficultés lors de la récupération des pastilles déposées.

En effet, il se produit entre le dépôt et le substrat en graphite utilisé une adhérence importante et au cours du refroidissement apparaissent des cassures de forme à priori aléatoire qui ne permettent pas de récupérer intacts les dépôts de Borure de Silicium.

On peut à priori penser à un écart très important entre les coefficients de dilatation des deux matériaux. La méthode que nous proposons apporte une solution plus complète au problème.

### I. PRINCIPE ET AVANTAGES DE LA MÉTHODE D'HOLOGRAFIE.

Cette méthode permet de comparer deux états successifs d'un même objet ; la technique utilisée est celle de la méthode par double exposition. Dans une première exposition, on enregistre l'objet en son état initial (température ambiante). L'objet est ensuite porté à une autre température et enregistré sur le *même* hologramme dans son état final. À la restitution, on observera simultanément les deux images holographiques de l'objet ; ces deux images donneront un système de franges d'interférence dont l'interprétation permettra d'évaluer et de mesurer les dilatations subies par l'objet.

*Avantages de la méthode.* Nous les énumérons ci-dessous sans les discuter.

#### a) *Avantages propres à la technique d'holographie.*

Les méthodes classiques d'interférométrie nécessitent la mise en oeuvre de *surfaces réfléchissantes, de haute qualité optique*. Par contre, des surfaces diffusantes de forme quelconque permettent d'obtenir des résultats par la méthode holographique.

— Dans toutes les mesures de contraintes il est fait appel à un étalon comme référence. Ici c'est l'un des états de l'objet étudié qui joue le rôle de référence par rapport à l'autre.

— Il n'est pas nécessaire de suivre l'évolution de l'objet ou de la figure d'interférence pendant l'application de la contrainte. Il est à noter que cette technique est possible en réalisant l'interférométrie holographique *en temps réel*; on suivra ainsi l'évolution de l'échantillon en cours de test.

— La mise en oeuvre de la méthode n'est pas délicate et la position de l'objet n'est pas critique, la latitude de positionnement étant fonction de la longueur de cohérence du laser utilisé (1 mètre environ).

#### b) *Avantage propre à la méthode employée*<sup>1,2</sup>.

Par une disposition et un choix convenable de l'objet de l'onde d'éclairement et de la direction d'observation on peut s'affranchir d'une translation d'ensemble de l'objet et d'une rotation de l'objet autour de l'axe commun d'éclairement et d'observation. C'est là un avantage très important dans la mise en oeuvre expérimentale de la méthode.

## II. MONTAGE EXPÉRIMENTAL.

Pour pouvoir interpréter aisément la figure d'interférence obtenue à la restitution il convient d'adopter une géométrie particulière dans le système optique.

L'onde d'éclairement de l'objet est une onde plane définie par son vecteur d'onde  $\vec{k}^i$ .

L'observation de l'objet s'effectue dans la même direction ainsi  $\vec{k}^e = -\vec{k}^i$ .

## III. ÉTUDE DU SYSTÈME D'INTERFÉRENCES.

Rapportons au trièdre  $(x_1, x_2, x_3)$  les coordonnées des points de l'objet étudié. Le déplacement le plus général d'un objet est le produit d'une translation  $\vec{T}$  et d'une rotation  $\vec{\Omega}$ . Dans ce cas

1. Lee O. HEFLINGER et al., *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 44, 1973, p. 5.

2. L. KAISER, S. BENET, M. FOURNIER et S. BRUNET, *Physics in Industry*. Dublin, mars 1976.



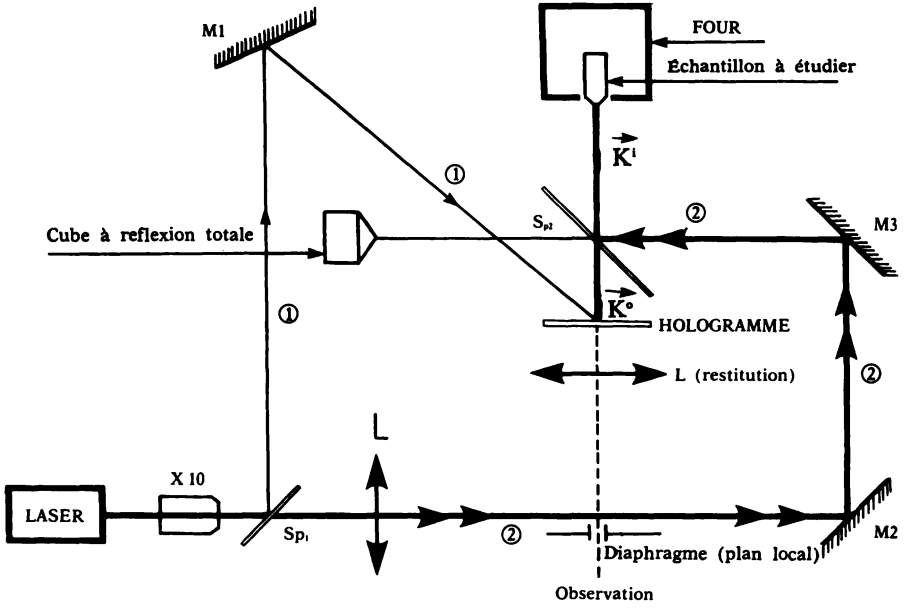


FIGURE 1. Schéma du dispositif expérimental.

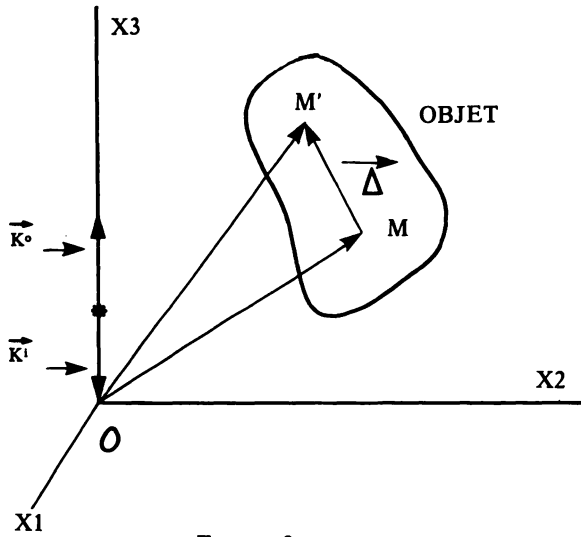


FIGURE 2

$$(\vec{OM}' - \vec{OM})_i = (\vec{\Delta})_i = (\vec{T})_i + (\vec{OM} \times \vec{\Omega})_i. \quad (1)$$

Une contrainte d'origine thermique se traduit par:

$$(\vec{OM}' - \vec{OM})_i = \alpha_{ij} x_j \Delta t, \quad (2)$$

$\alpha_{ij}$  étant les coefficients de dilatation thermique.

La déformation étant *homogène* pour une petite variation de température  $\Delta t$  du cristal ( $\alpha_{ij}$ ) est un tenseur symétrique que l'on peut rapporter à ses axes principaux, en l'occurrence les axes cristal.

Ainsi le déplacement d'un point de l'objet s'écrit:

$$\mu_i = (\vec{T})_i + (\vec{OM} \times \vec{\Omega})_i + \alpha_{ij} x_j \Delta t. \quad (3)$$

L'équation des plans d'onde s'écrit donc:

$$\delta = m\lambda = (\vec{k} - \vec{k}^1) \cdot (\vec{OM}' - \vec{OM}) = 2 (\vec{T})_i + (\vec{OM} \times \vec{\Omega})_i + \alpha_{ij} x_j \Delta t \quad (4)$$

On montre que la figure d'interférence est localisée sur l'objet,<sup>3, 4</sup> ainsi le système de franges d'interférence est donné par l'intersection des plans d'onde avec la surface de l'objet.

Ainsi les équations (4) peuvent nous permettre de *déterminer* les 2 composantes de rotation  $\Omega_j$  et  $\Omega_k$  et les 3 coefficients de dilatation  $\alpha_{kj}$ . Cette détermination dans le cas le plus général est difficile.

### 1. Mesure d'un coefficient de dilatation.

Cette mesure s'effectue aisément dans le cas d'un matériau isotrope, le tenseur de dilatation se réduisant à un seul coefficient. elle peut également être menée à bien dans le cas d'un matériau anisotrope dont on connaît la direction des axes cristallographiques et dont on fera coïncider l'un d'entre eux ( $k$ ) avec la direction d'observation.

En effet, dans ce cas l'équation (4) s'écrit:

$$m \frac{\lambda}{2} = (\vec{T})_k + (\vec{OM} \times \vec{\Omega})_k + \alpha_{kk} x_k \Delta t; \quad (5)$$

3. J. MONNERET, in «Applications de l'Holographie». Symposium International de Besançon. Juillet 1970.

4. Karl A. STETSON. JOSA Letters. Vol. 66, n.º 6. June 1976.

elle est identique à celle obtenue pour un matériau isotrope; la mesure donnera l'un des coefficients principaux de dilatation.

Les équations (5) font intervenir 3 inconnues. Un système de 3 équations permet donc de résoudre simplement le problème. Cette résolution sera d'autant plus simple que l'on aura fait un choix judicieux de trois points. En particulier, en choisissant trois points de l'objet non coplanaires et dont les projections sur la plaque photographique sont alignées, le système conduit à:

$$\alpha_{kk} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{m^{12} - \rho m^{23}}{(x^1_k - x^2_k) - \rho(x^2_k - x^3_k)}, \quad (6)$$

avec  $m^{12} = m^1 - m^2$ , différence des ordres d'interférence entre les points 1 et 2.

$$\rho = \frac{x^1_i - x_i^2}{x^2_i - x_i^3} = \frac{x^1_j - x_j^2}{x^2_j - x_j^3}, \quad (7)$$

équation de la droite tracée sur la restitution photographique de la figure d'interférences.

*N.B.:* L'hologramme n'ayant pas de mémoire, on ne peut déduire de la mesure le signe du coefficient de dilatation.

## 2. *Interprétation d'une figure d'interférence.*

Une analyse de la géométrie de la figure d'interférence obtenue peut se révéler très instructive et permettre d'obtenir l'ordre de grandeur des coefficients de dilatation ainsi que l'orientation des axes cristallographiques par rapport au repère du laboratoire. L'équation (4) développée s'écrit:

$$\frac{m \cdot \lambda}{2} = (\vec{T})_3 + (\alpha_{31} \Delta t + \Omega_2)x_1 + (\alpha_{32} \Delta t - \Omega_1)x_2 + \alpha_{33} \Delta t x_3. \quad (8)$$

### *Application à l'étude d'échantillons de graphite obtenus par extrusion.*

Nous avons usiné un échantillon de graphite en forme de cône d'axe  $x_3$  coïncidant avec l'axe d'extrusion. L'élévation de température est de 32°K. On note que les plans d'interférence sont des plans

«pratiquement» parallèles à l'axe  $x_3$  et à l'axe  $x_2$ . Des plans parallèles donneraient, en effet, des franges rectilignes. Le coefficient  $\alpha_{33}$ , coefficient de dilatation suivant l'axe d'extrusion du barreau, est très faible.

Un calcul approché permet d'obtenir l'ordre de grandeur.

$$\alpha_{33} = \alpha_{\text{extrusion}} \approx 0,9 \cdot 10^{-6} (\text{°K})^{-1}.$$

Dans un deuxième temps, nous avons travaillé dans la direction  $x_1$ . L'élévation de température est de 25°K. Dans ce cas, la normale aux plans \* d'interférence est orientée suivant une direction voisine de l'axe  $x_1$ . D'autre part, la figure d'interférences est formée d'ellipses \* centrées sur un axe voisin de l'axe  $x_1$ : L'interfrange étant faible, ceci permet de conclure que le coefficient de dilatation suivant l'axe  $x_1$  est nettement plus élevé que suivant les deux autres axes. Une estimation conduit à:

$$\alpha_{11} \approx 10 \cdot 10^{-6} (\text{°K})^{-1}.$$

## DISCUSSION

Le graphite obtenu par extrusion est un matériau anisotrope. Les plans de graphite ayant tendance à glisser les uns sur les autres, quand l'échantillon est soumis à une pression ces plans s'orienteront suivant une direction voisine de l'axe d'extrusion. Le graphite présente deux coefficients de dilatation très différents, l'un suivant une direction parallèle aux plans des hexagones (axe a), très faible, l'autre dans une direction normale aux plans (axe c)  $\alpha_c = 17 \cdot 10^{-6} (\text{°K})^{-1}$ ,  $\alpha_a = 1,3 \cdot 10^{-6} (\text{°K})^{-1}$ .

Ces considérations sont en accord avec les résultats obtenus ci-dessus.

\* Afin de préciser l'orientation de la normale aux plans d'interférence, on a travaillé avec des ondes légèrement sphériques. Les surfaces d'égale différence de marche sont donc transformées en surfaces sphériques et leur intersection avec la surface du cône permet de préciser le point de tangence.

## CONCLUSION

Par cette méthode, nous avons, d'une part, *mesuré les coefficients de dilatation* d'un échantillon anisotrope usiné en forme de cône de dimension  $\varnothing = 20$  mm ;  $h = 20$  mm et, d'autre part, mis en évidence *l'orientation dans un matériau des axes d'anisotropie de dilatation*.

Il est à noter que cette détermination est facilitée par la forte anisotropie de dilatation présentée par le graphite.

Par ailleurs, les interférogrammes rendent compte des lignes de contrainte qui apparaissent lors de la cassure des dépôts de Borure de Silicium permettant ainsi une taille convenable des substrats de graphite utilisés en C.V.D.

Enfin, cette méthode est applicable à toute étude de déformation d'origines diverses (mécanique, électrique...) même dans la mesure où celles-ci sont faibles.



**COUCHES MINCES D'OXYDE D'INDIUM DOPÉ A L'ÉTAIN  
REALISÉES PAR SPRAY. APPLICATION AUX CELLULES  
SOLAIRES**

par

**M. SAVELLI, L. SZEPESSY, J. C. MANIFACIER, K. WADI,  
J. F. BRESSE**

Centre d'Études d'Électronique des Solides, CNRS  
Université des Sciences et Techniques du Languedoc  
Montpellier, France

## RÉSUMÉ

Nous présentons les premiers résultats concernant les propriétés physiques des couches minces conductrices et transparentes d'oxyde d'indium dopé à l'étain  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})$ , élément d'une structure photovoltaïque.

Ces films ont été préparés au moyen d'une méthode très simple de vaporisation.

Pour des films ayant des résistances de couche comprises entre 7 et 12 ohms carrés, on obtient des coefficients de transmission voisins de 90 % dans le visible et le proche infrarouge.

## RESUM

Presentem els primers resultats referents a les propietats físiques de les capes primes conductores i transparents d'òxid d'indi dopat amb estany  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})$ , element d'una estructura fotovoltaica.

Aquests films han estat preparats emprant un mètode molt simple de vaporització.

Per a films de resistències superficials compreses entre 7 i 12  $\Omega$ , hom obté coeficients de transmissió al voltant del 90 % en l'espectre visible i en l'infraroig pròxim.

## SUMMARY

First results concerning the physical properties of highly transparent conducting layers of tin doped indium oxide  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})$  as a part of a photovoltaic structure are presented. A very simple spraying method has been used to prepare the  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})$  films. Layers with sheet resistance values between  $R_{sh} = 7 - 12 \Omega/D$  and optical transmissions near 90 % for the visible and near I.R. spectrum has been obtained.



## A. INTRODUCTION

Préparés par une méthode de transport en phase vapeur (spray), les oxydes d'étain  $\text{SnO}_2$  dopés au fluor ou d'indium  $\text{In}_2\text{O}_3$  dopés à l'étain en films minces sont des semiconducteurs de type n dégénérés ( $n=10^{19}$  à  $10^{21}$   $\text{cm}^{-3}$ ) transparents sur toute l'étendue du spectre visible et du proche I.R. (gap  $E_G \approx 3.7$  eV).

Dans notre étude nous avons été guidés essentiellement par l'optimisation de ces films minces en vue de leur utilisation ultérieure dans l'élaboration des cellules solaires du type hétérojonction (H.T.J.) Si -  $\text{SnO}_2(\text{F})$  ou Si -  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})$ . Dans ces structures, l'oxyde joue le rôle d'une électrode transparente, conductrice et protectrice. La génération des porteurs se fait directement dans la zone de déplétion, d'où une amélioration du rendement quantique vers les courtes longueurs d'onde (cellules violettes). De plus, compte tenu de leurs indices de réfraction voisins de 1,9 à 2, l'utilisation de ces oxydes permet d'éviter l'emploi d'une couche antireflet de  $\text{SiO}_2$ . Les résultats obtenus concernant les dépôts de  $\text{SnO}_2(\text{F})$  et les structures  $\text{SnO}_2$  - Si ont déjà été publiés.<sup>1</sup>

Nous présenterons ici les résultats concernant les films minces d' $\text{In}_2\text{O}_3$  déposé sur substrat en verre ainsi que quelques résultats préliminaires concernant les structures Si(n) -  $\text{In}_2\text{O}_3$  (dopé Sn).

## B. PRÉPARATION DES FILMS MINCES DE $\text{In}_2\text{O}_3$

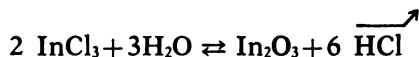
Nous avons utilisé une méthode de vaporisation dont on trouvera les détails dans la référence.<sup>2</sup> Cette technique de préparation

1. Mme. M. PERTOTIN, L. SZEPESSY, J. C. MANIFACIER, P. PAROT, J. P. FILLARD et M. SAVELLI, «Propriétés électriques et optiques de lames minces de  $\text{SnO}_2$  dopés et de l'hétérojonction  $\text{SnO}_2$  - Si (p ou n)». Colloque International sur l'électricité solaire, Toulouse 1-5 Mars 1976, pp. 481-492, Ed. C.N.E.S.

2. J. C. MANIFACIER, M. DE MURCIA et J. P. FILLARD, «Optimisation de la préparation de films minces d'oxyde d'étain par transport en phase gazeuse». *Mat. Res. Bull.*, Vol. 10, 1975, pp. 1215-1220.

est d'une mise en oeuvre expérimentale extrêmement simple et peu coûteuse par comparaison avec les autres méthodes couramment utilisées: évaporation,<sup>3</sup> sputtering<sup>4, 5, 6</sup> ou C.V.D.<sup>7</sup> Elle est de plus rapide, permettant d'obtenir un dépôt en quelques minutes.

La réaction de synthèse est:



Cette réaction se produit à des températures supérieures à 350°C.

Dans le cas de notre appareillage et pour les substrats en verre borosilicate utilisés<sup>8</sup> les températures choisies ont été respectivement de T<sub>1</sub>=565°C pour la température du four de préchauffage<sup>2</sup> et de T<sub>2</sub>=500°C pour la température du substrat (pyrex ou silicium).

Les films minces d'oxyde d'indium ne sont pas suffisamment conducteurs, d'où la nécessité d'ajouter à la solution à vaporiser une certaine quantité de dopant. Nous avons choisi l'étain qui semble être le dopant le plus efficace, la solution à vaporiser étant de composition pondérale:

14 g eau distillée

14 g alcool éthylique (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH)

2.5 g acide chlorhydrique

x g trichlorure d'indium (InCl<sub>3</sub>)

y g tétrachlorure d'étain hydraté (SnCl<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O)

avec x+y=2.8 grammes.

La quantité d'eau et d'alcool utilisée permet d'obtenir une bonne fluidité du mélange, et la quantité d'HCl a été optimisée afin d'obtenir les meilleurs résultats.

Le débit du gaz porteur (azote) a été pris égal à 3 litres/min, et

3. F. VAN DER MAESEN and C. H. M. WITMER, «Hall and resistivity measurements on thin films of SnO<sub>2</sub> and In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>». Compte rendu du 7.ème Congrès International: physique des semi-conducteurs, Paris: Dunod, 1964, pp. 1211-1215.

4. J. L. VOSSEN, «R. F. sputtered transparent conductors, the system In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SnO<sub>2</sub>». R.C.A. Rev., Vol. 32, 1971, pp. 289-296.

5. D. B. FRASER and H. D. COOK, «Highly conductive, Transparent films of sputtered In<sub>2</sub> x Sn<sub>x</sub> O<sub>3</sub> y». J. Electrochem. Soc.: Solid State Science and Technology, Vol. 119, n.º 10, 1972, pp. 1368-1374.

6. F. BUIGUEZ, G. BOMCHILL, S. GALZIN et A. MONFRÉ, «Mise en évidence des mécanismes de formation des couches minces d'oxyde d'indium». Colloque: «Matériaux et technologies pour la microélectronique», Montpellier 1976, p. 146-149.

7. J. KANE, H. P. SCHWEIZER and W. KERN, «Chemical vapor deposition of transparent electrically conducting layers of indium oxide doped with tin». Thin Sol. Films, Vol. 29, n.º 1, 1975, pp. 155-163.

8. Verre N.º code 732.01 Sovirel, 90-92 rue Baudin, 92 Levallois-Perret, France.

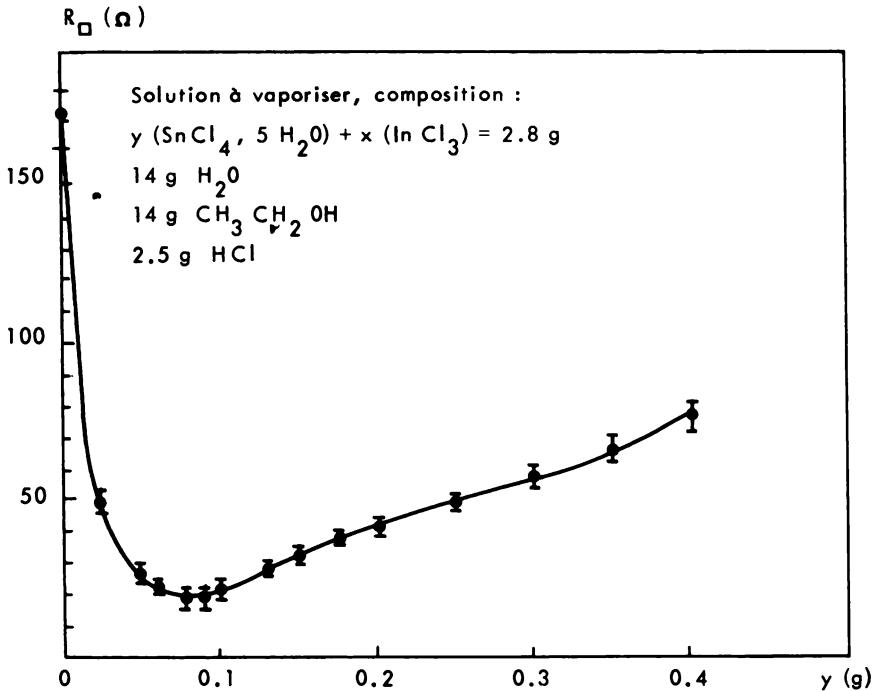


FIGURE 1. Variation de la résistance surfacique  $R_{\square}$  en fonction de la concentration en étain. Débit du gaz porteur=3 l/min,  $T_1=576^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2=500^{\circ}\text{C}$  (Cf. Ref. [2]).

la durée de la vaporisation est prise égale à  $t=3$  min (sauf indication contraire).

La figure 1 représente la variation de la résistance surfacique  $R_{\square}$  des dépôts en fonction de la quantité de  $\text{SnCl}_4 (5\text{H}_2\text{O})$  dans la solution.

On obtient un minimum de  $R_{\square}$  pour  $x=2,72$  g  $\text{InCl}_3$  et  $y=0,08$  g  $\text{SnCl}_4 (5\text{H}_2\text{O})$ . Ces valeurs conduisent à un rapport atomique  $\text{Sn}/\text{In} \approx 2\%$  (nous avons supposé que la composition de la solution à vaporiser en Sn et In se retrouve dans le dépôt). Cette valeur est inférieure à celles trouvées par d'autres auteurs pour différentes méthodes de préparation: VOSSEN<sup>4</sup> par sputtering trouve  $\text{Sn}/\text{In} \approx 10\%$ , KANE et al.<sup>7</sup> par C.V.D. trouvent  $\text{Sn}/\text{In} \approx 4,5\%$ . Notons enfin que la vitesse de croissance est rapide (figure 2) voisine de  $1.000 \text{ \AA}/\text{min}$ , cependant à l'inverse des dépôts de  $\text{SnO}_2$  cette vitesse

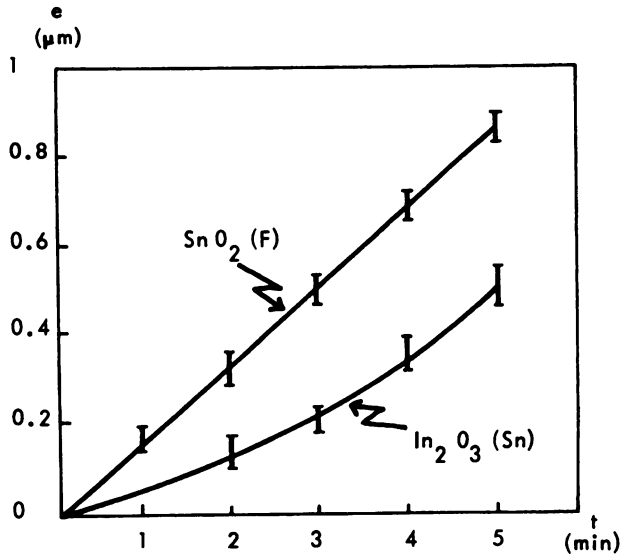


FIGURE 2. Variation de l'épaisseur des dépôts en fonction du temps de vaporisation  $T_1=576^\circ\text{C}$ ,  $T_2=500^\circ\text{C}$ , débit du gaz porteur: 3 l/m. Cf. Ref. (2).

n'est pas constante (figure 2). Il semble que l'on puisse rattacher cela à une différence de réactivité entre le substrat en verre et les oxydes  $\text{In}_2\text{O}_3$  et  $\text{SnO}_2$ , nous avons en effet remarqué que le nettoyage des substrats est extrêmement critique dans le cas des dépôts d'oxyde d'indium, un nettoyage insuffisant conduisant à un aspect blanchâtre du film.

### C. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

#### 1. Spectre de transmission

Nous avons porté figure 3 les spectres de transmission pour des longueurs d'onde comprises entre  $\lambda=0,2$  et  $2,1 \mu\text{m}$  pour deux lames  $\text{In}_2\text{O}_3$  (Sn) de résistance carrée 14 et  $22\Omega_{\square}$ .

On remarque qu'entre  $0,6$  et  $1,2 \mu\text{m}$  la transmission est supérieure à 90 % ; de plus l'absorption par les porteurs libres est importante vers les grandes longueurs d'onde, ce qui peut présenter

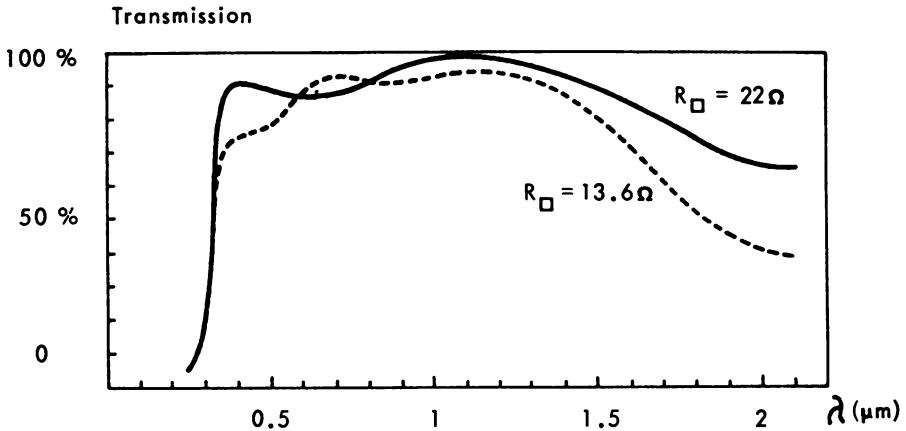


FIGURE 3. Spectre de transmission-films d' $\text{In}_2\text{O}_3$  (Sn) sur substrat pyrex.

une limitation importante (pour des lames trop dopées) au rendement quantique dans le cas des structures  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})\text{-Si}$ .

Il est possible d'obtenir par cette méthode des lames plus épaisses  $e \approx 0,8 \mu\text{m}$ ,  $R \approx 6 \Omega_{\square}$  qui après recuit sous argon à  $400^\circ\text{C}$  pendant 1 heure (cf. paragraphe suivant) conduisent à  $R_{\square} \approx 4,5 \Omega$ ,  $\rho \approx 3,6 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , mais dans ce cas la transmission à  $\lambda = 1,1 \mu\text{m}$  passe de 90 % à 75 %.

## 2. Mesures d'effet Hall

Ces mesures ont été faites pour des températures comprises entre 7 K et 350 K et pour différentes valeurs du dopage en étain (cf. figure 4). Nous avons remarqué que les valeurs de la mobilité des électrons  $\mu_H$  et de la concentration électronique ne varient pas sensiblement dans cette gamme de températures (nous avons supposé pour les calculs que le facteur de Hall était égal à 1 pour ces films très conducteurs).

Nous avons reporté dans le Tableau I ci-après, à titre de comparaison les caractéristiques électriques et optiques de couches minces de  $\text{In}_2\text{O}_3$  dopées Sn préparées par différents auteurs (la méthode de préparation est indiquée).

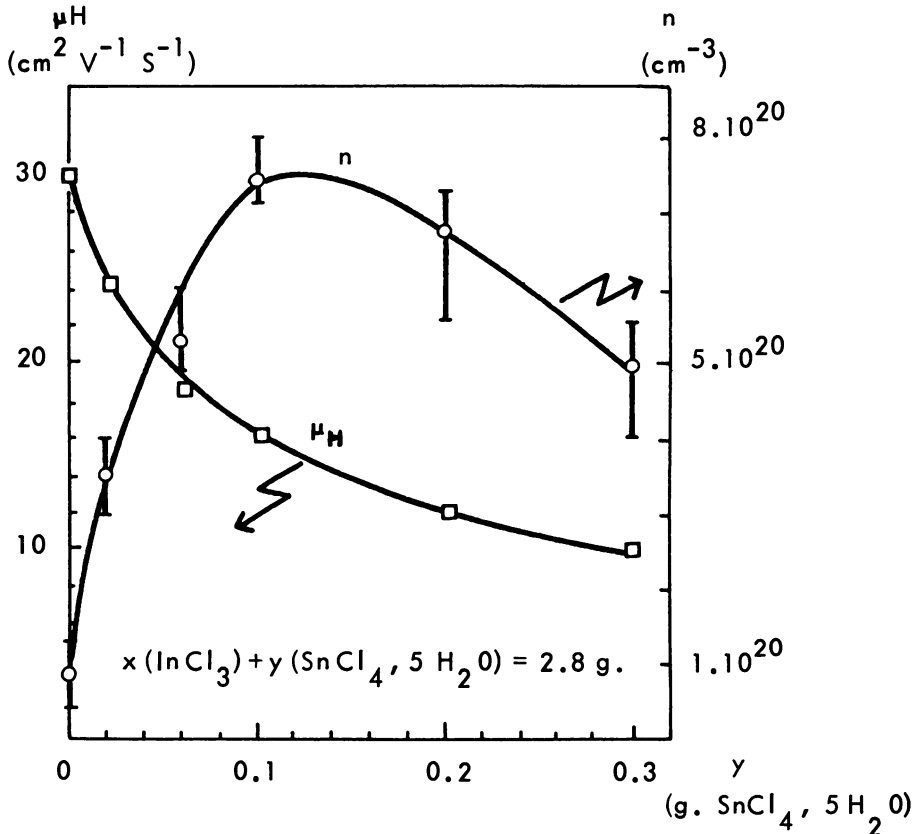


FIGURE 4. Densité électronique et mobilité de Hall pour les dépôts de In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Sn) en fonction de la concentration en étain — T=300 K.

TABLEAU I

COMPARAISON DES CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES ET OPTIQUES  
POUR DIFFÉRENTS FILMS TRANSPARENTS ET CONDUCTEURS

Films In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Sn)	$R_{\Omega}$	$\rho$ cm	$n$ cm <sup>-3</sup>	$\mu_H$ cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> S <sup>-1</sup>	Transmission à $\lambda=0,60 \mu\text{m}$
Nos travaux (spray)	9	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{20}$	16	90 %
Kane et al. <sup>7</sup> C.V.D.	10	$4,9 \cdot 10^{-4}$			89 %
Fraser et al. <sup>5</sup> sputtering	3	$3 \cdot 10^{-4}$			80 %
Vossen <sup>4</sup> sputtering	15	$6 \cdot 10^{-4}$			90 %

### 3. Influence des traitements thermiques

La conductivité des oxydes  $\text{SnO}_2$  et  $\text{In}_2\text{O}_3$  non dopés est due à la non stoechiométrie (défaut d'oxygène). Le caractère métastable de ces films se traduit par une augmentation importante de la résistivité après un recuit de quelques heures à l'air libre et pour des températures supérieures à  $300^\circ\text{C}$ .

Dans le cas des films de  $\text{SnO}_2$  dopés Sb ou F, la stabilité de ces couches en fonction du traitement thermique est bonne, la résistivité est stable pour des températures de recuit:  $T=450^\circ\text{C}$  pendant plusieurs heures,<sup>1</sup> et ce, quel que soit le milieu ambiant.

Dans le cas des films de  $\text{In}_2\text{O}_3$  dopés Sn, un recuit sous argon pendant 1 heure à  $T=400^\circ\text{C}$  diminue la valeur de  $R_{\square}$  (cf. Tableau II). Un recuit sous atmosphère ambiante pendant 1 heure à  $T=400^\circ\text{C}$  augmente la valeur de  $R_{\square}$  (cf. Tableau II).

Dans les deux cas le spectre de transmission n'évolue pas sur le visible et le proche I.R., et se trouve même parfois amélioré.

L'augmentation de la conductivité (qui correspond surtout à une augmentation de la densité d'électrons libres) en cours de recuit sous argon peut s'expliquer<sup>6</sup> par la dissociation du  $\text{SnO}$  et l'intégration de l'étain dans le réseau du  $\text{In}_2\text{O}_3$ .

La diminution de la conductivité après un traitement thermique à l'air libre est observée par de nombreux auteurs.<sup>4,5</sup> Elle est attribuée par VOSSEN<sup>4</sup> à l'oxydation en surface qui élimine les va-

TABLEAU II

INFLUENCE DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LES LAMES  $\text{In}_2\text{O}_3$  (Sn)

	$R_{\square}(\Omega)$ initial	$R_{\square}(\Omega)$ recuit 1 h. sous argon $T=400^\circ\text{C}$	$R_{\square}(\Omega)$ recuit 1 h. à l'air libre $T=400^\circ\text{C}$
$\text{In}_2\text{O}_3$ (non dopé) temps: 3 min.	200	150	400
$\text{In}_2\text{O}_3$ (Sn): rapport atomique Sn/In=0,04 temps: 3 min.	35	15	38
$\text{In}_2\text{O}_3$ (Sn): rapport atomique Sn/In=0,02 temps: 5 min.	10	7	13

cances d'anions; cet auteur observe de plus un phénomène de passivation de la surface en cours de recuit par l'oxyde formé et une stabilisation de la résistance surfacique en fonction de la durée du recuit.

Notons pour terminer que des traitements thermiques prolongés pour des températures supérieures à 500°C provoquent une augmentation importante de la  $R_{\square}$ , de plus les dépôts prennent un aspect blanchâtre; ces phénomènes peuvent être attribués à une réaction avec le substrat et à la diffusion des alcalins au verre dans l'oxyde d'indium<sup>9</sup> (les alcalins jouant le rôle d'accepteur).

#### D. APPLICATION AUX CELLULES SOLAIRES Si(n)-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (dopé Sn)

L'électrode transparente d'oxyde d'indium doit obéir à deux exigences contradictoires: être transparente donc mince, être conductrice donc épaisse.

HACKE<sup>10</sup> a défini un facteur de mérite pour les électrodes transparentes:

$$\varnothing_{TC} = \frac{T^{10}}{R_{\square}}$$

où T est le facteur de transmission, et  $R_{\square}$  est la résistance surfacique. Nous avons reporté dans le tableau 3 les valeurs de  $\varnothing_{TC}$  pour différents dépôts conducteurs et transparents. Il est intéressant de noter que  $\varnothing_{TC}$  dans le cas des films spray est supérieur aux autres méthodes de préparation pour  $\lambda > 0,9 \mu\text{m}$ , d'où l'intérêt de ne pas utiliser des dépôts trop conducteurs, qui peuvent limiter par suite de l'absorption par les porteurs libres la réponse d'une structure Si-SnO<sub>2</sub>(Sn) vers les grandes longueurs d'onde. Un deuxième paramètre important est la hauteur de barrière  $\varnothing_B$  de la diode Schottky;  $\varnothing_B$  dépend des affinités électroniques du semi-conducteur et de l'électrode transparente, ainsi que des états d'interface. Plus cette hauteur de barrière  $\varnothing_B$  est grande, plus importante sera la tension en circuit ouvert  $V_{CO}$  de la cellule solaire.

9. J. KANE, H. P. SCHWEIZER and W. KERN, «Chemical vapor deposition of antimony-doped tin oxide films formed from dibutyl tin diacetate». *J. Electro. Soc.: Solid State Science and Technology*, Vol. 123, n.° 2, 1976, pp. 270-277.

10. G. HAACKE, «New figure of merit for transparent conductors». *J.A.P.*, Vol. 47, n.° 9, 1976, pp. 4086-4089.



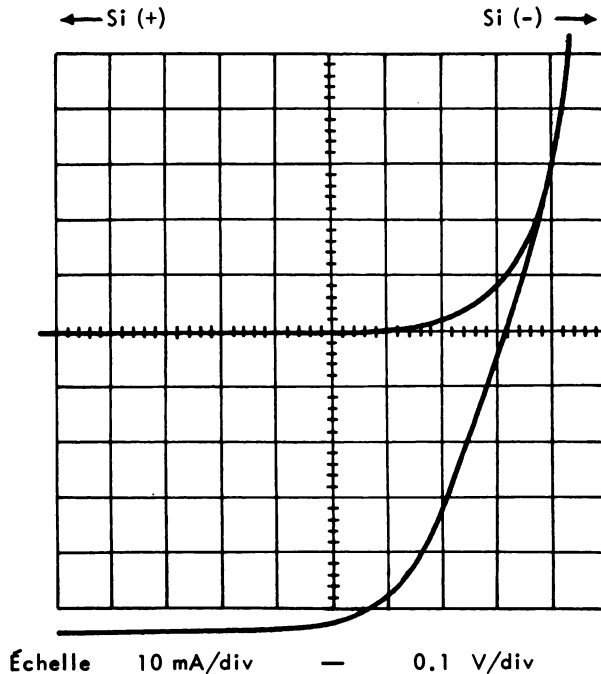


FIGURE 5a. Caractéristique I-V dans l'obscurité et sous éclairciment solaire simulé A.M.1. Si (n,  $\rho=2\Omega\cdot\text{cm}$ )— $\text{SnO}_2$ — $T=292\text{ K}$ . — $S=2\text{ cm}^2$ .

Nous avons constaté expérimentalement que pour la méthode spray,  $V_{\text{co}}$  pour la structure  $\text{Si}(n)-\text{SnO}_2(\text{F})$  était de l'ordre de 300-350 mV sous A.M.1.<sup>11</sup> Cf.: figure 5a, le rendement de conversion étant dans ce cas voisin de 3,5 %. Pour la structure  $\text{Si}(n)-\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})$ ,  $V_{\text{co}}$  est voisin de 420-450 mV conduisant à des rendements de conversion  $\eta=6$  à 7 % (cf. figure 5b).

Les meilleurs résultats obtenus à présent pour des structures identiques sont ceux de DUBOW et al.<sup>12</sup> Par sputtering ils obtiennent  $\eta\approx 12\%$  pour une structure  $\text{Si}(p)-\text{In}_2\text{O}_3(10\%\text{ SnO}_2)$ . Il faut cependant noter le caractère critique de la méthode de préparation

11. G. НААКБ, «Transparent electrode properties of cadmium stannate». *Appl. Phys. Lett.* Vol. 28, 1976, pp. 622-623.

12. J. B. DUBOW, D. E. BURK and J. R. STES, «Efficient photovoltaic heterojunctions of indium tin oxides on silicon». *Appl. Phys. Lett.* Vol. 29, n.º 8, 1976, pp. 494-496.

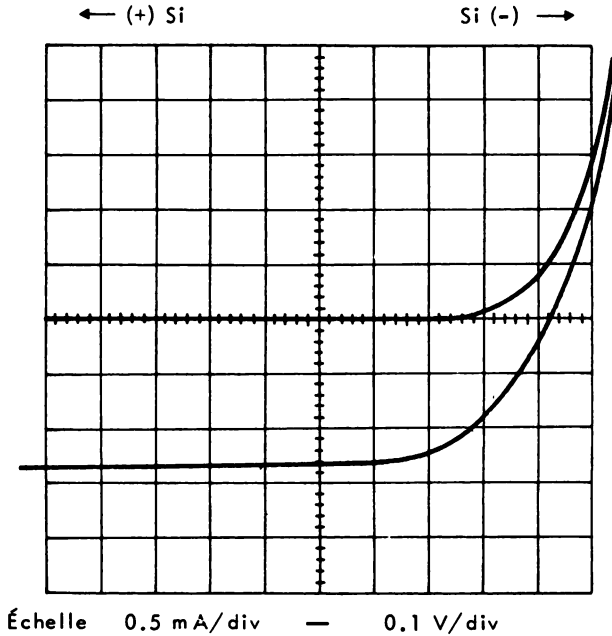


FIGURE 5b. Caractéristique I-V dans l'obscurité et sous éclairciment solaire simulé A.M.1. Si (n,  $\rho=2 \Omega \cdot \text{cm}$ )— $\text{In}_2\text{O}_3$  (Sn),  $T=292 \text{ K}$ ,  $S=4 \text{ mm}^2$ .

utilisée en ce qui concerne la structure de bande à l'interface. En effet, différents auteurs<sup>13, 14</sup> ont trouvé des rendements voisins de 6 % à 7 % par des méthodes de sputtering ou d'évaporation, mais toujours dans le cas d'un dépôt de  $\text{In}_2\text{O}_3$  sur du silicium de type p.

Dans le cas de la méthode spray nous n'obtenons de bons résultats pour  $\eta$  que pour du silicium de type n. Notons enfin que la stabilité dans le temps (sur 3 mois) de ces structures Si -  $\text{In}_2\text{O}_3$  est excellente.

13. S. W. LAI, S. L. FRANZ, G. KENT, R. L. ANDERSON, J. K. CLIFTON and J. V. MASIL, « $\text{In}_2\text{O}_3$  - Si heterojunction solar cells». Eleventh I.E.E.E. photovoltaic specialists conference, I.E.E.E. New York, 1975.

14. E. FABRE et R. TIJBURG, «Heterostructures pour cellules solaires au silicium». Colloque international «Électricité solaire», Toulouse, France, 1-5 Mars 1976.

**TABLEAU III**

**COMPARAISON DES FACTEURS DE MÉRITE  $\varnothing_{TC}$  POUR DIFFÉRENTES ÉLECTRODES TRANSPARENTES**

Auteurs	Dépôts	$R_{\square}$ ( $\Omega$ )	Transmission			$\varnothing_{TC}$ ( $10^{-3} \cdot \Omega^{-1}$ )		
			$\lambda=0.55 \mu\text{m}$	$\lambda=0.9 \mu\text{m}$	$\lambda=1.1 \mu\text{m}$	$\lambda=0.55 \mu\text{m}$	$\lambda=0.9 \mu\text{m}$	$\lambda=1.1 \mu\text{m}$
Fraser et al. <sup>5</sup>	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SnO <sub>2</sub> (sputtering)	3.1	0.83	0.77	0.64	50	24	3.7
Haacke <sup>11</sup>	Cd <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub> (sputtering)	2.4	0.84	0.82	0.7	73	57	11.8
Nos travaux	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Sn) (spray)	9	0.85	0.92	0.92	22	48	48

## E. CONCLUSION

Nous avons préparé des électrodes transparentes d'oxyde d'indium dopé étain ainsi que des structures Si (type n) -  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})$  en utilisant une technique de vaporisation simple et rapide conduisant à des rendements de conversion voisins de  $\eta=7\%$ .

Une des caractéristiques essentielles des dépôts est leur excellente transparence supérieure à 85 % sur toute la fenêtre utile du substrat de silicium.

Le facteur de mérite à  $\lambda=0,9\ \mu\text{m}$  (cf. Tableau III) est parmi les meilleurs pour les électrodes transparentes couramment réalisées.

**INFORME SOBRE LES ACTIVITATS DEL LAAS  
EN EL CAMP DE L'ENERGIA SOLAR**

per

**J. BUXÓ, D. ESTEVE**

**LAAS\*-CNRS, Tolosa de Llenguadoc, França**

## RESUM

L'aplicació terrestre de la conversió fotovoltaica presenta, en primer lloc, el problema del cost de realització de les fotopiles. Cal considerar la possibilitat de reduir el cost de les fotopiles de silici en una relació de 2 a 3, la qual cosa obre camps d'aplicació, limitats tanmateix a instal·lacions de petita importància.

Dues altres vies s'obren, possiblement:

— L'una concerneix la realització de fotopiles en capes primes de gran superfície i de poc cost d'elaboració. En aquesta direcció, la definició de la barrera de potencial difícilment pot ésser considerada per mitjà de la creació d'homounions. Cal, doncs, desenvolupar el perfeccionament de les heterounions: semiconductor-semiconductor, metall-semiconductor; hom posarà una atenció especial en la utilització de díodes Schottky i d'estructures M.I.S.

— L'altra concerneix la realització de centrals utilitzant la concentració òptica. La superfície fotosensible hi resta reduïda, i en aquest cas hom pot considerar fotopiles de cost bàsic elevat i de rendiments més alts. Seran presentats els primers resultats d'un projecte d'1 kw.

## SUMMARY

The terrestrial application of the photovoltaic systems has its main problem in the high cost of the photocells. A first approach let us to the actual possibility to reduce the cost of silicon cells at a ratio of 2-3, in with case new applications of small size systems can be economically feasible.

Two ways have to be considered:

One is the manufacturing of cells by big surface and low cost thin film techniques. Therefore the creation of the potential barrier has to be obtain without homojunctions. That neams the obtention of heterojunctions has to be performed like: semiconductor-semiconductor-metal-semiconductor and specially o related to structures like Schottfly diodes and M-I-S.

The other one is concerning the utilization of photovoltaic systems using optical concentration. The active surface remains small and it has to be considered the possibilities of employing both small and high cost cells with higher efficiencies. The first results of a 1 Kw system.

## INTRODUCCIÓ

El problema de la utilització de l'energia solar a través de la conversió fotovoltaica presenta dos problemes principals:

1. Ocupació del terreny.
2. Cost de les instal·lacions.

1. El problema de l'ocupació del terreny no sembla massa greu. Dues dades il·lustren aquesta afirmació: l'ocupació de terreny corresponent a la producció agrícola per a mantenir una persona durant un any representa 2.000 m<sup>2</sup>. L'ocupació de terreny necessària per a la producció fotovoltaica que correspon al consum energètic d'una persona durante un any és estimada en 20 m<sup>2</sup>.

2. Cost de les instal·lacions.

Abans de presentar xifres cal precisar, naturalment, que el motiu de les inestabilitats actuals del cost de l'energia resta encara mal definit. Tot i això, sembla que el cost de les instal·lacions fotovoltaïques que utilitzen silici monocristallí és encara de 50 a 100 vegades massa alt. Evidentment, hom espera que els anys vinents el preu del silici monocristallí baixará segons un factor que hom pot estimar de l'ordre de 2 a 4 vegades.

La utilització del Si monocristallí de menys bona qualitat anomenat «metallúrgic», i que no comporta processos d'elaboració especials i, per tant, cars, podria conduir a una reducció fins a una desena part.

## PROBLEMES QUE PLANTEJA LA «CONCENTRACIÓ»

El programa que hom desenvolupa actualment al LAAS no és pas condicionat per aquest plantejament.

Al LAAS hom treballa sobre la solució dita de concentració de l'energia solar. Aquesta consisteix a dissenyar dispositius de concentració, de preu reduït, que permetin als dispositius fotovoltaics de treballar amb una intensitat de  $n$  sols en comptes de treballar amb *un sol*, únicament.

Vegem ara com una concentració de  $n=100$  ens permetrà d'és-

ser competitiu respecte al cost de l'energia elèctrica produïda per les centrals tèrmiques convencionals.

Si tenim en compte el preu actual de les tarifes elèctriques que s'acosten a 1 FF/kWh, el preu de 10 hores de consum serà de 10 FF. Una utilització de 10 hores/dia ens porta, per tant, a uns 3.000 FF/any. Si considerem que el nostre sistema de concentració pot funcionar d'una manera fiable durant vint anys, haurem de comparar el seu cost amb 20 vegades 3.000 FF=60.000 FF.

#### COST DEL SISTEMA DE CONCENTRACIÓ I DE LA FOTOPILA

Pel que fa al *sistema*, tenim una eficiència de conversió estimada en  $\eta=10\%$  per a silici monocristallí i la potència lliurada pel sol d'1 kW/m<sup>2</sup>.

Per tant tindrem:

Rendiment  $\times$  Potència del sol = 100 W/m<sup>2</sup>, que serà la potència disponible lliurada per la conversió fotovoltaica del sistema.

La potència que hem pres com a referència és d'1 kW. Per tant, caldrà una superfície de 10 m<sup>2</sup> per a poder transformar la potència d'1 kW solar.

L'interès de la tècnica de concentració ve del fet que el preu de 10 m<sup>2</sup> d'heliòstat és de 10.000 FF aproximadament.

#### EL SISTEMA FOTOVOLTAIC

Cal ara discutir la superfície necessària que haurà de tenir la fopila, i el seu preu. Si partim d'una concentració de 100 vegades caldrà 0,1 m<sup>2</sup> de fopila. El preu de la fopila pot ésser xifrat entorn dels 10 FF/cm<sup>2</sup>. Per tant, caldrà despendre

$$10 \text{ FF/cm}^2 \times 1.000 \text{ cm}^2 = 10.000 \text{ FF de fopiles}$$

Si aquesta solució és fiable per a un període de 10 anys, tindrem que la concentració esdevindrà un mètode competitiu. D'altra banda, si la concentració fos 1.000 vegades en compte de 100 hom podria pensar a treballar amb materials més cars que el silici i hom podria arribar a gastar 10.000 FF per a una superfície de material equivalent a 100 cm<sup>2</sup>.

Els treballs del LAAS han estat orientats d'ençà de fa més de deu anys vers l'estudi de la física dels components d'estat sòlid. En



aquest context els treballs referents a la conversió fotovoltaica són menats a tres nivells.

En el primer nivell hom treballa en un estudi d'optimització de les cèl·lules solars de silici. Hom arriba ací a la conclusió que una concentració d'un factor 100 és el límit d'operabilitat d'aquest material. Aquesta afirmació resta aclarida si pensem en els inevitables problemes de resistència sèrie que cal plantejar motivats per la necessitat de fer contactes localitzats.

Si fem servir materials de mobilitat més gran, tals com l'arseniür de galli (AsGa) o bé tellurur de cadmi (TeCd), hom pot esperar de poder treballar amb concentracions superior. Tanmateix, ja hem vist que amb concentracions de 1.000 ens permet de treballar amb un material de preu més elevat (haviem dit fins a 100 FF/cm<sup>2</sup>). És per això que en el LAAS l'estudi de l'arseniür de galli és el que hi ha en segona posició.

#### ARSENIÜR DE GAL·LI

L'objectiu d'aquest estudi és compartit, en estreta col·laboració, amb els industrials francesos. L'arseniür de galli és un material de gap variable. En el nostre cas el gap variable serà obtingut mitjançant la incorporació gradual d'alumini a través d'un procés de creixement epitaxial. Hom arriba, amb aquest procés, a obtenir una estructura d'aquest tipus:



on hom tindrà a la superfície el gap més elevat i en el volum el gap tindrà el valor més feble. Això ens permet d'absorbir tota la gamma de l'espectre solar amb un màxim de rendiment i, per tant, d'assolir rendiments superiors al 10 %.

#### UN TERCER CAMP: EL TEL·LURUR DE CADMI (TeCd)

Aquest material presenta un gap d'1,4 eV, i mitjançant adjunció de mercuri hom aconsegueix un creixement gradual de HgCdTe i s'arriba a rebaixar el valor del gap a 0,2 eV, és a dir, d'aquesta manera hom pot arribar a construir materials de gap variable. En una primera etapa, que és l'actual, es tracta solament de construir piles a base de TeCd amb rendiments semblants als del silici. La segona etapa serà dedicada a construir una fotopila de gap variable.

Cal assenyalar, abans d'encetar aquest punt, que un altre avan-

tatge d'utilitzar TeCd és de poder disposar d'un material de gap directe que permet d'absorbir la totalitat de l'espectre amb un gruix de solament  $5 \mu$  de material, en comptes de les  $300 \mu$  necessàries per a l'absorció en el cas del silici.

Finalment, cal dir algunes paraules sobre l'estudi d'una central d'1 kW, en el qual el LAAS pren una part activa.

En aquest sentit, dos tipus de solucions han estat pensades. La primera és una solució per reflexió, que fa servir miralls parabòlics i els plans de la qual tinc ací amb mi per a qui s'hi interessi. La segona és una solució per transmissió que utilitza diòptries i de la qual també dispo de informació detallada per a qui ho desitgi.

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA SERIE  
DE LA TRANSCÉLULA**

por

**A. LUQUE, A. CUEVAS, M. G. AGOST, J. EGUREN**

**Laboratorio de Semiconductores, E.T.S.I.T.  
Universidad Politécnica de Madrid**

## RESUMEN

Recientemente se han desarrollado células solares iluminables por las dos caras para concentración estática, que denominamos transcélulas. Estas células presentan buenos valores de corriente de cortocircuito ( $35 \text{ mA/cm}^2$ ) y de tensión de circuito abierto ( $600 \text{ mV}$ ), pero un bajo factor de curva ( $0,5$ ) debido a la alta resistencia serie inherente a la estructura. Un análisis de esta resistencia muestra que un diagrama de metalización adecuada puede dar lugar a valores aceptables de este factor.

## RESUM

Recentment han estat desenvolupades cèl·lules solars il·luminables per a totes dues cares per a concentració estàtica, les quals anomenem transcèl·lules. Aquestes cèl·lules presenten bons valors de corrent de curt circuit ( $35 \text{ mA/cm}^2$ ) i de tensió de circuit obert ( $600 \text{ mV}$ ), però presenten un baix factor de corba ( $0,5$ ), el qual és degut a l'alta resistència sèrie inherent a l'estructura. Una anàlisi d'aquesta resistència mostra que un diagrama de metalització adequat pot donar lloc a valors acceptables d'aquest factor.

## SUMMARY

Solar cells illuminated simultaneously on both sides, so called «transcells» have been recently developed in our laboratory.

These cells show good short circuit current levels ( $\sim 35 \text{ mA/cm}^2$ ) and open circuit values of  $600 \text{ mV}$ . Nevertheless the low curve factor ( $\sim 0,5$ ) has to be related to the high resistance inherent of the cell structure itself.

An analysis of this phenomena shows that the selection of an appropriate metalization pattern, acceptable values for the curve factor can be reached.

WINSTON<sup>1</sup> y sus colaboradores han desarrollado perfiles de espejos cilíndricos capaces de enfocar la luz solar incidente sobre colectores de forma arbitraria siempre y cuando la proyección de los rayos de sol sobre el plano perpendicular a las generatrices del espejo sea inferior a un valor máximo  $\varphi_m$  que denominaremos ángulo de aceptación.

Tales espejos, orientados con las generatrices de E a W y orientados hacia el sur apuntando al ecuador celeste, permitirían concentrar la energía solar sobre el colector para cualquier ángulo horario del sol cuando éste se encuentra en los *equinoccios*. Cuando esto último no ocurre, la energía solar también se concentra en el colector si el ángulo de aceptación es suficientemente grande como para admitir las variaciones de declinación del sol.

Para ángulos de aceptación no demasiado elevados será menester algunos retoques estacionales del ángulo de elevación del espejo. Estos retoques serán tanto menos numerosos cuanto mayor sea el ángulo de aceptación. En la figura 1 se observa la energía que es posible recoger en un espejo de este tipo para ángulos de aceptación de  $\pm 10^\circ$ , en Madrid, suponiendo que se permiten cuatro u ocho variaciones anuales del ángulo de elevación y que éste ha sido elegido de manera que la energía recogida es lo más constante posible a lo largo de todo el año.<sup>2</sup>

Existe una relación entre la concentración máxima alcanzable en un concentrador Winston y el ángulo de aceptación máxima dado por

$$\frac{L_c}{P_c} = \frac{1}{\text{sen } \varphi_m} \quad (1)$$

donde la concentración se ha expresado como cociente entre la

1. R. WINSTON y R. HINTENBERGER, *Solar Energy*, 17, 225, (1975).  
2. A. LUQUE y E. RÍOS, *Energía recogida en Madrid por un espejo Winston*, UPM/ETSIT/LS/1175, Madrid (1975).

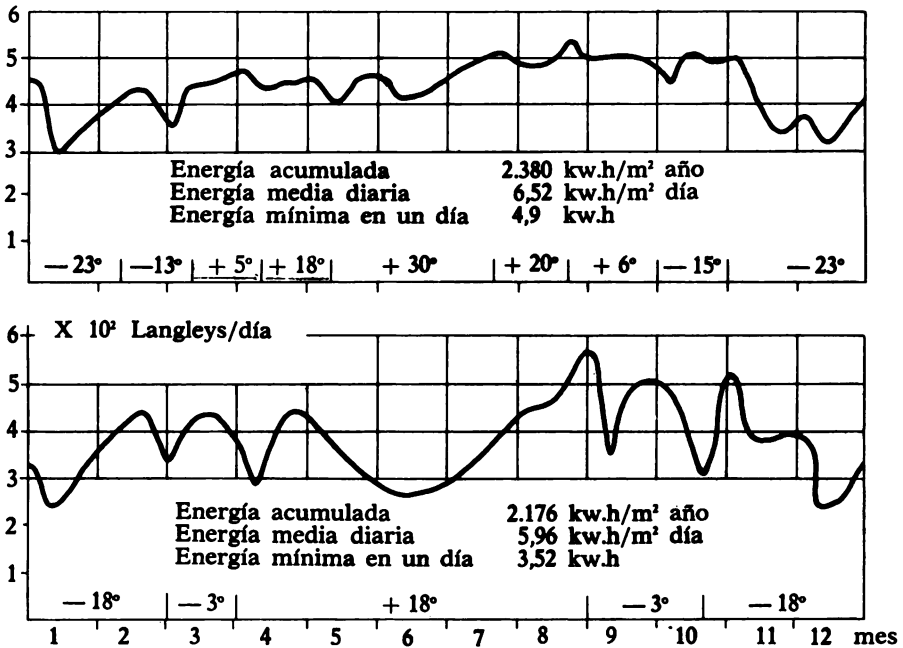


FIGURA 1. *Superior*, ocho cambios estacionales de ángulo de elevación. *Inferior*, cuatro cambios. Curvas obtenidas con la insolación en Madrid, promediadas durante diez días.

longitud de la apertura de entrada  $L_e$  y el perímetro del concentrador  $P_c$ .

La concentración estática fotovoltaica ha atraído sobre sí reciente interés<sup>3, 4, 5</sup> como procedimiento para reducir la masa de silicio necesaria para la conversión *fotovoltaica*. Para un ángulo  $\varphi_m$  dado la máxima reducción de silicio se obtiene si el colector, es decir, la célula, tiene doble perímetro, es decir, puede ser eficiente por ambas caras.

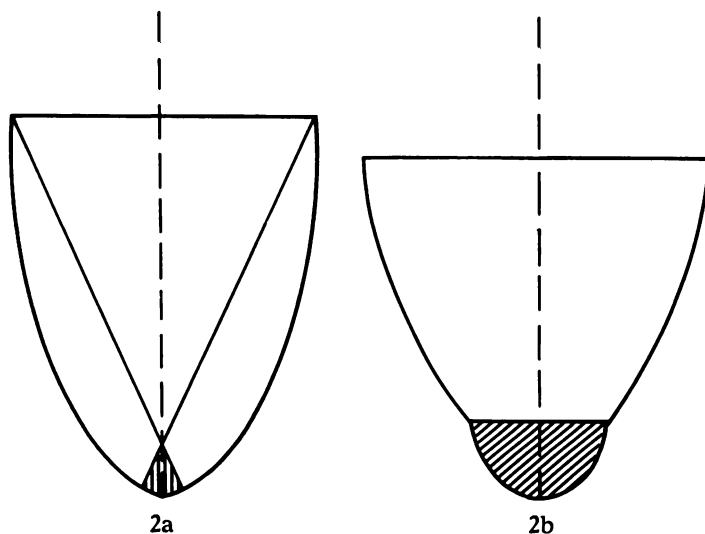
En este caso la concentración vale

$$\frac{L_e}{W_c} = \frac{2}{\text{sen } \varphi_m} \quad (2)$$

3. T. SUREK, R. O. BELL and W. T. KURTH, *Proc. Int. Symp. on Solar Energy*, Spring Meeting of the Electrochem. Soc., Washington, May 1976.

4. A. LUQUE, *The transcell: a novel two sided solar cell*. S.U.B. Meeting, Toulouse, June 1976.

5. A. I. MLAVSKY, R. W. STORMONT, A. S. TAYLOR, *12th Photovoltaic Specialists Conference* (to be published).



FIGURAS 2a y 2b. Concentrador de Winston: a) hueco, receptor vertical; b) mixto, la parte inferior contiene un dieléctrico de índice de refracción mayor que 1. Es el tipo llamado «con aletas».

es decir, que una célula de doble cara permite duplicar la concentración que recibe para un ángulo de aceptación dado con relación a la que puede obtenerse en una célula iluminable sobre una cara.<sup>6</sup> En la figura 2 se observa la disposición de este tipo de células dentro del concentrador:

Para satisfacer esta necesidad A. LUQUE ha inventado recientemente la célula de doble cara.<sup>7</sup> Un esquema de este dispositivo se muestra en la figura 3. Dos capas  $n^+$  han sido difundidas sobre una oblea tipo  $p$  por ambas caras y la tecnología planar ha sido empleada para parar la difusión en los lugares necesarios para permitir la toma de contactos a la región  $p$ . Un esquema del proceso de fabricación se muestra en la figura 4. En la Tabla I aparecen las principales características del dispositivo.

Esta célula ha sido llamada transcélula ya que su estructura y su funcionamiento recuerda un transistor. En el modo normal de funcionamiento ambas capas difundidas se conectan en paralelo

6. N. B. GOODMAN, R. IGNATIUS and R. WINSTON, *Applied Optics* 2434 (1976).

7. A. LUQUE, patente española núm. 453.575 (pendiente).

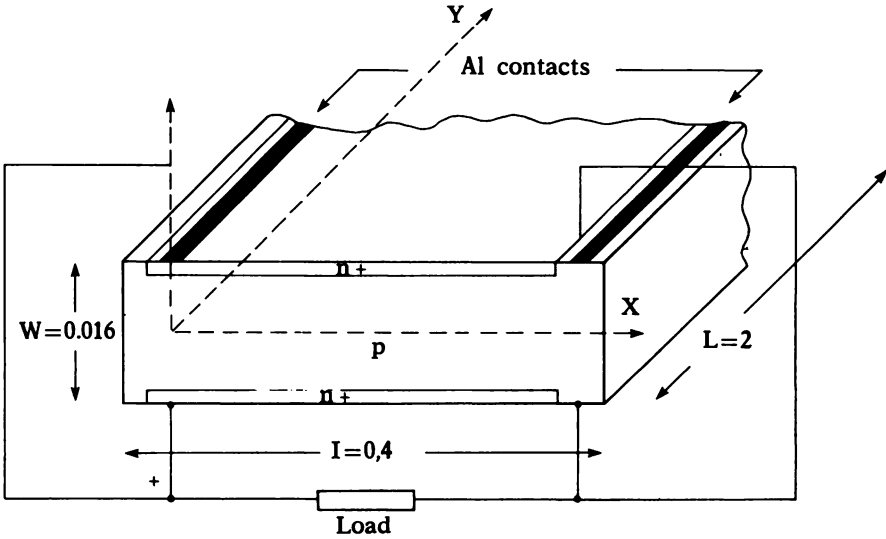


FIGURA 3. Esquema de una transcélula.

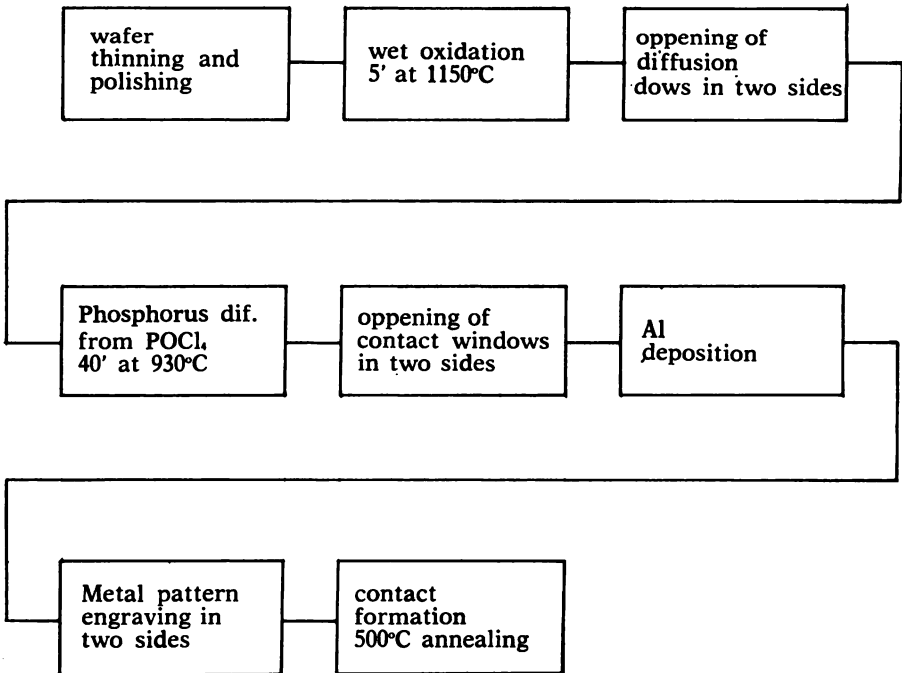


FIGURA 4. Proceso de fabricación de transcélulas.



TABLA I

## CARACTERÍSTICAS DE TRANSCÉLULAS

Espesor . . . . .	140-180 $\mu\text{m}$
Resistencia de capa del volumen (tipo P) . . . . .	40-60 $\Omega$
Resistencia de capa de la región difundida (tipo N) . . . . .	8-12 $\Omega$
Profundidad de unión . . . . .	0,5 $\mu\text{m}$
Área de la célula . . . . .	$0,4 \times 2 = 0,8 \text{ cm}^2$
Error de alineamiento entre ambas caras difundidas . . . . .	10 $\mu\text{m}$
Área de contactos . . . . .	$0,01 \times 2 = 0,02 \text{ cm}^2$
Área efectiva de la célula . . . . .	$0,3525 \times 2 = 0,705 \text{ cm}^2$
Factor de recubrimiento . . . . .	0,88
Recubrimiento antireflectante . . . . .	Capa de PSG azul 800 Å de espesor
$I_{sc}$ típica (AM1×1,4) (una cara) . . . . .	21-24 mA
$J_{sc}$ verdadera (AM1×1,4) (una cara) . . . . .	30-34 mA/cm <sup>2</sup>
$V_{oc}$ típica (AM1×1,4) (una cara) . . . . .	540-600 mV
$R_s$ típica . . . . .	6-12 $\Omega$
$I_{sc}$ típica adicional del electrodo posterior (AM1×1,4) . . . . .	5-10 mA/cm <sup>2</sup>
Resistencia serie calculada (volumen) . . . . .	4,2 $\Omega$

constituyendo el cátodo de la transcélula. El ánodo está constituido por la zona *p*. Esta estructura, aun iluminada por una sola cara, muestra corrientes de cortocircuito superiores a las de la célula convencional ya que los portadores generados cerca de la parte posterior de la transcélula son colectados con gran eficiencia por la unión posterior. Asimismo la tensión de circuito abierto, especialmente para transcélulas delgadas, resulta aumentada al aislar la unión posterior a la zona de base de la zona superficial posterior de alta velocidad de recombinación. Un análisis<sup>8</sup> comparativo de la corriente de cortocircuito y de la tensión de circuito abierto de transcélulas, células convencionales y células de campo retrodifusor<sup>9</sup> (Back Surface Fields o BSF cells) muestra que para espesores prácticos la transcélula presenta mejor comportamiento que las restantes células (ver figura 5). En la Tabla II aparece una evidencia experimental de la mejora en corriente de cortocircuito y en tensión de circuito abierto lograda con la conexión en transcélula.

El mayor inconveniente de la transcélula radica en su resistencia serie inherentemente elevada debido a que los portadores, antes de alcanzar los electrodos exteriores, han de recorrer un camino

8. A. LUQUE, *Double Sided Solar Cell for Static concentration*, por publicar.

9. J. MANDELKORN and J. H. LAMECK, *Proc 9th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 66 (1972).

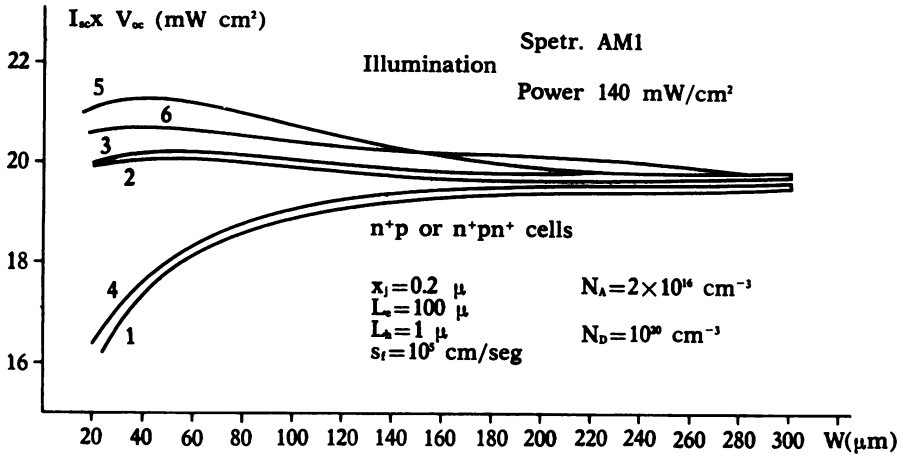


FIGURA 5

TABLA II

**CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO Y TENSION DE CIRCUITO ABIERTO DE TRANSCÉLULAS EXPERIMENTALES BAJO ILUMINACIÓN AM2**

Iluminación	Cara A				Cara B				Cara A
	Unión A		Unión B		Unión A		Unión B		
Condiciones de la unión opuesta	c.a.	c.c.	c.a.	c.c.	c.a.	c.c.	c.a.	c.c.	en paralelo
Corriente c.c. (mA)	10,6	9,3	8,0	2,5	11,25	9,9	8,5	2,8	12,3
Tensión c.a. (mV)	495	430	478	320	472	379	479	325	489

de elevada resistencia constituido por parte de la resistencia de capa de las regiones  $n$  y parte de la resistencia de capa de la región  $p$ .

Suponiendo una iluminación idéntica por ambas caras, las ecuaciones que gobiernan el voltaje en cada punto  $x$  (ver figura 1) son:<sup>8</sup>

$$\frac{dV_n(x)}{dx} = -\frac{R_n}{L}I_n(x) \text{ con } V_n(0)=0 \quad (3)$$

$$\frac{d V_p(x)}{dx} = - \frac{R_p}{L} I_p(x) \text{ con } V_p(1) = V_s \quad (4)$$

$$\frac{d I_n(x)}{dx} = - I_{sc} L \left[ 1 - \exp \frac{q(V(x) - V_{oc})}{kT} \right] \text{ con } I_n(1) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d I_p(x)}{dx} = I_{sc} L \left[ 1 - \exp \frac{q(V(x) - V_{oc})}{kT} \right] \text{ con } I_p(0) = 0 \quad (6)$$

con

$$V(x) = V_p(x) - V_n(x) \quad (7)$$

donde:

$V_n(x)$  = tensión en cada punto de la zona  $n^+$

$V_p(x)$  = tensión en cada punto de la base

$R_n$  = resistencia por cuadro ( $\Omega/\square$ ) de la capa difundida

$R_p$  = resistencia por cuadro ( $\Omega/\square$ ) de la capa de base

$L$  = longitud de la célula

$I_n(x)$  = corriente en cada punto de la zona  $n^+$

$I_p(x)$  = corriente en cada punto de la zona  $p$

$V_s$  = tensión aplicada

$I_s$  = corriente de la célula

$I_{sc}$  = densidad de corriente de cortocircuito

$V_{oc}$  = tensión de circuito abierto

$l$  = anchura de la célula

$R_s$  ( $\Omega$  cm)

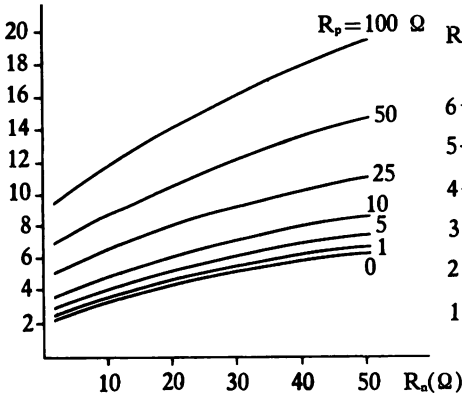


FIGURA 6

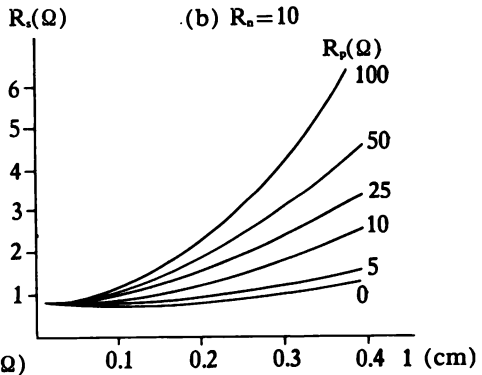


FIGURA 7

La solución de estas ecuaciones aparece en la figura 6. En ella es posible apreciar cómo para resistencias de capa crecientes en la zona  $p$  aparecen también crecientes resistencias series que en las transcélulas experimentales realizadas hasta ahora incluso llegan a cuadruplicar la resistencia de células convencionales.

El resultado de las ecuaciones (3) a (7) en condiciones asintóticas puede expresarse analíticamente. Así, para

$$(R_n + R_p) \frac{1}{L} \ll \frac{kT}{q I_{sc} L l},$$

$$R_s = \frac{kT}{q I_{sc} L l},$$
(8)

que es la resistencia «intrínseca» de la célula solar, es decir, la que acontece cuando los efectos parásitos de resistencia son poco notables. Esta expresión sería también válida para una célula convencional en iguales condiciones. En el caso contrario, es decir si

$$R_n + R_p \frac{1}{L} \gg \frac{kT}{q I_{sc} L l},$$

$$R_s = \frac{R_n R_p}{(R_n + R_p)} + \sqrt{\frac{kT}{q I_{sc} L l} (R_n + R_p) \frac{1}{L}},$$
(9)

que representa la conexión en paralelo de las dos resistencias  $R_n 1/L$  y  $R_p 1/L$  cuando ambas resistencias son de parecido valor y tiende a la media geométrica entre la resistencia intrínseca y la resistencia  $R_n 1/L$ , cuando  $R_p$  es próxima a cero, que es el caso de las células convencionales.

Sin embargo, existen diversos medios de reducir estas resistencias hasta valores aceptables, entre ellos la realización de un enrejillado adecuado de contactos. Así, reduciendo  $l$  en cantidades no excesivas se pueden lograr buenos resultados. Tal como se observa en la figura 7, donde se ha representado el término  $R_s 1$ , que es el factor que, de hecho, influye en la eficiencia, bastaría reducir la anchura  $l$  de la rejilla de metalización de 0,4 cm a 0,1 para tener, para una célula de  $R_p = 100$ , que es el valor en las actuales, mejor factor de curva que el correspondiente a una célula convencional con una separación entre dientes de 0,4.

# **CÉLULA SOLAR DE SILICIO POLICRISTALINO**

por

**B. ALONSO OTERO, J. PIQUERAS, J. MARTÍNEZ, A. CRIADO**

**Departamento de Física del Estado Sólido  
Universidad Autónoma de Madrid**

## RESUMEN

Se han hecho células solares, sobre obleas de Si policristalino tipo p, mediante difusión. Se ha obtenido una eficiencia del 7,1 % sin usar capa antirreflectante, siendo la profundidad óptima de la unión de 2,6  $\mu$ . Mediante aproximación de la curva experimental de respuesta y la teórica se han obtenido las longitudes de difusión.

## RESUM

Hom ha fet cèl·lules solars sobre oblees de Si policristallí tipus p, mitjançant difusió. Hom n'ha obtingut una eficiència del 7,1 % sense emprar capa antireflectora, amb una profunditat òptima de la unió de 2,6  $\mu$ . Per mitjà de l'aproximació de la corba experimental de resposta i la teòrica han estat obtingudes les longituds de difusió.

## SUMMARY

Solar cells on polycrystalline Silicon p-type wafers have been made by diffusion. An efficiency of 7,1 % without antireflectif layer has been obtained. The optimum depth of the junction has been estimated to be at 2,6  $\mu$  from the surface.

A fitting procedure between the experimental and theoretical curves has been used to calculate the diffusion lengths.

## INTRODUCCIÓN

Las células se construyeron mediante difusión de fósforo sobre Si-policristalino tipo p. El usar Si policristalino como material base reduce el precio de coste de éstos; a pesar del tamaño de grano de estos materiales parece ser que actúan como superficies de recombinación, lo que hace que las células obtenidas a partir de él sean poco eficientes. Teniendo en cuenta que cuanto mayor sea el grano mayor es la probabilidad de que los portadores recorran su longitud de difusión sin que lleguen a recombinarse, y en la idea de que cuanto más corto fuese el trabajo tecnológico para la obtención del material base más barato sería éste, se hicieron en nuestro laboratorio estudios sobre distintos Si policristalinos para su posible aplicación a dispositivos. Uno de los estudios ha sido el que se obtiene mediante deposición química de Si-policristalino sobre un núcleo monocristalino.<sup>1</sup> Cortando la muestra y mediante un ataque químico preferencial se observan dos zonas (fotografía 1), perfectamente diferenciadas, un núcleo central monocristalino y una zona externa estriada.

Estas estructuras son obtenidas típicamente por subenfriamiento que permite una cristalización del núcleo central mientras que la zona externa, al enfriarse más rápidamente, no ha tenido tiempo de nuclearse en monocristales. Debido a la heterogeneidad del grano no es aconsejable para la fabricación de dispositivos ya que generalmente no serán reproducibles.

Mediante una fusión por zonas de este Si, una o dos pasadas, se llega a un tipo de Si de grano más uniforme y mayor como se observa en las fotografías 2 y 3 que nos muestran cortes paralelos y normales a la muestra. La primera nos muestra los granos, sus fronteras y una serie de dislocaciones sin ninguna orientación preferencial. En la otra, que tiene mayor amplificación que la anterior, observamos más nítidamente el grano. Vemos, también, que las fronteras de grano están formadas por unas pocas alineaciones de

1. MUÑOZ, E.; BOIX, J. M.; LLABRÉS, J.; MÓNICO, J. P. y PIQUERAS, J., *Solid State Electronics*, 17, 1974, 439.

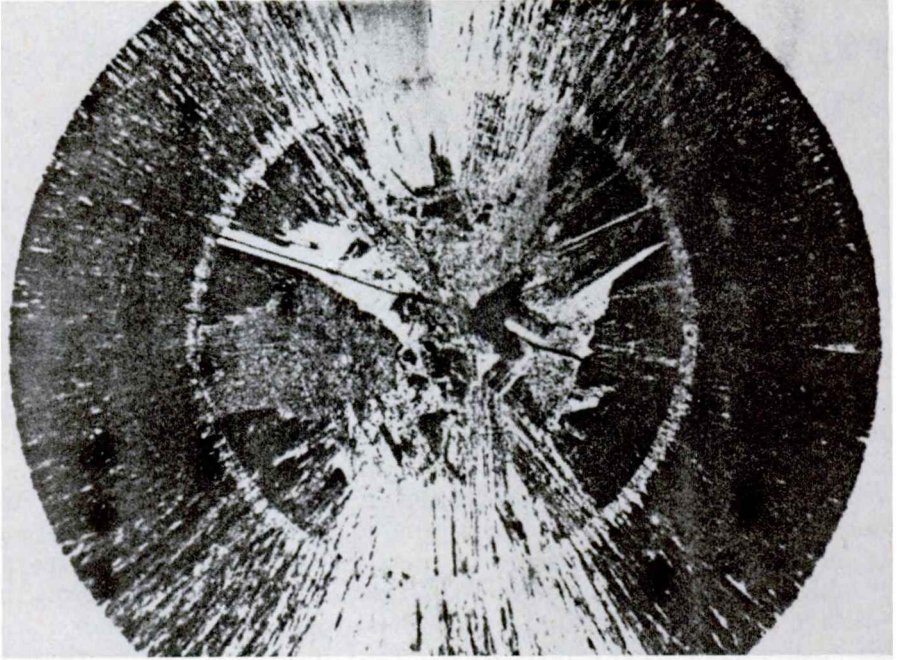


Foto 1

dislocaciones, en algunos casos una sola alineación, lo que da a este Si un carácter bastante monocristalino. El tamaño medio del grano era del orden de  $10^4 \mu^2$  y dentro de ellos existe una serie de dislocaciones cuya densidad media es del orden de  $16^6$  disl/cm<sup>2</sup>, que es un orden mayor que las de un monocristal típico. De la evaluación eléctrica del material se dedujo que  $\rho = 45\omega \times \text{cm}$  y la concentración  $N_a = 2,92 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ . También experimentalmente se observó que su movilidad era  $\mu = 370,6 \text{ cm}^2/\text{v. sg}$ , que es ligeramente inferior a la correspondiente a un monocristal de esa resistividad.

Se hicieron difusiones a distintos tiempos y se calcularon las características C-V de las uniones así realizadas, dando una dependencia lineal de  $1/C^3$  frente a V, lo que es característico de una emisión de gradiente lineal. Se calcularon las profundidades de la unión observándose que éstas eran más profundas que si se hiciesen





Foto 2

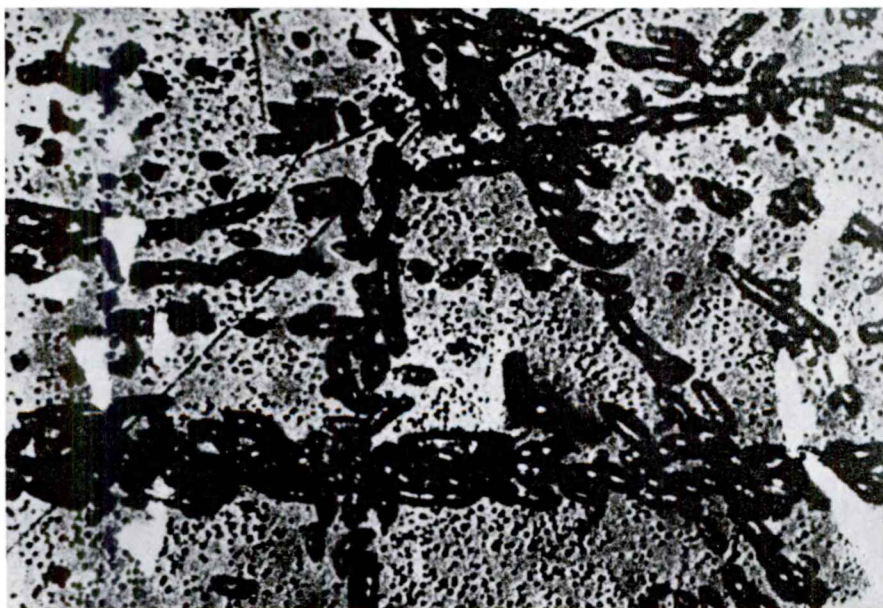


Foto 3

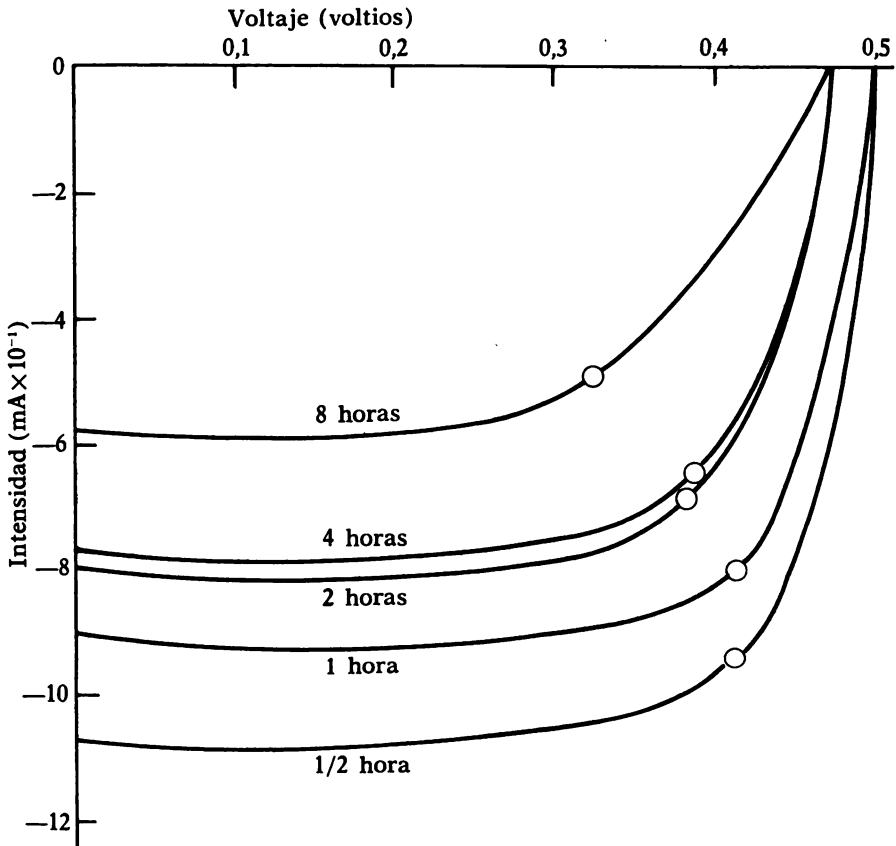
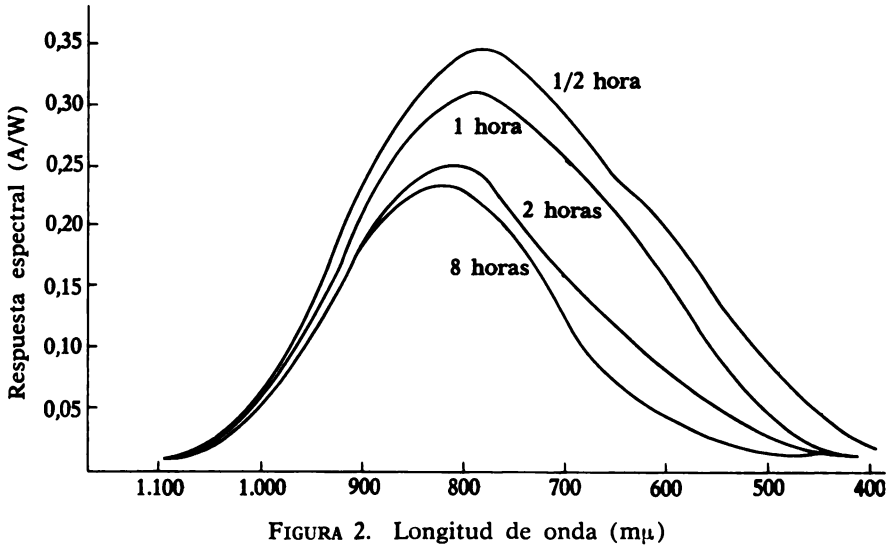


FIGURA 1. Característica I-V de células solares para diferentes tiempos de difusión ( $T=1.200^{\circ}\text{C}$ ).

sobre un monocristal, por lo que se dedujo que su coeficiente de difusión era mayor siendo éste de  $3,09\mu^2/\text{hora}^2$ .

Esto nos hizo pensar que el material era bastante apropiado para realizar sobre él dispositivos fotovoltaicos. Mediante difusión de fósforo a una temperatura de  $1200^{\circ}\text{C}$ , durante distintos tiempos se fabricaron las células. Como electrodos se usó aluminio. Sobre la zona N, por la cual se hacía incidir la luz, se evaporó una capa

FIGURA 2. Longitud de onda (m $\mu$ )

de aluminio semitransparente; una réplica de ella nos dio un coeficiente de transmisión prácticamente constante en la zona del visible e infrarrojo cercano con un valor del 50 %. Aplicándoles una tensión entre 0 y 0,6 V. se obtuvieron las características de la figura 1. La muestra de 1/2 hora es la que nos dio una intensidad mayor y por tanto es la que va a producir mayor eficiencia (figura 2). Conforme el tiempo de difusión va aumentando, los picos de eficiencia se desplazan hacia el infrarrojo, lo cual es obvio ya que, al ser la unión más profunda, los pares de portadores que tienen más posibilidad de alcanzar ésta son los creados por los fotones de mayor longitud de onda que son los que menos se absorben.

En vista de que la eficiencia aumentaba al disminuir la profundidad de la unión se hicieron otra serie de células a una temperatura de difusión de 1.100°C. Los contactos usados en este caso han sido de cromo. La capa semitransparente presentaba un coeficiente de transmisión del 60 %, prácticamente constante en la zona de trabajo. La respuesta espectral (figura 3) nos muestra que la célula de mayor eficiencia es aquella en que el tiempo de difusión dura una hora, que corresponde a una profundidad de la unión de 2,6 $\mu$ .

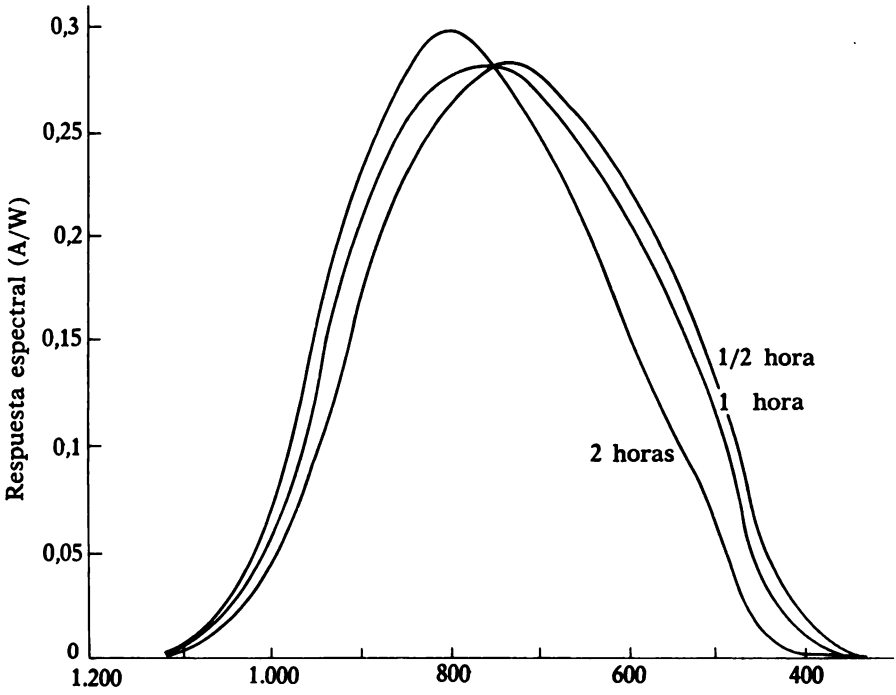


FIGURA 3. Longitud de onda (mμ).

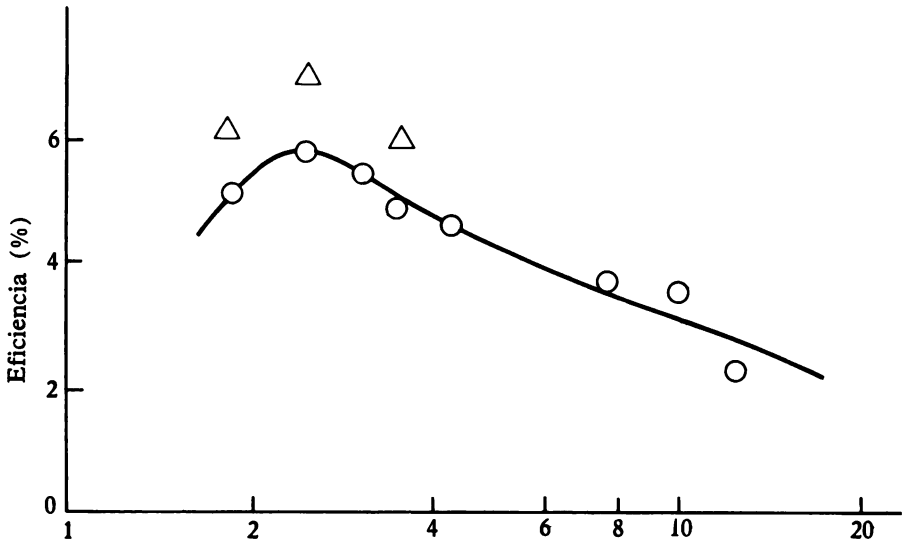


FIGURA 4. Profundidad de la unión (μ)

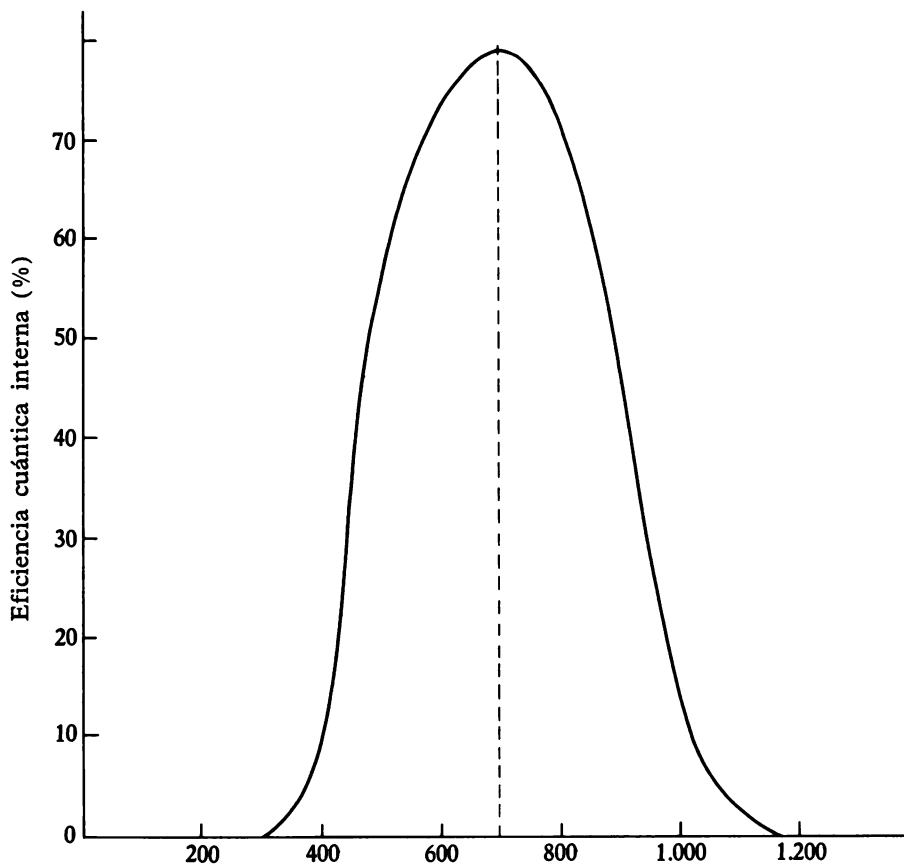


FIGURA 5. Longitud de onda (mμ)

La variación de la eficiencia en función de la profundidad de la unión se observa en la figura 4. Como las transmisiones del cromo y del aluminio son diferentes, se normalizaron éstos a un valor de un 50 %. Los tres triángulos representan las células de electrodos de cromo que al normalizarlas son representadas por los tres círculos que se observan bajo los triángulos. Los otros círculos representan las células de electrodos de aluminio. La figura nos muestra que la máxima eficiencia corresponde a una profundidad de  $2,5\mu$  aproximadamente.

La eficiencia cuántica, el tanto por ciento de pares electrón-hueco generados por fotones que llegan a la unión, de la célula de mayor eficiencia, nos muestra que el 80 % de los portadores que llegan a la unión son los generados por fotones de longitud de onda de  $0,7\mu$ , reduciéndose esta proporción de forma casi simétrica para longitudes de onda superiores e inferiores (figura 5).

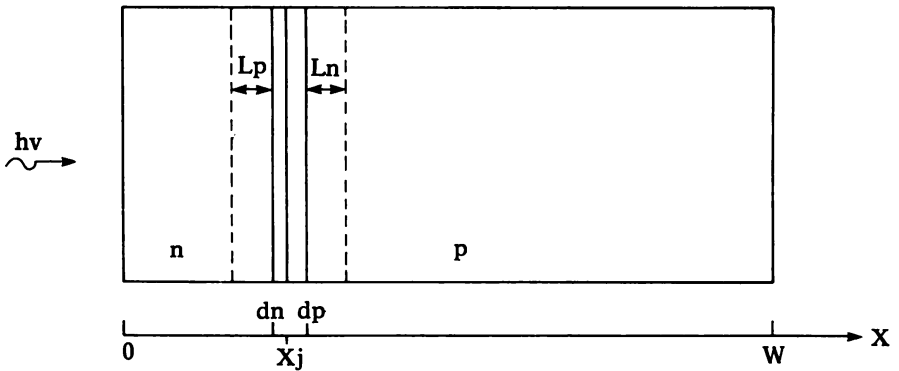


FIGURA 6. Modelo geométrico de una célula solar.

Se ha hecho un cálculo de las longitudes de difusión mediante aproximación de la curva experimental de respuesta espectral a la curva teórica. Esta se deduce a partir de un modelo muy simple<sup>3</sup> que hace una serie de suposiciones, tales como la de suponer constantes el dopaje, la movilidad y el tiempo de vida. El esquema puede verse en la figura 6. Esta curva va a tener la forma:

$$S(\lambda) = S_p(\lambda) + S_n(\lambda) + S_{ce}(\lambda);$$

$$S_p(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} |1 - R(\lambda)| \frac{\alpha L_n}{1 + \alpha L_n} \{ \exp(-\alpha dp) - \exp[-\alpha \omega + (\omega - dp)/L_n] \},$$

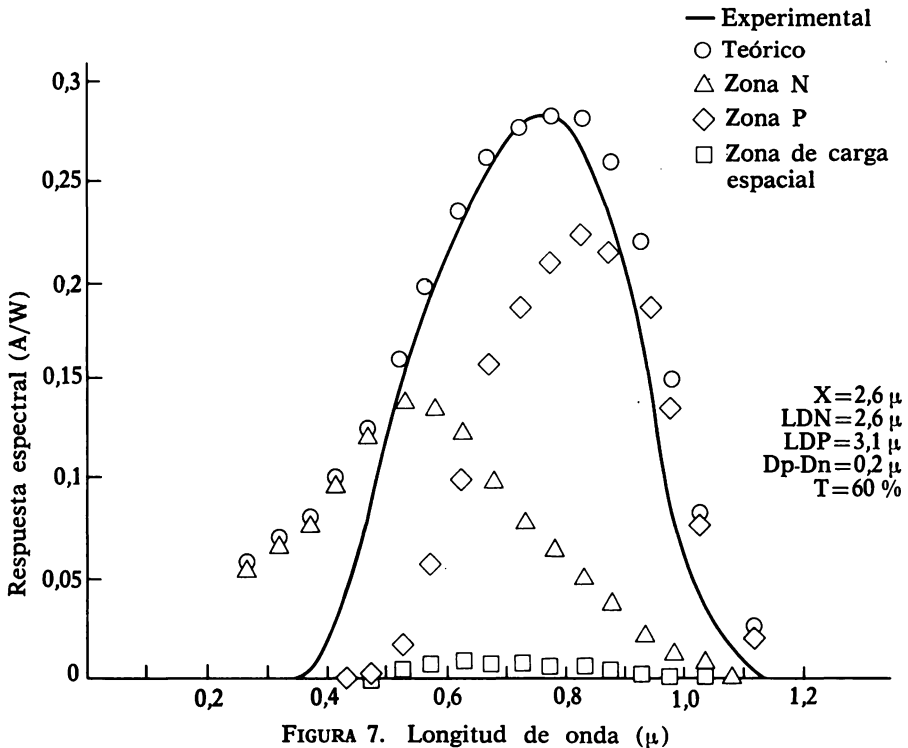
que nos da la contribución de la zona p a la respuesta total;

$$S_n(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} |1 - R(\lambda)| \frac{\alpha L_p}{1 - \alpha L_p} \{ \exp(-\alpha dn) - \exp(-dn/L_p) \}$$

que es la contribución de la zona n,

$$S_{ce}(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} |1 - R(\lambda)| \exp(-\alpha dn) \{ 1 - \exp[-\alpha(dp - dn)] \}.$$

3. SZE, S. M., *Physic of semiconductor devices*, Wiley, 1969.



$R(\lambda)$  es la reflectividad en función de la longitud de onda.

$\alpha(\lambda)$  es el coeficiente de absorción en función de la longitud de onda.

La curva experimental que vamos a aproximar va a ser para unos valores de  $2,6 \mu$  de profundidad de unión, con un coeficiente de transmisión del 60 % e independiente este último de la longitud de onda. Por medidas de la capacidad se sabía que la anchura de la región de carga espacial era de  $0,2\mu$ . A partir de valores que se dieron a  $L_n$  y a  $L_p$  se calculó  $S(\lambda)$  para 14 valores diferentes de  $\lambda$  comprendidos entre  $0,3$  y  $1,1\mu$ . Se eligieron valores de  $L_n$  y  $L_p$  que diesen un máximo para  $S(\lambda)$  próximo al encontrado experimentalmente, y además este valor máximo debía ser igual al máximo de la curva experimental. Por último, los valores de  $L_n$  y  $L_p$  óptimos fueron aquellos que hacían la expresión  $|S(\lambda)-S_{exp}(\lambda)|$  mínima. Estos valores han sido:

$$\begin{aligned}L_n &= 26\mu \\L_p &= 3,1\mu\end{aligned}$$

En la figura 7 se representa la curva experimental de la respuesta espectral  $S_{exp}(\lambda)$ , la teórica  $S(\lambda)$  y las contribuciones de  $S_p(\lambda)$ ,  $S_n(\lambda)$  y  $S_{ce}(\lambda)$  dadas por las fórmulas anteriores. Como se aprecia, las curvas se ajustan en la región comprendida entre  $0,5$  y  $0,8\mu$ . En las otras zonas la respuesta espectral teórica es mayor que la experimental.

Los fotones correspondientes a las longitudes de onda de  $0,3$ - $0,5\mu$  van a ser absorbidos cerca de la superficie, y en esa región el tiempo de vida media va a ser mucho menor que en las otras regiones ya que la concentración de portadores cerca de la superficie va a ser muy grande y provocará una disminución del tiempo de vida. Por otra parte, debido a la difusión, aumenta la densidad de defectos aumentando, por tanto, la probabilidad de recombinación. Por todo ello, muy pocos portadores generados por estos fotones llegaron a la unión, de ahí que la curva experimental sea menor que la teórica.

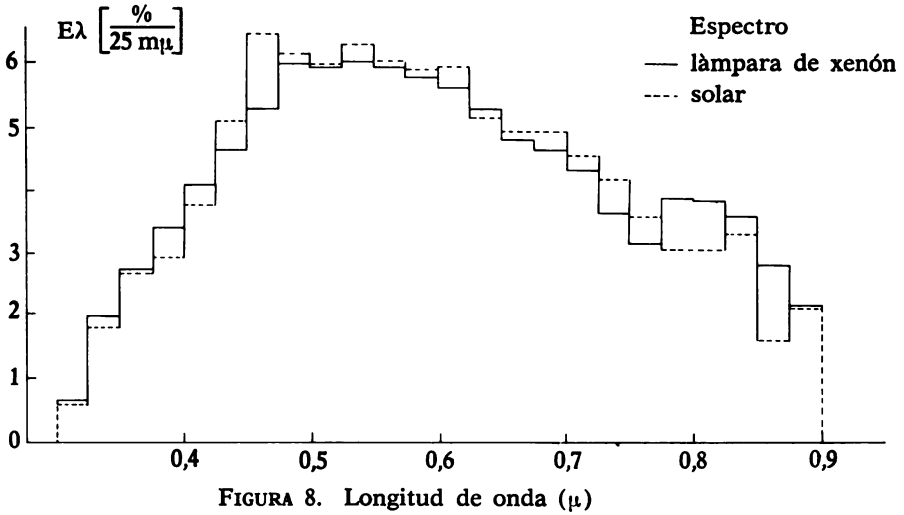
El aumento de la curva teórica en la zona del infrarrojo, a partir de  $0,8\mu$  se explica teniendo en cuenta que estos fotones van a ser absorbidos en la zona p. Como hemos dicho anteriormente, las difusiones son del tipo de gradiente lineal, o lo que es lo mismo, una parte de las impurezas difundidas atravesaron la unión y alcanzaron la zona p. Esto produce una perturbación de la red en esa zona que va a actuar como trampa para los portadores creados en ella y por tanto disminuye la probabilidad de que estos alcancen la unión.

Por último, se ha querido saber cuál sería la eficiencia de estas células si en vez de iluminarla con la fuente luminosa del laboratorio se iluminase con la luz solar. En la figura 8 se representan los espectros luminosos de la lámpara de xenón usada y del sol. El espectro solar es mayor en la región del visible y menor en la del infrarrojo. Mediante un programa apropiado se comprobó que la diferencia de eficiencias totales es menor que el 1 % de la eficiencia total de la célula.

## CONCLUSIONES

La célula de mayor eficiencia obtenida ha sido aquella en que la profundidad de la unión está a  $2,6\mu$ ; su eficiencia ha sido del





7,1 %. Si tenemos en cuenta que la capa semitransparente evaporada reduce su eficiencia casi en un factor 2, creemos que ésta será aumentada si en vez de esta capa usamos contactos óhmicos opacos en forma de pata de gallo. Esto unido a una reducción en el precio de coste, con respecto a las células de Si monocristalino, puede hacerlas bastante competitivas. Esto estimula a continuar la investigación sobre el presente tema.



**LÁMINAS ANTIRREFLECTANTES Y SU APLICACIÓN  
A DISPOSITIVOS DE CONVERSIÓN  
DE ENERGÍA SOLAR**

por

**A. NÚÑEZ, F. GRAÑA y C. SÁNCHEZ**

**FEMSA, D.E.P., Investigación, Madrid**

## RESUMEN

Se discuten brevemente las bases físicas para la aplicación de láminas antirreflectantes en dispositivos conversores de energía solar. Se presenta un análisis experimental de algunas de las películas usadas comúnmente en células solares de Si monocristal. Se discuten las principales técnicas experimentales de preparación de estas películas así como su rentabilidad.

## RESUM

Hom discuteix breument les bases físiques per a l'aplicació de làmines antireflectores en dispositius convertidors d'energia solar. Hom presenta una anàlisi experimental d'algunes de les pel·lícules emprades correntment en cèl·lules solars de Si monocristallí. Hom discuteix les principals tècniques experimentals de preparació d'aquestes pel·lícules, i també llur rendibilitat.

## SUMMARY

The physical bases of the application of antireflecting layer in solar energy converter dispositives are briefly discussed. An experimental analysis of some of the films commonly used in Si monocrystal solar cells, is presented. Discussions on the main experimental techniques for the preparation of these films, as well as on their economical aspect, are given.

## INTRODUCCIÓN

Los dispositivos convertidores de energía solar en uso hoy pueden aprovechar la totalidad del espectro solar o bien una parte de él. En condiciones de AM1 los colectores térmicos a base de paneles negros convierten la energía solar comprendida entre  $\sim 0,4-2,5 \mu\text{m}$ . Las células solares de Si monocristal sólo convierten la radiación entre  $\sim 0,4-1,1 \mu\text{m}$ , aproximadamente 60 % del total de la energía solar.

Cuando la radiación solar incide sobre estos dispositivos es parcialmente reflejada por las superficies que va encontrando a su paso. La cantidad de luz reflejada depende del material sobre el cual incide la radiación, del ángulo de incidencia y la longitud de onda que se considere. Una superficie de Si bien pulida refleja  $\sim 34 \%$  a longitudes de ondas largas ( $\sim 1,1 \mu\text{m}$ ) y  $\sim 54 \%$  para luz en el extremo azul y violeta del espectro ( $\sim 0,4 \mu\text{m}$ ). Los vidrios normales o los plásticos tales como PMMA, que se utilizan como cubiertas en los colectores térmicos solares reflejan  $\sim 4 \%$  en cada una de sus caras.

Las reflexiones, evidentemente, suponen pérdidas respecto a aprovechar toda la energía solar. Y en la práctica es deseable minimizar estas pérdidas incrementando el porcentaje de energía solar convertida en térmica o eléctrica. En general, cualquier dispositivo o solución que reduzca estas pérdidas por reflexión en las superficies constituye un sistema antirreflectante (AR). Las soluciones que comúnmente se utilizan en energía solar son películas delgadas depositadas sobre las superficies de silicio, vidrio, etc... Estas películas delgadas se denominan láminas AR. Una de estas láminas AR puede reducir las pérdidas por reflexión en Si a un  $\sim 8 \%$ , en media para todo el espectro solar, y en vidrio a  $\lesssim 2 \%$ . Una combinación de dos capas AR en Si reduce las reflexiones hasta  $\sim 3 \%$ , pero, en general, y para los convertidores terrestres basta utilizar una sola capa AR. Estas mejoras en las pérdidas por reflexión se traducen en un mayor porcentaje de conversión de la radiación incidente. En el caso de las células solares de Si monocristal la co-

riente en cortocircuito ( $I_{sc}$ ) y el factor de llenado (FF) experimentan una mejora de  $\sim 1,3-1,4$ . En el caso de los colectores térmicos el uso de películas AR significa mejoras en el rendimiento térmico de  $\sim 7-10\%$ .

Bajo un punto de vista básico, el poder reflectante de un material está ligado a su índice de refracción. La diferencia de comportamiento entre el Si y el vidrio (diferente reflectividad a la radiación solar) se debe principalmente: *a*) A que el índice de refracción del Si es una cantidad compleja para casi todo el espectro de la radiación solar, en tanto que el del vidrio es real; y *b*) A que la parte real del índice del Si es notablemente mayor (3,444) que la del vidrio (1,3-1,4). Cuanto más difiere este índice del correspondiente del aire (1,0) mayor es la reflectividad de la substancia. La anti-reflexión en una superficie de un determinado material se consigue acoplándole ópticamente con el ambiente que le rodea, generalmente aire. Con este acoplamiento parte de la radiación que se reflejaba en el material se transmite a él ahora. Este acoplamiento óptico se consigue depositando sobre el material en cuestión una lámina delgada de una substancia cuyo índice de refracción sea intermedio entre el del sustrato, cuya reflectividad se quiere reducir, y el del aire, además de cumplir otras condiciones adicionales.

Para cada dispositivo solar se puede utilizar una variedad de láminas AR, que a su vez se preparan según técnicas diferentes: evaporación en vacío, deposición química, oxidación térmica, etc...<sup>1</sup> En lo que sigue expondremos brevemente el uso de láminas AR en células solares de monocristal de silicio y en colectores térmicos, describiendo algunos resultados obtenidos por nosotros con películas delgadas producidas por evaporación térmica en vacío.

## FORMULACIÓN

El material cuya reflexión se quiere reducir puede ser transparente (vidrio) o absorbente (Si) de la radiación solar. La película delgada que se deposita sobre él puede ser también de uno u otro tipo. De tal forma que en la práctica disponemos de cuatro posibilidades:

- Sustrato y película AR transparentes.
- Sustrato transparente y película AR absorbente.
- Sustrato y película AR absorbentes.
- Sustrato absorbente y película AR transparente.

1. D. M. MATTOX, J. Vac. Sci. Technol., 13, 127 (1976).

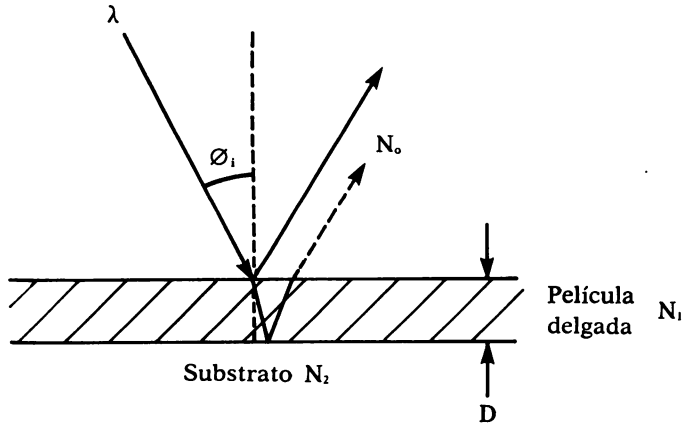


FIGURA 1

No consideraremos la segunda posibilidad por carecer de interés práctico. Como ejemplo de la primera citaremos los vidrios o plásticos protectores de los colectores térmicos. Las células de Si tipifican la tercera y cuarta posibilidades.

El sistema que vamos a considerar se muestra en la figura 1. Suponemos para las consideraciones que siguen luz monocromática de longitud de onda  $\lambda$ , para la cual los índices de refracción  $N_1$  y  $N_2$  de la película AR y sustrato puede ser reales o complejos.  $N_o$  es el índice de refracción del medio ambiente, aire normalmente. El ángulo de incidencia es  $\phi_i$  y el espesor de la capa AR es  $D$ .

#### a) *Sustrato y película AR son transparentes*

En la figura 2 se muestra la expresión de la reflectividad en intensidad del sistema así como las condiciones para obtener cero reflectividad. Al ser las sustancias transparentes, los índices de refracción son reales,  $n_o$ ,  $n_1$  y  $n_2$ . Se ha supuesto incidencia normal.

Observamos que cualquiera que sea  $n_1$ , siempre que sea intermedio entre  $n_2$  y  $n_o$ , hay un espesor de la película AR para el cual la reflectividad es mínima. Este mínimo es cero si se cumple además  $n_1 = \sqrt{n_2}$ , como  $n_o = 1,0$ .

Con estas condiciones se obtiene un mínimo para una  $\lambda$  determinada, no para todas. Pero, afortunadamente, este mínimo suele ser muy ancho y prácticamente se ven afectadas por él las longitudes de onda un 30 % más cortas o más largas que la central. Es decir el efecto AR es notable.

REFLECTANCIA. PELÍCULA Y SUBSTRATOS TRANSPARENTES		
$N_1 = n_1,$	$N_2 = n_2,$	reales
$\varnothing_1 = 0$		
$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta}$		
$r_1$ y $r_2$ Coeficientes de Fresnel		
$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}$	$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$	
Diferencia de fase introducida por película AR:		
$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 D$		
Mínimo de R: $n_1 D = \lambda_0 / 4$ y múltiplos impares de $\lambda_0 / 4$ .		
El mínimo es:	$R_m = \left  \frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2} \right ^2$	
Este mínimo es $R_m = 0$	si	$n_1^2 = n_0 n_2$

FIGURA 2

En la figura 3 se han representado las reflectancias calculadas correspondientes a una o dos capas AR. El efecto de la capa AR se mantiene muy bien si el índice de refracción de la capa delgada es superior al deseado; sin embargo, el efecto antirreflectante disminuye notablemente para valores de  $n_1$  inferiores al adecuado. Los índices de refracción corresponden, muy aproximadamente, a los siguientes materiales:  $\text{SiO}_2$  ( $\sim 1,5$ ),  $\text{SiO}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\sim 1,9$ ),  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  ( $\sim 2,25$ ).<sup>2</sup>

En la parte inferior de la figura se puede observar el diferente efecto que se obtiene en Si combinando adecuadamente dos capas de distinto índice de refracción.<sup>3</sup> Un sistema adecuado para reducir la reflexión hasta  $\sim 3\%$ , en media de todo el espectro, es combinar una capa de  $\text{TiO}_2$  ( $\sim 2,3$ ) de  $\sim 600\text{\AA}$  y una capa de  $\sim 1.050$ - $1.100\text{\AA}$  de  $\text{SiO}_2$  o  $\text{MgF}_2$  ( $\sim 1,4$ ).

2. H. J. HOVEL, *Solar Cells, 11, Semiconductors and semimetals*. Academic Press, New York, 1975, p. 204.

3. A. MUSSET, A. THELEN, *Progress in Optics* (Edit. E. Wolf). North-Holland, Amsterdam, 1970.



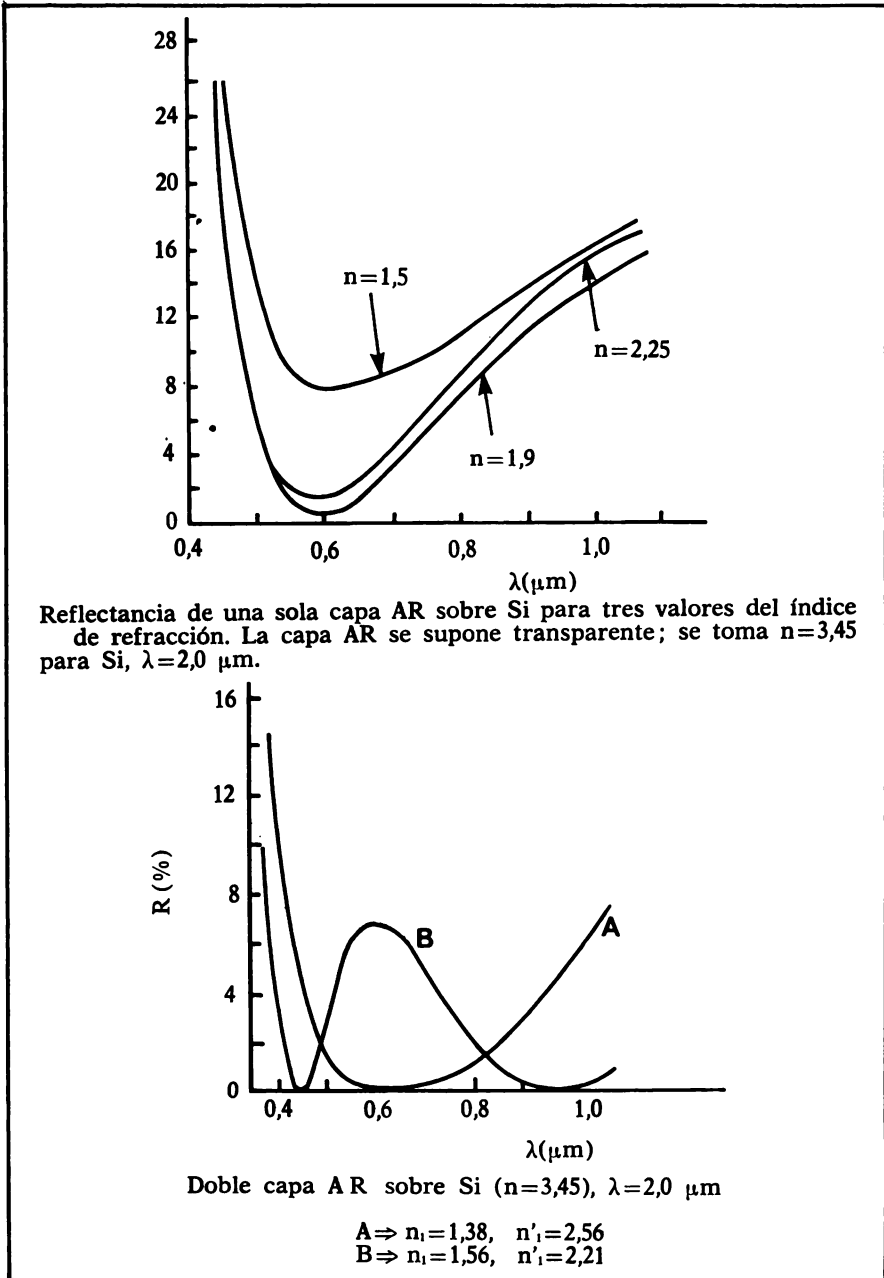


FIGURA 3

b) *Película AR absorbente o transparente y sustrato absorbente*

Los índices de refracción son ahora complejos.

$$N_1 = n_1 - ik_1$$

$$N_2 = n_2 - ik_2$$

Las correspondientes expresiones para la reflectancia se pueden ver en las figuras 4 y 5. Las expresiones son ahora algo más complicadas y en algunos casos es suficiente operar con ellas simplificadas. Se ha supuesto cualquier ángulo de incidencia.

La variación de la reflectividad con el espesor de la película delgada es aproximadamente periódica, como se puede ver en la figura 6. Los datos de esta figura se han calculado tomando Si y SiO<sub>2</sub> combinados. En el caso de que la capa AR sea absorbente los máximos y mínimos van disminuyendo progresivamente.<sup>4</sup>

Un ajuste de los resultados experimentales a esta curva calculada, permite obtener el índice de refracción de la película antirreflectante y su espesor. Al mismo tiempo, la forma de esa curva y su evolución brusca sugiere su utilización para el control de la producción de películas AR, cuando no se quiere o no se puede utilizar un controlador de espesores. En este trabajo exponemos algunos resultados en esta línea, haciendo ver que la obtención «in situ» de curvas como la de la figura 6 permite realizar un buen control de las propiedades AR de la lámina que se va a obtener.

#### APLICACIÓN DE CAPAS AR EN CÉLULAS SOLARES DE Si MONOCRISTAL

Hemos expuesto anteriormente las bases para seleccionar un material adecuado para hacer una capa AR en una célula solar de Si monocristal. En la figura 7 se ha representado la variación de la reflectividad mínima que se obtiene en Si con capas AR de materiales, cuyos índices varían entre 1,0 y 3,0. Se indican diversos materiales y productos comerciales que pueden ser utilizados con fines antirreflectantes. Como se puede ver, algunos derivados del Ti y el SiO reúnen características ideales. La gráfica se ha obtenido para  $\lambda = 6,5 \mu\text{m}$ , pero los resultados son idénticos a los que se obtendrían en otras longitudes de onda.

El monóxido de Si presenta ciertas ventajas y ha sido corrientemente utilizado como AR en Si. Por ejemplo, el índice de refracción de una película delgada de SiO producida por evaporación en vacío varía, según sean las condiciones de evaporación, entre 1,7

4. D. L. PULFREY, J. J. H. RECHE, *Applied Optics*, 12, 1577 (1973).

**REFLECTANCIA PELÍCULA ABSORBENTE-SUSTRATO ABSORBENTE**

$$R = r_T \cdot r_T^* = |r_T|^2$$

$$r_T = \frac{\rho_1 + \rho_2 \exp(-2i\delta)}{1 + \rho_1 \rho_2 \exp(-2i\delta)}$$

Luz polarizada «s». Coeficientes de Fresnel.

$$\rho_1 = -\frac{(N_1/N_0)\cos\varnothing_r - \cos\varnothing_i}{(N_1/N_0)\cos\varnothing_r + \cos\varnothing_i}; \quad \rho_2 = -\frac{(N_2/N_1)\cos\varnothing_s - \cos\varnothing_r}{(N_2/N_1)\cos\varnothing_s + \cos\varnothing_r}$$

$$N_0 \sin\varnothing_i = N_1 \sin\varnothing_r, \quad N_1 \sin\varnothing_r = N_2 \sin\varnothing_s.$$

$$\rho_1 = \gamma_1 \exp(i\theta_1); \quad \rho_2 = \gamma_2 \exp(i\theta_2)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} D (N_1^2 - N_0^2 \sin^2\varnothing_i)^{1/2}$$

Película delgada absorbente. Substrato absorbente.

$$R = \frac{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 \exp(-2V) + 2\gamma_1 \gamma_2 \exp(-V) \cos\varnothing_1}{1 + \gamma_1^2 \gamma_2^2 \exp(-2V) + 2\gamma_1 \gamma_2 \exp(-V) \cos\varnothing_2}$$

$$\delta = \frac{1}{2i}(v + iu), \quad \cos\varnothing_r = a_1 + ib_1$$

$$\varnothing_1 = u - (\theta_2 - \theta_1), \quad \varnothing_2 = u - (\theta_2 + \theta_1)$$

$$v = \frac{4\pi}{\lambda} D(K_1 a_1 - n_1 b_1), \quad u = \frac{4\pi}{\lambda} D(n_1 a_1 + k_1 b_1)$$

$$N_1 = n_1 - iK_1$$

FIGURA 4

y 1,95. Algo totalmente semejante ocurre con  $\text{TiO}_2$  cuando se produce por evaporación en vacío. En general, bajos ritmos de evaporación (1-5 Å/seg), temperatura del sustrato moderadamente alta (100-250°C) y cierta presión parcial de oxígeno en la cámara de vacío permiten obtener películas transparentes con bajos índices [ $n(\text{SiO}) \approx 1,7$ ].

**LUZ POLARIZADA «s». PELÍCULA TRANSPARENTE**

Substrato absorbente:

$K_1 = b_1 = v = 0$

$$R = \frac{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + 2\gamma_1\gamma_2\cos\varnothing_1}{1 + \gamma_1^2\gamma_2^2 + 2\gamma_1\gamma_2\cos\varnothing_2}$$

$u = \frac{4\pi D}{\lambda}$ ,                       $N_1 = n_1$ ,                       $\cos\varnothing_r = a_1$

FIGURA 5

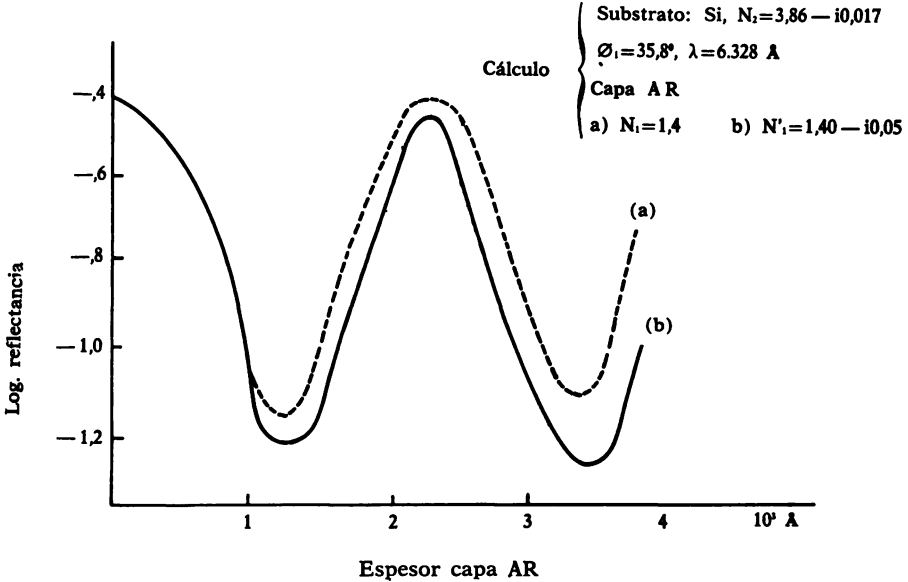


FIGURA 6

En tanto que altos ritmos de evaporación, bajas temperaturas del substrato (p.e. ambiente) y bajas presiones en la cámara dan origen a láminas absorbentes (transparentes en infrarrojo) de altos índices [ $n(\text{SiO}) \approx 1,95$ ], probablemente debido a la existencia de mayor número de defectos en la película delgada. Como luego veremos éstas son las condiciones experimentales de nuestras pruebas. Por otro lado, para producir una capa delgada de  $\text{TiO}_2$  es necesario

evaporar con cierta presión de oxígeno. Lo anterior se aplica también a  $Ta_2O_5$ . Debido a estas restricciones, en ocasiones es más conveniente producir láminas AR de ciertos óxidos por oxidación térmica.

Conviene también citar que una capa de SiO que ha de ser AR en  $0,6 \mu m$  debe tener un espesor aproximado de  $\sim 900 \text{ \AA}$ , con  $n(\text{SiO}) \approx 1,7$ . Sin embargo este óxido tiene el inconveniente de ser ligeramente absorbente para la mayor parte del espectro visible e infrarrojo cercano. Se ha intentado emplear como sustituto  $CeO_2$ , pero técnicamente es más difícil de preparar. También podrían funcionar bien capas de  $Al_2O_3$  ( $n \approx 1,86$ ) y  $Si_3N_4$ .<sup>5</sup>

Por otra parte, las cubiertas de vidrio que se utilizan para proteger los paneles de células solares pueden favorecer el efecto AR debido a su bajo índice (1,3-1,5). Por ejemplo, una cubierta de vidrio y una lámina de  $TiO_2$  forman un conjunto que actúa mejor que el SiO, debido al mayor índice del  $TiO_2$  y a su menor absorción.

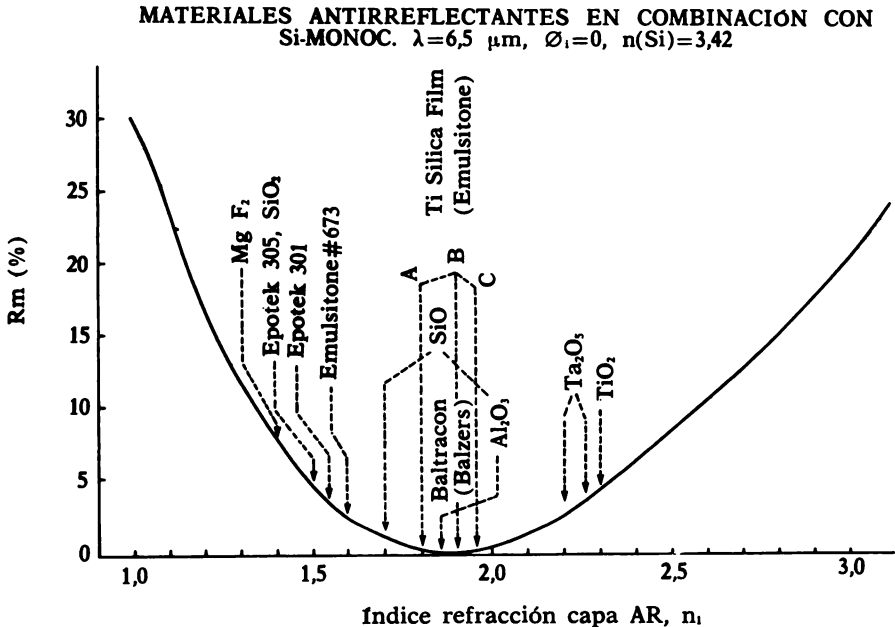


FIGURA 7

5. R. L. CRABB, A. ATZEI, Conf. Rec. IEEE Photo. Spec. Conf. 10th Palo Alto (1973), p. 168.

En general, la capa AR debe ser también adecuada a los fines de la célula solar que se desarrolle. Para la célula solar violeta, por ejemplo, no son adecuados ni SiO ni TiO<sub>2</sub>, ya que ambos presentan alta absorción  $\lambda < 4.000 \text{ \AA}$ . Son necesarias capas más transparentes en el azul-violeta. En esta aplicación es conveniente el Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, que tiene una anchura de banda prohibida de 4,2 eV y un índice de  $n \approx 2,20-2,26$ . En condiciones de AMO una capa de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y una cubierta de cuarzo funcionan muy bien.

Expondremos a continuación algunos resultados obtenidos con láminas de SiO producidas por evaporación. Nuestros resultados con TiO<sub>2</sub> producido por oxidación térmica son paralelos.

En la figura 8 se puede ver la instalación experimental. Se utiliza un sistema de evaporación «flash» y vacío  $\sim 10^{-6}$  Torr. Se controla y mide la intensidad del haz del laser a medida que se va produciendo la capa de SiO. En la figura 9 (parte superior) se muestra la curva registrada, intensidad del haz de laser en función tiempo

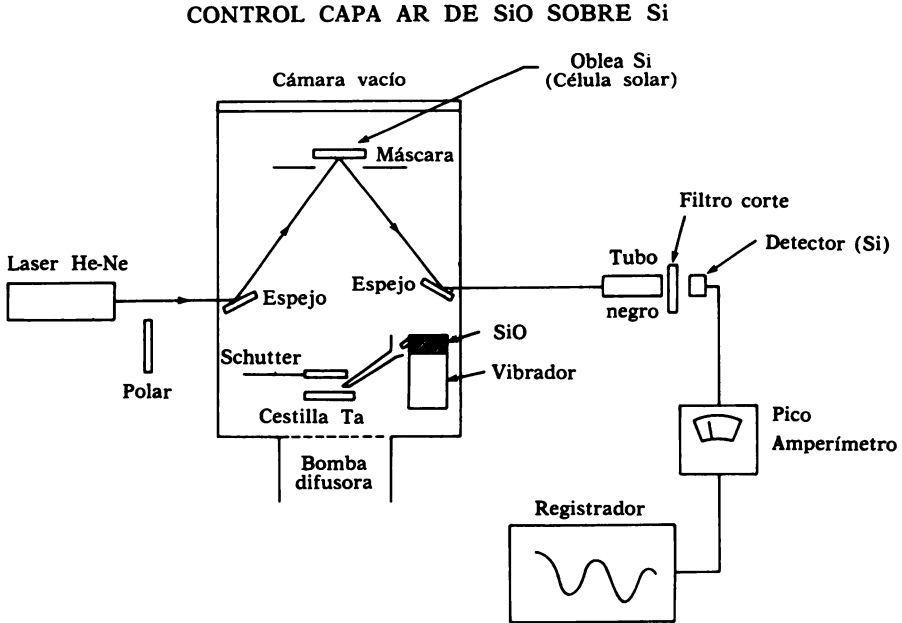


FIGURA 8

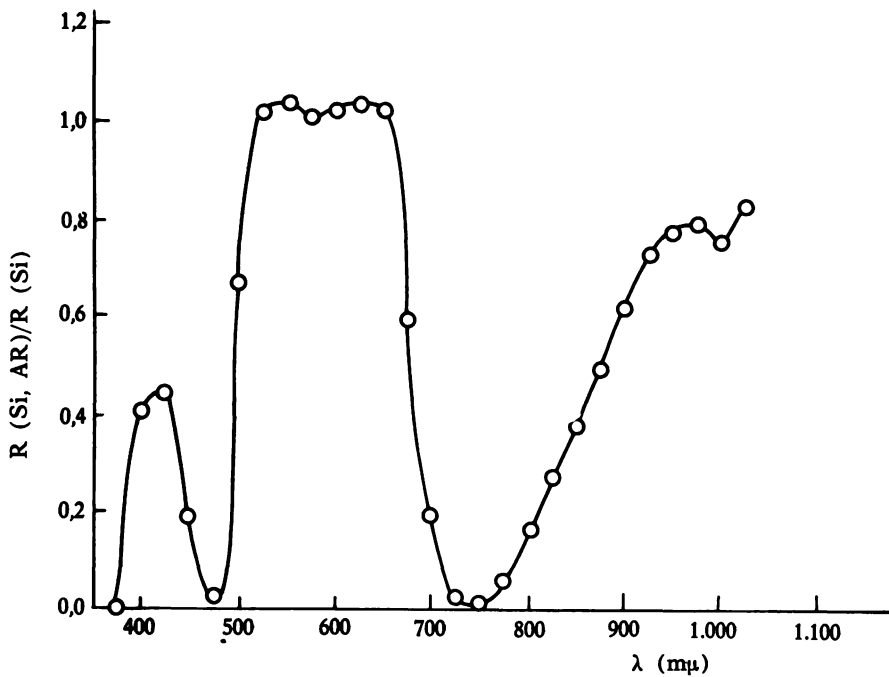
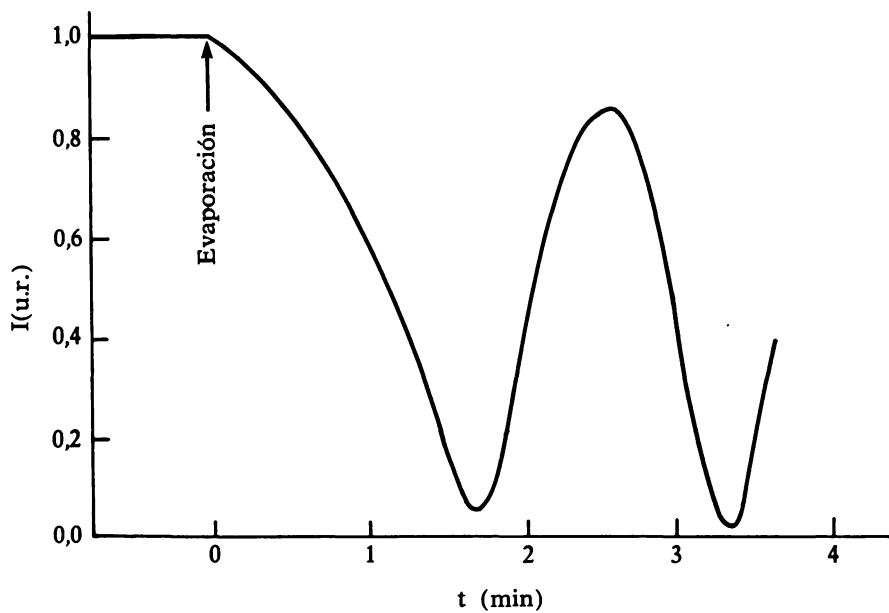


FIGURA 9

evaporación (equivalente a espesor de película de SiO). Se puede ver que la película obtenida es absorbente y que su espesor final es  $\sim 1.000\text{\AA}$ . En la parte inferior de la figura se puede ver la variación de la reflectividad del Si debido a la capa AR. Se debe hacer notar que en tanto las medidas de R se han hecho con un ángulo de incidencia del  $10^\circ$ , las correspondientes al control de la película de SiO se han hecho con  $\theta_i \approx 50^\circ$ . Es notable observar que se pueden conseguir reducciones de reflectividad notables en márgenes espectrales muy amplios.

En la figura 10 se muestra la evolución de la reflectividad con el espesor de la película de SiO, así como el control de esta reflectividad mediante la curva que se registra durante la producción de la película de SiO. Las letras A, B, C, D de ambas partes de la figura se corresponden entre sí. Como se puede ver, una lámina del tipo B es excelente para reducir la reflectividad en la zona donde la célula solar de Si presenta mayor rendimiento. Una película intermedia entre A y B es adecuada para la zona espectral más intensa del sol.

Como alternativa para el uso de películas AR se han estudiado varias posibilidades. Una de ellas consiste en la preparación de millones de pirámides o «whiskers» superficiales con dimensiones y espaciamentos del orden de micras. La luz incidente en esta superficie aserrada o montañosa experimenta múltiples reflexiones, aumentando la probabilidad de absorción.<sup>6</sup>

#### CAPA AR EN LOS VIDRIOS PROTECTORES DE LOS COLECTORES TÉRMICOS

No entraremos a considerar la preparación de estas películas, sino su repercusión en la calidad del colector. La figura 11 compara la distribución de la energía solar en un colector según tenga o no capas AR, operando a alta temperatura. Todos los tantos por ciento están referidos al 100 % incidente inicial.<sup>7</sup>

El uso de cuatro capas AR supone que el 75,1 % de la radiación solar incidente alcanza el colector negro, frente a un 68,4 % si no se usan láminas AR. Respecto al aprovechamiento térmico de la radiación, en un colector sin AR se obtiene un 33,1 %, y un 39,4 % con capas AR.

6. A. B. MEINEL, M. P. MEINEL, *Applied Solar Energy, An Introduction*, Addison-Wesley Co. London, 1976.

7. *The Optical Industry and Systems Directory*, Encyclopedia Dictionary Edit. Optical Spectra, 1976.



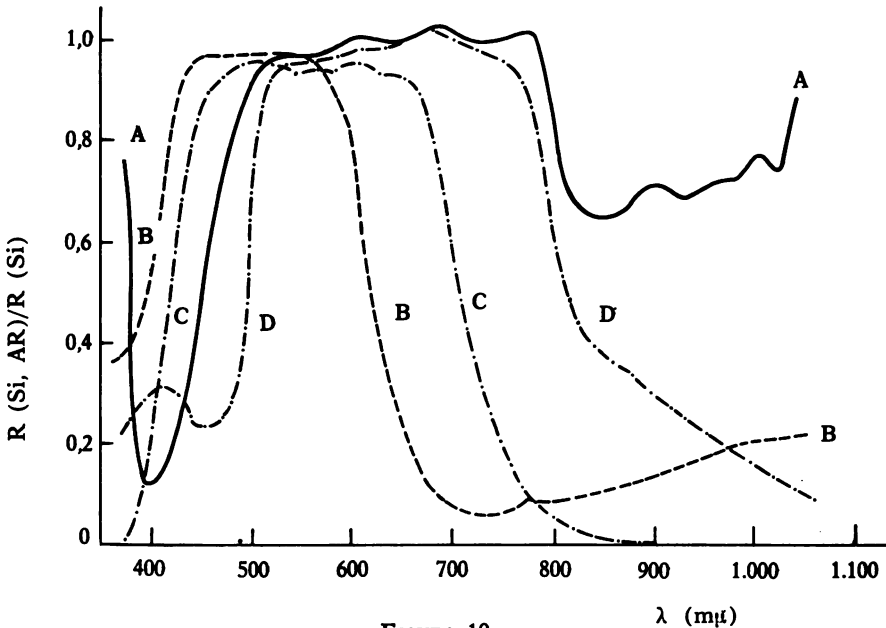
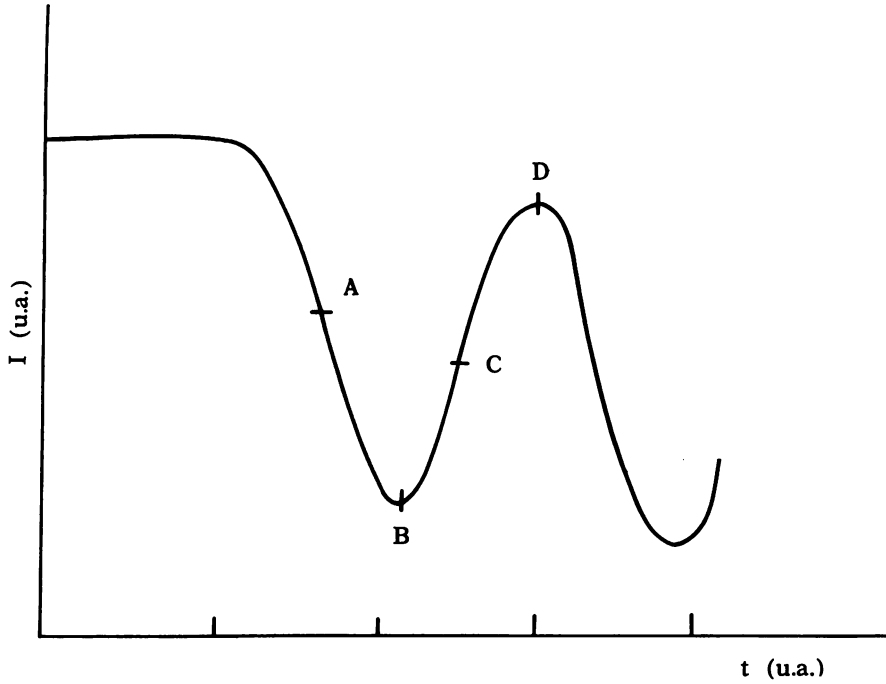


FIGURA 10

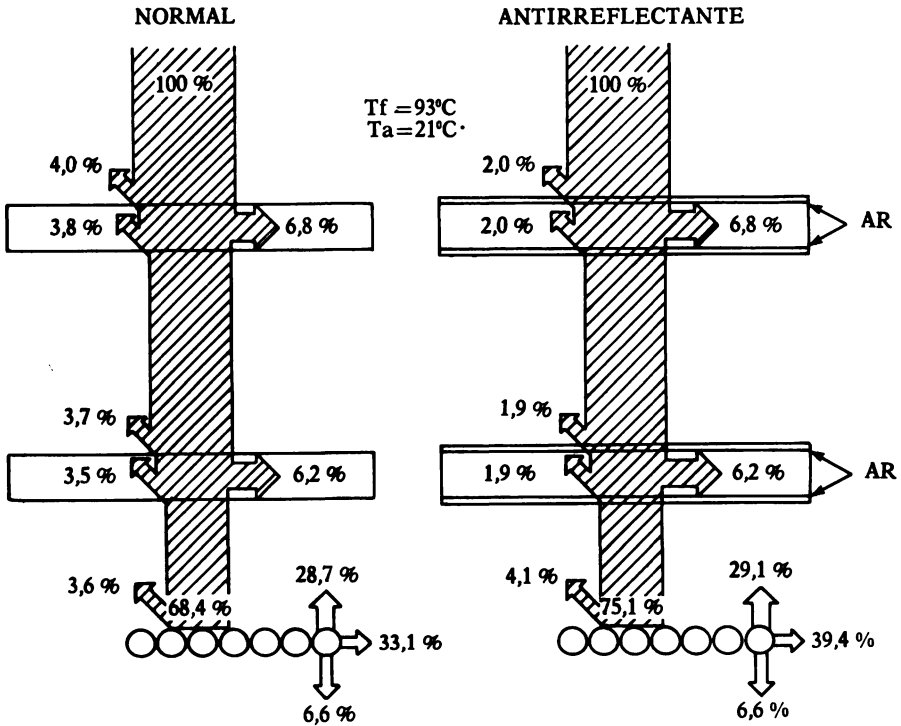


FIGURA 11

Para grandes superficies el uso de evaporación en vacío sólo es viable con tecnologías parecidas a las que se emplean en metalizaciones de plásticos, juguetes, etc... Para la preparación de vidrios AR parecen más convenientes técnicas de ataque químico, como «chemical leaching».

#### CONSIDERACIONES ECONÓMICAS

Las capas AR no son indispensables para el funcionamiento de los convertidores solares citados anteriormente, sino que suponen mejoras cuantitativamente importantes. En este sentido conviene establecer ciertos criterios económicos que determinen cuándo se debe usar un dispositivo AR. El criterio general a aplicar es el siguiente: los beneficios económicos obtenidos deben ser superior-

res a los gastos ocasionados al añadir la lámina AR, todo ello referido a un cierto período de tiempo.

En la figura 12 se muestra la aplicación de este criterio para células solares, referida a 1 año y  $\text{cm}^2$ .

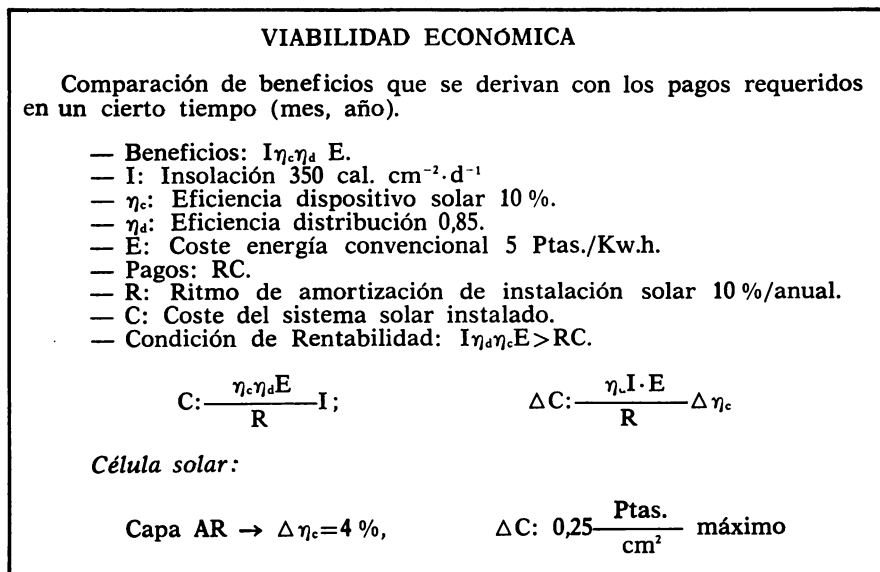


FIGURA 12



**TÉCNiques DE SIMULACIÓ I DETERMINACIÓ DE  
PARAMETRES PER ORDENADOR EN LES CÈL·LULES  
SOLARS DE BARRERA SUPERFICIAL**

per

**L. CASTAÑER I MUÑOZ, C. FERRARONS I J. CABESTANY**

**E.T.S.E. de Telecomunicació  
Universitat Politècnica de Barcelona**

## **RESUM**

Hom descriu un procés general de simulació de la resposta espectral i de les característiques corrent-tensió d'una cèlula solar il·luminada. Els paràmetres que intervenen en els dits models poden éssers determinats per tècniques de minimització mitjançant ordinador. Hom descriu una aplicació al cas de cèlules solars de barrera superficial.

## **SUMMARY**

A method of simulation of the spectral response of solar cells is presented. The particular case of surface barrier solar cells is considered.

Les tècniques de simulació per ordinador dels diversos dispositius semiconductors han estat d'una gran utilitat en l'anàlisi de llur comportament considerant els paràmetres més característics del funcionament.

En el cas particular dels fotodispositius aplicables a la conversió de l'energia solar, les tècniques de simulació han estat aplicades en la descripció de models de funcionament tant a dispositius fotovoltaics clàssics, com la cèl·lula d'unió p-n de silici<sup>1</sup>, com a estructures més atractives per a l'ús terrestre, com les barreres Schottky.<sup>2</sup>

Sota aquesta perspectiva, hom descriu la posada en marxa d'una tècnica d'ordinador capaç de simular la fotoresposta d'una cèl·lula solar, la característica corrent-tensió, així com de les tècniques necessàries per a obtenir els paràmetres dels models emprats partint d'un resultat experimental concret. Hom s'ha servit d'aquesta tècnica per a simular les fotorespostes d'una cèl·lula clàssica d'unió n+/p abrupta o amb dopatges exponencials i d'una cèl·lula solar de barrera Schottky entre metall i semiconductor homogeni o bé amb dopatge exponencial.

## PLANTEJAMENT DEL PROBLEMA

La solució de qualsevol problema de conducció en una estructura semiconductor ha de partir del plantejament de les equacions de circulació en la regió objecte d'estudi i de les condicions en els límits d'integració. La formulació analítica més general, en termes dels corrents i de les concentracions, és la que obeeix les equacions de circulació, que per als buits és:

$$\frac{\delta p}{\delta t} + \nabla J_p - G = 0, \quad (1)$$

1. J. G. FOSSUM, «Computer aided numerical analysis of silicon solar cells», *Solid State Electronics*, Vol. 19, 1976, pp. 269-277.

2. R. F. MCOUAT, D. L. PULFREY, «A model for Schottky barrier solar cell analysis», *Journal of Applied Physics*, Vol. 47, n.º 5, 1976.

$$J_p = \mu_p E \cdot p - \frac{KT}{q} \mu_p \nabla p ; \quad (2)$$

On  $p$  és la concentració de buits,  $J_p$  la densitat de corrent de buits,  $\mu$  la mobilitat,  $E$  el camp elèctric i  $G$  el terme de generació-recombinació. Aquest terme  $G$  es pot desglossar en una part tèrmica, que segueix la teoria de Schottky-Read, i una part deguda a la il·luminació que en general es formula:

$$g(x) = \alpha(\lambda) N(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)x},$$

essent  $N(\lambda)$  el flux de fotons de l'espectre solar i  $\alpha(\lambda)$  el coeficient d'absorció del material. En aquest treball s'ha pres l'espectre de Johnson com a dada numèrica per a resoldre les equacions 1 i 2.

Substituint (2) en (1) resulta que en una dimensió

$$\frac{\delta p}{\delta t} + \mu_p \frac{\delta(pE)}{\delta x} - \frac{KT}{q} \nabla^2 p - G = 0. \quad (3)$$

En el cas d'estudis d'il·luminació contínua queda reduïda a

$$\mu_p \frac{\delta}{\delta x} (pE) - \frac{KT}{q} \frac{\delta^2 p}{\delta x^2} - G = 0. \quad (4)$$

La solució d'aquesta equació diferencial es pot obtenir de forma analítica en el cas que el camp elèctric sigui constant o nul, i de forma numèrica en la resta dels casos.

La solució s'ha de sotmetre a les condicions de contorn que s'imposin, les quals, en el cas de les estructures fotovoltaïques, es poden resumir en:

- a) Condició de curt circuit o polarització nul·la entre terminals.
- b) Condició de recombinació superficial, per a buits:

$$J_p(x=0) = q S_p (p - p_0), \quad (5)$$

on la superfície es troba a  $X=0$  i  $p_0$  és la concentració d'equilibri.  $S_p$  és la velocitat de recombinació superficial.



Entre les solucions analítiques hi ha des de les més aproximades<sup>3</sup> per a camp elèctric nul o constant fins a les que consideren el dispositiu fraccionat en zones de camp quasi-constant.<sup>4</sup>

Les solucions de forma numèrica poden ésser molt variades, i unes de les més recentment publicades són les contingudes en les referències 1 i 2.

El treball que descrivim ha emprat les solucions de tipus analític de les referències 3 i 4, i és també possible d'introduir solucions numèriques sense alterar substancialment el procediment general de simulació.

Un cop obtingudes la distribució dels portadors i la del camp elèctric, i la densitat de corrent per a una longitud d'ona, la densitat de corrent total, posat que hi hagi injecció feble, podrà ésser obtinguda integrant aquella sobre la zona d'interès de l'espectre solar. Aquesta zona d'interès serà la formulada per les longituds d'ona a les quals el material semiconductor sigui sensible.

En conseqüència:

$$I_L = A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} |J_n(\lambda) + J_p(\lambda)| d\lambda. \quad (6)$$

L'integrand de l'equació (6) es troba format per la suma dels corrents de buits i d'electrons que dona el corrent total independentment de l'estructura del dispositiu; cal precisar tanmateix que en el cas de la barrera Schottky es fa servir una nomenclatura diferent en aquest treball.

La resposta espectral es defineix com el quocient entre el corrent de curt circuit que proporciona la fotocèl·lula i l'energia rebuda:

$$S(\lambda) = \frac{\text{Corrent de curt circuit } I_L \text{ (mA)}}{\text{Potència incident (mW/cm}^2\text{)}}$$

El rendiment de la conversió fotovoltaica s'obté del quocient

3. J. J. LOFESKI, J. J. WYROCKI, *RCA rev.*, 22, 38, 1961.

4. M. WOLF, *Proc. IEEE*, Vol. 674, 1963.

entre la potència màxima subministrada pel fotodispositiu a la càrrega i la potència total rebuda.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} \cdot$$

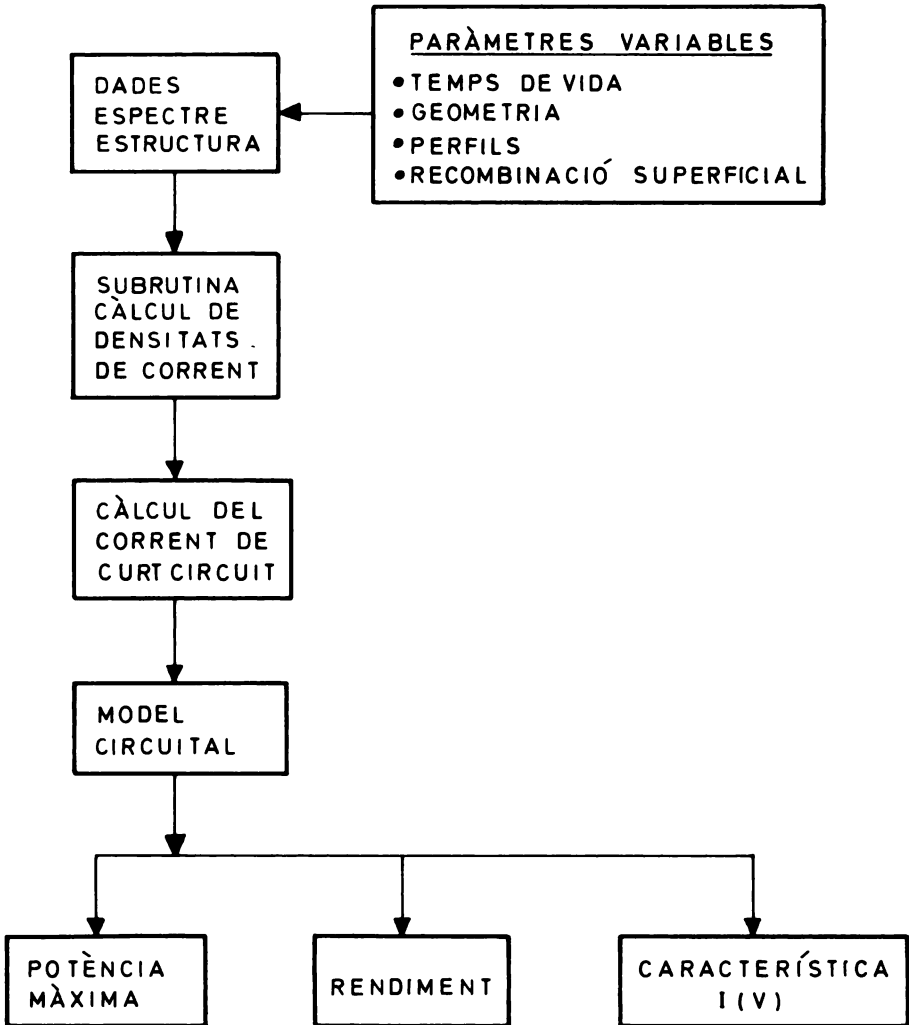


FIGURA 1. Procediment general de simulació.

El valor de  $P_{in}$  s'ha pres com el de la potència que es rep del sol fora de l'atmosfera terrestre i per unitat de superfície, coneguda habitualment com a AMO.

El valor de  $P_{max}$  es dedueix del càlcul de la característica corrent-tensió del fotodispositiu il·luminat partint d'un model circuital adequat.

El procediment general de simulació ha estat esquematitzat en la figura 1 i en aquest treball ha estat aplicat a estructures d'unió  $n+/p$  clàssiques i a estructures de barrera superficial.

#### CÈL·LULA SOLAR D'UNIÓ $n+/p$

El cas de la cèl·lula solar d'unió  $n+/p$  és el més conegut per tal com ha estat el tipus de dispositiu més emprat fins ara.

En la simulació realitzada s'ha pres com a solució analítica de l'equació de difusió la de la referència 3. Efectivament, aquesta solució analítica és vàlida per a una regió semiconductora sotmesa a una injecció exponencial des d'un dels seus extrems.

En la figura 2 es resumeix el procediment seguit i es posa en relleu la relació entre la resposta espectral i el corrent de curt circuit. També es recull el model circuital del qual hom s'ha servit, consistent en dos díodes ideals, una resistència en sèrie  $R_s$  i una resistència de fugues en paral·lel  $R_{sh}$ .

La figura 3 recull diferents casos de cèl·lula solar d'unió  $n+/p$  abrupta i de dopatges suposats homogenis. En la figura 4 s'ha considerat el cas de camp elèctric no nul però constant a banda i banda de la unió.

#### CÈL·LULA SOLAR DE BARRERA SCHOTTKY

El cas de la barrera superficial per a la conversió de l'energia solar ha estat estudiat en alguns aspectes.<sup>2, 5, 6</sup> El procediment de simulació descrit pot ésser aplicat a aquest cas. Efectivament, la densitat de corrent de curt circuit té dos termes (per a una barrera metall-semiconductor).

$$J = J_{pi}(x=w) + J_{DL}$$

El terme  $J_{DL}$  prové dels portadors generats en la regió de càrrega espacial, i l'altre  $J_{pi}(x=w)$  resulta de la difusió de buits en el límit  $w$  d'aquesta regió. Es considera la superfície a  $x=0$ .

5. S. J. FONASCH, *J. of Applied Physics*, 1975, p. 1286.

6. L. CASTAÑER, C. FERRARONS, *Applied Physics Letters*, Vol. 30, n.º 3, 1977, p. 172.

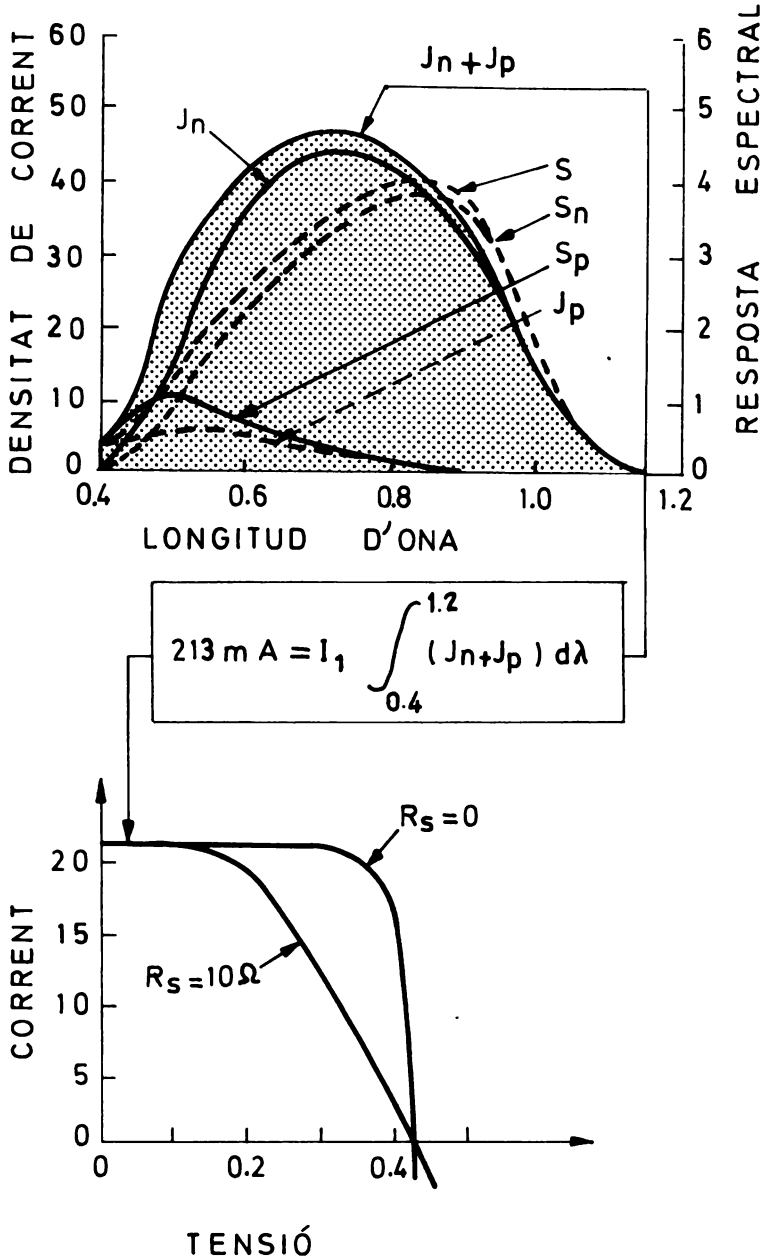


FIGURA 2. Representació de la resposta espectral i de la característica  $I(v)$  en cèl·lula solar de silici n+/p.

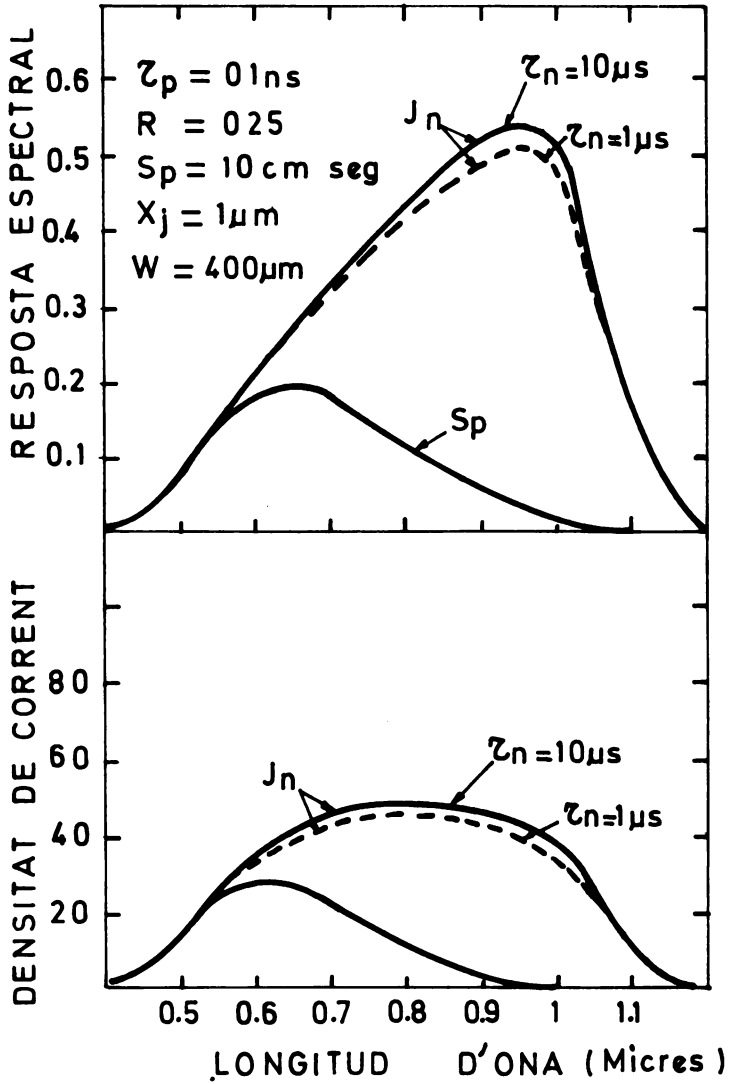


FIGURA 3. Resposta espectral de cèl·lules solars d'unió n+/p de silici amb camp elèctric nul o constant.

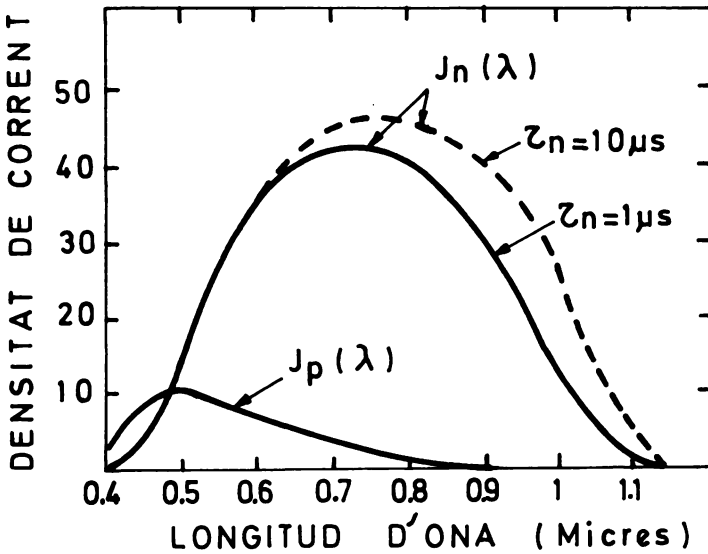
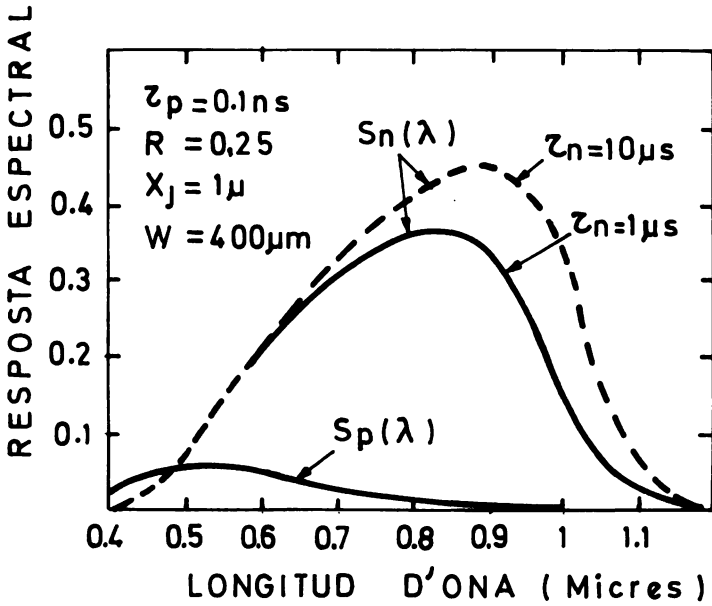


FIGURA 4. Densitat de corrent en funció de la longitud d'ona per a alguns valors del camp elèctric.

La solució més aproximada per al terme  $J_{DL}$  és donada considerant que tots els fotons incidents creen parells electró-buit que són collectats íntegrament pel camp elèctric imperant, així

$$J_{DL} = \int_0^w qN(\lambda)\alpha(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)x] dx$$

Per al terme  $J_{pi}$  ( $x=w$ ) hom pot fer servir la mateixa solució de l'equació de difusió que ha emprat en el cas de la unió  $p - n^3$ .

En el cas que el perfil d'impureses no sigui constant, cal introduir una correcció en el càlcul de l'amplària  $w$  respecte al seu valor en una unió abrupta. La solució s'obté resolent l'equació de POISSON.

$$\frac{dE}{dx} = - \frac{p}{\epsilon}$$

amb les condicions de contorn.

$$x=0 \quad V = \phi_{BN}$$

$$x=w \quad V = - |q E_c(w) - EF|$$

$$E_c(w) - E = - \frac{KT}{q} \ln [(N_D/N_c) - \beta w]$$

si hom considera una distribució exponencial de les impureses

$$N_D = N_{D_0} \exp(-\beta x)$$

On  $E$  és el camp elèctric,  $q$  la densitat de càrrega espacial,  $V$  el potencial,  $E_c$  la banda de conducció,  $EF$  el nivell de Fermi,  $K$  la constant de Boltzman,  $T$  la temperatura,  $N_c$  la densitat efectiva d'estats de la banda de conducció,  $\phi_{BN}$  l'alçària de la barrera metall-semiconductor i  $E$  la permeabilitat del material.

Hom ha fet diversos càlculs de la densitat de corrent en funció de la longitud d'ona com es veu a la figura 5. La influència del camp elèctric resta reflectida en aquesta figura des de valors negatius de  $-300$  V/cm fins a valors positius de  $+100$  V/cm.

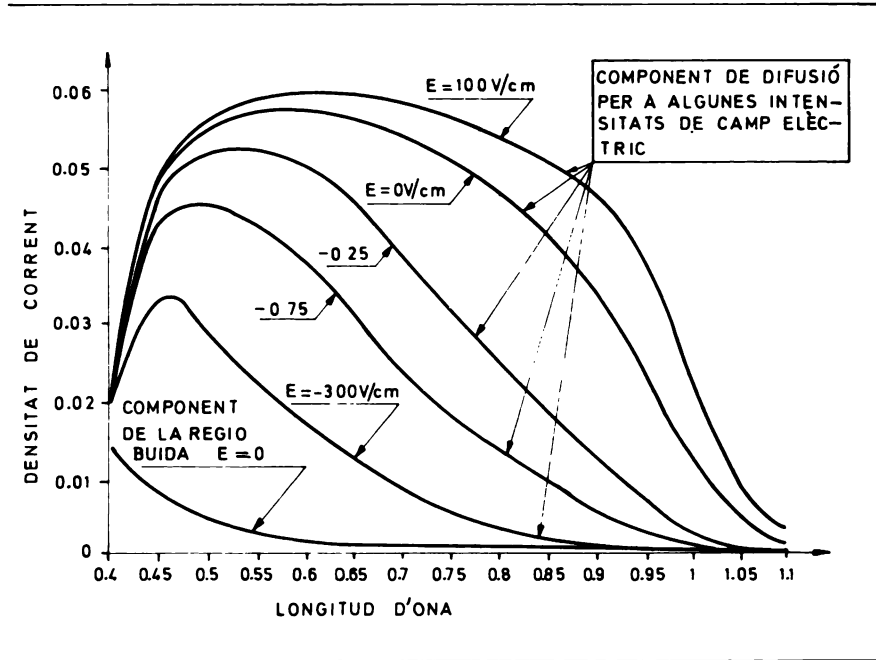


FIGURA 5. Diverses possibilitats estudiades en barrera Schottky amb il·luminació frontal i posterior.

• Pot tenir un més gran interès l'anàlisi de diverses possibilitats d'il·luminació frontal, amb la zona de càrrega espacial en la superfície i la il·luminació posterior amb la zona de càrrega espacial prop del contacte posterior.

A més, hom ha considerat com a material de base els dos tipus p i n de semiconductors. Evidentment, convé de distingir entre el signe favorable i el desfavorable de camp elèctric, entès com el fenomen d'afavorir o de frenar la difusió dels portadors creats en el volum semiconductor. Per exemple, el camp elèctric serà favorable si el seu sentit és cap a la unió en el cas de semiconductor tipus n i injecció frontal. Quan el camp elèctric és negatiu és un camp favorable en injecció posterior i desfavorable en injecció frontal. La figura 7 recull una representació del corrent total de curt circuit en funció del camp elèctric. D'aquesta figura es poden extreure les següents consideracions:

— en injecció frontal, un camp elèctric favorable de valor moderat permet assolir una saturació del corrent total de curt circuit;



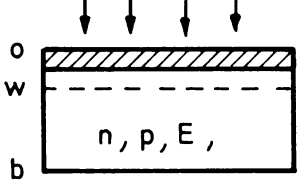
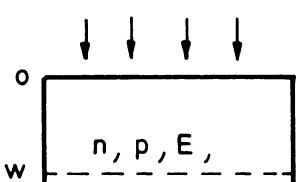
GEOMETRIA	CONDICIONS
	<p>IL.LUMINACIÓ FRONTAL                      SEMICONDUCTOR N O P                      CAMP ELÈCTRIC  <math>E = 0</math>    <math>0</math>    <math>E \neq 0</math>  <math>\tau_n</math> o <math>\tau_p</math>, b    VARIABLES</p>
	<p>IL.LUMINACIÓ POSTERIOR                      SEMICONDUCTOR N O P                      CAMP ELÈCTRIC  <math>E = 0</math>    <math>0</math>    <math>E \neq 0</math>  <math>\tau_n</math> o <math>\tau_p</math>, b    VARIABLES</p>

FIGURA 6. Corrent total de curt circuit en funció del valor i el signe del camp elèctric.

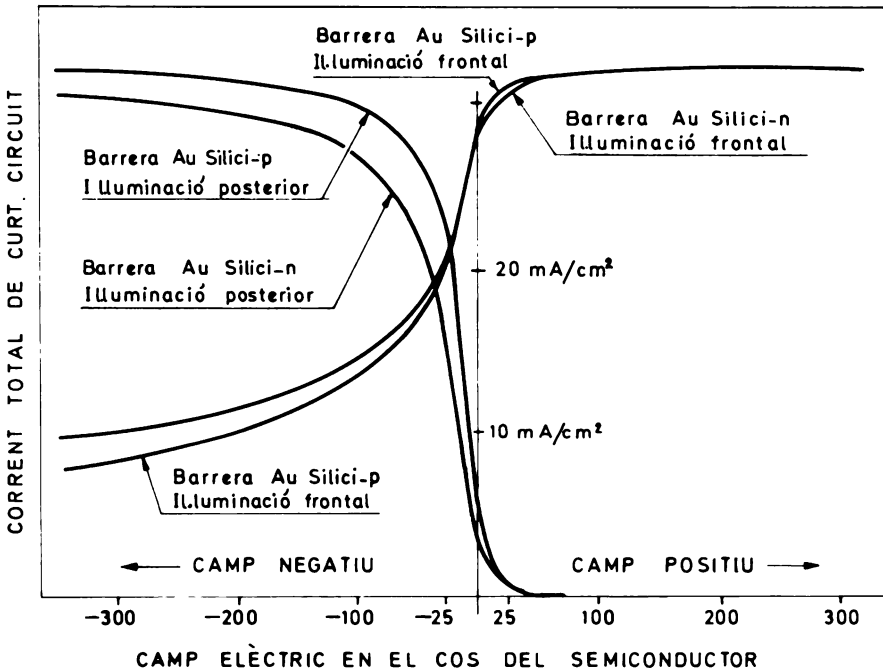


FIGURA 7. Corrent total en funció del gruix del material.

- en injecció frontal, un camp negatiu fa disminuir el corrent total de curt circuit i s'arriba a la saturació més lentament que en el cas anterior;
- en injecció posterior, camps elèctrics desfavorables de magnitud moderada fan caure el corrent total a valors insignificants;
- en injecció posterior, un camp elèctric favorable d'aproximadament 100 V/cm permet d'aconseguir la saturació de fotocorrent.

El cas representat en aquesta figura ha estat resolt per a un temps de vida mitjà de minoritaris d'1  $\mu$ s i un gruix de semiconductor de 100  $\mu$ m.

L'efecte relatiu de la injecció frontal o posterior és més ostensible si hom fa variar el gruix del material per a diversos valors

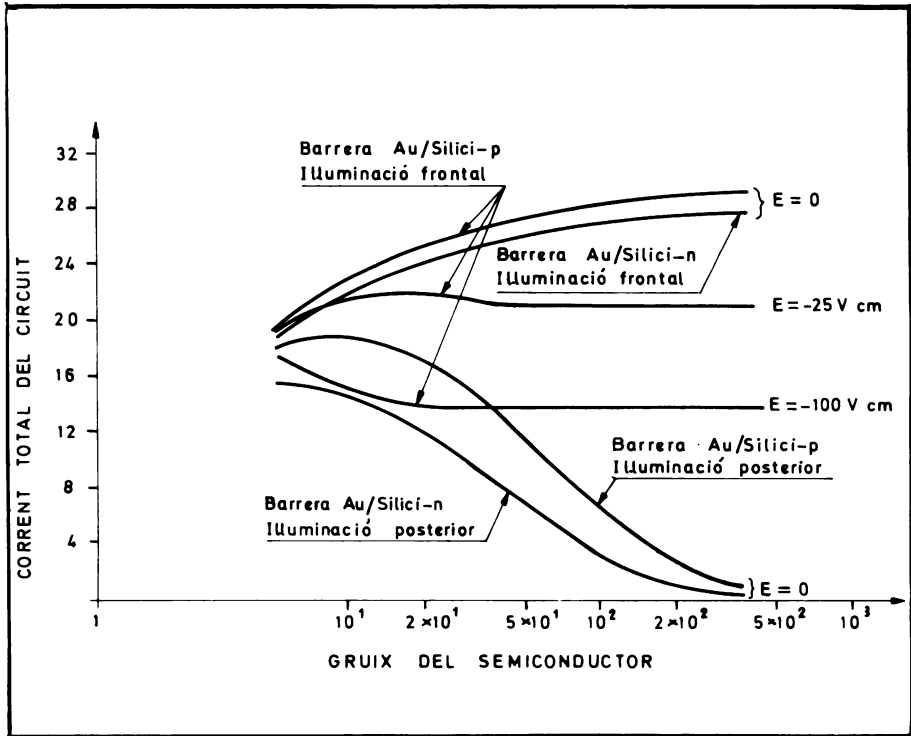


FIGURA 8. Variació del rendiment de la conversió de la cèl·lula Schottky en funció del camp elèctric aplicat.

de camp elèctric com s'indica en la figura 8. Hom ha representat el corrent total de curt circuit en ordenades.

Evidentment, la variació obtinguda era de gruix per la pròpia naturalesa de l'estructura. Efectivament, a mesura que s'augmenta el gruix en el cas d'illuminació frontal, s'ha de arribar a una certa saturació, car, com a mitjana i en absència de camp elèctric, els portadors creats a més distància de la unió que la longitud de difusió es recombinaran i no podran participar en els processos de conducció entre terminals.

Aquest valor de saturació depèn del valor i del signe del camp elèctric.

En il·luminació posterior, com més gruix hi haurà del material més petita serà la quantitat de portadors recollits, per la qual cosa cal esperar una corba monòtonament decreixent en funció de  $b$  i per a diversos valors del camp elèctric.

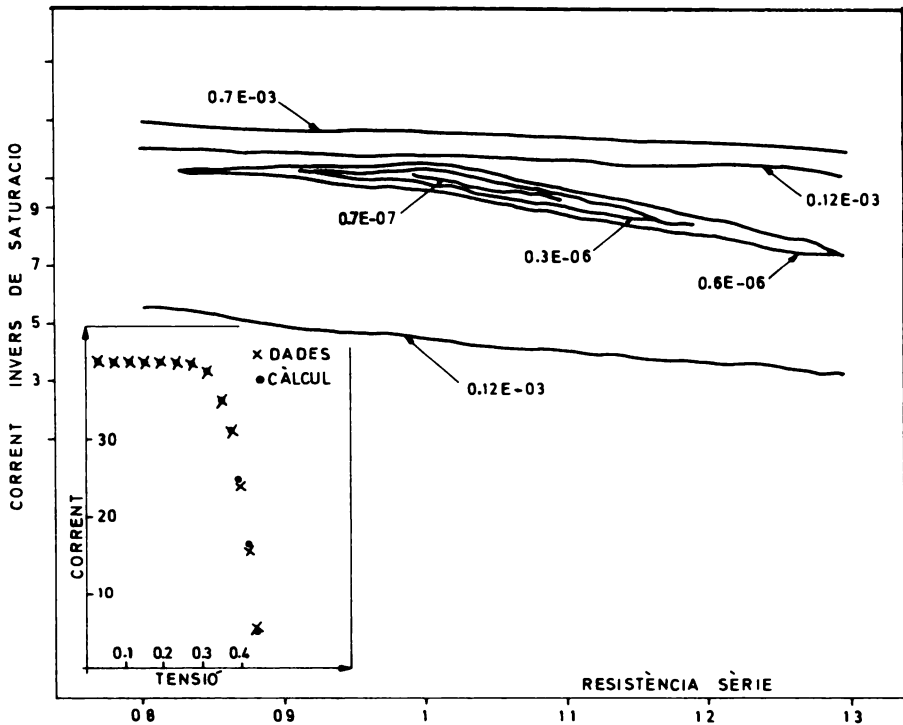


FIGURA 9. Corbes isoerror en la determinació dels valors dels paràmetres del model circuital.

El valor de l'alçària de la barrera  $\phi_{BN}$  té poca influència sobre el valor del corrent total de curt circuit, però afecta decisivament el rendiment, ja que determina en gran mesura el valor de la potència màxima.

La figura 9 mostra una variació del rendiment de la cèl·lula Schottky en valor relatiu i en funció del camp elèctric aplicat.

#### DETERMINACIÓ DE PARÀMETRES

Els programes exposats en els apartats anteriors són d'utilitat si hom vol caracteritzar un fotodispositiu partint d'un resultat experimental concret.

El problema es planteja en termes de determinar els valors dels paràmetres del model matemàtic que simula una resposta experimental.

Per a una fotocèl·lula podem prendre el model circuital més senzill, constituït per un díode ideal i una resistència en sèrie de pèrdues.

Si anomenem la característica mesurada  $I_m$  i la característica simulada  $I_s$ ,

$$I_s = I_L - I_{o3} [\exp q(V + I_s R_s) / KT - 1]$$

per a obtenir  $R_s$  i  $I_o$  es defineix la funció error <sup>7</sup>

$$E(f) = \sum_1^N e(qz_i) = \sum_1^N |I_s(qz) - I_m(z)|^2$$

on  $f$  indica els paràmetres d'aquest model i  $z$  els punts de mostra.

L'objectiu és de minimitzar l'error  $E(q)$  en el pla  $I_o R_s$ , tot observant les corbes isoerror.

També hom ha representat la característica mesurada sobreposada a la simulada. L'error és inferior al 8 %.

7. R. FLETCHER, M. J. POWELL, *Computer Journal*, Vol. 6, 1963, p. 163.

**TECHNOLOGY OF  $\text{Cu}_2\text{S}$ -CdS SOLAR CELLS**

by

**G. H. HEWIG, W. H. BLOSS**

**Institut für Physikalische Elektronik, Universität Stuttgart,  
Federal Republic of Germany**

## SUMMARY

Solar energy can be converted in different ways: The most attractive application is the direct conversion of solar radiation to electricity. Highly efficient and extremely cheap solar cells can be produced on the basis of thin semiconducting films.

An automatized pilote line production for CdS layers which are evaporated under high vacuum conditions, and their subsequent treatment to get an encapsulated  $\text{Cu}_2\text{S}-\text{CdS}$  thin films solar cell, are described.

## RESUM

L'energia solar pot ésser transformada de diferents maneres.

Una de les més interessants és la conversió directa de la radiació solar en electricitat. Cèl·lules solars altament eficients i extremament barates poden ésser produïdes utilitzant pel·lícules de capa fina de materials semiconductors. Hom hi descriu una línia de producció pilot, automatitzada, que permet de dipositar capes de  $\text{SCd}$ , evaporades en condicions d'alt buit, i també el tractament posterior fins arribar a la cèl·lula solar de  $\text{Cu}_2\text{S}-\text{CdS}$  encapsulada.

Solar energy is this form of energy, which is available in the largest amount compared to other forms of energy. The utilization of this energy by direct energy conversion into electricity is a very interesting method but also a very complicated one. The device for this direct energy conversion process, is called solar cell. There are two types of solar cells, which are well developed: The single crystalline Silicon solar cell and the polycrystalline  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$  solar cell. The goal of my lecture is to demonstrate, that polycrystalline  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$  solar cells can be produced in a large scale at extremely low costs, using a technology, which is also feasible for most of the developing countries with a certain level of industrialization.

Figure 1 shows the total incident solar energy per year and  $\text{cm}^2$  over all the world. It can be seen that the developing countries receive a lot of solar energy and therefore the utilization of this energy must be a very important task for them.

Now, I want to report on our pilot line production with a production rate of  $1 \text{ m}^2$  thin film solar cells per month.

Ordinary window glass with an evaporated silver layer serves for substrate material and back contact for the CdS layer. As the quality of the CdS layer has a great influence on the performance of the final solar cell, reproducible evaporation conditions are accomplished. A schematic view of the arrangement for evaporation is shown in figure 2.

The graphite crucible is heated by the radiation of a tantalum cylinder, which itself is heated electrically. The crucible is baffled by quartz frit with a porosity of  $100 \mu\text{m}$ . Thus it is possible to obtain spatterfree CdS layers. For substrate heating a graphite meander is used.

Three crucibles are operating simultaneously for the pilote line production. A control unit determines the running off of the complete process: Heating of crucibles and substrates, opening and closing of the shutter and changing of substrates. The thickness of the CdS layer is determined by the temperatures of crucible and substrate and the time for evaporation. At present, it takes 20 minutes to evaporate CdS layers with a thickness of  $30 \mu\text{m}$  at tem-

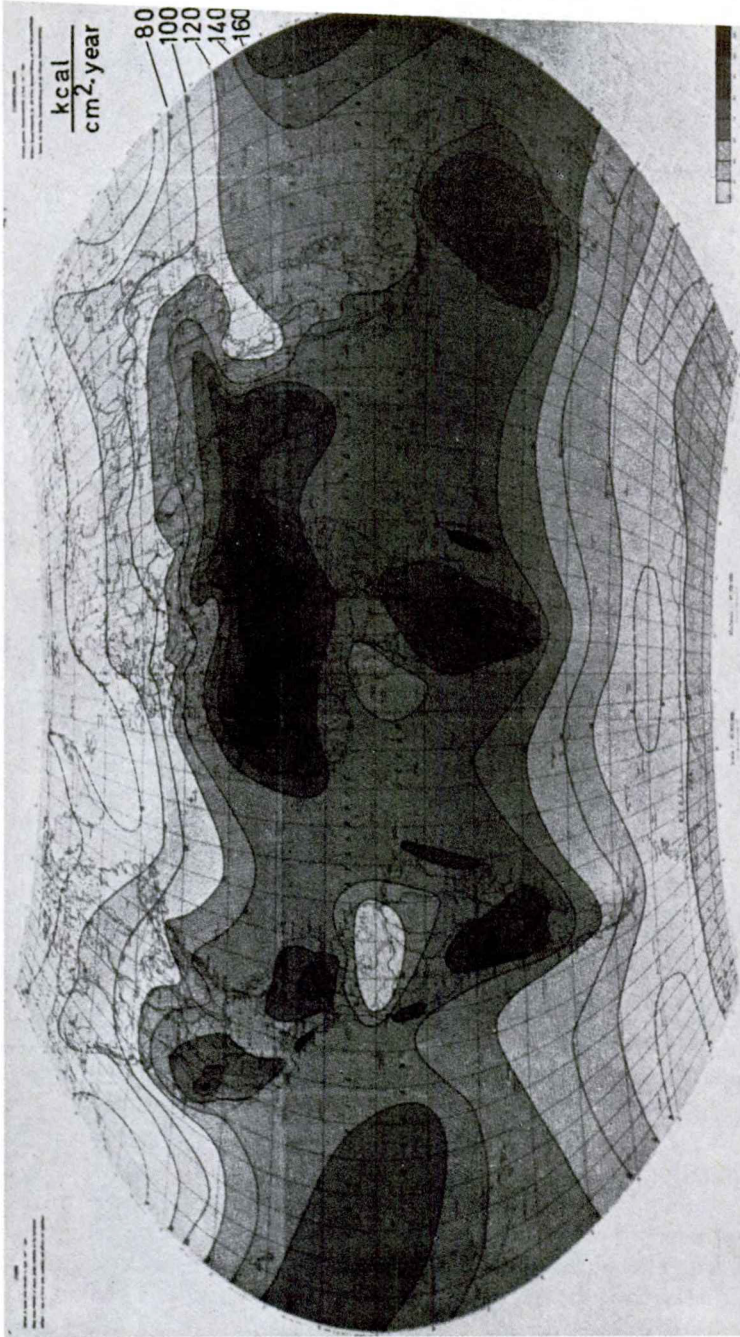


FIGURE 1. Generalized isolines of global radiation (kcal/cm<sup>2</sup> per year).



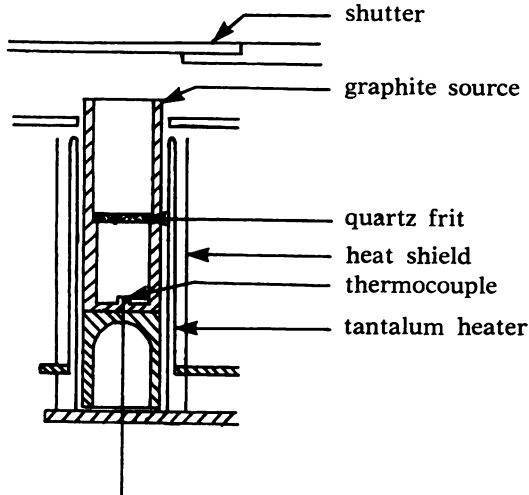
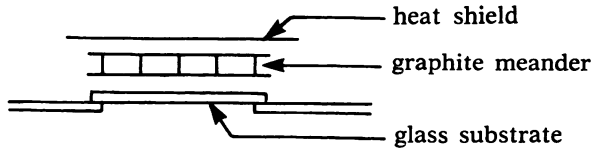


FIGURE 2. Schematic arrangement of the evaporation of CdS.

peratures of  $950^{\circ}\text{C}$  and  $250^{\circ}\text{C}$  for crucible and substrate, respectively.

In figure 3 there is the evaporation plant and at the left side the electronic control unit and power supply.

The interior of the evaporation plant is shown in figure 4. At the top the power supply for the substrates and below it the circular substrate holder for 12 glass substrates. In the lower part there are three crucibles for the evaporation of CdS.

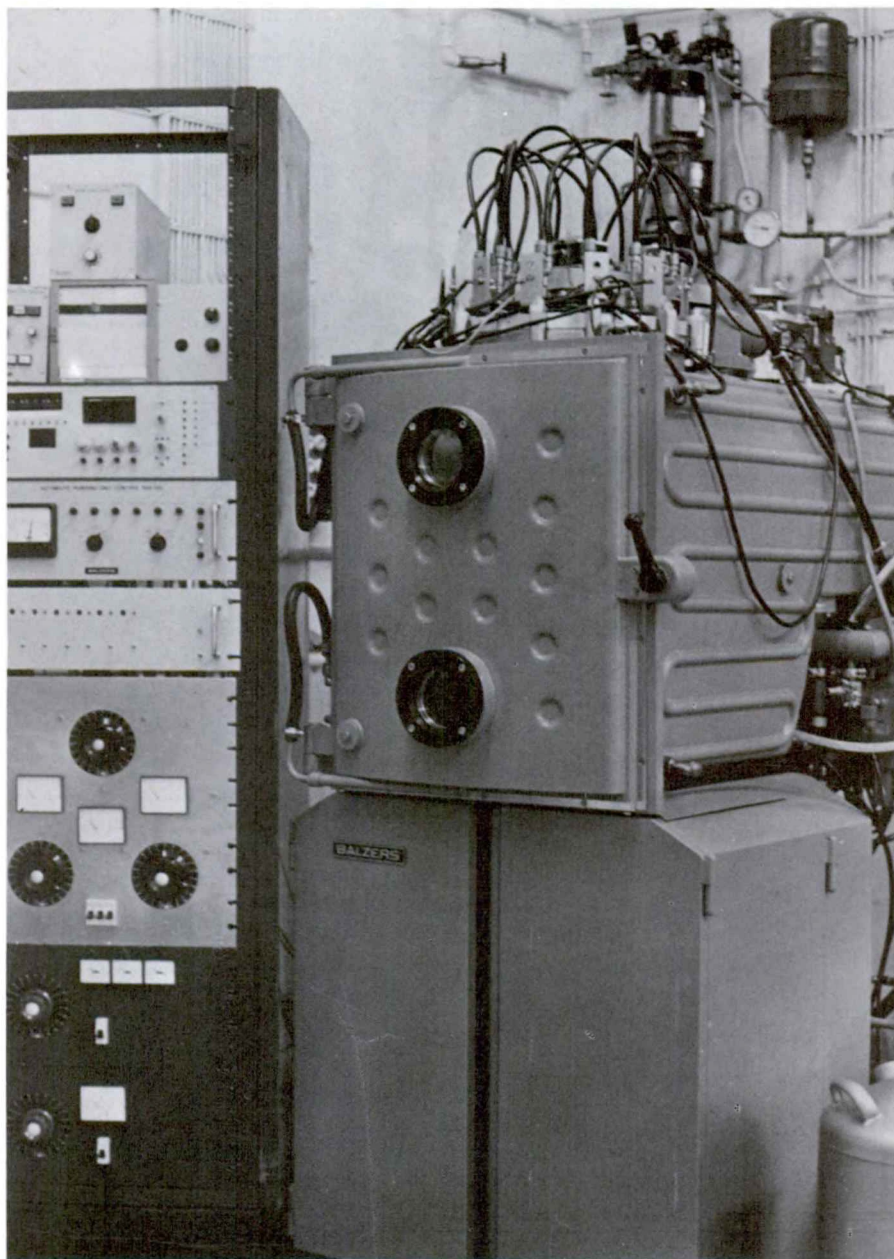


FIGURE 3. Evaporation plant.

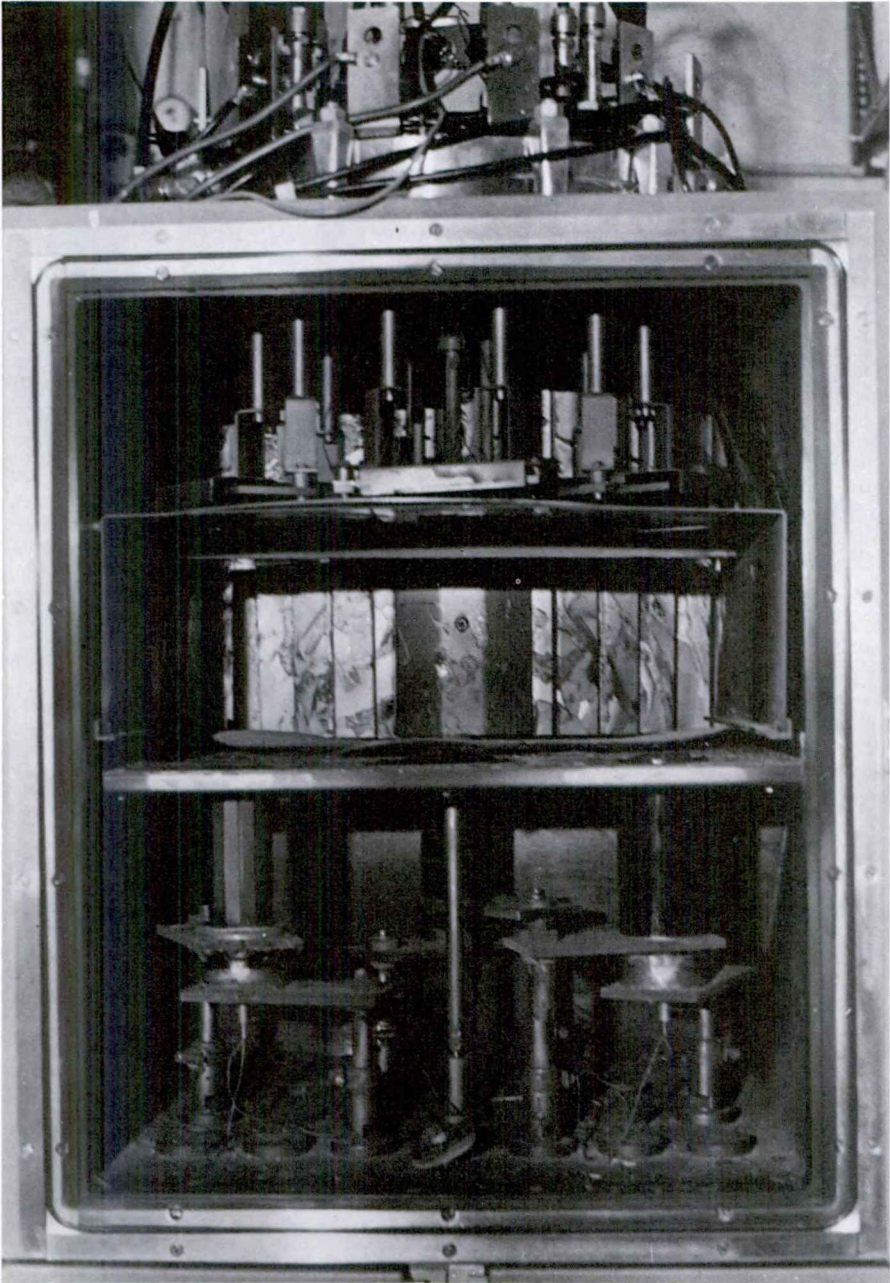


FIGURE 4. Arrangement of the evaporation of CdS.

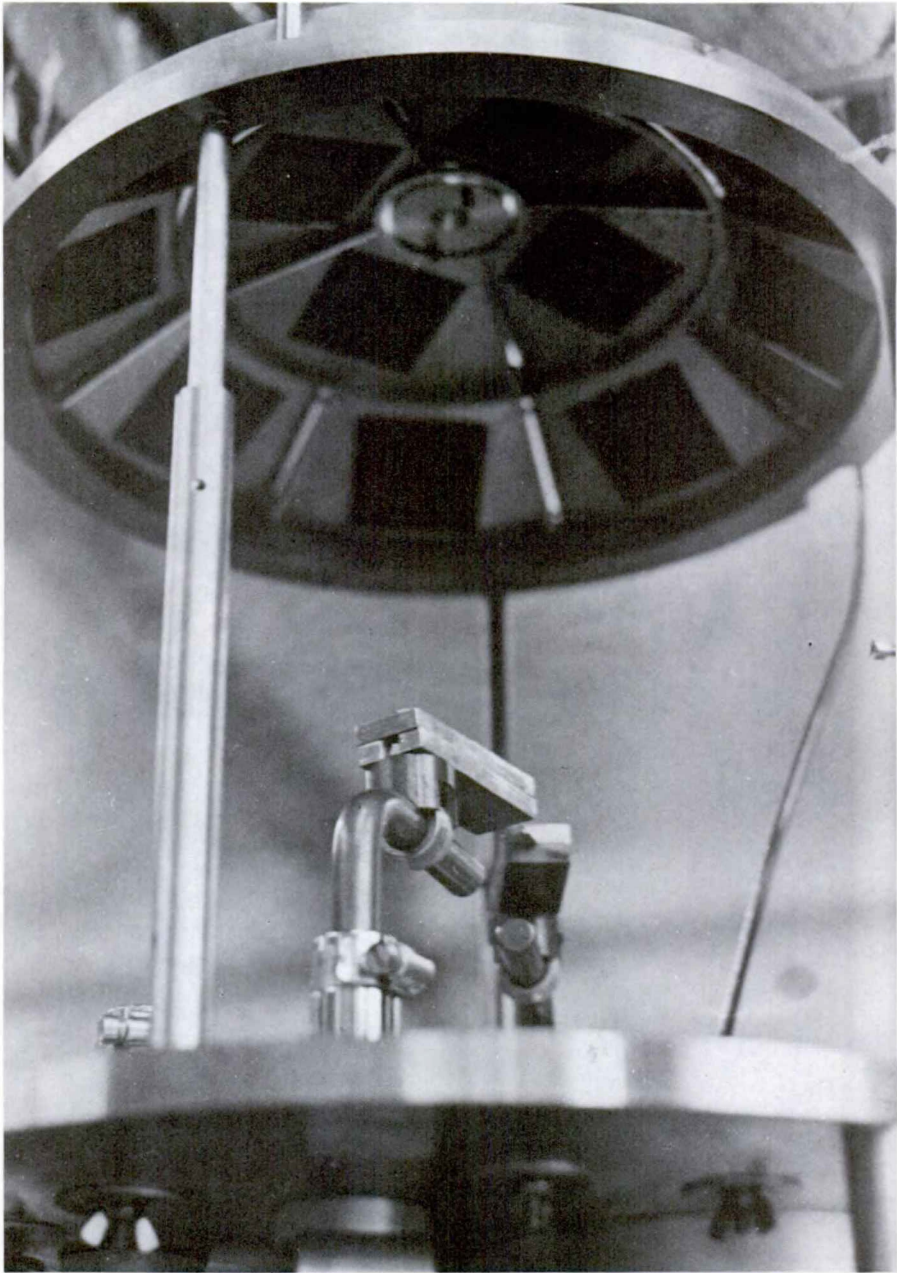


FIGURE 5. Arrangement of the evaporation of Cu.

The further manufacturing steps are etching and barrier formation by chemical treatments. The p-n junction is formed by dipping the CdS layers in an acid solution of CuCl at a temperature of  $90^\circ\text{C}$ . After a dipping time of 10 seconds the thickness of the p-type  $\text{Cu}_2\text{S}$  layer is about  $2000 \text{ \AA}$ .

An additional step to improve the efficiency of the cell is the evaporation of a copper layer with a thickness of about  $50 \text{ \AA}$  onto the cuprous sulphide. During an additional heat treatment in air, copper is diffusing into the  $\text{Cu}_2\text{S}$  and is filling the copper vacancies in the lattice. Furthermore, a surface layer of cuprous oxide, which acts as a mirror for minority carriers, is believed to be formed.

In figure 5 the interior of the evaporation plant is shown, in which the copper is evaporated onto the cuprous sulphide. A small crucible, which is heated electrically and above it 12 solar cells. At the top of the substrate holder, there is a quartz crystal installed, to measure the thickness of the evaporated copper layer during the evaporation process.

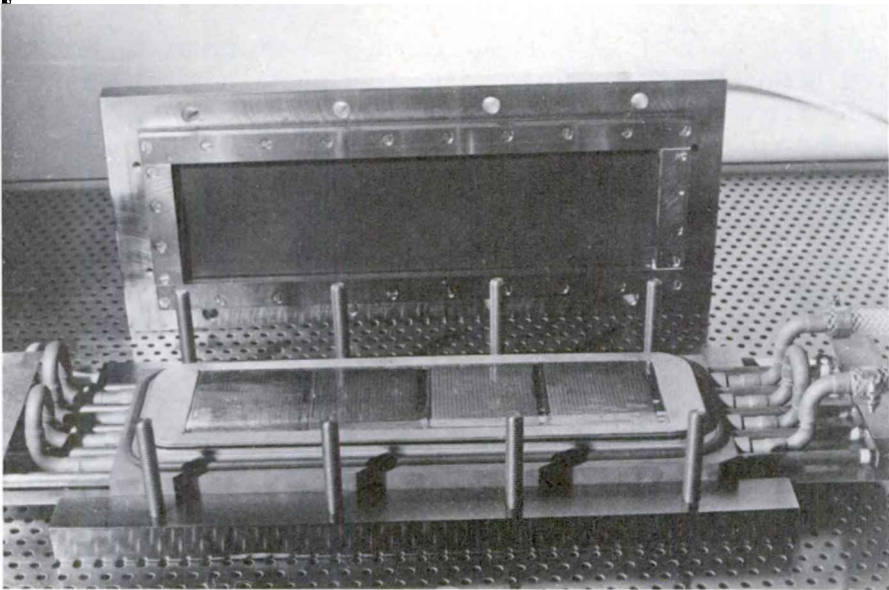


FIGURE 6. Press for encapsulation.

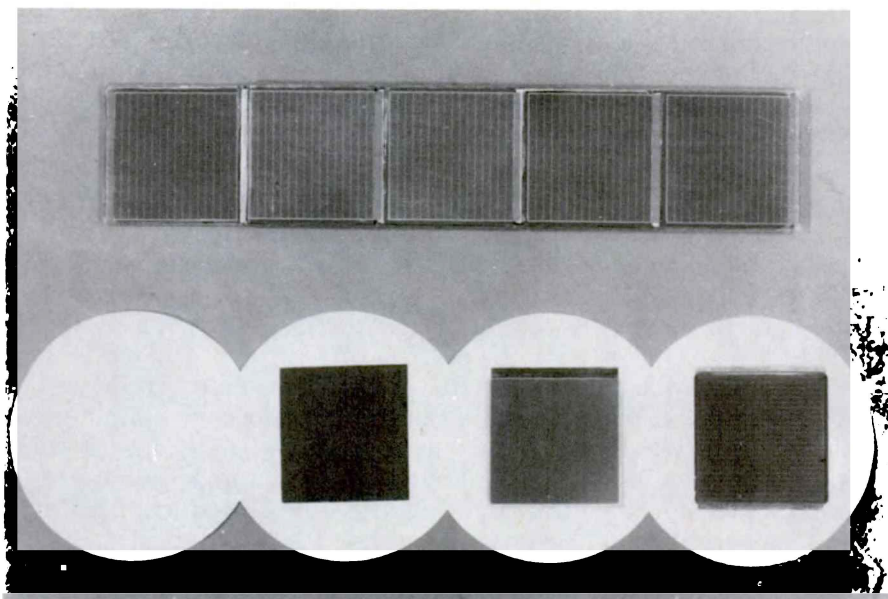


FIGURE 7. Solar cells in different stages of the manufacturing process.

For terrestrial solar cell operation it is necessary to seal the cell hermetically. The transparent front contact is formed by a gold plated copper grid. A glass plate, which is coated with a hot setting adhesive, is pressed on the cell to seal it hermetically against oxygen and water vapour.

Figure 6 shows the press for the encapsulation of an array of 4  $7 \times 7$  cm<sup>2</sup> solar cells. The press is heated electrically and can be cooled down by flowing water. During the sealing process, the interior of the press, this means the space between Cu<sub>2</sub>S layer and the glass cover, is evacuated. Inside the press, 4 encapsulated thin film solar cells can be seen.

Figure 7 shows a survey of the different stages of the manufacturing process. At the lower part of the slide, there is a cleaned glass substrate, which consists of ordinary window glass, then a metallized glass substrate, the evaporated CdS layer with a thickness of 30  $\mu$ m and an encapsulated thin film solar cell. In the upper part of the slide there is a small thin film solar cell generator with 5  $7 \times 7$  cm<sup>2</sup> thin film solar cells, connected in series. The power output in bright sunshine is 0.5 Amps and 2 Volts, that is about 1 Watt.

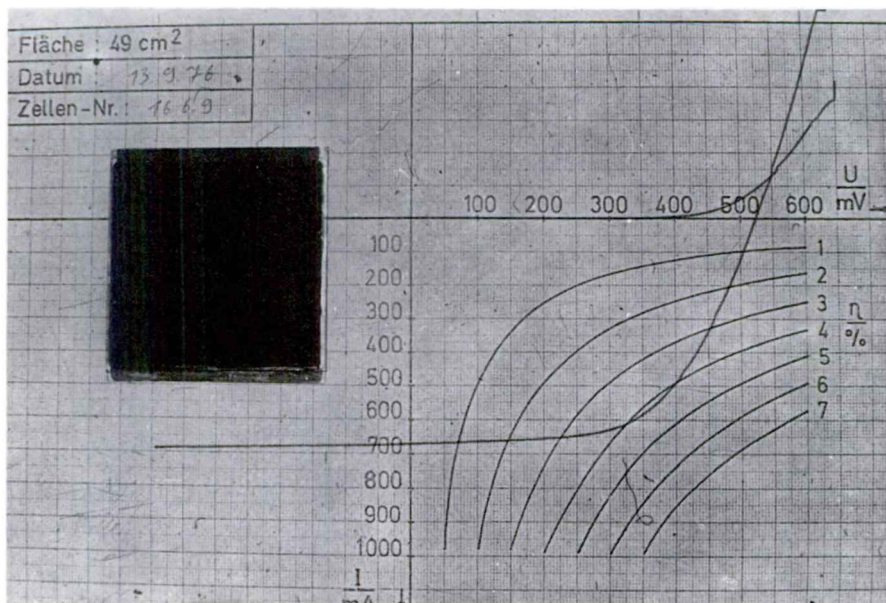


FIGURE 8. I-V characteristic of a  $7 \times 7$  cm<sup>2</sup>  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$  thin film solar cell.

Figure 8 shows the I-V characteristic of a  $7 \times 7$  cm<sup>2</sup>  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$  thin film solar cell. The efficiency of the cell is about 4%. The behaviour of the I-V characteristic shows, that the series resistance of the cell can be improved. The series resistance of the cell is determined approximately by the slope of the I-V characteristic at open circuit conditions.

Figure 9 shows a test generator with  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$  thin film solar cells on the roof of our institute. One panel consists of 8 solar cells in series and 7 panels are installed altogether. In one panel there are two thin film solar cells for measuring the operating temperature of the solar cells and two silicon solar cells as a reference. The short circuit current of each panel and of the silicon cells and the temperature of the test cells are plotted at time intervals of 2 minutes.

The degradation of the cells after an operation time of half year on the roof of our institute is between 5 and 10%, but it can be shown, that the degradation of the total panels mainly occur due to higher degradation of single cells in the panel. Therefore we can extrapolate, that our more stable cells show a life time of at least 5 to 10 years.

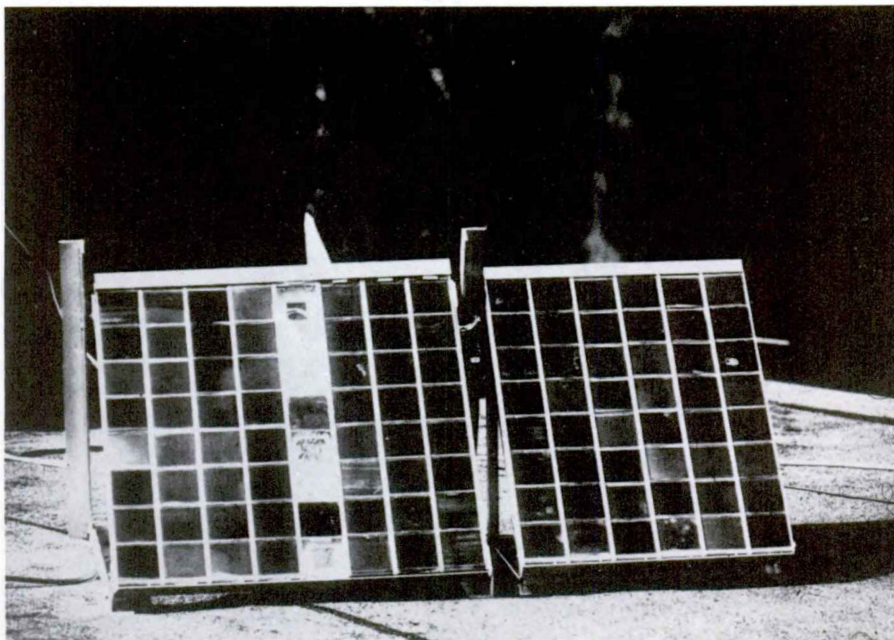


FIGURE 9. Test generator with  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$  thin film solar cells on the roof of the institute.

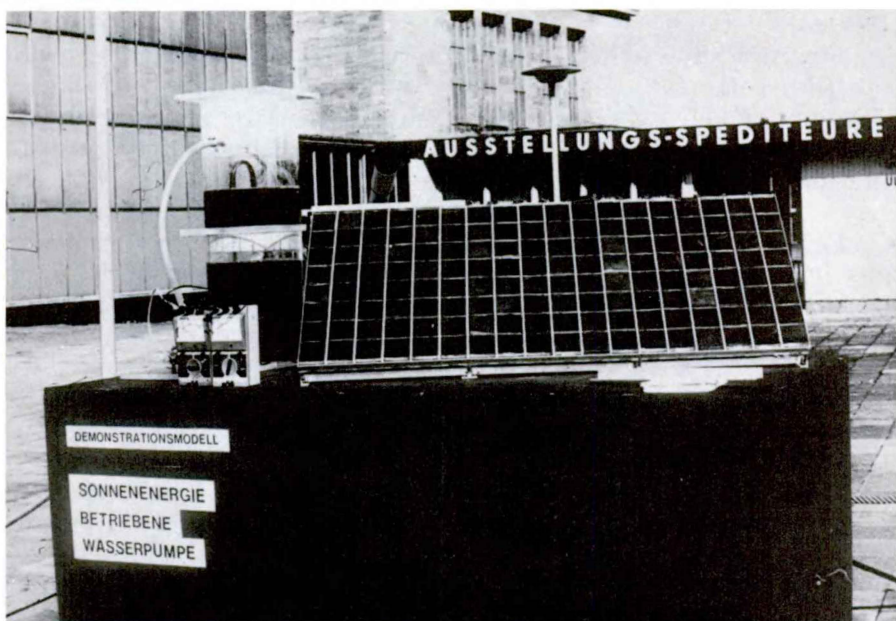


FIGURE 10. 20 Watt  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$  thin film solar cell generator.



In figure 10 a model for demonstrational purposes is shown. The solar generator consists of 18 panels, and each panel consists of 8  $7 \times 7$  cm<sup>2</sup> thin film solar cells, connected in series. In bright sunshine, the electric power output is about 20 Watt. The electric power of the generator supplies a d-c motor, which drives a water pump. The water is pumped from a lower level to a higher one, from where it is emptied through a siphon. The water looks yellow to green due to some fluorescence additives. This demonstration model also worked only with diffused light at the Exhibition of the German Industry in West-Berlin this year, where we have exhibited our thin film solar cells for the first time and it was a great success in demonstrating the feasibility of thin film solar cells for terrestrial utilization of solar energy.



**POSITION DES COMPOSÉS III-V DANS LA CONVERSION  
D'ÉNERGIE SOLAIRE**

par

**M. AVEROUS**

Centre d'Études d'Électronique des Solides  
Université des Sciences et Techniques du Languedoc  
Laboratoire associé au CNRS  
Montpellier, France

## RESUME

On presente une revue des différents composés III-IV tels que Ga Al As, Ga Al Sb, In Al Sb, parmi les différents matériaux permettant de convertir l'énergie solaire par effet photovoltaïque.

## RESUM

Entre els diversos materials que permeten de convertir l'energia solar per l'efecte fotovoltaic, hom passa revista a diferents composts III-V, com és ara Ga Al As, Ga Al Sb, In Al Sb. Hom en posa en evidència l'interès i en dona els rendiments esperats.

## SUMMARY

Diferent compounds of the (III-V) groups, namely Ga, Al, As; Ga, Al, Sb; In, Al, Sb; have been considered among a wide scope of materials which can be selected for photovoltaic energy conversion. The calculate efficiencies are presented.

## INTRODUCTION

En 1977, les générateurs photovoltaïques représentent seulement une puissance installée de quelques centaines de kilowatts. La production actuelle triple chaque année. En 1986, l'ERDA (Energy Research and Development Administration) prévoit une production de 500 MW/an au prix de 2.500 F/KW installé pour les U.S.A.<sup>1</sup>

Quels seront les matériaux les plus aptes à répondre à cette demande importante? Le choix d'un matériau ou d'une classe de matériau doit tenir compte de l'objectif fixé. En effet, des objectifs tels que:

- Grande production électrique
- Centrale de puissance en site isolé
- Alimentation de pompes à eau au Sahel

sont des objectifs très différents où le prix d'une installation compétitive peut être multiplié par dix. Dans chacun des trois cas, il a été calculé que le prix de l'énergie électrique compétitif est respectivement 0,15 F/KWH - 0,50 F/KWH, 1,50 F/KWH; le dernier objectif (1,50 F/KWH) peut être atteint par les cellules au Si, si on suppose que leur prix devrait diminuer d'un facteur 3 ou 4 dans les années à venir compte tenu d'une production importante, et qu'un nouveau facteur favorable de 3 ou 4 pourrait être obtenu par une concentration faible.<sup>2</sup>

La figure 1 montre le rendement de conversion minimum requis pour un prix de cellule donné, pour atteindre un coût de l'électricité de 0,15 F/KWH - 0,50 F/KWH, 1,50 F/KWH. Il apparaît clairement sur cette figure que pour atteindre l'objectif: centrale de puissance en site isolé, il faut faire appel à une nouvelle génération de photopiles qui doivent répondre aux spécifications suivantes: prix du KWH: 0,5 F, soit un rendement supérieur à 10 % pour un prix inférieur à 1.000 F/m<sup>2</sup>. Cet objectif sera d'autant mieux

1. M. RODOT, M. BARBE, J. DIXMIER, *Revue de Physique Appliquée*.  
2. J. J. LOFERSKI, *Proc. IEEE* 51, 667 (1963).



atteint que l'on pourra travailler sous forte concentration. Nous allons montrer que les composés III-V et plus particulièrement leurs alliages sont aptes à répondre à ces spécifications.

## I. CARACTÉRISTIQUES OPTIMISÉS D'UN MATÉRIAU

*La bande interdite:* La largeur de bande interdite est un paramètre essentiel. Sa valeur optimisée est un compromis entre les différentes pertes qui interviennent dans la conversion de l'énergie et qui limitent le rendement. Nous les avons classées en pertes dues aux mécanismes de fonctionnement et pertes imposées par la technologie.

*Limitation de rendement due aux pertes:*

A — Pertes dues au mécanisme de fonctionnement:

- Photons d'énergie  $h\nu < E_g$  non absorbés.
- Photons d'énergie  $h\nu > E_g$  (absorption inactive).
- Porteurs minoritaires photocréés non collectés à cause de leur longueur de diffusion limitée.
- Facteur de tension  $\frac{eV_{oc}}{E_g}$
- Facteur de courbe  $\frac{I_m V_m}{I_{cc} I_{oc}}$
- Pertes par réflexion.

B — Pertes de puissance imposées par la technologie:

- Recombinaisons des porteurs par l'intermédiaire d'états de surface.
- Recombinaison au niveau du contact ohmique arrière.
- Recombinaisons des porteurs dans le volume  $y$  compris la zone de charge d'espace.
- Courant de fuite à travers la jonction causée par des imperfections.
- Autres mécanismes de conduction à travers la jonction (émission de champ, effet tunnel).

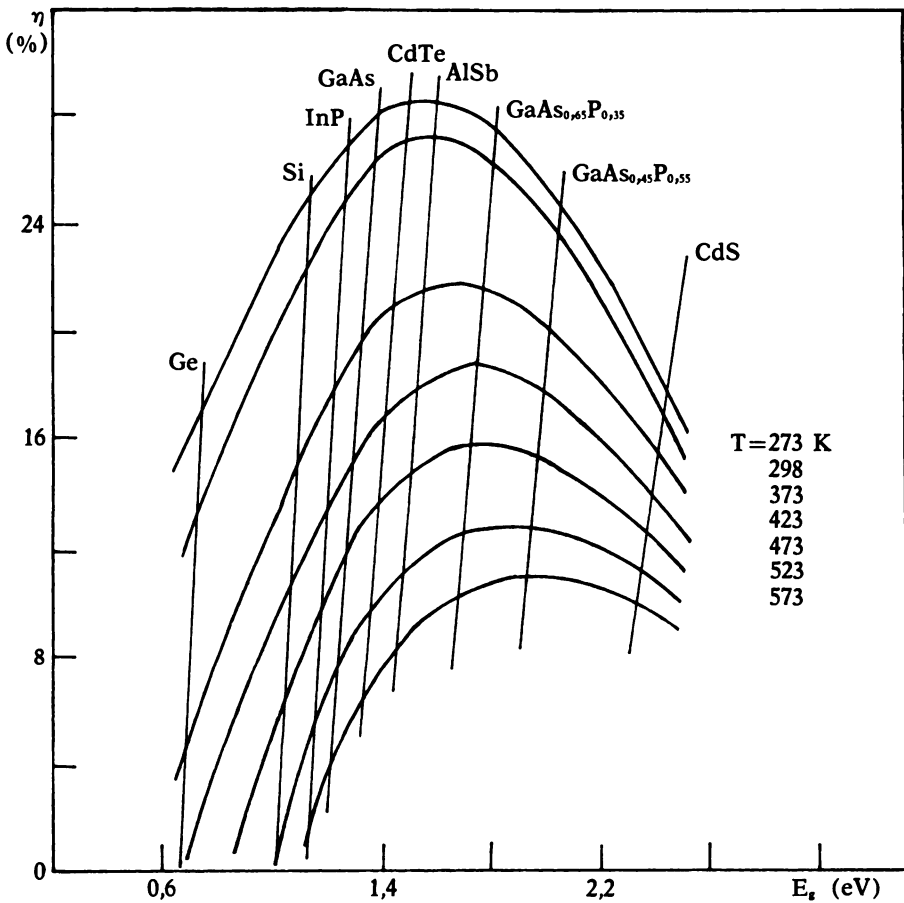


FIGURE 2. Rendement théorique d'une cellule solaire en fonction de  $E_g$  et de la température d'utilisation.

En tenant compte de tous ces facteurs, on obtient la figure 2<sup>3</sup> sur laquelle on remarque que le maximum se déplace vers les gap importants quand  $T$  augmente, ce qui signifie que pour travailler sous forte concentration il faudra choisir des matériaux à large bande interdite. Nous notons sur cette figure la place privilégiée de nombreux composés III-V aussi bien à température ambiante qu'à température élevée.

3. M. Rodor, *Acta Electronica*, 18, 4, 1975, pp. 345-358.



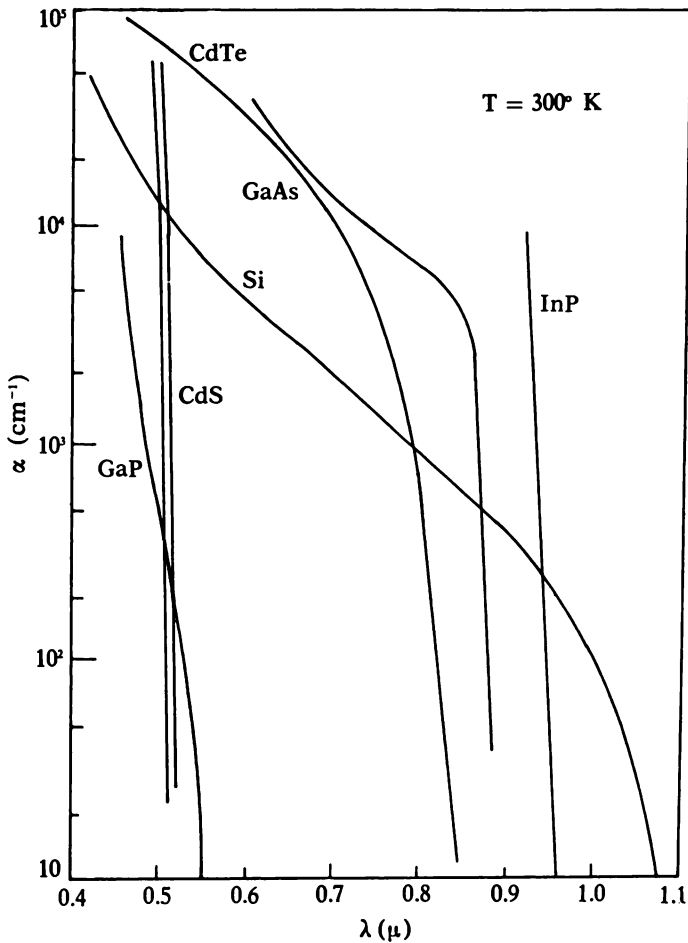


FIGURE 3. Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde de différents semiconducteurs. On note la différence dans la forme des courbes du GaAs et du Si caractéristiques d'un gap direct et indirect.

La figure 3 donne la variation du coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde. Nous remarquons que les matériaux à transition directe ont un coefficient plus élevé que ceux à transition indirecte. Cela se traduira par une épaisseur plus faible de la couche sensible de la photopile si on utilise un matériau à gap direct, (GaAs, InP), donc par une économie de matériau. Néanmoins cet avantage du gap direct est tempéré par une durée de vie beaucoup plus brève, ce qui du point de vue longueur de diffusion se compense.<sup>3</sup> La structure idéale serait celle qui permettrait d'avoir des

créations de paire électrons-trous comme dans le cas d'un gap direct et des recombinaisons identiques à celles d'un gap indirect. Nous verrons que cela est possible avec des alliages du type  $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}$ .

Les pertes les plus importantes proviennent de l'absorption inactive.<sup>3,4</sup> Il a été proposé pour diminuer ces pertes des hétérojonctions à gap gradué (figure 4).

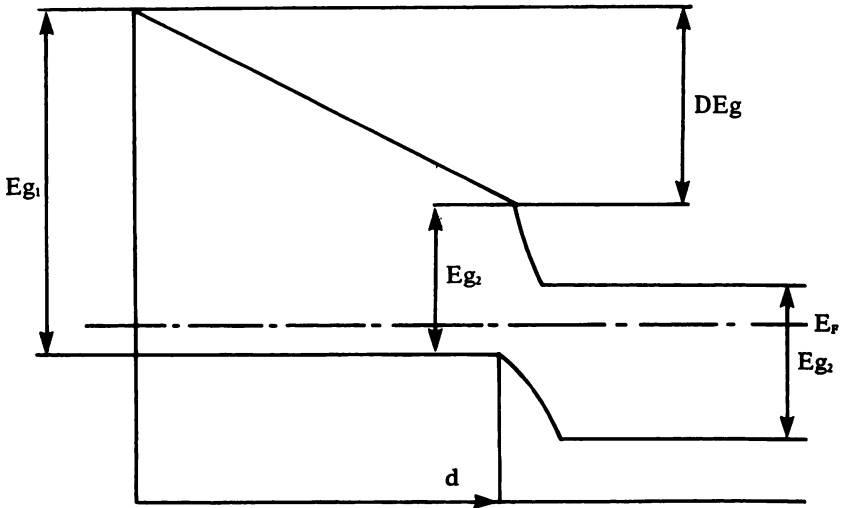


FIGURE 4. Hétérojonctions à gap gradué. GaAs-GaAlAs ou GaSb-GaAlSb.

La figure 4 montre tout le parti que l'on peut tirer d'une telle structure<sup>5</sup> puisqu'elle permet de créer des paires électrons-trous pour des  $h\nu$  de valeurs différentes. Cependant il est nécessaire d'avoir des paramètres cristallins de part et d'autre de la jonction qui diffèrent de moins de 1 %. Les composés III-V sont particulièrement bien placés puisque par exemple le GaAs et l'AlAs ont respectivement des paramètres de réseau de 5.654 Å et 5.661 Å, de même le GaSb et l'AlSb ont des paramètres de réseau de 6.09 Å et 6.13 Å. En ce qui concerne les valeurs respectives des longueurs de bandes interdites, nous avons:

4. M. J. WOLF, *Energy Convers.*, 14, 49 (1975).

5. Y. MARFAING, *Proc. Int. Conf. on Solar Cells*. Toulouse, 605 (1970).

GaAs (transition directe)	1.43 eV	
AlAs (transition indirecte)	2.15 eV	$\Delta E = 0.7 \text{ eV}$
GaSb (transition directe)	0.8 eV	
AlSb (transition indirecte)	1.6 eV	$\Delta E = 0.8 \text{ eV}$

Par conséquent, il est possible de fabriquer des hétérojonctions à gap gradué proche du gap de rendement optimum à une température d'utilisation donnée.

La figure 5 montre les variations de composition entre l'interface et la surface d'une couche de  $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}$  obtenue expérimenta-

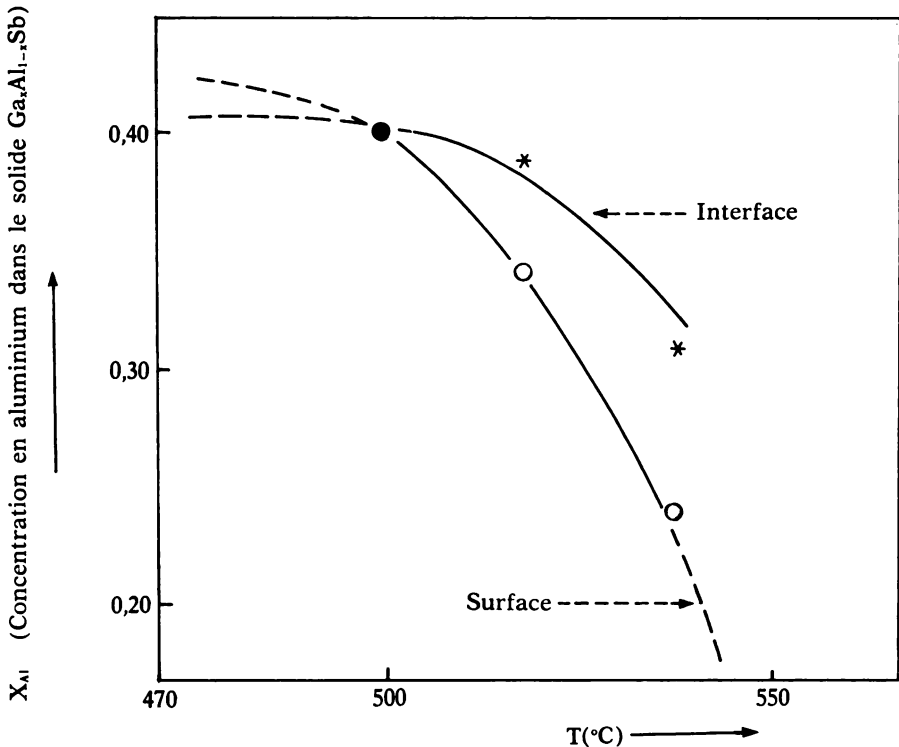


FIGURE 5. Variation de concentration d'aluminium à la surface et à l'interface en fonction de la température de fabrication ou un  $C_L = \frac{\text{Al}}{\text{Ga}}$  % en poids = 0.75%.

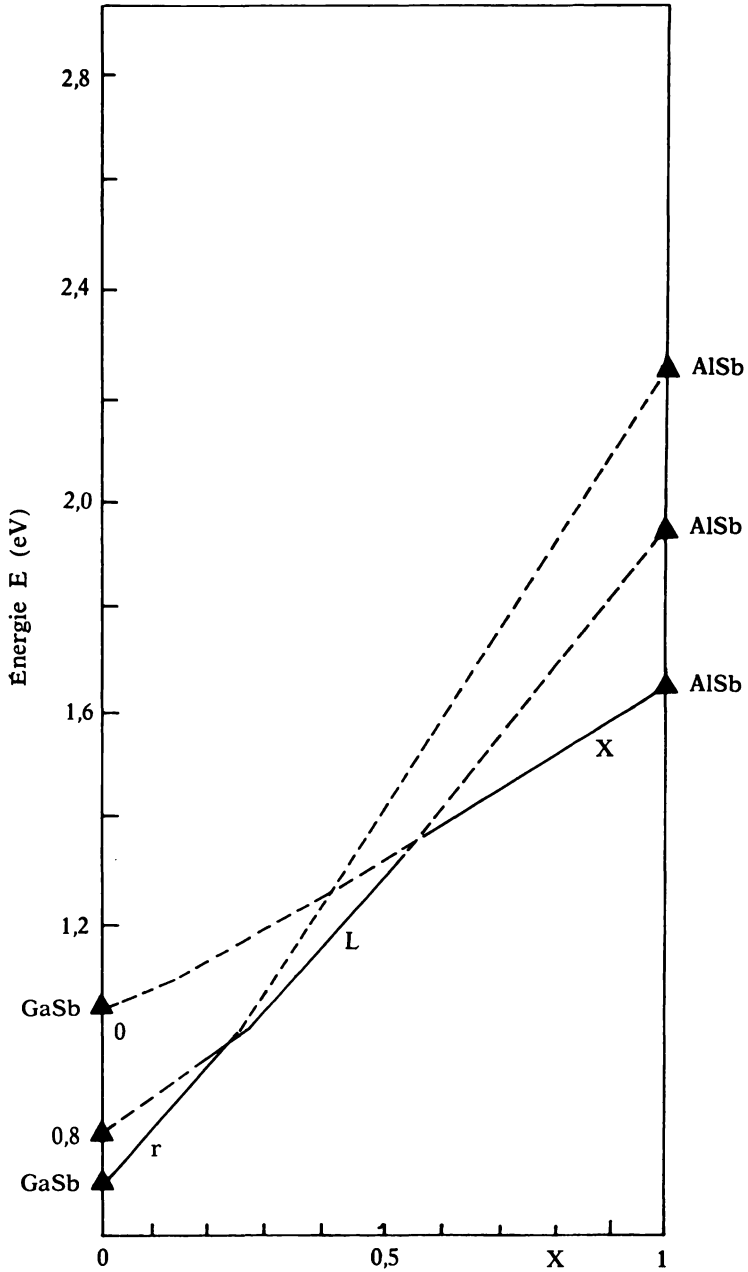


FIGURE 6. Évolution de la structure de bande de  $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{Sb}$  avec  $x$ .

lement par VAN MAU et BOUGNOT<sup>6</sup> en fonction de la température de fabrication pour un rapport  $C_2=0,75$  d'aluminium sur gallium en poids dans le creuset, au départ.

A partir de l'évolution de la structure de bande avec la composition du  $Ga_xAl_{1-x}Sb$ ,<sup>7</sup> que l'on observe sur la figure 6, nous pouvons pour un  $x$  convenablement choisi, obtenir dans notre cellule photovoltaïque une structure de bande non graduée, mais avec deux minimum de la bande de conduction situés comme dans la figure 7. A partir d'une telle structure, où le minimum (111) est situé à  $kT$  du minimum central (000), on peut bénéficier d'un gap direct pour la création de paires électrons-trous (probabilité beaucoup plus grande pour le minimum central). Les électrons ainsi photocréés, vont se thermaliser dans le minimum subsidiaire (111) et par conséquent du point de vue recombinaison, nous pouvons bénéficier des

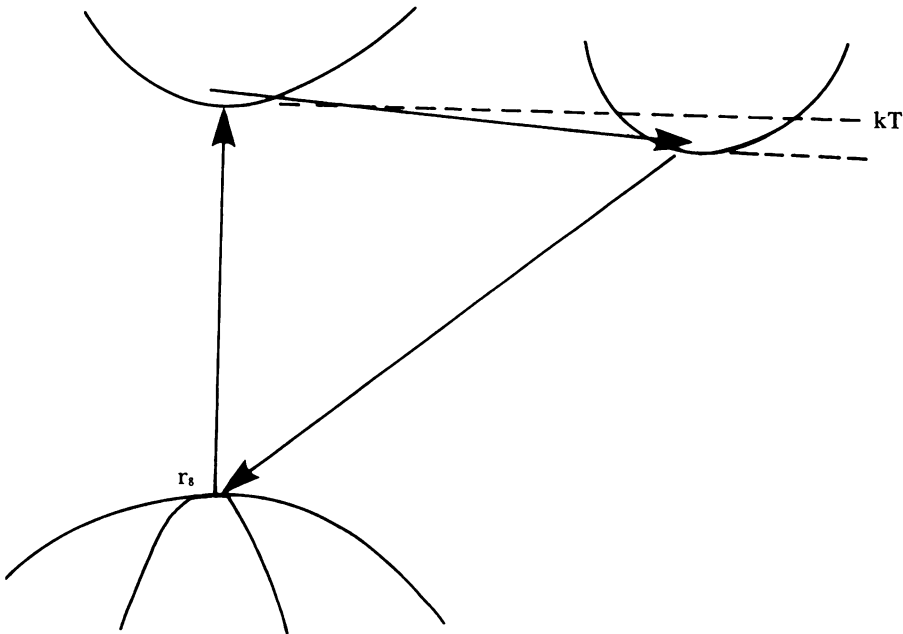


FIGURE 7. Configuration de bande pour  $x$  voisin de 0.40. Minimum central situé à  $kT$  au-dessus du minimum en  $k=(111)$ .

6. N. VAN MAU et G. BOUGNOT, *Rapport de Contrat D.G.R.S.T.*, Décembre, 1975.  
7. H. MATHIEU et al., *Phys. Rev.*, 12, 12, 5846 (1975).

avantages d'un gap indirect. Seuls les composés III-V dans le domaine d'énergie de rendement optimum permettent de réaliser de telles structures. Les matériaux actuellement étudiés pour la réalisation de gap gradués, ou de structure à deux bandes de conduction sont: le GaAlAs, le GaAlSb et plus récemment l'InAlSb.

### *Aptitude à travailler sous concentration solaire*

L'élément important qui freine actuellement le développement des photopiles fabriquées à partir de composés III-V est leur prix de revient.

Dans une perspective de prix de KWH fixé à 0.5 F., il est nécessaire de travailler sous forte concentration solaire. De ce fait, on augmente le rendement du système dans des proportions importantes, et le coût de la photopile devient une partie peu importante du coût total. Pour un facteur de concentration  $K=100$ , la photopile intervient pour 20 % du coût total. Pour un facteur de concentration  $K \approx 1000$ , ce pourcentage devient très faible, et l'emploi de matériau tel que GaAs, GaAlAs, GaAlSb devient économiquement rentable, à condition que ces matériaux se prêtent à la concentration.<sup>1, 8, 9, 10</sup>

La figure 8 montre les résultats obtenus sous concentration de 1000, en fonction de la température sur une hétérostructure<sup>8</sup> GaAs n — GaAs p — Ga<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As p par J. DU BOW, Colorado, State University. Les remarques qui peuvent être faites à partir de cette figure sont les suivantes:

- le rendement photovoltaïque diminue avec la température, mais le rendement photothermique augmente, de telle sorte que le rendement total tend vers une valeur limite de 25 % ;
- le GaAlAs est ici utilisé comme fenêtre, ce qui signifie, qu'il élimine les recombinaisons à la surface de la jonction, et il agit comme un contact basse résistance qui décroît la résistance série de la cellule.

Par conséquent, on doit encore pouvoir augmenter le rendement en utilisant des hétérostructures, faites d'une fenêtre GaAlAs, mais aussi d'une hétérojonction. Le GaAlSb se prête également à ce type de cellule avec toutefois une limitation vers les grands gap.

Des expériences de concentration ont été faites également sur des photopiles GaAs — GaAs<sub>0,43</sub>P<sub>0,57</sub> qui ont montré un comportement similaire avec un gain important sur le rendement.<sup>9</sup>

8. J. DU BOW, *Electronics*, 11, 86, Nov. 76.

9. A. S. EPSEIN and M. V. DEBAETS, *Sol. Stat. Elect.*, 9, 1019 (1976).

10. L. W. JAMES and R. L. MOON, *Appl. Phys. Lett.*, 467 (1975).

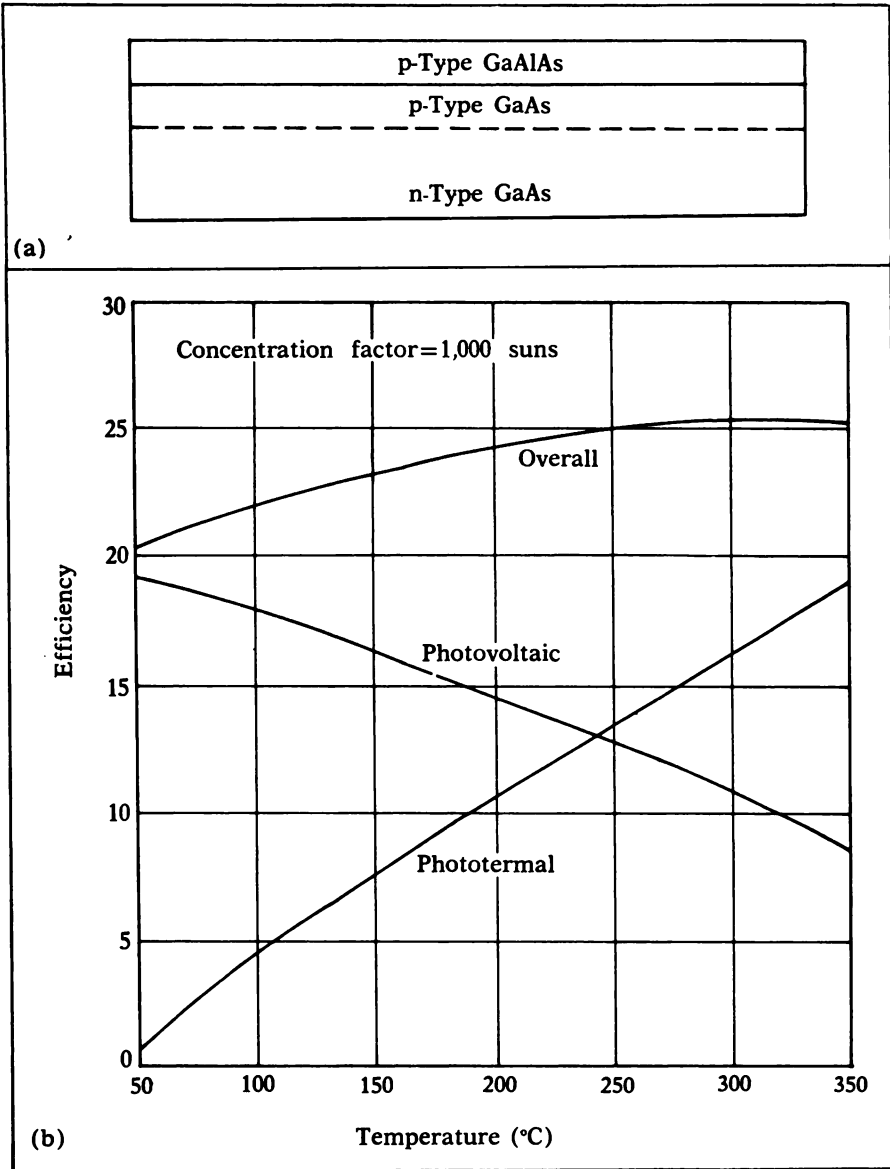


FIGURE 8. Rendement total obtenu sous concentrations de 1000, en fonction de la température pour GaAs-GaAlAs.<sup>9</sup>

**CONCLUSION**

A partir de 1980, il existera un marché important pour des cellules solaires de rendement élevé fonctionnant sous forte concentration.

Les composés III-V semblent devoir occuper une place de choix dans la conquête de ce marché grâce aux atouts suivants: gap optimum — gap gradué — structure de bande à plusieurs minima — recombinaisons en surface faible, grâce à des fenêtres d'alliage III-V déposées sur la cellule — résistance série faible — bonne tenue aux fortes concentrations ( $K > 1000$ ).



**APLICACIÓ DE LES ESTRUCTURES MIS-TÚNEL  
A LA CONVERSIÓ FOTOVOLTAICA**

**per**

**J. BUXÓ**

**LAAS, Tolosa de Llenguadoc, França**

## RESUM

L'interès de la utilització d'aquestes estructures ve del fet que el corrent de portadors majoritaris queda fortament reduït per l'efecte túnel de la capa intermèdia. Hom demostra sota quines condicions el pas dels portadors fotogenerats (minoritaris) és encara possible. Hom presentarà una experiència i la teoria completa d'aquest transport.

## SUMMARY

The interest in the utilization of these structures, derives from the fact that the effect of the current of the majoritary carriers, would be reduced strongly, as a result of the tunnel effect of the intermediate layer. It is shown under which conditions the passing of the photogenerated carriers (minority ones) is still possible. An experience and the complete theory of this process will be presented.

Diferents autors han discutit darrerament les possibilitats dels díodes Schottky tipus MIS-túnel.

L'interès d'aquest dispositiu és degut a la presència d'una capa molt fina d'aïllant entre el metall i el semiconductor. Aquesta capa fina augmenta i controla el valor de l'eficàcia d'injecció del dispositiu.

L'eficàcia d'injecció d'un díode Schottky pur (és a dir, que no conté la capa intermèdia aïllant) és reduïda a l'ordre de  $10^{-6}$  i només depèn de la natura del metall que defineix el valor de l'alçada de la barrera de contacte (tal com ho han demostrat teòricament i experimentalment YO i SNOW).

La possibilitat d'obtenir un augment d'aquest valor (eficàcia d'injecció) en el cas on és introduïda una capa aïllant intermèdia, ha estat demostrada experimentalment per CARD i RHODERICK i també per nosaltres, mitjançant la utilització d'estructures de tipus epitransistor (fig. 1).

Utilitzant aquestes estructures és possible, en el camp de la conversió fotovoltaica, d'augmentar l'eficàcia d'injecció i d'obtenir rendiments fotoelèctrics superiors als dels díodes Schottky normals.

Talment com mostren les figures següents, el rendiment fotoelèctric d'un díode Schottky normal no és superior a un 6 % (fig. 2).

Al requadre següent —il·lustració 3— veiem els principals resultats que hom ha obtingut en el cas de les estructures MIS; i resumint podem observar la figura 4.

#### EFICÀCIA D'INJECCIÓ

L'estudi teòric de l'eficàcia d'injecció en les estructures MIS per efecte túnel permet de demostrar que, superant una velocitat de recombinació nul·la a la superfície, els valors de l'eficàcia poden ésser molt elevats.

La figura 5 mostra els resultats obtinguts quan hom suposa que el semiconductor té la superfície invertida i, a més, aquesta inversió es manté àdhuc polaritzant-lo en directe.

Les corbes de la figura següent s'obtenen quan la polarització directa provoca la pèrdua d'aquesta condició d'inversió.

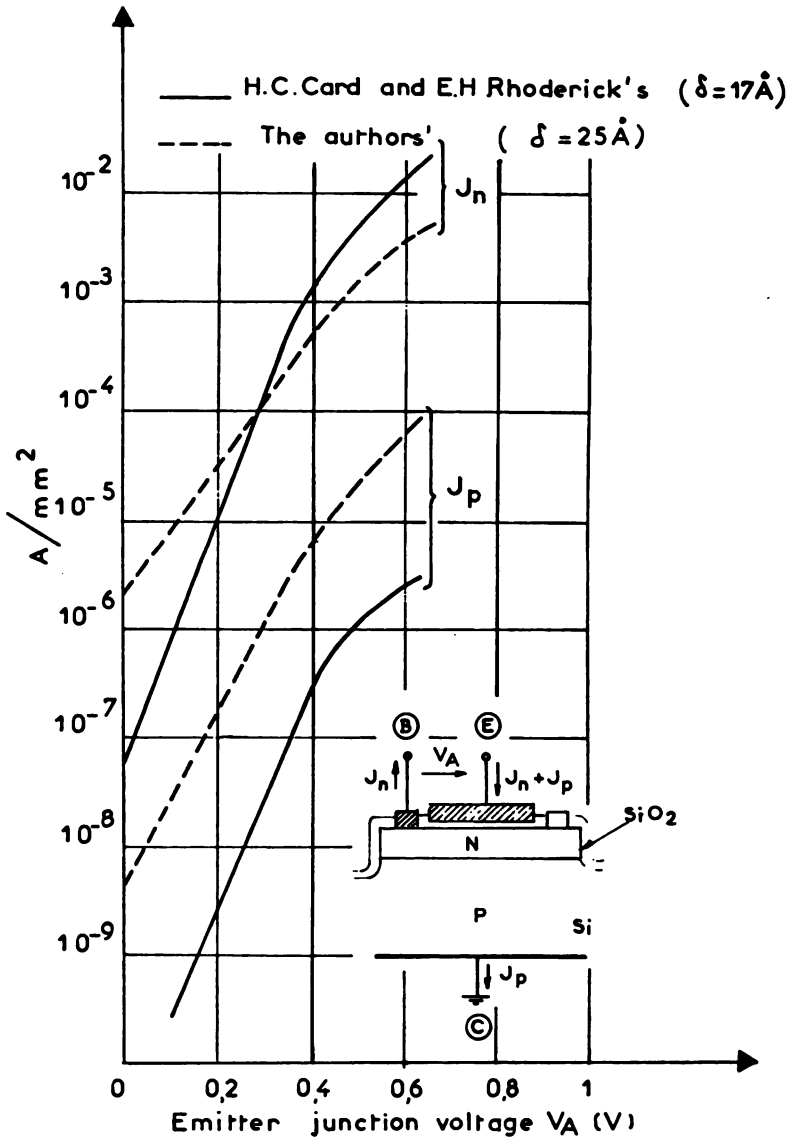


FIGURA 1

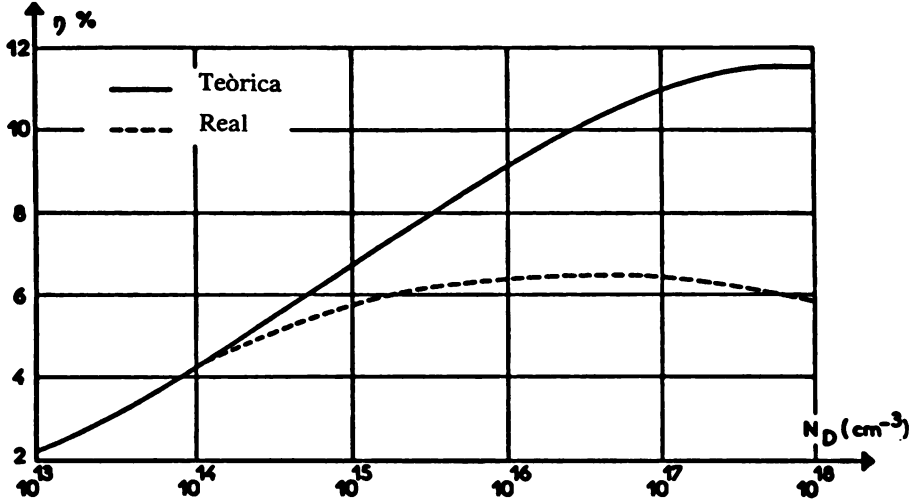


FIGURA 2

	Díode Schottky M-S	Estructura MIS túnel
Eficàcia d'injecció $\gamma$ (polarització elèctrica)	$\approx 10^{-6}$ depèn del tipus de metall	$\approx 10^{-3}, 10^{-2}$
Polarització òptica (utilització fotopila)	$\eta \leq 6\%$	$8\% \leq \eta \leq 10\%$
Característiques òptiques		

FIGURA 3

AUTORS	SEMICONDUCTOR	AÏLLANT	METALL	RESULTATS
D. R. Lilington W. G. Townsend 1975	Si tipus n	SiO <sub>2</sub> 10-20 Å	Au	V <sub>oc</sub> augmenta un 30 % respecte a un díode tipus Schottky convencional
R. J. Stirn Y. C. M. Yeh 1975	GaAs	Al,Ga <sub>1-x</sub> As creixement per deposició epitaxial E <sub>g</sub> > 0 δ = 20 Å	Au	η = 15 %
E. J. Charlson J. C. Lien 1975	Si tipus p	SiO <sub>2</sub> δ ≈ 30 Å	Al	η = 8 %
W. A. Anderson 1974	Si tipus p	Capa de SiO <sub>2</sub> no intencionada	Cr	η = 8,1 %
A. H. M. Kipperman M. H. Omar 1976	Si tipus p	SiO <sub>2</sub> δ 50 ≈ Å	Au	η > 10 %
E. Fabre (Lep) 1976	Si tipus p	No és directa- ment controlable	Ti	η = 8 % quan el factor de qualitat (η) augmenta el valor V <sub>oc</sub> també augmenta

FIGURA 4

Ara veiem que aquells valors tan elevats de  $\gamma$  ja són molt més difícils d'obtenir. Aquests càlculs demostren, per tant, que hi ha paràmetres essencials que controlen el valor de  $\gamma$  (fig. 6).

Essent:

- el gruix de la capa aïllant intermèdia (fig. 7);
- l'alçada de la barrera de contacte (fig. 8).

Aquesta darrera és definida per:

- la diferència entre els treballs de sortida del metall i del semiconductor;
- la densitat d'estats de superfície presents a la interfase SiO<sub>2</sub>/Si.

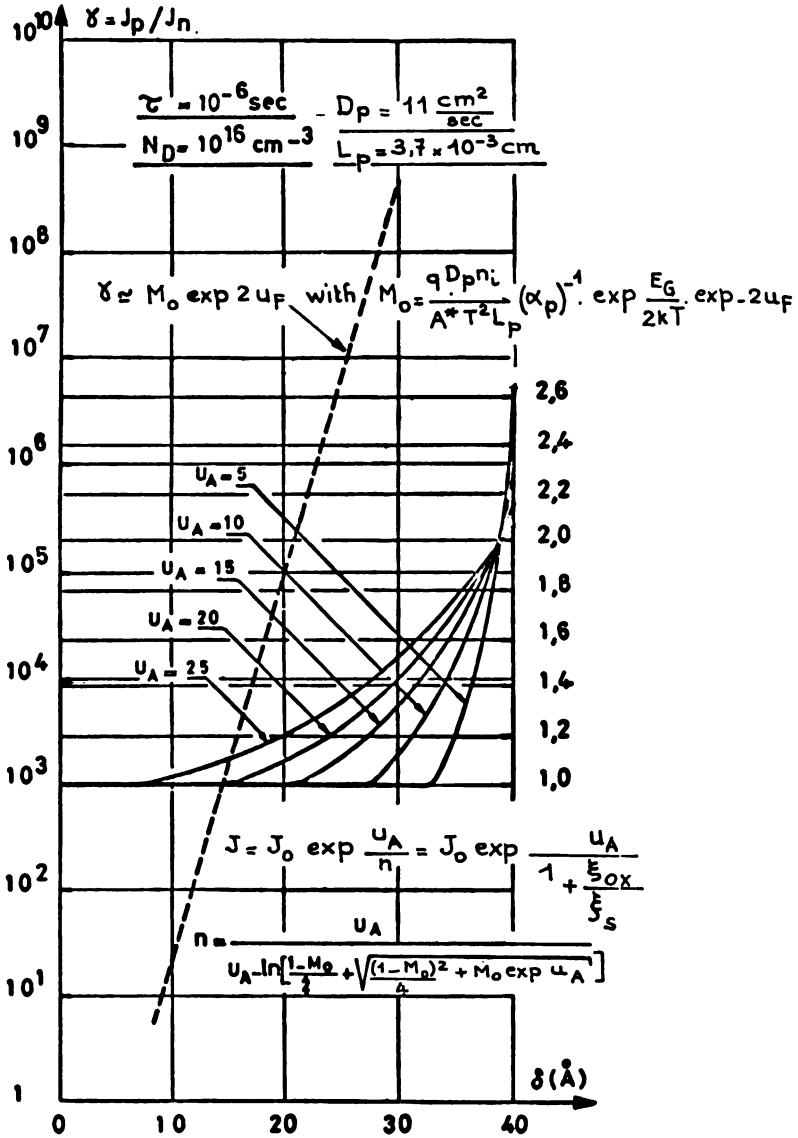


FIGURA 5

## QUADRE D'OPTIMITZACIÓ

	$\varphi\emptyset n$	In	Ip
Metall amb un valor de treball de sortida molt elevat	elevat favorable	feble favorable	facilitat favorable
Estats de superfície	donadors (+, 0)	feble desfavorable	no s'interaccionen amb els forats
	acceptors (-, 0)	gran favorable	no s'interaccionen amb els electors

FIGURA 6

Vegem ara com es modifiquen els resultats que hem presentat, si tenim en compte la presència dels estats de superfície que fins ara havíem ignorat.

Per a la discussió diferenciarem dues menes d'estat de superfície.

A) *Estats donadors (+, 0)*

En general, pròxims a la banda de conducció i, per tant, ionitzats (+) *des d'un punt de vista electrostàtic*, tenen una acció desfavorable respecte a l'alçada de la barrera i, per tant, respecte a l'eficàcia d'injecció.

*Des d'un punt de vista dinàmic*, aquests estats poden servir de pont entre un mecanisme de transició tèrmica envers els portadors majoritaris, seguit d'una transició tipus túnel envers els estats lliures del metall.

Si tenim en compte aquest mecanisme, hom arriba a una reducció significativa de l'eficàcia d'injecció.



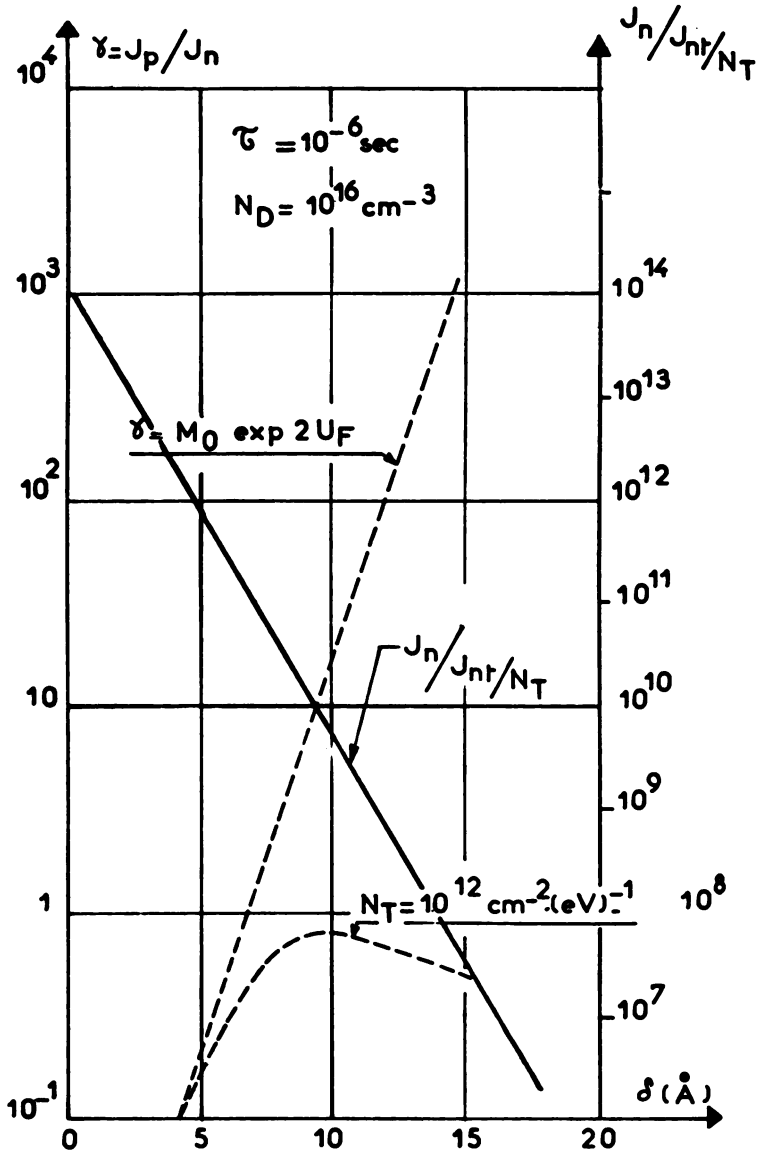


FIGURA 7

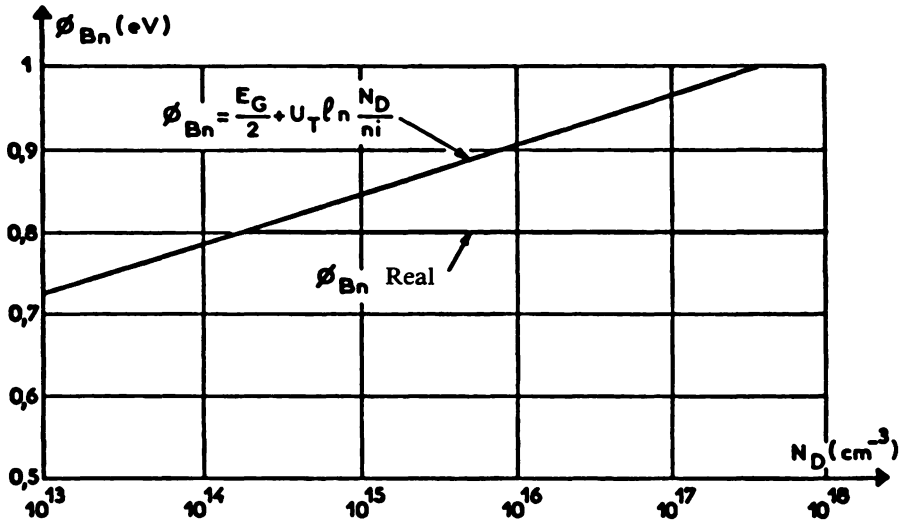


FIGURA 8

### B) Estats acceptors

Aquests estats són generalment pròxims a la banda de valència i presenten una càrrega negativa.

Des del punt de vista electrostàtic, tenen una acció favorable envers l'alçada de la barrera i, per tant, sobre l'eficàcia d'injecció.

Des d'un punt de vista dinàmic, poden servir de pont per a la transferència de portadors minoritaris, i en aquest cas tenen una acció favorable envers els valors de l'eficàcia d'injecció.

### EL RENDIMENT DE LA FOTOPILA

Hem dit que l'acció de la capa aïllant provocava un augment de la tensió  $V_{oc}$ ; ara veurem per què.

La característica  $I(V)$  ens demostra que el corrent òptic no resta modificat per la presència de la capa aïllant (fig. 3). En efecte, el transport del corrent òptic resta garantit pel mecanisme d'efecte túnel per a un valor qualsevol del gruix de la capa intermèdia.

Respecte a la tensió  $V_{oc}$ , l'equació demostra que aquest valor augmenta per a valors grans de  $\delta$ .

**PROPRIÉTÉS DES COUCHES DE CdS OBTENUES PAR  
VOIE CHIMIQUE REACTIVE EN VUE D'APPLICATIONS  
AUX CELLULES SOLAIRES Cu<sub>2</sub>S-CdS**

par

**M. SAVELLI, Mme. J. BOUGNOT, J. MARUCCHI, Mme. PEROTIN,  
M. SIRKIS,\***

**Centre d'Études d'Électronique des Solides, CNRS  
Université des Sciences et Techniques du Languedoc  
Montpellier, France**

\* Adresse: Arizona State University (U.S.A.)

## RÉSUMÉ

Ces travaux concernent des lames minces de CdS préparées par voie chimique réactive.

Nous donnons quelques résultats relatifs à l'action du recuit sous différentes atmosphères en fonction de la température et du temps. Nous présentons les premiers résultats obtenus sur les cellules solaires  $\text{Cu}_2\text{S} - \text{CdS}$  fabriquées par «dipping» à partir de couches de CdS déposées sur  $\text{SnO}_2$ .

## RESUM

Aquests treballs fan referència a les làmines primes de CdS preparades per via química reactiva.

Donem alguns resultats relatius a l'acció de la recuita sota diferents atmosferes en funció de la temperatura i del temps. Presentem els primers resultats obtinguts en les cèl·lules solars  $\text{Cu}_2\text{S} - \text{CdS}$  fabricades per «dipping» a partir de capes de CdS dipositades damunt  $\text{SnO}_2$ .

## SUMMARY

These studies concern films of CdS prepared by means of a reactive chemistry procedure. Some results concerning the effects of heat treatment in different atmospheres on both electrical and crystallographic properties as a function of the temperature and the duration of the treatment are given.

We also present our first results obtained for  $\text{Cu}_2\text{S} - \text{CdS}$  solar cells produced by «dipping» films of CdS deposited on a  $\text{SnO}_2$  layer.

## INTRODUCTION

Ces dernières années, l'hétérojonction  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$  a été étudiée d'une manière extensive en vue d'applications terrestres dans le domaine de la conversion photovoltaïque. La fabrication de ces cellules est obtenue par échange d'ions en solution aqueuse dans une solution cuivreuse d'une couche de CdS évaporé sous vide. Plus récemment VEDEL et al.,<sup>1, 2</sup> et JORDAN (Baldwin-El Paso)<sup>3</sup> ont montré qu'il était possible d'obtenir des cellules en réalisant la couche de CdS par pulvérisation chimique réactive, c'est-à-dire par «spray», sans que le rendement de conversion ne soit affecté.

Le but de nos recherches actuelles, dont nous rapportons ici certains résultats, est d'étudier le processus de fabrication de couches minces de CdS par «spray», et d'explorer les propriétés électriques de ces lames corrélativement aux paramètres de fabrication.

## PREPARATION DES LAMES MINCES DE CdS

A partir de chlorure de cadmium anhydre de synthèse  $\text{CdCl}_2$  (Merck) et de thiourée pour analyse  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  (Labosi) sont réalisées deux solutions aqueuses à 0.1 mole/litre. En faisant varier les proportions de ces deux solutions, on réalise un mélange dans le rapport désiré des concentrations en ion cadmium  $\text{Cd}^{++}$  et en ion soufre  $\text{S}^{--}$ .

Une surpression du circuit liquide de l'ordre de  $10^4 \text{ N/m}^2$  produit un flux de liquide de l'ordre de  $4 \text{ cm}^3/\text{minute}$ , sortant de l'injecteur dont le diamètre est de 35/100 de mm. Une arrivée d'air sous une pression de  $1.2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  réalise la vaporisation du liquide sous forme d'un aérosol homogène.

1. J. VEDEL, E. CASTEL, International Conference, Toulouse, march 1-5, 1976, Ed. CNES, pp. 333-337.

2. S. MARTINUZZI, F. CABANE-BROUTY, J. GERVAIS, A. MOSTAVAN, International Conference, Toulouse, march 1-5, 1976, Ed. CNES, pp. 303-308.

3. J. F. JORDAN, I.E.E.E. Photovoltaic Specialists Conference, Scottsdale, Arizona, may 6-8, 1975, 75CH0948-OED, pp. 508-514.

Un système rotatif d'entraînement du système injecteur-vaporisateur permet un balayage, à une vitesse de 4 cm/seconde, d'une couronne circulaire sur laquelle sont placés les supports échantillons. Ces derniers sont formés de plaquettes de pyrex de  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 0.2\text{ cm}$ , placées dans des logements adaptés dans la plaque de chauffage; un dispositif spécial permet une rotation lente de ces logements, afin d'obtenir des lames minces homogènes.

Un thermocouple positionné sur une lame témoin, est couplé au dispositif d'alimentation de la plaque chauffante; le dispositif de régulation assure une variation de la température inférieure de  $5^\circ\text{C}$  maximum entre deux instants encadrant l'arrivée de l'aérosol sur la plaque. Les paramètres intervenant dans cette étude sont le rapport  $\text{Cd}^{++}/\text{S}^{-}$  et la température  $T_s$  du substrat, le flux du liquide ayant été gardé ici constant.

Afin d'une part de contrôler le processus de fabrication, et d'autre part d'avoir une idée précise du taux de condensation du-

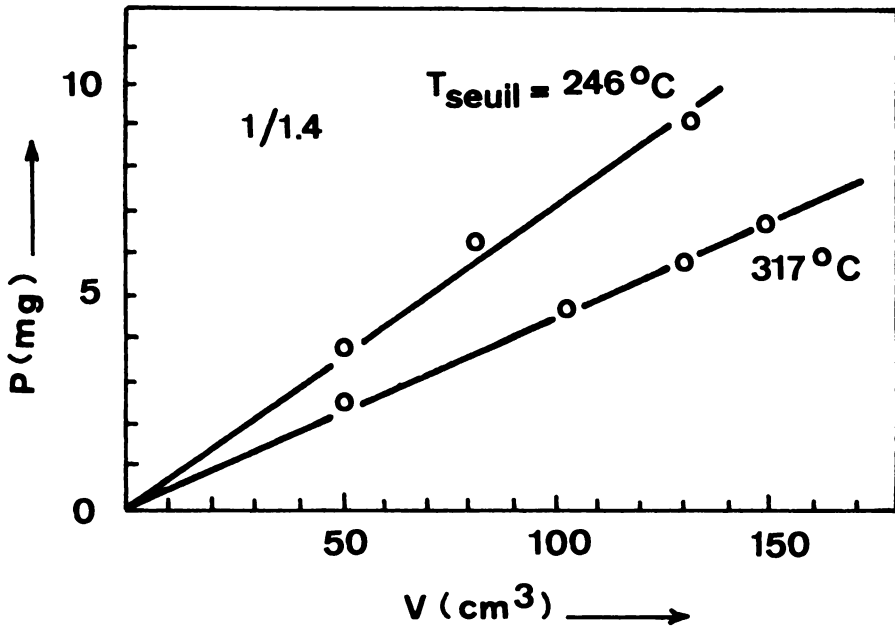


FIGURE 1. Poids de  $\text{CdS}$  condensé en fonction du volume de liquide vaporisé, pour  $\text{Cd}^{++}/\text{S}^{-} = 1/1.4$ .

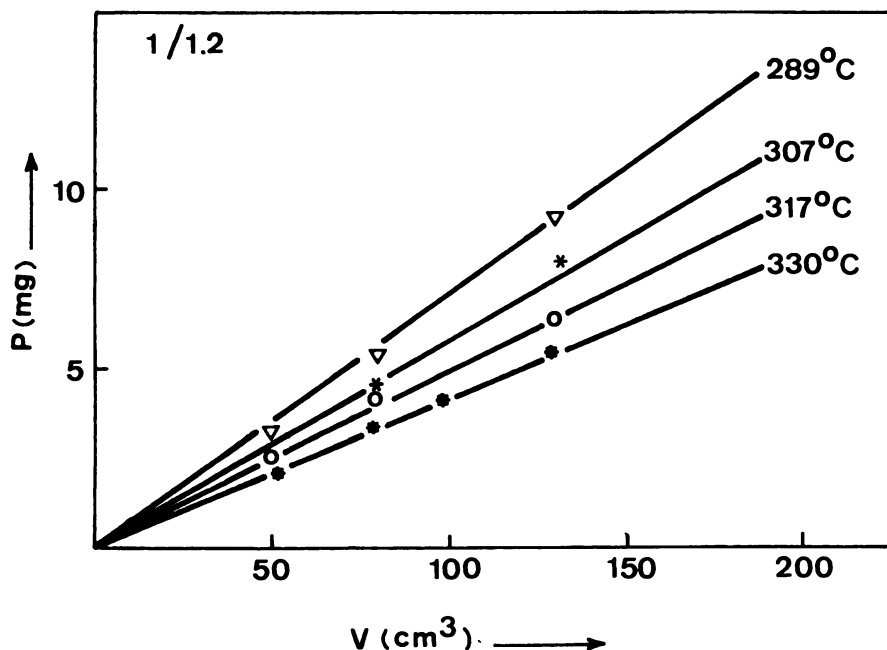


FIGURE 2. Poids de CdS condensé en fonction du volume de liquide vaporisé, pour  $\text{Cd}^{++}/\text{S}^{--}=1/1.2$ .

rant la croissance du dépôt, nous avons tracé des abaques donnant la variation du poids de matière déposée en fonction du volume du liquide utilisé pour les différents rapports de concentration  $\text{Cd}^{++}/\text{S}^{--}$  suivants: 1/1, 1/1,2 et 1/1,4 et pour différentes températures du support comprises entre 251°C et 330°C (voir figures 1, 2 et 3).

Nous avons fait figurer sur chacun de ces diagrammes la courbe de température de seuil au dessous de laquelle toute la matière arrivant se condense sur le substrat. On peut voir sur les figures 1, 2 et 3 que le taux de condensation est d'autant moins important que la température du substrat augmente par rapport à celle correspondant au seuil.

#### PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES

La figure 4 montre la variation de la résistivité en fonction de l'épaisseur, pour une température de fabrication de CdS voisine de 317°C environ et pour des rapports de concentration  $\text{Cd}^{++}/\text{S}^{--}$

égaux à 1/1 et 1/1,2. Au commencement on note: pour les faibles épaisseurs une forte décroissance de  $\rho$  liée à l'amélioration de la cristallinité, ensuite un palier, puis une nouvelle diminution de la résistivité due sans doute à un effet thermique. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par WILSON et WOODS<sup>4</sup> sur des lames évaporées sous vide.

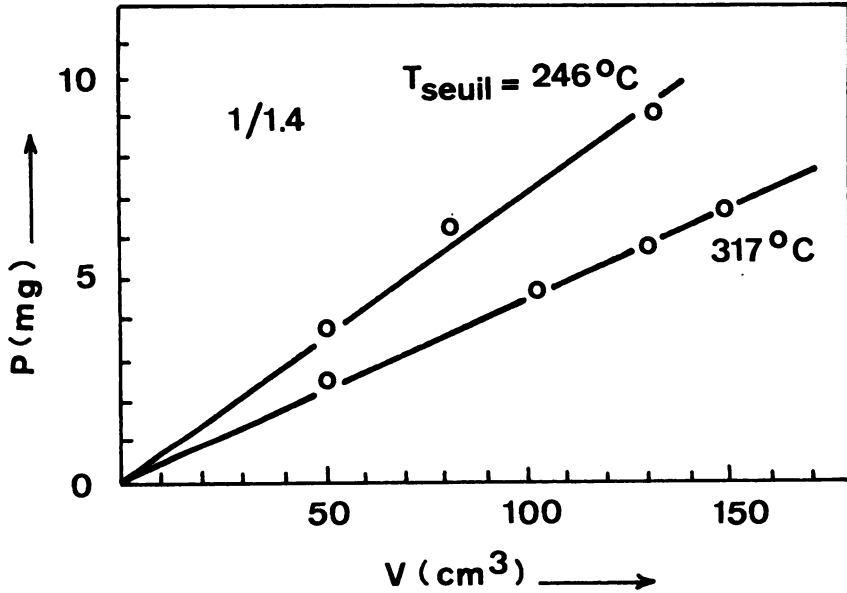


FIGURE 3. Poids de CdS condensé en fonction du volume de liquide vaporisé, pour  $\text{Cd}^{2+}/\text{S}^{2-} = 1/1.4$ .

L'influence des recuits sous atmosphère d'hydrogène ou d'air sur la résistivité  $\rho$ , la mobilité  $\mu$  et la densité des porteurs  $n$ , à la température ambiante, est montrée sur les figures 5, 6 et 7. Les courbes sont obtenues point par point; les traitements thermiques étant effectués par palier successif de 5 minutes dans le cas de l'hydrogène, et de 30 minutes dans le cas de l'air.

Il est évident que les recuits ont un double effet: l'augmentation de la densité des porteurs et l'augmentation de la mobilité. On note que l'on obtient des mobilités plus élevées sous  $\text{H}_2$ .

4. J. I. B. WILSON, J. WOODS, J. Phys. Chem. Solids, 34, 1973, pp. 171-181.



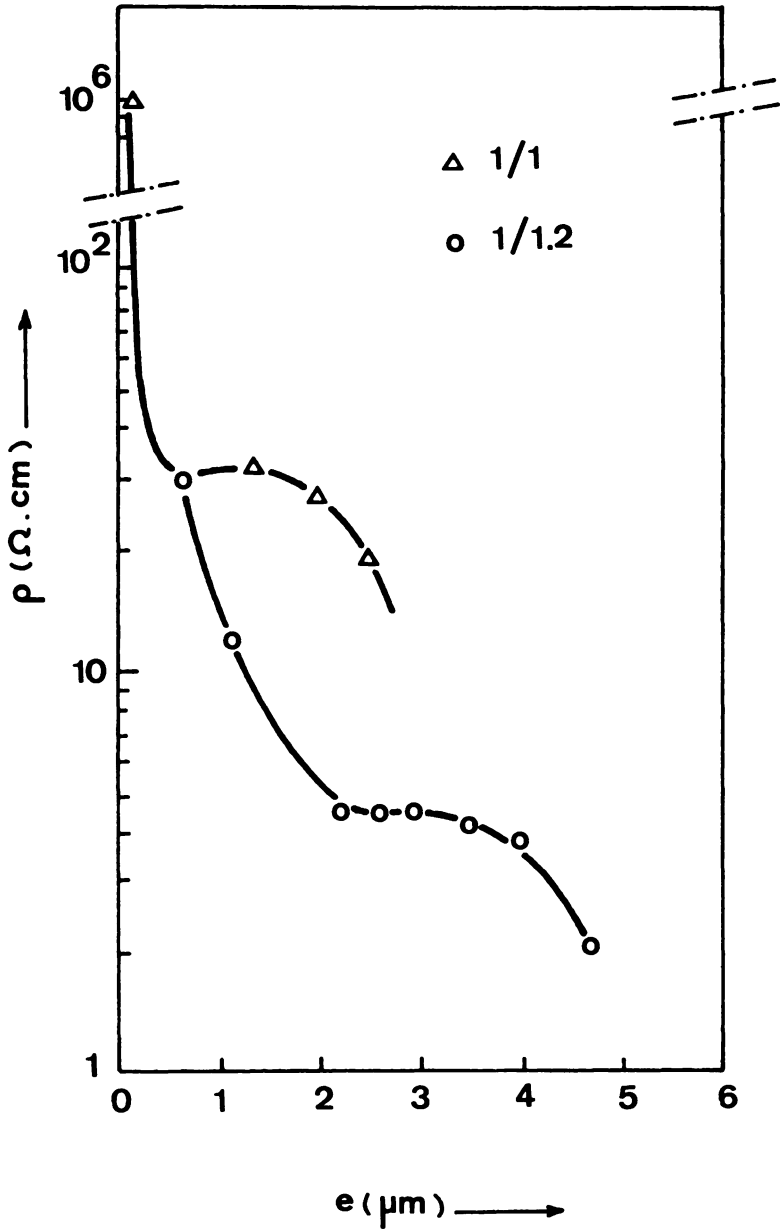


FIGURE 4. Variation de la résistivité en fonction de l'épaisseur du CdS déposé.

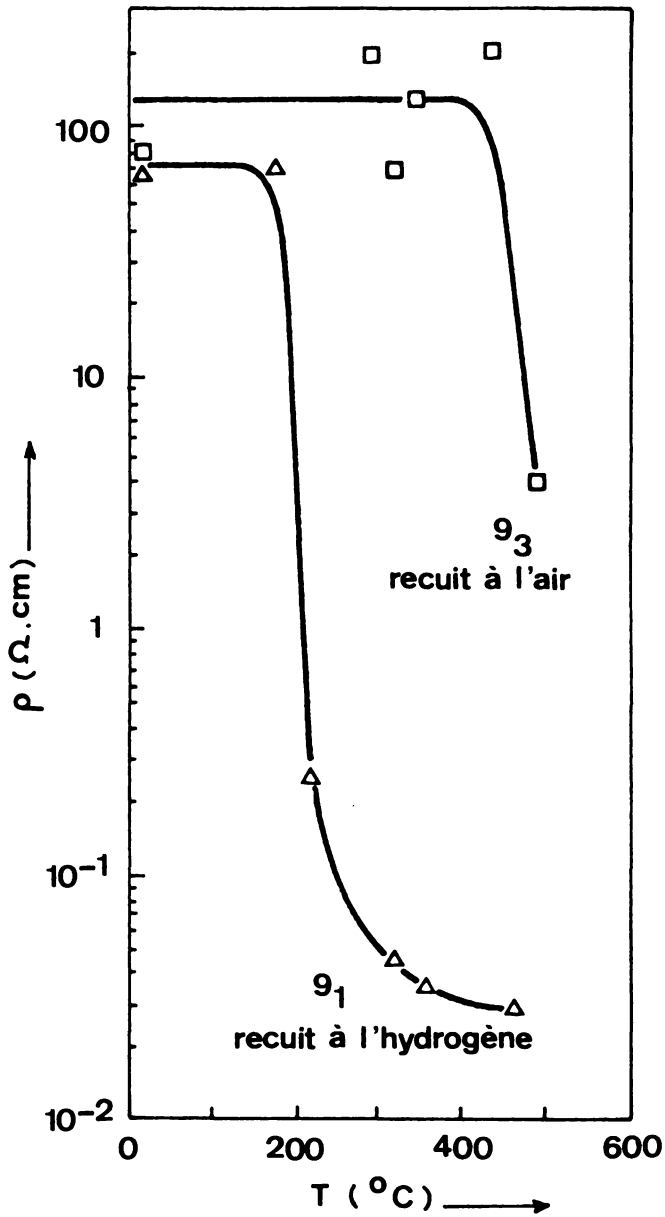


FIGURE 5. Variation de la résistivité ambiante en fonction de la température de recuit. Ces lames de la série n.° 9, d'épaisseur  $5 \mu\text{m}$  sont fabriquées avec un rapport  $\text{Cd}^{++}/\text{S}^{-} = 1/1$  à la température de  $317^{\circ}\text{C}$ .

$$\mu_{\text{H}_2} \sim 50 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$T_{\text{recuit}} = 460^\circ\text{C}$$

$$\mu_{\text{air}} \sim 10 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

Dans l'air des températures de recuit supérieures à  $500^\circ\text{C}$  environ se traduisent par la destruction de la couche de CdS.

On observe aussi que la densité des porteurs  $n$  augmente beaucoup plus sous l'action de l'hydrogène

$$n_{\text{H}_2}/\text{cm}^3 \sim 4 \cdot 10^{18}$$

$$T_{\text{recuit}} = 460^\circ\text{C}$$

$$n_{\text{air}}/\text{cm}^3 \sim 2 \cdot 10^{17}$$

## ÉTUDE AUX RAYONS X

Généralement, le recuit à l'air présente un affinement des pics de rayons X, ce qui prouve une amélioration de la taille des grains de la couche (voir par exemple figures 8a et 8b). Cependant, on note une modification de l'orientation des grains après le recuit à l'air, le pic (10.1) devenant prépondérant (figure 8), dans le cas de lame de CdS fabriquée avec une concentration  $\text{Cd}^{++}/\text{S}^{--}$  égale à 1/1,2. Ce changement n'est pas observé dans le cas de recuit en atmosphère inerte.<sup>5</sup>

## CONCLUSION

Nous avons étudié l'influence de différents paramètres de fabrication (température du substrat, rapport des ions  $\text{Cd}^{++}/\text{S}^{--}$ ) sur la croissance de couches de CdS. L'étude comparative des recuits sous  $\text{H}_2$  et air a été entreprise afin d'obtenir un CdS présentant des propriétés électriques compatibles à la réalisation ultérieure des cellules solaires.

Les premiers résultats montrent que, dans tous les cas, l'hydrogène a une action plus efficace que l'air. Ceci se traduit par une variation plus grande de la résistivité, de la mobilité et de la densité des porteurs.

5. R. R. CHAMBERLIN and J. S. SCHARMAN, J. of the Electrochemical Soc., 113, n.º 1, 1966. pp. 86-89.

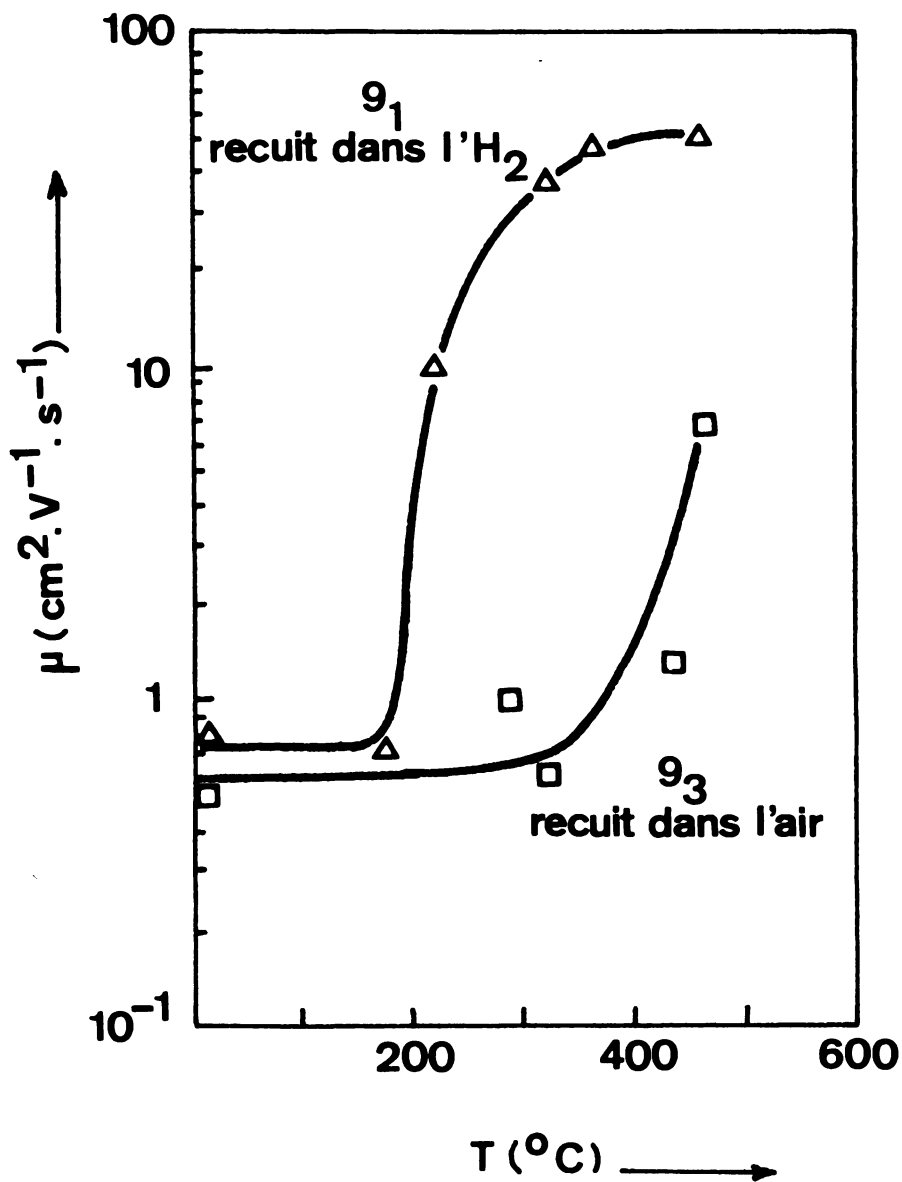


FIGURE 6. Variation de la mobilité en fonction de la température de recuit pour les lames de CdS de la série n.° 9.

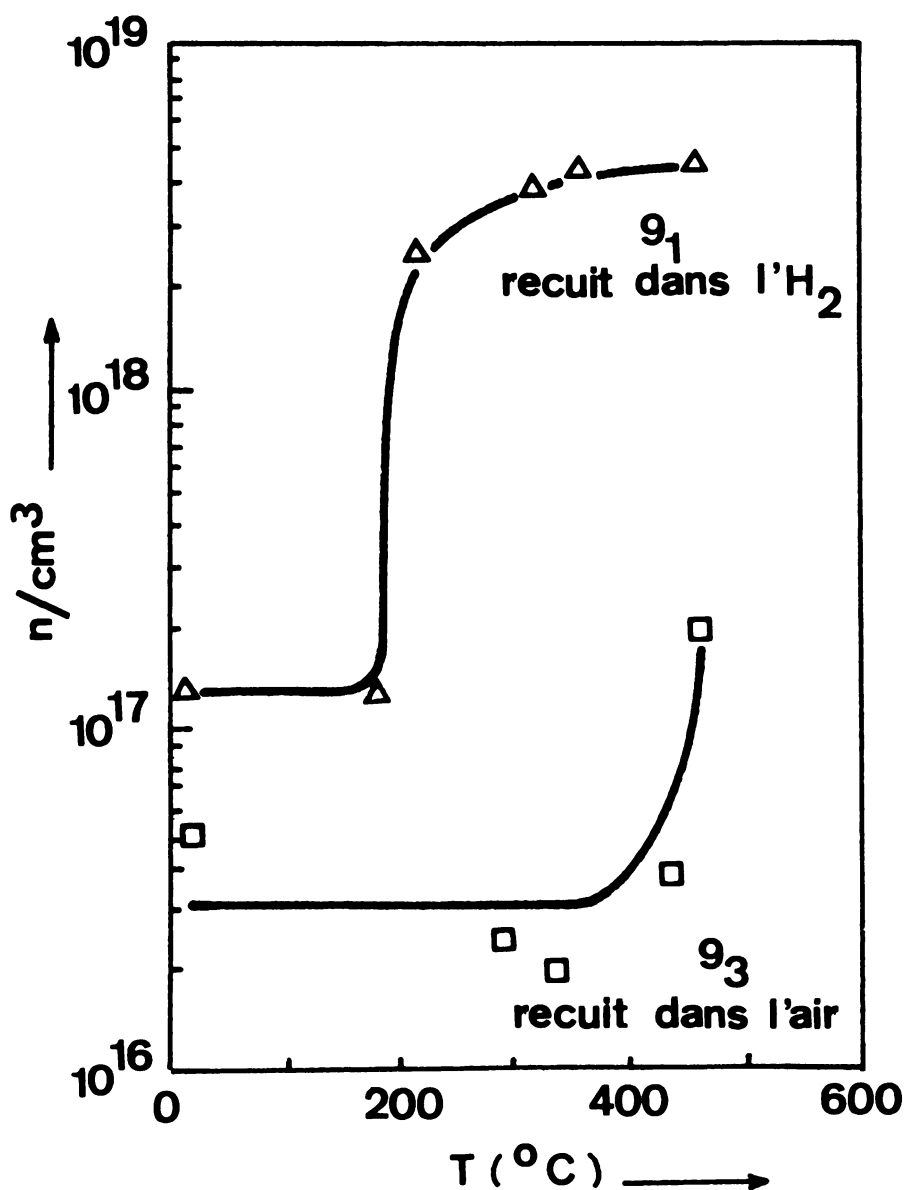


FIGURE 7. Variation de la densité de porteurs en fonction de la température de recuit pour les lames de CdS de la série n.° 9.

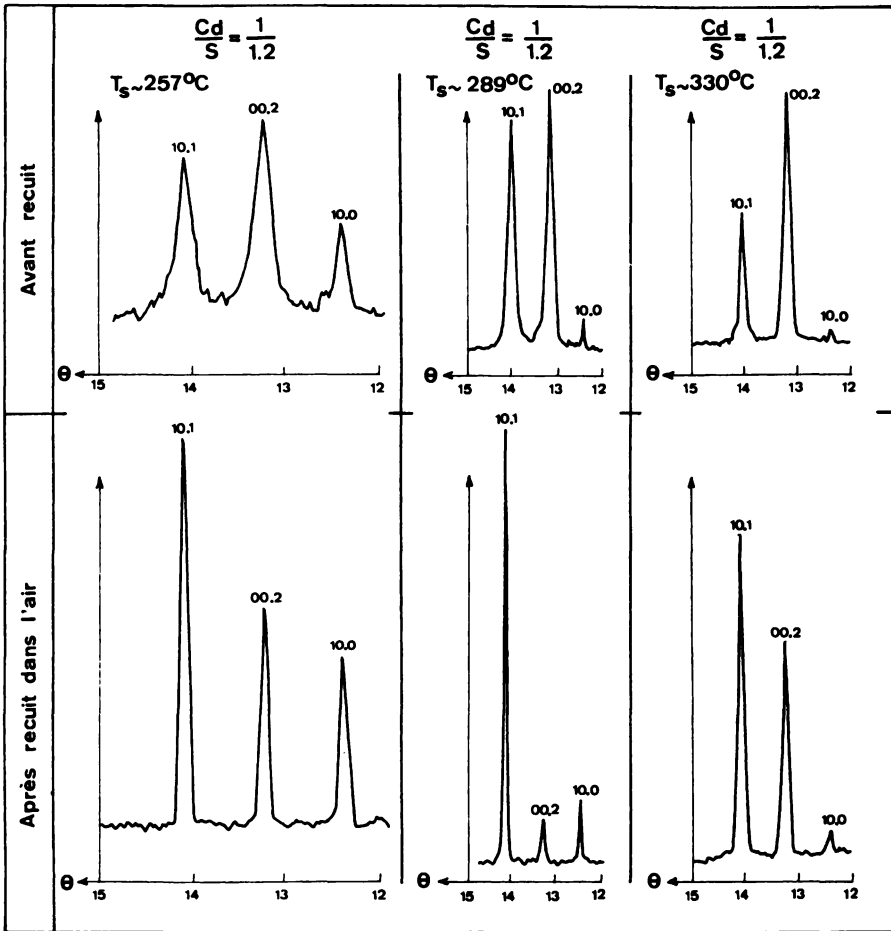


FIGURE 8. Spectres de rayons X montrant l'amélioration de la cristallinité de lames de CdS par des recuits à l'air ( $T_{\text{recuit}} \sim 500^\circ\text{C}$  pendant 1/2 heure).

**DISPOSITIVO FOTOVOLTAICO DE EFECTO BECQUEREL  
(INTERFASE Si-ELECTROLITO ACUOSO)**

por

**F. GRAÑA y C. SÁNCHEZ**

**FEMSA, D.E.P., Investigación, Madrid**

## RESUMEN

Se presenta un análisis experimental detallado de la interfase Si monocristal-electrolito acuoso en oscuridad e iluminado por una de las caras del semiconductor. Se estudian variables como la longitud de onda e intensidad de la luz, concentración y pH del electrolito, superficie iluminada del semiconductor, etc. Se concluye que los rendimientos del dispositivo fotovoltaico deben ser mejorados incrementando la fotocorriente.

## RESUM

Hom presenta una anàlisi experimental detallada de la interfase Si monocristall-electròlit aquós en obscuritat i il·luminat per una de les cares del semiconductor. Hom estudia variables com és ara la longitud d'ona i la intensitat de la llum, la concentració i el pH de l'electròlit, la superfície il·luminada del semiconductor, etc. La conclusió és que els rendiments del dispositiu fotovoltaic han d'ésser millorats incrementant el fotocorrent.

## SUMMARY

A detailed experimental analysis of the interface. Si monocrystal aqueous electrolyte in darkness and illuminated from one of the sides of the semiconductor is presented. Such variables as wave length and intensity of light, concentration and pH of the electrolyte, surface of the semiconductor etc., are studied. It is concluded that photovoltaic device efficiencies must be improved through photocurrent increase.



## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los más importantes desafíos que se plantean hoy día para la explotación de la energía solar es la elaboración de sistemas de conversión mixtos, es decir, sistemas que generan simultáneamente energía eléctrica y térmica, utilizando para ambos fines la misma superficie. De lo contrario en ciertas aplicaciones, tales como en viviendas, se requiere la utilización de una determinada superficie para generar electricidad y otra distinta para utilización térmica de la energía solar. Sistemas mixtos como los que acabamos de mencionar se pueden obtener combinando células solares de Si monocristal con concentradores de radiación (lentes de Fresnel o espejos de Winston) y un sistema de refrigeración por agua para evitar el calentamiento de las células y aprovechar la energía térmica que, de otra forma, debe ser disipada.

Por otra parte, las células solares de silicio sólo convierten una fracción de la energía contenida en el espectro solar (aproximadamente un 50 % para  $\lambda < 1.1 \mu\text{m}$ ) y el resto debe ser disipado en forma térmica, lo que normalmente constituye pérdida cuando se está hablando de conversión fotovoltaica. Un sistema mixto muy conveniente sería aquel que aprovecharse todo el espectro solar, una fracción para conversión en electricidad y otra en energía térmica. Evidentemente, un sistema tal como una central heliostática cumple este requisito, pero tienen el inconveniente de que a la hora de generar electricidad se han de hacer varias transformaciones (energía térmica a mecánica y a eléctrica), lo que sucesivamente reduce los rendimientos.

La ventaja de un sistema mixto sobre una central heliostática es más patente en sistemas de baja potencia, donde una central térmica solar es difícilmente justificable.

El efecto Becquerel, conocido también como efecto fotoelectroquímico, fue el primero de los efectos fotovoltaicos descubiertos (1839).<sup>1</sup> Este efecto consiste en el cambio de potencial de un electrodo semiconductor (en circuito abierto) o en la corriente que fluye (en cortocircuito) cuando se ilumina la interfase de separa-

ción de un semiconductor y un electrolito líquido. El efecto existe y presenta características propias si el electrodo es metálico y no semiconductor. Pero, para efectos de conversión de energía solar, la utilización de semiconductores como electrodos es sumamente ventajosa. Por lo tanto, en lo que sigue consideraremos efecto Becquerel en semiconductores exclusivamente.

## 2. FUNDAMENTO

La definición que antes hemos citado incluye, en general, los llamados efectos fotovoltaicos y los fotogalvánicos. Sin embargo, aunque ambos son fenómenos fotoquímicos, se diferencian notablemente en cuanto que operan según mecanismos totalmente diferentes. El efecto fotovoltaico opera a través de la excitación directa de un electrón por fotón para producir electricidad (en el caso que nos ocupa esto ocurre en el semiconductor); el efecto fotogalvánico opera a través de la excitación de una molécula por un fotón que induce reacciones químicas para dar productos energéticamente más altos.<sup>2</sup> En el primero, la carga se propaga a través de procesos electroquímicos que tienen lugar, principalmente, en la interfase; en el segundo, los productos altamente energéticos pierden su energía a través de reacciones químicas o procesos endergónicos.

Una revisión bibliográfica del efecto fotovoltaico en semiconductores compuestos fue publicada por WILLIAMS en 1960.<sup>3</sup> Desde entonces se han hecho varias patentes de células solares que utilizan este efecto.<sup>4,5</sup> Por otro lado, el trabajo que se ha hecho sobre interfases semiconductor-electrolito líquido es abundante y recientemente se han publicado algunas revisiones sobre el tema.<sup>6-11</sup> Sin embargo, en estos trabajos se ha dedicado muy poca atención a la posible utilización de estos procesos para la conversión directa de energía solar en eléctrica.

1. E. BEQUEREL, *Compt. Rend.*, 9, 561, 1839.
2. W. D. K. CLARK y J. A. ECKERT, *Solar Energy*, 17, 147, 1975.
3. R. WILLIAMS, *J. Chem. Phys.*, 32, 1505, 1960.
4. N. N. WINOGRADOFF y H. K. KESSLER, U. S. Patent 3.271,198, 1966.
5. *Ind. Res.*, 5, 34, 1976.
6. H. GERISCHER, *Surf. Sci.*, 13, 265, 1965.
7. H. GERISCHER, *Surf. Sci.*, 18, 97, 1969.
8. H. GERISCHER, *Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering*, Edit. por P. Delahay, Interscience, N. Y. 1961, pp. 139-232.
9. H. GERISCHER, *Physical Chemistry, an Advanced Treatise*, IX-A, Edit. por Eyrings, Handerson and Jost, Academic Press, N. Y., 1970, pp. 463-542.
10. V. A. MYAMLIN y Y. V. PLESKOV, *Electrochemistry of Semiconductors*, Plenum Press., N. Y., 1967.
11. P. J. HOLMES, *The Electrochemistry of Semiconductors Academic Press*, N. Y., 1962.

### 3. EXPERIMENTAL

La situación experimental que vamos a discutir queda esquematizada en la figura 1, parte superior. Los pares electrón-hueco generados por fotones son separados por el campo eléctrico existente en la zona de carga espacial, dando origen a un fotovoltaje superficial. La situación física, principalmente estructura de bandas del sistema, está representada en la parte inferior de la figura. En ella se indican los dos tipos de procesos más importantes que pueden tener lugar en la interfase semiconductor-electrolito. Eg es la anchura de banda prohibida en el semiconductor y  $V_{sc}$  el doblamiento de bandas o máximo fotopotencial. Es posible identificar los principales «hechos» a tener en cuenta para desarrollar una célula solar tecnológicamente útil. Estas características afectan principalmente a la eficiencia de la célula y a su estabilidad.<sup>12</sup> Brevemente, estos hechos son:

- a) Para tener una alta eficiencia cuántica en la producción de una elevada corriente de cortocircuito es necesario que la luz incidente sea fuertemente absorbida en la zona de carga espacial superficial, es decir:

$$\alpha \gtrsim \frac{1}{W} \text{cm}^{-1}$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción de la luz del semiconductor y  $W$  es la anchura de la zona de carga espacial. Esta anchura está determinada, esencialmente, por el semiconductor y por el contacto semiconductor-electrolito líquido. Bajo el punto de vista del semiconductor se requiere un dopaje ligero,  $n \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , y un semiconductor de «gap» directo. En cuanto al contacto semiconductor-electrolito líquido se requiere la mayor facilidad para el intercambio de carga, es decir un proceso de contacto ocurriendo en la oscuridad.

b) El doblamiento de las bandas en la superficie del semiconductor debe ser máximo, puesto que este parámetro representa el máximo valor que se puede obtener en la tensión de circuito abierto bajo iluminación de alta intensidad. Este doblamiento de bandas está determinado por la pareja semiconductor-electrolito, y es un fenómeno de oscuridad.

c) La anchura de la banda prohibida del semiconductor se

debe elegir de forma que se aproveche el máximo del espectro solar. El doblamiento de las bandas es menor que la anchura de la banda prohibida, mientras que el flujo de fotones que se puede absorber es una función monótona decreciente de la anchura de la banda prohibida. Por combinación de ambas consideraciones se deduce un valor teórico óptimo de la anchura de banda prohibida entre 1.0 y 1.8 eV.

*d)* La reacción electroquímica que tiene lugar a través de la interfase semiconductor-electrolito líquido, y que realiza la transmisión de carga eléctrica, no debe ser destructiva de la superficie del semiconductor ni suponer consumo del electrolito líquido. Al mismo tiempo, esa reacción no debe imponer un límite al ritmo de transferencia de carga a niveles de irradiación normales.

*e)* Los sobrepotenciales o sobretensiones de los electrodos deben minimizarse.

*f)* La resistencia del electrodo y del electrolito deben minimizarse. Es el mismo problema que se presenta al poner los contactos a las células solares de Si, cuya resistencia debe reducirse para tener la mínima pérdida de potencial.

Antes de entrar en la exposición concreta de algunos hechos físicos merece la pena hacer unos comentarios sobre la economía del dispositivo y su construcción. El mecanismo físico-químico de este tipo de células solares no requiere el uso de un material monocristalino como en las células solares de Si (para obtener longitudes de difusión de los portadores minoritarios que sean largas). Tampoco se exige la preparación de una unión p-n, evitándose el proceso y la tecnología involucrada. Entonces, básicamente, las exigencias del material son: un espesor del orden de unas pocas veces el inverso del coeficiente de absorción y una concentración de portadores razonablemente baja ( $n \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ). Por tanto son utilizables películas evaporadas en vacío, creadas anódicamente, etcétera.

Por otra parte, un electrolito acuoso parece lo más deseable por la abundancia del  $\text{H}_2\text{O}$ . Sin embargo, solventes orgánicos, como metanol, etanol, etc... son abundantes y baratos. La elección del electrolito estará determinada esencialmente por el punto d, antes citado, y el semiconductor que se use.

Como hemos visto, las condiciones anteriores, principalmente la a y la b, dependen en gran parte de las propiedades de la estructura S-E.L. y, por lo tanto, de su comportamiento en oscuridad.



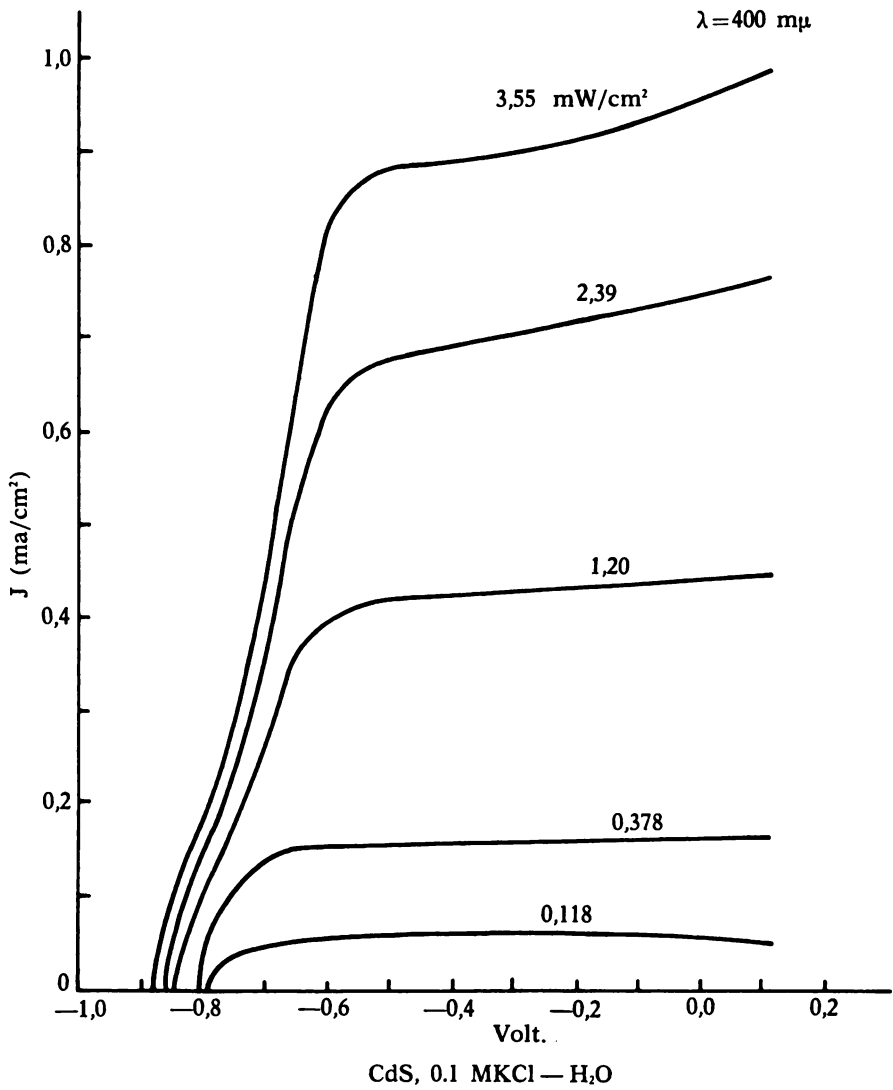
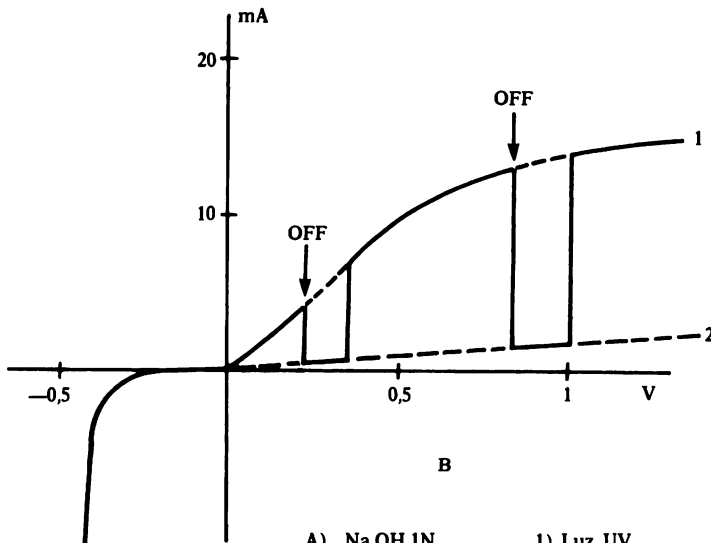
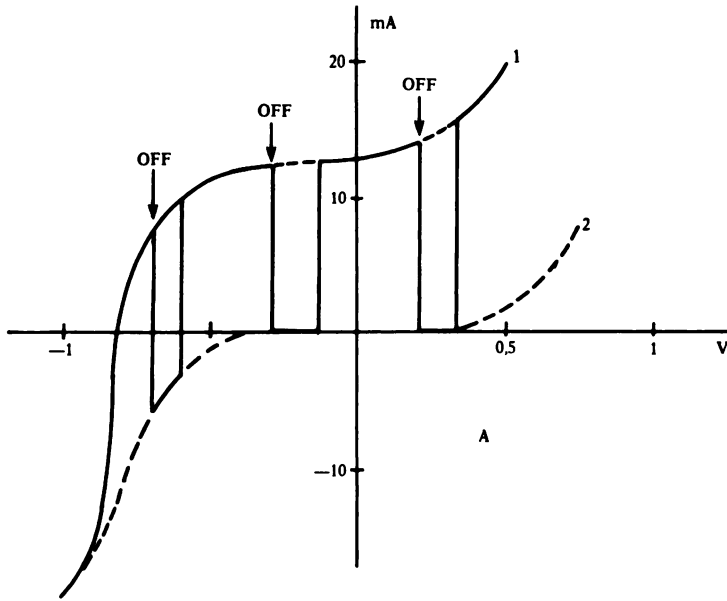


FIGURA 2



A) Na OH 1N                      1) Luz UV  
 B) H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> 1N                  2) Oscur.

Efecto Becquerel TiO<sub>2</sub>

FIGURA 3

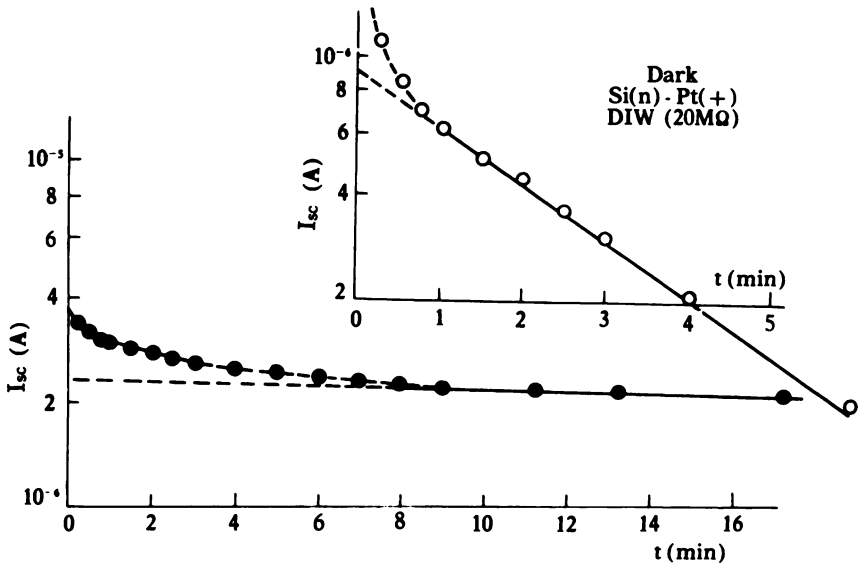
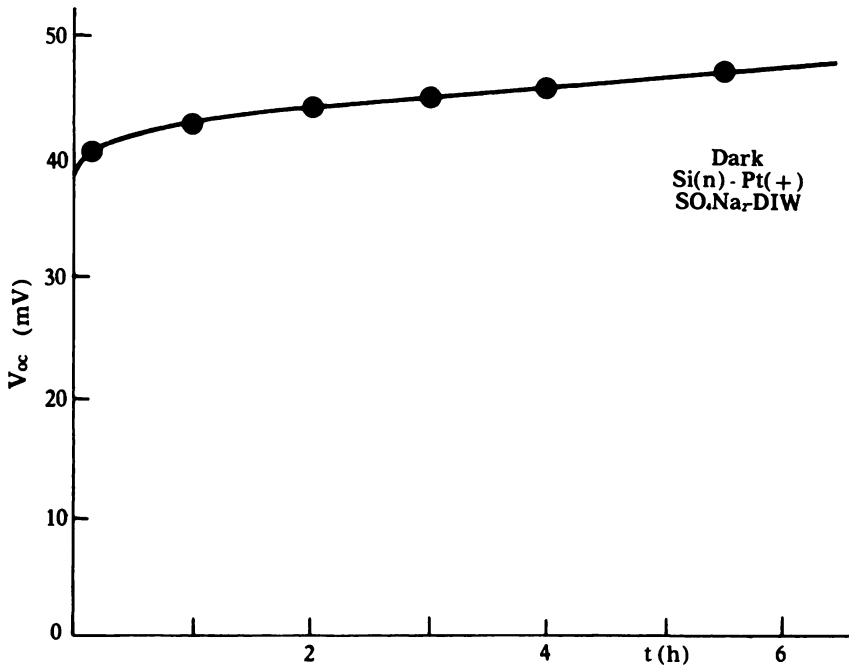


FIGURA 4



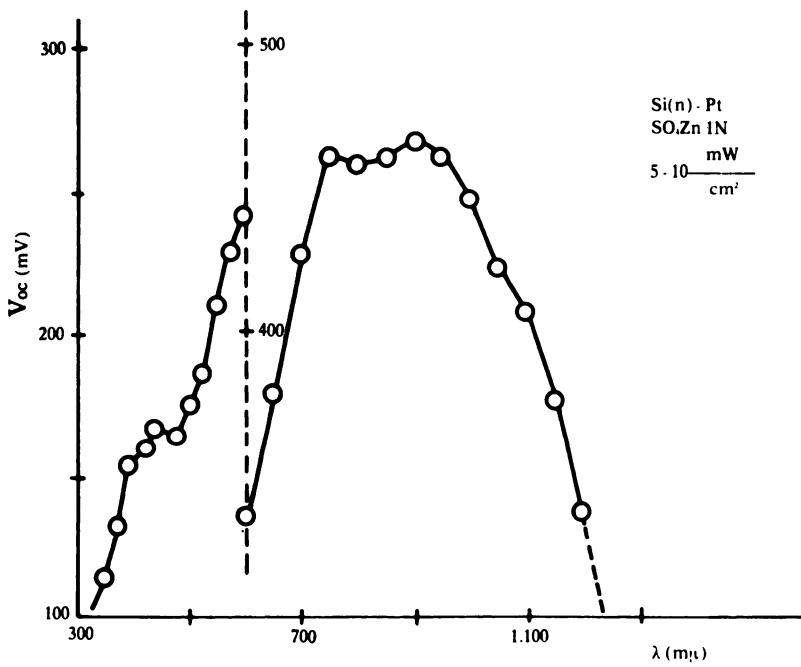
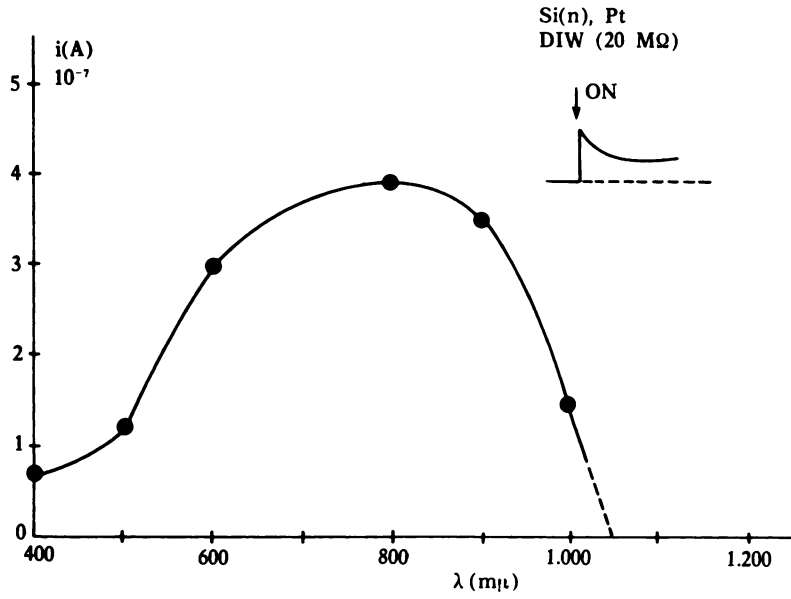


FIGURA 5

#### 4. RESULTADOS

En relación con la instalación experimental que se muestra en la figura 1 se ha utilizado el siguiente equipo: Como fuentes de luz, monocromadores Bausch and Lomb y Spex de distinta intensidad y resolución. Filtros de corte y neutros, de Corning y Corion, respectivamente. En algunos experimentos se ha usado un láser de He-Ne de baja potencia. Se midieron las corrientes eléctricas con un picoamperímetro Keithley mod. 414.S y las tensiones con un osciloscopio Tektronik aumentando adecuadamente la impedancia de entrada con una sonda  $\times 10^3$ .

Se han utilizado obleas de Si tipo «n» y «p» procedentes de Wacker y Topsil.

El efecto fotovoltaico en células Becquerel obtenido con diferentes semiconductores se ilustra en las figuras 2 y 3, según resultados de ANDERSON y CHAL,<sup>12</sup> y CLECHET y ot.<sup>13</sup> La figura 2 muestra la influencia de la intensidad de la luz sobre la característica I-V en una célula de CdS y electrolito acuoso de KCl. La iluminación se realiza con luz monocromática  $\lambda=400$  m $\mu$ . Los resultados son muy prometedores, aunque la utilización de semiconductores compuestos presenta el inconveniente de su descomposición y, por tanto, su agotamiento. Se ha observado que en una célula con CdS, la superficie del semiconductor se cubre de S, en tanto que en el electrolito aparecen concentraciones crecientes de Cd.

En la figura 3 se muestran resultados obtenidos con semiconductores más estables, tales como TiO<sub>2</sub>. La influencia de luz UV sobre la característica I-V cuando el TiO<sub>2</sub> está sumergido en medio alcalino (parte superior figura) o en medio ácido (parte inferior), es sumamente repetitiva. Los valores de tensión en circuito abierto son generalmente altos. Los valores de la corriente en cortocircuito son menores que los correspondientes a células de Si monocristal.

La misma conclusión se obtiene con nuestros resultados en Si. El problema más importante a resolver es la mejora de la corriente en cortocircuito. Para ello se presenta como necesario un mejor conocimiento básico del sistema.

El sistema electrolítico presenta un comportamiento complejo en oscuridad, que no ha sido estudiado con detalle y para el cual no se posee una explicación completa. Aunque no nos vamos a detener en este punto, queremos mostrar algunos resultados. En

12. W. W. ANDERSON, y Y. G. CHAI, *Energy Conversion*, 15, 85, 1976.

13. P. CLECHET, F. JUILLET, J. R. MARTIN y R. OLIVER, *Proceedings of the International Conference on Solar Electricity*, Toulouse, march, 1976, p. 445.

Anchura zona carga espacial, de penetración fotón,  $x$

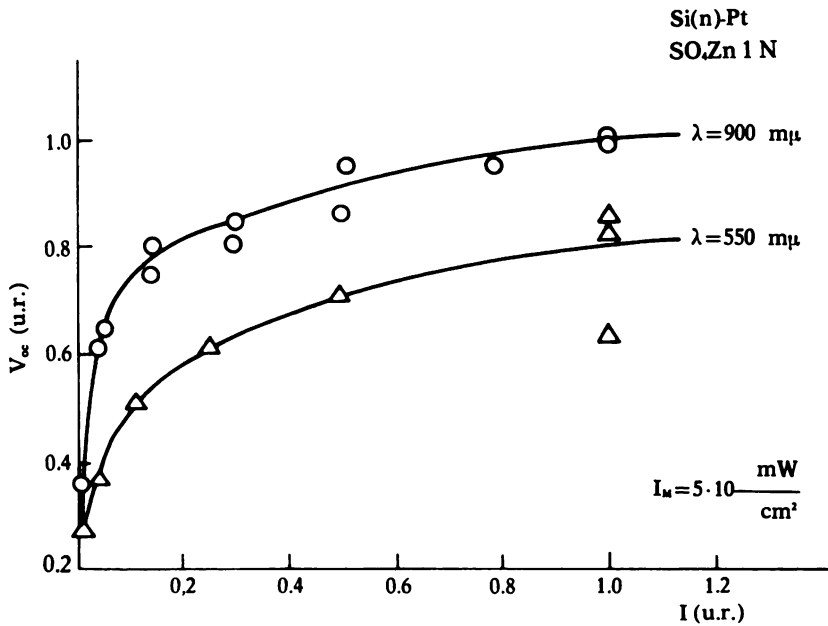
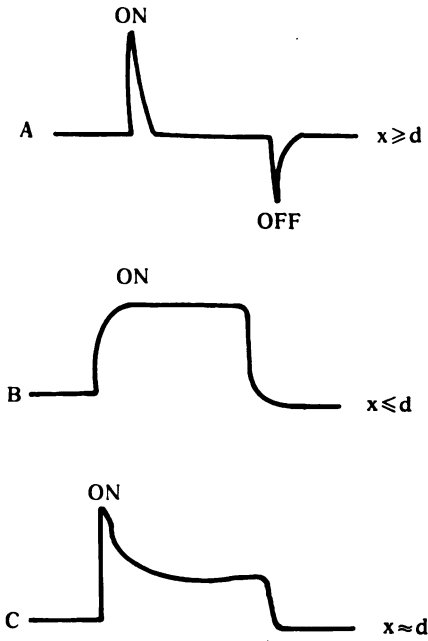


FIGURA 6

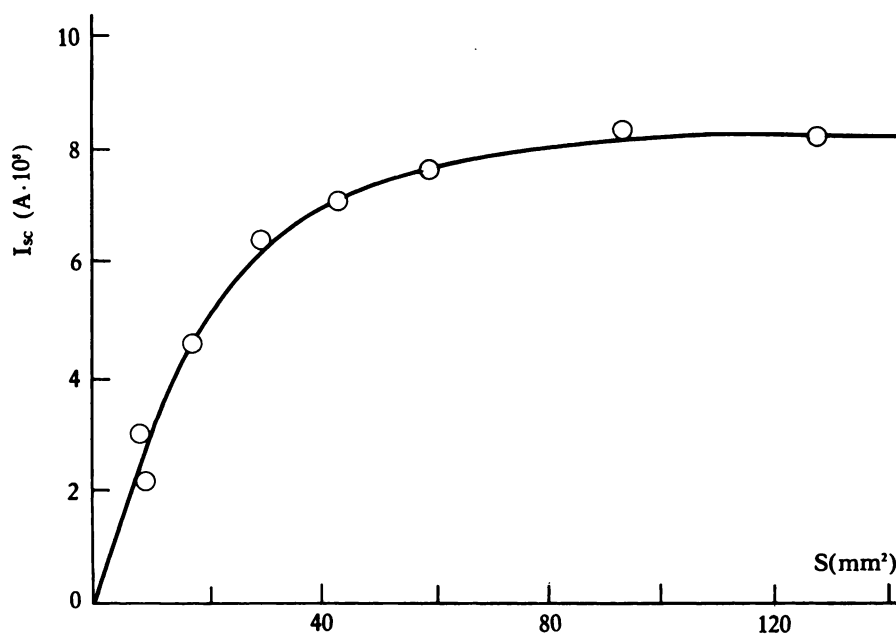
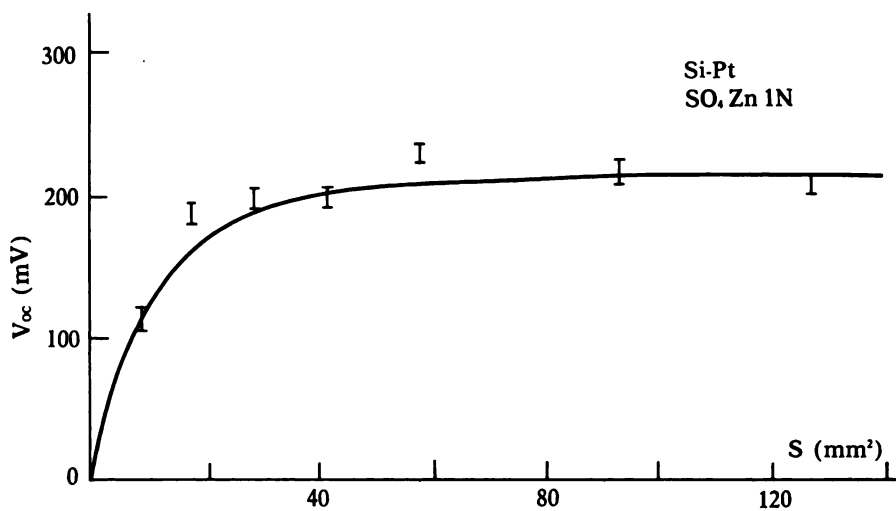


FIGURA 7

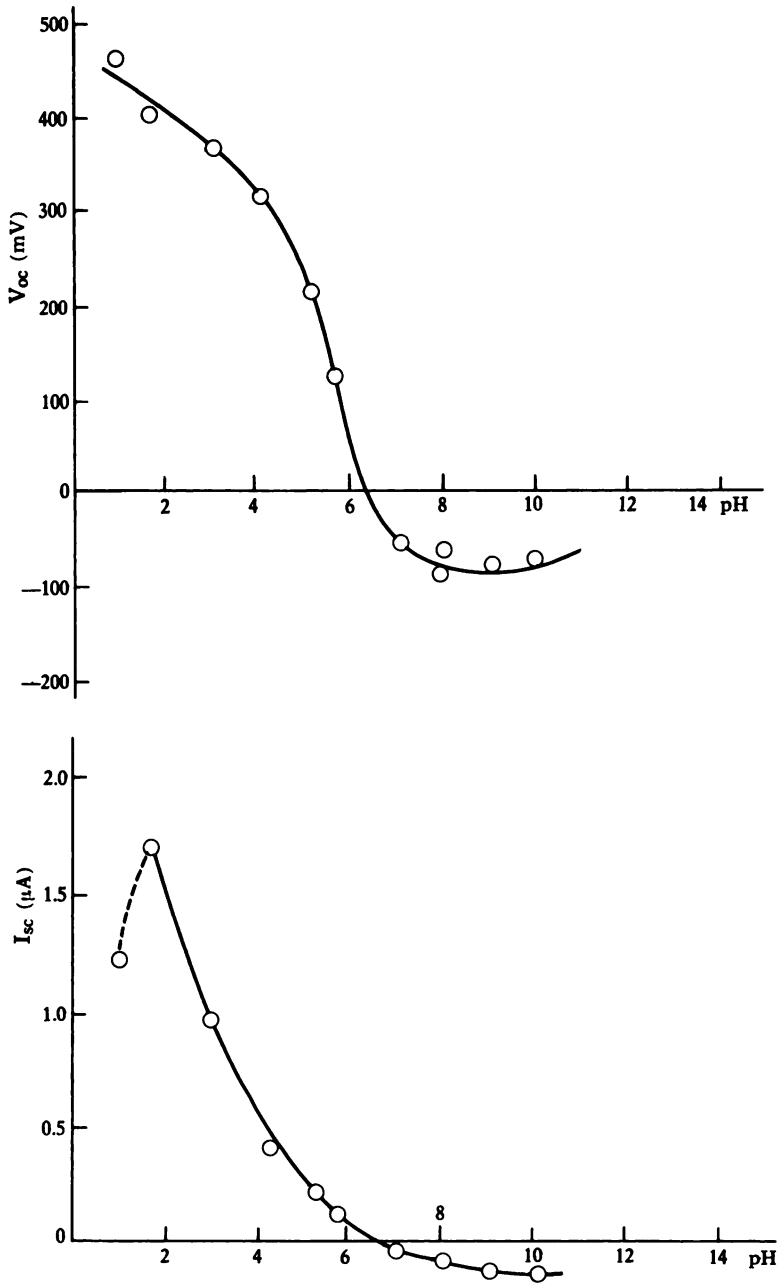


FIGURA 8

la figura 4 se ha representado la tensión en circuito abierto y la corriente en cortocircuito en oscuridad. Como se puede ver por el análisis exponencial de la figura, el intercambio de carga se realiza a través de más de un proceso.

En la figura 5 se ha representado la respuesta espectral en corriente y tensión de la célula Becquerel con Si y agua desionizada (DIW) o  $\text{SO}_4\text{Zn}$ . El máximo para ambos parámetros se obtiene en longitudes de onda próximas a 900 m $\mu$ . Las curvas no están normalizadas ni corregidas por la emisión espectral de las lámparas del monocromador. Las intensidades luminosas en estos experimentos son bajas, unas 10-20 veces menor que en condiciones AM1. Aún así, se puede observar como las fotocorrientes son sumamente bajas.

La tensión en circuito abierto,  $V_{oc}$ , varía muy poco con la intensidad de la luz, tal como se muestra en la figura 6.

Este resultado es acorde con los que se obtienen en otros sistemas fotovoltaicos. Tal como se indica en la parte superior de la figura 6, la respuesta del sistema varía en forma con el tiempo según la penetración del fotón (longitud de onda de la radiación); aunque esta interpretación es puramente cualitativa.

Junto a los parámetros puramente físicos, tales como los anteriores, se han estudiado otros de índole geométrica y de diseño. En la figura 7 se muestra la dependencia de la tensión en circuito abierto y corriente en cortocircuito con la superficie iluminada de Si. No disponemos de una explicación sencilla de este resultado, que de alguna forma significa la existencia de procesos de saturación.

Finalmente queremos comentar nuestros resultados en relación a las características del electrolito utilizado. El parámetro más significativo es el pH de la solución. Su influencia sobre los valores de  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$  se muestra en la figura 8. Como se puede ver, es conveniente utilizar soluciones ligeramente ácidas, siempre que no ataquen al electrodo semiconductor.

En conclusión podemos decir que hay dos problemas técnicos importantes que se deben resolver: la estabilidad química del sistema y la mejora de las fotocorrientes. Se deben estudiar con más detalle problemas de geometría y diseño.

**DURÉE DE VIE ET MOBILITÉ DES PORTEURS DANS  
LE SILICIUM POLYCRISTALLIN DESTINÉ AUX  
PHOTOPILES SOLAIRES \***

par

**D. BIELLE-DASPET et G. GASSET**

**Centre d'Étude Spatiale des Rayonnements.  
Toulouse, France**

\* Travail effectué dans le cadre de l'ATP-CNRS «Conversion photovoltaïque». Échantillons réalisés par le Laboratoire d'Electronique et de Physique Appliquée-94450 Limeil Brevannes.

## RESUME

Les méthodes de photoconductivité transitoire et du photocourant transitoire de diffusion sont exploitées en fonction du niveau  $\Delta$  de porteurs photoexcités, de  $\Delta = 10^{13}$  à  $\Delta = 10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$ , pour étudier la durée de vie et la mobilité des électrons et des trous dans du ruban de silicium polycristallin de type P, 50  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, et à grains de  $100 \times 200$   $\mu\text{m}^2$ . L'amplitude et la décroissance des photoréponses mesurées indiquent

(i) des durées de vie qui peuvent être supérieures à plusieurs microsecondes, et que

(ii) joints et défauts de structure agissent simultanément sur les trous majoritaires (effets de barrière de potentiel) et les électrons minoritaires (effets de piégeage et/ou de court-circuit).

## RESUM

Hom es val dels mètodes de fotoconductivitat transitoria i del fotocorrent transitori de difusió en funció del nivell  $\Delta$  de portadors fotoexcitats, de  $\Delta = 10^{13}$  a  $\Delta = 10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$ , per tal d'estudiar la durada de vida i la mobilitat dels electrons i dels forats en una cinta de silici policristallí de tipus P, de 50  $\mu\text{m}$  de gruix, i amb grans de  $100 \times 200$   $\mu\text{m}^2$ . L'amplitud i el decreixement de les fotorespostes mesurades indiquen

(i) durades de vida que poden ésser superiors a uns quants microsegons, i que

(ii) unions i defectes d'estructura actuen simultàniament sobre els forats majoritaris (efectes de barrera de potencial) i els electrons minoritaris (efectes de recombinació i/o de curt circuit).

## SUMMARY

The transient photo-conductivity and transient diffusion photocurrent methods are utilized on function of level  $\Delta$  of photo-excited carriers, from  $\Delta = 10^{13}$  to  $\Delta = 10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$ , in order to study life and mobility of electrons and foramen into a poly-crystal silicon tape, of the type P, of 50  $\mu\text{m}$  thickness, and grains of  $100 \times 200$   $\mu\text{m}^2$ . The amplitude and decrement of the mesured photo-responses it indicate:

(i) Lifetime of carriers can be greater than few microseconds.

(ii) Junction and tsructure defects act simultaneously on majority carriers (holes) by potential barrier effect and on the minority carriers (electrons) by recombination and/or short-circuit effects.



## I. INTRODUCTION

Le silicium polycristallin à gros grains est l'un des matériaux les plus prometteurs pour la réalisation des piles solaires terrestres du proche futur. Pour l'instant, le problème est l'élaboration de polycristaux de qualité acceptable. Ce problème pose une question fondamentale qui est l'influence des défauts étendus — joints de grains et défauts de structure — des polycristaux sur les propriétés électriques du silicium, et en particulier sur la longueur de diffusion des porteurs de charge.

C'est dans ce sens que les études que nous avons entreprises<sup>1</sup> ont pour objectif, d'une part, d'analyser les propriétés électroniques des joints de grains et défauts de structure et, d'autre part, de comprendre l'impact de ces « défauts » sur les propriétés de transport du matériau — c'est-à-dire mobilité et durée de vie des porteurs électrons et trous —.

Les résultats présentés dans ce papier concernent l'effet global d'un ensemble de défauts de structure et joints de grains sur la mobilité et la durée de vie des porteurs majoritaires et minoritaires. Ceci, dans le cas d'un silicium polycristallin de type P, résistivité moyenne  $1 \Omega \cdot \text{cm}$ , réalisé sur substrat de graphite et composé de grains de  $300 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  (figure 1).

Les résultats reposent sur l'analyse des photoréponses transitoires — réponses de photoconductivité<sup>2</sup> et de photocourant de diffusion<sup>3</sup> — observées lorsque l'échantillon est soumis à une excitation brève et homogène de porteurs (excitation par flash 6 à 30 ns de laser 100 MWatt à verre dopé au néodyme;<sup>2</sup> études à  $300^\circ \text{K}$ ).

L'analyse effectuée porte (i) sur l'amplitude et la cinétique de décroissance des photoréponses, étudiées en fonction du nombre  $\Delta$  de paires électron-trou créées en excès ( $\Delta \approx 10^{13}$  à  $10^{19} \text{cm}^{-3}$ ), et (ii) sur la comparaison entre les réponses observées, sous les

1. D. BIELLE-DASPET, G. GASSET, Inter. Conf. Rad. Effects in Semiconductors, Dubrovnick, Sep. 1976.

2. D. BIELLE-DASPET, *Solid. State El.*, 16, 1103, 1973.

mêmes conditions expérimentales, d'une part avec les échantillons polycristallins et des échantillons monocristallins (Si type P, dopant Bore,  $0.8 \Omega \cdot \text{cm}$ ), d'autre part avec des échantillons polycristallins séparés ou non du substrat de graphite et groupés de façon à ce que la plus grande dimension des grains se trouve parallèle, ou au contraire perpendiculaire, à l'axe de transport des porteurs de charge.

Dans ce qui suit, nous donnerons d'abord les aspects caractéristiques des méthodes d'études et conditions expérimentales utilisées, puis nous présenterons l'ensemble des résultats obtenus.

## II. MÉTHODES DE MESURE ET CONDITIONS EXPERIMENTALES

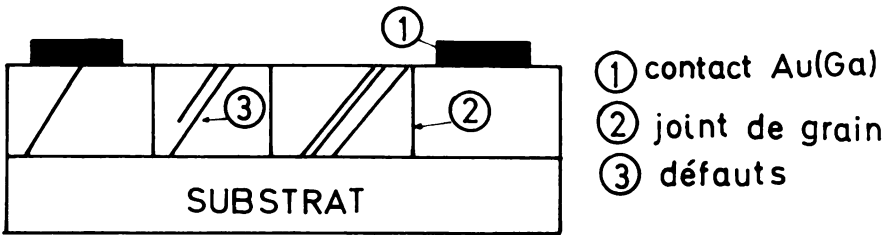
Les études effectuées reposent sur l'exploitation simultanée de deux méthodes de mesure —la méthode de photoconductivité transitoire et la méthode du photocourant transitoire de diffusion<sup>3</sup>— et sur l'analyse à la fois de l'amplitude et de la décroissance des photoréponses observées en fonction de la densité  $\Delta$  de paires électron-trou créées en excès ( $\Delta$  allant de  $10^{13}$  à  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) pendant la durée  $T=6$  ou  $30$  ns du flash lumineux.

Le principe de la photoconductivité transitoire est résumé dans la figure 2: le matériau, de conductivité à l'équilibre  $\sigma_0$ , est traversé par un courant constant  $I$ . Les  $\Delta n = \Delta p = \Delta$  électrons et trous créés en excès dans le volume  $xW$  par l'impulsion lumineuse, brève et pénétrante, disparaissent avec une même constante de temps  $\tau$  sous régime transitoire d'excitation. Par définition, même cette constante de temps  $\tau$  est la «durée de vie» des porteurs. Il en résulte donc une variation de conductivité  $\Delta\sigma$  dans la région éclairée qui entraîne une variation de tension  $\Delta V$  aux bornes de l'échantillon. La décroissance du signal  $\Delta V$  traduit par suite la durée de vie  $\tau$  des porteurs.

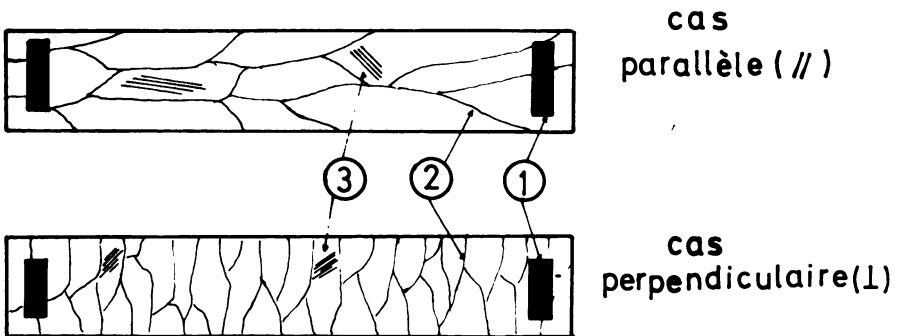
L'amplitude  $\Delta V_{\text{max}}$  du signal  $\Delta V$  est par contre étroitement liée à la mobilité des porteurs majoritaires  $\mu_p$ . L'étude de l'amplitude de  $\Delta V_{\text{max}}$  en fonction de  $\Delta$ , des faibles  $\Delta$  ( $\Delta_{\text{min}}$ ) aux fortes  $\Delta$  ( $\Delta_{\text{lim}}$ ), permet donc de voir s'il y a ou non variation de la mobilité  $\mu_p$  avec le niveau d'injection  $\Delta$  des porteurs. Il faut par ailleurs remarquer que la durée de vie  $\tau$  ci-dessus est la «durée de vie effective» des porteurs injectés. Elle dépend à la fois des possibilités de recombinaison dans le volume de l'échantillon  $\tau_v$  et des pertes aux surfaces  $\tau_{G\sigma}$ . La valeur de  $\tau_{G\sigma}$  dépend étroitement des vitesses de perte de porteurs «s» aux surfaces de l'échantillon.

3. D. BIELLE-DASPET, G. GASSET (à publier).

Si (II) $\sim 50 \mu\text{m}$
Si (I) qqs $\mu\text{m}$
Si C
SUBSTRAT GRAPHITE



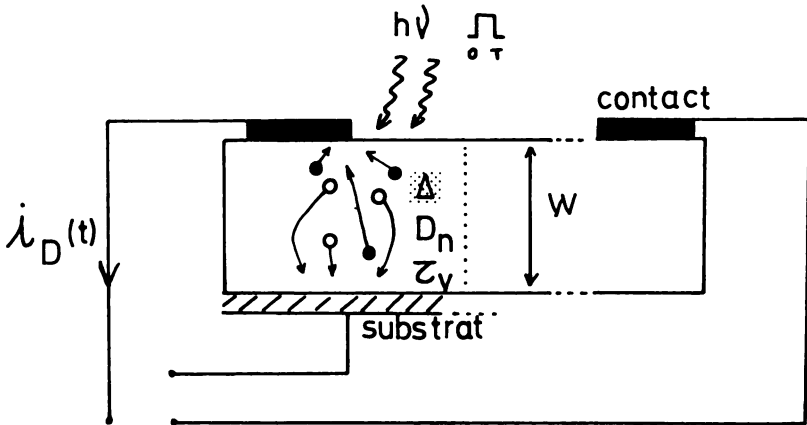
COUPE



VUE DE DESSUS

FIGURE 1. Structure des échantillons polycristallins.

# PHOTOCOURANT TRANSITOIRE DE DIFFUSION



$$i_D(t) = \frac{2kTl_e}{q} \frac{\Delta}{W} \mu_n \times \begin{cases} \frac{1}{Vt} e^{-t/\tau_v} \\ \text{ou} \\ e^{-t/\tau} \end{cases}$$

$T \ll \tau$

$$\tau^{-1} = \tau_v^{-1} + \tau_{Gi}^{-1}$$

$$\frac{4W^2}{\pi^2 D_n} \underset{S=0}{\leq} \tau_{Gi} \leq \frac{W^2}{\pi^2 D_n} \underset{S=\infty}{}$$

FIGURE 2. Principe des mesures de photoconductivité transitoire.

La deuxième méthode (figure 3) expérimentale repose sur l'étude d'un photocourant transitoire de diffusion, et ne met en jeu que les porteurs minoritaires injectés en excès. Ces porteurs sont collectés par une zone type jonction p-n —ici la jonction métal-semiconducteur— à laquelle ils arrivent par diffusion. La décroissance du signal de photocourant est liée à la durée de vie effective  $\tau_i$  des porteurs minoritaires, ou même directement à leur durée de vie volumique  $\tau_v$ , suivant les caractéristiques  $\tau_v$ ,  $S$ ,  $\beta$ ,  $D_n$ ,  $W$  de l'échantillon étudié.<sup>3</sup> En ce qui concerne la durée de vie effective  $\tau_i$ , elle dépend à la fois des recombinaisons en volume  $\tau_v$  et des recombinaisons à la surface arrière de l'échantillon par  $\tau_G$ . Par contre, dans cette méthode, l'amplitude du signal de photocourant ne dépend que de la mobilité  $\mu_n$  des porteurs minoritaires, et la variation ou non de  $\mu_n$  avec la densité de porteur peut donc ici se mettre en évidence en faisant varier le niveau d'injection  $\Delta$  des porteurs.

Par ailleurs, pour comprendre les résultats qui sont présentés dans la suite, il faut remarquer que, même dans le cas d'un monocristal homogène, la durée de vie volumique  $\tau_v$  peut varier avec l'injection  $\Delta$  des porteurs<sup>2</sup> de même que la contribution  $\tau_G^2$  (avec  $s$  qui tend à croître avec  $\Delta$  dans le cas d'une surface libre, alors que

---


$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad & \tau^{-1} = \tau_v^{-1} + \tau_G^{-1} \\ \textcircled{2} \quad & \tau_v = \frac{\tau_{v\min} + \Delta / p_0 \times \tau_{v\lim}}{1 + \Delta / p_0} \\ \textcircled{3} \quad & \tau_G = f(s, 1/D_{\min o.}) \\ \textcircled{4} \quad & s \propto s_0 (1 + \Delta / p_0) \\ \textcircled{5} \quad & D(\Delta) = \frac{kT}{q} \mu(\Delta) = \frac{kT}{q} \mu_0 \left[ 1 + A(p_0 + \Delta) / (B + p_0 + \Delta) \right]^{-\frac{1}{2}} \\ \textcircled{6} \quad & \left\{ \begin{array}{l} \text{electrons: } \frac{kT}{q} \mu_0 = 39 \text{ cm}^2/\text{s} \quad , \quad A=350 \quad , \quad B=1.05 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \\ \text{holes: } \quad \quad \frac{kT}{q} \mu_0 = 13 \text{ cm}^2/\text{s} \quad , \quad A=81 \quad , \quad B=3.24 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \end{array} \right. \end{aligned}$$


---

FIGURE 3. Principe de mesures de photocourant transitoire de diffusion.

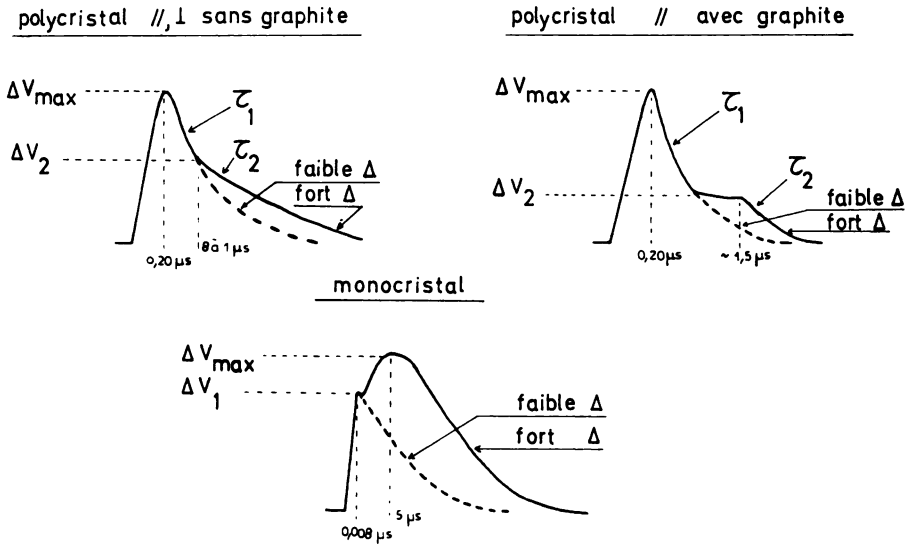


FIGURE 4. Évolution classique des paramètres  $\tau$ ,  $\tau_v$ ,  $\tau_c$ ,  $S$ ,  $D$ , avec la densité  $\Delta$  de porteurs excités.

la mobilité des porteurs tend à diminuer dès que  $\Delta$  devient supérieur à la densité des porteurs majoritaires à l'équilibre  $p_0$ ) (figure 4).

Sous l'angle expérimental, les échantillons étudiés consistent en fragments parallélépipédiques de  $\sim 1 \times 0,3$  cm<sup>2</sup> de surface découpés dans le ruban polycristallin et séparés ou non du substrat de graphite du ruban. Les échantillons sont fixés sur un support isolant et opaque, et la surface éclairée est limitée à une portion de  $0,1 \times 0,3$  cm<sup>2</sup> de la surface à l'aide de masques. La surface éclairée est positionnée soit au milieu de l'échantillon —études de photoconductivité— soit au bord d'un contact —études de photocourant de diffusion. Le dispositif expérimental utilisé est décrit par ailleurs.<sup>1, 4</sup>

### III. RÉSULTATS

L'analyse des résultats expérimentaux, c'est-à-dire amplitude et décroissance des photoréponses, effet de  $\Delta$ , comparaison entre polycristaux et comparaison avec monocristaux, repose directement sur les principes des réponses de photoconductivité et photocourant transitoire rappelées au paragraphe précédent.

4. M. BENZOHRRA, «Application de la photoexcitation transitoire à la caractérisation physique des matériaux et composants à semiconducteur». Thèse de Docteur-Ingénieur, Toulouse, Sep. 1976.

III. 1. *Études de photoconductivité transitoire*

La figure 5 schématise la forme des signaux  $\Delta V(t)$  observés à partir de la méthode de la photoconductivité transitoire. La première remarque qu'appelle ces signaux concerne leur allure vers les injections  $\Delta$  grandes devant la densité des porteurs majoritaires à l'équilibre  $p_0 \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ : cette allure est différente pour les polycristaux et les monocristaux. En particulier l'apparition d'une seconde composante  $\tau_2$  d'amplitude  $\Delta V_2$  est typique des réponses délivrées par les polycristaux. L'apparition de cette seconde composante est conforme au fait que, sous l'effet des forts  $\Delta$  ( $\Delta \gg p_0$ ), le caractère « discontinu » de la répartition des porteurs dans le polycristal disparaît. Au moment où cesse l'excitation lumineuse les porteurs se recombinent donc avec une constante de temps  $\tau_1$ , comme dans un matériau homogène. Après un certain temps  $t$ , par contre, un nombre suffisant de porteurs en excès s'est recombinié: le caractère discontinu de la distribution des porteurs dans le polycristal réapparaît alors avec une constante de temps spécifique  $\tau_2$ .

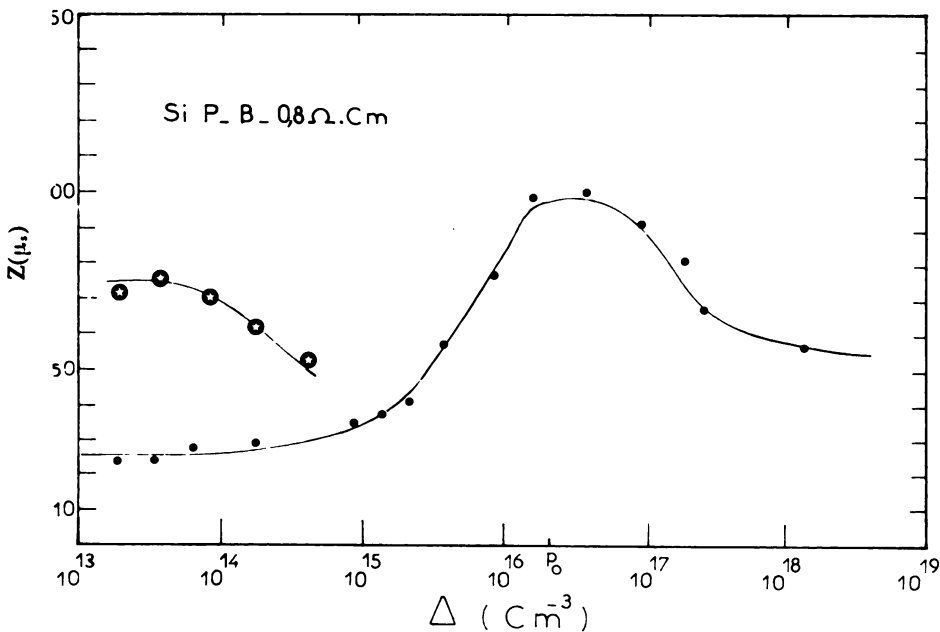
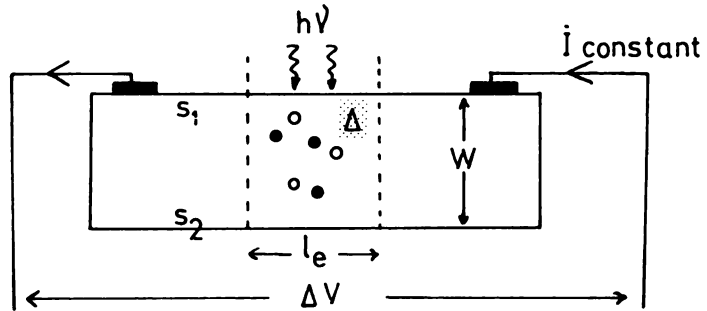


FIGURE 5. Allures comparées des signaux de photoconductivité transitoire.

## PHOTOCONDUCTIVITÉ TRANSITOIRE



$$\Delta = \Delta n(\circ) = \Delta p(\circ)$$

$$\sigma_0 = q\mu_p p_0$$

$$\Delta n(t) = \Delta p(t) = \Delta e^{-t/\tau}$$

$$\Delta\sigma_e(t) = q\mu_p \left(1 + \frac{\mu_n}{\mu_p}\right) \Delta n(t)$$

$$\Delta V = - \frac{\Delta\sigma_e}{\sigma_0(\sigma_0 + \Delta\sigma_e)} \times \left(\frac{l_e}{W \times l}\right) \times i$$

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{\Delta V_{\max}}{\Delta_{\min}} = - \frac{1 + \mu_n/\mu_p}{\mu_p} \times \frac{\Delta}{p_0} \left( \right) i ; \quad \frac{\Delta V_{\max}}{\Delta_{\lim}} = \frac{1}{(\sigma_0)_{\lim}} \left( \right) i \\ \tau^{-1} = \tau_v^{-1} + \tau_{G_e}^{-1} \quad \quad \quad s_1 = s_2 = s \\ \frac{W}{2s} \leq \tau_{G_e} \leq \frac{W^2}{\pi^2 D_n} \\ s \text{ petit} \quad \quad \quad s \infty \end{array} \right.$$

FIGURE 6. Monocristal Si P-0.8 Ω cm: évolution de la durée de vie avec le niveau d'excitation  $\Delta$  (mesures de photoconductivité comme de photocourant de diffusion).



À titre de référence, nous avons rapporté dans la figure 6 l'évolution classique  $\tau (\Delta/p_0)$  de la durée de vie  $\tau$  des porteurs en fonction du taux d'injection  $\Delta$  qui est observée pour un monocristal, les résultats de la figure 6 étant relatifs à un monocristal de Si P  $0,8 \Omega \cdot \text{cm}$ . Dans ces résultats, la partie croissante de la courbe  $\tau (\Delta/p_0)$  est représentative de l'évolution  $\tau_v (\Delta/p_0)$  de la durée de vie en volume  $\tau_v$  des porteurs dans l'échantillon; la décroissance qui apparaît vers les plus forts  $\Delta$  traduit au contraire l'effet sur la durée de vie effective  $\tau$  (cf. figure 2) de la diminution de la durée

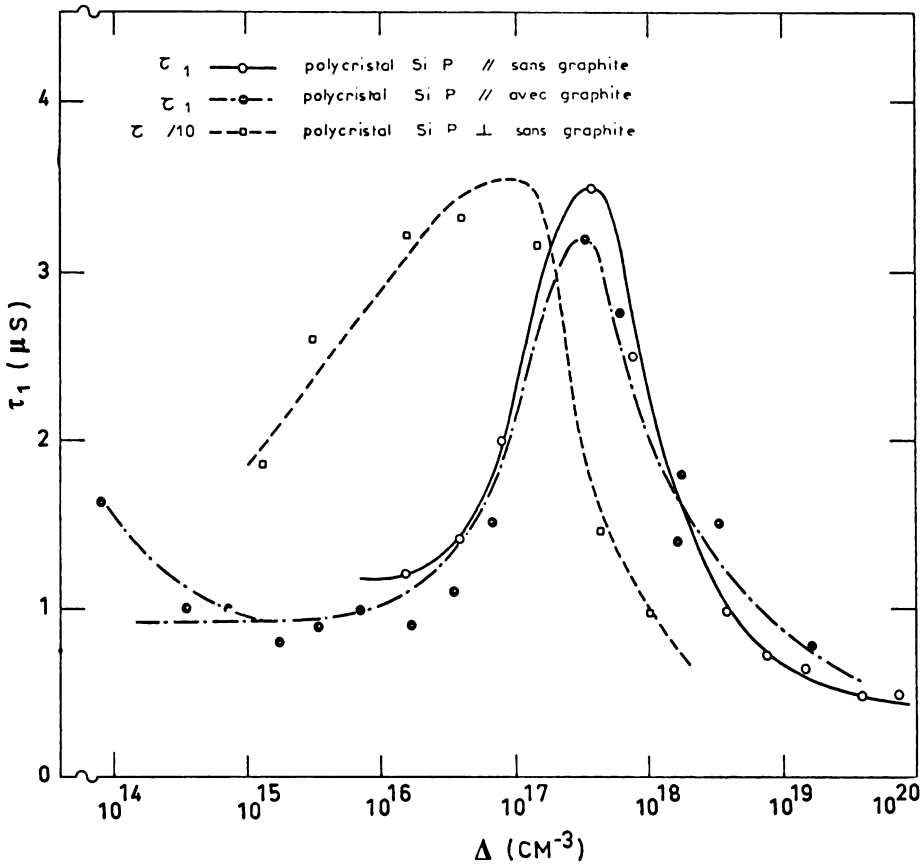


FIGURE 7. Polycristaux, mesures de photoconductivité transitoire: évolution avec  $\Delta$  de la constante de temps  $\tau_1$  définie figure 5.

de vie géométrique  $\tau_{G\sigma}$ :  $\tau_{G\sigma}$  diminue car la vitesse de recombinaison en surface  $s$  augmente avec  $\Delta$ . (Aux très faibles injections, des pièges de porteurs minoritaires sont responsables de l'accroissement de  $\tau$ .)

De la même façon nous avons représenté dans la figure 7, pour les échantillons de matériaux polycristallins, l'évolution de la durée de vie  $\tau_1$  en fonction du taux d'injection  $\Delta$ . On peut constater que l'évolution  $\tau_1(\Delta)$  présente une allure générale identique à l'évolution  $\tau(\Delta/p_0)$  observée pour un monocristal. Dans la partie croissante de l'évolution  $\tau_1(\Delta)$ ,  $\tau_1$  est représentatif de la durée de vie volumique des porteurs dans les polycristaux et montre que cette durée de vie est relativement grande pour un tel matériau. Aux plus forts  $\Delta$ , le décalage entre les maximums des évolutions  $\tau_1(\Delta)$  obtenues avec les polycristaux parallèles et perpendiculaires implique une mobilité  $\mu_n$  des porteurs minoritaires plus grande dans le Si à grain perpendiculaire (sans graphite) que dans le Si à grain parallèle (sans graphite).

La figure 8 représente l'évolution de la constante de temps de réajustement  $\tau_2$  en fonction de  $\Delta$  ( $\tau_2$  traduisant le rétablissement du caractère polycristallin).  $\tau_2$  se montre très supérieur à la durée de vie volumique des porteurs dans le polycristal quand le polycristal est séparé du substrat de graphite.  $\tau_2$  est par contre beaucoup plus petit quand le polycristal est laissé sur son substrat de graphite. Ceci indiquerait donc que le graphite joue le rôle d'un «shunt» pour le rétablissement du caractère polycristallin.

L'évolution de l'amplitude  $\Delta V_{\max}$  des signaux de photoconductivité avec  $\Delta$  est rapportée dans la figure 9, pour l'ensemble des échantillons polycristallins et monocristallins. On peut ainsi voir que, vers les plus fortes injections  $\Delta$ , l'amplitude  $\Delta V_{\max}$  des signaux a la même allure dans les polycristaux et les monocristaux. En particulier on retrouve alors l'évolution classique des mobilités  $\mu_{n,p}$  des porteurs avec  $\Delta$  (cf. figure 4). Par contre, lorsque  $\Delta$  diminue et dans le domaine où les injections  $\Delta$  tendent à être assez faibles, les réponses des polycristaux montrent un comportement typique: pour les polycristaux, l'amplitude  $\Delta V_{\max}$  des signaux de photoconductivité décroît moins vite que  $\Delta$ .

Alors que  $\Delta V_{\max}(\Delta)$  est une courbe de pente 1 avec le cas d'un monocristal, on observe une courbe de pente 0,75 et même 0,35 pour les polycristaux. C'est donc (cf. figure 2) que la mobilité  $\mu_p$  des trous majoritaires diminue dans un polycristal quand  $\Delta$  diminue, et ceci d'autant plus fortement qu'il y a plus de joints de grains et défauts de structure en travers des lignes de courant I.

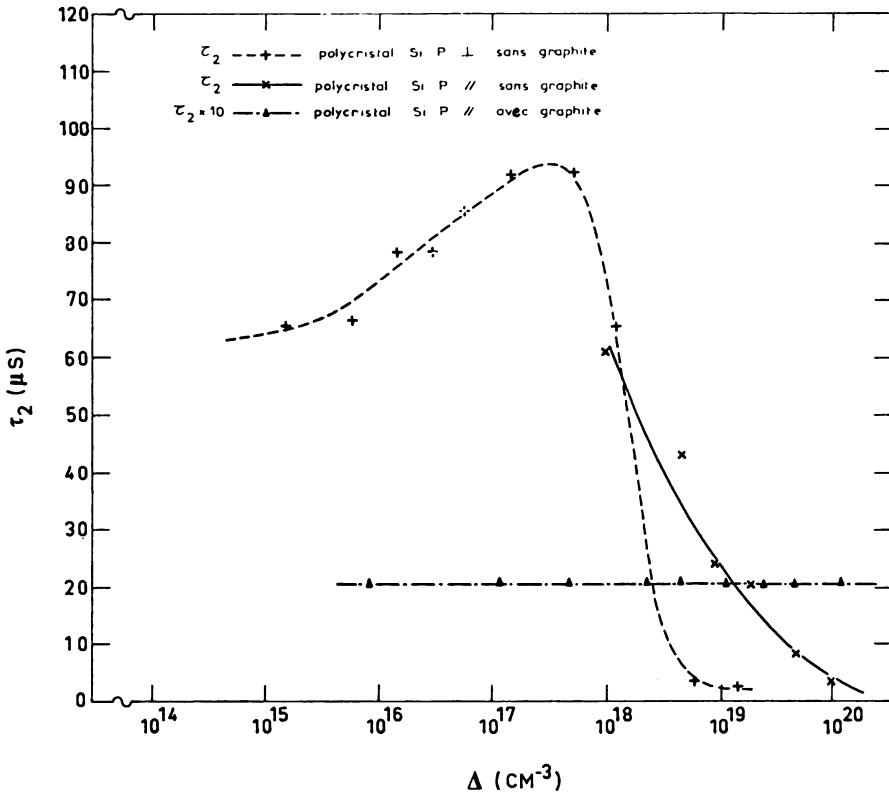


FIGURE 8. Polycristaux, mesures de photoconductivité transitoire: évolution avec  $\Delta$  de la constante de temps  $\tau_2$  définie figure 5.

Les résultats consignés dans la figure 9 traduisent ainsi l'inégalité

$$\mu_p < \mu_p < \mu_p \text{ mono}$$

entre les mobilités  $\mu_p$  dans les différents échantillons étudiés.

Il faut également noter la différence entre les amplitudes  $\Delta V_{\max}$  qui sont observées, à  $\Delta$  donné, avec les polycristaux parallèles suivant que ces polycristaux sont étudiés avec ou sans le substrat de graphite. Elle impliquerait ici que la présence du substrat graphite entraîne une augmentation de la mobilité  $\mu_n$  des électrons minoritaires dans les polycristaux.

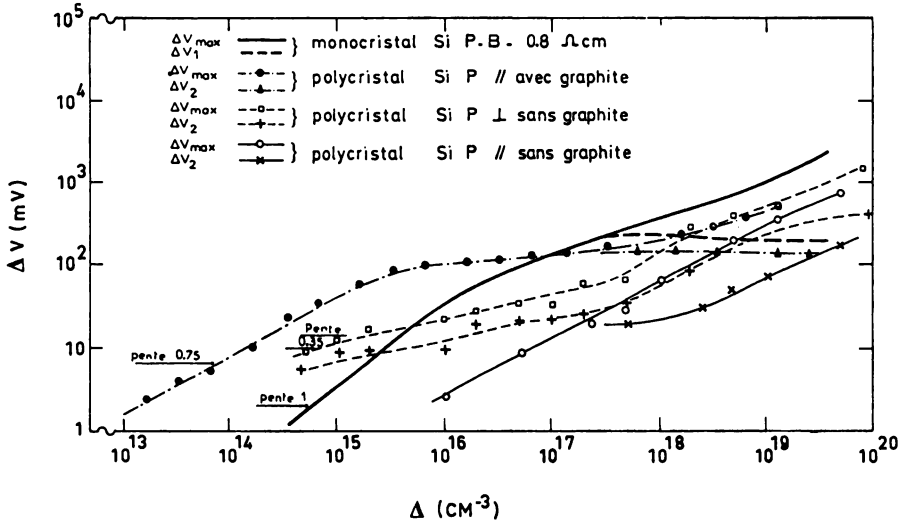


FIGURE 9. Polycristaux et monocristal: évolution avec  $\Delta$  de l'amplitude  $\Delta V_{\max}$  des signaux de photoconductivité ( $I=5$  mA).

### III. 2. Résultats des études par la méthode du photocourant transitoire de diffusion

Dans la figure 10 sont rapportés les résultats concernant l'évolution, en fonction de  $\Delta$ , de l'amplitude  $i_{p_{\max}}$  des signaux de photocourant dans les polycristaux. À faible  $\Delta$  la pente 1 de l'évolution  $i_{p_{\max}}(\Delta)$  est analogue à celle qui est observée avec un monocristal; elle traduit que la mobilité  $\mu_n$  des porteurs minoritaires pour un polycristal, comme pour un monocristal, est indépendante de  $\Delta$  lorsque  $\Delta$  reste faible. Par contre, et contrairement au cas des monocristaux, lorsque  $\Delta$  croît les amplitudes  $i_{p_{\max}}$  tendent vers une saturation très rapide. Cette saturation implique que la mobilité des électrons minoritaires tend à diminuer quand  $\Delta$  croît dans les polycristaux. À noter que, dans le domaine de saturation de  $i_{p_{\max}}(\Delta)$ , la différence entre les amplitudes de  $i_{p_{\max}}$  observées pour le polycristal parallèle avec graphite et pour le polycristal perpendiculaire sans graphite signifierait un rapport 5 entre la mobilité  $\mu_n$  des porteurs minoritaires dans le polycristal parallèle avec graphite et la mobilité  $\mu_n$  de ces porteurs dans le polycristal perpendiculaire.

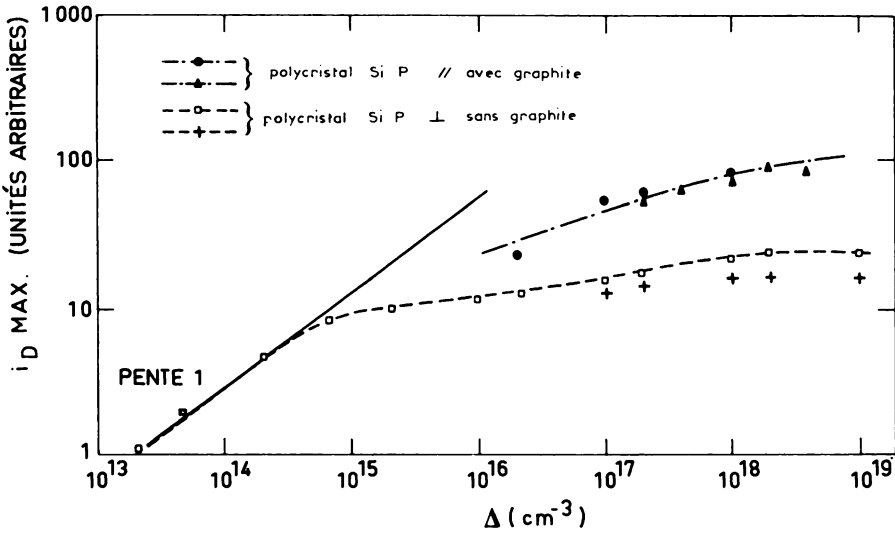


FIGURE 10. Polycristaux, mesures de photocourant transitoire de diffusion: évolution avec  $\Delta$  de l'amplitude  $\tau_{D\text{max}}$  des signaux observés.

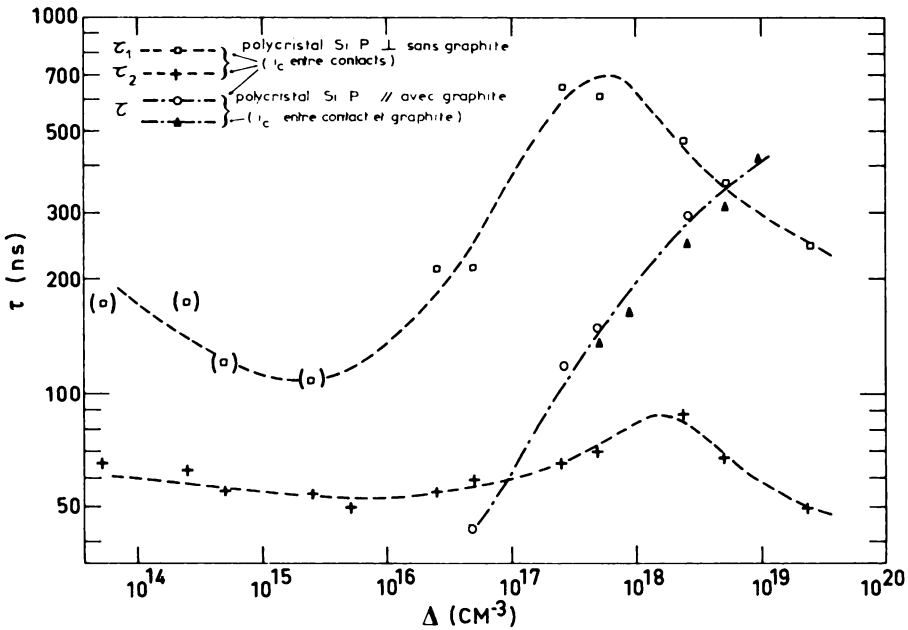


FIGURE 11. Polycristaux, mesures de photocourant transitoire de diffusion: évolution avec  $\Delta$  de la constante de temps  $\tau$  de décroissance des signaux

L'évolution de la durée de vie effective  $\tau$  des porteurs minoritaires en fonction de  $\Delta$ , obtenue par la méthode du photocourant transitoire de diffusion, est représentée dans la figure 11.

Les durées de vie mesurées  $\tau_i$  sont ici de l'ordre de quelques centaines de nanosecondes seulement. En effet, la durée de vie qui est mesurée par cette méthode est la contribution géométrique  $\tau_{Gi}$  du polycristal car cette contribution est beaucoup plus petite que la contribution géométrique  $\tau_G$  qui intervient dans les mesures de photoconductivité —cf. figures 2 et 3—. Pour le polycristal perpendiculaire sans graphite, la partie croissante des courbes  $\tau_i(\Delta)$  correspond à l'accroissement de  $\tau_{Gi}$  sous l'effet de la diminution de la mobilité des électrons minoritaires lorsque  $\Delta$  croît (cf. III-1). Vers les forts  $\Delta$ , et pour les échantillons sans graphite,  $\tau_{Gi}$  tend au contraire à diminuer sous l'effet de l'accroissement de la vitesse de recombinaison  $S$  à la surface arrière —accroissement d'une valeur petite vers une valeur  $\sim \infty$ —, accroissement qui est analogue à l'accroissement de  $s$  noté dans les études de photoconductivité.

Les résultats sont différents pour le cristal parallèle avec graphite. En effet, pour cet échantillon, la face arrière de l'échantillon est la jonction p-n Si P-Si C. C'est-à-dire que, lorsque  $\Delta$  augmente, le taux de disparition des électrons minoritaires de Si P, sur la face arrière tend au contraire à décroître d'une valeur très grande à une valeur petite. Ceci explique i) les valeurs plus faibles de  $\tau$  vers les faibles  $\Delta$ , et ii) le fait que seul domine dans  $\tau(\Delta)$  l'influence de la diminution  $\mu_n(\Delta)$  sur  $\tau_{Gi}$  lorsque  $\Delta$  augmente.

#### IV. CONCLUSION

En conclusion, les différents résultats expérimentaux que nous avons obtenus par la méthode de photoconductivité transitoire et la méthode de photocourant transitoire de diffusion montrent qu'il est possible de s'attendre à 5 comportements électriques particuliers des polycristaux de Si P à larges grains. A savoir:

1. Il n'y a pas réellement de discontinuité dans le matériau du point de vue phénomène de transport. Sous forte injection de porteurs, il apparaît une constante de temps  $\tau_2$  de réajustement du caractère polycristallin,  $\tau_2$  étant plus petit dans le cas du Si polycristallin laissé sur le substrat de graphite. Simultanément, la mobilité  $\mu_n$  des électrons minoritaires est plus grande dans les échantillons laissés sur graphite que dans les échantillons séparés du substrat de graphite.

2. La durée de vie volumique  $\tau_v$  des porteurs dans les polycristaux étudiés est supérieure à la microseconde et peut donc être considérée comme relativement grande.
3. Du point de vue des propriétés de transport, les «défauts» d'un polycristal se comportent comme des pièges temporaires pour les électrons minoritaires et comme une barrière de potentiel pour les trous majoritaires.
4. Mobilités  $\mu_n$  et  $\mu_p$  des électrons et des trous d'un polycristal sont toutes deux des fonctions du niveau d'injection  $\Delta$  de porteurs, avec  $\mu_p$  qui augmente avec  $\Delta$ , alors que  $\mu_n$  tend à diminuer lorsque  $\Delta$  augmente.
5. Pour de faibles densités  $\Delta$  de porteurs injectés en excès, la mobilité des porteurs majoritaires est, dans le polycristal, inférieure à la mobilité que ces porteurs majoritaires auraient dans un matériau monocristallin. Mais la mobilité des porteurs minoritaires d'un polycristal tend à être supérieure à la mobilité des porteurs minoritaires d'un monocristal.

Enfin, la mobilité effective des porteurs minoritaires (électrons) dans les polycristaux laissés sur un substrat de graphite paraît environ 5 fois plus grande que la mobilité de ces mêmes porteurs dans le cas d'un polycristal séparé du graphite.





**RÉALISATION DE CELLULES SOLAIRES TERRESTRES  
À JONCTION P-N PAR IMPLANTATION IONIQUE**

par

**J. C. MULLER, J. P. PONPON, A. GROB, J. J. GROB, P. SIFFERT**

Centre de Recherches Nucleaires  
Groupe de Physique et Applications des Semiconducteurs.  
Strasbourg, France

## RÉSUMÉ

On étudie les possibilités d'emploi de l'implantation ionique en vue de la réalisation de cellules solaires photovoltaïques à jonction p—n superficielle à base de silicium. On s'intéressera plus particulièrement aux propriétés des couches de silicium dopées par des ions bore, au rôle des défauts de structure liés au bombardement ionique ainsi qu'à l'effet des recuits. Les caractéristiques électriques des cellules obtenues par implantation seront également présentées.

## RESUM

Hom estudia les possibilitats d'emprar la implantació iònica amb vista a la realització de cèl·lules solars fotovoltaïques d'unió p—n superficial a base de silici. Més particularment interessaran les propietats de les capes de silici dopades per ions de bor i el paper que tenen els defectes d'estructura introduïts durant el bombardejament iònic així com a l'efecte de recuites. Igualment seran presentades les característiques elèctriques de les cèl·lules obtingudes per implantació.

## SUMMARY

The possibilities of the use of ion implantation methods to obtain p-n surface junctions on silicon base material for photovoltaic solar cells are analysed.

Particularly much more attention has been devoted on the properties of such layers obtained on silicon implanted by bore ions. The structural defects introduced during the implantation and the results obtained after annealing are discussed.

The electrical characteristics of the cells are also shown.

## INTRODUCTION

Différentes techniques sont employées actuellement pour la réalisation de cellules solaires photovoltaïques sur des substrats cristallins, citons la diffusion thermique de dopants accepteurs ou donneurs, les structures métal-semiconducteur ou MOS, les hétérojonctions. Par contre, beaucoup moins de travaux ont été consacrés au dopage par bombardement ionique. Pourtant, les avantages présentés par cette technique sont réels et bien connus: contrôle précis de la profondeur de jonction, de la concentration d'impuretés dopantes introduites... Ces avantages sont d'ores et déjà mis à profit dans l'élaboration de certains circuits intégrés et pourraient l'être pour les cellules solaires. En effet, les développements récents de cellules violettes démontrent toute l'importance de la réduction de la zone morte d'entrée. Par ailleurs, il est nécessaire dans ces dispositifs de contrôler le dopage superficiel pour l'amener à la solubilité limite de l'impureté introduite, afin de diminuer la résistance série de la couche superficielle et de réduire les pertes de rendement de conversion.

Il convient de mentionner également que les techniques de diffusion thermique conventionnelles sont limitées aux matériaux monocristallins car le coefficient de diffusion de la plupart des impuretés est plus important aux joints de grains, ces régions constituant des zones de précipitation préférentielles de ces dopants. Par conséquent, il convient de développer des techniques de dopage mieux adaptées aux matériaux polycristallins, au silicium en ruban ou en film, qui seront probablement employés dans un avenir proche pour la préparation des cellules terrestres.

L'implantation ionique semble bien adaptée à ces tâches. Elle a été mise en oeuvre dès 1966,<sup>1,2</sup> et en 1967<sup>3</sup> des cellules présen-

1. V. M. GUSEV, V. V. TIMOV, M. I. GUSEVA, V. I. KURINNYI, *Sov. Phys. Sol. State* 7, 1966, p. 1673.

2. V. M. GUSEV, V. V. ZADDE, A. P. LANDSMAN, V. V. TITOV, *Sov. Phys. Sol. State* 8, 1966, p. 1363.

3. J. T. BURRILL, W. J. KING, S. HARRISON, P. McNALLY, *IEEE Trans. Elec. Dev.* Ed. 14, 1967, pp. 10.

tant des rendements de 11 % pour des conditions d'éclairement AMO ont été préparées. Depuis lors, cette méthode avait été quelque peu négligée, du moins pour ce type d'applications, alors qu'elle s'imposait pour la réalisation d'autres dispositifs. Elle a été reprise récemment et des cellules ont été réalisés par implantations des éléments suivants: phosphore, arsenic,<sup>4</sup> bore.<sup>5</sup> Les principaux résultats publiés dans la littérature sont reportés sur le Tableau I.

TABLEAU I						
Auteurs	Énergie keV	Dopant	V <sub>oc</sub> (mV)	I <sub>sc</sub> /cm <sup>2</sup> mA	F	η %
Gusev [1]	30 - 150	P	475	19	0,6	7
Gusev [2]	30	P	450	-	-	6-8
Burill* [3]	80 - 200	P	550	35 - 40	0,75	10 - 11
Neilson [4]	20 - 80	As	-	-	-	5
		P	510	21	0,65	6,5 - 7
Ponpon [5]	15 - 30	B	530	16	-	-

\*avec couche antireflet et conditions AMO

## II. CHOIX DU DOPANT

Dans ce travail, nous sommes plus spécialement intéressés au dopage du silicium par implantation ionique à des doses suffisantes pour atteindre la limite de solubilité. Celle-ci est reportée sur le Tableau II pour les dopants usuels; on constate qu'elle est comparable à celle mesurée par diffusion thermique et atteint  $10^{20}$  à  $10^{21}$  cm<sup>-3</sup> pour le bore, le phosphore et l'arsenic. L'examen du Tableau III montre que le bore présente une activité électrique supérieure aux autres dopants pour une pénétration et un recuit identiques. Nous avons donc choisi ce dopant et avons implanté des échantillons de silicium N à des doses supérieures à  $10^{16}$  cm<sup>-2</sup> à des énergies inférieures ou égales à 15 keV.

4. J. B. NEILSON, T. M. VANDERWEL, J. SHEWCHUN, D. A. THOMPSON, sous presse.

5. J. P. PONPON, P. SIFFERT, 11th Photovoltaic Specialists Conference, 1975, p. 342.

TABLEAU II		
SOLUBILITÉ		
Implantation à chaud (450°C) 40 keV		Diffusion thermique 1100°C
B	$2 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{20}$
Al	$2 \cdot 10^{19}$	$2 \cdot 10^{19}$
Ga	$4 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{19}$
P	$> 4 \cdot 10^{20}$	$10^{21}$
As	$10^{21}$	$2 \cdot 10^{21}$
Sb	$8 \cdot 10^{20}$	$4 \cdot 10^{19}$
Bi	$2 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{17}$

TABLEAU III							
IMPLANTATION IONIQUE							
IONS ÉLECTRIQUEMENT ACTIFS (%) MÊME PARCOURS, RECUIT 900°C							
B	Al	Ga	In	P	As	Sb	Bi
90%	10%	8%	1%	10%	20%	10%	1%

Dans ces conditions, la fenêtre d'entrée de la cellule sera peu importante. En effet, sur la figure 1 nous avons calculé le parcours projeté  $R_p$  des ions bore d'après le modèle de ralentissement de LINDHARD, ainsi que l'épaisseur de la zone morte qui en résulte suivant la concentration de dopant dans le matériau de base. Dans nos conditions de fabrication, l'épaisseur de fenêtre, confirmée expérimentalement, est inférieure à 1000 Å; par conséquent la perte d'efficacité de conversion (300°K, éclaircissement AMO) qui en résulte ne dépassera pas 2 % (figure 2).

### III. PROPRIÉTÉS DES COUCHES IMPLANTÉES

#### 1. Désordre cristallin global

Les surfaces bombardées ont été analysées, par la technique de rétrodiffusion de particules chargées en condition de canalisation, en fonction de la température de recuit. On constate que:

- après implantation une zone amorphe de silicium d'épaisseur 700-800 Å est formée;
- la fraction d'ions décanalisés croît fortement avec la température de recuit jusqu'à 800°C environ;

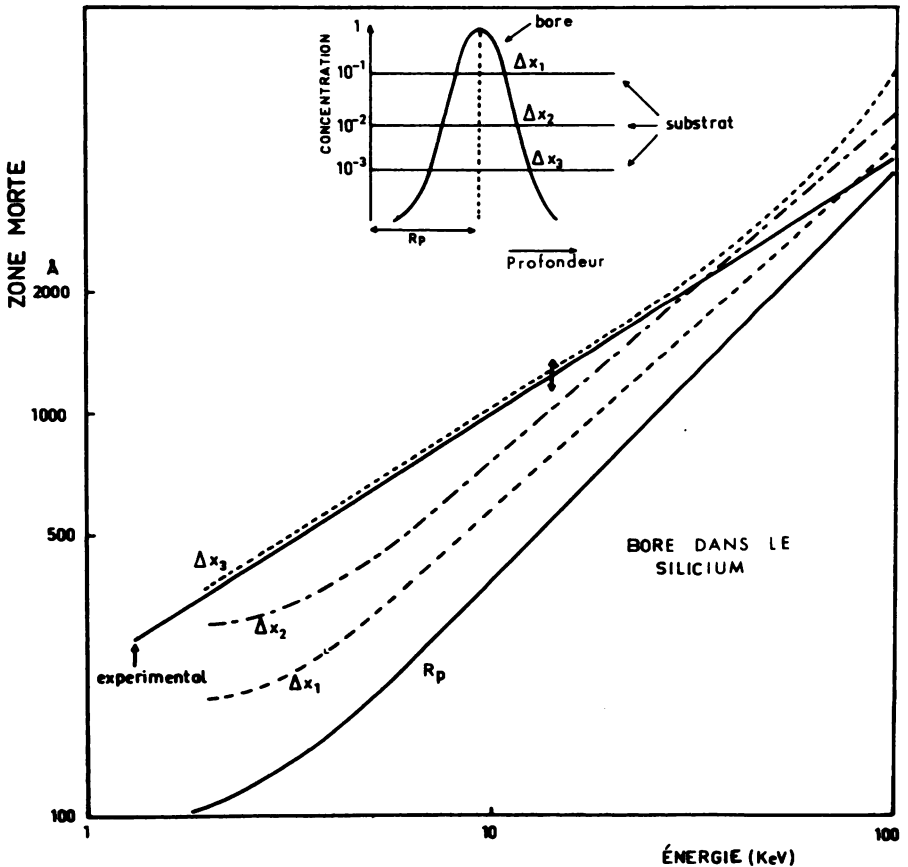


FIGURE 1. Parcours moyen des ions bore dans le silicium et épaisseur de la zone morte pour différentes concentrations d'impuretés du substrat, en fonction de l'énergie des ions.

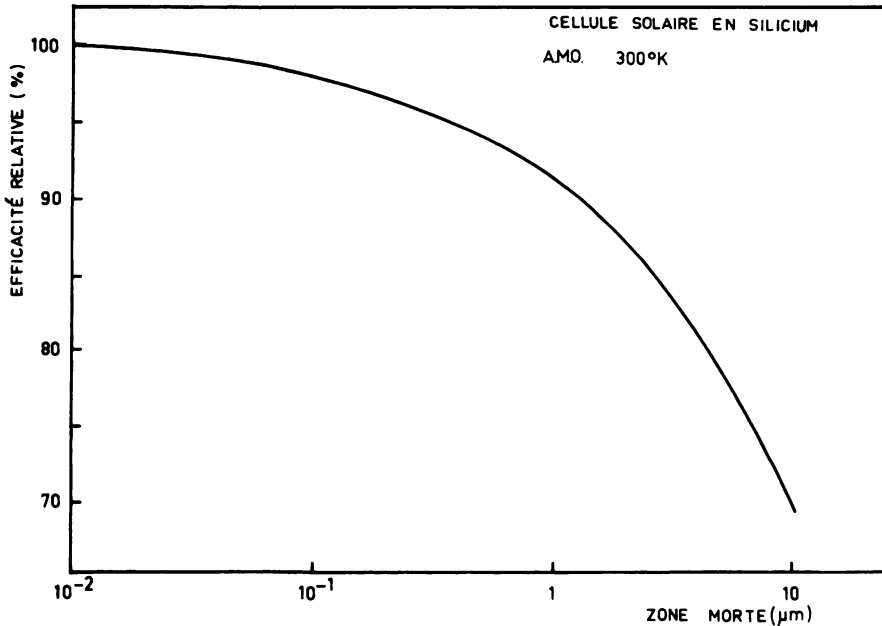


FIGURE 2. Efficacité de conversion relative d'une cellule à base de silicium en fonction de l'épaisseur de la zone morte d'entrée des rayonnements (calcul AMO, 295° K).

— la couche superficielle ne recristallise pas par épithaxie même après un recuit à 950°C.

Ces résultats peuvent être dus à la transformation de défauts simples en dislocation, amas ou bâtonnets orientés suivant des axes cristallographiques différents de ceux du cristal d'origine. D'autres auteurs<sup>6</sup> ont obtenu des résultats similaires pour des couches bombardées par des ions phosphore et recuites à 1.000°C. Il apparaît donc que pour des implantations à très forte dose des conditions de recuit nouvelles doivent être recherchées (recuits par paliers de température, par exemple).

## 2. Nature microscopique des défauts

Pour préciser la nature microscopique des défauts formés, notamment l'énergie d'activation, la section efficace de capture et la température de recuit, nous avons effectué des mesures de courants thermostimulés (TSC).

6. Keitchiroh UDA, Mototaka KAMOSHIDA, *J. Appl. Phys.* 48, 1977, p. 18.

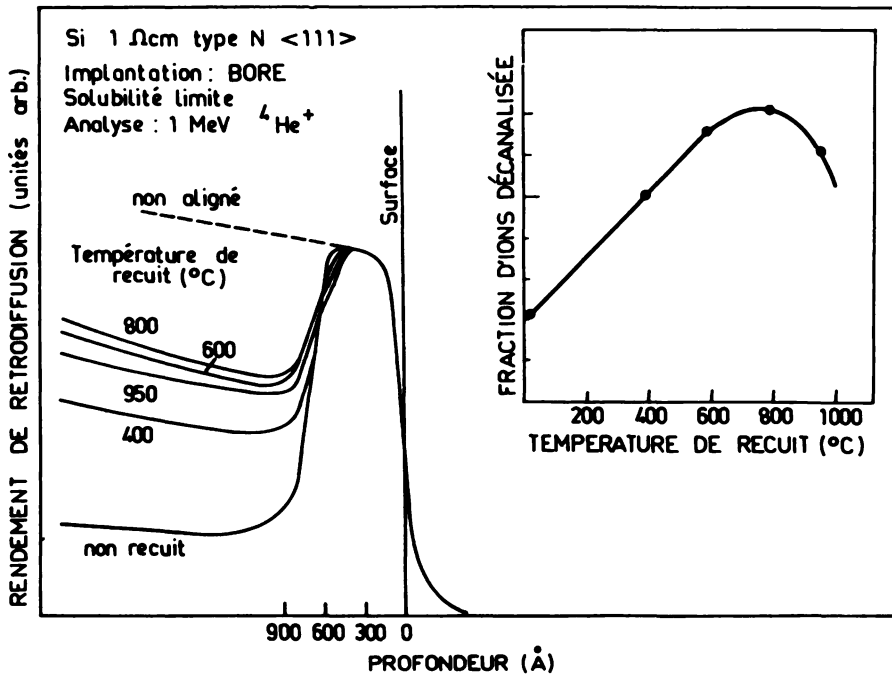


FIGURE 3. a) Spectre de rétrodiffusion de particules chargées ( $^4\text{He}^+$ , 1 MeV) sur des plaquettes implantées et analysées en conditions de canalisation. b) Évolution de la fraction d'ions décanalisée en fonction de la température de recuit.

Après avoir refroidi les jonctions p-n à la température de l'azote liquide et peuplé les centres de capture soit par éclairage, soit par variation de la tension appliquée, nous avons enregistré le courant résultant de la réémission des porteurs capturés par les pièges lorsqu'on réchauffe rapidement l'échantillon. Nous pouvons constater (figure 4) qu'il n'y a qu'un seul pic, apparaissant à la température  $T_m = 128^{\circ}\text{K}$  et disparaissant pour un recuit inférieur à  $300^{\circ}\text{C}$ . Le niveau correspondant à ce pic a été étudié en détail, son énergie d'activation  $E_T$  est de  $0,26\text{ eV}$  et sa section efficace de capture  $10^{-16}\text{ cm}^2$ . Il résulte probablement de l'association de deux lacunes dans l'état de charge  $(0, +)$ ; au delà de  $300^{\circ}\text{C}$  cette dilacune se transforme en des ensembles plus complexes nécessitant des températures très élevées pour obtenir l'activité électrique maximale des ions implantés.



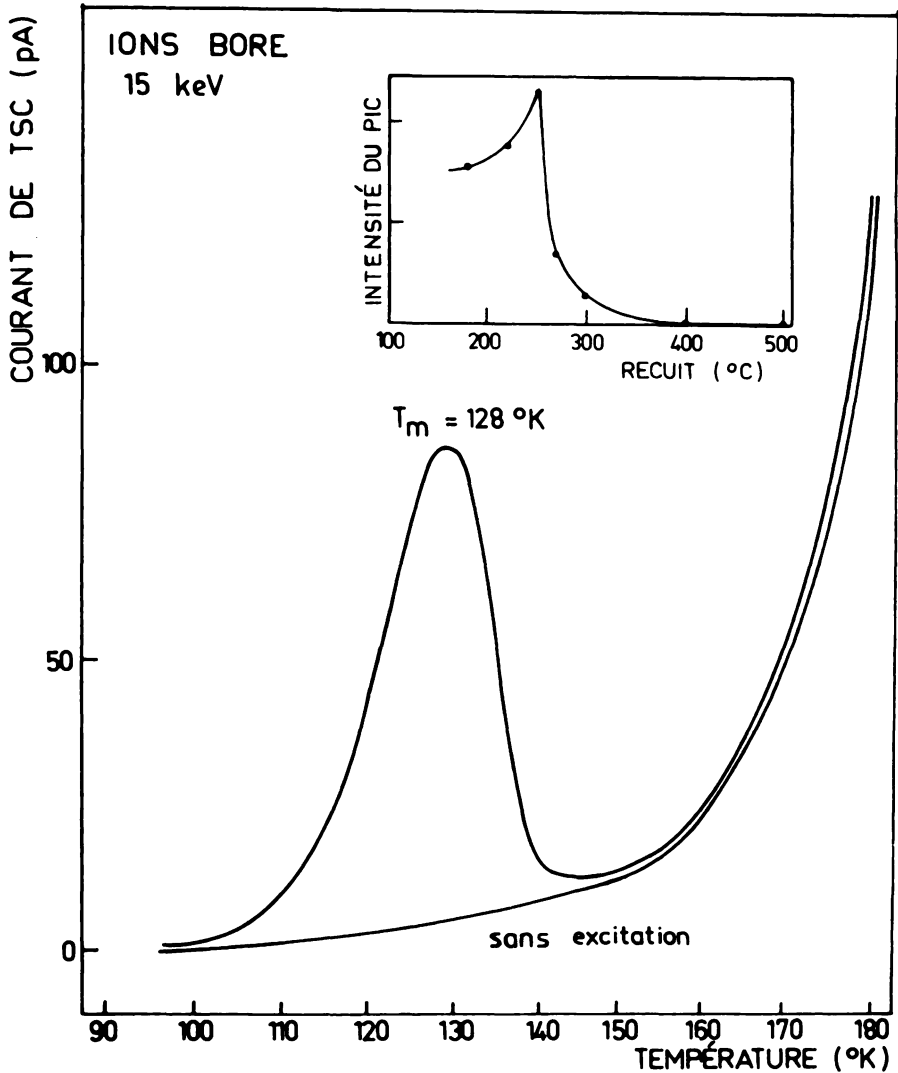


FIGURE 4. a) Courbe de TSC obtenue pour une jonction P—N réalisée par implantation d'ions bore de faible énergie (15 keV). b) Évolution de l'intensité du pic de TSC en fonction de la température de recuit.

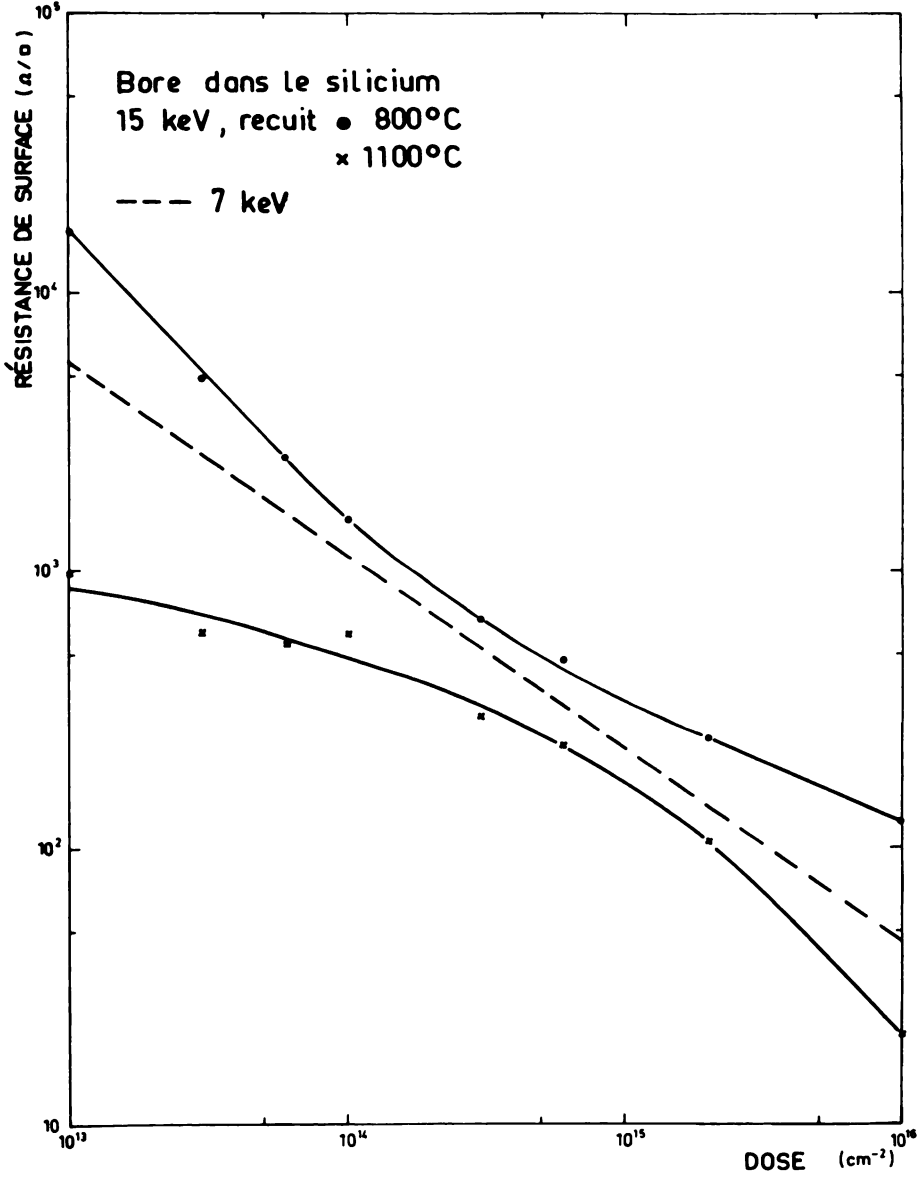


FIGURE 5. Résistance superficielle des couches implantées en fonction de la dose.

On remarquera que, pour ces énergies d'implantation faibles, la forte concentration de défauts sur les volumes petits du cristal conduit à des associations de défauts entre eux, alors que celles avec les impuretés chimiques sont beaucoup moins importantes. Ces dernières n'apparaîtront que pour des énergies d'implantation plus élevées.<sup>8</sup>

#### IV. CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DES CELLULES

##### 1. Préparation des échantillons

Les substrats sont constitués de silicium monocristallin d'orientation  $\langle 111 \rangle$  ou  $\langle 100 \rangle$  ayant une face polie, de type N, de résistivité comprise entre 1 et 10 ohm · cm. Après bombardement ionique sur une surface de 2 cm<sup>2</sup>, les échantillons sont recuits sous vide. Une grille d'or est déposée par évaporation sous vide sur la surface implantée, alors que le contact ohmique est assuré par un dépôt de magnésium ou d'aluminium.

##### 2. Résistance superficielle

L'évolution de la résistivité superficielle en fonction de la dose d'ions implantés est reportée sur la figure 5. Nous constatons que celle-ci diminue avec la dose. Pour des valeurs proches de la limite de solubilité, des résistivités inférieures à 100  $\Omega/\square$  sont atteintes.

##### 3. Réponse spectrale

La réponse spectrale d'une diode diffusée conventionnelle et d'une cellule implantée est reportée sur la figure 6; les deux courbes ont été normalisées. On constate que la cellule implantée présente une réponse plus favorable du côté des courtes longueurs d'ondes (domaine où le rayonnement solaire est le plus intense). Le rendement du côté rouge du spectre est très sensible au cycle thermique subi par la cellule lors des traitements thermiques de recuit. Ceci n'est pas étonnant; il est en effet bien connu que la vitesse de refroidissement joue un rôle important sur les longueurs de diffusion des porteurs.

8. J. C. MULLER, R. STUCK, P. SIFFERT, Inter. Conf. Freiburg; Phys. Conf. Ser. London, 23, 1974, p. 513.

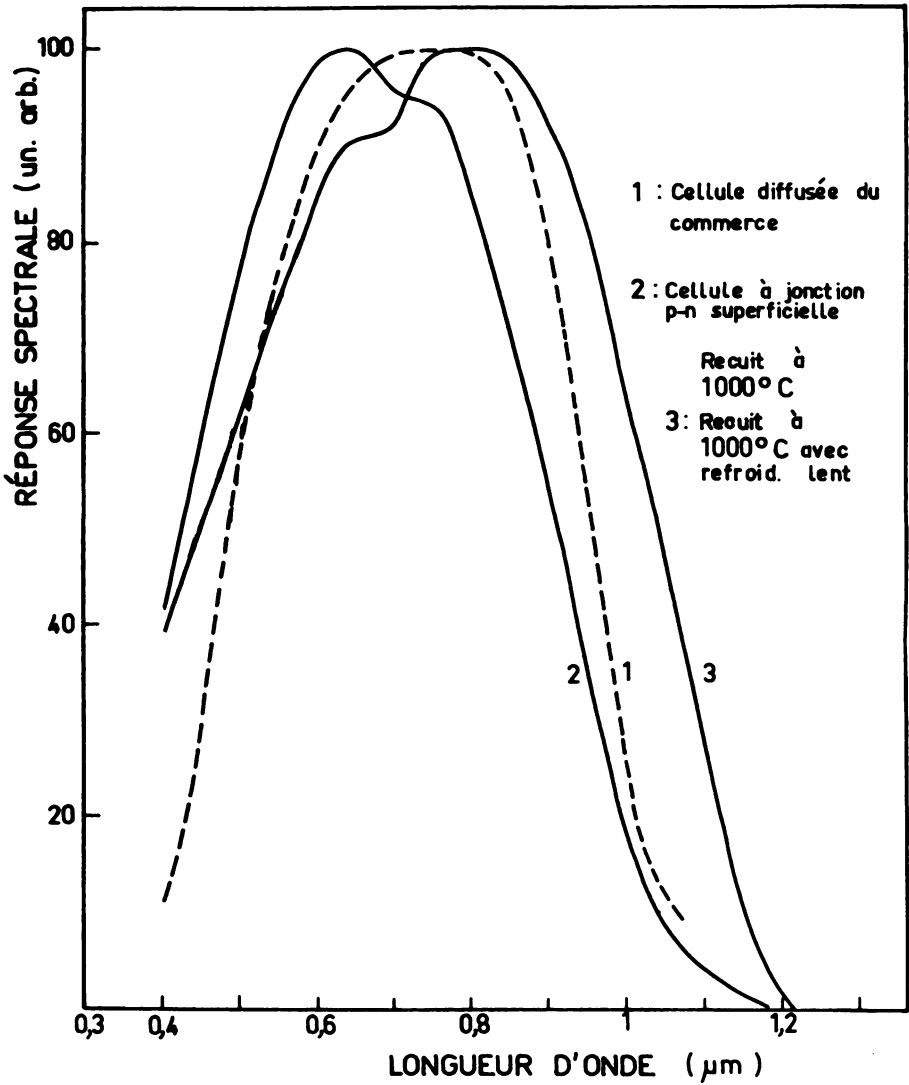


FIGURE 6. Réponse spectrale des cellules à jonction P—N obtenues par implantation ionique et par diffusion thermique conventionnelle.

TABLEAU IV				
Dopant	Profondeur de la jonction (Å)	$V_{ov}$ (mV)	$I_{sc}/cm^2$ (mA)	$\eta$ %
P	≈ 100	500 - 510	28 - 29	5
B	200 - 300	500 - 530	32 - 35	6 - 8
	700 - 800	520 - 530	34 - 36	7,5 - 8
		530 - 550	≈ 40	8 - 10*

\*Surface de la cellule : 0,25 cm<sup>2</sup>

#### 4. Caractéristiques courant-tension

Les caractéristiques I-V à l'obscurité et sous éclairage ont été étudiées. Dans ce dernier cas, une lampe à filament de tungstène munie d'un filtre, fournissant une puissance d'éclairage de 100 mW/cm<sup>2</sup> (conditions AM1) a été employée pour éclairer toute la surface implantée (2 cm<sup>2</sup>) recouverte d'une grille collectrice mais SANS couche anti-reflets (figure 7). La tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  dépasse 500 mV et le courant photogénéré  $I_{sc}$  est d'environ 32 mA/cm<sup>2</sup>. Le facteur de remplissage est de l'ordre de 0,5, ce qui est probablement dû aux conditions non encore optimisées d'implantation et de recuit. En effet, des valeurs de ce facteur F aussi élevées que 0,76 ont été reportées dans la littérature.<sup>9</sup> L'ensemble des résultats obtenus est représenté sur le Tableau IV. Mentionnons finalement qu'aucune dégradation des performances n'est apparue sur ces cellules après 1 an de fonctionnement.

9. R. WICHNER, 11th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 1975, p. 243.

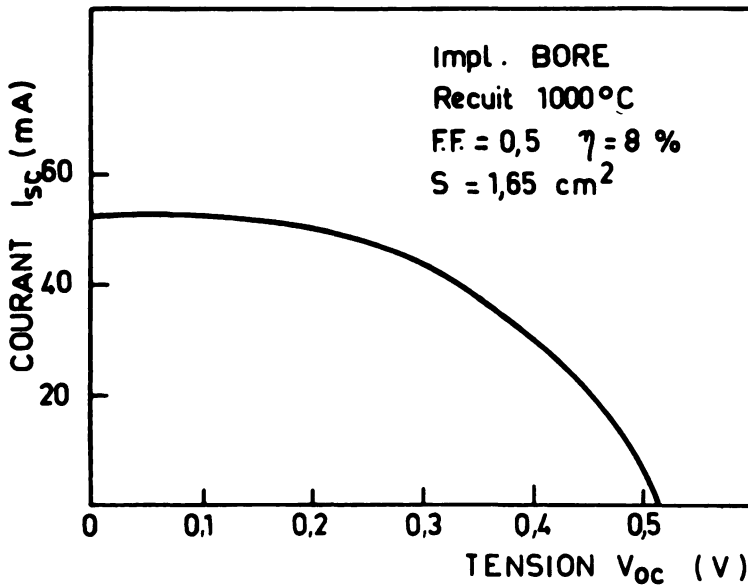
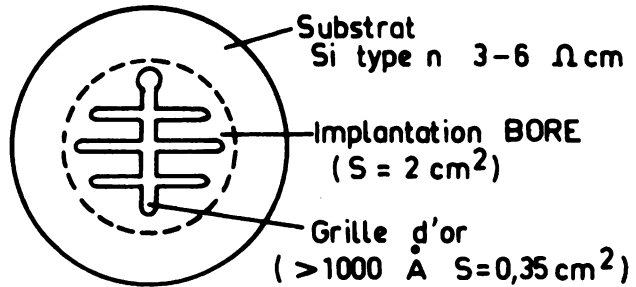


FIGURE 7. a) Schéma d'une cellule implantée par des ions bore. b) Caractéristiques courant-tension.

## CONCLUSION

Notre but était de démontrer les possibilités de l'implantation d'ions de faible énergie, et nos efforts se sont essentiellement portés vers l'étude des couches fortement dopées (caractérisation des défauts cristallins et des défauts engendrés par le bombardement) et non vers l'optimisation de la structure. Il reste de nombreux problèmes à résoudre, tels que le contact arrière, la résistance série, la géométrie de la grille, les traitements antireflets, mais le problème le plus important est celui du recuit de guérison des défauts.

Les premiers résultats semblent prometteurs puisque, dans certaines conditions, des courants  $I_{sc}$  de 40 mA/cm<sup>2</sup> ont été atteints.





# **HOMOUNIONES DE CdTe PARA CELDAS SOLARES**

por

**J. MIMILA-ARROYO,\* G. COHEN-SOLAL, A. BOUZZI**

**Laboratoire de Physique des Solides, CNRS. Meudon, Francia**

\* Investigador del I.P.N. - Esime (México). Bajo licencia

## RESUMEN

Películas delgadas de CdTe son acrecidas epitaxialmente por el proceso de transporte en fase vapor a corta distancia (CSVT).

Las películas, depositadas en sustratos de CdTe monocristalino, son generalmente policristalinas, pero con orientación impuesta por el sustrato. El tamaño de grano depende del estado de la superficie y del procedimiento de crecimiento. Las uniones se obtienen depositando capas de tipo P (impurificadas con As) sobre monocristales de CdTe, de baja resistividad, impurificados con In. Se describen y discuten algunos resultados preliminares, con intención de determinar los efectos de los parámetros básicos del material en las características de células solares.

## RESUM

Pel·lícules primes de CdTe són acrecudes epitaxialment pel procés de transport en fase vapor a curta distància (CSVT).

Les pel·lícules, dipositades sobre substrats de CdTe monocristallí, són generalment policristal·lines, però amb orientació imposada pel substrat. La mida del gra depèn de l'estat de la superfície i també del procediment d'acreixement. Les unions són obtingudes dipositant capes del tipus P (dopades amb As) damunt monocristalls de CdTe, de baixa resistivitat, dopats amb In. Hom descriu i discuteix alguns resultats preliminars amb la intenció de determinar els efectes dels paràmetres bàsics del material en les característiques de les cèl·lules solars.

## SUMMARY

The films deposited on monocrystalline Cd Te substrates are of polycrystalline nature and the orientation is determined by the substrate. The grain size will depend on the surface and the growth process conditions. The junctions are obtained by depositing layers of p-type (doped with As) on CdTe substrates of low resistivity and doped with In.

Some preliminary results are present and a discussion on the basic parameters of the material influencing the solar cell characteristics are viewed.

## INTRODUCCIÓN

El CdTe ha resultado desde los primeros estudios teóricos uno de los materiales más interesantes para la conversión fotovoltaica bajo iluminación solar. Esto debido a: Su ancho de banda prohibida ( $E_g=1.45$  eV) que corresponde al que deberá dar las homouniones más eficientes, 24 %.<sup>1</sup> Su elevado coeficiente de absorción óptica, que permite realizar estructuras fotovoltaicas extremadamente delgadas, con un espesor activo del orden de  $5 \mu\text{m}$ .<sup>2</sup> Buenas propiedades de transporte eléctrico ( $\mu_n=800 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{seg}$   $\mu_p=80 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{seg}$ ).<sup>3</sup> Posibilidad de elaborarlo de tipo N y de tipo P mediante la adición de impurezas ajenas a la matriz, In y As por ejemplo. Dentro del campo de fotopilas a efectos especiales, existen varios materiales semiconductores, con los cuales se puede alejar, para realizar estructuras de ancho de banda prohibida variable<sup>4,5</sup> y crear un cuasi-campo eléctrico entre la superficie iluminada y la unión P-N, cuya acción es reducir el efecto de la velocidad de recombinación superficial y de volumen y aproximar el rendimiento al de una estructura ideal, que resulta además poco sensible a malas condiciones de transporte, por ejemplo: tiempo de vida de minoritarios del orden de  $10^{-9}$  seg y velocidades de recombinación superficial elevadas,  $10^6 \text{ cm}/\text{seg}$ .<sup>6</sup> Finalmente, citemos el hecho de que puede obtenerse en películas delgadas conservando buenas propiedades eléctricas.<sup>7,8</sup>

Sin embargo, la investigación del efecto fotovoltaico en CdTe ha sido escasa; los trabajos más interesantes fueron los de D. A. CUSANO<sup>9</sup> quien realizó heterouniones  $\text{Cu}_x\text{Te}-\text{CdTe}$  con un rendimiento de 6 %.

1. J. WYSOCKI and P. RAPPAPORT, *J. Appl. Phys.*, Vol. 31, 1960, p. 691.
2. R. O. BELL, H. B. SERREZE and F. V. WALD, Eleventh Photovoltaics Specialists Conference, 497. Phoenix (U.S.A.), 1975.
3. R. TRIBOULET, *Rev.*
4. G. COHEN-SOLAL et al., *Rev. Phys. Appl.*, Vol. 1, 1966, p. 11.
5. F. F. MOREHEAD and G. MANDEL, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 5, 1964, p. 53.
6. A. BOUZZI et al., en este congreso.
7. S. N. MAXIMOVSKI et al., 2nd. Inter. Symp. on CdTe, Strasbourg, France, 1976.
8. YU. K. YEZHOVSKY et al., *Thin Sol. Films.*, Vol. 18, 1973, p. 127.
9. D. A. CUSANO, *Rev. de Phys. Appl.*, Vol. 1, 1966, p. 195.

En el presente trabajo se describe la realización de uniones P-N de CdTe obtenidas por crecimiento epitaxial de CdTe P sobre CdTe N, así como caracterización electrónica y propiedades fotovoltaicas.

#### EPITAXIA DE LAS CAPAS

El método escogido para realizar las capas es el de epitaxia por transporte en fase vapor a corta distancia (CSVV) en una atmósfera controlada ( $H_2$ ,  $N_2$ , etc.).<sup>10, 11</sup> El procedimiento de operación ha sido mejorado de manera que se puede efectuar un decapado térmico del sustrato de unas cuantas décimas de  $\mu m$ ; esto permite tener un buen estado de la superficie sobre la cual se iniciará la epitaxia. Las películas obtenidas son generalmente policristalinas, con la orientación de los granos impuesta por el sustrato; la dimensión de éstos depende de las condiciones de elaboración: temperatura de la fuente y sustrato, así como el gradiente térmico entre ellos. El transporte es de carácter reactivo en el que se ha puesto en evidencia el papel del vapor de agua en la velocidad de crecimiento; aumentando ésta con la concentración de vapor en el volumen de epitaxia. Mediante esta técnica puede crecer CdTe sobre CdTe a temperaturas relativamente bajas, lo que disminuye el problema de interdifusión de impurezas, por ejemplo: para temperaturas de fuente y sustrato  $600^\circ C$  y  $500^\circ C$  respectivamente con una separación entre ellos de 1 mm se tiene una velocidad de crecimiento de  $0.6 \mu m/min$ .

La obtención de contactos y montaje de las fotopilas puede verse en un artículo precedente;<sup>12, 11</sup> se precisa que la capa no siga ningún tratamiento adicional de recocido o difusión profundos, es decir, las características de la unión quedan determinadas por las condiciones de epitaxia.

#### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación de los resultados ya publicados anteriormente, se realizó un estudio más profundo sobre el mecanismo de trans-

10. J. SARAIE et al., *Japan J. Appl. Phys.*, Vol 11, 1972, p. 1758.

11. F. H. NICOLL, *J. of Electrochemical Soc.*, Vol. 110, 1963, p. 1165.

12. J. MIMILA-ARROYO, A. BOUAZZI et G. COHEN-SOLAL, 2nd. Inter. Symp. on CdTe., Strasbourg, France, 1976.

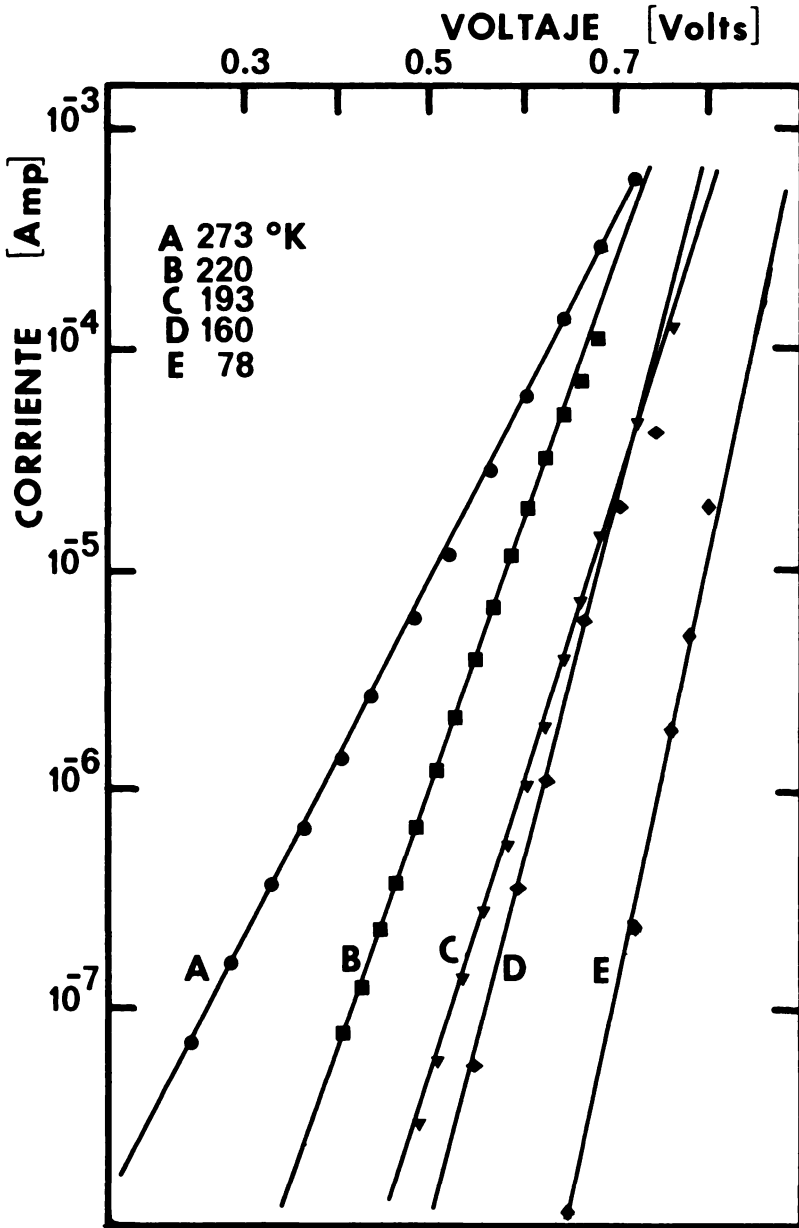


FIGURA 1. Características I-V en polarización directa con la temperatura como parámetro.

porte de carga a través de la unión. Para esto se trazaron curvas I-V a varias temperaturas; éstas se muestran en la figura 1. La curva de I directa en función de V es de la forma:

$$I = I_s \left[ \exp \frac{qV}{\beta kT} - 1 \right],$$

donde

$$I_s = 10^{-10} \text{ amp/cm}^2,$$

y

$$\beta = 1.3,$$

a temperatura ambiente. De las gráficas de la figura 1 se determina  $I_s$  para cada temperatura y en la figura 2 se muestran éstas en función de  $1/T$ . De esta gráfica se determina una energía de activación para el mecanismo de conducción, cuyo valor es

$$E_a = 0.61 \text{ eV.}$$

Se efectuó una segunda caracterización de acuerdo con la teoría de SAH y otros,<sup>13, 14</sup> es decir, estudiando la corriente inversa a polarización constante, en función de T. En la figura 3 se muestra la gráfica  $IT^{-5/2}$  en función de  $1/T$ ; la energía de activación encontrada tiene aproximadamente el mismo valor. Lo anterior permite proponer que el mecanismo de transporte de portadores de carga a través de la unión está dominado por la generación-recombinación en la zona de carga de espacio con una energía de activación de  $E_a = 0.61 \text{ eV}$ . O. BELL y otros<sup>2</sup> publican igualmente esta energía.

Mediciones de capacidad en función de la tensión de polarización, muestran que se trata de una unión gradual en la vecindad de la unión donde el gradiente de concentración de impurezas es del orden de  $a = 10^{21} - 10^{22} \text{ impurezas-cm}^{-4}$  para capas impurificadas con arsénico durante el crecimiento; para tensiones de polarización inversa mayores a 1 volt, la variación de C con V corresponde a la de una unión de impurificación homogénea en cada lado.

13. SAH et al., *Proc. I.R.E.*, Vol. 45, 1957, p. 1228.

14. R. LANCON et Y. MARFAING, *Le Journal de Physique*, Vol. 30, 1969, p. 97.

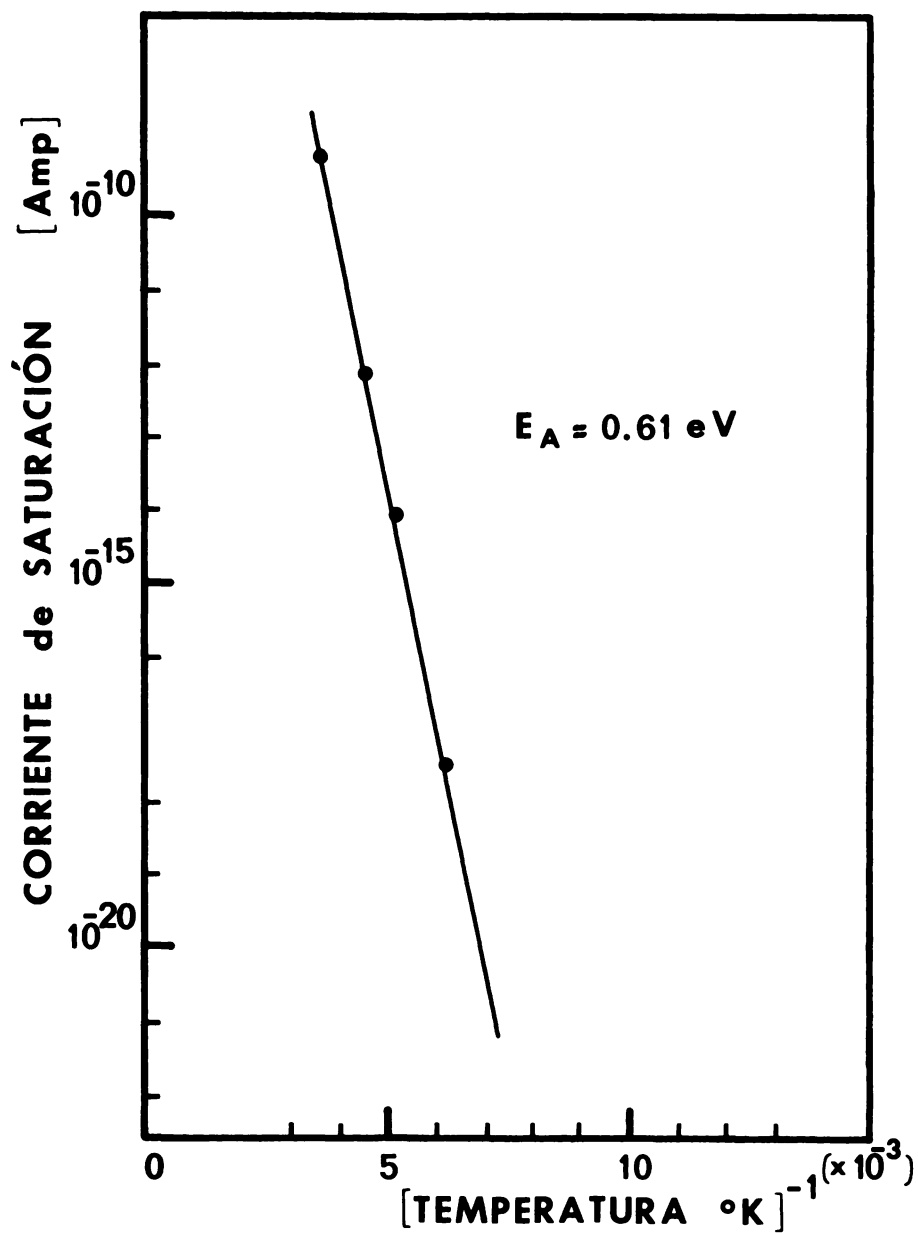
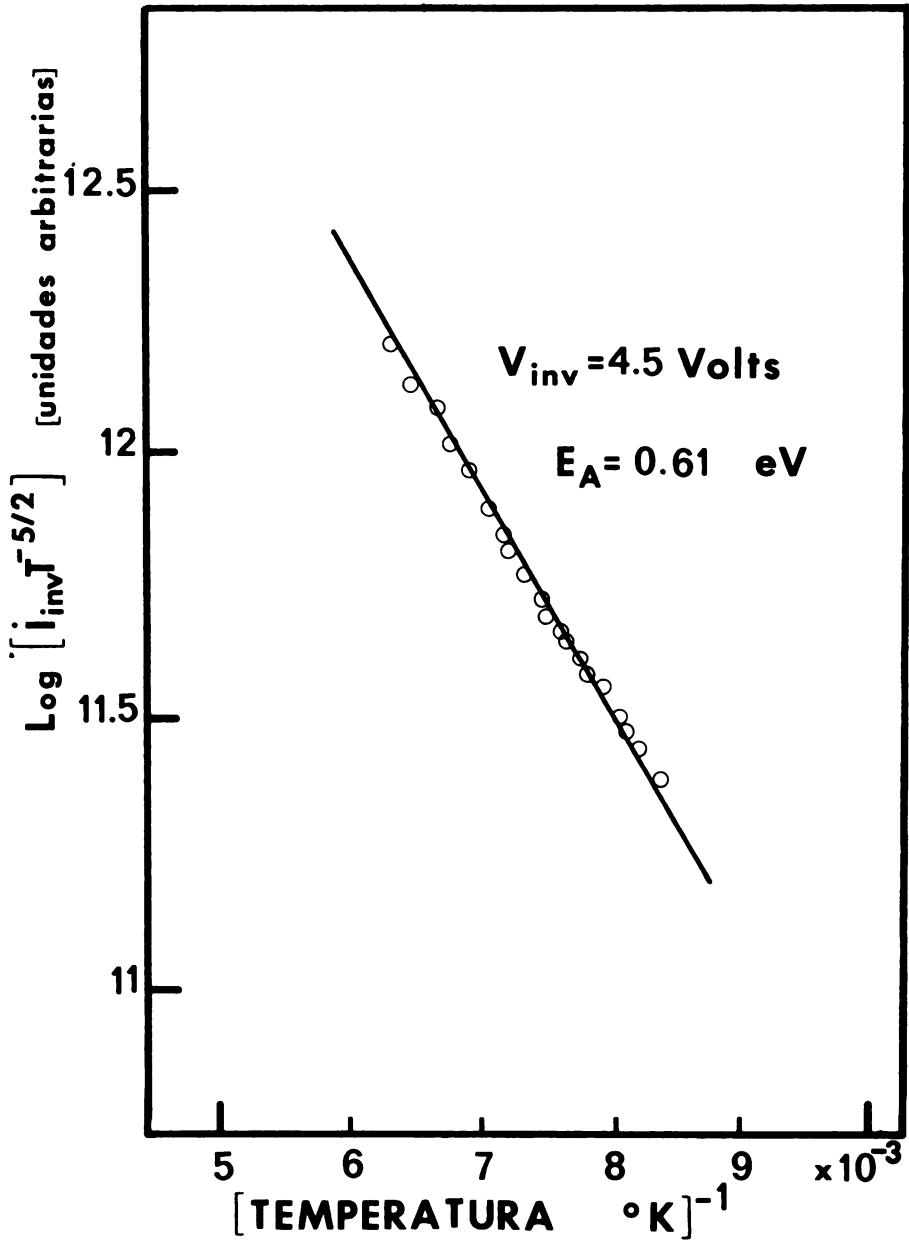


FIGURA 2. Corriente de saturación,  $I_s$ , en función de la temperatura.

FIGURA 3. Corriente inversa en función de  $1/T$  guardando la polarización.



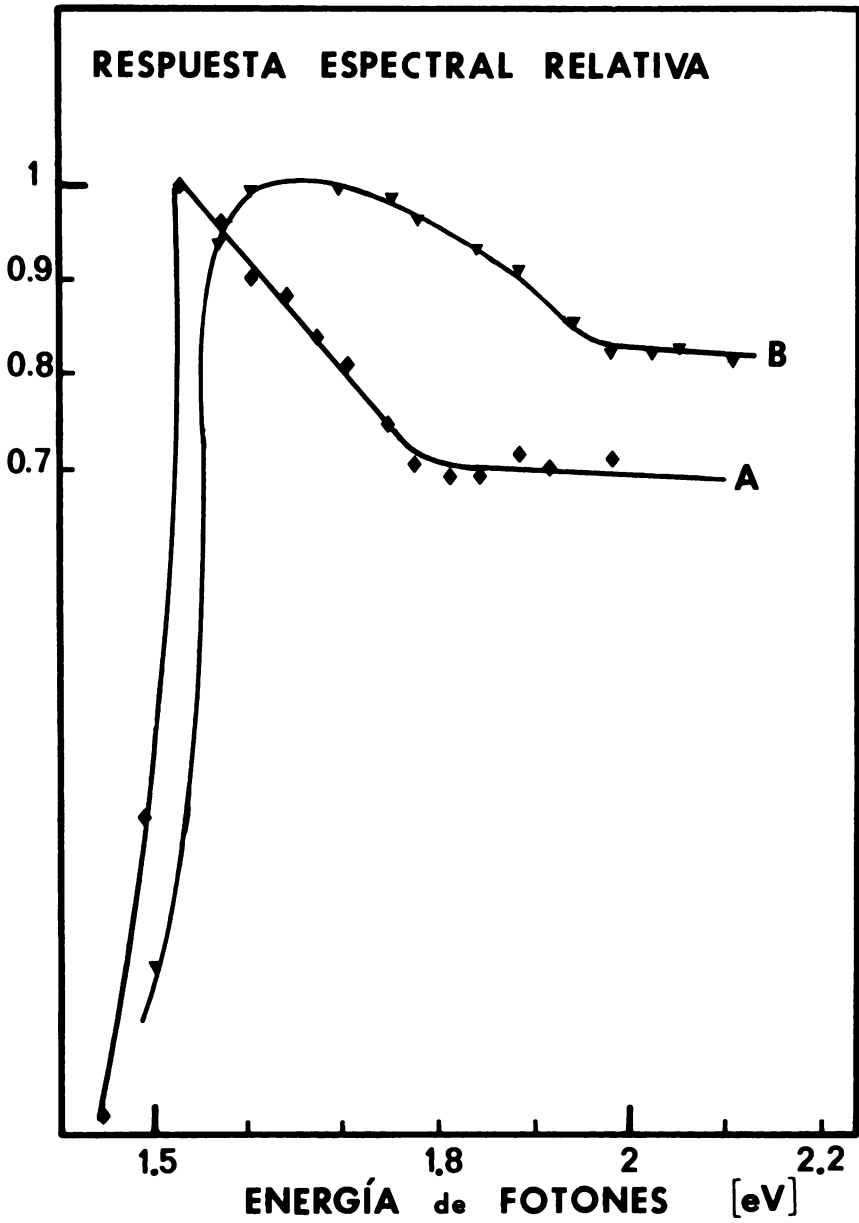


FIGURA 4. Respuesta espectral relativa a número de fotones constante  $Ax_j=1.6\mu$  y  $Bx_j=0.4\mu_o$ .

### CARACTERÍSTICAS FOTOVOLTAICAS

Los resultados que se presentan a continuación han sido obtenidos sin tener una geometría de contactos optimizada y sin corrección de las pérdidas debidas a la reflexión, iluminadas las muestras con una lámpara de tungsteno calibrada; valores típicos son los siguientes:

tensión de circuito abierto  $V_{co}=730$  mV,  
 densidad de corriente en cortocircuito  $J_{cc}=12$  mA/cm<sup>2</sup>,  
 resistencia en serie  $R_s=50$   $\Omega$ ,  
 factor de llenado a forma 0.62,  
 rendimiento  $\eta=5.4$  %.

La respuesta espectral relativa de dos de las fotopilas, con diferente profundidad de unión, se muestra en la figura 4: las profundidades de unión son 1.6  $\mu\text{m}$  y 0.4  $\mu\text{m}$  para las curvas A y B respectivamente; se observa que cuando la unión está más cerca de la cara iluminada se mejora la colección de portadores producidos por fotones de alta energía. El valor óptimo de la profundidad de unión está determinado fundamentalmente por el coeficiente de absorción óptica, la velocidad de recombinación en la superficie y la longitud de difusión de minoritarios; de un análisis simple basado en el modelo de difusión se encuentra que para iluminación solar la unión debe situarse entre 0.1 y 0.4  $\mu$  de profundidad.

### CONCLUSIONES

— Se han realizado fotopilas de CdTe por epitaxia en fase vapor con profundidades de unión perfectamente controlables y menores a 1  $\mu\text{m}$ . El sustrato es CdTe monocristalino de resistividad igual a 0.02  $\Omega\text{-cm}$  y la capa de tipo P impurificada con As; el rendimiento actual obtenido es de 5.4 %.

— Existe un mecanismo de generación-recombinación en la zona de carga del espacio que aumenta en varios órdenes de magnitud la corriente de saturación, respecto al valor predicho por la teoría de SCHOKLEY. Esto reduce considerablemente el valor de la fototensión y consecuentemente el rendimiento.

— La resistencia en serie, debida sobre todo a la resistencia de contacto y a la capa P, deberá ser reducida, pues el valor actual es

muy elevado para lograr un buen rendimiento de conversión fotovoltaica.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la cooperación de R. TRIBOULET, quien cedió los cristales utilizados en este estudio, y a Y. MARFAING por las interesantes discusiones y sugerencias.



## ANNEX I



1er. COLLOQUI INTERNACIONAL  
D'ENERGIA SOLAR

Barcelona, 23 i 24 de febrer de 1977

PROGRAMA

*Dimecres 23*  
*9.30 h.*

Inauguració oficial del Colloqui a càrrec del president de l'Institut d'Estudis Catalans, Dr. ALSINA I BOFILL.  
Presentació del Colloqui a càrrec del secretari general de la Secció de Física, F. SOLÉ.

SESSIÓ I

Presidència: J. PORTA I JUÉ i ENRIC CASASSAS.

*10 - 10.40 h.*

Les fonts d'energia, noves perspectives per a Catalunya i la resta de l'Estat espanyol. C. A. GASOLIBA, Universitat Autònoma de Barcelona.

*10.40 - 11 h.*

PAUSA.

Presidència: G. VASSALLS, D. BODIOT.

*11 - 11.30 h.*

The contribution of total energy systems to the penetration of solar energy.  
G. B. ZORZOLY, CISE, Milano, Itàlia.

*11.30 - 12 h.*

Programas del Centro de Estudios de la Energía en el campo del aprovechamiento de la Energía Solar. A. MUÑOZ TORRALBO, Centro de Estudios de la Energía, Ministerio de Industria, Madrid.

*12 - 12.20 h.*

Prospects of alternative source in Great Britain. C. BUCKLEY, Scientific Policy Research Unit. University of Sussex, Great Britain.

*12.20 - 12.40 h.*

Análisis de la resistencia serie de la transcélula. A. LUQUE. ETSI Telecomunicaciones, Madrid.

*12.40 - 13 h.*

Aplicaciones térmicas a baja temperatura de la energía solar. D. TINAUT i F. RAMOS BERJANO, Instituto de Óptica, CSIC, Madrid.

*13 - 15.30 h.*

DINAR

## SESSIÓ II

Presidència: A. MUÑOZ, Dr. WINSKOWSKI.

*15.30 - 15.50 h.*

Los tratamientos superficiales selectivos en la tecnología de la energía solar. F. BRIONES, Lab. Láminas Delgadas, Inst. Física de Materiales, CSIC, Madrid.

*15.50 - 16.10 h.*

L'energia solar i l'Arquitectura. R. SERRA-FLORENSA, Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona.

*16.10 - 16.30 h.*

Resum de les activitats en el LAAS. D. ESTEVE i J. BUXÓ, Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes, CNRS. Tolosa de Llenguadoc, França.



*16.30 - 16.50 h.*

Étude d'un distillateur solaire. F. ROCARIES, B. N'DOYE, P. GRANIER i D. BODIOT, Laboratoire de Thermodynamique et Energétique de Perpignan. France.

*16.50 - 17.10 h.*

Utilització de tècniques lleugeres en la climatització artificial. E. PUJOL, Tels-tar. Terrassa.

*17.10 - 17.40 h.*

PAUSA.

*17.40 - 18 h.*

Serres solaires. P. DENIS, NMMR, CEA-CENT, Grenoble. France.

*18 h.*

TAULA RODONA.

Presidència: D. BODIOT, G. B. ZORZOLY, R. FOLCH, J. M. TURA, C. A. GASÒLIBA.

### SESSIÓ III

*Dijous 24*

Presidència: G. B. ZORZOLY, J. BUXÓ.

*9.30 - 9.50 h.*

Étude théorique du chauffage des gaz par rayonnement solaire à hautes températures. G. OLALDE, A. SUWONO, J. L. PEUBE i M. DAGUENET, Laboratoire de l'énergie solaire d'Odelló, CNRS i Laboratoire de Thermodynamique et Energétique de Perpignan. France.

*9.50 - 10.10 h.*

Optimisation de l'utilisation des capteurs solaires. J. P. MADERN, SOFEE. Perpignan, France.

*10.10 - 10.30 h.*

Perspectivas de las células fotovoltaicas de Si y AsGa, costos y eficiencias. J. L. SACEDÓN, Instituto de Física de Materiales, CSIC. Madrid.

*10.30 - 10.50 h.*

Couches minces d'oxyde d'indium à l'étain réalisés par spray. Application aux cellules solaires. M. SAVELLI, Centre d'Études d'Électronique des Solides, Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, France.

*10.50 - 11.20 h.*

PAUSA.

Presidència: M. SAVELLI, J. RIVERA.

*11.20 - 11.40 h.*

Aplicació de les estructures MIS-túnel a la conversió fotovoltaica. J. BUXÓ, LAAS, CURS. Tolosa de Llenguadoc. França.

*11.40 - 12 h.*

Célula solar de silicio policristalino. A. OTERO, J. PIQUERAS, J. MARTÍNEZ y A. CRIADO, Universidad Autónoma de Madrid.

*12 - 12.20 h.*

Láminas antirreflectantes y su aplicación a dispositivos de conversión de energía solar. E. SÁNCHEZ, FEMSA, S. A., Madrid.

*12.20 - 12.40 h.*

Técnicas de simulación y determinación de parámetros por ordenador en las células solares de barrera superficial. L. CASTAÑER, Escola Tècnica Superior de Telecomunicacions de Barcelona.

*12.40 - 13.00 h.*

Technology of  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$  Cells. G. H. HEWIG, Institut für Physikalische Elektronik, Universität Stuttgart. Federal Republic of Germany.

*13 - 15.30 h.*

DINAR

#### SESSIÓ IV

Presidència: G. H. HEWIG, L. CASTAÑER.

*15.30 - 15.50 h.*

Position des composés III-V dans la conversion d'énergie solaire. M. AVEROUS, Centre d'Études d'Electronique des Solides. Montpellier, France.

*15.50 - 16.10 h.*

Propriétés des couches minces CdS obtenues par voie chimique réactive; applications aux cellules  $\text{Cu}_2\text{S-CdS}$ . M. SAVELLI, Centre d'Études d'Electronique des Solides, Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, France.

*16.10 - 16.30 h.*

Dispositivo fotovoltaico de efecto Becquerel interfase Si-Electrolito acuoso. C. SÁNCHEZ, FEMSA, Madrid.

*16.30 - 16.50 h.*

La durée de vie et mobilité des porteurs dans le Si polycristallin destiné aux photopiles solaires. D. BIELLE, G. GASSET, CNRS. Toulouse. France.

*16.50 - 17.10 h.*

PAUSA.

*17.10 - 17.30 h.*

Réalisation de cellules solaires terrestres à jonction p-n par implantation ionique. P. SIFFERT, J. C. MULLER et J. P. PONPON, Centre de Recherches Nucléaires, PREN, Strasbourg, France.

*17.30 - 17.50 h.*

Optimization of CdHgTe graded band gap solar celle. Y. MARFAING et A. BOUAZZI, CNRS, Laboratoire de Physique des Solides. Meudon-Bellevue, France.

*17.50 - 18.10 h.*

**Homouniones de CdTe para celdas solares. J. MIMILA-ARROYO, CNRS. Meudon, Francia, i IPN, México.**

*18.10 - 18.40 h.*

**PAUSA.**

**TAULA RODONA**

**Presidència: M. SAVELLI, A. GERBE, L. CASTANYER, F. SOLÉ, G. H. HEWIG, A. LLORET.**

## ANNEX II



## **PRESIDÈNCIA D'HONOR**

**ALSINA i BOFILL, Josep** — President de l'IEC.

**ARAMON i SERRA, Ramon** — Secretari General de l'IEC.

**CASASSAS i SIMÓ, Enric** — Delegat de l'IEC a la SCCFQM.

**ESTEVE i SUBIRANA, Antoni** — President de la Secció de Ciències de l'IEC.

**FERNÁNDEZ i FERRER, Julià** — Rector de la Universitat Politècnica de Barcelona.

**FONT i ALTABA, Manuel** — Ponent de Cultura de l'Excma. Diputació Provincial de Barcelona.

**PORTA i JUÉ, Jordi** — President de la Secció de Física de la SCCFQM.

**VASSALLS, Gérard** — President de la Universitat Catalana d'Estiu de Prada.

## ASSISTENTS AL COLLOQUI

- AGUILÓ, Magdalena — Geòloga, Universitat de Barcelona.
- ALEMANY i MANZANERO, Jordi — Redactor de la revista «Ajoblanco»,  
Barcelona.
- ALONSO, B. — Físic, Universitat Autònoma de Madrid.
- ALPUENTE i COMAS, Josep — Estudiant.
- ANTÓ i ROCA, Joan — Físic, TELSTAR, S. A., Terrassa (Barcelona).
- ARTUS SURROCA, Alfonso — Enginyer, ROCA, S. A., Barcelona.
- AVEROUS, Michel — Físic, Universitat de Llenguadoc, Montpellier  
(France).
- AYMERICH i HUMET, Xavier — Físic, SCCFQM, Barcelona.
- BELL, Lawrence — Enginyer, ORION, S. A., Barcelona.
- BER BARTOLÍ, José Enrique — Enginyer.
- BIELLE-DASPET, Danielle — Físic, CESR, Tolosa de Llenguadoc  
(France).
- BODIOT, Daniel — Professor, Centre Universitari de Perpinyà (France).
- BONAS i MIRÓ, Joan — Perit Químic.
- BOTTON DE JOCEAYNE — Arquitecte, ETSAB, Barcelona.
- BRIONES, F. — Instituto de Física de Materiales, CSIC, Madrid.
- BUXÓ, Joan — Físic, LAAS, Tolosa de Llenguadoc (France).
- CALDERER, J. M. — Físic, Universitat de Montpellier (France).
- CAMARASA i CASTILLO, Josep M. — Biòleg, Societat Catalana de Bio-  
logia, Barcelona.
- CAPELLA ARMENGOL, Ramón — Industrial, TELSTAR, S. A., Terrassa  
(Barcelona).
- CARBONELL i DALMASES, Joaquim — Enginyer.
- CARRERAS, Francesc — Enginyer, CONSU, S. A., Barcelona.
- CARRERAS i PLANELLS, Ramon — Químic, ETSEI, Terrassa (Barcelona).
- CASASSAS i SIMÓ, Enric — Químic, Facultat de Ciències, Universitat de  
Barcelona.
- CASTAÑER MUÑOZ, Luis — Enginyer de Telecomunicacions, ETSET,  
Barcelona.
- CENDRA i GARRETA, Jaume — Enginyer Industrial, ETSEI, Terrassa  
(Barcelona).
- CLAVAGUERA i PLAJA, Narcís — Físic, Facultat de Ciències, Universitat  
de Barcelona.
- CLAVERIE, Maurice — Sots-Director de PIRDES, CNRS, Paris (France).
- CUESTA i ROCA, Lluís — Estudiant de Física, Universitat Politècnica  
de Barcelona.
- DAGUENET, M. — Professor al CNRS, Odelló (France).
- DE VAL i VINADÉ, Joan Josep — Físic, Barcelona.



DENIS, Pierre — Biòleg, CEA-CENT, Grenoble (France).  
DEVIN, Bernard — Director de «Projet Solaire», CEA, Saclay (France).  
ELIZALDE i RIUS, Emili — Físic, Facultat de Ciències, Universitat de Barcelona.  
ESQUERRA i PIZA, Pere — Enginyer, INGEST, S. A., Barcelona.  
ESTEVE i PUJOL, Joan — Físic, Universitat de Barcelona.  
ESTOP i GRAELLS, Eugènia — Geòloga, Universitat de Barcelona.  
FERNÁNDEZ, Julià — Físic, Rector de la Universitat Politècnica de Barcelona.  
FIGUERAS i DAGA, Albert — Físic, SCSFQM, Barcelona.  
FOLCH i GUILLÈN, Ramon — Biòleg, Societat Catalana de Biologia, Barcelona.  
FOLGUERA i CAVEDA, Eduard — Arquitecte, ETSAB, Barcelona.  
GACIA i ESCAPA, Francesc — Físic, La Seda de Barcelona.  
GALÍ i MEDINA, Salvador — Cristallògraf, Universitat de Barcelona.  
GARRIGA i SAPERAS, Ramon — Enginyer, HIFRENSA, Tarragona.  
GASÒLIBA, Carles A. — Economista, UAB, Bellaterra (Barcelona).  
GASSET, G. — Físic, CESR, Tolosa de Llenguadoc (France).  
GIMBEL i DOMÈNECH, Antoni — Delineant Projectista, REFUS, Barcelona.  
GRANIER, Patrick — Enginyer, Laboratori Termodinàmic Perpinyà (France).  
GUINART i FLORIS, Joan — Instal·lador elèctric, Barcelona.  
HEWIG, G. H. — Enginyer, Universitat de Stuttgart (Bundesrepublik Deutschland).  
JALLE i ALAIZI, Josep — Enginyer, EYSSA, Barcelona.  
JUVELLS i PRADES, Ignasi — Físic, Universitat de Barcelona.  
LARRAMENDI LLOPART, J. Carlos — Enginyer.  
LLORET i ORRIOLS, Antoni — Físic, CNRS, Orsay (France).  
LÓPEZ BERGADÀ, J. M. — Enginyer, ENHER, Barcelona.  
LUQUE LÓPEZ, Antonio — Enginyer, ETSIT, Madrid.  
MADERN, J. P. — Sofee, Perpinyà (France).  
MARFÀ i PAGÈS, J. Oriol — Enginyer Agrònom, INAI.  
MARQUÈS i FERNÁNDEZ, Ricard — Físic, Facultat de Ciències, Barcelona.  
MARTÍNEZ, George — Investigador, Universitat de Perpinyà (France).  
MATA HERBERG, Federico — Estudiant.  
MATZNER, Friedrich-Wilhelm — Enginyer, BENDIBÈRICA, S. A., Barcelona.  
MIMILA ARROYO, J. — Enginyer, UPD, Mèxic.  
MIRABELL i IZARD, Oriol — SEH Hispano-Alemana de Energía Solar, Barcelona.  
MIRANDA TORRENTS, Saturnino — Enginyer, FRICALMI, S. L.

**MORENZA, Josep Lluís** — Físic, Universitat de Barcelona.  
**MÜLLER, Jean Claude** — Físic, Estrasburg (France).  
**MUÑOZ DOMÍNGUEZ, Santiago** — Físic, Vice-rector d'Investigació, UAB, Bellaterra (Barcelona).  
**MUÑOZ TORRALBO, A.** — Enginyer, Director del Centro de Estudios de la Energía, Madrid.  
**PASQUAL i VIVES, Genís** — Professor de Física, Barcelona.  
**PLANA i CASTELLVÍ, Josep A.** — Geògraf, Serveis d'Estudis del Banc Urquijo, Barcelona.  
**NIETO i ALEGRE, Xavier** — Arquitecte, Barcelona.  
**N'DOYE, BANDA** — Professor Universitari, Senegal.  
**OLALDE, Gabriel** — Enginyer, Universitat de Mèxic.  
**OLIVELLA, Ignasi** — Ecòleg, Universitat de Barcelona.  
**OTERO, Antonio** — Físic, UAM, Madrid.  
**PARELLADA i SABATA, Joan** — Físic, Facultat de Física, Universitat de Barcelona.  
**PASCUAL i GAÍNZA, Jordi** — Físic, Universitat de Montpeller (France).  
**PIQUERAS i PIQUERAS, Joan** — Físic, UAM, Madrid.  
**PORTA i JUÉ, Jordi** — Físic, Facultat de Física, Universitat de Barcelona.  
**PUJOL, Ernest** — Enginyer, TELSTAR, Terrassa (Barcelona).  
**PLA, Enric** — Físic, HIFRENSA, Tarragona.  
**RAFELS, Julio** — Director del CIPE, Barcelona.  
**RAMENTOL ROCA, Alberto** — Industrial, IZALCO.  
**RAMOS BERJANO, Francisco** — Físic, Instituto de Óptica, CSIC, Madrid.  
**RECOLONS FIGUERAS, José** — Enginyer, FECSA, Barcelona.  
**RIVERA i ARANDA, Josep** — Físic, CSIC, Barcelona.  
**ROCA i ROSELL, Antoni** — Físic, SCCFQM, Barcelona.  
**ROCAIRES, François** — Enginyer, Laboratori Termodinàmic, Universitat de Perpinyà (France).  
**RODRÍGUEZ, Rafael** — Geòleg, Facultat de Barcelona.  
**RUCABADO VERDAGUER, Manuel** — Sots-Director, RAPIDA, S. A., Barcelona.  
**SACEDÓN, José Luis** — Físic, CSIC, Madrid.  
**SALA i OLLER, Miquel** — Arquitecte, Barcelona.  
**SANAHUJA i PARERA, Blai** — Físic, SCCFQM, Barcelona.  
**SÁNCHEZ, Carlos** — Físic, FEMSA, Madrid.  
**SANCHO, Agustín** — Enginyer.  
**SANTACREU i SEGURA, Antoni** — Estudiant.  
**SAVELLI, Michel** — Físic, Universitat de Montpeller (France).

**SANZ MENDES, Jesús**—Enginyer, Laboratori Semiconductores, ETSIT, Madrid.

**SERRA i FLORENÇA, R.** — Arquitecte, ETSAB, Barcelona.

**SERRA i MESTRES, Francesc** — Físic, UAB, Bellaterra (Barcelona).

**SIRKIS, M.** — Arizona State University (USA).

**SOLÀ i FORCADA, Joan** — Mecànic, Moià (Barcelona),

**SOLÀ i FORCADA, Josep** — Estudiant, Barcelona.

**SOLÉ i PLANAS, Francesc** — Físic, PIHER SEMICONDUCTORS, Granollers (Barcelona).

**SOLER i TORROELLA, Joan** — Industrial Elèctric, SOLER, S. A., Canet de Mar (Barcelona).

**SPINNER, Bernard**—Professor, Centre Universitari, Perpinyà (France).

**SUÑOL i BARRERA, Jordi** — Enginyer, Director OETT, Barcelona.

**SUWONO, Aryadi** — Professor, Universitat de Bandoeng (Indonèsia).

**TINAUT, Diego** — Físic, Instituto de Óptica, CSIC, Madrid.

**TORRENS, Enric** — Economista, TORRENS, Barcelona.

**TORRENT i SERRA, M. Carme** — Física, SCCFQM, Barcelona.

**TREMOSA, Laura** — Enginyer, Directora de «Mundo Industrial», Barcelona.

**TRIGO i LIZARRITURRI, Joan.**

**TRIMBOLI, Adriano** — SIMPLEX, S. A., Saragossa.

**TURA i SOTERAS, Josep M.** — Físic, CSIC, Barcelona.

**VASSALLS, Gérard** — Físic, Universitat de Perpinyà (France).

**VIADER i GUIXA, Pere** — Enginyer, Ajuntament de Barcelona.

**VILANOVA i GASULL, Joaquim** — Industrial, FOGARSA.

**VILASECA i ALABEDRA, Ramon** — Físic, Departament d'Òptica, UAB, Bellaterra (Barcelona).

**WALLNER, I.** — Director d'ASE, Essen (Bundesrepublik Deutschland).

**XINXÓ i MURO, Ferran** — Físic, PIHER SEMICONDUCTORS, S. A., Granollers (Barcelona).



## TAULA

<i>Discurs d'obertura, per J. ALSINA I BOFILL . . . . .</i>	5
<i>Presentació del col·loqui, per FRANCESC SOLÉ I PLANAS . . . . .</i>	9
 Les fonts d'energia: noves perspectives per a Catalunya i la resta de l'Estat espanyol, <i>pel</i> DR. CARLES A. GASÒLIBA . . . . .	11
Programas del Centro de Estudios de la Energía del ministerio de Industria en energía solar, <i>por</i> A. MUÑOZ TORRALBO . . . . .	27
The prospects for the unconventional energy sources in Britain with particular reference to solar energy, <i>by</i> C. M. BUCKLEY . . . . .	33
Aplicaciones térmicas de la energía solar, <i>por</i> D. TINAUT y F. RAMOS.	51
Energía solar i arquitectura, <i>per</i> RAFAEL SERRA I FLORENSA . . . . .	59
Modelisation sur ordinateur d'un système de distillation, <i>par</i> F. ROCARIES, P. GRANIER, B. N'DOYE . . . . .	67
Utilització de tècniques lleugeres en la climatització artificial, <i>per</i> E. PUJOL . . . . .	79
La serre solaire, <i>par</i> P DENIS, P. JOURDAN, J. P. CHIAPAPE, J. DAMANGUEZ . . . . .	89
Étude théorique du chauffage des gaz par rayonnement solaire à hautes températures, <i>par</i> G. OLALDE, A. SUWONO, J. L. PEUBE, M. DAGUENET . . . . .	99
Optimisation de l'utilisation des capteurs solaires, <i>par</i> J. P. MADERN.	107
The state of solar technology developments in the Federal Republic of Germany, <i>by</i> DR. I. WALLNER . . . . .	117
El invernadero ideal, <i>por</i> ADRIANO TRIMBOLI . . . . .	137
Étude de l'anisotropie de dilatation des supports en graphite utilisés dans la fabrication des thermoéléments, <i>par</i> S. BENET, B. ARMAS, R. BERGE, J.-L. DEJARDIN, M. FOURNIER, G. VASSALLS . . . . .	147
Couches minces d'oxyde d'indium dopé à l'étain réalisées par spray. Application aux cellules solaires, <i>par</i> M. SAVELLI, L. SZEPPESSY, K. WADI, J. F. BRESSE . . . . .	157
Informe sobre les activitats del LAAS en el camp de l'energia solar, <i>per</i> J. BUXÓ, D. ESTEVE . . . . .	171
Análisis de la resistencia serie de la transcélula, <i>por</i> A. LUQUE, A. CUEVAS, M. G. AGOST, J. EGUREN . . . . .	177
Célula solar de silicio policristalino, <i>por</i> B. ALONSO OTERO, J. PIQUERAS, J. MARTÍNEZ, A. CRIADO . . . . .	187

Láminas antirreflectantes y su aplicación a dispositivos de conversión de energía solar, <i>por</i> A. NÚÑEZ, F. GRAÑA, C. SÁNCHEZ.	201
Tècniques de simulació i determinació de paràmetres per ordenador en les cel·lules solars de barrera superficial, <i>per</i> L. CASTAÑER, C. FERRARONS, J. CABESTANY.	219
Technology of $Cu_2S$ -CdS solar cells, <i>by</i> G. H. HEWIG, W. H. BLOSS.	235
Position des composés III-V dans la conversion d'énergie solaire, <i>par</i> M. AVEROUS.	249
Aplicació de les estructures MIS-túnel a la conversió fotovoltaica, <i>per</i> J. BUXÓ.	263
Propriétés des couches de CdS obtenues par voie chimique reactive en vue d'applications aux cellules solaires $Cu_2S$ -CdS, <i>par</i> M. SAVELLI, Mme. J. BOUGNOT, J. MARUCCHI, Mme. PEROTIN, M. SIRKIS.	273
Dispositivo fotovoltaico de efecto Becquerel (interfase Si-electrolito acuoso), <i>por</i> F. GRAÑA, C. SÁNCHEZ.	285
Durée de vie et mobilité des porteurs dans le silicium polycristallin destiné aux photopiles solaires, <i>par</i> D. BIELLE-DASPET, G. GASSET.	301
Réalisation de cellules solaires terrestres à jonction P — N par implantation ionique, <i>par</i> J. C. MULLER, J. P. PONPON, A. GROB, J. J. GROB, P. SIFFERT.	319
Homouniones de CdTe para celdas solares, <i>por</i> J. MIMILA-ARROYO, G. COHEN-SOLAL, A. BOUZZI.	335
Annex I. — Programa.	347
Annex II. — Presidència d'Honor. — Assistents al Colloqui.	355

**Acabat d'imprimir als  
tallers d'Impremta Juvenil, S. A.  
de Barcelona  
el dia 12 de gener de 1980**











