

**SOCIETAT CATALANA  
DE FÍSICA  
I SOCIETAT CATALANA  
DE QUÍMICA**

*FONTS ALTERNATIVES*

*D'ENERGIA*

**MATERIALS AVANÇATS  
PER A L'ENERGIA FOTOVOLTAICA,**

A CÀRREC DE

JORDI ANDREU BATALLÉ,

DE LA UNIVERSITAT

DE BARCELONA

El subministrament energètic actual depèn, en gran mesura, dels combustibles fòssils. Durant quant temps es pot mantenir aquesta situació? Quina és l'aportació actual de la producció fotovoltaica d'energia? Quines són les limitacions de la tecnologia fotovoltaica actual? Quines perspectives de futur obren els nous materials per a la producció de la propera generació de plaques fotovoltaïques?

## 1. INTRODUCCIÓ

Dins del cicle «El foc i el medi», organitzat per l'Institut d'Estudis Catalans, aquesta conferència tracta sobre els materials avançats per a la conversió fotovoltaica de l'energia solar. En el nostre cas, bé podríem fer un joc de paraules: què podria fer el foc per al medi? La resposta és que hi pot fer molt. El Sol, com a màxim representant del foc, pot ser la font d'energia més respectuosa amb el medi ambient. La conversió fotovoltaica de l'energia solar és el mètode més avançat i eficaç de conversió de l'energia del Sol en energia elèctrica.

Tractarem a continuació la situació actual del mercat energètic, la viabilitat de la conversió fotovoltaica de l'energia solar, així com la contribució que podem esperar dels nous materials a la producció de plaques fotovoltaïques més eficients i econòmiques.

## 2. SITUACIÓ DEL MERCAT ENERGÈTIC

El consum mundial d'energia ha crescut el 2,6% l'any 2002; aquest valor és superior al creixement mitjà en els darrers deu anys, que ha estat de l'1,4%. La Xina, amb un creixement del 20%, és el país que més ha contribuït a aquest augment, ja que la resta del món ha crescut menys de l'1%.

En la figura 1 observem que l'energia consumida s'extreu, majoritàriament, dels combustibles fòssils: petroli, gas natural i carbó. Només una petita part es produeix a partir de les centrals hidroelèctriques. També hi ha una petita contribució dels combustibles nuclears.

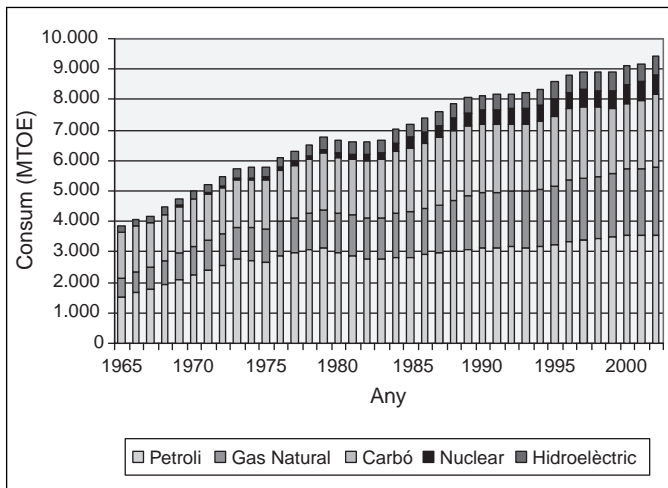


FIGURA 1. Evolució del consum mundial d'energia.

Els combustibles fòssils són responsables de l'augment de  $\text{CO}_2$  a l'atmosfera, que té com a conseqüència l'escalfament global del nostre planeta. Per aquest motiu, s'estan fent esforços per reduir l'ús d'aquests combustibles.

D'altra banda, cal tenir present que les reserves mundials de combustibles fòssils s'estan exhaurint. És molt difícil estimar durant quant temps podrem disposar de combustibles fòssils, però en podem obtenir un paràmetre indicatiu: el quocient entre les reserves i el consum anual. Aquest paràmetre és actualment de seixanta anys per al gas natural i de quaranta anys per al petroli.

No és raonable esperar un acabament sobtat de les reserves de combustible, però sí un increment gradual del preu dels combustibles fòssils, el qual impulsarà el desenvolupament de noves fonts energètiques. La conversió fotovoltaica de l'energia solar és una d'aquestes fonts. Com que prové directament de l'energia del Sol, diem que aquesta font d'energia és renovable i, segons els materials utilitzats, molt respectuosa amb el medi ambient.

### 3. CONVERSIÓ FOTOVOLTAICA DE L'ENERGIA SOLAR

Una placa fotovoltaica permet convertir la radiació solar que arriba a la seva superfície en corrent elèctric. Com que la radiació solar que arriba a la superfície varia segons l'hora solar i la situació atmosfèrica, una placa fotovoltaica produeix una potència variable. Per classificar la producció energètica de les plaques, s'ha definit una il·luminació de referència (AM1,5), que correspon a una energia de  $1.000 \text{ W/m}^2$  amb un espectre normalitzat que s'ha obtingut amb mesures estadístiques sobre la radiació solar real. La potència nominal de les plaques és la potència que produeix la placa quan la il·luminem amb aquesta radiació de referència (AM1,5). Una placa d'un metre quadrat amb un rendiment del 15% té una potència nominal de 150 W. La potència nominal d'una central fotovoltaica és la potència elèctrica que subministraria aquesta central amb la radiació de referència.

Com que la radiació solar és variable, la potència que produeix una central fotovoltaica sota il·luminació solar també varia. Però en un lloc determinat, l'energia que envia el Sol durant un any és pràcticament constant. Això permet confeccionar mapes de la radiació solar que fan possible calcular l'energia anual que produirà una central fotovoltaica. A Catalunya, l'energia anual que proporciona el Sol és approxi-

madament equivalent a 1.500 hores de radiació AM1,5 (unes quatre hores diàries). Una central de 1 kW pic produiria 1.500 kWh anuals. Hi ha diferents causes que fan que les centrals produeixin una mica menys d'energia que la que determinem amb aquest càlcul simple. Per a centrals fotovoltaïques situades a Catalunya s'obté una producció anual de 1.200 kWh per cada kW pic.

Sovint s'han presentat objeccions a la conversió fotovoltaica de l'energia solar que es basen en un desconeixement o mala informació de les característiques d'aquesta tècnica. Una primera objecció és que l'espai necessari per instal·lar les centrals fotovoltaïques és excessiu. És molt fàcil estimar la superfície necessària per abastir un determinat territori amb la tecnologia actual. A Catalunya, amb un consum anual per habitant de 6.000 kWh d'energia elèctrica i una població de 6 milions d'habitants, calen 36.000 milions de kWh anuals. Per produir aquesta energia, necessitem una potència nominal instal·lada de 30 milions de kW pic. Amb plaques con-

321

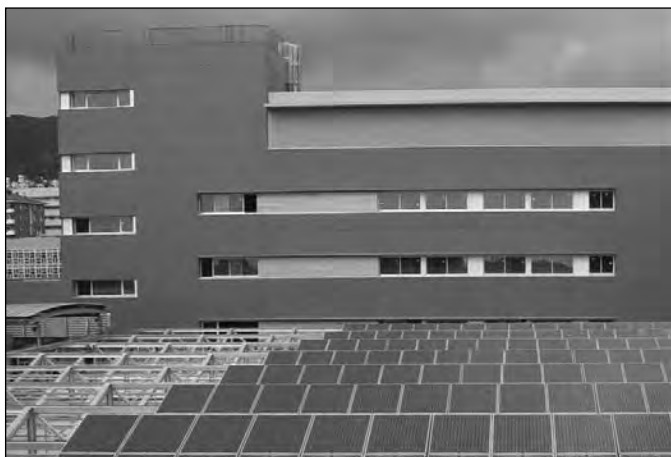


FIGURA 2. Atri solar de la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona.

vencionals del 15 % de rendiment, cal una superfície de 200 milions de  $m^2$ , que representa una superfície inferior a la d'un quadrat de menys de 15 km de costat. Cal tenir present que les centrals fotovoltaïques s'integren en edificis o altres infraestructures i que no ocupen un espai exclusiu. Un exemple d'aquestes centrals integrades és l'atri solar de la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona, que es mostra a la figura 2.

Una altra objecció és que l'energia necessària per produir una placa fotovoltaica és més gran que l'energia que subministrarà en tota la seva vida útil. Això no és cert, ja que les plaques actuals proporcionen l'energia que s'ha utilitzat en produir-les en menys de tres anys i la seva vida útil és superior als trenta anys.

Malgrat el que hem dit fins ara, la producció fotovoltaica d'energia solar és actualment marginal si la comparem amb el consum mundial d'energia.

Però és important destacar que el creixement de la producció de plaques fotovoltaïques ha mantingut una mitjana superior al 20 % anual durant els darrers vint anys. Els punts de la figura 3 mostren una estimació de l'energia anual que produeixen els sistemes fotovoltaïcs, expressada en equivalents energètics de tones de petroli (TEP). La línia blava representa l'evolució de l'energia produïda anualment per aquests sistemes fotovoltaïcs, la qual suposa un creixement de la producció anual de plaques del 23 %. La línia vermella discontinua representa el consum mundial anual de totes les fonts d'energia per al 2002. Veiem que aquest consum anual d'energia es podria abastir amb energia solar fotovoltaica l'any 2050. Per tant, si es manté el creixement actual, la producció fotovoltaica d'energia solar entrarà en el mercat global de l'energia en un període de quaranta a cinquanta anys. Un creixement del 50 % anual de la producció de plaques permetria escurçar aquest període a només vint anys, tal com

mostra la línia verda de la gràfica. Aquest creixement de la producció és fàcilment assolible si alguna de les noves tècniques de plaques en capa prima passa a industrialitzar-se en una producció en sèrie a escala mundial.

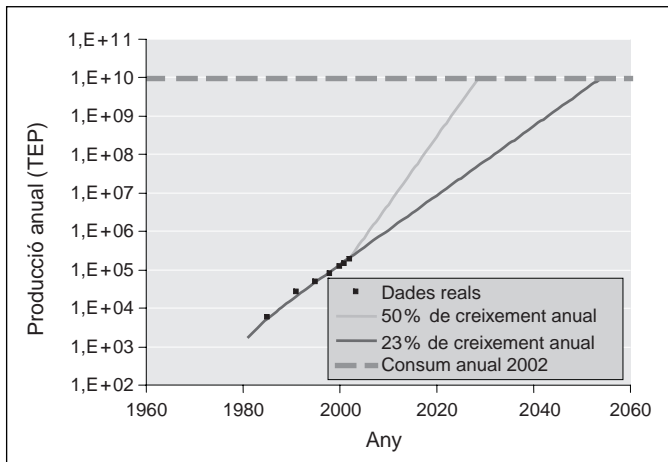


FIGURA 3. *Creixement de l'energia produïda per centrals fotovoltaïques.*

No ens ha de sorprendre el temps que cal perquè la producció fotovoltaica de l'energia solar estigui en condicions de substituir, totalment o parcial, la producció d'energia elèctrica a partir de combustibles fòssils. Això passa sempre que un sistema tecnològic ha de substituir un d'anterior. Podem posar-ne un exemple en el desenvolupament de l'automòbil. Al principi, es veia només com un divertiment exòtic digne d'aristòcrates. La producció d'automòbils era marginal i no es considerava un sistema de transport comparable al tren o als sistemes de tracció animal. Van caldre molts anys de desenvolupament tecnològic i d'industrialització per arribar a l'actual estat de desenvolupament.

#### 4. TECNOLOGIA CONVENCIONAL

El descobriment de l'efecte fotovoltaic s'atribueix a Edmond Becquerel, que el 1839 va observar que una bateria augmentava la seva tensió quan un dels elèctrodes s'exposava a la llum. Albert Einstein va donar, el 1905, una explicació convincent del fenomen, per la qual va ser guardonat amb el Premi Nobel.

Pearson, Chapin i Fuller, dels Laboratoris Bell, van iniciar el 1950 el desenvolupament pràctic de les cèl·lules solars per a la producció d'energia. El seu objectiu era construir una petita central de producció d'energia elèctrica per alimentar els satèl·lits artificials.

La tecnologia actual de cèl·lules fotovoltaïques utilitza cristalls de silici, amb procediments de producció similars als utilitzats en la indústria electrònica. Un cristall de silici de gran àrea té una cara que incorpora una petita quantitat d'àtoms de fòsfor i la conducció elèctrica es realitza pel moviment de càrregues negatives (electrons), mentre que l'altra cara incorpora una petita quantitat d'àtoms de bor i la conducció elèctrica es realitza pel moviment de càrregues positives (forats). Entre les dues cares apareix, de manera natural, un camp elèctric. Tenim, així, un dispositiu anomenat *unió p-n*.

Quan la llum incideix sobre el silici, crea càrregues positives i negatives, que són separades pel camp elèctric. Entre el contacte metàl·lic superior (en forma de reixa) i el contacte metàl·lic inferior, apareix un corrent elèctric. La figura 4 mostra una cèl·lula de silici cristal·lí.

Els cristalls de silici es fabriquen amb un procés complicat. S'extreu l'oxigen de la sorra mitjançant un procés de reducció química. El silici obtingut es purifica en diferents etapes i un procés de creixement de cristall de silici permet obtenir lingots cilíndrics que són tallats a llesques d'uns 300  $\mu\text{m}$  de gruix. El procés és molt car i actualment gran part del silici que



s'utilitza per fabricar plaques fotovoltaïques ha estat rebutjat per la indústria electrònica.

Encara que els processos de producció de cèl·lules de silici cristal·lí evolucionen contínuament, el cost de fabricació de les plaques fotovoltaïques basades en cristall de silici és molt alt i és la principal causa que el cost de producció de l'energia elèctrica amb centrals fotovoltaïques sigui més de quatre vegades més alt que el de la producció basada en centrals convencionals. Per tant, hi ha un gran interès a desenvolupar tècniques de producció de plaques fotovoltaïques que en permetin disminuir els costos de producció.

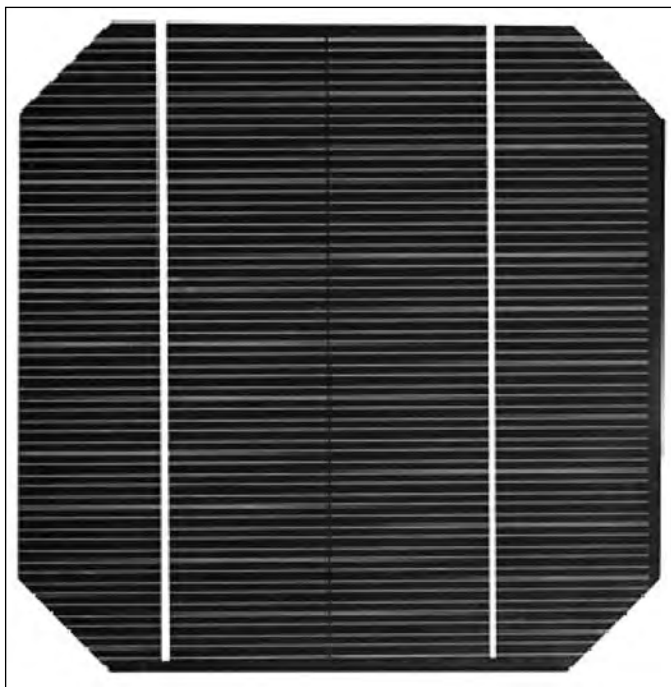


FIGURA 4. Cèl·lula solar de silici cristal·lí.

## 5. TÈCNIQUES EN CAPA PRIMA

Una de les tècniques amb més perspectives de futur es basa en capes primes de silici microcristal·lí hidrogenat ( $\mu\text{-Si:H}$ ). El Grup d'Energia Solar Fotovoltaica i Electrònica de Gran Superfície, integrat en el Centre de Referència en Materials Avançats per a l'Energia de la Generalitat de Catalunya (CeRMAE), està desenvolupant aquesta tecnologia de plaques fotovoltaïques.

Les plaques fotovoltaïques en capa prima es basen en el mateix principi de les cèl·lules de cristall de silici, però el semiconductor amb què es construeix la placa és només una capa molt prima dipositada sobre un suport (substrat). Les primeres plaques de silici en capa prima que s'han desenvolupat es basen en silici amorf hidrogenat ( $\text{a-Si:H}$ ) i ja fa uns anys que s'utilitzen per alimentar petits dispositius electrònics (calculadores, rellotges...). També existeixen comercialment plaques de silici amorf per a la construcció de centrals fotovoltaïques. El rendiment inicial d'aquestes plaques pot assolir valors prou grans (del 13%), però disminueix al cap d'unes mil o dues mil hores d'exposició a la llum solar i s'estabilitza en valors de només 6,5% o 7%. Aquest rendiment s'aconsegueix mitjançant una tècnica molt sofisticada basada a dipositar tres cèl·lules una sobre l'altra.

326

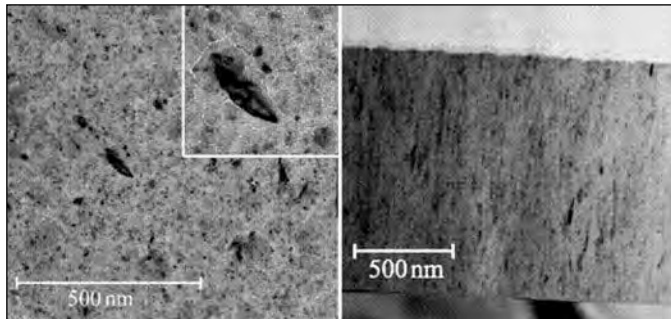


FIGURA 5. *Imatges de microscopi electrònic del silici microcristal·lí hidrogenat.*

Aquest efecte de degradació induïda per la llum no apareix en el silici microcristal·lí. Hi ha una intensa activitat de recerca per tal d'utilitzar aquest material en la producció de plaques de baix cost i alt rendiment.

El silici microcristal·lí és un material semiconductor no homogeni format per cristalls de silici d'uns 10 nm de grandària dins d'una matriu de silici amorf hidrogenat. Els cristalls ocupen la major part del volum del material i el silici amorf hidrogenat ocupa l'espai entre els cristalls. Les característiques òptiques del material són molt similars a les del silici cristal·lí. Les característiques de transport de corrent són més similars a les del silici amorf; en particular, la mobilitat dels portadors és baixa i cal utilitzar cèl·lules amb una capa activa intrínseca situada entre la capa dopada tipus p i la capa dopada tipus n. Hi ha dues configuracions possibles: amb substrats transparents se sol utilitzar la configuració p-i-n, mentre que si el substrat és opac se sol utilitzar la configuració n-i-p. En tots dos casos la llum entra primer per la capa p de la cèl·lula).

Una cèl·lula d'unió p-i-n o n-i-p funciona bé si la capa intrínseca és molt prima (entre 500 nm i 1.000 nm). Però el silici microcristal·lí té una absorció òptica baixa (transició òptica indirecta) i caldria un gruix gran de la capa de silici intrínsec (i) per absorbir tota la llum incident sobre la cèl·lula. És fàcil calcular el corrent màxim que podríem obtenir amb una cèl·lula de silici en funció del gruix. La figura 6 mostra aquest resultat per a silici cristal·lí i per a silici microcristal·lí hidrogenat.

Podem observar que, amb una cèl·lula de 1.000 nm, només obtenim una petita part del corrent màxim, que és de 43 mA/cm<sup>2</sup>.

El mètode principal per millorar el rendiment de les cèl·lules de silici microcristal·lí és augmentar el corrent de la cèl·lula mitjançant tècniques que permetin incrementar la quantitat de llum absorbida. Aquestes tècniques s'anomenen *tècniques de confinament òptic* i les descriurem a continuació.

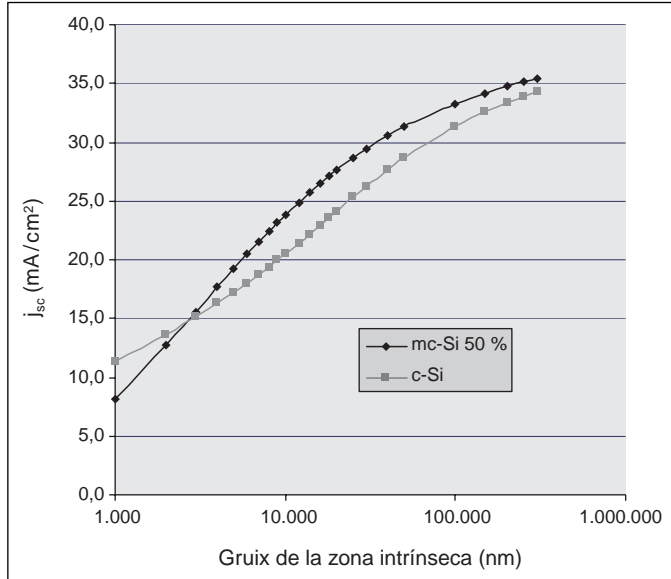


FIGURA 6. Densitat de corrent de la cèl·lula en funció del gruix.

La figura 7 mostra un esquema d'una cèl·lula n-i-p de silici amb una estratègia de confinament òptic. Sobre un substrat de vidre es diposita una capa metàl·lica reflectora; al damunt, un conductor transparent ( $\text{SnO}_2$  o  $\text{ZnO}$ ); després, les capes de silici n-i-p i, finalment, un altre conductor transparent. La llum incident travessa l'estructura n-i-p de silici, on és parcialment absorbida, es reflecteix en el mirall metàl·lic posterior i torna a travessar la n-i-p. L'òxid conductor transparent és rugós i dispersa la llum incident; en conseqüència, la llum travessa l'estructura n-i-p obliquament i, per tant, el seu recorregut efectiu a través del silici és diverses vegades el gruix de la capa de silici. Aquest fet augmenta la quantitat de llum absorbida i, per tant, el corrent de la cèl·lula.

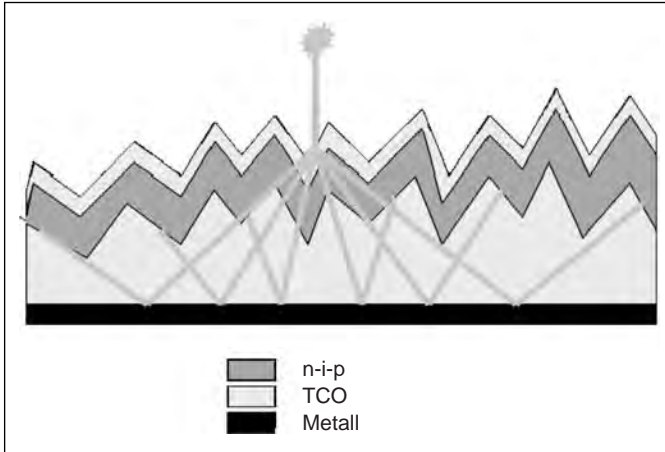


FIGURA 7. Confinament òptic d'una cèl·lula d'unió n-i-p.

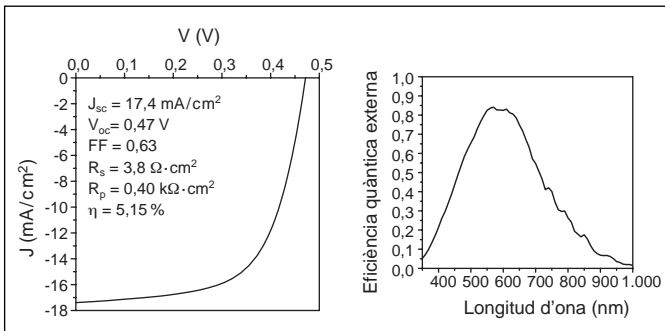


FIGURA 8. Corba  $I(V)$  i eficiència quàntica externa per a una cèl·lula de  $\mu\text{c-Si:H}$ .

La figura 8 mostra la corba  $I(V)$  d'una cèl·lula solar de silici microcristal·lí obtinguda pel nostre grup. La primera gràfica mostra el corrent en funció de la tensió. Encara que el rendiment és moderat, un resultat important és que es manté estable després de cinc mil hores d'il·luminació. D'altra

banda, veiem que el corrent és molt més petit que el màxim de  $43 \text{ mA/cm}^2$  que obtindríem si tota la llum solar fos absorbida per la capa intrínseca.

La segona gràfica mostra l'eficiència quàntica externa en funció de la longitud d'ona de la llum incident. Aquest paràmetre ens indica la proporció de fotons d'una determinada longitud d'ona que són absorbits per la cèl·lula. Aquesta gràfica és de gran utilitat per estudiar el confinament òptic en cèl·lules de silici microcristal·lí.

Quan es comença a desenvolupar una nova tecnologia de plaques fotovoltaïques, és molt útil estimar quin és el màxim rendiment que podem assolir. Aquesta estimació es basa en els paràmetres optoelectrònics del material i en un model del comportament del dispositiu. Si utilitzem un model teòric per a la cèl·lula p-i-n o n-i-p de silici microcristal·lí i suposem que aconseguim absorbir tota la llum en una cèl·lula de només  $500 \text{ nm}$ , obtenim un rendiment de més del  $19,3\%$ , mentre que si aconseguim absorbir tota la llum solar en una cèl·lula de  $1.000 \text{ nm}$  obtenim un rendiment del  $17,1\%$ .

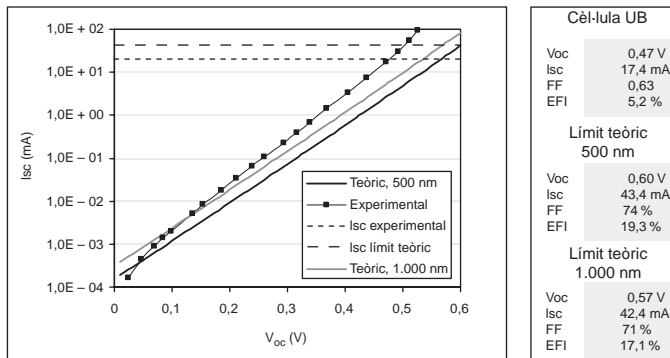


FIGURA 9. Estimació del rendiment màxim d'una cèl·lula de silici microcristal·lí.

## 6. SUBSTRATS PLÀSTICS FLEXIBLES

Quan un substrat sobre el qual s'ha de dipositar el silici en capa prima s'introdueix en el sistema de dipòsit, cal esperar un temps determinat abans de començar a dipositar la capa de silici. Si la superfície de substrat que es carrega en cada operació és petita, el temps d'espera pot ser més gran que el temps que s'utilitza per dipositar la capa. Per això cal dissenyar sistemes de dipòsit que permetin introduir una gran superfície de substrat en cada operació de càrrega. Això és molt més fàcil si s'utilitzen substrats flexibles, que es poden carregar en forma de bobines que contenen grans superfícies de substrat. Un altre avantatge d'aquesta estratègia consisteix a fabricar les plaques flexibles en una planta de producció i distribuir-les a diferents plantes de producció secundàries que utilitzen aquestes plaques flexibles per construir el producte final (plaques integrades en mòduls arquitectònics, sostres per a vehicles, etc.).

Els substrats flexibles metàl·lics permeten temperatures de dipòsit més altes, però fan més difícil la interconnexió entre cèl·lules. Els substrats flexibles plàstics permeten una interconnexió més fàcil (no són conductors), però la temperatura de dipòsit ha de ser més baixa (entre 90 i 150°C).

El nostre grup està desenvolupant una tècnica de dipòsit químic en fase de vapor activat per catàlisi superficial en un fil calent (*hot-wire chemical vapor deposition*, HWCVD), que permet dipositar silici microcristal·lí de bona qualitat a baixa temperatura a partir d'un precursor en fase gas ( $\text{SiH}_4$ ). Utilitzem aquesta tècnica per desenvolupar cèl·lules de silici microcristal·lí sobre substrat plàstic (naftalat de polietilè, PEN).

## 7. CONFINAMENT ÒPTIC SOBRE PEN

Hem comentat abans la tècnica de confinament òptic, basada en reflector posterior i òxids conductors transparents amb rugositat controlada. El grup de la Universitat de Barcelona està desenvolupant una tècnica de confinament òptic basada en el control de la textura superficial del plàstic (PEN) mitjançant litografia d'impressió a escala nanomètrica. Amb aquesta tècnica es preparen substrats de PEN amb textura controlada i s'hi diposita una capa de conductor metàl·lic i una capa prima (uns mil nanòmetres) d'òxid conductor transparent. Les capes de silici (n-i-p) es dipositen sobre aquest reflector i la cèl·lula es completa amb un contacte superior d'òxid conductor transparent. L'esquema d'una cèl·lula que incorpora aquest reflector es presenta a la figura 10.

332

La tècnica de litografia d'impressió a escala nanomètrica (NIL) utilitza un tampó amb textura superficial controlada i transfereix aquesta textura sobre la superfície del polí-

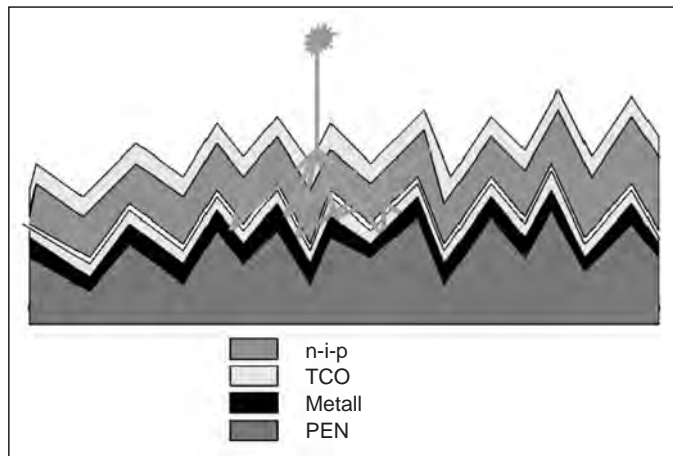


FIGURA 10. Cèl·lula solar amb reflector posterior sobre plàstic texturat.



mer aplicant una pressió i una temperatura controlades durant un temps determinat. La figura 11 mostra l'esquema d'un procés d'impressió, mentre que la figura 12 mostra el sistema experimental utilitzat.

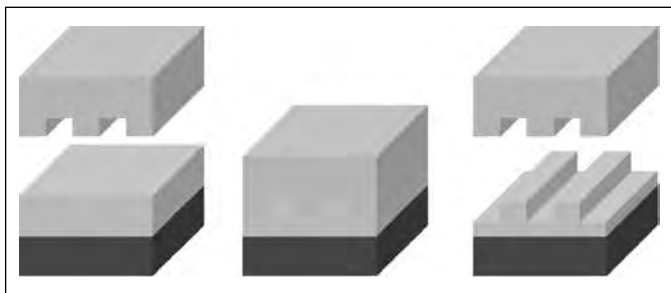


FIGURA 11. *Procés d'impressió a escala nanomètrica mitjançant NIL.*

Amb la tècnica NIL és possible preparar tant textures aleatòries com textures fabricades. L'objectiu és que la cèl·lula absorbeixi el màxim de llum incident perquè es transformi en corrent elèctric. Per aconseguir aquest fi, cal estudiar el comportament òptic de la superfície texturada.

Aquest estudi es realitza utilitzant un mesurador de la transmitància i reflectància òptiques en funció de l'angle. La figura 13 mostra un esquema d'aquest aparell, mentre que la figura 14 en mostra una fotografia.

L'estudi òptic es basa a controlar els diferents processos tecnològics:

- texturat del PEN amb NIL
- dipòsit del reflector metàl·lic
- dipòsit de l'òxid conductor transparent
- dipòsit del semiconductor n-i-p
- dipòsit del conductor transparent posterior.

Com a conductor transparent s'utilitza  $\text{ZnO}$  o  $\text{SnO}_2$ . Per a cada capa dipositada, es determina la transmitàn-



FIGURA 12. *Sistema NIL.*

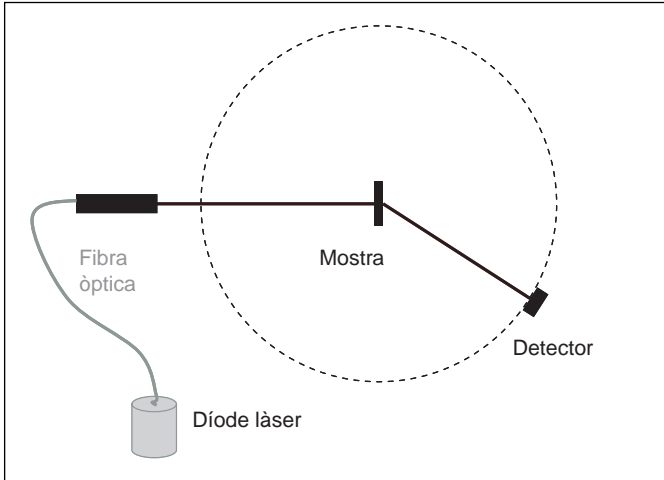


FIGURA 13. Esquema d'un sistema de mesura de transmitància i reflectància en funció de l'angle.

335

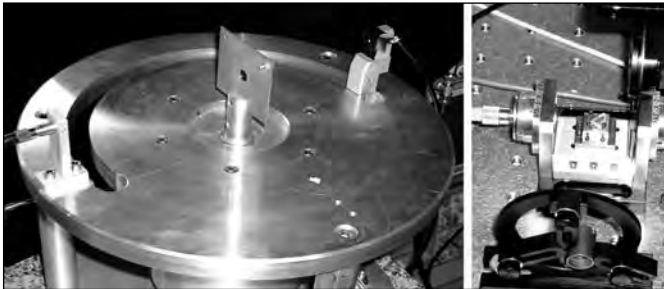


FIGURA 14. Sistema de mesura de transmitància i reflectància en funció de l'angle.

cia i la reflectància òptica en funció de l'angle. Aquestes mesures permeten estimar la quantitat de fotons absorbits en el semiconductor i el màxim corrent que pot produir la cèl·lula solar.

Un exemple de la influència de la textura superficial en la dispersió de la llum que incideix en una superfície es

pot veure a la figura 15. S'hi mostra l'energia de la llum detectada en funció de l'angle per a una capa d'òxid conductor transparent d'una rugositat de quaranta nanòmetres i per a un vidre esmerilat de rugositat molt superior.

Aquesta dispersió de la llum està directament relacionada amb l'augment de l'absorció òptica de la cèl·lula.

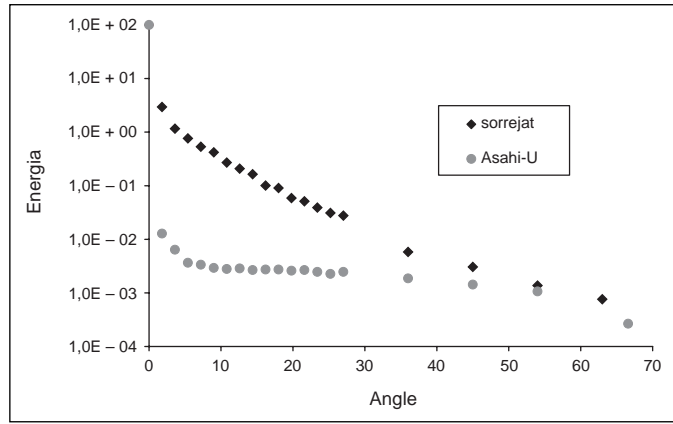


FIGURA 15. *Dispersió de la llum en funció de l'angle.*

## 8. CONCLUSIONS

— La producció d'energia elèctrica a partir de la transformació fotovoltaica de l'energia solar pot subministrar la major part de l'energia elèctrica el 2050 si es manté el creixement anual de més del 20% de la producció de plaques.

— Les tècniques en capa prima basades en silici tenen un marge important per augmentar-ne l'eficiència i disminuir-ne els costos de producció.

— El mercat fotovoltaic està actualment en els seus inicis i cal un gran esforç en R + D.

— Moltes empreses multinacionals importants tenen activitat en el sector.

— Actualment, encara és possible per a moltes empreses entrar en el sector. Això ja no serà tan fàcil quan els volums de producció siguin més importants.

