

**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 silici¹, com a estructures més atractives per a l'ús terrestre, com les barreres Schottky.²

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, μ 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:

$$J_p(x=0) = qS_p (p - p_0), \quad (5)$$

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 aproximades³ per a camp elèctric nul o constant fins a les que consideren el dispositiu fraccionat en zones de camp quasi-constant.⁴

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.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} \cdot$$

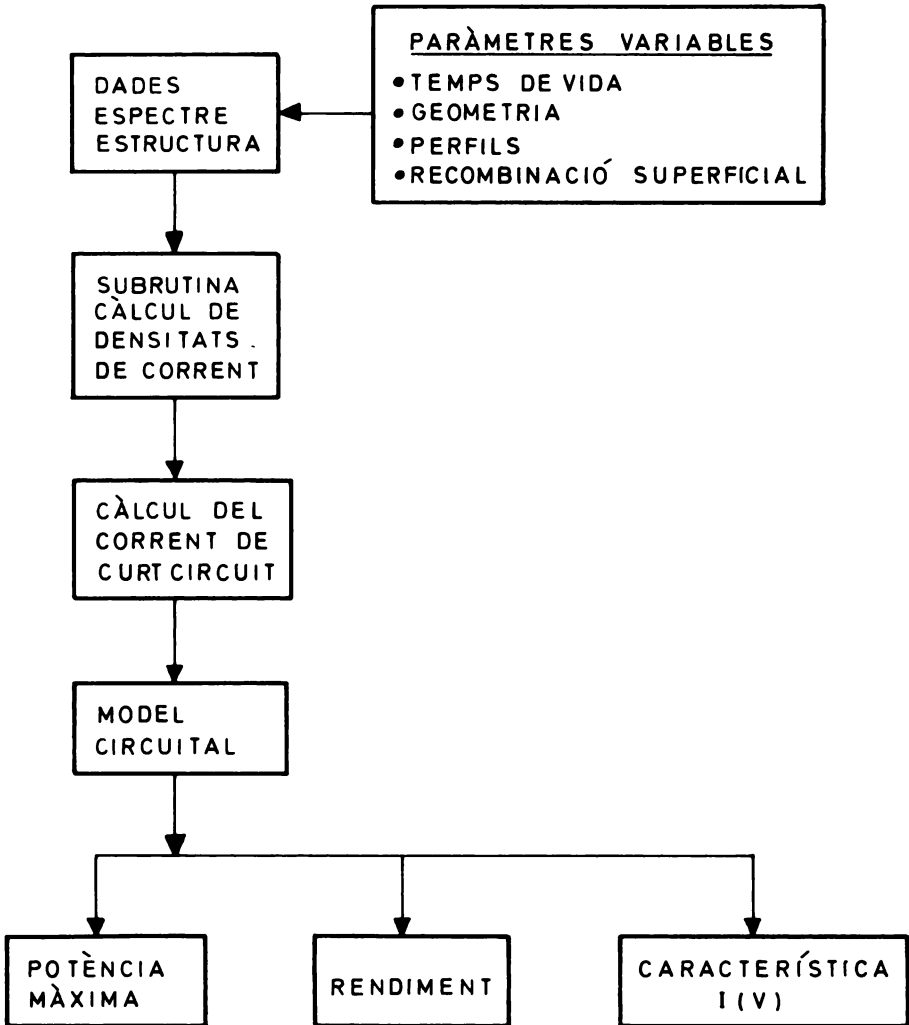


FIGURA 1. Procediment general de simulació.

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 semiconductor 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.^{2, 5, 6} 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.

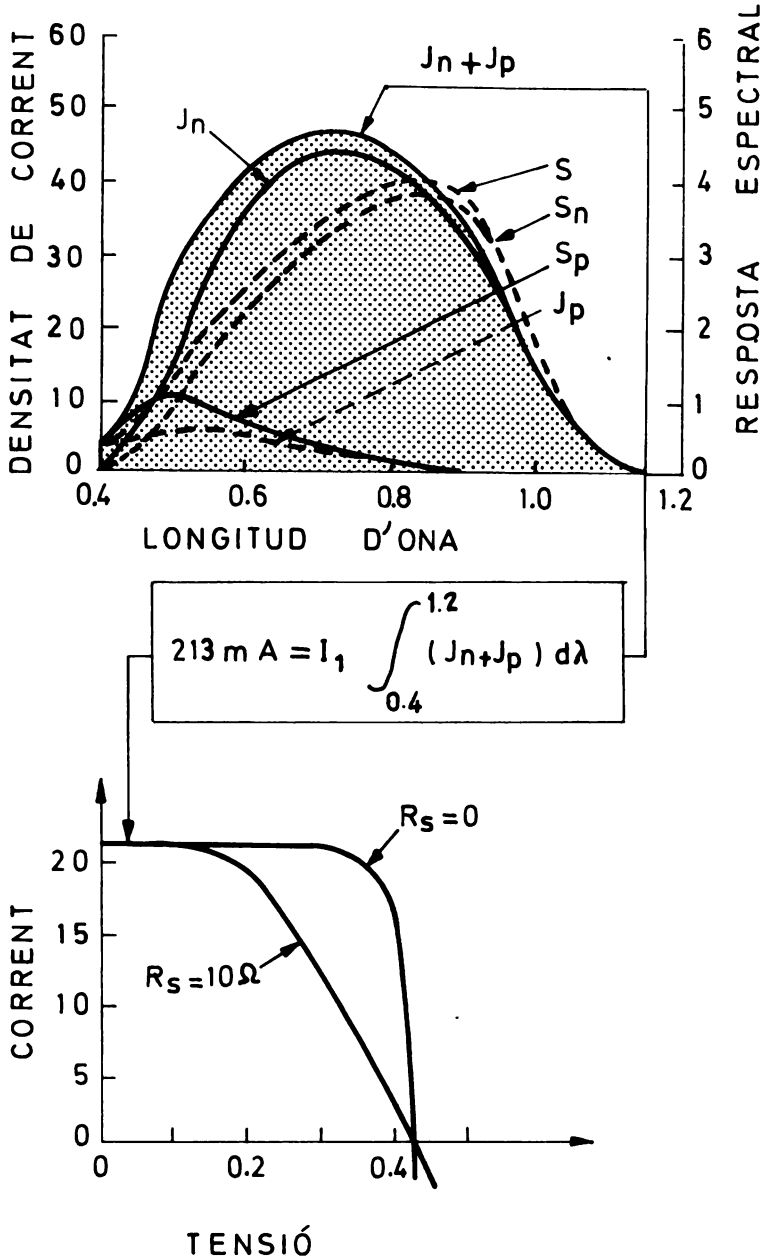


FIGURA 2. Representació de la resposta espectral i de la característica $I(v)$ en cèl·lula solar de silici n+/p.

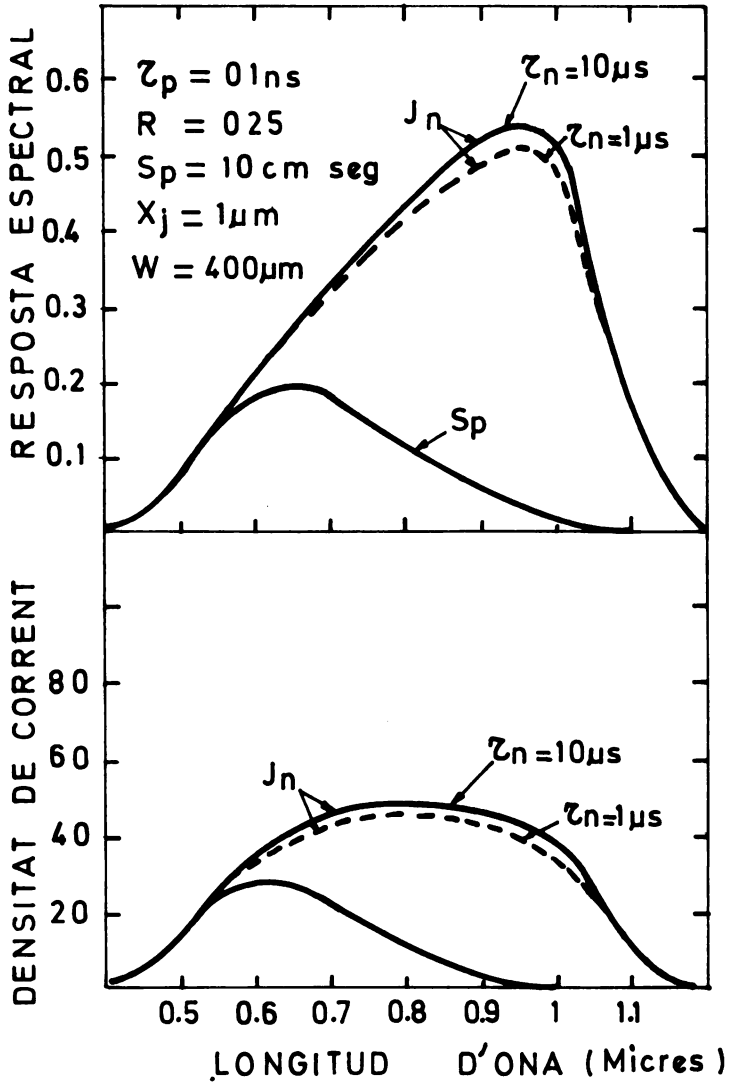


FIGURA 3. Resposta espectral de cèl·lules solars d'unió n+/p de silici amb camp elèctric nul o constant.

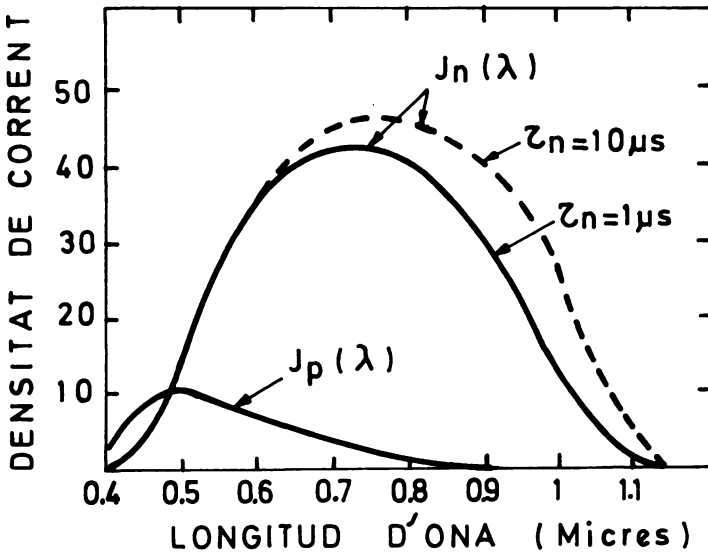
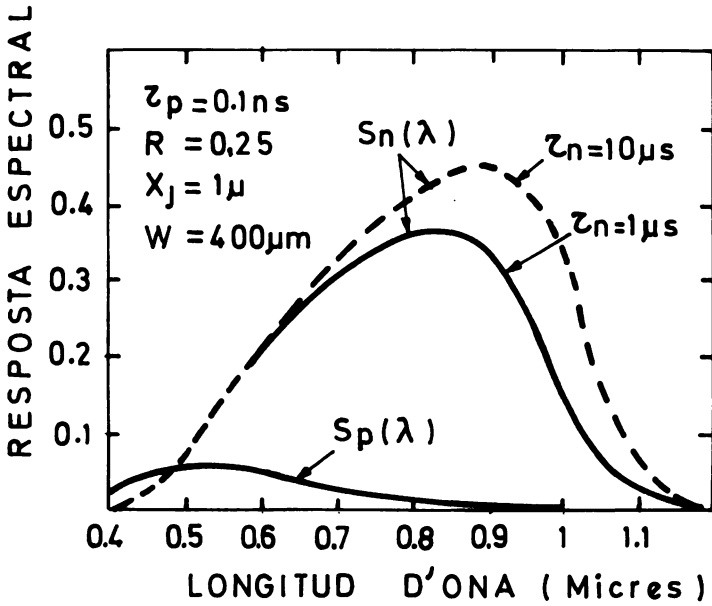


FIGURA 4. Densitat de corrent en funció de la longitud d'ona per a alguns valors del camp elèctric.

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, ϕ_{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.

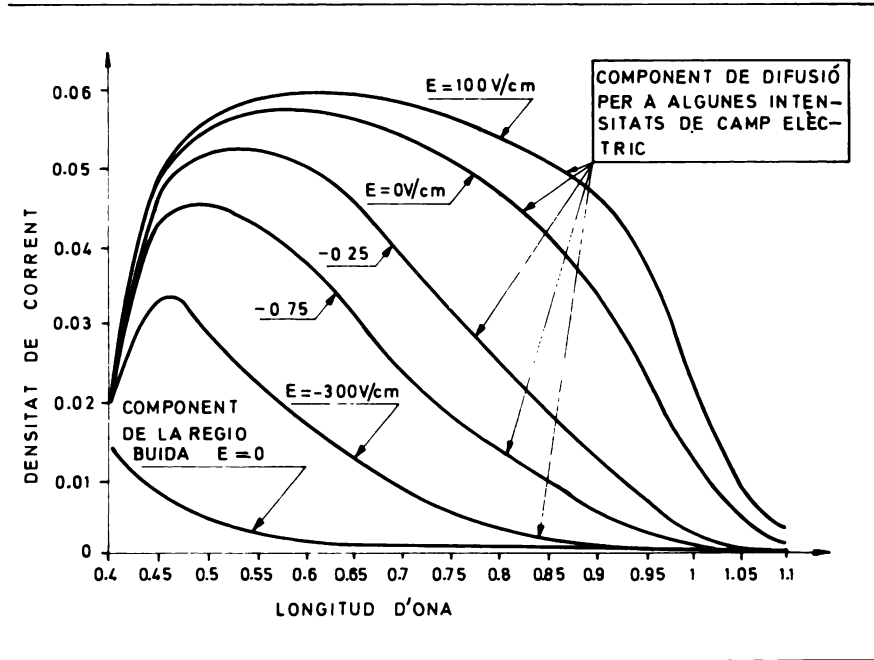


FIGURA 5. Diverses possibilitats estudiades en barrera Schottky amb il·luminació frontal i posterior.

• 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;

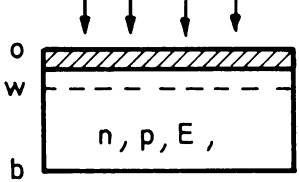
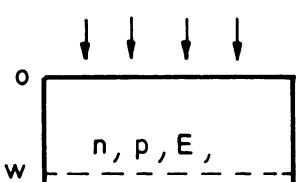
GEOMETRIA	CONDICIONS
	<p>IL.LUMINACIÓ FRONTAL SEMICONDUCTOR N O P CAMP ELÈCTRIC $E = 0 \quad 0 \quad E \neq 0$ $\tau_n \text{ o } \tau_p, b$ VARIABLES</p>
	<p>IL.LUMINACIÓ POSTERIOR SEMICONDUCTOR N O P CAMP ELÈCTRIC $E = 0 \quad 0 \quad E \neq 0$ $\tau_n \text{ o } \tau_p, b$ VARIABLES</p>

FIGURA 6. Corrent total de curt circuit en funció del valor i el signe del camp elèctric.

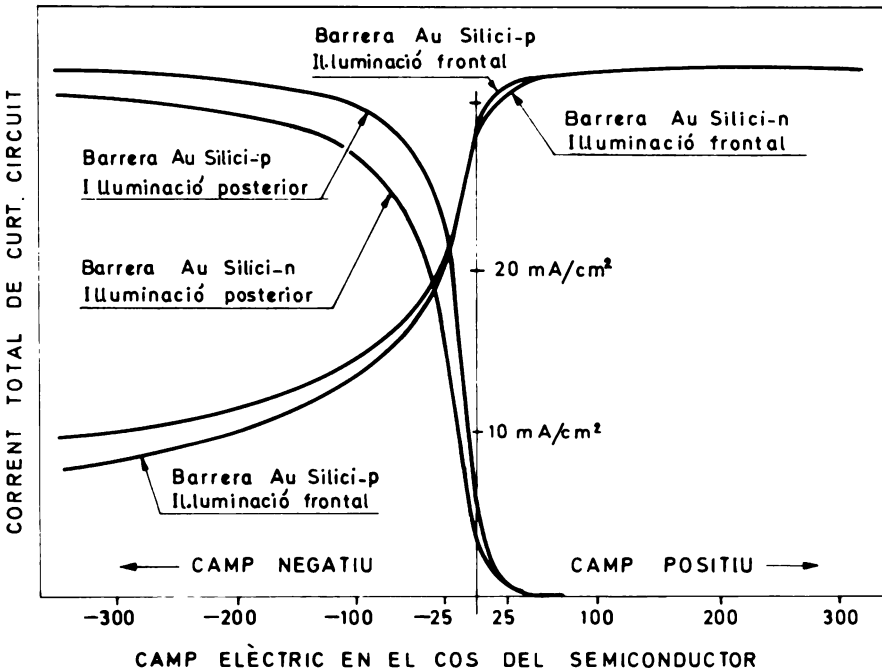


FIGURA 7. Corrent total en funció del gruix del material.

- 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 μ s i un gruix de semiconductor de 100 μ 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

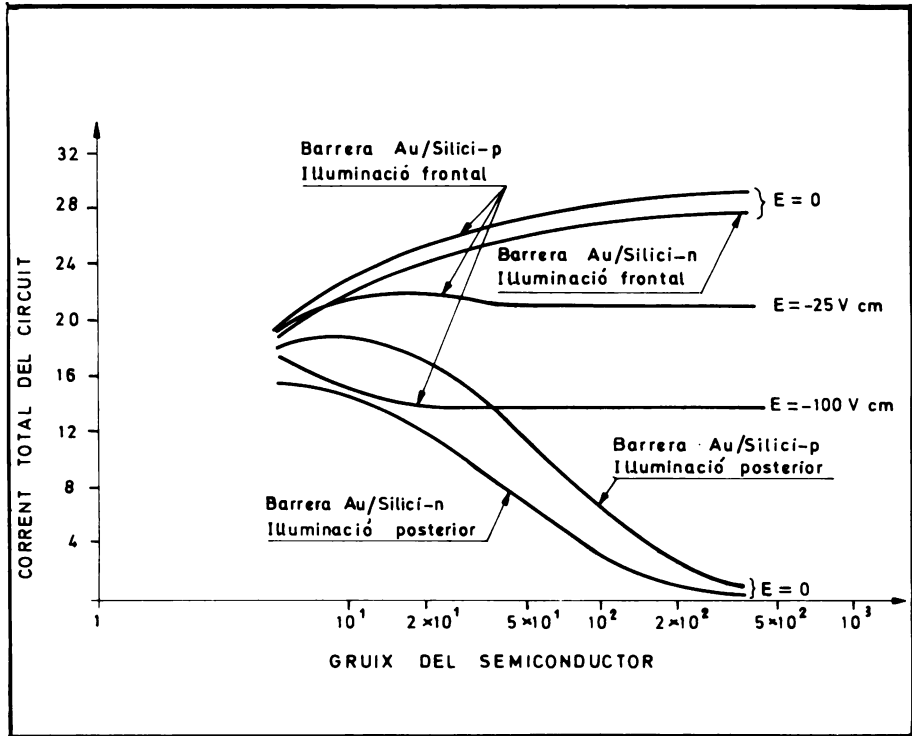


FIGURA 8. Variació del rendiment de la conversió de la cèl·lula Schottky en funció del camp elèctric aplicat.

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.

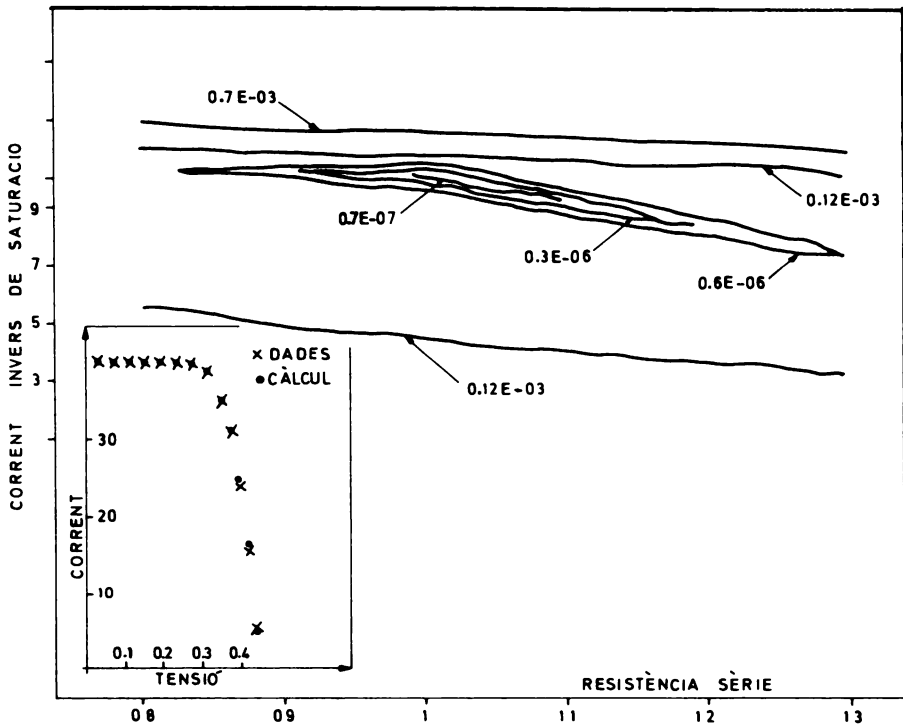


FIGURA 9. Corbes isoerror en la determinació dels valors dels paràmetres del model circuital.

El valor de l'alçària de la barrera ϕ_{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 ⁷

$$E(f) = \sum_1^N e(qz_i) = \sum_1^N |I_s(qz) - I_m(z)|^2$$

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.