

TECNOLOGIA: Les noves cèl·lules solars

per Francesc Solé

El present treball intenta presentar el desenvolupament i l'estat actual de les tecnologies en cèl·lules solars fotovoltaïques. Tanmateix analitza la necessitat tecnològica d'abaratir el cost de les mateixes i les diferents recerques endegades en aquest sentit en diferents països.

Francesc Solé i Planas (Barcelona, 1943) es llicenciat en Ciències Físiques per la Universitat de Leipzig, Alemanya. Ha treballat durant 10 anys en recerca de l'estat sòlid a Piber Semiconductors, S.A.

	TIPUS D'ESTRUCTURA	RENDIMENT	LABORATORI
La cèl·lula solar de silici monocristal·lí	M P/Si	17%	SOLAREX
	SHOTTKI-Si	12,5%	L.E.P.
	N-P Si*	10%	A.E.G.
	SHOTTIKI-Si amorf	5,5%	R.C.A.
	N-P GAAS	15%	J.L.P.
	N-CdS/P-InP	15%	BELL LAB.
	N-Cds/P-Cdle	8%	STANFORD UNIV.

En aquest tipus de cèl·lula, malgrat haver estat desenvolupada durant els anys cinquanta als laboratoris de la Bell Telephone i ésser la primera a gaudir de maduresa tecnològica, no fou fins a l'any 1973 que d'una eficiència de conversió entorn del 10%, hom passà a eficiències del 14%, primer, i més tard del 17% (I), (vegeu fig. 1).

En la figura 2 hom presenta, d'una manera esquemàtica, l'estructura d'una cèl·lula solar d'aquest tipus. Hi són recollits els paràmetres bàsics. Val a dir que la cèl·lula és de silici monocristal·lí d'alta puresa, anomenat també de qualitat "semiconductor"*.

Les tecnologies de fabricació d'aquestes cèl·lules solars són fonamentalment les emprades correntment en la fabricació de dispositius microelectrònics, és a dir, de l'estat sòlid. La combinació d'aquestes tècniques, permet doncs realitzar cèl·lules solars de silici, amb estructures electròniques equivalents, però amb diferències físiques evidents. (Vegeu fig. 3)

* Si policristal·lí de puresa "semiconductor"

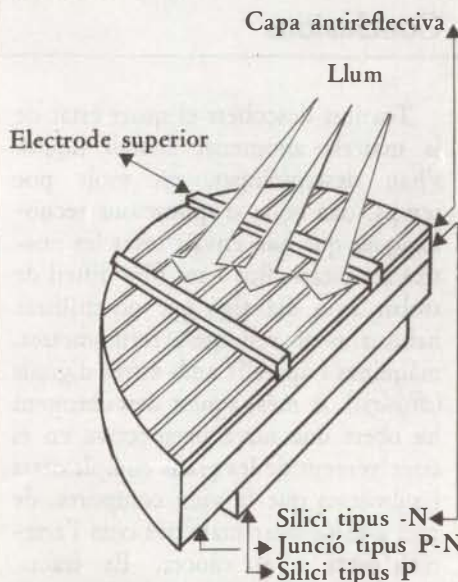
Fig. 1

Estructura i rendiments de diferents cèl·lules fotovoltaïques.

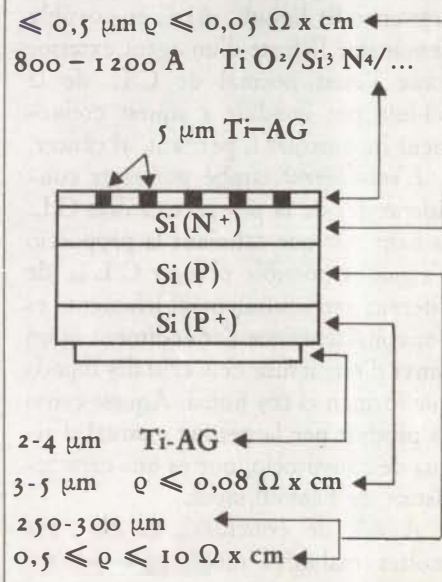
Fig. 2

a) Secció d'una cèl·lula solar de silici.

Cèl·lula de silici

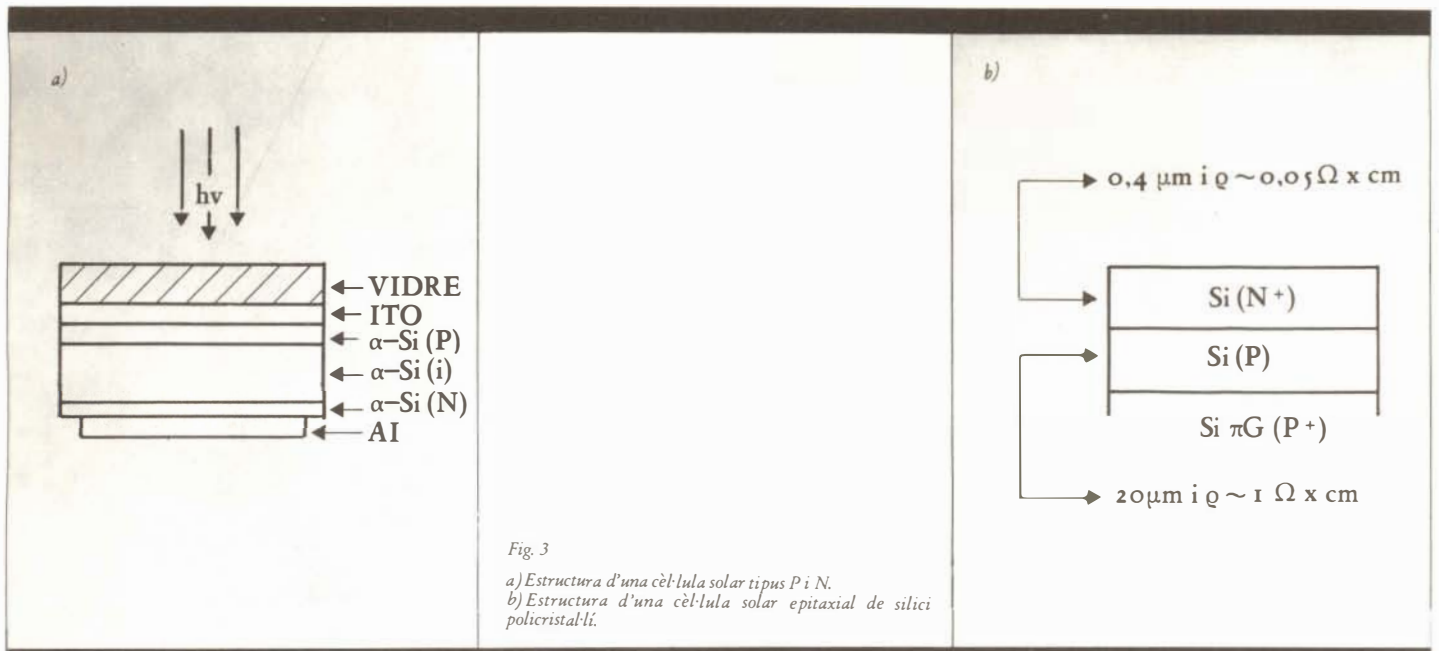


b) Esquema d'una cèl·lula solar de silici.



Tecnologies de fabricació

Entre aquestes caldria esmentar:
E- La difusió tèrmica. La difusió controlada d'impureses en un sòlid (silici), mitjançant la introducció d'àtoms aliens en la xarxa cristal·lina



del silici (dopatge). Aquest és un procés tèrmic realitzat a alta temperatura (850-1150 °C).

– La implantació iònica. En aquest procés, realitzat a baixa temperatura, les impureses s'introdueixen en la xarxa cristal·lina del silici (implantació) mitjançant l'acceleració dels ions a energies properes als 150 KeV i segons orientacions cristal·logràfiques preferents del silici. La figura 4 il·lustra esquemàticament aquest procés.

– La fotolitografia. Mitjançant l'aplicació de resines fotosensibles especials damunt la superfície de la cèl·lula solar, és possible engravar les geometries adients en aquesta. (Vegeu "Ciència" n.º 14)

– La deposició de metalls en el buit. Els contactes de la cèl·lula solar, s'obtenen dipositant en el buit, mitjançant tècniques d'evaporació més o menys convencionals, metalls bons conductors elèctricament. Normalment els metalls són Ti, Pd, Ag, Al, Au, etc...

Altres cèl·lules de silici monocristal·lí

Així doncs, a partir de l'estructura típica d'una cèl·lula de silici com la il·lustrada en la figura 2, foren endegats tota una colla de treballs, tant experimentals com teòrics, per optimitzar els diferents paràmetres electrònics de la cèl·lula solar, i, per tant, per millorar-ne l'eficiència de conversió. Així, Lindmayer l'any 1973 reeixí a desenvolupar una nova cèl·lula coneguda amb el nom de "cèl·lula violada" (*violet cell*) que té la característica fonamental d'ésser molt més sensible a la radiació ultraviolada. Aquesta cèl·lula treballa amb una junció de tipus N⁺ molt poc fonda, de l'ordre de les 0,2 micres, mentre que les tradicionals treballen amb fondàries de 0,5 micres. Segons Lindmayer,

l'efecte principal que hom aconseguix amb aquesta nova estructura, en reduir l'amplada de la zona fortament dopada ($C_B \sim 10^{20}$ at/cm³), és de reduir la probabilitat de recombinació dels portadors en aquesta zona i, per tant, d'augmentar el temps de vida dels portadors generats. Cal assenyalar que la cèl·lula violada posseeix una eficiència de conversió de l'ordre d'un 15% i ha estat fonamentalment desenvolupada per aplicacions espacials, on la radiació ultraviolada és quasi tres vegades més forta que sobre la superfície de la Terra (condicions AMO).

La cèl·lula solar epitaxial.

Un altre treball d'optimització de l'estructura ha estat fet pel grup

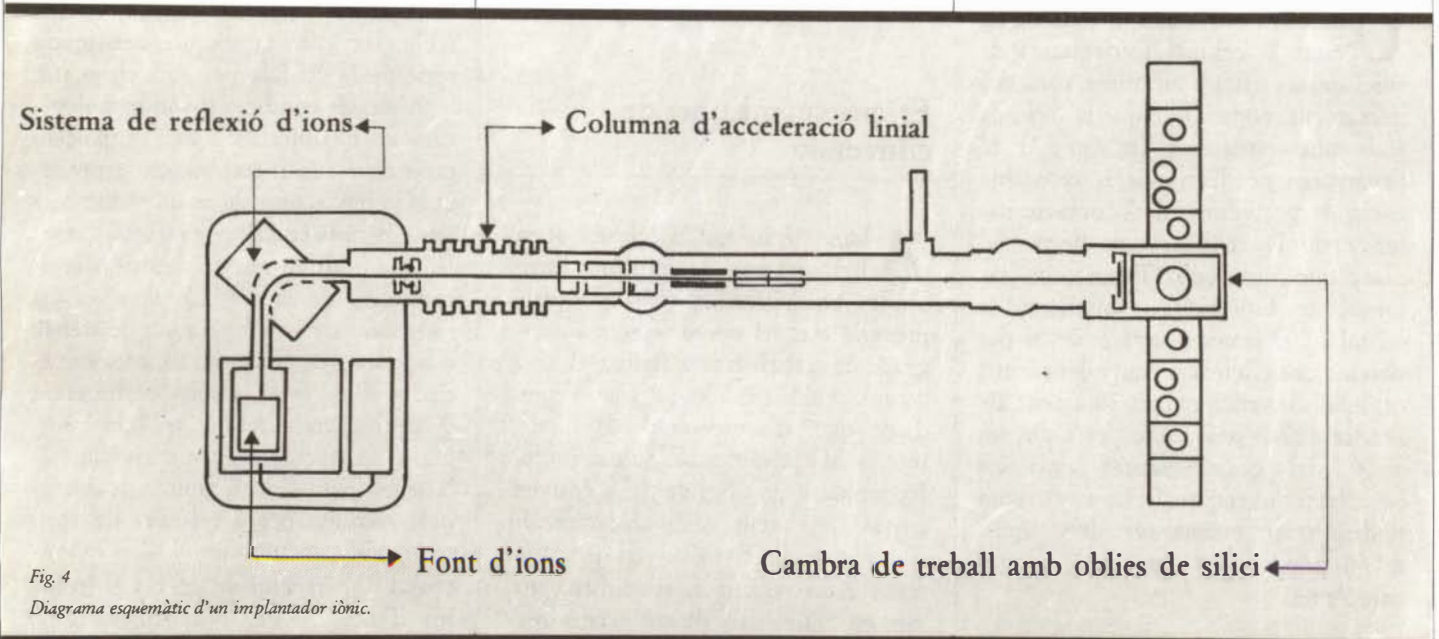
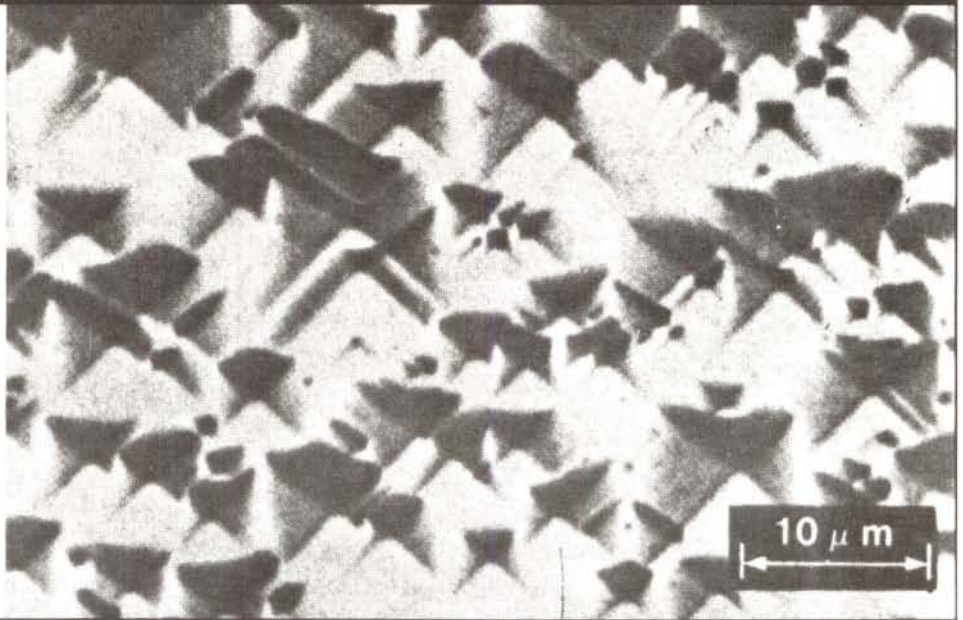


Fig. 5

Superfície de silici (1.0.0.) atacada químicament amb la típica estructura piramidal.



de recerca de la RCA. Mitjançant el creixement epitaxial de silici (3), hom aconsegueix d'optimitzar els gruixos i els dopatges de l'estructura bàsica de la cèl·lula i, per tant, els seus paràmetres electrònics. La flexibilitat que permet la tecnologia de creixement epitaxial de silici fa possible la realització d'estructures electròniques interessants que d'alta manera són tecnològicament gairebé impossibles. Ens referim especialment al fet d'obtenir tant capes suficientment primes (0,3 - 10 μ) com dopatges abruptes i de tipus diferents (n-p) (dopatge n o p).

Cèl·lula de silici amb camp retrodifusor.

Una nova estructura introduïda ha estat la cèl·lula fotovoltaica de silici monocristal·lí amb una zona p⁺ (fortament dopada). Aquesta cèl·lula amb una estructura (n⁺/p/p⁺) té l'avantatge de disminuir la recombinació de portadors en el contacte inferior de la cèl·lula, per efecte del camp que introdueix. Tanmateix, garanteix un bon contacte òhmic de la cèl·lula, i el gruix necessari de Si per obtenir una eficiència equivalent a una cèl·lula convencional és solament de l'ordre de les 100 micres, és a dir, un 30% del gruix emprat amb les cèl·lules convencionals (4 i 5), com poden ésser estructures dels tipus: n⁺/n/p/p⁺ o p⁺/p/n/n⁺ i més complexes.

La cèl·lula solar "texturitzada"

Un altre tipus de millorament introduït en la cèl·lula de silici convencional ha estat portat a terme emprant com a material de base silici monocristal·lí d'orientació (1.0.0) en lloc del clàssic (1.1.1.). Aquest canvi d'orientació en el material permet, mitjançant atacs químics anisotròpics (preferencials), d'obtenir una superfície selectiva, anomenada també "texturitzada", que substitueix les capes antireflectores usals (SiO₂, TiO₂, SiN₄, T₂O₃). A la figura 5 veiem una superfície de silici (1.0.0.) atacada químicament amb la típica estructura piramidal, que permet de reduir les pèrdues de fotons per reflexió en la superfície de la cèl·lula del 35% al 15%

Eficiència màxima de conversió

Abans de deixar la cèl·lula de silici, així com les millores introduïdes en successius treballs experimentals menats per diferents autors i grups de treball fins a arribar al 17% actual, voldríem cloure aquest tema dient que, d'acord amb els models teòrics d'optimització d'una cèl·lula fotovoltaica de silici de tipus convencional (feta amb silici monocristal·lí d'alta puresa), el càlcul fet per diferents autors quant al rendiment màxim en l'eficiència de conversió és de

l'ordre del 22% (7). Tanmateix, d'acord amb la tecnologia d'avui, la incidència de cost de la cèl·lula de silici en el sistema fotovoltaic ve a representar prop del 70% del preu de cost final. D'aquest cost de la cèl·lula, un 30% correspon a la seva metal·lització, un 35% al silici emprat i la resta a les necessàries manipulacions per obtenir la cèl·lula acabada.

Les cèl·lules solars de concentració

La diferència (quant a dispositiu electrònic) d'aquestes noves cèl·lules per a concentració, respecte de les convencionals, rau en el fet que aquestes han de conduir densitats de corrent molt més fortes, puix que han de mantenir una resistència interna feble, així com també una resistència sèrie de la cèl·lula per sota els 0,3 Ω .

Aquestes condicions són tecnològicament factibles, ja que, mitjançant geometries de metal·lització específiques, hom aconsegueix un valor baix per a la resistència sèrie i d'altres efectes que podrien minvar l'eficiència de conversió de la cèl·lula, com és ara l'augment de la temperatura de treball d'aquesta per efecte de la concentració, poden ésser resolts, refrigerant d'una manera adient la cèl·lula i emprant un tractament de passivació de la superfície. En el capítol de materials escollits per a cèl·lules de concentració, esmentarem: el silici monocristal·lí, l'arseniür de gal·li i el fosfor d'indi. Segons Varian (8), amb

ENERGIA EMPRADA PER kg DE SILICI

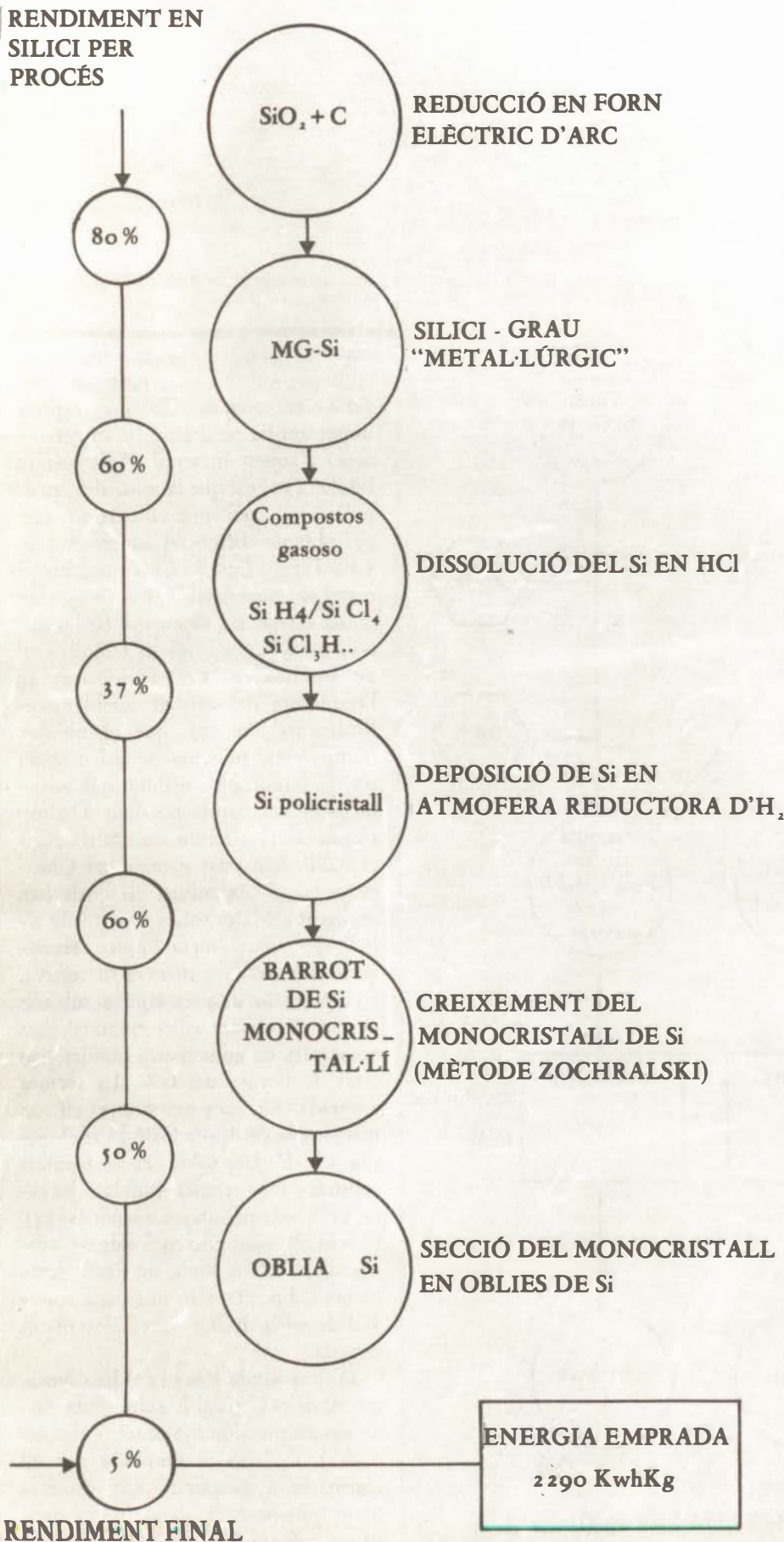


Fig. 6.-

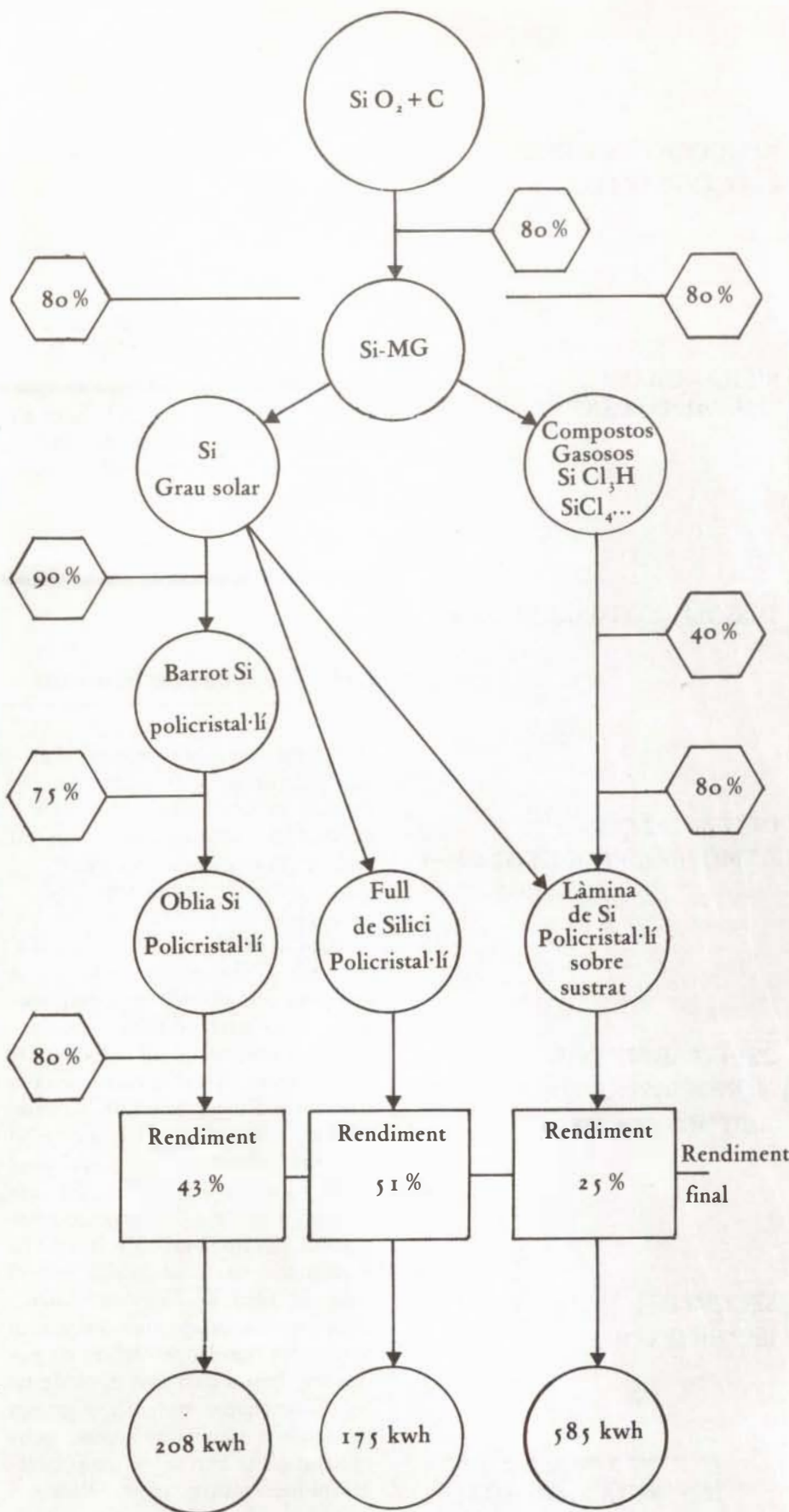
Procés convencional per obtenir silici monocristal·lí de puresa "semiconductor" en forma de discos

cèl·lules d'arseniür de gal·li hom ha aconseguit unes eficiències de conversió d'un 22 % per a 200 sols de concentració.

Cèl·lules solars de baix cost

D'altra banda d'acord amb el gràfic de la fig. 6, veiem que, per produir un kg de silici monocristal·lí de qualitat "semiconductor" ens cal emprar una energia equivalent de 2.058 kWh. Si comparem els diferents processos possibles per produir silici policristal·lí tal com és indicat al gràfic de la fig. 7, ens adonem que qualsevol dels mètodes proposats signifiquen un estalvi d'energia considerable per obtenir un kg de silici. De tota manera els diferents mètodes d'obtenció d'aquest nou silici policristal·lí no tenen gaire sentit mentre el material obtingut per qualsevol d'aquests mètodes no arribi a fer possible un rendiment de conversió fotovoltaica superior a un 10% (9,10,11). Aquest silici ha estat batejat amb el nom de silici de "qualitat solar". Dins aquesta perspectiva s'inscriuen nombrosos treballs per definir els paràmetres bàsics d'aquests tipus de silici. Entre aquests esmentarem primer els resultats assolits amb silici policristal·lí d'alta puresa, del grup interdisciplinari format entre Wacker i AEG, que han obtingut uns rendiments d'un 10% amb material policristal·lí. Aquest treball ha estat molt important, pel fet que ha demostrat per primera vegada que no cal que el

RENDIMENT PER PROCÉS X %



ENERGIA TOTAL EMPRADA PER kg DE Si

Fig 7

Possibles processos per a produir silici policristal·lí de qualitat "solar" a baix preu

material sigui forçosament monocristal·lí per obtenir eficiències de conversió enraonades. Un altre aspecte important ha resultat ser la caracterització d'aquest material. Així, segons Fischer (13) cal que la mida del gra de policristall sigui superior a 100 micres per obtenir eficiències superiors a un 10% (vegeu figs. 8 i 9). Tanmateix, el material policristal·lí ha de gaudir d'una estructura orientada (columnar o fibrosa). Segons aquests treballs i els de Lindmayer (14), l'orientació en l'estructura del cristall sembla ésser fonamental, mentre que el nombre d'impureses presents semblen ésser menys importants, malgrat que possiblement llur natura ho sigui. D'altres treballs duts a terme amb Silici policristal·lí, han estat menats per Chu i els seus col·laboradors, els quals han obtingut cèl·lules solars a partir de silici de tipus metal·lúrgic, recristal·litzant-lo d'una manera successiva, i emprant-lo després com a substrat per fer-hi créixer silici epitaxial. Les eficiències de conversió assolides han estat de l'ordre del 6%. La tècnica emprada fou descompondre en un reactor epitaxial, silà (SiH₄) i triclorosilà (SiCl₃H) sobre els esmentats substrats. Una tècnica semblant ha estat utilitzada per un grup japonès (15), havent obtingut eficiències de conversió d'un 7,6% amb substrats semblants i dipositant-hi una capa epitaxial de silici de 0,5 micres fortament dopada.

D'altra banda Fang (12) ha dipositat silici policristal·lí sobre substrats de natura metàl·lica (alumini i aliatges d'acer). La tècnica emprada per ell consisteix a evaporar silici directament mitjançant un canó de feix electrònic, alhora que els substrats metàl·lics són escalfats entre 500 i 600

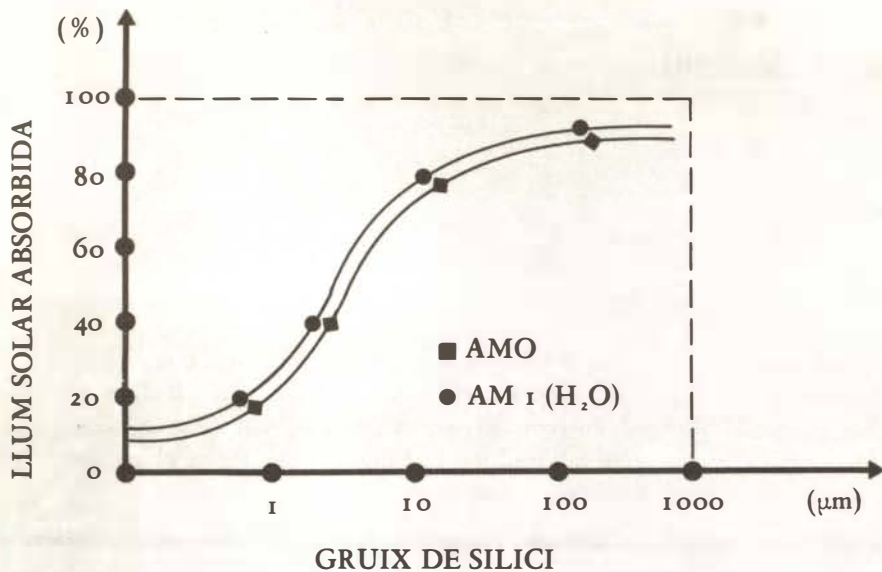


Fig. 8.-

Percentatge de llum solar absorbida pel silici en funció del seu gruix

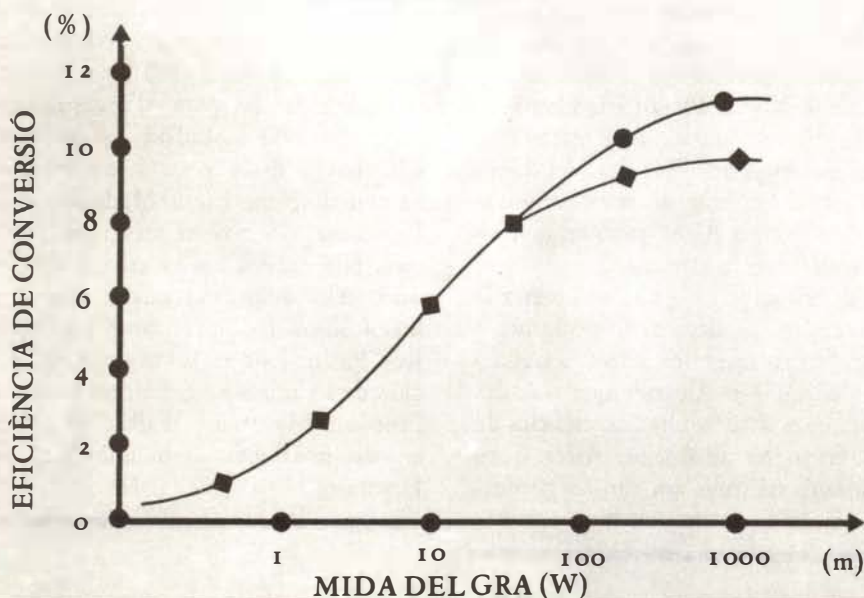


Fig. 9.-

Eficiència de conversió en funció de la mida de gra (w) per a silici no cristal·lí

°C. D'aquesta manera hom reïx a obtenir que el silici així dipositat presenti una estructura columnar i una mida de gra superior a 5 micres, amb la qual cosa les eficiències obtingudes han estat de l'ordre del 5%.

d'un 5%. Aquesta característica sembla deguda a l'alt índex d'absorció de la llum del silici amorf. La tecnologia emprada consisteix a dipositar silici, sobre un substrat forà (vidre), a partir de la descomposició d'una molècula de silà, en règim de plasma enriquit amb hidrogen.

Francesc Solé i Planas

Silici de qualitat solar

els darrers treballs per a l'obtenció d'un silici de baix preu i bona eficiència de conversió semblen adreçar-se vers el silici amorf, i en aquest sentit han estat presentats en el darrer temps els resultats assolits per Carlson i el grup de treball de la Universitat de Dundee (Escòcia) (16). Aquest nou silici gaudeix de l'avantatge de necessitar uns gruixos de l'ordre d'una micra solament per obtenir eficiències

Referències:

- Ref. 1: Treball de presentació conferència 1977. Sur la conversion photovoltaïque de l'Énergie Solaire. Robert Chabbal et Michel Rodot. Proceedings of the International Conference, held at Luxemburg September 1977. p. 47.
 Ref. 3: J. Lindmayer, F. Allison "The violet cell". Comsat revue vol. 3, pp. 1-22, 1973.

Ref. 3: Epitaxial silicon solar cell. J. Dabal et H. Kressel. R.C.A. Journal of Applied Physics, Vol. 46, n.º 3, march 1975.

Ref. 4: Les photopiles au Silicium monocristallin à usage terrestre. J. Michel. ACTA ELECTRONICA 20, 2, 1977.

Ref. 5: F. Solé i L. Castañer. Cèl·lules solars de silici monocristal·lí amb camp retrodifusor. II Col·loqui internacional d'Energia Solar. Barcelona, març 1979.

Ref. 6: Treball de presentació conferència 1977. Sur la conversion photovoltaïque de l'Énergie Solaire. Robert Chabbal et Michel Rodot. Proceedings of the International Conference, held at Luxemburg September 1977. p. 47.

Ref. 7: J. Buxó i J. Esteve. LAAS. Conferència presentada en el segon Col·loqui Internacional d'Energia Solar de Barcelona. Març 1979.

Ref. 8: Varian Report March 1978

Ref. 9: L.P. Hunt "Total Energie use in the production of silicon solar cells from raw material to finished product". Conf. Rec. 12th PVSC, November 1976, Baton Rouge, LA.

Ref. 10: K.V. Ravi and F.V. Wald "Solar cell material preparation techniques", A. Review Semiconductor silicon, 1977, pp. 820-835.

Ref. 11: L.P. Hunt et al. "Production of solar-grade silicon from purified metallurgical silicon", Conf. Rec. 12th PVSC, November 1976, Baton Rouge, LA.

Ref. 12: P.H. Fang "research on low cost solar cell structure for large electrical power systems", Annual Rep. NSF/RANN/SE/GI-34975/PR/724.

Ref. 13: J.H. Fischer. Solar cells from polycrystalline material semiconductor division, proceedings of the international conference, at Luxemburg September 1977, p. 52.

Ref. 14: T.L. Chu et al. "Silicon solar cells on unidirectionally Recrystallized metallurgical silicon", IEEE Trans. El. Dev. Vol. ED-24, 4 1977.

Ref. 15: T. Saitoh et al. "Dendritic growth of silicon thin-films on alumina ceramic and their application to solar cells". Jap J. of Appl. Physics, vol. 16-1977 p. 413.

Ref. 16: D.E. Carlson, "Amorphous silicon solar cells" Appl. Phys. Lett. Vol. 28, 11-1976, p. 671.