

Viabilitat de l'energia fotovoltaica

Jordi Andreu Batallé *

Departament de Física Aplicada. Universitat de Barcelona

Introducció

La possibilitat de disposar d'energia elèctrica mitjançant una xarxa que arriba a cada casa o a cada indústria és un fet al qual estem tan acostumats que és fàcil no adonar-nos dels avantatges que ens proporciona. Però l'energia que consumim a través d'aquesta xarxa prové gairebé sempre de la combustió de recursos minerals limitats, que estem gastant a un ritme molt superior al que la natura ha necessitat per produir-los.

D'altra banda, com a conseqüència d'aquests processos de combustió, el nivell de CO_2 lliurat a l'atmosfera posa en perill el funcionament global del nostre ecosistema i produeix un increment global de la temperatura mitjançant l'efecte hivernacle.

Per trobar solucions a aquest problema que siguin vàlides a molt llarg termini cal buscar una font d'energia que sigui neta i que no tingui el futur limitat per l'exhauriment de recursos materials. L'energia que ens envia el Sol és la més antiga de les formes d'energia utilitzades per la humanitat i compleix clarament aquestes condicions. La producció d'energia elèctrica a partir de l'energia del Sol és la possibilitat més atractiva per produir energia elèctrica de manera neta.

Orígens de la conversió fotovoltaica

La conversió fotovoltaica té els seus orígens físics més remots en el descobriment de l'efecte fotoelèctric (conegut també com efecte fotoelectroquímico) per Alexandre-Edmond Becquerel, l'any 1839. Amb l'explicació d'aquest efecte, Einstein guanyà el premi Nobel l'any 1921.

Però l'antecedent de l'actual tecnologia fotovoltaica és el treball de Daryl Chaplin, Calvin Fuller i Gerald Pearson dels Bell Telephone Laboratories, que el 1954 presentaren la primera cèl·lula fotovoltaica, amb un rendiment del 4 %. Per centrar el descobriment, cal dir que feia tan sols sis anys que J. Bardeen i W. Brattain havien presentat (1948) el transistor de puntes. El funcionament de les cèl·lules solars es basa en els mateixos principis que han donat lloc al creixement impressionant

de la tecnologia electrònica des de meitat de segle.

Bases físiques de les cèl·lules semiconductores

Materials semiconductors

Per entendre el funcionament d'una cèl·lula solar basada en semiconductors, cal entendre una mica l'estructura electrònica dels semiconductors. Els materials semiconductors són, en general, cristalls que presenten estats electrònics agrupats en bandes d'energia separades entre elles per bandes prohibides. En un semiconductor, l'última banda està totalment ocupada per electrons (banda de valència) i la banda superior és buida (banda de conducció). Entre elles hi ha una banda prohibida, *gap*, d'1 eV. Cada estat electrònic en una banda s'estén a tot el semiconductor, i determina la velocitat (el moment) de l'electró en aquell estat. La suma de totes les velocitats dels electrons en una banda totalment plena és zero, i per tant, no podem establir un corrent encara que apliquem un camp elèctric, ja que els electrons en la banda no poden canviar de velocitat. Però per efecte de l'excitació tèrmica algun dels electrons de la banda de valència pot saltar a la banda de conducció. En aquesta última banda hi ha moltes velocitats possibles per a l'electró, i l'aplicació d'un camp elèctric dóna lloc a un corrent de conducció. D'altra banda, els electrons de la banda de valència poden escollir quin dels estats electrònics (amb les velocitats corresponents) deixen lliures, i així contribuir a la conducció de corrent. Els estats electrònics no ocupats de la banda de valència es comporten com a partícules positives; són els forats.

L'existència d'electrons i forats és la base de funcionament de la major part de dispositius electrònics. Però l'efecte que permet la flexibilitat de construir tantes estructures possibles és el dopatge. En efecte, certs àtoms d'impureses incorporats en el volum del semiconductor tenen tendència a alliberar electrons o a captar electrons, i produeixen semiconductors dopats *p* o *n* respectivament. En aquests semiconductors, o bé la densitat de forats en la banda de valència és superior a la d'electrons en la banda de conducció (dopatge de tipus *p*), o bé la densitat d'electrons és superior a la de forats (dopatge de tipus *n*).

*Jordi Andreu Batallé (Barcelona, 1958) és doctor en física per la Universitat de Barcelona (1986) i professor titular de la Universitat de Barcelona, treballa al Laboratori de Física de Capes Fines

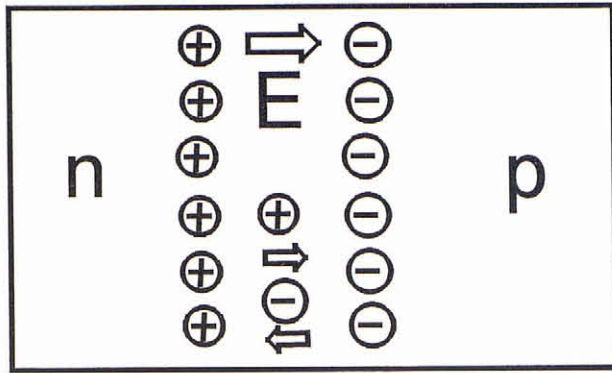


Figura 2: Esquema d'una cèl·lula solar

Estructura i funcionament de les cèl·lules solars

Les cèl·lules solars estan formades per la unió d'un semiconductor dopat n i un de dopat p . Quan els dos tipus de materials estan en contacte, s'estableixen dos corrents en sentit contrari, un corrent de difusió, com a conseqüència del canvi de concentració d'electrons i forats entre els dos costats del dispositiu, i un altre de conducció, com a conseqüència del camp elèctric creat pel mateix moviment de càrregues. Per entendre correctament aquest procés és important tenir en compte que els semiconductors dopats, tant de tipus p com de tipus n , són globalment neutres, ja que les càrregues mòbils (electrons i forats) estan compensades per les impureses ionitzades que, com que estan fixes en la xarxa del cristall, no intervenen en els corrents, però sí en la creació de camp. Això estableix un camp elèctric entre la part p i la part n del dispositiu. La figura 2 representa l'acumulació de càrrega produïda pels electrons i pels forats, com també el camp que s'estableix.

L'efecte fotoelèctric en un semiconductor es produeix perquè un fotó de llum col·lisiona amb un electró de la banda de valència i li dona prou energia per enviar-lo a la banda de conducció. A la figura 3 es representa esquemàticament aquest procés. La conseqüència d'això és la creació d'un nou electró i un nou forat. En un semiconductor homogeni l'electró envestiria finalment amb un forat i es produiria el que s'anomena recombinació de l'electró i el forat. Però en una unió $p-n$, el camp elèctric de la unió tendeix a separar l'electró del forat (figura 2), el qual podrà circular pel circuit exterior i, com a conseqüència, produirà un corrent elèctric.

Les cèl·lules solars més habituals es basen en monocristalls de semiconductors (silici, arseniür de gali). El procés de fabricació inclou el creixement dels cristalls, el tall en forma d'oblies, el dopatge i el dipòsit dels contactes. Les cèl·lules produïdes presenten un elevat rendiment, que ha arribat a ser de més d'un 23 % en el cas de cèl·lules de silici i que és encara superior en les d'arseniür de gali. L'estat de desenvolupament actual en cèl·lules de silici monocristallí és molt elevat, i els rendiments es

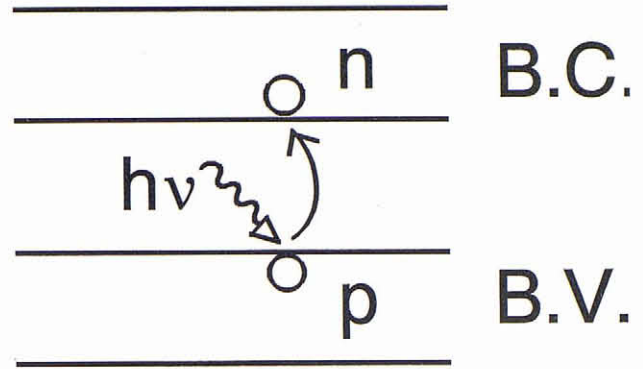


Figura 3: Efecte fotoelèctric en un semiconductor

troben a prop dels màxims que teòricament es poden obtenir amb aquest tipus de dispositius.

Viabilitat de l'energia fotovoltaica a gran escala

Una discussió seriosa de la viabilitat de la producció d'energia elèctrica a gran escala mitjançant la conversió fotovoltaica necessàriament ha de considerar tant els aspectes tecnològics com els aspectes econòmics. En la latitud de Catalunya, el Sol ens envia uns 4,5 kWh per metre quadrat i per dia de mitjana anual. L'actual tecnologia basada en el silici cristallí obté rendiments d'aproximadament el 10 % en el conjunt del sistema fotovoltaic; per tant, amb la tecnologia actualment més desenvolupada, podem obtenir anualment 160 kWh/m². La superfície necessària per produir per mètodes fotovoltaics una energia elèctrica de 20.000 GWh, que és més o menys la que es gasta anualment a Catalunya, és de 125 km². Aquesta superfície, encara que és important, no representa una limitació per a la producció fotovoltaica massiva d'energia.

Un altre punt que cal considerar, i que sovint s'ha presentat com una objecció a la producció massiva d'energia mitjançant mètodes fotovoltaics, és l'energia necessària per produir els plafons. Amb la tecnologia actual basada en el silici cristallí, el temps necessari per recuperar l'energia despesa en la producció del sistema fotovoltaic és d'uns tres anys, i existeixen altres tecnologies en què aquest temps es redueix a menys d'un any. Per tant, tampoc aquest aspecte és un impediment important en la producció massiva d'energia fotovoltaica.

La consideració econòmica és la que en realitat està limitant l'aplicació a gran escala de l'energia fotovoltaica. Mentre que el cost de producció d'energia elèctrica fotovoltaica en centrals basades en la tecnologia convencional és de 30 cèntims de dòlar per kWh, els actuals costos de producció per a les centrals basades en combustibles fòssils és de 6 cèntims de dòlar per kWh. Aquest factor aproximadament 5 en els costos de producció és el responsable del fet que no s'apliqui mas-

sivament a escala mundial la producció d'energia fotovoltaica.

Noves estratègies. Noves tecnologies

Ja fa temps que existeix una activitat de recerca i desenvolupament en el camp fotovoltaic, que persegueix disminuir els costos de producció dels plafons fotovoltaics. Per fer-ho, cal eliminar la part més cara del procés de producció d'un plafó basat en cèl·lules cristallines, que és el creixement del cristall i el procés de tall en oblies. Aquest procés encareix molt el cost final del plafó. El procediment alternatiu més raonable és la producció de plafons fotovoltaics mitjançant el dipòsit d'una capa prima de semiconductor sobre un vidre de gran superfície. S'han proposat diferents materials per produir aquest tipus de dispositius. Un dels que actualment presenta millors expectatives industrials és el silici amorf hidrogenat. Aquest material va ser dipositat per primer cop per R.C. Chittich el 1970 i les primeres cèl·lules (amb rendiment del 2,4 %) les obtingueren Carlson i Wronski el 1976. Cal dir que aquestes cèl·lules presenten una disminució inicial del rendiment a causa de la presència d'estats metastables; tot i això el rendiment estabilitzat que se n'obté actualment és aproximadament del 8 %. Les possibilitats de producció massiva d'aquests dispositius són clares, i actualment s'utilitzen de manera habitual per alimentar petits dispositius electrònics, com les calculadores. Però, malgrat que el seu rendiment no ha parat d'augmentar, encara és notablement inferior (aproximadament la meitat) al de les cèl·lules de silici cristallí. Malgrat tot, la tecnologia del silici amorf encara s'està desenvolupant, i no ha parat de créixer des del seu descobriment ara fa 20 anys.

El Laboratori de Física de Capes Fines de la Universitat de Barcelona té experiència en la tecnologia del silici amorf des de fa 10 anys, i actualment participa en un dels dos projectes europeus (dins del programa JOULE) dirigits al desenvolupament de les cèl·lules solars de silici amorf.

L'actual rendiment dels plafons de silici amorf no els fa competitiu amb els plafons basats en cèl·lules cristallines, ja que, encara que el cost de producció de la cèl·lula siguin molt inferiors, el cost dels vidres i dels suports estructurals necessaris per construir un plafó encareix el procés i el cost final és similar al del plafó basat en cèl·lules cristallines. El major rendiment d'aquest fa, doncs,

que el seu cost per kWh produït sigui inferior.

Però aquesta situació ha canviat radicalment amb les noves tendències que estan apareixent en el camp fotovoltaic. Aquestes tendències es concreten en els edificis fotovoltaics connectats a la xarxa. La tècnica constructiva de molts dels edificis comercials, basada en façanes de vidre amb suport d'alumini o acer, permet d'integrar sistemes fotovoltaics amb un cost afegit molt petit. Considerant l'increment de cost d'aplicació del sistema fotovoltaic a un d'aquests edificis, l'energia produïda és quasi rendible des del punt de vista econòmic, i ho és encara més si la tecnologia utilitzada es basa en tècniques de capa fina.

És així com ha començat una cursa en què participen investigadors fotovoltaics, empreses fotovoltaiques, empreses de components per a la construcció i arquitectes, per tal de posar a punt la tecnologia de construcció d'edificis fotovoltaics. El primer projecte europeu construït amb plafons fotovoltaics estructurals (que, a més de contenir les cèl·lules fotovoltaiques, fa de tancament extern de l'edifici) acaba de construir-se a Alemanya, i ja fa un temps que s'està treballant en el projecte de la Biblioteca Municipal de Mataró, el sistema fotovoltaic de la qual està finançat parcialment per un projecte del programa JOULE en què participen una empresa catalana de nova creació, Teulades i Façanes Multifuncionals (TFM), el LFCF de la Universitat de Barcelona, el ZSW de Stuttgart i el GENEC de Cadarache. L'edifici incorporarà elements fotovoltaics tant de façana com de teulada. A la figura 1 es presenta una imatge d'aquest projecte arquitectònic.

Conclusió

Sovint els físics que ens dediquem a aplicacions ens sentim atrets per l'elegància de certes solucions tècniques i pels principis físics en què es basen, però deixem de considerar aspectes pràctics i econòmics que són determinants en l'expansió d'un sistema tecnològic. La tecnologia de semiconductors, que va fer desaparèixer en molt poc temps els antics sistemes electrònics basats en vàlvules de buit, ha tingut enormes dificultats per imposar-se en el camp de la producció massiva d'energia elèctrica. La integració dels sistemes fotovoltaics en edificis es presenta com un pas clau per aconseguir el desenvolupament industrial dels plafons fotovoltaics basats en capes fines semiconductor.

Bibliografia

- SCHEER, H., *Estrategia solar*, Plaza y Janes, (Barcelona, 1993).
FAHRENBRUCH, A.L. i BUBE, R.H., *Fundamentals of Solar Cells*, Academic Press (Nova York, 1983).
TAKAHASHI, K. i KONAGAI, M., *Amorphous silicon solar cells*, North Academic (Londres, 1986).