PLASMA DE SILÀ A BAIXA PRESSIÓ PER A LA PRODUCCIÓ DE SILICI AMORF HIDROGENAT

per

J. ANDREU, G. SARDIN, J.C. DELGADO, J.L. ANDÚJAR, J. ESTEVE i *J.L. MORENZA*
Departament de Física Aplicada i Electrònica. Facultat de Física.
Universitat de Barcelona. Av. Diagonal 645, 08028 Barcelona

INTRODUCCIÓ

El silici amorf hidrogenat (a-Si:H) és el semiconductor amorf que més ha estat estudiat aquest darrers anys. A més de l'interès fonamental com a semiconductor amorf, presenta un gran nombre d'aplicacions, entre les quals cal destacar la producció de fotopiles solars de capa prima i l'electrònica de gran superfície.

El primer mètode emprat per al dipòsit de a-Si:H amb unes certes propietats semiconductores fou la descàrrega elèctrica amb radiofreqüència en gas silà (SiH_4). Quasi immediatament hom començà d'utilitzar la descàrrega amb corrent continu i alta tensió. A més d'aquestes tècniques de plasma, actualment han estat provades un gran nombre de tècniques per al dipòsit de a-Si:H, com la homo-CVD, l'evaporació reactiva activada per plasma, la polvorització catòdica o la CVD activada per llum.

Al nostre laboratori hem utilitzat un mètode de producció de a-SI:H basat en una tècnica de plasma produït per feixos d'electrons d'energia moderada (60 eV) amb confinament electrostàtic. En aquest treball seran presentats els detalls del mètode de dipòsit i algunes de les característiques del material obtingut.

MÈTODE DE DIPÒSIT

El mètode utilitzat per al dipòsit de capes de a-Si:H és el de la descàrrega en corrent continu, amb càtode calent i confinament electrostàtic en gas

silà. A la figura 1 mostrem un esquema del reactor de plasma, el qual és dins un recipient en forma de T a l'interior del qual hom realitza el buit mitjançant una bomba mecànica de paletes i una bomba difusora de 1600 l/s. Per a entrar quantitats controlades de gas hom utilitza una vàlvula d'agulla, i mitjançant un diafragma situat sobre la bomba difusora hom pot regular el poder de bombament. Una altra bomba auxiliar permet de dur a terme el bombament de silà; aquesta bomba és necessària, ja que el silà reacciona espontàniament en contacte amb l'oxigen.

A l'interior del recipient de buit hi ha un cilindre metàl·lic que incorpora una resistència de calefacció regulada electrònicament per a mantenir una temperatura constant. En una de les bases del cilindre hi ha un filament escalfable que actua de càtode, i prop de l'altra base, un elèctrode circular que actua d'ànode. El cilindre es polaritza negativament respecte al càtode actuant d'elèctrode de confinament.

Aquest tipus de reactor permet d'obtenir capes de a-Si:H a pressions entre 1 i 10 μbar, les quals són unes 100 vegades inferiors a les utilitzades amb reactors de radiofreqüència o de corrent continu i alta tensió. Bé que les pressions utilitzades són molt inferiors a les de les descàrregues usuals, les velocitats de dipòsit obtingudes són del mateix ordre (3 Å/s).

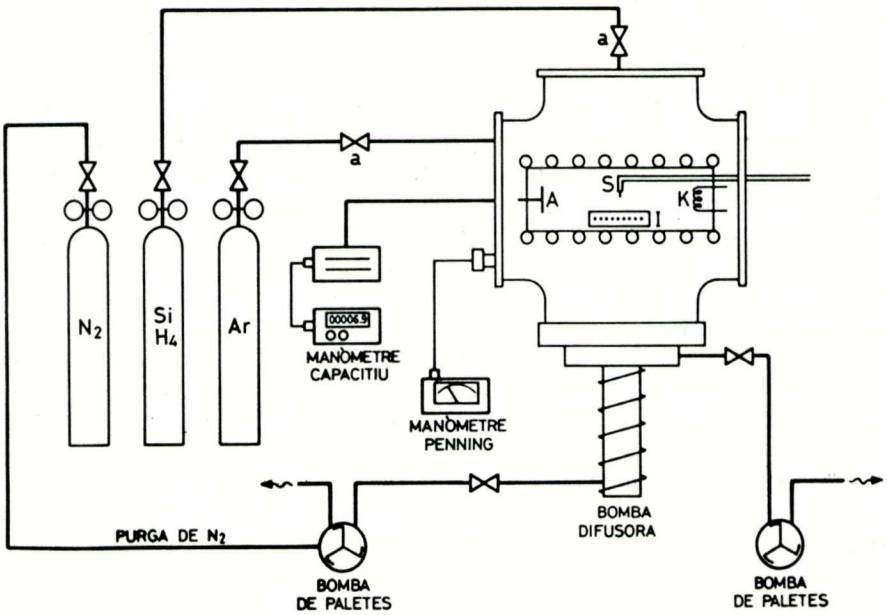

Figura 1. Esquema del reactor de plasma.

CARACTERÍSTIQUES DEL PLASMA

Les característiques del plasma influeixen notablement en les propietats de les capes obtingudes. Per a estudiar el plasma de silà produït per la descàrrega en corrent continu, amb càtode calent i confinament electrostàtic, hem utilitzat dos tipus diferents de sondes elèctriques.

La sonda de Langmuir consisteix en una petita punta metàl·lica en forma de cilindre que és polaritzada a diferents tensions per tal de recollir la característica I-V, a partir de la qual hom pot calcular la distribució d'energia dels electrons. El resultat d'un d'aquests mesuraments és presentat a la figura 2, on els punts són el resultat dels mesuraments amb la sonda de Langmuir, i la línia contínua és l'ajust per la suma de tres distribucions de Maxwell.

L'estudi de la població d'ions del plasma utilitzant la sonda de Langmuir és més difícil, i per això hom utilitza l'analitzador d'energia iònica que presentem a la figura 3. En aquest, una reixa en contacte amb el plasma fixa el potencial d'un pla; una segona reixa situada al seu darrera és polaritzada positivament respecte a la primera, frenant els ions procedents del plasma, i finalment una placa polaritzada negativament per tal d'atreure els ions cap-

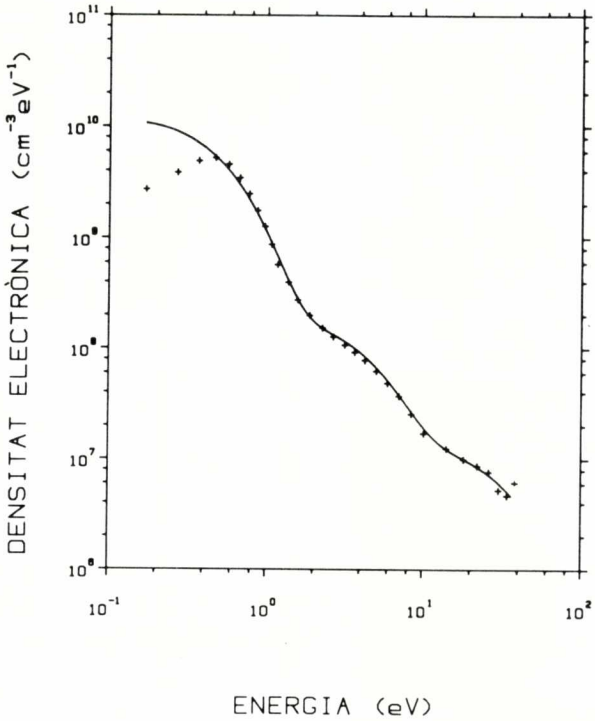

Figura 2. Densitat d'electrons mesurada amb la sonda de Langmuir.

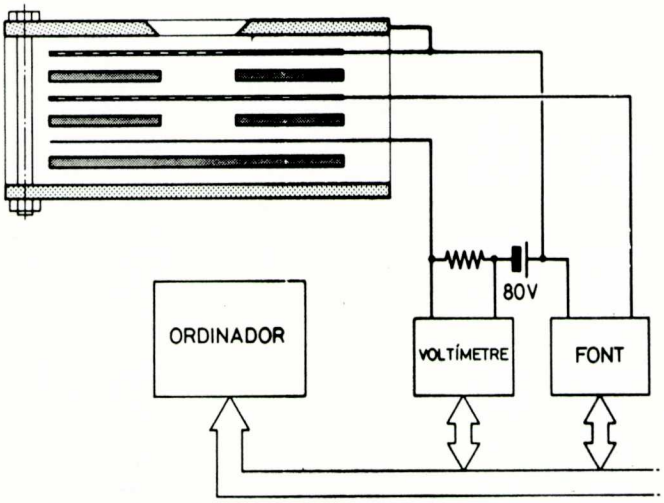

Figura 3. Esquema de l'analitzador d'energia iònica.

ta el corrent iònic. Del corrent iònic captat en funció del potencial retardador, hom pot obtenir l'energia i el flux dels ions que arriben al substrat. Coneixent el flux dels ions que arriben al substrat i la velocitat de creixement de la capa, hom pot obtenir un paràmetre que representa la relació de fluxos entre ions i radicals neutres responsables del creixement de la capa. A la figura 4 presentem la dependència d'aquest paràmetre amb la pressió; hom hi observa que, per a pressions elevades, la importància relativa dels ions en el creixement de la capa és menor.

CARACTERÍSTIQUES DE LES CAPES

La presència d'hidrogen en les capes de a-Si:H produeix una dràstica disminució de la densitat d'estats en el gap i permet d'obtenir materials amb bones propietats semiconductores. Per tant, és interessant d'estudiar el contingut i l'enllaç de l'hidrogen en les capes. Les dues tècniques utilitzades són l'espectroscòpia de transmissió en l'infraroig llunyà i l'exodifusió de l'hidrogen. Aquesta segona tècnica és duta a terme amb l'aparell representat esquemàticament a la figura 5, on el forn (3) produeix un augment de la temperatura durant el qual és registrat el pic d'H_2 captat pel quadripol (5) en funció del temps. Amb aquesta tècnica hom pot obtenir el contingut d'hidrogen, així com informació estructural sobre la mostra.

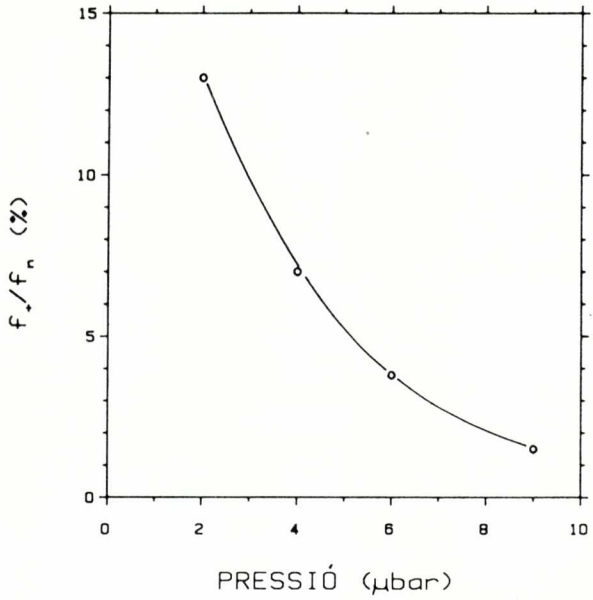

Figura 4. Flux d'ions positius captat per l'analitzador d'energia iònica relatiu al de radicals neutres.

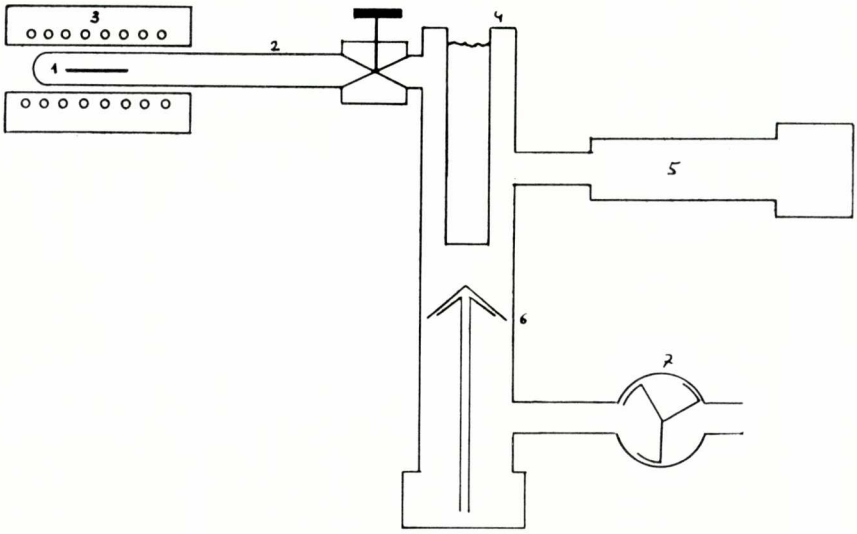

Figura 5. Esquema del sistema d'exodifusió d'hidrogen. (1) mostra, (2) tub de quars, (3) forn tubular, (4) trampa de nitrogen, (5) espectròmetre de masses, (6) bomba de difusió, (7) bomba de paletes.

Per a les aplicacions del material dipositat, és molt important l'estudi de les seves característiques òptiques i elèctriques. Pel que fa a les propietats òptiques, han estat duts a terme mesuraments d'espectroscòpia de transmissió en el visible i l'infraroig proper, a partir dels quals hom pot obtenir els paràmetres òptics de les capes, com l'índex de refracció (n) i el coeficient d'extinció (α).

L'extrapolació de les zones rectes que apareixen en una gràfica de $\sqrt{\alpha nE}$ en funció de l'energia (E) permet d'obtenir l'energia del gap òptic del material. Podem veure aquesta representació a la figura 6 per a mostres de a-Si:H, Al amb diferents continguts d'alumini. Hom hi observa que, a mesura que augmenta el contingut d'alumini, el gap disminueix. A la figura 7 presentem l'energia del gap òptic per a capes de a-Si:H de diferents gruixos, on observem que, per a un gruix menor de 0,5 μm, els resultats dels mesuraments donen energies més grans.

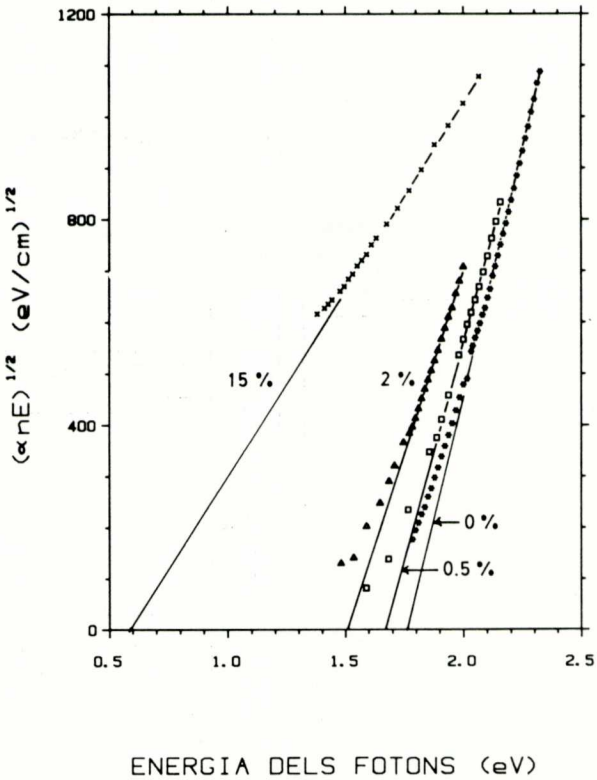

Figura 6. Resultat dels mesuraments de transmissió òptica per a capes d'aliatges a-Si:H,Al amb diferents concentracions d'alumini.

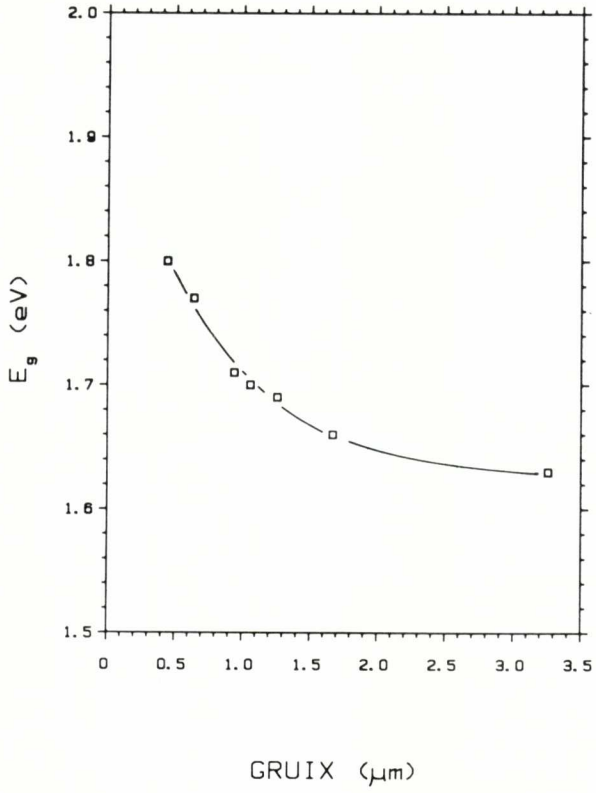

Figura 7. Energia del gap òptic de mostres de a-Si:H en funció del gruix de les capes.

Les característiques elèctriques del material han estat estudiades mesurant la conductivitat en funció de la temperatura i la fotoconductivitat. A la figura 8 hi ha representada una gràfica d'Arrhenius de la conductivitat en fosc per a mostres situades en diferents posicions en el reactor. Les tres mostres més conductores són les que han estat obtingudes sobre substrats oposats al filament. Els experiments de fotoconductivitat donen valors de l'ordre de 10^{-4} S cm^{-1} per a un flux de fotons d'aproximadament 10^{14} cm^{-2} s^{-1} amb energies prop de 2 eV per a les capes crescudes sobre substrats oposats al filament, mentre que les crescudes sobre substrat encarat al filament donen valors de la fotoconductivitat 100 vegades inferiors.

Els experiments de fotoconductivitat en funció de la temperatura per a mostres de a-Si:H, Al són presentats a la figura 9, on hom pot observar la gran variació que es produeix en la conductivitat amb la incorporació d'alumini. És destacable l'elevat valor de la conductivitat per a la mostra amb més contingut d'alumini. Això fa que aquest material sigui adequat per a la zona

p de cèl·lules p-i-n. Les característiques de les capes de a-Si:H obtingudes es comparen favorablement amb les fins ara reportades, obtingudes amb tècniques de polvorització catòdica i d'evaporació reactiva activada.

CONCLUSIÓ

Amb un plasma de silà produït per una descàrrega en corrent continu, amb càtode calent i confinament electrostàtic, hom pot obtenir capes de a-Si:H amb velocitats de creixement acceptables i bones propietats òptiques i elèctriques.

Les capes de a-Si:H, Al obtingudes per aquest mètode presenten unes propietats destacables i són adequades per a produir la zona p de cèl·lules p-i-n.

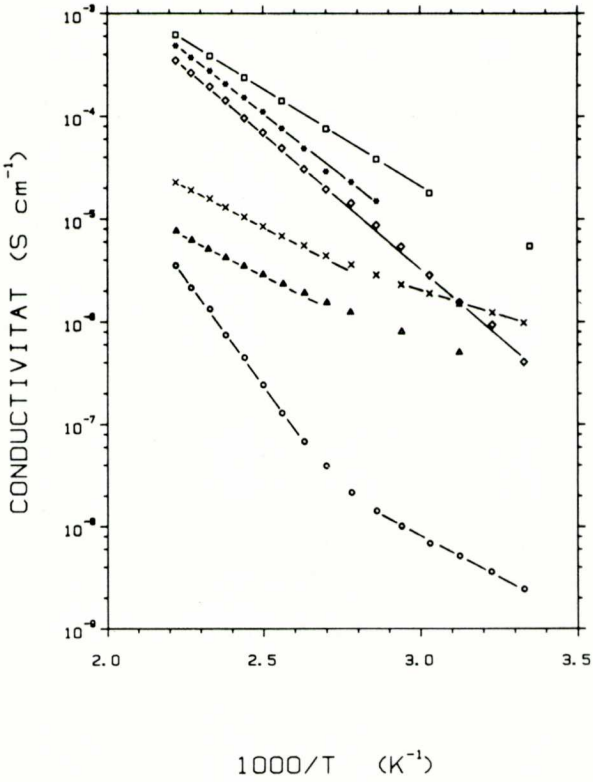

Figura 8. Conductivitat en fosc per a mostres de a-Si:H situades en diferents posicions dins el reactor. Les tres més conductores són les encarades a l'ànode.

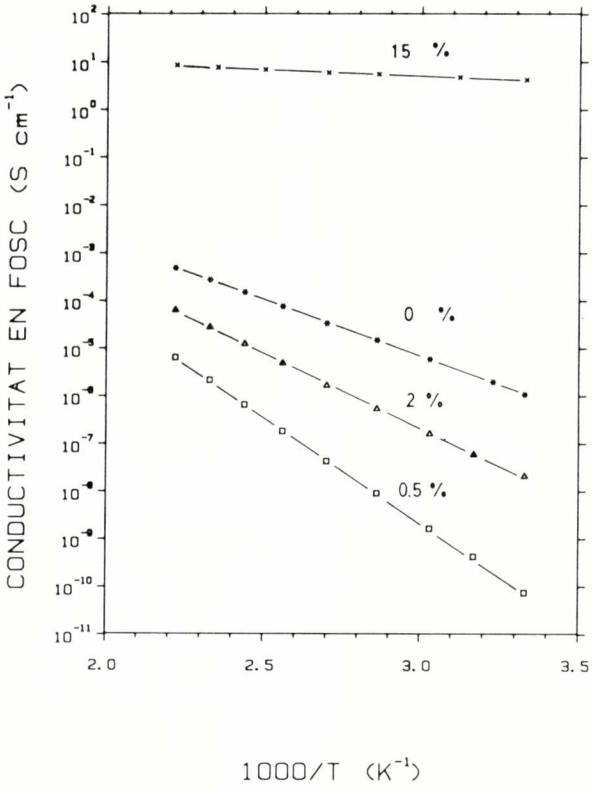

Figura 9. Conductivitat en fosc per a mostres de a-Si:H,Al amb diferents concentracions d'alumini.