

Caracterització elèctrica del plasma d'una descàrrega de radiofreqüència utilitzada en la fabricació de circuits VLSI

Pau Molinàs-Mata *

Introducció

Quan circula un corrent elèctric a través d'un gas es produeix una descàrrega elèctrica. Aquestes descàrregues es poden classificar en funció del tipus de corrent que hi circula; s'anomenen *contínues* quan el corrent és continu i *alternes* quan és altern. Les descàrregues també es poden classificar en *naturals*, com els llamps, i en *artificials*, com les dels tubs fluorescents.

La fabricació de circuits VLSI (*Very Large Scale Integration*) utilitza descàrregues artificials per gravar i dipositar capes fines metàl·liques, semiconductores i aïllants sobre una llisca semiconductora. Els gasos utilitzats en aquests processos s'introdueixen en un reactor, que conté la llisca semiconductora. En general s'utilitzen halogenurs per gravar i hidrurs o compostos organometàl·lics per dipositar, barrejats amb altres gasos. Els productes de la reacció són evacuats del reactor mitjançant bombes de buit que mantenen una pressió de treball inferior a l'atmosfèrica, compresa entre els mil·litorrs i els torr. Un generador elèctric subministra l'energia necessària, compresa entre $0,01 \text{ Wcm}^{-3}$ i 1 Wcm^{-3} , per mantenir la descàrrega. Per tal de poder gravar i dipositar aïllants, i augmentar el grau de dissociació i ionització del gas s'utilitza normalment radiofreqüència (1 MHz-100 MHz), que s'acobla capacitivament amb el gas.

La fabricació de circuits VLSI

Els circuits integrats es fabriquen apilant convenientment capes fines de materials diferents sobre un substrat. Això comporta arrencar aquella part de la capa inútil per a la finalitat amb què ha estat dipositada. Així s'interconnecten els dispositius dels circuits integrats.

Cada cop que s'apila una nova capa fina es realitza un cicle de sis etapes (figura 1). En la primera etapa es diposita la nova capa, i a continuació es diposita a sobre seu una capa de resina fotosensible. En la tercera etapa s'insola la resina a través d'una màscara, i a continuació s'extreu la part de resina insolada. En la cinquena etapa s'ataquen les parts de la capa fina no protegides per la resina, i a continuació s'arrenca la resina sobrant, que ha actuat de barrera de l'atac.

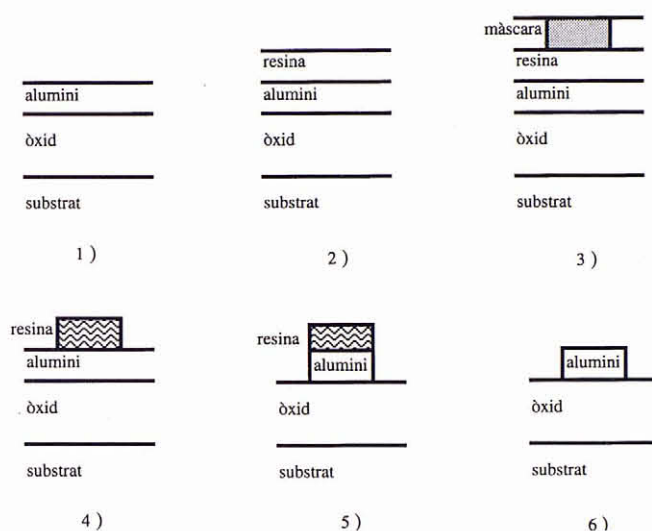


Figura 1: Representació de les sis etapes del procés de fabricació d'una connexió metàl·lica

Les connexions entre dispositius d'un circuit integrat es realitzen normalment mitjançant pistes metàl·liques, que s'aïllen entre elles mitjançant capes dielèctriques. En el cas, per exemple, d'un transistor CMOS es connecten els drenadors d'un transistor NMOS i d'un PMOS mitjançant una pista d'alumini (figura 2) realitzada segons el cicle de sis etapes descrit anteriorment. Aquesta pista queda aïllada de la resta mitjançant una capa dielèctrica prèviament dipositada, generalment SiO_2 .

La part inútil de la capa d'alumini dipositada durant la primera etapa és arrencada en la cinquena etapa. En aquesta etapa és quan es defineixen les vores de la pista. El nombre cada cop més elevat de circuits per unitat d'àrea comporta pistes de dimensions semblants al gruix de la capa. Això requereix processos que permetin definir esglaons de les capes de parets ben verticals, la qual cosa demana atacs poc isòtrops (Gottscho, 1993).

Els processos assistits per plasma permeten fer atacs anisòtrops. Per exemple, l'alumini, un dels metalls més emprats per fer les connexions, es pot atacar isòtropicament amb una dissolució d'àcid ortofosfòric, mentre que amb un procés assistit per plasma es pot fer anisòtropa-

*Pau Molinàs-Mata (Barcelona, 1961) és doctor en Física i professor del Departament d'Enginyeria Electrònica de la UPC (pmolinas@eel.upc.es).

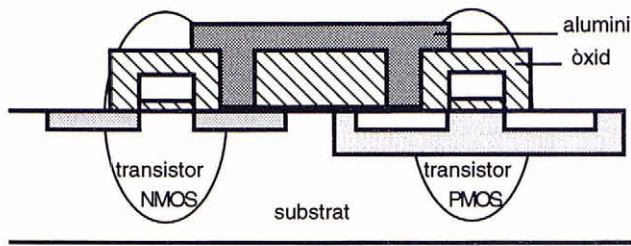


Figura 2: Representació de la connexió entre drenadors d'un transistor CMOS

ment, amb BCl_3 com a principal gas reactiu.

Tal com s'ha dit anteriorment, la pista metàl·lica d'alumini ha quedat aïllada de la resta mitjançant una capa dielèctrica dipositada prèviament. El dipòsit d'una capa ha de representar una càrrega tèrmica mínima per a les situades sota seu. Aquesta condició s'ha de complir més estrictament com major és el nombre de dispositius interconnectats per unitat d'àrea.

Els processos assistits per plasma minimitzen la càrrega tèrmica. Per exemple, l'òxid de silici, l'aïllant més emprat, es pot fer créixer tèrmicament oxidant la superfície semiconductora en condicions d'equilibri tèrmic, a $1.000\text{ }^\circ\text{C}$, en un forn ventilat amb oxigen. Tanmateix, aquest òxid es pot dipositar mitjançant un procés assistit per plasma a una temperatura inferior als $400\text{ }^\circ\text{C}$.

L'estat plasma d'una descàrrega de radiofreqüència

L'estat en què es troba la matèria quan la seva temperatura és d'alguns milers de kelvins es coneix amb el nom de *plasma*. Els plasmes que s'utilitzen en la fabricació de circuits integrats són plasmes fora de l'equilibri termodinàmic, i s'anomenen plasmes freds. Es tracta de plasmes parcialment ionitzats, dissociats i excitats, en els quals les temperatures electròniques són molt elevades, d'algunes desenes de milers de kelvins (d'alguns eV), mentre que les temperatures iòniques són tèrmiques, d'alguns centenars de kelvins, i pròximes a la temperatura molecular. Les espècies presents en aquest tipus de plasmes poden ser molt variades i en un primer nivell de complexitat distingim els radicals neutres, els ions i, naturalment, els electrons.

Els radicals neutres segueixen el moviment molecular abans de reaccionar, mentre que els ions es mouen sota l'efecte de la mitjana del camp elèctric. Els electrons, que estan confinats pels ions a l'interior del reactor, són els únics que segueixen el senyal de radiofreqüència, i la seva dinàmica determina el comportament del plasma. Les parets dels reactors de descàrregues de radiofreqüència es recobreixen amb ions i constitueixen una zona de càrrega d'espai positiva, anomenada *beina* (figura 3).

Sota l'acció del camp de radiofreqüència la interfície entre el plasma i la beina, situada a $x = S(t)$, oscil·la entre les dues posicions extremes S_1 i S_2 .

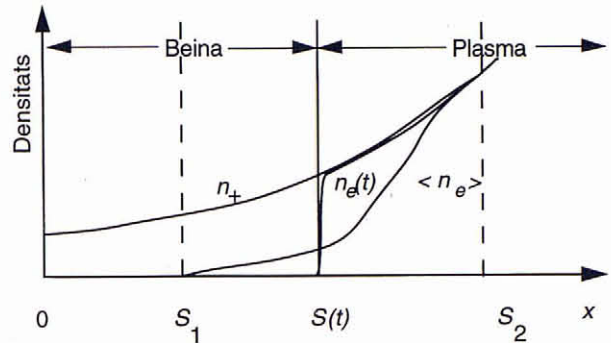


Figura 3: Representació qualitativa de les densitats iònica (n_+), electrònica (n_e) i de la beina que recobreix un elèctrode de radiofreqüència

Es poden observar comportaments diferents del plasma en variar la pressió del gas. Per exemple, el règim de funcionament de la descàrrega passa de ser estocàstic a tipus α quan la pressió passa de les decenes a les centenes de millitorr¹ (figura 4). En el règim estocàstic el plasma es manté en funcionament mitjançant electrons que viatgen paral·lelament a la direcció del camp elèctric, i que són reflectits pel camp elèctric de la beina en expansió. En el règim tipus α el plasma es manté mitjançant el moviment d'oscil·lació del conjunt dels electrons situats a la frontera de les beines.

A cadascun dels règims de funcionament anteriors li correspon una distribució de l'energia dels electrons diferent. La funció de distribució de l'energia dels electrons, $F(E)$, caracteritza l'estat plasma de la descàrrega de radiofreqüència i permet controlar la repetibilitat del procés. A partir de la mesura de la $F(E)$ s'obté la densitat del plasma i l'energia mitjana dels electrons. La part de la distribució corresponent a les baixes energies determina les propietats de transport del plasma, mentre que la zona corresponent a les altes energies determina el grau de dissociació del plasma.

En general, els reactors de descàrrega de radiofreqüència solen estar equipats amb mesuradors del cabal i de la pressió del gas. Aquestes mesures, però, donen un coneixement parcial de l'estat del plasma. Així, per exemple, el flux d'ions que copeja tant les parets del reactor com la superfície de la lesca semiconductora depèn de la densitat del plasma. Els canvis de la temperatura del gas (Perrin et al., 1994) provoquen canvis de la densitat del gas, que poden induir canvis sobtats a la densitat del plasma. Aquests canvis repercuteixen

¹ 1 mTorr=0,133 Pa

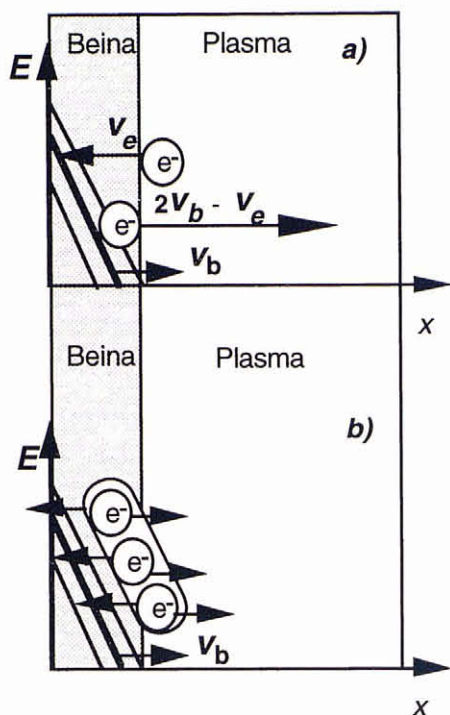


Figura 4: Representació esquemàtica del camp elèctric en funció de la posició pels règims de funcionament d'una descàrrega de radiofreqüència: a) règim estocàstic i b) règim tipus α

en el règim de funcionament de la descàrrega i afecten el procés en curs, cosa que en dificulta la repetibilitat.

La caracterització elèctrica de l'estat plasma

Per tal de caracteritzar el plasma en règim estacionari es mesura la funció de distribució de l'energia dels electrons $F(E)$. Aquesta és el nombre d'electrons amb una energia compresa entre E i $E + dE$ per unitat d'energia i unitat de volum (Godyak, 1990):

$$F(E) = na_E \frac{\sqrt{E}}{\sqrt{\langle E \rangle^3}} e^{-(b_E E / \langle E \rangle)^c},$$

on n és la densitat del plasma, $\langle E \rangle$ la mitjana de l'energia dels electrons, i a_E , b_E i c són paràmetres que depenen del tipus de gas i de la descàrrega.

La $F(E)$ d'un plasma d'una descàrrega de radiofreqüència depèn de nombrosos factors com ara el caràcter electronegatiu o electropositiu del gas, la seva temperatura, la freqüència i l'amplitud del senyal altern, el valor del camp elèctric. Tanmateix, la $F(E)$ d'un plasma qualsevol es pot mesurar sense més hipòtesi que la isotropia de la distribució electrònica al voltant d'una sonda de Langmuir immersa en el plasma, mitjançant el mètode de Druyvesteyn. Aquest mètode utilitza la relació existent entre la $F(E)$ i el corrent elèctric I que

circula a través del plasma i de la sonda:

$$F(E) = \frac{2\sqrt{2m_e}}{e^3 A} \sqrt{E} \frac{d^2 I}{dV^2},$$

on m_e és la massa de l'electró, e és la càrrega de l'electró i A és l'àrea de la sonda.

La sonda de Langmuir és una sonda electrostàtica constituïda per dos elèctrodes metàl·lics que se situen en el volum del plasma i entre els quals s'estableix una diferència de potencial. Un dels elèctrodes té habitualment forma cilíndrica, mentre que l'altre correspon a la referència electrostàtica. En el cas d'un acoblament capacitiu, l'elèctrode de referència és un dels dos elèctrodes del reactor entre els quals es genera la descàrrega. El plasma tanca el circuit elèctric de la sonda, format pels dos elèctrodes i els altres elements del circuit i de mesura (figura 5).

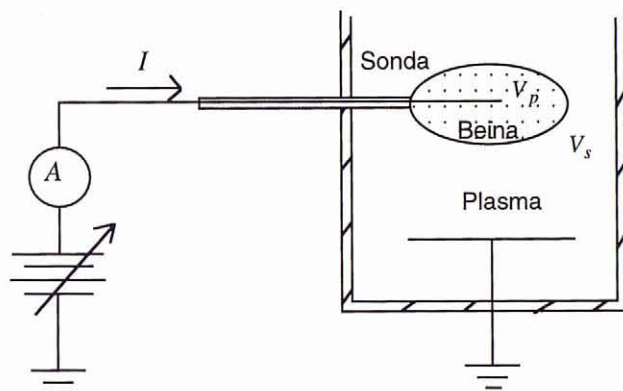


Figura 5: Esquema del circuit elèctric d'una sonda de Langmuir

La intensitat del corrent, I , que circula per la sonda, depèn de la diferència de potencial V que apareix en la beina de càrrega d'espai que es forma al seu voltant, i consta d'una component electrònica, I_e , i d'una iònica, I_+ , tals que: $I = I_e - I_+$. Les abscisses de la característica $I(V)$ que determinen l'origen i el rang de la $F(E)$ són, respectivament, els anomenats *potencial plasma* i *potencial flotant*. El potencial flotant, V_f , es defineix com aquella tensió amb què es polaritza la sonda per a la qual la intensitat I s'anulla, i el potencial plasma, V_s , com aquella tensió amb què es polaritza la sonda per a la qual la intensitat I se satura d'electrons (figura 6).

Aquesta mesura de la $F(E)$ requereix prendre certes precaucions relatives al disseny del sistema d'adquisició, adequant-lo a la descàrrega i al gas objecte de la mesura (Godyak, 1990). També cal preveure el fet que la característica $I(V)$ adquirida pot contenir soroll, i que aquest pot venir amplificat per l'operació de derivar. Per tal de minimitzar aquest efecte es poden utilitzar filtres Savitzky-Golay, que permeten filtrar el soroll present a

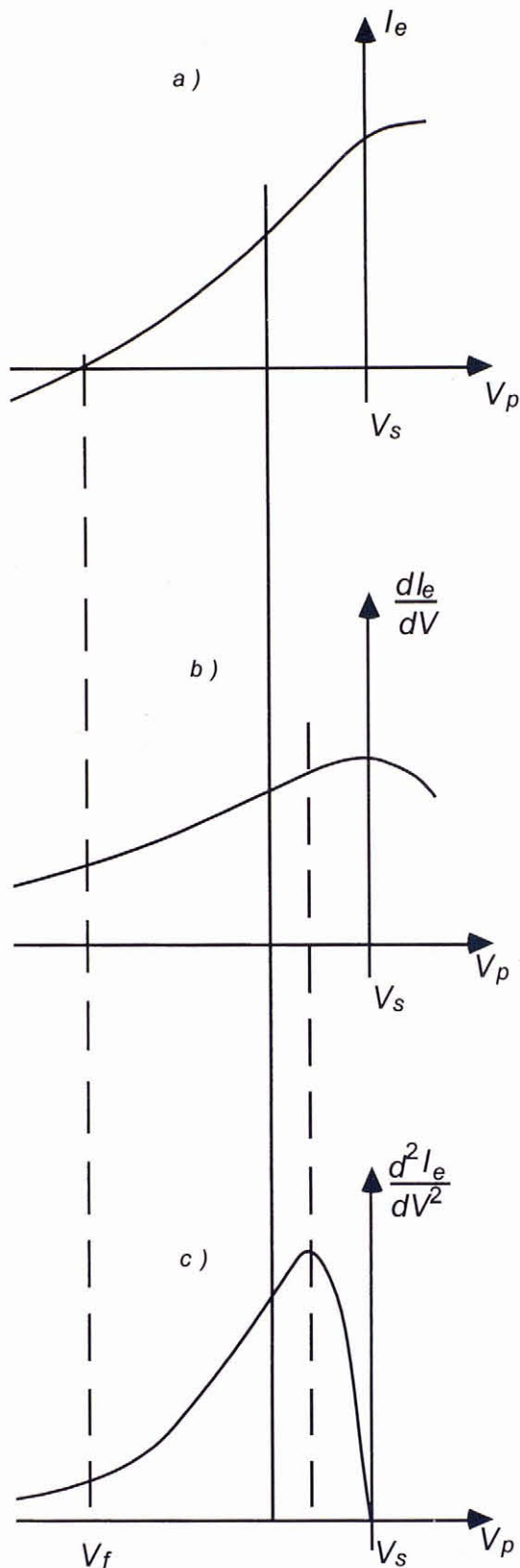


Figura 6: Mètode de Druyvesteyn: a) característica $I(V)$, b) primera derivada de $I(V)$, c) segona derivada de $I(V)$, i d) $F(E)$. V_p és la tensió de polarització de la sonda i $V = V_p - V_s$

la característica de la sonda i obtenir la $F(E)$ a partir de la funció polinòmica que més s'apropa al conjunt de punts original (Gorry, 1990).

Conclusió

L'anisotropia del gravat i la minimització de la càrrega tèrmica del dipòsit de capes primes durant la fabricació de circuits integrats adquireixen molta importància quan les dimensions de les pistes són submicromètriques. Aquesta progressiva miniaturització dels circuits integrats ha potenciat la utilització dels processos assistits per plasma, que són els que en permeten una fabricació industrial. Tanmateix, aquests processos requereixen una caracterització de l'estat plasma —per tal d'assegurar-ne la repetibilitat— que es pot fer mitjançant la funció de distribució de l'energia dels electrons. Aquesta es pot mesurar amb una sonda de Langmuir, aplicant el mètode de Druyvesteyn, i realitzant un filtratge digital de la característica $I(V)$.

Bibliografia

- GORRY, P. A., General least-squares smoothing and differentiation by the convolution (Savitzky-Golay) method, *Anal. Chem.*, **62**, 570-573 (1990).
 GOTTSCHO, R., Plasmas make progress, *Physics World*, **març**, 39-45 (1993).
 PERRIN, J, MOLINAS-MATA, P. i BELENGUER, P., Ion-drag and plasma-induced thermophoresis on particles in radiofrequency glow discharges, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **27**, 2.499-2.507 (1994).
 GODYAK, V. A., Measuring EEDF in gas discharge plasmas, dins AUCIELLO, O. (ed.) *Plasma-surface interactions and processing of materials*, Kluwer, pàg. 95-134, (Netherlands, 1990).