



Universitat Autònoma de Barcelona

**Caracterització elèctrica de
dielèctrics de porta de dispositius
MOS amb CAFM: SiO₂ i dielèctrics
d'alta permitivitat**

Xavier Blasco Jiménez

Maig 2005



Universitat Autònoma de Barcelona

**Caracterització elèctrica de
dielèctrics de porta de dispositius
MOS amb CAFM: SiO₂ i dielèctrics
d'alta permitivitat**

**Memòria presentada per en
Xavier Blasco Jiménez
per optar al grau de
Doctor en Enginyeria Electrònica**

Bellaterra, Maig 2005



Universitat Autònoma de Barcelona
Departament d'Enginyeria Electrònica

Na Dra. Montserrat Nafria Maqueda, Professora Titular del Departament d'Enginyeria Electrònica de la Universitat Autònoma de Barcelona,

CERTIFICA

que el treball *Caracterització elèctrica de dielèctrics de porta de dispositius MOS amb CAFM: SiO₂ i dielèctrics d'alta permitivitat* que presenta Xavier Blasco Jiménez per optar al grau de Doctor en Enginyeria Electrònica, ha estat realitzat sota la seva direcció.

Bellaterra, Maig de 2005.

Dra. Montserrat Nafria Maqueda

*Als meus pares,
ma germana
i la Lourdes.*

Agraïments.

En primer lloc vull expressar el meu sincer agraïment a la meva directora de tesi, na Montserrat Nafria, per la dedicació i la orientació que he rebut en tot moment per part seva, i a en Xavier Aymerich que, com director del meu treball de recerca de tercer cicle, em va iniciar en el món de la investigació.

A en Marc Porti, per haver-me aguantat tant de temps com a company de despatx i per les fructíferes discussions que hem tingut durant tots aquests anys.

A en Wilfried Vandervorst, per acollir-me dins del seu grup de recerca a IMEC, per proporcionar-me infraestructures i mostres d'última generació i pels seus suggeriments i comentaris sempre tant encertats.

A na Jasmine Pétry, per ajudar-me en el dia a dia a l' IMEC i per les discussions tant aferrissades sobre el high-k perfecte.

Igualment vull expressar el meu agraïment a la resta de companys i companyes del departament d'Enginyeria Electrònica, per la seva col·laboració en els petits detalls sense els quals no es podria haver realitzat aquesta feina.

I, per últim, als meus pares, la meva germana i la Lourdes, pel suport constant que m'han oferit i per la paciència que han tingut amb mi, especialment durant el procés d'escriptura de la tesi.

A tots, moltes gràcies.

Índex.

Relació d'articles inclosos en aquesta Tesi

Presentació	1
1. L'òxid de porta en dispositius MOS	3
1.1. La capacitat MOS	3
1.1.1. Descripció	4
1.1.2. Procés de fabricació	7
1.1.3. Tècniques estàndard d'oxidació de porta	8
1.1.4. Tècniques estàndard de caracterització elèctrica del dielèctric de porta	10
1.2. Degradació i ruptura dielèctrica del SiO ₂	12
1.3. Límits del SiO ₂ com a dielèctric de porta	16
1.4. Dielèctrics de porta d'alta permitivitat	18
1.4.1. Requeriments dels materials high-k	18
1.4.2. Comportament elèctric i fiabilitat	20
1.5. Resum	25
2. Microscopies de Sonda Propera	27
2.1. Caracterització a escala nanomètrica mitjançant Microscopies de Sonda Propera	28
2.2. Microscopi de Forces Atòmiques	30
2.2.1. Descripció	30
2.2.2. Caracterització topogràfica	34
2.2.3. Nanofabricació	35
2.3. Microscopi de Forces Atòmiques amb punta Conductora	37
2.3.1. Diferències respecte al Microscopi de Forces Atòmiques	38
2.3.2. Caracterització de dielèctrics de porta amb Microscopi de Forces Atòmiques amb punta Conductora	40

2.4. Microscopi de Forces Atòmiques amb punta Conductora Millorat .	44
2.4.1. Configuració experimental	45
2.4.2. Mesures puntuals	48
2.4.3. Mapes elèctrics	52
2.5. Resum	55
3. Caracterització topogràfica i elèctrica de SiO₂ crescut amb Microscopi de Forces Atòmiques	57
3.1. Caracterització topogràfica.....	59
3.1.1. Fabricació de les estructures de test i procediment experimental	59
3.1.2. Rugositat de l'òxid de porta crescut amb Microscopi de Forces Atòmiques	62
3.2. Caracterització elèctrica	65
3.2.1. Configuració experimental	66
3.2.2. Fabricació de mostres i estressos elèctrics per a la caracterització amb Microscopi de Forces Atòmiques amb punta Conductora	68
3.2.3. Fabricació de mostres i estressos elèctrics per a la caracterització estàndard	69
3.2.4. Comparació del comportament elèctric de l'AFM-GOX i el T-GOX	71
3.3. Resum	74
4. Caracterització de dielèctrics d'alta permitivitat mitjançant CAFM i ECAFM	77
4.1. Compatibilitat del HfAlO _x amb processos de recuit a temperatures elevades	78
4.1.1. Configuració experimental.....	79
4.1.2. Dependència de les propietats elèctriques amb la temperatura de recuit.....	80
4.2. Característiques elèctriques i fiabilitat dels stacks HfO ₂ /SiO ₂	87
4.2.1. Configuració experimental.....	87
4.2.2. Caracterització elèctrica dels stacks verges	90
4.2.3. Ruptura dielèctrica de l'stack HfO ₂ /SiO ₂	95
4.3. Resum	102
Conclusions	105
Referències	109
Articles (A-E)	

Relació d'articles inclosos en aquesta tesi.

- Article A: Topographic Characterization of AFM Grown SiO₂ on Si.**
X. Blasco, D. Hill, M. Porti, M. Nafria, X. Aymerich, Nanotechnology, vol. 12, pp. 110-112 (2001)
- Article B: Ultra Thin Films of Atomic Force Microscopy Grown SiO₂ as Gate Oxide on MOS Structures: Conduction and Breakdown Behavior.**
X. Blasco, M. Nafria, X. Aymerich, Surface Science, vol. 532-535, pp. 732-736 (2003)
- Article C: Characterization of the dependence of HfAlO_x electrical behavior on post-deposition annealing temperature.**
X. Blasco, J. Pètry, M. Nafria, X. Aymerich, O. Richard, W. Vandervorst, Microelectronic Engineering, vol. 72, pp. 191-196 (2004)
- Article D: Enhanced electrical performance for conductive atomic force microscopy.**
X. Blasco, M. Nafria, X. Aymerich, Rev. Scientific Instruments, vol. 76, article n° 016105 (2005)
- Article E: Breakdown spots of ultra-thin (EOT<1.5nm) HfO₂/SiO₂ stacks observed with enhanced – CAFM-**
X. Blasco, M. Nafria, X. Aymerich, J. Pètry, W. Vandervorst. Microelectronics and Reliability. vol., pp. 811-814 (2005)

Presentació

L'èxit de la microelectrònica com a un dels motors de l'economia mundial rau en el fet de poder cobrir la demanda contínua de millors prestacions. Des dels seus orígens la indústria microelectrònica ha optat per la contínua reducció de les dimensions dels dispositius MOS com a tècnica per augmentar les prestacions dels productes que ofereixen al mercat. Actualment aquesta miniaturització significa que les dimensions dels dispositius electrònics han entrat profundament en el rang nanomètric.

Tot i que històricament han anat sorgint problemes físics i tecnològics que a priori feien pensar que no es podria continuar l'escalat, l'experiència ha demostrat que sempre existeix una solució efectiva i econòmicament viable. En l'actualitat, uns dels principals problemes amb que es troba el procés de miniaturització (en el cas concret de la tecnologia MOS) són la capacitat per definir patrons cada vegada més petits i les propietats dels dielèctrics de porta amb gruixos extremadament prims.

Per aconseguir les dimensions laterals demandades, la nanofabricació ha seguit principalment dues estratègies: d'una banda, s'ha augmentat la resolució dels processos fotolitogràfics estàndard gràcies a la utilització, per exemple, de longituds d'ona més curtes o màscares amb desplaçament de fase, mentre que, de l'altra banda, han emergit noves tecnologies basades en principis de funcionament completament diferents que la fotolitografia, com Nanoimprint, Self Assembly o la oxidació mitjançant AFM. L'AFM permet definir patrons molt més petits (~10nm, que actuen com a màscares litogràfiques) que la fotolitografia estàndard, i amb una configuració experimental més senzilla. La comunitat científica ha dedicat grans esforços a determinar les condicions de creixement que porten a l'obtenció dels patrons d'òxid crescut amb AFM de dimensions més petites, la cinètica d'oxidació i a la fabricació de nanoestructures on part del procés ha estat realitzat mitjançant AFM. Però, tot i l'interès dedicat a l'AFM com eina nanolitogràfica, l'òxid de silici crescut amb AFM no ha estat utilitzat com òxid de porta. Si l'òxid crescut amb AFM fos un bon dielèctric de porta, es simplificaria més el procés de fabricació de dispositius nanomètrics amb AFM. Ja no seria imprescindible utilitzar aquest òxid com a màscara per un procés posterior, sinó que l'AFM podria créixer directament el dielèctric de porta. Per això un dels objectius proposats en aquesta tesi és analitzar, mitjançant la caracterització a escala nanomètrica amb CAFM, el comportament com dielèctric de porta de l'òxid crescut amb AFM, ja que les seves propietats com dielèctric actiu resulten pràcticament desconegudes.

A causa dels gruixos ultra primers del SiO₂ utilitzat com a dielèctric de porta (<2nm), el corrent de fuites de les estructures MOS (a través de la porta) és massa elevat, fet que comporta, d'una banda, consums energètics elevats, i de l'altra, temps de vida massa curts. L'opció triada per una gran part de la comunitat científica i tecnològica per a la reducció del corrent de porta és la substitució del SiO₂ com a dielèctric de porta per un altre material amb una permitivitat superior. Amb aquesta estratègia es pot aconseguir el valor de capacitat requerit però amb un gruix físic més gran i per tant, reduir dràsticament el corrent de fuites. Malauradament, substituir el SiO₂ no és una tasca fàcil, perquè es necessita un material que, a més de posseir unes bones prestacions elèctriques, també ofereixi la màxima compatibilitat possible amb els processos CMOS actuals. Tot i així, una gran part de la comunitat científica coincideix que el material que reemplaci al SiO₂ serà un compost de Hafni.

La caracterització elèctrica dels dispositius MOS, en la majoria dels experiments realitzats per estudiar el comportament elèctric i la fiabilitat dels materials d'alta permitivitat, s'ha dut a terme utilitzant tècniques estàndard en dispositius amb porta. Aquests experiments proporcionen resultats globals per tota l'àrea de la porta, quedant emmascarats fenòmens d'escala nanomètrica de vital importància per a la comprensió dels processos que tenen lloc. Utilitzant microscopies de sonda propera es poden estudiar aquests fenòmens a escala nanomètrica. És per això, que en aquesta tesi, s'ha proposat com un dels objectius principals l'estudi a escala nanomètrica de les propietats elèctriques i de fiabilitat dels materials d'alta permitivitat mitjançant CAFM. Donat que les prestacions ofertes pels CAFM comercials en alguns experiments ha resultat insuficient, s'ha optat pel desenvolupament d'un prototipus de CAFM millorat, amb unes prestacions elèctriques superiors.

Tenint en compte els objectius que es volen assolir, el treball que ha donat peu a aquesta tesi està dividit en quatre capítols. Al primer capítol es realitza una breu revisió de la capacitat MOS, la fiabilitat del SiO₂ i de dielèctrics d'alta permitivitat. El capítol primer recull també les limitacions que presenta el SiO₂ com a dielèctric de porta i les propietats que ha de tenir el material que el substitueixi. Al segon capítol s'introdueixen les microscopies de sonda propera, i es descriuen amb més detall les utilitzades per a la caracterització de dielèctrics de porta a escala nanomètrica. Es farà especial èmfasi en la descripció del prototipus de CAFM millorat, que ha desenvolupat el nostre grup de recerca. Els capítols tercer i quart presenten, respectivament, els resultats obtinguts de l'aplicació del CAFM per a la caracterització com a dielèctric de porta del SiO₂ crescut amb AFM, i per l'estudi del comportament elèctric i de la ruptura dielèctrica de diversos compostos de Hafni. Per últim es summaritzen les principals conclusions a que els resultats obtinguts han donat lloc.

1

L'òxid de porta en dispositius MOS

L'escalat continuat dels dispositius Metall - Òxid – Semiconductor (MOS) ha comportat que les seves dimensions estiguin en el rang nanomètric, i el gruix de l'òxid de porta, en particular, s'apropi al nm. Aquesta reducció de les dimensions ha permès un augment espectacular de les prestacions dels transistors d'efecte camp MOS (MOSFET), i per tant, dels sistemes electrònics en general. Actualment, degut als gruixos ultra prims del SiO_2 utilitzat com dielèctric de porta, el corrent de fuites de les estructures MOS és massa alt. Una de les solucions proposades per solucionar aquest problema és la substitució del SiO_2 per un dielèctric d'alta permitivitat, que permetria reduir dràsticament el corrent de fuites. Desgraciadament, aquesta transició no és senzilla, ja que es pretén substituir un material (SiO_2) que només té un inconvenient, una constant dielèctrica relativament baixa, per un dielèctric alternatiu que bàsicament només té un avantatge, una constant dielèctrica alta. Tot i això, el material escollit haurà de complir uns requisits mínims en aspectes com: permitivitat i alçada de barrera, interfícies de qualitat, compatibilitat amb els materials i processos utilitzats per la tecnologia CMOS, i fiabilitat.

En aquest capítol es realitza una breu revisió de la capacitat MOS, s'ofereix una descripció simplificada del seu procés de fabricació i de com es realitza la seva caracterització elèctrica estàndard. Posteriorment, es comenten les principals tècniques de fabricació de dielèctrics de porta ultra prims i s'introdueixen els conceptes associats a la fiabilitat microelectrònica del SiO_2 . Per últim, es descriuen les limitacions del SiO_2 com a dielèctric de porta, les propietats que ha de tenir el material que el substitueixi i s'ofereix un resum de l'estat de l'art sobre el comportament elèctric i la fiabilitat de dispositius MOS amb dielèctric de porta d'alta permitivitat.

1.1. La capacitat MOS

La capacitat MOS, com a part integrant del MOSFET, constitueix el cor de la indústria microelectrònica. Les seves prestacions no han deixat d'augmentar exponencialment des de fa quatre dècades, gràcies a la millora dels processos de fabricació i a la reducció

contínua de les seves dimensions. En aquesta secció es sumariuen les nocions bàsiques del funcionament, fabricació i caracterització de les capacitats MOS.

1.1.1. Descripció

La capacitat MOS (Fig. 1.1.a) està formada per una capa prima de material aïllant crescut entremig d'un substrat semiconductor i d'un terminal metàl·lic, al qual ens referim com terminal de porta. El substrat és típicament Silici, dopat amb impureses donadores o acceptores. L'aïllant tradicionalment emprat ha estat el SiO_2 , tot i que com es veurà en aquest capítol, està en procés de ser substituït. També el material del terminal de porta, que havia estat habitualment el poly-Si (Si molt dopat que es comporta pràcticament com un metall), està en vies de ser reemplaçat, en aquest cas per materials metàl·lics.

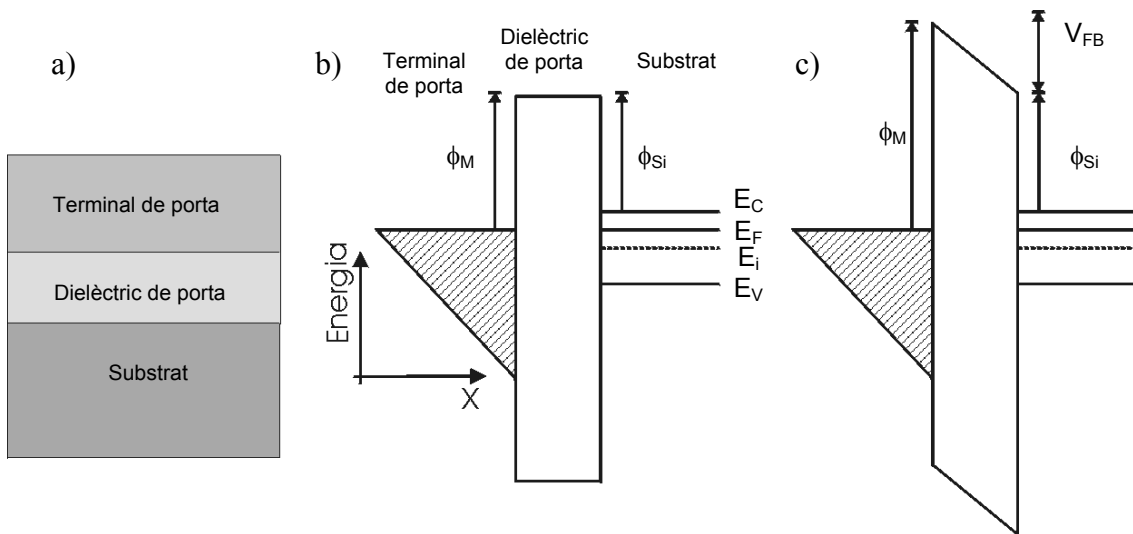


Fig. 1.1. a) Estructura de capes d'una capacitat MOS, b) i c) diagrama de bandes de la capacitat amb V_G igual a zero, per V_{FB} igual i diferent de zero respectivament. S'indiquen les alçades de barrera (ϕ_i) que troben els portadors per travessar el dielèctric, la banda de conducció (E_C) i de valència (E_V) i el nivell de Fermi (E_F).

Les figures 1.1.b i c mostren els diagrames de bandes d'una capacitat MOS amb una tensió de bandes planes (V_{FB}) igual a zero i diferent de zero respectivament, quan la tensió entre els terminals porta - substrat (V_G) és igual a zero. Nivells de Fermi del terminal de porta i del substrat a distintes energies i la presència de càrrega atrapada a l'estructura són les causes més comuns que provoquen que el diagrama de bandes no presenti bandes planes per $V_G=0V$. La V_G que s'ha d'aplicar a l'estructura MOS per tenir bandes planes és defineix com V_{FB} . A la figura 1.1.b s'indiquen també les alçades de barrera que troba un electró a la interfície porta - aïllant (ϕ_M) i a la interfície substrat - aïllant (ϕ_{Si}). En funció de la V_G que s'aplica, la capacitat pot estar en acumulació, deplecció o inversió. Per una explicació detallada del funcionament dels dispositius MOS, es recomana consultar per exemple [Pierret 83].

Tot i que en aquesta tesi s'estudien les capacitats MOS, des del punt de vista funcional el dispositiu d'interès és el transistor MOSFET (Fig. 1.2). El MOSFET està format per una capacitat MOS entre els terminals de drenador i font. Es comporta bàsicament com

un interruptor on la V_G determina si circula corrent entre aquests dos terminals. Quan la capacitat MOS està en inversió, existeix un canal al substrat (capa d'inversió) amb el mateix tipus de portadors que els terminals drenador i font i per tant quan s'aplica una tensió (V_{DS}) entre aquests dos terminals pot circular corrent. Quan la capacitat MOS no es troba en inversió, no existeix aquest canal i no pot circular corrent entre drenador i font. Aquest corrent determina les prestacions (velocitat) del transistor i és, sota certes aproximacions [Pierret 83], proporcional a la capacitat en inversió de l'estructura MOS. La capacitat (si es considera com un condensador quadrat de plaques plano - paral·leles) ve donada per la expressió (1.1) on k és la constant dielèctrica relativa del dielèctric de porta, ϵ_0 és la permitivitat de l'espai lliure, A_{cap} és l'àrea de la capacitat MOS i t_d el gruix del dielèctric. Per això, per cada nova generació de transistors, la indústria microelectrònica necessita utilitzar gruixos més petits d'òxid de porta per continuar millorant les prestacions [ITRS 04].

$$C_{inv} = \frac{k\epsilon_0 A_{cap}}{t_d} \quad (1.1)$$

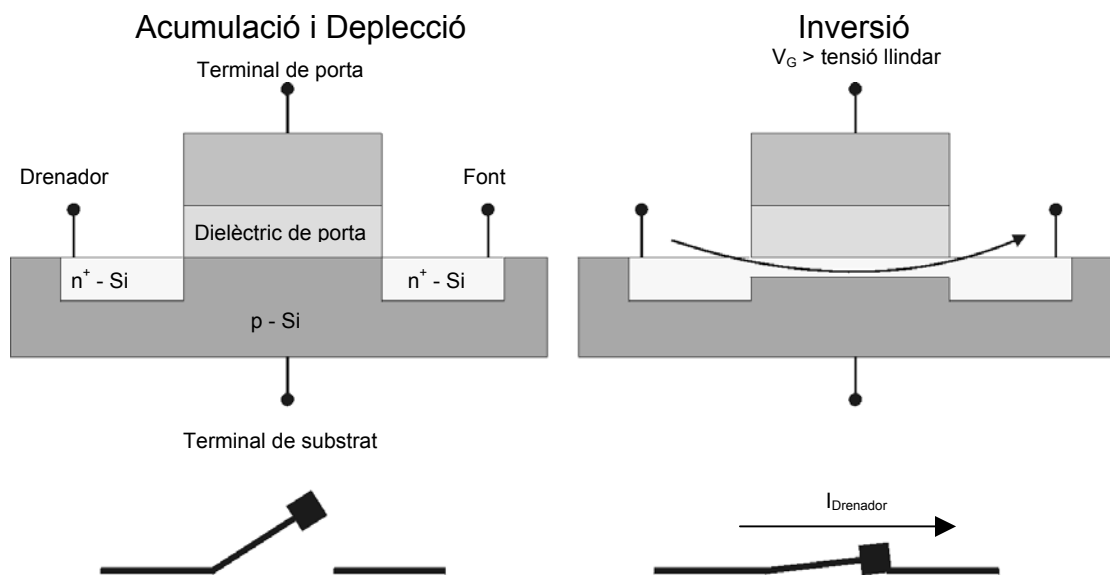


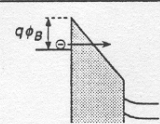
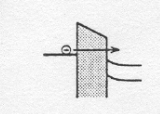
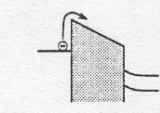
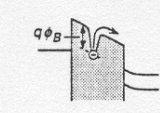
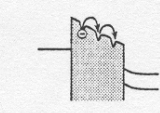
Fig. 1.2. Esquema d'un MOSFET sense i amb canal, i la seva representació com un interruptor obert (quan està en acumulació o depleció) o tancat (quan es troba en inversió)

Fins aquí s'ha considerat una capacitat MOS amb un aïllant ideal, és a dir, sense càrrega atrapada al seu interior o les seves interfícies, i amb un corrent túnel nul a través del dielèctric. A la pràctica, l'aïllant té una densitat interfacial de defectes no nul·la, on es pot atrapar càrrega. També es pot atrapar càrrega al volum (bulk) del dielèctric, en defectes que poden existir inicialment a l'aïllant o que apareixen a mesura que augmenta el temps d'operació del dispositiu. L'atrapament de càrrega provoca un canvi en el repartiment de tensions (o equivalentment d'energies) i en la forma del diagrama de bandes.

Mentre que en generacions passades de dispositius MOS és podia considerar el corrent túnel a través del dielèctric de porta menyspreable, pels gruixos d'òxid actuals ($<3\text{nm}$) aquest corrent té una importància crítica [Green 01]. A continuació es descriuen breument els principals mecanismes de conducció que es donen en dielèctrics de porta

ultra prim. Es poden trobar més detalls en [Hori 97]. També s'inclou la seva expressió analítica com a recordatori per quan calgui la seva utilització en capítols posteriors.

Per comentar els diferents mecanismes de conducció que s'observen als dielèctrics ultra prims, es partirà per exemple del diagrama de bandes d'una capacitat MOS on s'ha aplicat una tensió negativa al terminal de porta (Fig. 1.3). Els electrons que s'injecten des del terminal de porta poden arribar a la banda de conducció del semiconductor del substrat de dues formes: guanyant l'energia suficient per superar la barrera de potencial que suposa l'aïllant o travessant-la per efecte túnel. Si l'alçada de la barrera és relativament petita i/o la temperatura prou elevada, els electrons poden guanyar l'energia necessària per superar la barrera, és el que es coneix com emissió Schottky (Fig. 1.3.c). Per dielèctrics amb una alçada de barrera relativament gran i una densitat de defectes relativament petita (com és el cas del SiO₂), els mecanismes de conducció dominants són: túnel Fowler – Nordheim (Fig. 1.3.a), quan els electrons travessen una barrera triangular, o túnel directe (Fig. 1.3.b), qual els electrons travessen una barrera trapezoïdal. Per dielèctrics amb una densitat de defectes elevada, els mecanismes de conducció més comuns són l'emissió Poole – Frenkel (Fig. 1.3.d), en que els electrons salten a un defecte situat a l'òxid i d'aquí al semiconductor i la conducció Òhmica o Hopping (Fig. 1.3.e), en que els electrons van saltant d'un defecte del dielèctric de porta a un altre fins arribar al semiconductor.

a)	Fowler-Nordheim Tunneling	$J = \frac{A}{4\phi_B} \mathcal{E}_i^2 \cdot \exp\left(-\frac{2B\phi_B^{3/2}}{3\mathcal{E}_i}\right)$	
b)	Direct Tunneling	$J = \frac{A}{d^2} \left\{ (\phi_B - \frac{V}{2}) \cdot \exp(-Bd\sqrt{\phi_B - \frac{V}{2}}) - (\phi_B + \frac{V}{2}) \cdot \exp(-Bd\sqrt{\phi_B + \frac{V}{2}}) \right\}$	
c)	Schottky Emission	$J \propto T^2 \cdot \exp\left(-\frac{\phi_B - \sqrt{\mathcal{E}_i C}}{\phi_t}\right)$	
d)	Poole-Frenkel Emission	$J \propto \mathcal{E}_i \cdot \exp\left(-\frac{\phi_B - 2\sqrt{\mathcal{E}_i C}}{\phi_t}\right)$	
e)	Hopping (Ohmic) Conduction	$J \propto \mathcal{E}_i \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_{ah}}{kT}\right)$	

$A = \frac{q^2}{2\pi h}, \quad B = \frac{4\pi\sqrt{2m^*q}}{h}, \quad C = \frac{4\pi\epsilon_i}{q}$

Fig. 1.3. Mecanismes de conducció típics en dielèctrics de porta ultra prims: a) túnel Fowler – Nordheim, b) túnel directe, c) emissió Schottky, d) emissió Poole – Frenkel i e) conducció Òhmica o Hopping. Figura reimpressa de [Hori 97].

Cal comentar també que, amb la irrupció dels materials d'alta permitivitat (high-k) en el camp dels dielèctrics de porta, el paràmetre d'interès per comparar els gruixos dels dielèctrics no és el seu gruix físic, si no el seu gruix elèctric equivalent (EOT de l'anglès

Equivalent Oxide Thickness). L'EOT té un significat capacitiu: una estructura MOS amb un dielèctric de porta qualsevol amb gruix físic $t_{\text{high-k}}$, i EOT t_{eq} ofereix la mateixa capacitat que una estructura MOS amb una capa de gruix físic t_{eq} de SiO_2 . L'EOT ve donat per l'expressió (1.2), on $t_{\text{high-k}}$ és el gruix físic del material d'alta permitivitat, i k_{SiO_2} i $k_{\text{high-k}}$ són les constants dielèctriques relatives del SiO_2 i del material d'alta permitivitat respectivament.

$$EOT = t_{\text{eq}} = \frac{t_{\text{high-k}} \cdot k_{\text{SiO}_2}}{k_{\text{high-k}}} \quad (1.2)$$

1.1.2. Procés de Fabricació

En aquesta secció es descriurà breument les etapes del procés (simplificat) CMOS de fabricació d'una capacitat MOS (Fig. 1.4) en tecnologia bulk. Aquesta explicació bàsica facilitarà la comprensió de les particularitats de les mostres (i dels seus processos de fabricació) utilitzades en capítols posteriors. A més a més permetrà introduir els termes propis necessaris del procés de fabricació microelectrònic. Cal remarcar que és una descripció bàsica on s'han eliminat diverses etapes imprescindibles per la fabricació de dispositius MOS. Es pot trobar una visió en profunditat dels processos CMOS a [Maly 87].

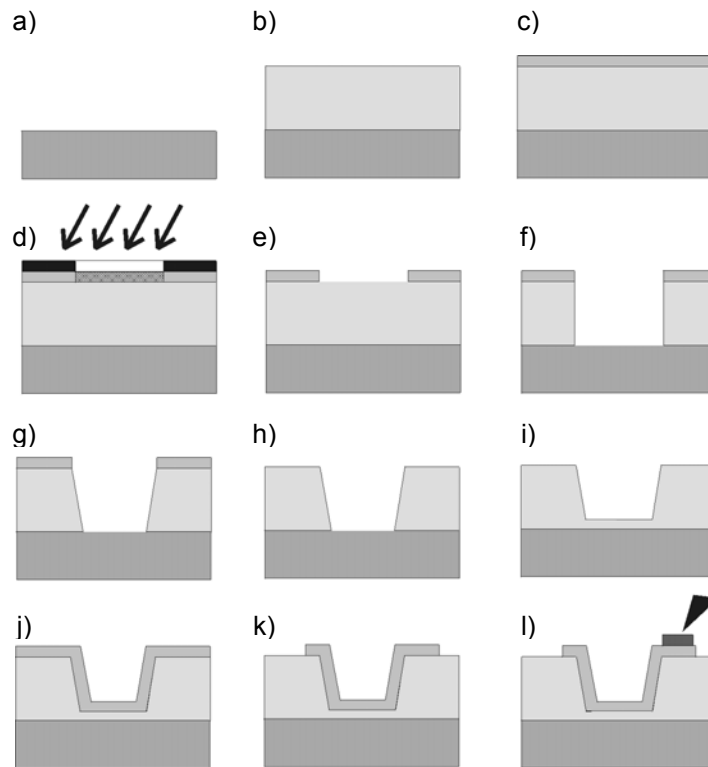


Fig. 1.4. Etapes del procés de fabricació (simplificat) d'una capacitat MOS en tecnologia bulk.

Es parteix d'un cilindre de (típicament) silici cristal·lí amb un diàmetre (actualment) de 200 o 300mm. Aquest es talla en làmines de 1-2 mm de gruix, que passen a ser el substrat sobre el que es fabricarà la capacitat MOS (Fig. 1.4.a).

El segon pas consisteix en una oxidació de camp. L'òxid de camp té com a finalitat aïllar els diferents dispositius i els diferents nivells que es fabriquen en un mateix substrat i el seu gruix és típicament de centenars de nm. L'òxid de camp es creix mitjançant oxidació humida, és a dir que durant el procés d'oxidació hi ha presència de vapor d'aigua, a temperatures de 900-1000°C. És un procés de creixement ràpid (de l'ordre d'una micra d'òxid en dues hores), però no massa precís degut justament a aquesta rapidesa (Fig. 1.4.b).

El següent pas és obrir finestres en l'òxid de camp fins al substrat, on es creixerà el dielèctric de porta o actiu. Per definir en quines zones s'obriran les finestres es realitza una etapa de fotolitografia seguida d'una etapa de gravat. La fotolitografia consta de tres passos. Primer es diposita una fotoresina sobre la capa en que es vol realitzar el procés (Fig. 1.4.c), l'òxid de camp en aquest cas. Una fotoresina és un material sensible a la radiació electromagnètica (actualment es treballa amb llum ultraviolada), de forma que la regió de fotoresina exposada (o la no exposada depenent del material) canviï les seves propietats i sigui fàcilment eliminable posteriorment. A continuació, es situa una màscara (Fig. 1.4.d) amb els patrons que es volen traslladar a la fotoresina (les finestres en aquest cas). La màscara està formada per zones opaques i zones transparents a la radiació electromagnètica utilitzada, per tant quan la màscara es col·loca sobre la fotoresina i s'aplica per exemple radiació ultraviolada les zones exposades canvien les seves propietats (queden sensibilitzades), i una vegada retirada la màscara, s'aplica algun producte químic que elimini la fotoresina sensibilitzada (Fig. 1.4.e). En aquest estat ja es pot realitzar el procés que es desitgi de forma selectiva sobre només una part de la capa que es té a sota de la fotoresina. En el nostre cas, per obrir finestres, el pas que s'ha de realitzar a continuació és el gravat (eliminació) de l'òxid de camp en la zona definida pel procés fotolitogràfic. El gravat es pot realitzar mitjançant un atac físic, que elimina el material bombardejant-lo amb ions amb alta energia. Aquest mètode de gravat té un grau d'anisotropia molt elevat, proporcionant perfils de gravat pràcticament verticals (Fig. 1.4.f). El gravat també es pot realitzar mitjançant un atac químic, obtenint llavors perfils suaus (Fig. 1.4.g). Com a pas final del procés d'obertura de les finestres, s'eliminen les restes de fotoresina (Fig. 1.4.h).

L'etapa següent és l'oxidació de porta (Fig. 1.4.i), que dóna peu al creixement d'un dielèctric de pocs nm de gruix. Els diferents mètodes que s'utilitzen es descriuran a la secció 1.1.3. Seguidament, es diposita poly-Si (Fig. 1.4.j) que actua com a terminal de porta, es dopa amb les impureses desitjades per tenir poly-Si dopat p o n, es sotmet l'òxid a una etapa de recuit per obtenir una distribució homogènia de les impureses del poly-Si i es realitza un altra etapa de fotolitografia i gravat (Fig. 1.4.k), per eliminar el poly-Si de les regions no desitjades. Per últim es pot dipositar metall, de forma que després d'aplicar fotolitografia i gravar-lo s'obté un bon contacte elèctric (Fig. 1.4.l), anomenat pad. En el cas que el dielèctric de porta sigui un material d'alta permitivitat, el terminal de porta de poly-Si tendeix a ser reemplaçat per un material metàl·lic.

1.1.3. Tècniques estàndard d'oxidació de porta

L'oxidació de porta d'una estructura MOS és uns dels passos més crítics del procés de fabricació CMOS. Això és conseqüència, per una banda, de la necessitat d'una interfície

òxid – semiconductor pràcticament ideal, amb una densitat d'estats interfacials molt baixa, i per altra banda, dels gruixos extremadament primos que s'utilitzen en les últimes generacions de MOSFETs. La fabricació de dielèctrics ultra primos es pot realitzar mitjançant creixement, deposició o implantació. S'entén com creixement l'oxidació (o oxinitridació) tèrmica del Si, mentre que deposició es refereix generalment a la generació química o física de la capa sense reacció amb el Si del substrat. Tanmateix, en alguns casos, l'òxid de porta és el resultat de la combinació de processos de deposició i creixement. En aquesta secció es presentaran breument aquestes tècniques.

L'oxidació i oxinitridació tèrmica del Si s'obté escalfant l'òxid en un rang de temperatures de 800 a 1200 °C, en una atmosfera amb O₂ o vapor d'H₂O. L'oxidació tèrmica consumeix Si durant el creixement, per tant, creant contínuament interfície nova. L'oxidació de la superfície del Si també té lloc a temperatura ambient, però només fins arribar a uns 3nm de gruix, ja que aquesta capa evita que el procés d'oxidació pugui continuar, al no poder arribar l'oxigen a la interfície on hauria de reaccionar amb el Si. En canvi, a temperatures altes, l'oxigen o les molècules d'H₂O es poden difondre a través de l'òxid prèviament crescut i l'oxidació pot continuar. L'oxidació en atmosfera d'oxigen i d'H₂O s'anomena oxidació seca i humida respectivament. Com que l'oxidació amb H₂O potencia la cinètica d'oxidació [Deal 65] generalment no s'utilitza pel creixement d'òxids ultra primos, tot i que alguns grups defensen que l'oxidació en aquesta atmosfera dona lloc a densitats de defectes més baixes i una millora de la fiabilitat [Bruyere 00, Murakami 94]. Fins fa poc, gairebé tot el SiO₂ de porta comercial es creixia mitjançant oxidació tèrmica. El principal problema de l'oxidació tèrmica, que ha obert les portes a la utilització de les tècniques de deposició química i física, és la necessitat d'altres temperatures, que són incompatibles amb alguns dels materials utilitzats actualment per la indústria microelectrònica.

Els processos de deposició química s'utilitzen normalment quan és imprescindible treballar a baixes temperatures (300-600°C). Aquests mètodes no consumeixen substrat, al contrari que l'oxidació tèrmica. Desgraciadament, ofereixen unes propietats interfacials gairebé sempre inferiors a les dels òxids tèrmics i per tant generalment cal sotmetre'ls a recuits a temperatures altes (≥750°C) per obtenir prestacions elèctriques comparables a les dels òxids tèrmics [Hattangady 96, Ma 94]. Dintre de la deposició química una de les tècniques més comuns és la *Chemical Vapor Deposition* (CVD) en la qual es fan reaccionar silà i oxigen per formar SiO₂ que es sublima en la superfície de l'òxid. L'aplicació d'aquesta tècnica per a la fabricació d'òxids ultra primos és limitada, ja que és difícil d'aconseguir uniformitat de gruix en oblees de 200-300mm. Una alternativa que ofereix un control molt precís del gruix crescut i de la uniformitat és la *Atomic Layer Deposition* ALD [Gasser 94, George 94], la qual creix el dielèctric monocapa a monocapa. Amb aquesta tècnica es poden aconseguir gruixos d'òxids per sota dels 0.5nm amb excel·lent uniformitat. Un altre mètode utilitzat per aconseguir gruixos per sota del nm és l'oxidació química humida, la qual fa servir productes que normalment s'utilitzen per netejar el Si, per provocar la seva oxidació [Couteau 98, Kern 70].

Les tècniques de creixement físiques pel SiO₂ [King 98] i Si – O – N [Soleimani 95, Liu 96] consisteixen en una implantació iònica, seguida generalment per un recuit. Aquestes tècniques permeten un gran control del gruix, composició i estructura de les capes d'òxid. Les tècniques de creixement físiques es diferencien de les deposicions

químiques en el fet que no es produeix cap deposició, si no que les capes dielèctriques es formen mitjançant la incorporació i posterior reacció dels compostos apropiats en el substrat. Aquestes tècniques poden deteriorar el substrat.

Cal dir que la majoria d'aquestes tècniques es poden utilitzar pel creixement dels dielèctrics de porta d'alta permitivitat dels quals es parla en la secció 1.4, sent els més utilitzats els mètodes de deposició química com els CVD i ALD ja comentats, i la Metalorganic Chemical Vapor Deposition (MOCVD). Aquesta tècnica permet la formació d'una capa bastant homogènia però té l'inconvenient de que el material dipositat ha de ser compatible amb altes temperatures.

1.1.4. Tècniques estàndard de caracterització elèctrica del dielèctric de porta

Les tècniques de caracterització elèctrica del dielèctric de porta de dispositius MOS que utilitza de forma estàndard la indústria microelectrònica tenen en comú el fet que ens proporcionen els paràmetres elèctrics desitjats a partir de la mesura de la resposta elèctrica del dispositiu quan se li aplica un test elèctric (tensió o corrent). Els aparells més comuns utilitzats per efectuar aquesta caracterització són: l'analitzador de paràmetres semiconductors i el mesurador d'impedàncies. A continuació, es descriuen aquests instruments i els tests que permeten realitzar. A la secció 1.2. s'explicarà quins paràmetres permet mesurar cada tipus de test, com s'obtenen i que signifiquen.

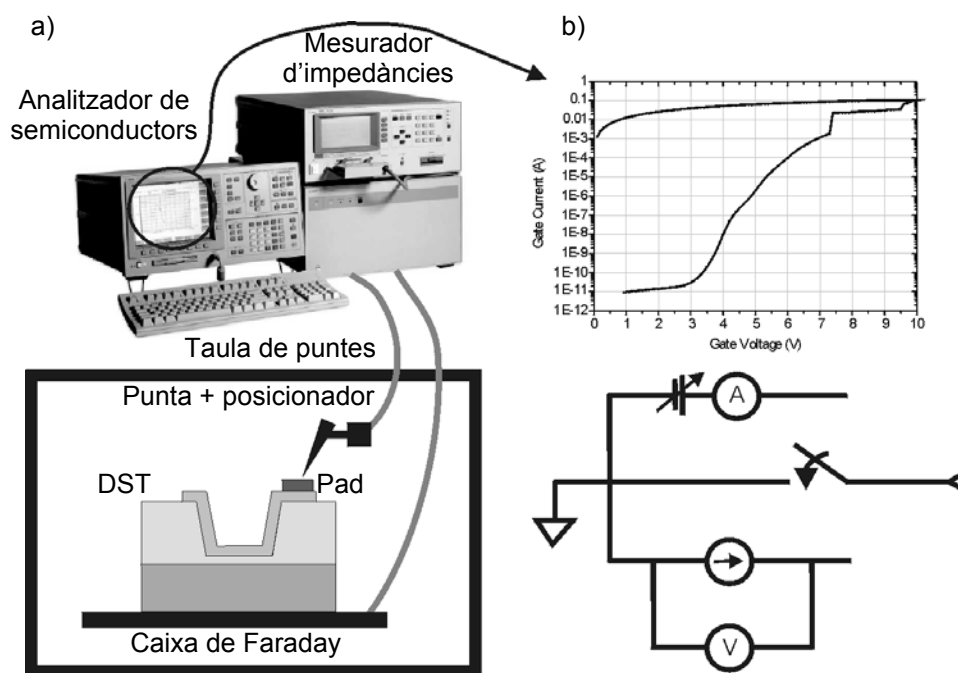


Fig. 1.5. a) Sistema bàsic de caracterització elèctrica de dispositius semiconductors: Analitzador de semiconductors, mesurador d'impedàncies i taula de puntes. b) Exemple de mesura amb un SMU i esquema del hardware que l'integra.

L'analitzador de paràmetres de semiconductors (APS) (Fig. 1.5.a) es pot entendre com un multímetre d'altres prestacions. Està compost de terminals font que permeten aplicar una tensió (o corrent) al dispositiu sota test (DST), terminals monitor que permeten mesurar l'evolució de la resposta elèctrica del DST i terminals font - monitor (SMU, de

l'anglès Source – Monitor Unit). Els SMU (Fig. 1.5.b inferior) són l'element principal de l'APS, permeten aplicar tensió i simultàniament mesurar corrent o aplicar corrent i simultàniament mesurar tensió. Per a la caracterització del dielèctric de porta, els test elèctrics més comuns [Martin 98] consisteixen en l'aplicació al DST de: a) Tensió constant, i mesura simultània del corrent que circula a través de la capacitat MOS en funció del temps. Aquest test permet mesurar el temps que el dielèctric triga en perdre total o parcialment les seves propietats aïllants. b) Corrent constant, i mesura simultània de la tensió que cau a la capacitat en funció del temps. Aquest test s'utilitza per determinar la càrrega injectada al dielèctric fins a un cert instant de temps. Típicament, fins que el dielèctric perd les seves propietats aïllants. c) Rampa de tensió, i mesura simultània del corrent que travessa la capacitat MOS. Aquest tipus de test permet mesurar la tensió i el camp elèctric en que el dielèctric perd les seves propietats aïllants, i estudiar els diferents modes de conducció a través del dielèctric. Per últim, sovint s'utilitzen combinacions dels mencionats tests.

A més a més, alguns APS permeten mesurar el valor de la capacitat de l'estructura MOS en funció de la tensió de porta. Per una determinada tensió de porta V_G , s'aplica una rampa de tensió des de $V_G - V$ fins a $V_G + V$ i es mesura el corrent de desplaçament que indueix aquesta rampa en la capacitat MOS. A partir del corrent de desplaçament i de l'equació (1.3), on Δt és el temps de duració de la rampa i ΔV la diferència entre els valors inicial i final de la rampa, es determina el valor de la capacitat. El resultat de repetir d'aquesta mesura per un rang de valors de V_G són les corbes C-V (capacitat - voltatge) quasi estàtiques. Les corbes C-V permeten determinar la tensió de bandes planes de l'estructura i el gruix de l'aïllant [Pierret 83]. Per obtenir les corbes C-V a alta freqüència s'utilitza el medidor d'impedàncies.

$$C = \frac{I_{\text{desplaçament}} \Delta t}{\Delta V} \quad (1.3)$$

La tècnica de charge pumping s'utilitza per caracteritzar la interfície aïllant – substrat [Groeseneken 84, Heremans 89]. Consisteix en la mesura del corrent del substrat, degut a processos de recombinació que es donen als defectes de la interfície, quan l'estructura alterna periòdicament d'acumulació a inversió. Això s'aconsegueix aplicant un tren de polsos de voltatge a la porta.

Aquestes tècniques s'utilitzen normalment per caracteritzar dispositius no encapsulats, és a dir que es pot accedir directament als pads. El fet que en una oblia pot haver milers de dispositius, i per tant de pads, on s'ha d'aplicar la magnitud elèctrica i mesurar la resposta, i que aquests pads solen ser uns quadrats d'unes 50 micres de costat, força que tant l'APS com el mesurador d'impedàncies, treballin conjuntament amb una taula de puntes (Fig. 1.5.a). La taula de puntes, en la seva versió més bàsica, consisteix en: a) unes puntes que es poden moure manualment amb precisió micromètrica per fer contacte sobre els pads desitjats, a la vegada que estan connectades als terminals de l'instrument que genera l'estímul elèctric i mesura la resposta, b) un sistema d'amplificació visual (p. ex. Microscopi) que permeti supervisar el posicionament de les puntes i c) una gàbia de Faraday on es situen les puntes i la oblia, per minimitzar la influència del soroll elèctric en les mesures.

Aquesta configuració bàsica del sistema de test pot ser suficient per un laboratori de recerca petit, però no per aplicacions on es necessita un volum de mesures per unitat de temps gran, com per exemple en una línia de producció de circuits integrats. De totes formes, el mateix equip bàsic presentat pot assolir les prestacions demandades simplement amb les millores i/o automatitzacions que es descriuen a continuació.

Afegir al sistema una matriu de connexions. A la matriu de connexions estan connectats tots els terminals dels instruments de caracterització i les puntes de la taula de puntes. La matriu permet connectar qualsevol de les puntes a qualsevol dels terminals dels instruments de caracterització mitjançant una aplicació informàtica. Així, per exemple, es pot passar de tenir les puntes i, j connectades a dos SMU de l'APS a tenir-les connectades a dos terminals del mesurador d'impedàncies amb un sol click de ratolí, enlloc de canviar els cables físicament.

Substituir els posicionadors manuals de les puntes per una carta de puntes. Mentre que el nombre de posicionadors manuals no sol ser superior a 4-6 per taula de puntes, una carta de puntes conté de l'ordre de 25-50 puntes amb la mateixa disposició geomètrica que els pads dels dispositius que es volen caracteritzar. Per tant el temps de posicionament per dispositiu disminueix. A més a més, afegint un multiplexor, que permet caracteritzar múltiples dispositius en paral·lel, s'obté reducció del temps total de test.

Per aconseguir que tant el procés de test com l'extracció de paràmetres funcioni de la forma més optimitzada possible, totes les accions que ha d'executar la instrumentació es poden gestionar automàticament des d'una aplicació informàtica de control i extracció de paràmetres.

1.2. Degradació i ruptura dielèctrica del SiO_2

L'èxit de la indústria microelectrònica es deu en gran mesura a les excel·lents característiques dielèctriques del SiO_2 . L'estudi de les seves propietats durant dècades ha permès acumular una gran quantitat de coneixements sobre el seu comportament, tot i que encara resten interrogants. En aquesta secció es sumeritzen els principals resultats referents al seu comportament com dielèctric de porta.

S'ha observat que els dispositius MOS després d'un cert temps d'operació deixen de funcionar correctament. Hi ha diversos factors que poden provocar la fallida [Groesenken 03], com per exemple la electromigració dels àtoms de metall de les pistes que connecten els diferents terminals del dispositiu, o la difusió d'àtoms de bor del dopatge del terminal de porta fins al substrat. En qualsevol cas, el factor crític que provoca que el dispositiu MOS deixi de funcionar correctament, des del punt de vista del comportament elèctric del dielèctric de porta, és la pèrdua de les seves propietats aïllants. Aquest fenomen, conegut com ruptura dielèctrica, ha atret des de fa dècades l'atenció dels investigadors que treballen en el camp de la fiabilitat de dispositius MOS. El coneixement del procés que porta a la pèrdua de les propietats aïllants i quins paràmetres influeixen és vital per poder predir el temps de vida del dispositiu.

La ruptura dielèctrica d'estructures MOS en condicions d'operació normals (les que es trobaran dins un circuit) pot trigar temps de l'ordre d'anys. Per poder estudiar aquests fenòmens en uns temps raonables, els tests es fan en condicions accelerades. És a dir, s'aplica una magnitud elèctrica (estrès) amb valors superiors als normals d'operació per induir la ruptura en un temps experimentalment raonable. Habitualment s'apliquen estressos del tipus:

Time Zero Dielectric Breakdown (TZDB) [Martin 98], que consisteixen en aplicar rampes de corrent o de tensió, sent aquestes últimes les més utilitzades habitualment. Quan s'aplica una rampa de tensió, es mesura simultàniament la intensitat que travessa l'òxid. A partir d'aquest test es poden identificar els diferents modes de conducció del dielèctric pels diferents rangs de voltatge i el trencament de l'estructura, detectat (en òxids de més de 3nm de gruix) com un augment bruscat del corrent mesurat (Fig. 1.6). Mitjançant l'evolució del corrent durant sèries de rampes de tensió, es pot monitoritzar la degradació prèvia a la ruptura dielèctrica que pateix l'estructura. El paràmetres més rellevants que s'obtenen amb aquests tests son la intensitat i la tensió a la que es produeix la ruptura (I_{BD} i V_{BD}), a partir de l'aplicació de rampes de corrent i de tensió respectivament.

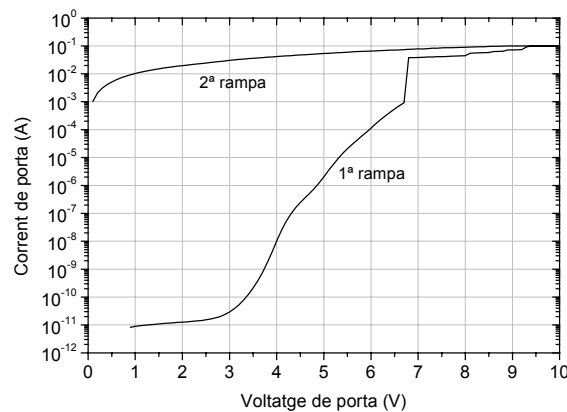


Fig. 1.6. Seqüència de 2 rampes de tensió consecutives aplicades a una capacitat MOS amb 3.5nm de SiO_2 com dielèctric de porta. La primera rampa presenta un salt de corrent que correspon a la ruptura dielèctrica. Per tensions menors que la de ruptura, es poden estudiar els diferents mecanismes de conducció que es donen. La segona rampa confirma aquesta ruptura ja que presenta valors de corrent elevats fins i tot per tensions aplicades molt baixes.

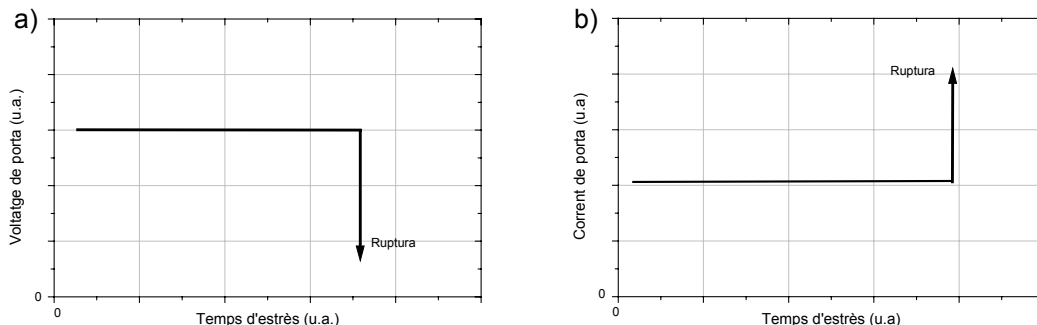


Fig. 1.7. L'aplicació CCS (a) i CVS (b) permet estudiar la degradació i ruptura dels dispositius MOS. Quan s'apliquen aquests estressos, la ruptura es detecta com una reducció brusca de la tensió que cau a la capacitat (CCS) o un augment sobtat del corrent que hi circula (CVS).

Time Dependent Dielectric Breakdown (TDDB) [Martin 98]. En aquest tipus d'estrès s'apliquen corrents (voltatges) constants i es mesura la evolució del voltatge (corrent) en funció del temps. En el cas d'estrès a corrent constant (CCS, de l'anglès Constant Current Stress) es detecta el trencament com un descens bruscat de la tensió mesurada (veure Fig. 1.7.a). Quan s'aplica estrès a tensió constant (CVS, de l'anglès Constant Voltage Stress) el trencament es detecta com un augment bruscat de la intensitat (veure Fig. 1.7.b). La evolució del corrent (o el voltatge) abans de la ruptura permeten estudiar la degradació de l'estructura. Els paràmetres més rellevants que s'obtenen amb aquests tests són el temps i la càrrega injectada fins la ruptura (t_{BD} i Q_{BD}).

Avui en dia, s'accepta que el fenomen de la ruptura dielèctrica del SiO_2 (pèrdua total o parcial de les propietats aïllants) ve precedit d'un procés de degradació durant el qual l'estructura i les propietats elèctriques de l'òxid van canviant. La degradació es causa al sotmetre a estrès l'estructura, com pot ser aplicant-li experimentalment una intensitat o un voltatge. L'estrès provoca la generació de trampes (defectes) a les interfícies i al volum de l'òxid. Quan un conjunt d'aquestes trampes forma un camí (de conductivitat alta) que connecta la porta amb el substrat de la capacitat MOS, es considera que l'òxid s'ha trencat [Degraeve 98, Stathis 99] (veure Fig. 1.8). Aquest model per a la ruptura, conegut com model de percolació [DiMaria 97, Suñé 90, Degraeve 95, Degraeve 98, Stathis 99] es pot estendre a òxids ultraprims simplement tenint en compte que ara el gruix d'òxid és del mateix ordre que el diàmetre d'un defecte ($\sim 3\text{nm}$) [Stathis 01] i per tant amb la generació d'un sol (o molt pocs) defectes ja es produeix la ruptura passant a un estat de conducció alta.

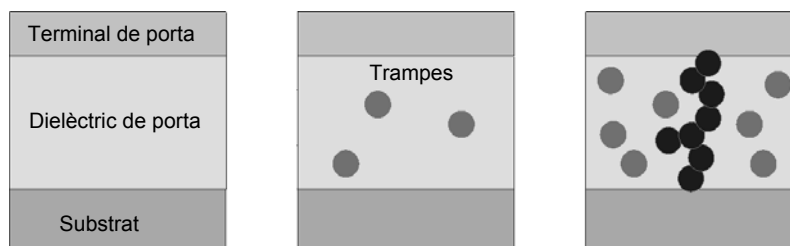


Fig. 1.8. Model percolatiu de la ruptura del dielèctric de porta d'una estructura MOS: l'aplicació d'estrès a la mostra provoca un procés de degradació que genera trampes aleatòriament a l'òxid, quan aquestes creen un camí (d'alta conductivitat) entre els elèctrodes es produeix la ruptura dielèctrica de la capacitat.

La ruptura és un procés estadístic. Això implica que, si s'aplica el mateix estrès a capacitats idèntiques, els valors dels paràmetres de ruptura com voltatge o temps de ruptura, no seran sempre els mateixos sinó que estaran distribuïts en un rang de valors. Tant experimentalment com teòricament s'ha verificat que aquests paràmetres segueixen una distribució de Weibull [Stathis 01].

La fallida de l'òxid de porta és un problema del tipus "weakest link", que vol dir que la ruptura es produeix en una petita àrea de l'òxid (espot) de dimensions molt reduïdes respecte al total de la capacitat, que la ruptura es produeix sempre en l'espot més dèbil (weakest) i que la probabilitat de que es produeixi la ruptura en un espot no depèn de que es produeixi en altres espots, és a dir, que els espots són independents [Wolters 86]. Tant l'anàlisi estadística de la informació obtinguda mitjançant les tècniques de caracterització estàndard [Suñé 90] com observacions directes dels dielèctrics de porta [Porti 02c, Palumbo 04] mostren que la ruptura és un fenomen extremadament local

(àrees de $\sim 10^{-13}$ - 10^{-12} cm²). Al capítol 2 es presentaran les tècniques apropiades per estudiar aquests fenòmens a escala nanomètrica, i que han estat utilitzades per obtenir els resultats presentats en aquesta tesi.

En funció del gruix de l'òxid, les característiques de conducció de post ruptura canvien. Els diferents tipus de comportament, definits pels nivells de corrent i les dependències de la intensitat amb el voltatge que es tenen en el règim de post ruptura, es defineixen com modes de ruptura/fallida. El mode concret de fallida que pateix l'òxid depèn del seu gruix [Green 01]. Per òxids amb un gruix >10 nm s'observa trencament dur (Hard Breakdown HBD) que consisteix en un canvi bruscat d'un estat de conductivitat baixa a un de conductivitat alta, amb una relació intensitat – voltatge (de post ruptura) lineal (veure Fig. 1.9). Per òxids d'un gruix menor que 5 nm, el mode de fallida pot ser tant el HBD com la ruptura suau (Soft Breakdown SBD) per la qual l'òxid perd parcialment les seves propietats dielèctriques, i on es té una dependència potencial de la intensitat amb el voltatge en el règim de post ruptura (veure Fig. 1.9). Tot i que el corrent després de SBD és diversos ordres de magnitud més petit que el corrent després de HBD, i que fins i tot la forma de la característica I-V és diferent depenent del tipus de ruptura, es creu que el mecanisme de ruptura (creació d'un camí conductor entre els elèctrodes, degut a la generació de trampes a l'òxid) és el mateix pel HBD i pel SBD, i que el fet que es tingui un mode de ruptura o un altre depèn de la configuració local concreta del camí conductor. Per òxids amb gruixos inferiors als 2.5 nm, s'ha detectat un nou mode de fallida: la ruptura progressiva (Progressive Breakdown PBD) [Monsieur 01, Monsieur 02, Linder 02]. La particularitat d'aquest mode és que la ruptura dielèctrica no es manifesta mitjançant un canvi sobtat de conductivitat (o si més no, és molt inferior a l'increment observat en els fenòmens de SBD i HBD) que permeti discernir de manera clara l'etapa de degradació de la de post ruptura. En aquest mode de fallida, a mesura que la degradació avança apareixen fluctuacions de corrent, fins que en un moment donat es forma el canal percolatiu en una determinada zona de l'òxid que dona lloc a la ruptura dielèctrica. Un cop desencadenada, i com a conseqüència de la degradació addicional que experimenta el canal conductor a causa de l'estrès aplicat, el corrent va augmentant de manera progressiva fins que s'assoleixen els corrents típics de post ruptura [Monsieur 02].

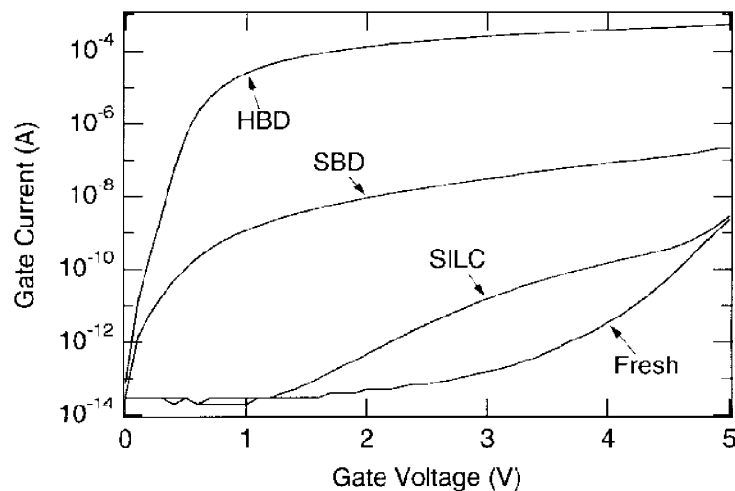


Fig. 1.9. Característiques corrent – voltatge corresponents a una capacitat amb una capa de 4.5 nm de SiO₂ com dielèctric de porta. S'observen diferents estadis de degradació i ruptura. Reimprès de [Crupi 98]

En òxids d'entre 3 i 10nm, prèviament al BD, es dona el fenomen del corrent de fuites induït per l'estrès elèctric (Stress Induced Leakage Current SILC) [Olivo 88, Jahan 91]: s'observa a camps baixos un corrent més gran que el que es tindria en una mostra sense estressar (però menor que si s'hagués patit un HBD o un SBD). El fenomen de la SILC s'atribueix a conducció per efecte túnel inelàstic assistit per les trampes generades en l'òxid [Takagi 99, Wu 99]. A mesura que augmenta l'estrès també augmenta la SILC de manera contínua fins que s'arriba al SBD o HBD. A diferència del SBD i el HBD que són fenòmens extremadament locals, la SILC es dona en tota l'àrea de la capacitat.

Cal mencionar que durant els últims anys ha crescut l'interès de la comunitat científico-tècnica per l'efecte que té la ruptura de l'òxid de porta no només en l'operació del dispositiu si no també en el funcionament del circuit electrònic del qual forma part [Rodríguez 02, Kaczer 02, Rodríguez 03, Kaczer 03, Fernandez 04]. L'estudi de diversos circuits digitals com inversors, cel·les SRAM o oscil·ladors ha revelat que el seu funcionament és parcialment tolerant al trencament de l'òxid de porta d'alguns dels MOSFETs que els componen. Aquest comportament relaxa una mica els criteris de fiabilitat imposats als MOSFETs, per que el seu trencament no implica necessàriament que el circuit deixi de funcionar correctament, que en última instància és el criteri que importa al mercat.

1.3. Límits del SiO₂ com a dielèctric de porta

Actualment, l'electrònica d'altres prestacions, com p. ex. els processadors d'última generació, utilitza MOSFETs amb gruixos d'òxid de porta per sota dels 2nm. L'ús de capes ultra primes de SiO₂ com dielèctric de porta d'estructures MOS comporta una sèrie de problemes, com: un corrent de fuites massa elevat, un corrent drenador-font (en MOSFETs) reduït, degradació de la fiabilitat, penetració de Bor i necessitat de créixer capes extremadament uniformes. En aquesta secció es comentaran aquests factors i com limiten el gruix mínim de SiO₂ que es pot utilitzar en la tecnologia CMOS.

Gràcies a la seva gran alçada de barrera i baixa densitat de defectes, el corrent que travessa el SiO₂ de porta ha estat tradicionalment molt baix. Per capes ultra primes no es dona aquesta situació, ja que a les tensions normals d'operació es té un corrent de fuites inacceptablement alt. Quan el gruix físic entre l'elèctrode de porta i el substrat està per sota dels ~3nm, el mecanisme de conducció que domina el corrent de fuites a través del SiO₂ és túnel directe [Buchanan 99] i per tant aquest corrent augmenta exponencialment quan es disminueix el gruix de l'òxid. Dades experimentals (Fig. 1.10) [Green 01] mostren que el corrent de fuites augmenta un ordre de magnitud per cada 0.2nm de reducció del gruix. Considerant que el corrent de fuites màxim acceptable per ordinadors de sobretaula és de 1A/cm² i per electrònica portable de 10⁻³A/cm², el gruix físic mínim de SiO₂ acceptable és aproximadament de 1.3 i 1.9nm respectivament.

Per MOSFETs amb SiO₂ ultra prim com dielèctric de porta (<~1.3nm) s'ha observat una reducció del corrent font - drenador respecte al valor esperat [Timp 97]. Per tant, no té sentit reduir més el gruix del SiO₂ si la reducció no comporta millores en les prestacions i sí, en canvi, un gran augment del corrent de fuites.

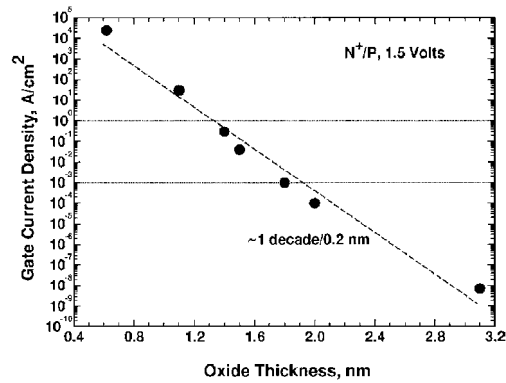


Fig. 1.10. Densitat de corrent de fuites en transistors NMOSFET, en funció del gruix de SiO_2 , quan s'aplica un voltatge de porta 1.5V. El corrent augmenta una dècada per cada reducció de 0.2nm en el gruix de l'òxid. Les línies horitzontals indiquen els corrents de fuites màxims acceptables per aplicacions d'altas prestacions (1A/cm²) i per aplicacions portables (1mA/cm²). Reimprès de [Green 01].

El temps de vida dels dispositius amb capes ultra primes de SiO_2 és també una de les grans preocupacions en el rang de gruixos menor de 2nm [Degraeve 96, Stathis 97, Buchanan 99]. Alguns grups han predit que les capes de SiO_2 amb un gruix menor de 2.2nm no compliran els criteris de fiabilitat requerits per la indústria [Stathis 98]. Altres grups [Weir 00], en canvi, redueixen aquest gruix fins a valors tant petits com 1.4nm. Aquesta dispersió de prediccions és deguda a que els paràmetres en els que es basen els models de predicció s'extreuen de tests en condicions accelerades, i llavors depenent del model d'extrapolació s'obtenen valors finals diferents. En qualsevol cas, per gruixos al voltant de 1.0nm, la probabilitat estadística de formació d'un camí percolatiu redueix la fiabilitat a nivells inacceptables [Alam 99].

First year of production	1999	2001	2002	2005	2008	2011	2014
DRAM generation	1G	1G	4G	16G	64G	256G	1T
Minimum feature size, nm	180	160	130	100	70	50	35
Equivalent oxide thickness, nm	1.9–2.5	1.5–1.9	1.5–1.9	1.0–1.5	0.8–1.2	0.6–0.8	0.5–0.6

Taula. 1.1. Previsions de la ITRS per l'EOT dels dielèctrics de porta de dispositius MOS (Reimprès de [Green 01]).

Per tant, els límits fonamentals per la reducció del gruix del SiO_2 venen donats per l'excés de corrent de fuites, la reducció del corrent drenador-font i la fiabilitat. Els dos primers factors imposen un límit de $\sim 1.3 - 1.4$ nm com a gruix més prim. A més a més, es té el problema tecnològic de la uniformitat de la capa. La rugositat de les interfícies provoca que per gruixos mitjos de valor límit, en alguns punts aquest gruix sigui menor de manera que en aquest punts es produirà abans la degradació i ruptura dielèctrica. Un altre problema tecnològic és la difusió de Bor des del terminal de porta fins al substrat a través d'aquestes capes tant primes, produint inestabilitats en el funcionament dels dispositius.

Per seguir la predicció de la International Technology Roadmap for Semiconductors [ITRS 04] referent a la reducció de gruix del dielèctric de porta (taula 1.1), el SiO_2 s'ha

de reemplaçar per un altre dielèctric amb constant dielèctrica més gran (high-k) a curt termini, ja que es pot aconseguir el valor de capacitat requerit però amb un gruix físic més gran (veure expressions 1.1 i 1.2), el que permet reduir dràsticament el corrent de fuites. Encara que la substitució del SiO₂ per un material high-k sembla la opció preferida per la indústria microelèctronica, el SiO₂ podria continuar com dielèctric de porta si altres estratègies com la innovació en el disseny dels dispositius (MOSFETs de doble porta [Liu 98, King 98] o MOSFETs verticals [Hergenrother 99]) són adoptades pel sector.

1.4. Dielèctrics de porta d'alta permitivitat

Com s'ha vist a la secció anterior, a mesura que l'EOT requerit s'apropa cap a valors $\leq 1.0\text{nm}$, el SiO₂ presenta tota una sèrie de problemes. En aquesta secció es llisten les característiques que ha de reunir el material d'alta permitivitat que substitueixi el SiO₂. A més a més, s'ofereix una visió resumida de conjunt dels coneixements que disposa la comunitat científica respecte a les propietats elèctriques i de fiabilitat dielèctrica dels materials d'alta permitivitat.

1.4.1. Requeriments dels materials high-k

Segons les previsions [ITRS 04] un EOT $\leq 1.0\text{nm}$ serà necessari abans de 5 anys, el que implica la substitució del SiO₂ per un material high-k. Desgraciadament, aquesta transició no és senzilla, ja que es pretén substituir un material (SiO₂) que només té un inconvenient, una k relativament baixa, per un dielèctric alternatiu que bàsicament només té un avantatge, una constant dielèctrica alta. Tot i això, el material escollit haurà de complir uns requisits mínims en aspectes com: a) permitivitat i alçada de barrera, b) estabilitat termodinàmica amb el Si del substrat, c) interfícies de qualitat, d) morfologia de la capa, e) compatibilitat amb el material del terminal de porta, f) i amb els processos CMOS, i g) fiabilitat [Wilk 01]. En aquesta secció es comentaran les propietats que ha de tenir el material que substitueixi al SiO₂ en relació als punts enumerats.

Evidentment, seleccionar un material amb una constant dielèctrica superior a la del SiO₂ és imprescindible, però per molts materials que opten a substituïts del SiO₂ els valors de k no són ben coneguts per capes ultra primes i els models teòrics pel càlcul de k no sempre s'ajusten a tot el ventall de dades experimentals [Shannon 93]. La diferència entre els valors calculats i els experimentals es pot atribuir a diferents factors com la consideració (o no) del gruix i del mètode de deposició de la capa. A més a més de la k, s'ha de tenir en compte l'alçada de barrera que presenta el dielèctric, ja que el corrent de fuites augmenta al disminuir l'alçada de barrera. Desgraciadament, per molts dels materials sota estudi, la relació entre la constant dielèctrica i l'alçada de barrera és inversament proporcional [Robertson 00]. Tot i que l'addició de petites quantitats d'elements com Zircón o Hafni al SiO₂ produeixen un augment de la constant dielèctrica d'aquest [Lucovsky 00], això només ofereix una solució a curt termini per allargar una mica la utilització del SiO₂, però no és suficient a mig termini. Per tant, encara que en un principi es va pensar que faria falta un dielèctric amb una $k > 25$ per substituir el SiO₂, actualment es treballa amb materials que ofereixen només un augment moderat de k però que a canvi presenten una alçada de barrera acceptable. Un

material amb una $k \sim 12 - 20$ permet obtenir l'EOT necessari per les generacions futures de transistors, amb uns gruixos físics en el rang de 3.5 - 5nm [Wilk 01].

Per tots els dielèctrics de porta ultra prims, la interfície amb el Si és crítica i determina en gran mesura les seves propietats elèctriques. Molts dels materials high-k investigats fins ara ofereixen una interfície inestable amb el Si. És a dir, que en condicions d'equilibri reaccionen amb el Si i formen una capa interfacial no desitjada. Aquests materials per tant, necessiten una barrera interfacial que eviti la reacció. Normalment aquesta barrera s'aconsegueix creixent una capa de SiO₂ de gruix per sota del nm. La barrera interfacial, a més a més, millora la mobilitat dels portadors pel canal dels MOSFETs, però per altra banda la capa extra complica l'estudi del dielèctric de porta i limita l'EOT mínim que pot assolir el dielèctric de porta. Des del punt de vista de la estabilitat amb el Si, els compostos resultants de la barreja de SiO₂ o Al₂O₃ amb ZrO₂ o HfO₂ són els que ofereixen un millor comportament [Wilk 01]. A més a més de ser estable amb el Si, és necessari que el substitut del SiO₂ tingui una densitat interfacial de defectes (D_{it}) baixa. Malauradament, la majoria de materials caracteritzats presenten una D_{it} 10-100 vegades superior a la del SiO₂.

L'estructura morfològica del dielèctric que substitueixi el SiO₂ ha de ser amorfa, ja que els dielèctrics de porta policristal·lins afegeixen el desavantatge de que les fronteres de gra ofereixen camins per on el corrent de fuites pot ser molt elevat. A més a més, el tamany de gra i la orientació varien dins la capa dielèctrica, provocant variacions de k i donant lloc a propietats poc reproduïbles. Gairebé tots els materials d'alta permitivitat estudiats es tornen policristal·lins quan es dipositen o després de tractaments tèrmics, fins i tot a temperatures no massa elevades.

Seria desitjable que el material high-k seleccionat fos compatible amb els terminals de porta de poly-Si, enlloc de necessitar porta metàl·lica, minimitzant els canvis en el procés CMOS, però pels mateixos motius que la majoria de high-k reaccionen amb el Si del substrat, també ho fan amb el poly-Si de la porta. Per evitar aquesta reacció s'hauria d'afegir una capa de SiO₂ entre el high-k i la porta, augmentant el gruix elèctric mínim que es pot aconseguir amb la multicapa dielèctrica. Per altra banda, la substitució del poly-Si per metalls eliminaria la necessitat de fer recuits per activar el dopatge del poly-Si, que normalment provoca que els high-k es tornin policristal·lins. La compatibilitat dels materials high-k amb els processos CMOS a alta temperatura és un dels temes d'estudi d'aquesta tesi, concretament aquesta compatibilitat s'estudiarà al capítol 4. També l'elecció del material del terminal de porta és un dels punts crítics de la indústria microelectrònica actual [ITRS 04].

Per últim, els materials high-k han de complir uns criteris de fiabilitat tant exigents com els del SiO₂, però la fiabilitat de les bi o multicapes dielèctriques high-k/SiO₂ no està ben establerta, i els coneixements adquirits pel SiO₂ durant dècades no són sempre aplicables directament. Aquesta tesi pretén contribuir a la clarificació d'alguns punts referents a la degradació, ruptura i fiabilitat dielèctrica dels dielèctrics high-k/SiO₂ en el capítol 4. En qualsevol cas, en la secció següent es presenta un recull dels coneixements que es tenen actualment sobre el comportament elèctric i la fiabilitat dels materials high-k rellevants pel treball dut a terme en aquesta tesi.

És important mencionar que no s'ha trobat encara el material idoni i que es treballa amb diferents materials en paral·lel, ja que cap compleix tots els requeriments simultàniament. Malgrat això, es creu que el material substituït del SiO_2 serà un compost de Hf [CUHKO 03]. És per això que l'estudi de materials high-k en aquesta tesi es redueix a alguns dels seus compostos. La taula 1.2 llista alguns dels materials high-k sobre els que s'ha fet algun tipus de caracterització per estudiar si podrien substituir al SiO_2 . S'han marcat en cursiva els materials que un centre punter en aquest camp, el IMEC (Interuniversity Microelectronic Center, en Lovaina), va considerar inicialment com substituïts potencials, finalment en cursiva i negreta s'indiquen els materials que actualment manté sota estudi com a possibles substituïts del SiO_2 .

Material	k	Material	k
Al_2O_3	8-11.5	NdAlO_3	22.5
$\text{Al}_x\text{Si}_y\text{O}_z$		PrAlO_3	25
$(\text{Ba},\text{Sr})\text{TiO}_3$	200-300	Si_3N_4	7
BeAl_2O_4	8.3-9.43	SmAlO_3	19
CeO_2	16.6-26	SrTiO_3	150-250
CeHfO_4	10-20	Ta_2O_5	25-45
$\text{CoTiO}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$		$\text{Ta}_2\text{O}_5\text{-TiO}_2$	
EuAlO_3	22.5	TiO_2	86-95
<i>HfO₂</i>	26-30	$\text{TiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$	
<i>Hf silicate, Zr silicate</i>	11-12,6	Y_2O_3	8-11.6
La_2O_3	20.8	$\text{Y}_x\text{Si}_y\text{O}_z$	
LaAlO_3	23.8-27	ZrO_2	22.2-28
LaScO_3	30	Zr-Al-O	8-28
La_2SiO_5		<i>Hf-Al-O</i>	8-30
MgAl_2O_4	8.3-9.4	$\text{Hf}(\text{Ti}, \text{Ta})\text{O}_4$	40-60

Taula 1.2. Materials high-k que en algun moment han estat considerats substituïts potencials dels SiO_2 . En negreta s'indiquen els materials que es consideren possibles substituïts actualment (reimprès de [CUHKO 03]).

1.4.2. Comportament elèctric i fiabilitat

El comportament elèctric i la fiabilitat del SiO_2 com a dielèctric de porta han estat objecte d'estudi des de fa dècades. Fruit d'això, per aquest material es disposen d'uns coneixements considerables sobre les seves propietats elèctriques, la física de degradació i ruptura dielèctrica i les metodologies d'anàlisi i extrapolació de resultats. Aquests coneixements serveixen a la comunitat científica com a punt de partida per a l'estudi del comportament elèctric i la fiabilitat dels dielèctrics de porta high-k.

La informació recollida en aquesta secció prové de tests macroscòpics (en dispositius amb porta dipositada) realitzats amb els equips descrits a 1.1.4. Els tipus d'estressos elèctrics que s'apliquen als dielèctrics bi o multicapa són els mateixos que pel SiO_2 . També cal remarcar que els coneixements que disposa la comunitat científica sobre el comportament elèctric i la fiabilitat en general dels materials high-k és encara limitada.

Com s'ha comentat, el principal motiu per a la utilització dels high-k com a dielèctric de porta és que la seva constant dielèctrica és superior a la del SiO_2 . Això permet assolir els EOT (i per tant els valors de capacitat) necessaris per continuar l'escalat tecnològic, però amb un gruix físic superior, que comporta una reducció dràstica del corrent de fuites. La figura 1.11.a [Wilk 01] mostra la comparació de la densitat de corrent de

fuites (i consum de potència) per un chip amb 1.5nm de SiO₂ com dielèctric de porta i per un dielèctric amb una constant dielèctrica superior però amb el mateix EOT. La utilització del material d'alta constant dielèctrica redueix el corrent de fuites diversos ordres de magnitud. A la figura 1.11.b [Vogel 98] s'ha representat els corrents de fuites (simulats) de capacitats MOS amb SiO₂ i diverses capes materials high-k, amb EOT de 2.0nm, com dielèctric de porta. Es pot veure que tots els high-k (D1 i D2 a la figura) ofereixen una reducció del corrent de fuites respecte al SiO₂. Això es degut al fet que pels materials high-k l'EOT desitjat s'aconsegueix amb un gruix físic superior que amb SiO₂.

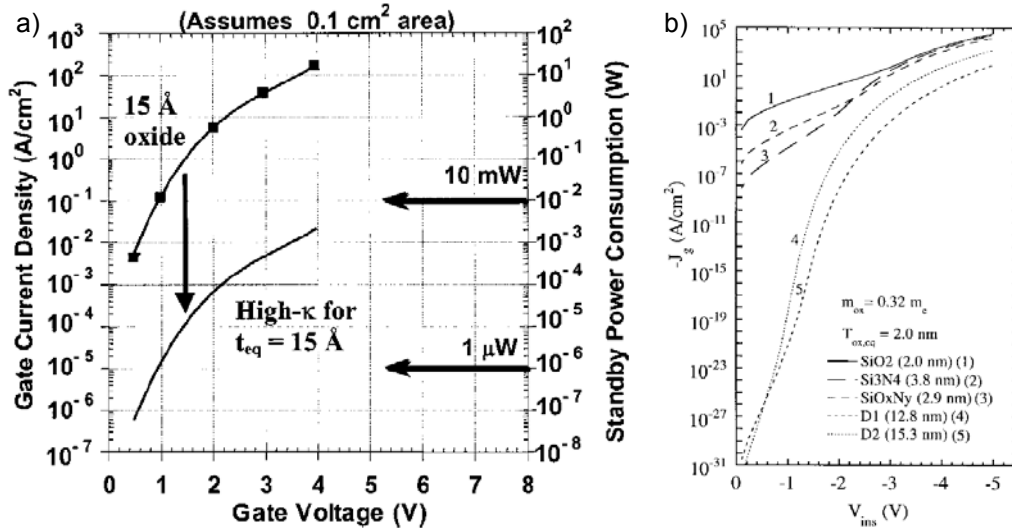


Fig. 1.11. a) Comparació de la densitat de corrent de fuites (i consum de potència) per un chip amb 1.5nm de SiO₂ com dielèctric de porta i per un dielèctric amb una constant dielèctrica superior però amb el mateix EOT. La utilització del material d'alta constant dielèctrica redueix el corrent de fuites diversos ordres de magnitud. Reimprès de [Wilk 01]. b) Simulacions dels corrents de fuites en funció del voltatge aplicat per diversos dielèctrics de porta. Reimprès de [Vogel 98].

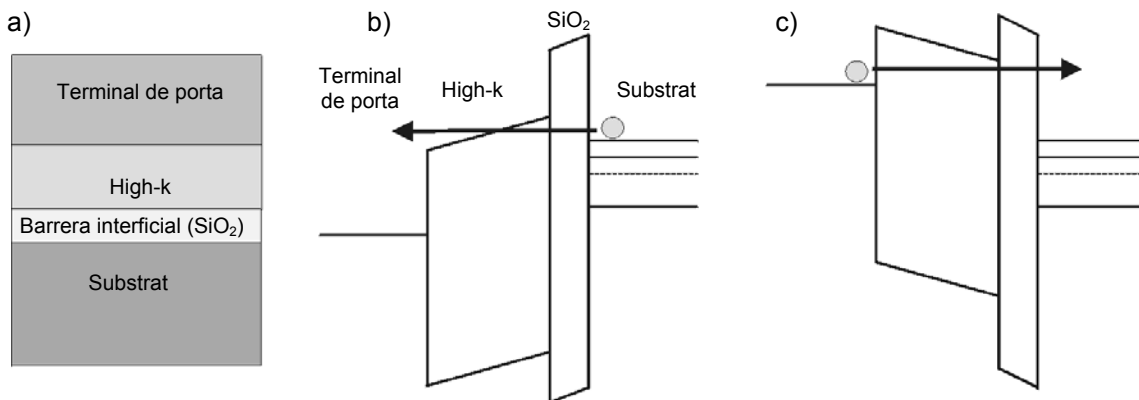


Fig. 1.12. a) Esquema de la estructura de capes típica d'un stack de porta amb high-k. b) i c) mostren el diagrama de bandes de l'stack amb injecció des de la interfície Substrat/SiO₂ i terminal de porta/high-k, respectivament. El gruix de la barrera túnel que troba l'electró és més gran quan s'injecta des de la interfície terminal de porta/high-k.

El diagrama de bandes d'un stack de porta amb material high-k (Fig. 1.12) és més complex que pel cas del SiO₂, ja que les estructures MOS pràcticament sempre contenen una capa interfacial per evitar reaccions no controlades amb el Si del substrat. Tant a partir de models teòrics [Voguel 98] (Fig. 1.13.a) com experimentalment [Kauerauf 02] (Fig. 1.13.b), s'observa que les característiques intensitat – voltatge depenen fortament de la polaritat de la tensió aplicada. El corrent túnel és molt més gran si els electrons troben primer el material amb una alçada de barrera més alta i un gruix menor (SiO₂). La figura 1.13.a il·lustra aquest comportament a partir dels corrents simulats [Vogel 98] de diversos stacks amb EOT de 2.0nm. El material que es llista en primer lloc a la llegenda del gràfic correspon al primer material de la bicapa dielèctrica que troba l'electró injectat. La comparació entre les característiques 2 i 3 o 4 i 5 permet observar clarament l'asimetria de la conducció. La figura 1.13.b [Kauerauf 02] mostra les característiques densitat de corrent – voltatge (corba superior) i intensitat – voltatge (corba inferior) d'un stack de ZrO₂/SiO₂. Es pot observar com amb una V_G de 4V (injecció des de la interfície substrat – capa interfacial de SiO₂) la densitat de corrent és 4 ordres de magnitud superior que amb una V_G de -4V (injecció des de la interfície terminal de porta – ZrO₂). Aquest comportament es pot explicar a partir dels diagrames de bandes corresponents a injecció des de la interfície Si/SiO₂ (Fig. 1.12.b) i des de la interfície terminal de porta/high-k (Fig. 1.12.c) quan la mateixa tensió es aplicada en els dos casos. Injectant des del substrat, a partir d'un cert valor de tensió l'electró només ha de travessar (des del punt de vista d'energies) la barrera de potencial corresponent a la capa interfacial (típicament <1.0nm), mentre que quan s'injecta des de la porta, per aquestes tensions, l'electró a més a més de travessar la barrera de la capa interfacial ha de travessar la capa de high-k.

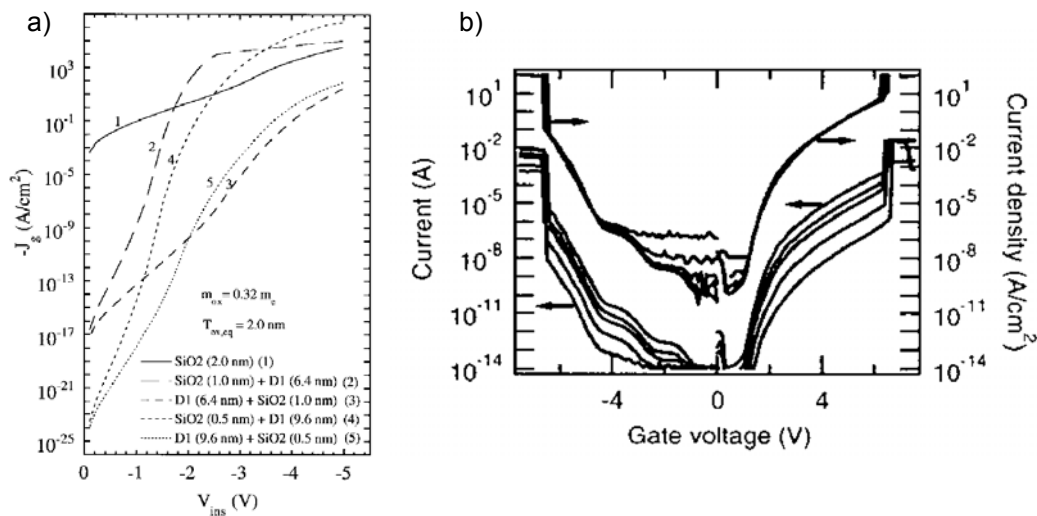


Fig. 1.13. Conducció teòrica a) i experimental b) a través d'stacks high-k/SiO₂. Es pot observar la forta asimetria del corrent de fuites en funció de la polaritat de l'estrès (veure text). Gràfics reimpressos de [Vogel 98] i [Kauerauf 02] respectivament.

Els mecanismes de conducció depenen, com pel SiO₂, de paràmetres com el voltatge aplicat o el gruix de les capes, però a més a més, del material dielèctric, el mètode de deposició, tractament post deposició o la qualitat (densitat de defectes) de les capes que formen l'stack. En funció d'aquest paràmetres, es pot donar qualsevol dels mecanismes enumerats a la secció 1.1.1. i combinacions d'ells (Fig. 1.14).

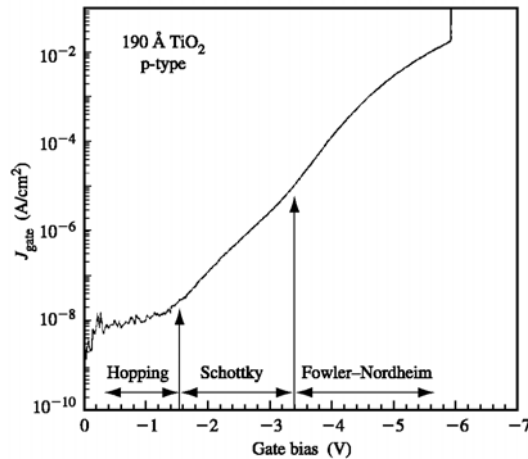


Fig. 1.14. Característica intensitat – voltatge per un stack de 19nm TiO₂ / 3nm SiO₂, on s'aprecien diferents mecanismes de conducció. Reimprès de [Campbell 99].

Totes les eines/tècniques d'estudi de la fiabilitat dels stacks han estat adoptades dels coneixements adquirits del SiO₂ durant dècades [Kim 04]. Moltes d'aquestes eines cal modificar-les i adaptar-les pels stacks, ja que a priori no tenen perquè ser directament aplicables. La comparació d'estadístiques de ruptura de diversos stacks amb les de capes simples de SiO₂ del mateix gruix que la capa de SiO₂ interfacial dels stacks ha revelat que quan s'aplica un voltatge a l'stack, aquest actua com un divisor de tensió (les tensions que cauen al SiO₂ i a la capa high-k s'avaluaran al capítol 4 i estan donades per les expressions 4.5 i 4.6, respectivament).

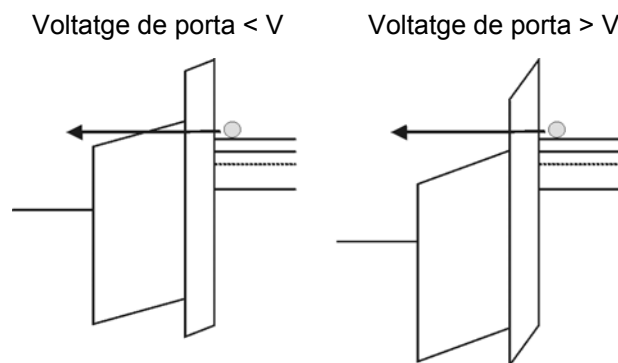


Fig. 1.15. Injecció des del substrat, quan s'apliquen voltatges elevats els electrons només han de travessar per efecte túnel la barrera interfacial. Per voltatges més baixos, a més a més han de travessar per efecte túnel parcial o totalment la capa high-k. El valor de voltatge (V) a partir del qual domina una situació o l'altre depèn de les característiques de l'stack.

La comparació [Degraeve 99] del corrent (injecció des del substrat) que travessa l'stack en funció de la tensió que cau només a la capa interfacial de SiO₂, amb el corrent que travessa una capa de SiO₂ del mateix gruix que la capa interfacial, en funció de la tensió que cau en aquesta capa, ha mostrat que per tensions altes aquestes dues característiques coincideixen. Per tensions baixes el corrent a través de l'stack és menor. Això es degut a que per tensions altes els electrons només han de travessar la barrera interfacial, mentre que per tensions baixes els electrons han de travessar a més a més part de la capa high-k (Fig. 1.15). Aquest comportament ofereix un exemple de com s'han de modificar les eines d'extrapolació adoptades del SiO₂: s'ha d'introduir algun factor correctiu en els models d'extrapolació del temps de vida dels dispositius (que s'obtenen a partir de tests

amb tensions aplicades altes) per a que es tingui en compte la reducció del nivell de degradació a tensions baixes.

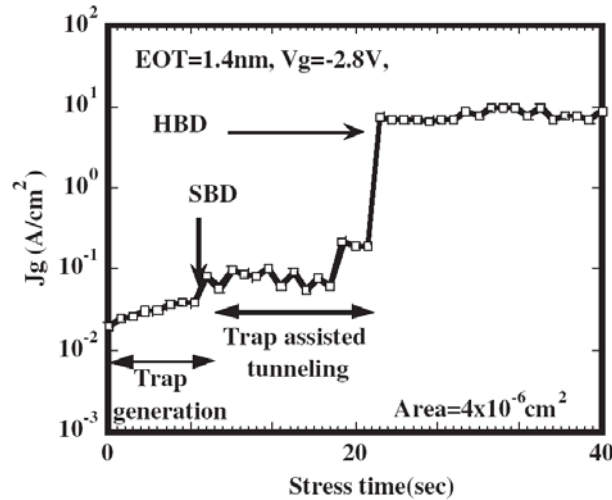


Fig. 1.16. Evolució del corrent de fuites en funció del temps d'estrès per un stack de $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ amb EOT de 1.4nm. S'observen diversos fenòmens de degradació i de ruptura. Reimprès de [Kim 02].

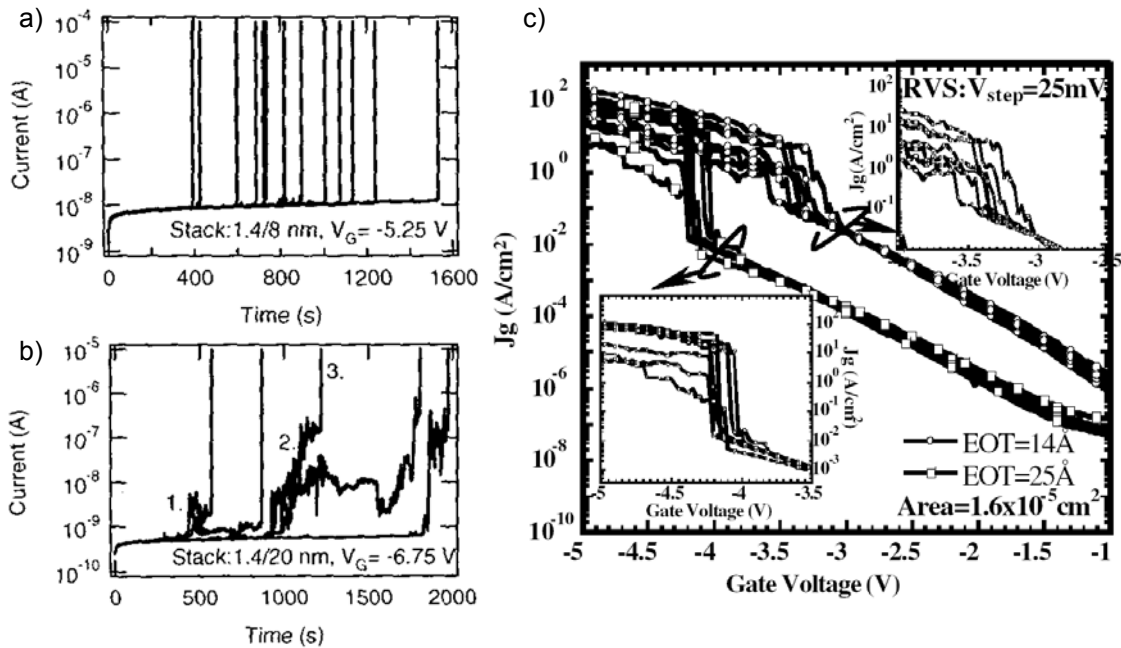


Fig. 1.17. Mentre que els CVS aplicats a stacks $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ (a) i (b) mostren un trencament més progressiu per EOT grans (reimprès de [Kauerauf 02]), RVS aplicats a stacks $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ (c) mostren el comportament contrari, ruptura més progressiva per EOT petits (reimprès de [Kim 04]).

L'aplicació d'estrès a l'stack comporta, com pel SiO_2 , la degradació i posteriorment ruptura dielèctrica, i es continua considerant vàlid el model percolatiu. S'han observat alguns dels fenòmens habituals que es donen a les capes de SiO_2 : SILC, SBD i HBD [Kim 02] (Fig. 1.16). Resultats experimentals [Degraeve 03] apunten a que el trencament de l'stack està controlat per la capa de SiO_2 . Aquests resultats, però, s'han

de considerar amb compte, ja que estan extretes a partir d'stacks amb un high-k en particular i és perillós extrapolar-les a tots els high-k. A mode d'exemple: pel ZrO_2 [Kauerauf 02] s'ha observat que, per capes primes, el trencament (salt en el corrent mesurat) és molt més abrupte i ben definit (Fig. 1.17.a) mentre que per capes gruixudes es produeix un increment progressiu del corrent (Fig. 1.17.b). Pel HfO_2 , considerat el material amb un comportament més semblant al ZrO_2 , s'han obtingut resultats oposats [Kim 04]: per stacks més gruixuts el BD és més abrupte mentre que per bi capes amb un EOT menor és més suau (Fig. 1.17.c), com pel cas del SiO_2 .

En aquesta secció s'ha fet una revisió dels resultats de la literatura referents a les característiques elèctriques i de fiabilitat dels high-k rellevants per al treball que es presentarà al capítol 4. Per una visió més completa dels coneixements (en contínua actualització) que té la comunitat científica sobre aquests materials com a dielèctrics de porta, es pot consultar els procedings referenciats a continuació, corresponents a conferències on els dielèctrics de porta d'alta permitivitat són un dels temes principals [INFOS, WODIM, IRPS, IEDM].

1.5. Resum

En aquest capítol introductori s'ha fet una revisió d'aquells aspectes que seran rellevants pel treball desenvolupat en aquesta tesi, centrada en el dielèctric de porta. Les prestacions elèctriques d'aquest s'han convertit en un punt crític per continuar l'escalat de dimensions dels dispositius MOS i per tant, en un problema a l'hora de seguir millorant les prestacions de la majoria de sistemes electrònics.

Al començament del capítol s'han revisat els principis bàsics de funcionament de la capacitat MOS i del MOSFET. Per tal d'entendre millor les particularitats del procés de fabricació de les mostres utilitzades en capítols posteriors, s'han descrit: el procés CMOS (simplificat) de fabricació d'una capacitat MOS en tecnologia bulk i els processos d'oxidació de porta.

El gruix del capítol s'ha centrat en el dielèctric de porta, l'objecte d'estudi d'aquest treball. En primer lloc, s'han presentat les tècniques habituals per a la caracterització elèctrica dels dielèctrics de porta dels dispositius MOS. Per caracteritzar el dielèctric, el dispositiu sota test es sotmet a un estrès elèctric (voltatge o corrent) i es mesura la seva resposta. El sistema de caracterització estàndard consisteix en un analitzador de paràmetres semiconductors i/o un mesurador de impedàncies, que permet estressar el dispositiu i adquirir la seva resposta. Una taula de puntes connecta aquests instruments amb els terminals dels dispositius. En aquest treball, aquestes tècniques s'utilitzaran puntualment de forma complementària a les tècniques de caracterització a escala nanomètrica que es veuran al capítol 2.

En la següent secció s'ha presentat un resum dels coneixements que té la comunitat científica de la fiabilitat del SiO_2 de porta. La caracterització elèctrica del SiO_2 portada a terme durant dècades ha revelat que l'aplicació d'estrès a la capacitat MOS provoca la degradació i finalment la ruptura dielèctrica de la capa d'òxid. Durant el procés de degradació es van creant defectes en tot el volum de l'òxid. Segons el model percolatiu, quan un camí de defectes (alta conductivitat) connecta les dues interfícies de l'òxid de

porta es produeix la ruptura. En funció de les característiques de la ruptura es distingeixen diferent modes, com la ruptura dura, suau o progressiva.

Malgrat les bones propietats mostrades durant dècades pel SiO₂, pels gruixos requerits actualment pel dielèctric de porta, l'elevat corrent de fuites i la reducció de la fiabilitat han provocat que aquest material estigui en vies de ser reemplaçat per un material amb una constant dielèctrica superior. Això permetria aconseguir l'EOT requerit amb un gruix físic més gran, i per tant, reduir el corrent de fuites. Aquest material ha de presentar una permitivitat i alçada de barrera acceptablement grans, estabilitat termodinàmica amb el Si del substrat, interfícies de qualitat, morfologia adequada, compatibilitat amb el material del terminal de porta i amb els processos CMOS, i oferir uns bons nivells de fiabilitat. Cal remarcar que encara no es disposa d'un substitut clar.

Els coneixements que es tenen de les característiques elèctriques i de fiabilitat d'aquests dielèctrics d'alta permitivitat són encara limitats, ja que depenen fortament de factors com: el material, el procés de fabricació del dielèctric o processos posteriors, com per exemple recuits. Tot i així es considera vàlid el model percolatiu i s'han adoptat la majoria d'eines, tècniques i models que prèviament s'utilitzaven pel SiO₂ per a la caracterització d'aquests materials. Malgrat això, encara hi ha oberts molts interrogants, com per exemple: l'efecte de la polaritat del voltatge aplicat en els processos de degradació i ruptura dielèctrica de l'stack, com afecta la capa interfacial a les propietats de l'stack en general i a la fiabilitat en particular o quins són els mètodes correctes d'extrapolació dels resultats de fiabilitat obtinguts en condicions accelerades de test a les condicions normals d'operació.

2

Microscopies de Sonda Propera

Els coneixements que té la comunitat científica sobre el comportament elèctric i la fiabilitat del SiO₂ i dels materials high-k com dielèctrics de porta de dispositius MOS, han estat obtinguts majoritàriament amb les tècniques descrites a la secció 1.1.4. Aquestes tècniques treballen amb dispositius amb porta dipositada, i per tant, els paràmetres mesurats estan promitjats sobre tota l'àrea coberta per la porta. Amb aquest promitjat alguns fenòmens que es donen a escala nanomètrica poden quedar emmascarats. Per tal de desvetllar aquests detalls, es requereixen tècniques que permetin caracteritzar regions de tamany nanomètric. D'entre aquestes eines, cal destacar les basades en la microscopia de sonda propera (SPM, de l'anglès Scanning Probe Microscopies), en les quals una sonda de dimensions nanomètriques escombria la superfície de la mostra, mentre mesura alguna de les seves característiques.

En aquest capítol, en primer lloc, es presenta una breu introducció a les SPM i es recullen algunes de les seves aplicacions més rellevants en el camp dels dielèctrics de porta. En concret, a la primera secció es parlarà de la Scanning Tunnelling Microscopy (STM) i tècniques basades en ella, com el BEEM (Ballistic Electron Emission Microscopy), que no s'han utilitzat en aquest treball però que han suposat punts de partida o proporcionat resultats complementaris als obtinguts amb les SPM que es presenten en les seccions posteriors. Es pot trobar una bona introducció a la majoria de SPM que es descriuen en aquest capítol a [Friedbacher 99].

A continuació, es descriurà la Microscopia de Forces Atòmiques [Binnig 86] (AFM, de l'anglès Atomic Force Microscopy), que permet adquirir la topografia d'una mostra amb resolució lateral de l'ordre dels pocs nm i resolució vertical millor que 1nm. Aquesta tècnica, no és només una eina molt útil per a caracterització topogràfica a escala nanomètrica, sinó que també ofereix unes grans prestacions com a eina nanolitogràfica. L'AFM permet definir estructures amb dimensions laterals mínimes de l'ordre dels 10nm. Seguidament, es presenta l'AFM amb punta conductora (CAFM, de l'anglès Conductive AFM), que a més a més de les mesures pròpies de l'AFM, permet obtenir mapes de corrent i característiques intensitat – voltatge de la mostra.

Per últim, es descriu un nou instrument: el Microscopi de Forces Atòmiques amb Prestacions Elèctriques Millorades (ECAFM, de l'anglès Enhanced CAFM), del qual el nostre grup de recerca ha desenvolupat el primer prototipus. Aquest nou instrument sorgeix com a resposta al fet que les prestacions elèctriques dels CAFM comercials no eren suficients per a la realització d'alguns tests que es volien portar a terme per a caracteritzar dielèctrics de porta a escala nanomètrica. Donat que l'ECAFM és un instrument nou, es descriurà de forma més detallada que l'AFM i el CAFM.

2.1 Caracterització a escala nanomètrica mitjançant Microscopies de Sonda Propera

Sota el nom genèric de SPM s'agrupa tot un conjunt de tècniques en que una punta de dimensions nanomètriques escombra una superfície permetent adquirir la topografia de la mostra i, depenent de la tècnica, adquirir també una altra magnitud simultàniament.

El principi de funcionament de les SPM és similar: una unitat de control s'encarrega de generar un patró d'escombrat per cobrir la zona de la qual es vol adquirir la topografia, mentre força que la punta ressegueixi la topografia de la mostra i enregistra els canvis. En la secció 2.4.3 es proporciona una descripció més detallada del procediment d'adquisició d'un mapa topogràfic pel cas concret de l'AFM.

La caracterització elèctrica de dielèctrics de porta mitjançant tècniques macroscòpiques (secció 1.1.4) es realitza a nivell de tota l'àrea coberta per la porta (de l'ordre de μm^2 normalment) proporcionant resultats promitjats sota tota l'àrea estudiada (Fig. 2.1.a). En canvi, les SPM treballen amb estructures MOS sense porta, de forma que la pròpia punta de la SPM (si és conductora) forma una estructura MOS de dimensions nanomètriques que pot ser estudiada per separat de les capacitats veïnes, obtenint així informació a escala local (Fig. 2.1.b).

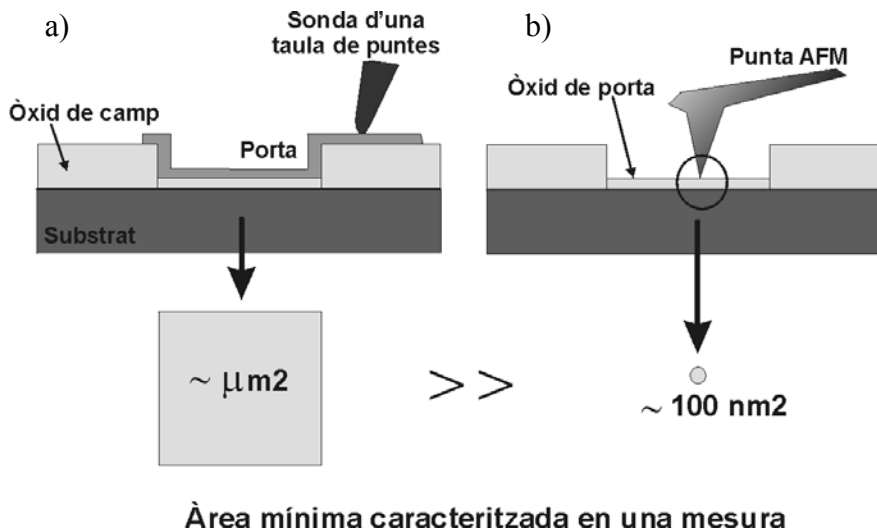


Fig. 2.1. Esquema il·lustratiu de (a) l'àrea que es caracteritza amb una mesura macroscòpica (dispositius amb porta dipositada microelectrònicament i caracteritzats amb analitzador de semiconductors i/o analitzador d'impedàncies + taula de puntes) i (b) una mesura amb SPM, (dispositius sense porta dipositada) on l'àrea caracteritzada queda determinada per la regió que defineix el contacte punta - mostra.

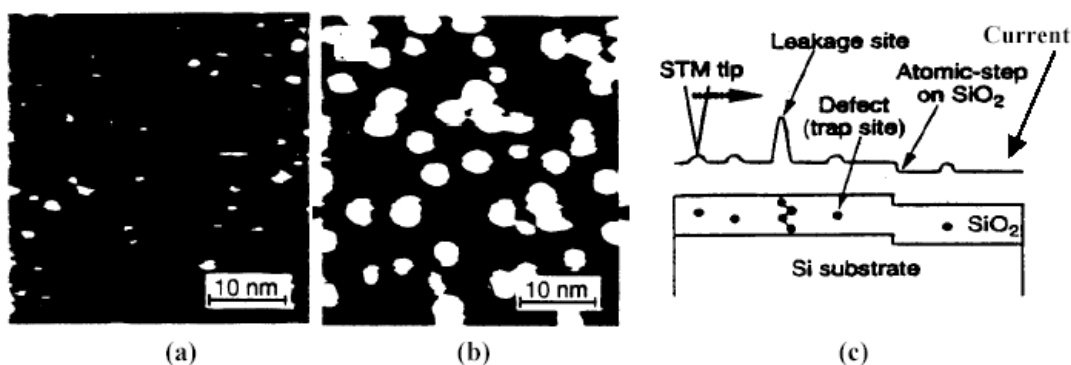


Fig. 2.2. Imatges STM adquirides en SiO_2 (a) verge i (b) estressat. En (b) s'observen espots elèctricament febles a causa de les trampes generades durant l'etapa de degradació. (c) Esquema que permet interpretar com afecten al corrent mesurat les variacions del gruix i de les propietats elèctriques. Reimprès de [Watanabe 99].

Una de les primeres SPM que es va utilitzar per estudiar dielèctrics de porta va ser el Scanning Tunnelling Microscopy (STM). Qualitativament, el principi d'operació d'un STM és senzill: s'apropa una punta molt esmolada a una distància típicament per sota del nm de la superfície que és vol estudiar i s'aplica una tensió entre la punta i la mostra. Tot i que el STM requereix mostres conductores, si el dielèctric és prou prim circularà un corrent. Aquest corrent és extremadament sensible al gruix i les propietats elèctriques del dielèctric. Per tant, és poden detectar variacions molt petites d'aquests dos paràmetres, encara que no de forma independent.

El STM ha estat utilitzat per avaluar tant la topografia com les propietats elèctriques del SiO_2 crescut mitjançant oxidació tèrmica. El STM ha permès estudiar la rugositat de la interfície Si- SiO_2 [Tsai 97, Fujita 98], i la evolució de la topografia a mesura que es va creixent una capa de SiO_2 [Wei 96]. Watanabe et al. [Watanabe 98, Watanabe 99] han estudiat les propietats elèctriques de capes ultra primes de SiO_2 elèctricament estressades a partir dels mapes elèctrics adquirits en una mateixa zona abans i després de l'aplicació d'un estrès elèctric. La figura 2.2 mostra dues imatges STM, una abans (a) i l'altre després (b) de l'aplicació de l'estrès. En (b) s'observa un augment tant del nombre d'espots febles (espots amb un nivell de corrent superior a la resta) com de la seva intensitat. Aquest augment s'ha atribuït al corrent túnel assistit per trampes generades durant el procés de degradació (SILC). En el mateix treball també es van mesurar característiques Intensitat – Voltatge (I-V) locals (després de l'estrès elèctric) en les zones fosques (conductivitat baixa) i en les zones brillants (conductivitat alta) de la figura 2.2.b, per tal de comparar-les amb les característiques que s'havien adquirit abans de l'estrès. Mentre que les característiques I-V obtingudes en les zones amb poc nivell de corrent eren similars a les prèvies a l'estrès elèctric (espots poc degradats), les que es van adquirir en les zones brillants mostraven un corrent superior al d'abans de l'aplicació de l'estrès, indicant que aquests espots havien patit una degradació de les seves propietats elèctriques.

Malauradament l'STM té certes limitacions que han fet que en els últims anys la comunitat científica prefereixi utilitzar altres SPM. Les limitacions més importants són: la necessitat de treballar en condicions de buit ultra alt, amb les complicacions experimentals que això comporta, i el fet que el corrent mesurat no és independent de la topografia i per tant qualsevol fluctuació en el corrent pot ser deguda a un canvi en les

propietats elèctriques o topogràfiques del dielèctric, essent impossible discernir quina de les dues és la responsable.

Una altra SPM utilitzada per a la caracterització de dielèctrics de porta ha estat el BEEM (Ballistic Electron Emission Microscopy) [Wen 97, Kaczer 96]. Aquesta tècnica està basada en el STM. Partint de la configuració d'aquest, es força la injecció d'electrons des de la punta cap a el substrat. La diferència entre el corrent injectat per la punta i el que es recull al substrat dona informació del nombre d'electrons que han patit scattering dintre de la mostra, i per tant dona informació de les seves propietats elèctriques. Mitjançant aquesta tècnica (al igual que amb STM) s'ha detectat la existència d'espots febles en els dielèctrics. També s'ha utilitzat per estudiar la distribució espacial de càrrega atrapada i de trampes /defectes elèctrics degudes a la degradació en capes ultra primes de SiO₂ [Ludeke 96]. A banda dels resultats pròpiament lligats a l'estudi de la degradació i ruptura dielèctrica, el BEEM s'ha utilitzat per estudiar paràmetres fonamentals de l'òxid, com la seva constant dielèctrica [Wen 98] o la massa efectiva dels electrons en la banda de conducció del dielèctric. Es pot trobar un bon recull de la utilització del BEEM per a la caracterització de dielèctrics de porta en el següent article de revisió [Ludeke 00]. Malauradament, aquesta tècnica ha de treballar en condicions de buit ultra alt per proporcionar resultats plenament fiables, de manera que es complica força la configuració experimental. També cal tenir en compte que les mostres sota estudi necessiten una preparació especial, ja que la punta del STM no contacta directament sobre el dielèctric de porta si no sobre una capa molt prima (<10nm) de material conductor que actua com terminal de porta. Aquesta capa, a més a més de ser molt prima ha de ser molt homogènia, i s'ha de dipositar en condicions de buit ultra alt. A més, el corrent mesurat no és independent de la topografia. Per tant, una fluctuació de corrent pot ser deguda tant a un canvi de les propietats topogràfiques com de les elèctriques, complicant la interpretació dels resultats. Aquests problemes queden solucionats amb la utilització de la Microscopia de Forces Atòmiques (AFM) i tècniques basades en aquesta.

2.2 Microscopi de Forces Atòmiques

Les limitacions que presenten algunes de les tècniques mostrades en la secció anterior per a la caracterització de dielèctrics de porta queden superades amb la utilització de l'AFM i de tècniques basades en ella, com la Conductive Atomic Force Microscopy (CAFM), que es veurà a la secció 2.3. L'AFM ha esdevingut una eina molt potent per a la caracterització i la fabricació a escala nanomètrica gràcies principalment a la gran resolució que ofereix, al fet de poder operar en condicions ambient i a que pot caracteritzar gairebé qualsevol tipus de mostra (aïllants, conductors, sòlids, líquids...). En aquesta secció es descriurà el funcionament de l'AFM a partir d'una configuració experimental típica. Seguidament es presentarà un resum d'aplicacions d'aquesta tècnica com eina de caracterització i de fabricació a escala nanomètrica.

2.2.1. Descripció

L'AFM mesura la topografia de la mostra a partir de la mesura de la força que experimenta una sonda de dimensions nanomètriques que va escombrant la mostra sota

estudi. La sonda pot realitzar l'escombrat en contacte amb la superfície de la mostra, en contacte intermitent o en no contacte. Per simplicitat, en aquesta secció es considerarà només el cas en que la sonda treballa en contacte amb la mostra, que és el mode en que l'AFM opera en aquest treball. Per una visió més extensa del funcionament de l'AFM en particular i de les SPM en general es recomana consultar per exemple [Friedbacher 99].

La figura 2.3 mostra la configuració experimental típica d'un AFM. La sonda (punta) de l'AFM es troba integrada en una palanca (cantilever) de dimensions micromètriques que actua com a suport. La punta s'apropa a la mostra fins que entra en contacte. Quan la punta troba un canvi en la topografia durant el procés d'escombrat de la mostra, la cantilever pateix una deflexió, degut al canvi de la força que experimenta el sistema punta - mostra. Per mesurar els canvis de la deflexió de la cantilever respecte a la deflexió de referència (o equivalentment els canvis en la topografia de la mostra respecte al valor de referència), el sistema més utilitzat actualment consisteix en focalitzar un làser en la cantilever i mesurar el seu reflex en un fotodiode. El voltatge de sortida del fotodiode depèn de la diferència de potència òptica rebuda a les seves meitats superior i inferior. Per tant, quan la cantilever pateix una deflexió el voltatge de sortida del fotodiode canvia. En funció del valor d'aquest voltatge de sortida, la unitat de control s'encarrega d'apropar o allunyar la punta de l'AFM mitjançant un actuador piezoelèctric fins recuperar el voltatge de referència del fotodiode. La distància que s'ha apropat o allunyat la punta queda registrada a la unitat de control. Després de repetir aquest procés per una matriu de posicions s'obté un mapa topogràfic de la mostra (Fig. 2.4). La mostra està col·locada en un porta mostres que, depenent del model d'AFM, permet treballar amb mostres de l'ordre d'1-2cm² fins a una oblia sencera. Les mesures que es realitzen amb un AFM solen estar en el rang dels nm, el que fa que el sistema sigui molt sensible a les vibracions. Per evitar aquest problema, l'AFM ha de comptar amb un dispositiu antivibracions. Seguidament es comentaran breument les característiques principals dels elements que componen un AFM.

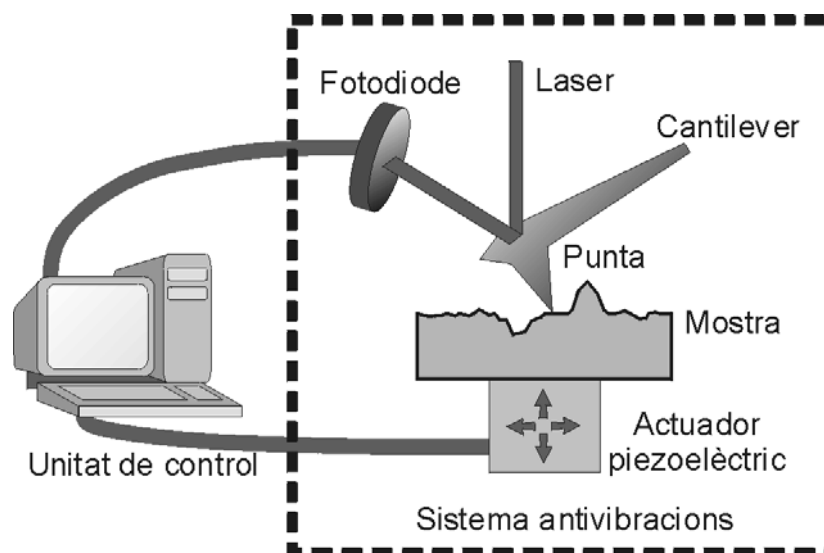


Fig. 2.3. Configuració experimental bàsica d'un AFM. La punta de l'AFM escombra la superfície de la mostra. Els canvis en la topografia provoquen canvis en la deflexió de la cantilever. La unitat de control s'encarrega, mitjançant actuadors piezoelèctrics, de mantenir la punta en contacte amb la mostra, i enregistrar els canvis en la topografia.

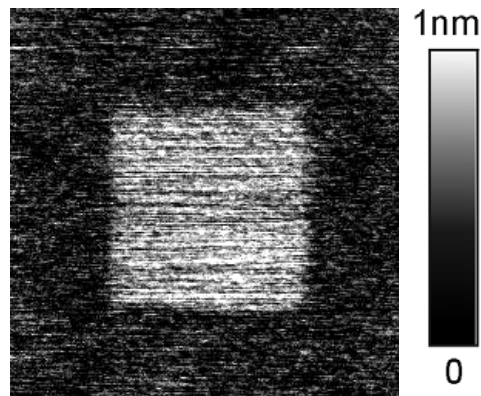


Fig. 2.4. Representació típica d'un mapa topogràfic adquirit amb AFM. El criteri habitual és que els colors més clars corresponen a les zones més elevades de la topografia. El tamany d'aquesta imatge és de $4 \times 4 \mu\text{m}^2$. El rang d'alçades és de 0nm (negre) fins a 1nm (blanc).

La punta de l'AFM és un dels elements més crítics del sistema, ja que la resolució del microscopi depèn en gran mesura de les seves característiques. Existeix un ampli ventall de tipus de puntes i cantilevers d'AFM [Nanosensors] i la seva elecció depèn de la aplicació per a la qual es fan servir. El material del qual estan fetes les puntes (els més habituals són el silici, aleacions metàl·liques, diamant i, properament, nanotubs de carboni) juntament amb el procés de fabricació determinarà en gran mesura les seves propietats: constant de força de la cantilever, resistència mecànica, conductivitat, reactivitat i punt de fusió, entre altres.

Geomètricament, la punta queda definida pel radi de curvatura i el semiangle del conus de la punta pròpiament dita i per les dimensions de la cantilever en la que està enganxada la punta (Fig. 2.5.a). Aquesta punta sol tenir una alçada d'unes poques micres i un radi de curvatura en el seu extrem lliure de l'ordre de 10-100 nm. El radi de curvatura i el semiangle del conus (Fig. 2.5.b) són uns dels factors crítics en la resolució dels AFM, perquè no es poden detectar estructures amb dimensions laterals més petites que el diàmetre de la punta, i els pendents màxims que es mesuraran en un canvi d'alçades vindrà limitat pel semiangle del conus de la punta.

Les dimensions de les cantilevers (Fig. 2.5.c) tenen uns valors dintre dels següents rangs [Nanosensors]: gruix (T) 1-7 micres, amplada (W) 25-60 micres i una longitud d'unes 100-500 micres aproximadament. Les dimensions de la cantilever determinen la seva constant de força (sensibilitat) i freqüència de vibració. Els valors d'aquests dos paràmetres (i per tant la punta/cantilever) es trien en funció del tipus de mesura que es vulgui realitzar.

El sistema de detecció de deflexió, compost típicament per un làser i un fotodiode, transforma les variacions de deflexió de la cantilever en variacions d'una magnitud elèctrica (tensió o intensitat) per poder introduir-les en un format adequat a la unitat de control. En funció del tipus de fotodiode, a més a més de la deflexió vertical de la cantilever es pot detectar també la seva torsió lateral, el que permet mesurar la fricció punta-mostra.

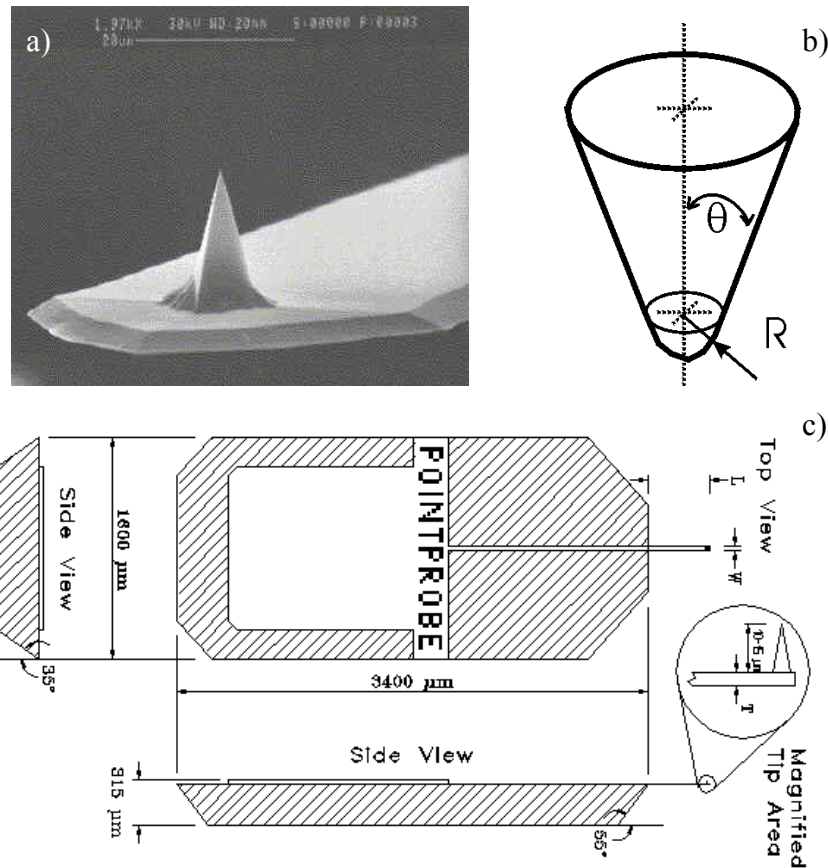


Fig. 2.5. a) Punta i cantilever d'AFM fabricada en silici, vista amb microscopi electrònic. b) Esquema d'una punta mostrant els paràmetres geomètrics bàsics: R radi de curvatura i θ semiangle del conus de la punta. c) Esquema d'una punta d'AFM, juntament amb el seu suport; la punta concretament està situada al final de l'apèndix de l'extrem dret del suport. La geometria de la cantilever (paràmetres T , L , W) determina la constant de força i la freqüència de vibració.

La unitat de control està composta per un processador digital de senyal (DSP, de l'anglès Digital Signal Processor) i un ordinador. La DSP s'encarrega de controlar la separació punta-mostra i generar el patró d'escombrat de la punta sobre la mostra aplicant els voltatges apropiats a actuadors piezoelèctrics. L'ordinador ofereix la interfície d'usuari, mitjançant un software específic que permet controlar i modificar pràcticament tots els paràmetres i accions del sistema, com per exemple: el tamany de l'àrea escombrada, la posició on es fa la mesura o la velocitat a la que es realitza.

Les vibracions provoquen canvis en la distància relativa punta mostra fent que la punta s'allunyi o s'apropi a la mostra. El software interpreta aquestes variacions com variacions en alçada, proporcionant topografia falsa; la punta pot arribar fins i tot a xocar amb la superfície i trencar-se. Per evitar aquests efectes, els AFM inclouen un sistema antivibracions. Aquest sistema ha de ser capaç d'aïllar el conjunt punta mostra de les vibracions que es propaguen pel terra i de les que es propaguen per l'aire. Per eliminar les vibracions que arriben pel terra es sol situar l'AFM sobre una taula antivibratòria, i per eliminar les vibracions que es transmeten per l'aire es col·loca l'AFM dintre d'una campana antivibracions.

Tot i que no es imprescindible, resulta molt útil equipar l'AFM amb un microscopi òptic quan es treballa amb mostres que tenen estructures o zones d'interès. L'AFM ofereix un

camp d'escombrat màxim de l'ordre d'unes $50 \times 50 \mu\text{m}^2$, mentre que una mostra típica pot tenir mm o cm de costat, i per tant pot resultar impossible localitzar la zona d'interès a simple vista. El microscopi òptic permet posicionar la punta de l'AFM sobre la zona d'interès amb una precisió de desenes de micres. Llavors amb l'AFM es busca la posició concreta i es comença l'adquisició.

Per tal que l'AFM pugui realitzar oxidacions (veure secció 2.2.3) cal afegir a la configuració bàsica una font de tensió que ens permeti polaritzar el sistema punta mostra.

2.2.2. Caracterització topogràfica

L'AFM ha esdevingut una eina de caracterització molt potent en camps tant diversos com: ciències de la salut [Arnsdorf 96], ciències de materials [Göken 96], biologia [Maurice 96], química [Czajkowsky 00] o microelectrònica [Shina 02]. Des del punt de vista concret de la caracterització topogràfica dels dielèctrics de porta, l'AFM s'ha utilitzat bàsicament per estudiar la morfologia de les seves superfícies e interfícies. La figura 2.6 mostra un exemple de la topografia de la superfície d'un dielèctric de porta. A partir de la topografia es pot comparar mètodes de creixement de dielèctrics (rugositat, homogeneïtat), o avaluar com afecten els diferents processos microelectrònics a la morfologia de les interfícies del dielèctric. A tall d'exemples, mitjançant AFM s'ha estudiat la influència de la rugositat de la interfície $\text{SiO}_2\text{-Si}$ de capacitats MOS amb diferents mètodes de creixement de l'òxid, en les seves estadístiques de ruptura [Lopes 96]. L'AFM també ha permès analitzar com es transmeten les inhomogeneïtats topogràfiques del substrat de Si al dielèctric de porta [Homma 92, Yasutake 94, Tsai 97]. A partir de la irrupció del materials high-k com alternativa al SiO_2 , aquests materials també han estat caracteritzats amb AFM. La principal línia de treball ha estat la comparació de la morfologia de capes de high-k crescudes amb diferents condicions [Toyoda 04, Bellingeri 05].

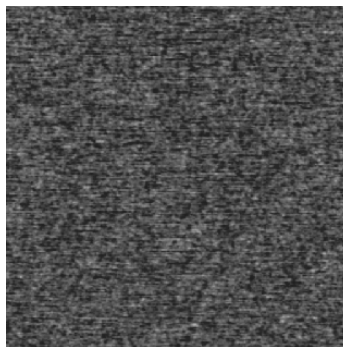


Fig. 2.6. Mapa topogràfic adquirit amb AFM d'una capa de 3.5nm de SiO_2 . Es pot observar com a escala nanomètrica la superfície presenta inhomogeneïtats. El tamany de la imatge és de $2 \times 2 \mu\text{m}^2$. El rang d'alçades és de 0nm (negre) fins a 0.2nm (blanc).

Pel seu principi d'operació, una imatge topogràfica mesurada amb AFM és realment un mapa de forces de la mostra i per tant qualsevol element que provoqui un canvi de forces provocarà un canvi aparent en la topografia mesurada. Aquestes falses topografies es coneixen com "image artifacts", i solen estar causades habitualment per

la presència de càrregues al dielèctric. L'AFM ha estat utilitzat tant per injectar càrregues en els dielèctrics [Stern 88, Terris 89] com per obtenir imatges topogràfiques d'aquestes zones i a partir de la topografia determinar la quantitat de càrrega injectada [Schönenberger 90]. A partir de les imatges topogràfiques de zones de dielèctrics que han estat sotmesos a estressos elèctrics i que han experimentat la ruptura, s'ha estudiat la càrrega que es genera en produir-se la ruptura dielèctrica [Porti 02].

A banda de les càrregues presents a la mostra sota estudi, l'altra gran font d'artifacts és la pròpia punta de l'AFM. La topografia que adquireix l'AFM és realment una convolució entre la topografia de la mostra i la forma de la punta. Mentre la punta és molt més esmolada que el motiu de la mostra que es vol estudiar, la topografia que s'adquireix és la de la mostra. En canvi, quan el motiu que es vol representar és més petit que la punta, la resolució queda limitada pel tamany de la punta. És per això que a l'hora d'analitzar quantitativament els paràmetres topogràfics d'una imatge adquirida amb AFM és molt important tenir en compte l'estat de la punta.

2.2.3. Nanofabricació

Des del descobriment per part de Dagata et al. [Dagata 90] de la possibilitat de crear patrons nanomètrics sobre una superfície mitjançant un Scanning Tunneling Microscope (STM) es va començar a considerar les microscopies de sonda propera, en general, [Nagahara 91, Dagata 91, Yau 91] i la microscopia de forces atòmiques, en particular, [Yasutake 93, Perez 95, Calleja 99] com una potencial eina nanolitogràfica.

La modificació de la superfície es produeix mitjançant l'oxidació anòdica local que provoca la punta de l'AFM. La figura 2.7 mostra un exemple d'oxidacions realitzades amb AFM. Sobre un substrat de Si s'ha crescut una matriu de punts de SiO₂ [García 99]. Cada punt té una alçada de 1nm aproximadament, un diàmetre d'uns 10nm i està separat 40nm dels seus veïns més propers. El potencial tecnològic de l'oxidació amb AFM no recau només en el fet de que permet generar estructures nanomètriques, si no també en que permet créixer òxid sobre un ampli ventall de materials com semiconductors [Held 98], metalls [Sugimura 93] o fotoresines [Wilder 98].

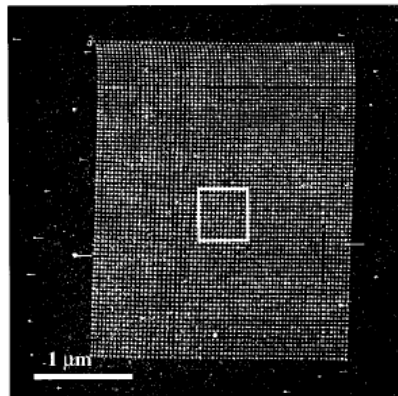


Fig. 2.7. Exemple d'oxidacions realitzades amb AFM. Sobre un substrat de Si s'han crescut 4864 punts de SiO₂. Cada punt té una alçada de 1nm aproximadament, un diàmetre d'uns 10nm i està separat 40nm dels seus veïns més propers. El tamany de la imatge és de 4×4µm². Reimprès de [García 99].

L'oxidació anòdica es produeix quan es col·loca la punta de l'AFM en contacte (o a pocs nm) amb la superfície a oxidar i s'aplica a la punta una tensió negativa respecte a la mostra. Llavors es crea un camp elèctric que arrossega ions OH^- (provinents de la humitat de l'ambient) cap a la superfície de la mostra, on reaccionen amb els àtoms de d'aquesta, generant òxid (al qual ens referirem com òxid AFM). L'equació 2.1 mostra la reacció que es dona en el cas concret de l'oxidació anòdica del silici. Aquesta reacció es produeix a la interfície entre l'òxid que es va creant i el material del substrat. Això implica que una part del gruix de l'òxid AFM està per sota del nivell de la superfície del material que s'està oxidant. Un òxid AFM de gruix total h té un gruix de $2/3$ de h per sobre la superfície del substrat i un gruix de $1/3$ de h per sota la superfície (Fig. 2.8.a).



Els principals paràmetres que influeixen en l'oxidació anòdica són: a) els ambientals, com la humitat, b) els relacionats amb la punta, com per exemple la seva geometria, c) els relacionats amb el substrat, com el dopatge, i d) els relacionats amb la dependència amb el temps de la tensió que s'aplica: si és un voltatge continu o altern, el valor del voltatge d'oxidació o el temps d'oxidació. A nivell qualitatiu podem dir que l'alçada h de les estructures oxidades augmenta: si augmentem el voltatge d'oxidació V_{ox} mantenint el temps d'oxidació t_{ox} fix, o també quan mantenint V_{ox} fix augmentem t_{ox} . El gruix de l'òxid no creix indefinidament a mesura que augmenta t_{ox} si no que es satura. Aquesta saturació es produeix perquè el mateix òxid generat entre la punta i el substrat evita que nous ions OH^- puguin arribar a la interfície amb el substrat i generar nou òxid. Per una explicació molt més detallada de la cinètica de l'oxidació amb AFM es recomana consultar els treballs d'alguns dels principals grups de recerca que treballen o han treballat en aquest camp [Stiévenard 97, Avouris 97, Pérez 98, Dagata 98, Calleja 99, Dagata 00, Dubois 00, Snow 00].

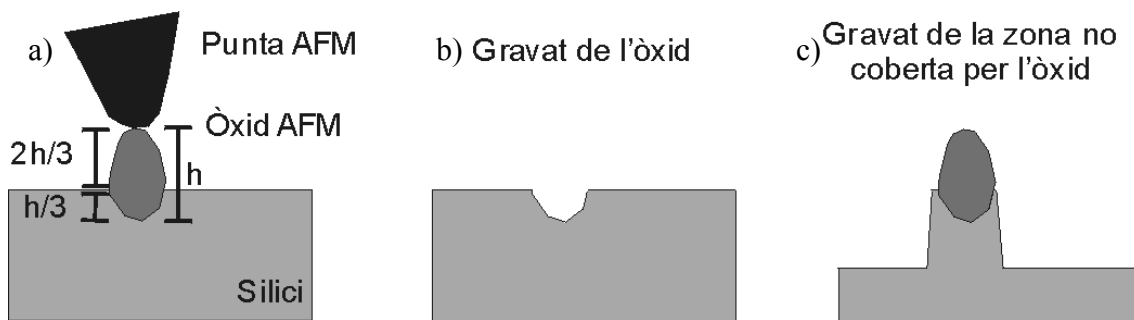


Fig. 2.8. a) L'òxid generat amb AFM consumeix material del substrat (silici en aquest exemple) i per tant no creix només per sobre la superfície del substrat sinó també per sota. L'òxid generat es pot atacar directament (b) o, mitjançant el gravat adequat, es pot atacar la superfície no coberta per l'òxid (c).

Per a la realització de nanoestructures i nanodispositius amb AFM, l'òxid que es creix amb el microscopi es pot utilitzar com a màscara per a un posterior procés o directament com a dielèctric actiu. Com s'ha dit a la secció 1.1.2, la funció d'una màscara és aconseguir que només una part de la capa que té a sota quedi exposada al següent procés microelectrònic. Pel cas de les màscares realitzades mitjançant òxid AFM el pas

posterior és habitualment un procés de gravat humit. L'òxid AFM es pot créixer directament sobre la capa que es vol gravar i posteriorment atacar el propi òxid (Fig. 2.8.b) o la zona no coberta per l'òxid (Fig. 2.8.c), o es pot créixer sobre una fotoresina i a continuació realitzar una etapa fotolitogràfica (Fig. 2.9) com la descrita a la secció 1.1.2. Per la definició de màscares es pot utilitzar de forma combinada la fotolitografia estàndard i l'oxidació amb AFM [Davis 03, Ishibashi 00]. Mitjançant el procés fotolitogràfic estàndard es defineixen els patrons amb dimensions superiors al centenar de nm i mitjançant AFM els patrons de dimensions més petites.

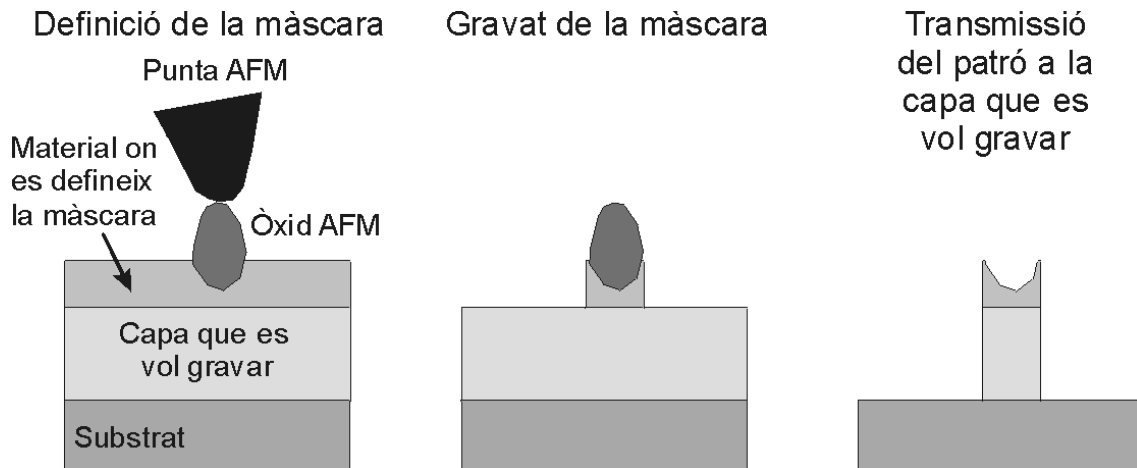


Fig. 2.9. Esquema del procés de definició d'estructures nanomètriques amb AFM sobre una resina i la posterior transmissió del patró a la capa que és vol gravar.

Diversos grups han fabricat dispositius MOS on l'òxid generat amb un microscopi de sonda propera ha estat utilitzat per definir alguna de les dimensions més petites del dispositiu [Minne 95, Campbell 95]. Alguns d'aquests òxids (com per exemple TiO_2) també han estat utilitzats com a dielèctrics de porta [Matsumoto 96]. Pel cas concret del SiO_2 crescut amb AFM només es disposava d'un coneixement molt limitat de les seves propietats com a dielèctric de porta, és per això que un dels principals objectius proposats per aquesta tesi ha estat la fabricació d'un dispositiu MOS amb SiO_2 AFM com a dielèctric de porta i la caracterització topogràfica i elèctrica d'aquest dielèctric. Al capítol 3 es recullen els resultats dels treballs realitzats per assolir el mencionat objectiu.

2.3. Microscopi de Forces Atòmiques amb punta Conductora

Partint de la configuració d'un AFM mostrada a la secció anterior, existeixen diverses SPM que ens permeten mesurar una altra magnitud simultàniament a la topografia. Entre elles cal destacar: la Magnetic Force Microscopy (MFM) [Veeco] que permet mesurar les propietats magnètiques de la mostra, la Electric Force Microscopy (EFM) [Veeco] que permet mesurar les càrregues elèctriques presents a la mostra, la Scanning Spreading Resistance Microscopy (SSRM) [Veeco] que permet mesurar la resistivitat local, o la Scanning Capacitance Microscopy (SCM) [Veeco] que permet adquirir mapes de capacitat (quan s'escombra la superfície) i corbes capacitat – voltatge (quan es manté la punta en una posició fixa). Aquesta tècnica s'ha utilitzat per a la identificació/visualització dels diferents (elements/terminals) que formen els dispositius

MOS (Fig. 2.10). La SCM ha permès estudiar els perfils de dopants en estructures MOS [Williams 89, Tomiye 98, Kang 99]. Actualment, la SCM s'està utilitzant també per a l'estudi d'espots de ruptura en capes ultra primes de SiO₂ [Wang 05].

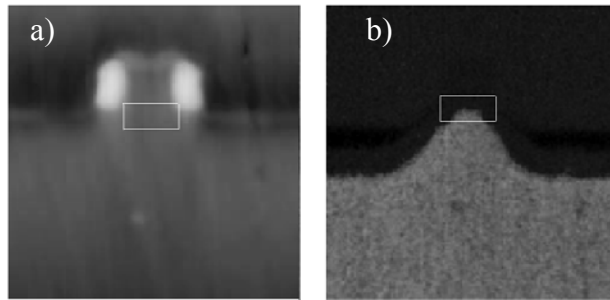


Fig. 2.10. Mapa topogràfic (a) i de capacitat (b) de la secció transversal d'un transistor MOS. El tamany dels mapes és $1.25 \times 1.25 \mu\text{m}^2$. La SCM permet, per exemple, determinar les dimensions laterals de l'òxid de porta (rectangle blanc) (Reimprès de [Veeco]).

Una atenció especial mereix la tècnica que aquí ens ocupa: la microscopia de forces atòmiques amb punta conductora (CAFM). Aquesta tècnica permet realitzar les mateixes mesures que l'AFM. A més, permet estudiar les principals propietats elèctriques de la mostra, també amb resolució nanomètrica, a partir de la mesura del corrent que travessa la mostra quan s'aplica un voltatge entre la punta i la mostra.

En la secció següent, es descriuran les modificacions que cal realitzar en una configuració típica d'AFM pel tal de convertir-lo en un CAFM. A continuació es presentaran algunes de les aplicacions més rellevants del CAFM per l'estudi de dielèctrics de porta.

2.3.1. Diferències respecte a l'AFM

Partint d'una configuració experimental típica d'un AFM com la que mostra la figura 2.4, les principals modificacions que cal realitzar per poder mesurar el corrent que travessa la mostra són (Fig. 2.11): a) equipar el microscopi amb una punta conductora per tal que pugui circular corrent, b) afegir una font de tensió per polaritzar el sistema punta - mostra, c) disposar d'un mitjà per mesurar el corrent que circula per la punta i d) col·locar el sistema punta mostra i els mitjans de mesura de corrent dintre d'una gàbia de Faraday, per tal de minimitzar la influència del soroll elèctric ambiental en les mesures.

La punta és l'element clau del sistema, ja que és la sonda que està pròpiament en contacte amb la mostra. Les prestacions del microscopi depenen en gran mesura de les característiques de la punta. Els principals tipus de puntes conductores comercials són (Fig. 2.12): les de Si recobertes d'un aliatge metàl·lic, les de Si recobertes de diamant i les puntes realitzades íntegrament en diamant. Les puntes de Si recobertes d'un aliatge metàl·lic, com per exemple Co/Cr o Pt/Ir, ofereixen una bona resolució ja que tenen un radi de corbatura d'uns 5-10nm. El seu principal inconvenient és que tenen una durabilitat relativament curta, ja que perden la conductivitat per desgast mecànic mentre s'escombra la superfície o degut a reaccions amb la mostra més ràpidament que les puntes de diamant.

Les puntes de diamant ofereixen una durabilitat molt més alta, però no presenten una resolució tant elevada. Aquest punt es fa especialment patent en les puntes recobertes, ja que la tècnica de creixement de la capa de diamant (deposició per CVD, Chemical Vapor Deposition) requereix com a mínim un gruix de 100 nm per aconseguir un grau d'uniformitat acceptable per a mesures amb CAFM.

Encara que no disponibles comercialment, les puntes que ofereixen unes millors prestacions són les fabricades íntegrament en diamant i modificades mitjançant Focus Ion Beam [Olbrich 99] per tal d'obtenir un radi de l'ordre dels 20nm. Aquestes puntes ofereixen una resolució i una durabilitat elevades. Per una informació més exhaustiva sobre les característiques de les puntes de CAFM es recomana consultar la secció 2.4 de [Porti 03] i les referències que cita.

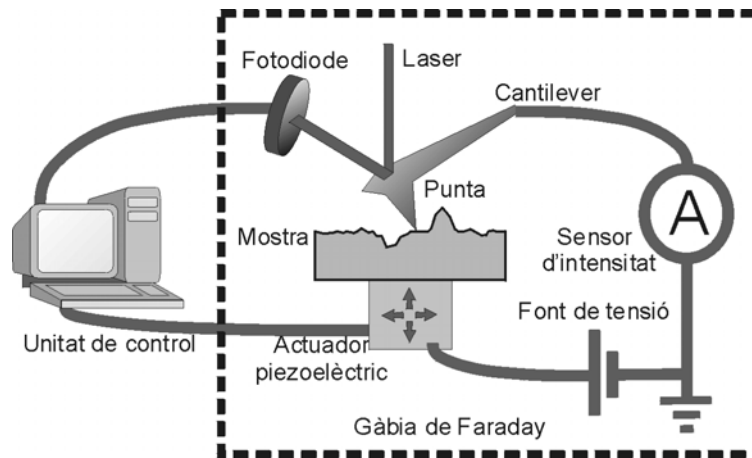


Fig. 2.11. Configuració experimental típica d'un CAFM. Les principals modificacions (respecte a un AFM) que cal realitzar per poder mesurar el corrent que travessa la mostra són: a) equipar el microscopi amb una punta conductora per tal que pugui circular corrent, b) afegir una font de tensió per polaritzar el sistema punta - mostra, c) disposar d'un mitjà per mesurar el corrent que circula per la punta i d) col·locar el sistema punta mostra i els mitjans de mesura de corrent dintre d'una gàbia de Faraday per tal de minimitzar la influència del soroll elèctric ambiental en les mesures.

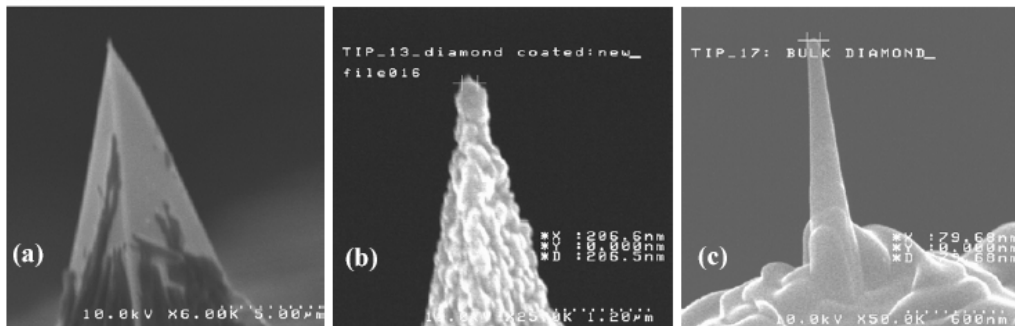


Fig. 2.12. Imatges obtingudes amb microscopi electrònic de (a) una punta de Co/Cr, (b) una punta de Si recoberta d'una capa de diamant i (c) una punta fabricada íntegrament en diamant i esmolada mitjançant Focus Ion Beam. Imatges reimpresses de [Porti 03].

En la majoria de CAFM la punta està connectada a terra mentre que la font de tensió aplica un voltatge al suport de la mostra. Un CAFM típic ens permet adquirir: mapes de

corrent i característiques intensitat – voltatge (I-V). En el primer cas la font de tensió aplica un voltatge constant mentre la punta escombra l'àrea seleccionada. Simultàniament a l'adquisició de la topografia en cadascun dels punts del mapa, es mesura el corrent que travessa la mostra. Pel cas de les característiques intensitat – voltatge la font aplica una rampa de tensió mentre la punta es manté en una posició fixa. Els mapes de corrent permeten estudiar els canvis en la conductivitat i/o en el gruix de la mostra en la matriu de posicions que componen el mapa. Les rampes de tensió permeten estudiar els diferents mecanismes de conducció que es poden donar per diferents rangs de tensió.

El mitjà estàndard del CAFM per a la mesura del corrent consisteix en connectar en sèrie amb la punta, la mostra i la font de tensió un convertidor intensitat – voltatge amb un factor d'amplificació molt gran, de manera que quan circulen corrents de l'ordre de pA s'obtingui a la sortida tensions de l'ordre de volts. El rang dinàmic de mesura de corrent dels CAFM comercials és d'uns tres ordres de magnitud. En funció del factor d'amplificació del convertidor utilitzat, els rangs típics de mesura de corrent són de fA a pA i de pA a nA [Veeco]. Cal remarcar que, fins i tot per corrents de l'ordre de pA-fA, la densitat de corrent que circula per la punta (i la mostra) es molt elevada ($\sim A/cm^2$) donat que l'àrea de contacte entre punta i mostra és de l'ordre dels pocs centenars de nm^2 .

2.3.2. Caracterització de dielèctrics de porta amb CAFM

Els dielèctrics de porta amb gruixos de pocs nm resulten especialment adequats per a la caracterització mitjançant CAFM, ja que aplicant uns pocs volts s'obtenen corrents en el rang de mesura del microscopi.

Els primers treballs en que es va utilitzar un CAFM per analitzar les propietats elèctriques del SiO_2 a escala nanomètrica es remunten a l'any 93 [Murrell 93]. Els experiments realitzats van consistir en aplicar rampes de tensió en diferents punts d'un òxid per a determinar el que els autors anomenaren robustesa dielèctrica, definida com la tensió que cal aplicar a un espot per tal d'assolir un corrent de 25pA. Aquests experiments es van ampliar i sistematitzar amb la mesura de mapes de robustesa dielèctrica (Fig. 2.13) [O'Shea 95, Ruskell 96], on simultàneament a l'adquisició de la topografia es mesurava la robustesa dielèctrica (entesa com el voltatge que cal aplicar en un punt per assolir un corrent determinat) en cadascun dels punts que formen la imatge. Aquests experiments van permetre observar que hi havia espots amb un comportament dielèctricament més feble que altres, és a dir, que hi havia posicions que necessitaven un voltatge inferior a la resta per assolir el corrent fixat com referència.

Com s'ha dit a la secció 2.3.1, els principals tests que es poden realitzar amb CAFM són: l'adquisició de mapes de corrent (simultàniament a la topografia) per una banda, i per l'altra, de característiques I-V locals. Mitjançant l'adquisició simultània de mapes de corrent i topogràfics s'ha estudiat la frontera entre l'òxid de porta i l'òxid de camp [Olbrich 98, Olbrich 98b, Olbrich 99b] revelant que en la regió on es produeix la transició entre els dos tipus d'òxid es produeix una reducció del gruix de l'òxid de porta (Fig. 2.14.a) que dona lloc a un augment de corrent túnel (Fig. 2.14.b).

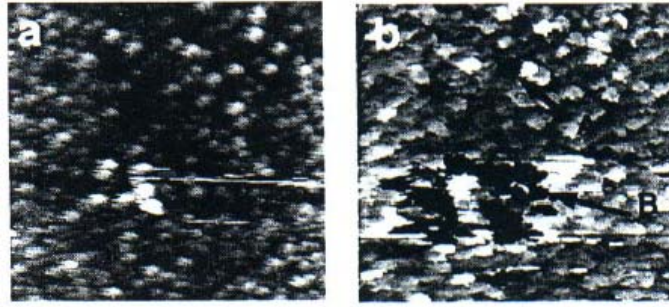


Fig. 2.13. Imatge de (a) topografia i (b) robustesa dielèctrica obtinguda en un àrea de $1.8\mu\text{m}^2$ d'òxid sobre un substrat de polisilici. Es va establir un límit de corrent de 25pA. Pel mapa topogràfic el rang d'alçades es de 0nm (negre) fins a 72nm (blanc). Pel mapa de robustesa dielèctrica el contrast entre les zones clares (dielèctricament més febles) i fosques és de 24.3V. Reimprès de [O'Shea 95].

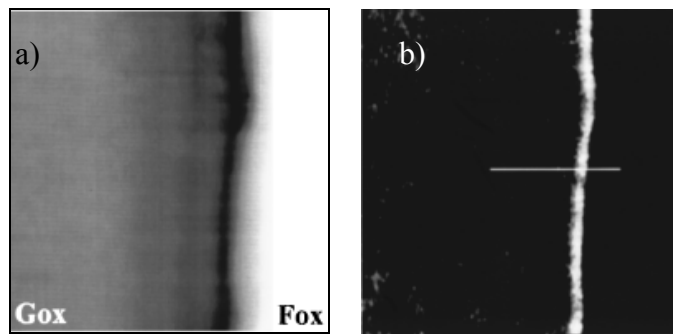


Fig. 2.14. a) Mapa topogràfic i b) mapa de corrent d'una regió de frontera entre òxid de porta (GOX) i òxid de camp (FOX). S'observa un augment de corrent túnel en la regió de transició, fruit d'una reducció del gruix de l'òxid de porta. El tamany de la imatge és de $0.7\times 0.7\mu\text{m}^2$. El rang d'alçades és de 0nm (negre) fins a 80nm (blanc). El rang de corrent és de 0fA (negre) fins a 150fA (blanc). Reimprès de [Olbrich 98].

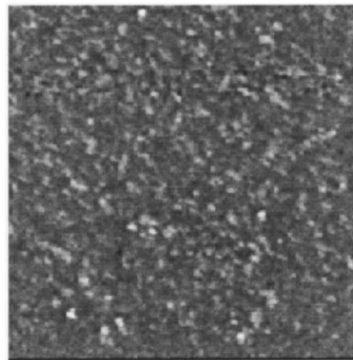


Fig. 2.15. Mapa de corrent mesurat amb CAFM en una capa de SiO_2 de 6nm de gruix, on s'aprecia que les propietats elèctriques del SiO_2 de porta no són homogènies a escala nanomètrica. El tamany de la imatge és de $3\times 3\mu\text{m}^2$. El rang de corrent és de 0fA (negre) fins a 50fA (blanc). Reimprès de [Porti 01].

Experiments similars han permès observar que les propietats elèctriques del SiO_2 de porta no són homogènies a escala nanomètrica, ja que hi ha punts (coneguts com espots febles) on el corrent és superior a la resta [Porti 01] (Fig. 2.15). La inhomogeneïtat en els mapes de corrent és deguda, per un costat, a petites variacions en el gruix de la mostra (alguns espots presenten més corrent perquè el gruix de la capa és menor que el

gruix mig) i, per altre, a variacions de les propietats elèctriques (tot i que tinguin el mateix gruix físic, un espot amb una alçada de barrera lleugerament menor presentarà un nivell de corrent túnel superior).

A partir de les característiques I-V (Fig. 2.16), s'ha pogut determinar el mecanisme de conducció a escala nanomètrica. L'ajust de les característiques experimentals al model del mecanisme de conducció (Fowler – Nordheim) ha permès extreure paràmetres rellevants de la mostra com per exemple el seu gruix o alçada de barrera [Olbrich 98, Porti 01]. Quan es canvia d'una posició a un altra, pot canviar tant el gruix local del dielèctric, com les seves propietats elèctriques (alçada de barrera), i tots dos canvis donaran lloc a una modificació del corrent mesurat. Per facilitar la comparació i anàlisi de les característiques I-V es sol considerar una alçada de barrera per la interfície Si-SiO₂ (injecció des del substrat) constant. D'aquesta manera, les corbes I-V es poden ajustar en funció d'un únic paràmetre, el gruix efectiu (t_{eff}), que engloba tots els factors que poden provocar variacions en el corrent local mesurat. Degut a la forta dependència del corrent túnel amb el gruix, a partir de les característiques I-V s'ha pogut determinar el gruix de forma molt acurada. Depenent de les condicions experimentals concretes s'ha arribat a assolir resolucions de 0.03nm [Olbrich 01].

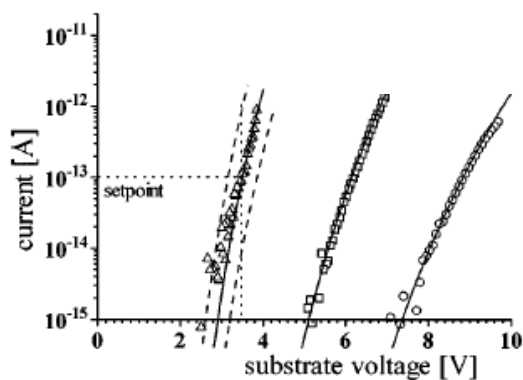


Fig. 2.16. Característiques Intensitat-Voltatge locals mesurades amb CAFM (símbols) i ajustos a conducció túnel Fowler-Nordheim (línies). Les mesures han estat realitzades en capes de SiO₂ amb gruixos de 3nm (triangles), 5.3nm (quadrats) i 7.8nm (cercles). Reimpreses de [Olbrich 98].

Tant els mapes de corrent com les característiques I-V permeten comparar el comportament elèctric de diferents materials dielèctrics i diferents processos/tècniques de creixement. Els capítols tercer i quart d'aquesta tesi són una mostra d'aquestes aplicacions, ja que en aquests capítols es recullen els resultats del treball realitzat per a la caracterització topogràfica i elèctrica de diferents dielèctrics de porta.

El CAFM també ha demostrat ser una eina molt eficaç per a l'estudi de la degradació i ruptura dielèctrica dels dielèctrics de porta. Aquesta tècnica no només permet caracteritzar la degradació i ruptura provocada per tècniques estàndard [Porti 02c], sinó que pot provocar la degradació i ruptura dielèctrica del dielèctric de porta [Porti 02, Porti 02b, Porti 02c], ja que la densitat de corrent que circula per l'àrea de contacte entre punta i mostra és suficientment alta. A partir dels mapes de corrent i les corbes I-V, el CAFM ha permès estudiar la evolució de la conductivitat dels espots a l'òxid durant el procés de degradació dielèctrica [Porti 02b], ha mostrat com evolucionen els modes de

conducció en els règims de pre i post ruptura (Fig. 2.17.a) i com afecten diferents paràmetres elèctrics (com el voltatge aplicat per estressar la mostra o la fixació d'un límit de corrent) a la ruptura dielèctrica [Porti 03] (Fig. 2.17.b). Les I-V també han permès observar, abans de la ruptura, commutacions entre estats de conductivitat diferent [Porti 01] que han estat associats a canvis en la alçada de la barrera túnel deguts a l'atrapament/desatrapament d'un electró (Fig. 2.17.c) en trapes generades durant l'estrès. Aquestes commutacions queden emmascarades quan es realitzen mesures a nivell macroscòpic, ja que amb aquest tipus de tècniques s'obtenen resultats promitjats sobre tota l'àrea del dielèctric de porta. També s'han observat commutacions entre estats de conductivitat diferent després de la ruptura. Es pot trobar un recull detallat de la utilització del CAFM com a eina de caracterització del SiO₂ de porta en [Porti 02b, Porti 03].

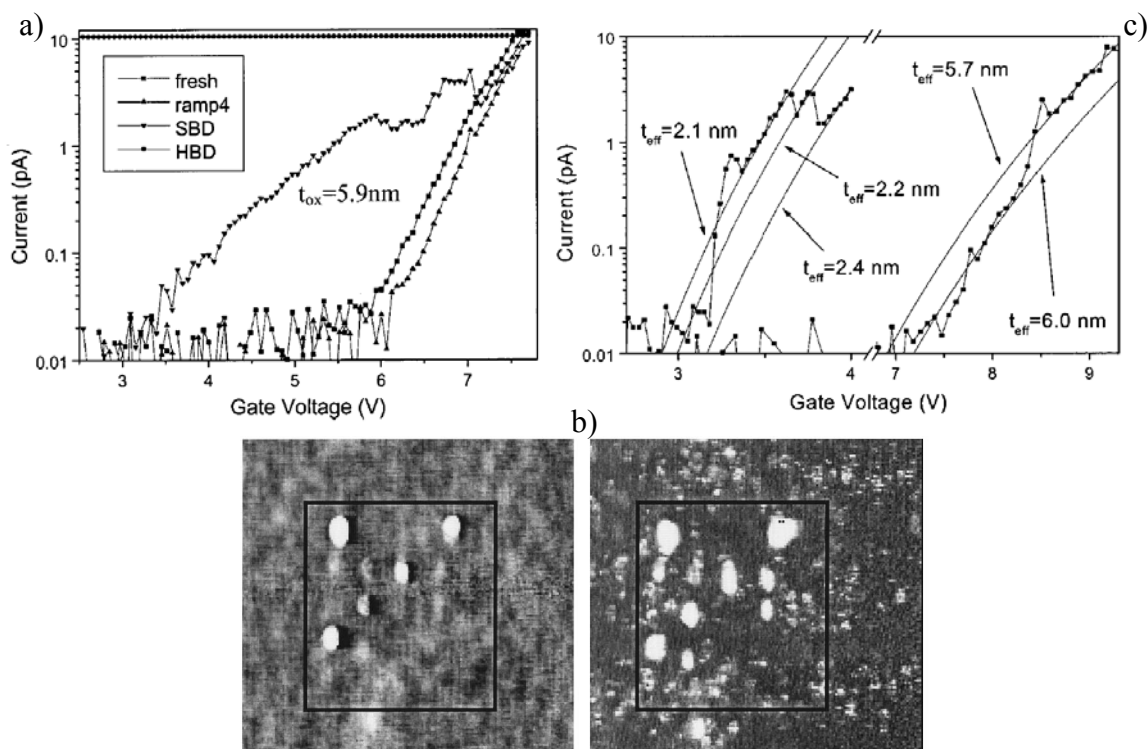


Fig. 2.17. a) Característiques I-V locals mesurades en un capa de SiO₂ de 6nm corresponents a una sèrie de rampes de voltatge en el mateix punt. Es pot veure com les corbes evolucionen des de la característica verge a una de trencada. b) Mapes topogràfic (esquerra) i de corrent (dreta) d'una zona on s'han aplicat diverses rampes de voltatge des de 0V fins a diferents valors finals. La topografia i el corrent mesurat en cadascuna de les posicions estressades depenen dels paràmetres de l'estrès aplicat. El tamany de les imatges és de 9×9μm². c) Commutacions de pre-ruptura entre diferents estats de conductivitat per una capa de SiO₂ de 3nm (corba esquerra) i de 6nm (corba dreta). Figures reimpresses de [Porti 02b].

Actualment, la caracterització de SiO₂ (com dielèctric de porta) amb CAFM segueix sent un camp prometedori. Algunes de les principals línies de treball són: la determinació de la localització (respecte a les interfícies) de la càrrega elèctrica que s'indueix en la ruptura i la evolució de la propagació lateral de la degradació i ruptura dielèctrica [Zhang 05], la comparació de diferents tècniques de creixement i processos de recuit de capes de SiO₂ dopat amb petites concentracions de nitrogen [Polspoel 05], o l'estudi de capes de SiO₂ implantades amb nanocristalls de Si [Porti 05].

En els últims anys, el CAFM també s'ha començat a utilitzar per a la caracterització de dielèctrics de porta d'alta permitivitat. Olbrich et al. [Olbrich 01] han utilitzat el CAFM per estudiar l'homogeneïtat de la conducció i el mecanisme de conducció en capes ultra primes de Al_2O_3 (Fig. 2.18). S'ha estudiat l'efecte de diferents processos de recuit en les propietats topogràfiques i elèctriques dels high-k [Pétry 04], i la dependència de la densitat d'espots febles amb el voltatge aplicat per a l'adquisició de mapes de corrent [Kyuno 05]. Altres investigadors estudien l'evolució de les propietats topogràfiques i elèctriques del high-k en funció del gruix i el grau de cristallinització de la capa o la rugositat de les interfícies [Goto 01, Ikeda 03, Wurmbauer 04]. Els articles C i E que formen part de compendi de publicacions que componen d'aquesta tesi estan dedicats a l'estudi de materials high-k amb CAFM.

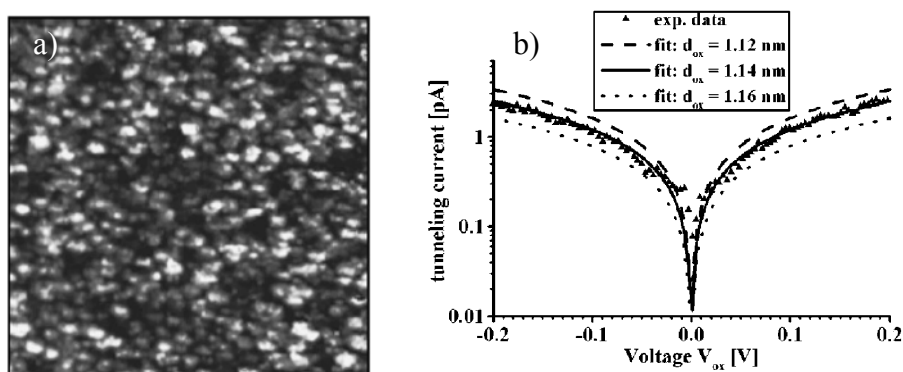


Fig. 2.18. a) Mapa de corrent mesurat amb CAFM en una capa de Al_2O_3 de 1.2nm de gruix. El tamany de la imatge és de $0.5 \times 0.5 \mu\text{m}^2$. El rang de corrent és de 0fA (negre) fins a 6pA (blanc). S'aprecia que les propietats elèctriques no són homogènies a escala nanomètrica. b) Característica Intensitat-Voltatge local mesurada sobre la mateixa mostra amb CAFM (símbols) i ajustos a conducció túnel directe (línies). Reimprès de [Olbrich 01].

Malauradament, per a la realització de determinats tests de fiabilitat en dielèctrics de porta les prestacions dels CAFM comercials resulten insuficients. És per això, que s'ha implementat un prototipus de Microscopi de Forces Atòmiques amb Prestacions Elèctriques Millorades (ECAF, de l'anglès Enhanced CAFM), que ha desenvolupat l'autor i que ha fet possible la realització d'experiments que no poden ser duts a terme amb cap altre instrument. La caracterització realitzada amb aquest nou instrument sobre materials high-k forma part dels resultats presentats al capítol 4. A la següent secció es descriu en detall l'instrument.

2.4. Microscopi de Forces Atòmiques amb punta Conductora Millorat

El Microscopi de Forces Atòmiques amb punta Conductora Millorat (ECAF) (Article D) sorgeix de la necessitat de millorar les prestacions dels CAFM comercials, ja que són insuficients per realitzar determinats tipus de tests elèctrics en dielèctrics de porta. El problema principal que presenten els CAFM comercials a l'hora d'estudiar elèctricament els dielèctrics de porta ultra prims és el reduït rang dinàmic de mesura de corrent (uns 3 ordres de magnitud). El corrent que circula per l'òxid de porta depèn fortament de la tensió que s'aplica, el gruix del dielèctric o l'estat de degradació d'aquest. Per tant, petites variacions d'aquests factors (degut a la dependència

exponencial) poden provocar que el corrent que recull la punta del CAFM quedi fora del rang de mesura. Un cas on el rang dinàmic insuficient es fa especialment patent és quan es produeix la ruptura dielèctrica. El canvi bruscat i de diversos ordres de magnitud del corrent implica que no es pugui adquirir en una mateixa mesura els corrents de pre i post ruptura.

Una altra limitació del CAFM i complementària a la primera és la poca flexibilitat que ofereix per la definició de test elèctrics. Els CAFM comercials només permeten aplicar tensió i mesurar corrent (i no al contrari), de forma que els tests queden reduïts a l'adquisició de mapes de corrent i a l'aplicació de rampes de tensió, i en alguns casos concrets a l'adquisició del corrent en funció del temps. Malgrat que amb aquests tests es poden extreure paràmetres importants, altres paràmetres rellevants necessiten altres tipus de tests [Martin 98].

El nou instrument desenvolupat ofereix un rang dinàmic de mesura de corrent molt més gran (de pA a mA) i una gran flexibilitat en la definició de tests elèctrics. En aquesta secció, en primer lloc es descriurà la configuració experimental bàsica del nou instrument, i a continuació els tests que permet realitzar. Cal dir que aquesta secció ni està pensada ni serveix com a manual d'usuari de l'ECAFM. Amb aquesta finalitat es disposa del treball final de carrera d'Enginyeria Tècnica de Telecomunicacions del Sr. Joan Font Roselló [Font 04], on s'ofereix una explicació detallada de la realització de mesures amb l'instrument.

2.4.1. Configuració experimental

Pel desenvolupament del prototipus d'ECAFM s'ha partit d'un CAFM (Fig. 2.11) compost d'un AFM de Nanotec Electrònica, un mòdul extern (convertidor intensitat-voltatge) per a la mesura de corrent de la marca Femto i un ordinador amb software Nanotec Electrònica que permet la configuració de l'AFM, la realització de mesures i el processat i anàlisi d'aquestes. Amb aquesta configuració inicial es poden obtenir mapes de corrent (quan s'escombria una zona amb un voltatge constant) simultàniament a l'adquisició de la topografia. També es poden obtenir característiques I-V locals (quan s'aplica una rampa de voltatge en un punt fix de la mostra) i característiques locals intensitat en funció del temps (aplicant un voltatge constant), en un punt fix.

L'electrònica de control de l'AFM té una unitat de processat digital de senyal (DSP) amb entrades i sortides analògiques que permet generar voltatges entre -12V i 12V que s'utilitzen per polaritzar la mostra respecte a la punta. La punta de l'AFM està connectada a un convertidor intensitat - voltatge amb guanys de 10^{10} , 10^{11} i 10^{12}V/A que es poden seleccionar manualment. La sortida del convertidor I-V està connectada a una entrada de la DSP que pot acceptar voltatges entre -3V i 3V . Per tant, considerant per exemple que s'ha seleccionat el guany de 10^{10}V/A , es poden mesurar només corrents amb un valor absolut menor que 300pA (corresponent a un voltatge d'entrada de 3V en la DSP). Per aquest guany el soroll elèctric està al voltant de 0.5pA , així que el rang dinàmic de mesura de corrent és de solament 3 ordres de magnitud. Altres CAFM ofereixen rangs de mesura diferents però igualment amb un rang dinàmic d'uns 3 ordres de magnitud [Veeco].

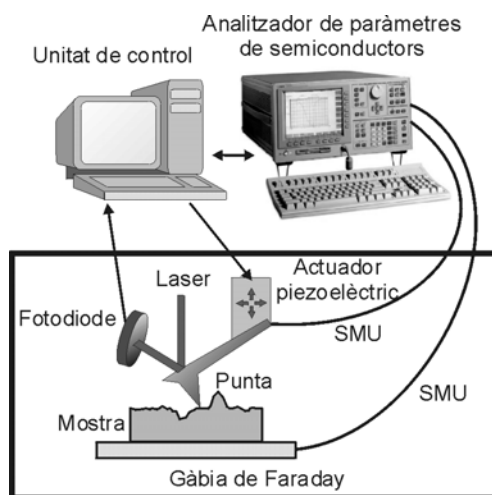


Fig. 2.19. Configuració experimental d'un ECAFM. Enlloc del hardware propi d'un CAFM, l'ECAFM utilitza un analitzador de paràmetres de semiconductors controlat via GPIB per aplicar voltatge (intensitat) al sistema punta mostra i mesurar la intensitat (tensió).

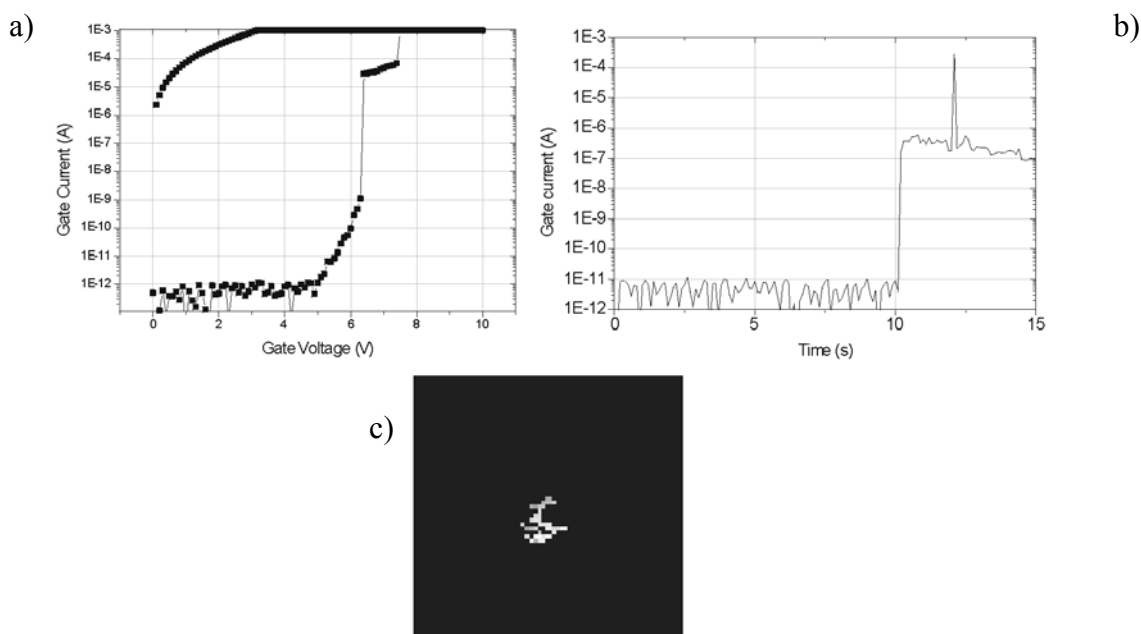


Fig. 2.20. Exemples de mesures realitzades amb ECAFM: Característiques Intensitat - Voltatge (a) Intensitat - Temps (b) i c) Mapa de corrent mesurats en una capa de 3.5nm de SiO_2 . El tamany de la imatge és de $2 \times 2 \mu\text{m}^2$. El rang de corrent és de 1pA (negre) fins a 1mA (blanc).

Per aconseguir un rang dinàmic de mesura de corrent més gran i una major flexibilitat en la definició de tests elèctrics, en el ECAFM s'han substituït els mitjans descrits de generació de voltatge i de mesura de corrent per unitats font - monitor (SMU, de l'anglès Source Monitor Unit) d'un analitzador de paràmetres de semiconductors (APS) 4156C d'Agilent Technologies (Fig. 2.19). Recordem que els SMU permeten aplicar voltatge i mesurar corrent o viceversa. A més a més els SMU tenen un rang de mesura variable i auto seleccionable, de manera que quan la magnitud que s'està adquirint s'apropa al màxim o al mínim que es pot mesurar amb un determinat guany, l'SMU canvia al guany apropiat de manera automàtica. La figura 2.20. mostra exemples d'alguns dels resultats obtinguts amb l'ECAFM. Cal fer notar l'increment del rang dinàmic per la mesura del corrent, respecte a un CAFM estàndard.

Per realitzar mesures puntuals, és a dir, quan la punta es manté fixa en una posició durant tota la mesura, el procés és el següent: (a) mitjançant el software de control de l'AFM (de Nanotec Electrònica) es mou la mostra per situar la punta en el lloc desitjat, (b) el test que es vol aplicar es configura a l'APS, s'executa i les dades es representen a l'APS. A continuació, s'envien les dades a l'ordinador. L'APS està equipat amb una interfície de bus GPIB per poder ser operat remotament i poder transmetre els resultats a l'ordinador de control. Per tant, encara que el pas (b) es pot realitzar des del panell de l'instrument directament, s'ha implementat un sistema de mesura més amigable, fent servir l'ordinador de control de l'AFM (equipat també amb una tarja GPIB) per gestionar l'operació de l'APS.

Per la realització de mapes elèctrics ha calgut sincronitzar l'adquisició de la topografia amb la mesura de la variable elèctrica desitjada. El voltatge aplicat al tub piezoelèctric en la direcció d'escombrat ràpida ha estat utilitzat com a paràmetre de sincronització: aquest voltatge es porta a una entrada d'una tarja d'adquisició de dades instal·lada a l'ordinador de control. Quan el voltatge monitoritzat correspon a l'inici de l'adquisició d'una línia de topografia, se li dona l'ordre via GPIB a l'APS per a que comenci l'aplicació d'un voltatge constant i mesura del corrent (o un corrent constant i mesura del voltatge). La duració de l'estrès constant és la mateixa que la de l'adquisició d'una línia de topografia. Per les següents línies de topografia es torna a repetir aquest procés fins obtenir un mapa elèctric.

Les seccions 2.4.2 i 2.4.3 descriuen de forma més detallada com es realitzen els diferents tipus de tests que permet l'instrument i l'aplicació de control que s'ha implementat amb Labview [NationalInstruments] per operar el prototipus d'ECAFM. Per la resta del capítol ens referirem a aquest software, instal·lat a l'ordinador de control, com MSE (de l'anglès Measurement Software for Enhanced CAFM).

Per avaluar les prestacions del nou instrument es van realitzar diferents tests en un conjunt de capacitats CMOS amb una capa de SiO₂ (oxidació tèrmica a 800°C) de 3.5nm de gruix com dielèctric de porta i poly-Si tipus n com a terminal de porta. El substrat d'aquestes capacitats és Si (100) dopat amb Fòsfor (10¹⁹cm⁻³). El poly-Si del terminal de porta es va eliminar mitjançant un gravat humit consistent en submergir les mostres en HF (al 10% en volum) durant 5s, un bany d'ultrasons amb KOH durant 20 minuts i neteja amb aigua desionitzada. L'ECAFM es va equipar amb puntes de Si recobertes de PtIr que ofereixen un àrea de contacte punta - mostra d'uns 300nm².

Com a exemple de mesures puntuals i de mapes elèctrics es va triar l'adquisició de característiques I-V i de mapes de corrent, respectivament. Tots dos tipus de mesures es van realitzar primer amb la configuració ben coneguda del CAFM, per tenir dades de referència, i posteriorment amb la configuració d'ECAFM. Per obtenir les característiques I-V es van aplicar a la mostra (la punta està connectada a terra) rampes de voltatge des de 0V fins a -10V, i es va mesurar simultàniament el corrent. Utilitzant aquesta polaritat s'evita l'oxidació anòdica de la mostra i els electrons s'injecten des de la interfície Si-SiO₂ que està millor determinada que la interfície punta SiO₂. Per tenir alguna estructura que es pugui distingir bé als mapes de corrent, abans de l'adquisició d'aquests, es va aplicar un estrès constant de 10V i amb una duració de 15s en una posició de la zona en que es realitzarien els mapes. L'estrès a tensió constant provoca la

ruptura dielèctrica i per tant una zona amb una conductivitat molt més alta que a la resta del mapa. El mapes es van adquirir amb una tensió de porta de 3V i un tamany de $2 \times 2 \mu\text{m}^2$.

2.4.2. Mesures puntuals

L'ECAFM segueix la mateixa seqüència d'operacions que l'APS per realitzar les mesures puntuals. Dintre del menú de mesures puntuals del MSE en primer lloc s'indica quina de les quatre unitats SMU de l'APS s'utilitzarà per realitzar la mesura (Fig. 2.21.a) i quin tipus de test elèctric es realitzarà. Seguidament es configuren els paràmetres propis del tipus de mesura seleccionada (Fig. 2.21.b) com per exemple voltatge inicial i voltatge final pel cas d'haver seleccionat una rampa de tensió, o el temps de duració del test en el cas d'un estrès constant. A continuació es configura la representació gràfica dels resultats (Fig. 2.21.c), com per exemple: variables a representar en cadascun dels eixos del gràfic o escales dels eixos. Per últim, s'executa el test, es llegeixen les dades adquirides per l'APS i es representen gràficament (Fig. 2.21.d) a la pantalla de l'ordinador. El MSE permet guardar les dades adquirides i també la configuració del sistema, per tal de poder-la carregar quan es desitgi sense haver de tornar a configurar manualment els paràmetres del test. La possibilitat de guardar i carregar configuracions de test s'ha utilitzat per realitzar seqüències de test. Un CAFM simplement permet repetir un mateix test simple diverses vegades.

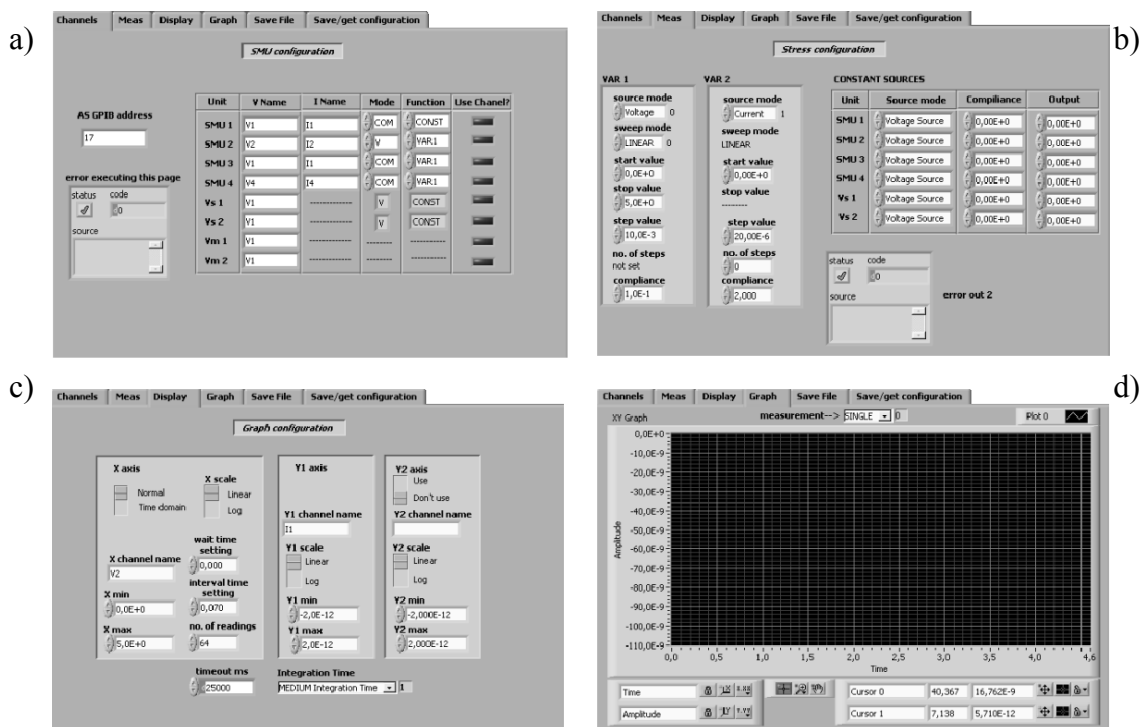


Fig. 2.21. El software de control de l'ECAFM configura i executa els tests puntuals seguint el mateix procediment que l'analitzador de paràmetres de semiconductors (APS) Agilent 4156C. En primer lloc s'indica quina de les quatre unitats SMU de l'APS s'utilitzarà per realitzar el tests (a) i quin tipus de test elèctric es realitzarà, seguidament es configuren els paràmetres propis del tipus de test seleccionat (b). A continuació es configura la representació gràfica del test (c). Per últim, s'executa el test, es llegeixen les dades adquirides per l'APS i es representen gràficament (d) a la pantalla de l'ordinador.

Mitjançant l'aplicació de gestió de tests (Fig. 2.22) del MSE, es poden carregar fins a quatre configuracions de test prèviament guardats i executar-los seqüencialment en l'ordre desitjat, les vegades que determini l'usuari. Aquest software permet seleccionar quines de les dades adquirides durant la seqüència de test es volen guardar.

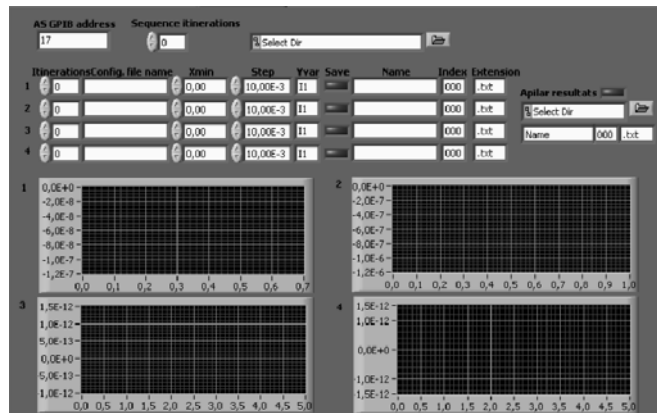


Fig. 2.22. El gestor de tests permet executar seqüències de test a partir de tests bàsics prèviament configurats.

La figura 2.23 mostra corbes I-V representatives de les estructures MOS amb 3.5nm de SiO₂ com òxid de porta, mesurades amb la configuració experimental corresponent a un CAFM estàndard (línia contínua) i l'ECAFM (línia + símbols). Per les mesures realitzades amb la configuració CAFM es poden distingir 3 regions: (a) la regió corresponent al soroll elèctric, amb corrent ≤ 1 pA, (b) la regió corresponent a corrent túnel, amb un rang de corrent de ~ 1 pA fins a 300pA, i (c) la regió de saturació (deguda a l'electrònica de mesura), amb corrent = 300pA. Les mesures realitzades amb ECAFM presenten també les regions (a) i (b), però el corrent túnel no es satura a 300pA. Per un determinat voltatge es produeix la ruptura dielèctrica de la capa d'òxid (~ 6 V per la I-V representada), que provoca un augment abrupte del corrent. Finalment s'assoleix un corrent de 1mA, que s'ha fixat prèviament com límit de corrent per aquest test. La regió (b) presenta corrent túnel tipus Fowler-Nordheim (FN) [Fowler 28, DiMaria 93] per les mesures realitzades amb les dues configuracions. El corrent FN depèn fortament del gruix de l'òxid i l'alçada de la barrera d'injecció. Aquests dos paràmetres varien d'una posició a una altra a escala nanomètrica: el gruix de l'òxid varia a causa de la rugositat de la superfície del SiO₂ i de la interfície SiO₂-Si, i l'alçada de la barrera d'injecció degut a la presència de defectes elèctrics. Això provoca que les característiques I-V mesurades a diferents posicions de la mostra presentin sempre una dispersió [Stathis 01] i per tant són aquests rangs de dispersió els que s'han de comparar per les dues configuracions experimentals. Els rangs de dispersió de les corbes I-V mesurades amb el CAFM i l'ECAFM (regió entre les línies discontinües a la figura 2.23) estan solapats, el que assegura que les mesures realitzades amb l'ECAFM reproduïxen les característiques de referència adquirides amb CAFM.

El límit de corrent de 1mA s'ha establert per protegir la punta durant els tests. Sense aquest límit, poden circular corrents més grans, que provoquen danys irreversibles en la punta. Aquest efecte es pot apreciar a la figura 2.24: durant la primera rampa de voltatge (línia contínua) es produeix la ruptura dielèctrica i s'assoleix un corrent màxim de 17mA, posteriorment, encara que el voltatge continua augmentant, el corrent disminueix 4 ordres de magnitud. Una segona rampa de voltatge realitzada a la mateixa posició just

després de la primera rampa (línia discontinúta) mostra un corrent molt més petit. Si s'estudia una altra posició (verge) amb aquesta punta ja no es recuperen els corrents típics mesurats durant la primera rampa. Cal remarcar que fins i tot aplicant el límit de corrent de 1mA, com que l'àrea de contacte entre punta i mostra és de pocs centenars de nm², la densitat de corrent que circula per la punta es de l'ordre de 10⁸-10⁹ A/cm².

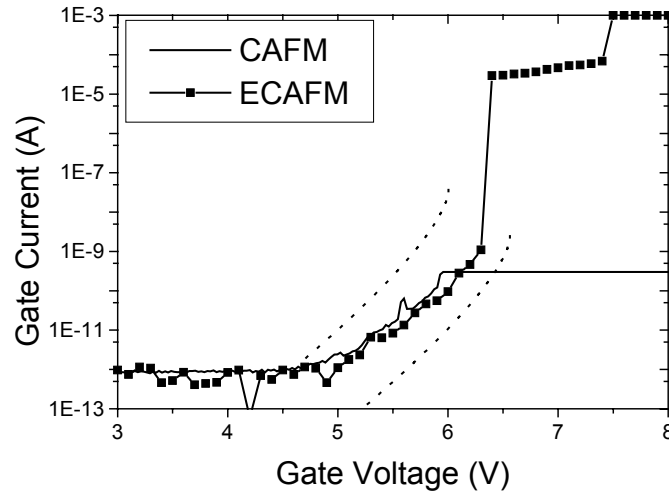


Fig. 2.23. Característiques I-V mesurades amb un CAFM estàndard (línia contínua) i amb ECAFM (línia + símbols). Pel CAFM es poden distingir 3 regions: (a) la regió corresponent al soroll, amb intensitat ≤ 1 pA, (b) la regió corresponent a corrent túnel, amb un rang de corrent de ~ 1 pA fins a 300pA, i (c) la regió de saturació (deguda a l'electrònica de mesura), amb corrent = 300pA. Les mesures realitzades amb ECAFM presenten també les regions (a) i (b), però el corrent túnel no es satura a 300pA. Per un determinat voltatge es produeix la ruptura dielèctrica de la capa d'òxid (~ 6 V per la I-V representada), que provoca un augment abrupte del corrent. Finalment s'assoleix un corrent de 1mA, que s'ha fixat prèviament com límit de corrent per aquesta mesura. Les línies discontinútes indiquen el rang de dispersió de les característiques I-V obtingut amb les dues configuracions experimentals.

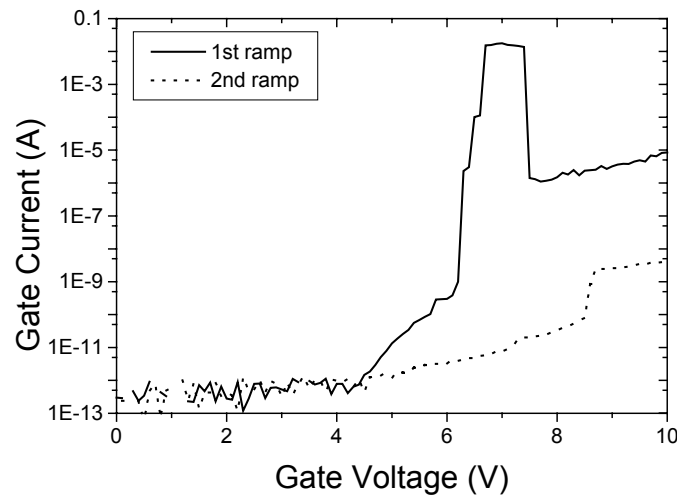


Fig. 2.24. Característiques I-V consecutives realitzades amb ECAFM en una mateixa posició de la mostra, sense límit de corrent. Un corrent excessiu provoca una reducció de la conductivitat de la punta.

Un problema similar, encara que no tant sever, apareix degut a la fricció punta - mostra. La figura 2.25 mostra una comparació de les característiques I-V (amb el límit de 1mA) realitzades abans (línia contínua) i després (línia discontinua) de l'adquisició de diversos mapes topogràfics. Aquests mapes es van adquirir utilitzant un tamany d'imatge gran i una velocitat d'escombrat ràpida, per tal de provocar un desgast accelerat de la punta. Es pot observar que amb la punta desgastada el corrent màxim que es mesura és de $\sim 0.5\mu\text{A}$, el que encara proporciona un rang dinàmic de 6 ordres de magnitud. Això és consistent amb el fet de considerar que la resistència de la punta ha augmentat amb el desgast (probablement per la pèrdua progressiva del recobriment conductor) fins a un valor d'uns $5 \times 10^8 \Omega$, que limita el corrent màxim que pot circular per la punta.

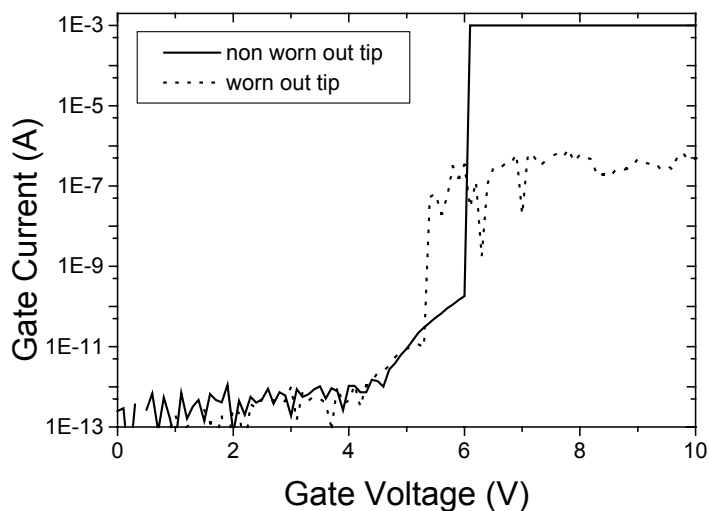


Fig. 2.25. Característiques I-V mesurades amb ECAFM amb límit de corrent de 1mA, amb una punta nova (línia contínua) i amb una punta desgastada (línia discontinua). Amb una punta desgastada es mesura menys corrent que amb una nova, tot i així els corrents són superiors als que es poden mesurar amb una punta per la que ha circulat més de 1mA.

Amb la finalitat de comprovar si la mesura de corbes I-V amb límit de corrent de 1mA pot causar un canvi en la resolució elèctrica (la mínima àrea que es pot distingir elèctricament dels punts del voltant) de l'ECAFM, es van adquirir mapes elèctrics amb la configuració CAFM (perquè permet una adquisició més ràpida) abans i després de realitzar diverses rampes de voltatge (amb el límit de corrent de 1mA) amb la configuració ECAFM. Per l'adquisició dels mapes de corrent s'ha utilitzat el voltatge mínim suficient per mesurar corrent per sobre del nivell de soroll. L'àrea de les zones amb corrent per sobre del nivell del soroll (espots febles) s'ha utilitzat per comparar l'àrea de contacte efectiva entre punta i mostra (i per tant la resolució elèctrica) abans i després de les corbes I-V obtingudes amb l'ECAFM. En tots dos casos s'ha obtingut valors de 500nm^2 aproximadament. Per tant quan es fixa un límit de corrent $\leq 1\text{mA}$, i es configuren els paràmetres d'escombrat de forma que es minimitzi el desgast de la punta (força punta - mostra i velocitat d'escombrat relativament baixes), les mesures de les característiques I-V són repetitives i l'àrea efectiva de contacte entre punta i mostra no empitjora.

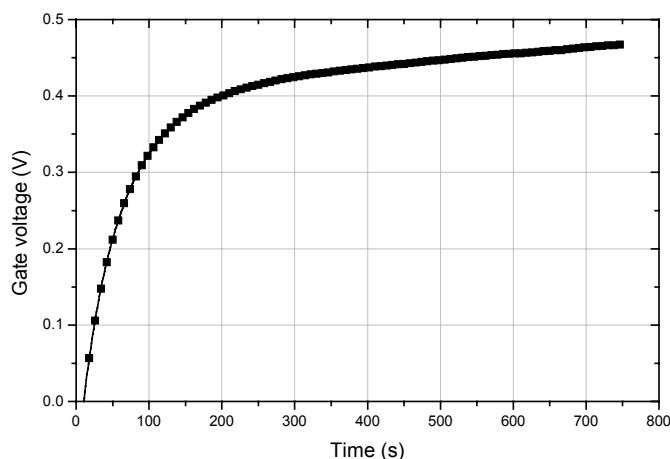


Fig. 2.26. Característica Voltatge - temps mesurada en un capa de 30nm de SiO₂ quan es força una intensitat de 100fA

Paral·lelament al major rang de mesura de corrent que ofereix l'ECAFM respecte als CAFM convencionals, l'altra gran avantatge de l'ECAFM és la flexibilitat per realitzar tests elèctrics que no es poden realitzar amb CAFM. Des del punt de vista de les mesures puntuals, un CAFM només permet mesurar el corrent que travessa la mostra quan s'aplica una rampa de voltatge, i en alguns casos concrets la mesura de corrent en funció del temps. En canvi, l'ECAFM permet a més a més la mesura de voltatge quan s'aplica una rampa de corrent, la mesura de voltatge en funció del temps i la generació d'una seqüència de test qualsevol a partir dels tests mencionats. A tall d'exemple, la figura 2.26. ofereix una mostra d'un d'aquests tests que a escala nanomètrica només pot realitzar-se amb ECAFM. En aquesta figura es representa una característica de voltatge en funció del temps (cortesia del Dr. Marc Porti) mesurada sobre una mostra amb capa de SiO₂ de 30nm de gruix (i amb la resta de paràmetres iguals que les mostres descrites en la secció 2.4.1), quan es força una intensitat de 100fA.

2.4.3. Mapes elèctrics

De la mateixa manera que per la realització de mesures puntuals, per a l'adquisició de mapes elèctrics es combina la utilització del software de control de Nanotec Electrònica i el MSE. En primer lloc, s'utilitza el software de Nanotec Electrònica per seleccionar la zona de la mostra que es mesurarà i per configurar paràmetres d'escombrat com tamany de la imatge, velocitat de l'adquisició o nombre de files i columnes de la imatge. Llavors, de forma simultània a l'adquisició del mapa topogràfic, el MSE indica a l'APS que apliqui un voltatge constant i mesuri el corrent que flueix a través de la mostra, o forçï un corrent constant i mesuri la caiguda de tensió.

Per comprendre com es sincronitza l'operació de l'AFM i de l'APS resulta útil descriure com s'adquireix un mapa topogràfic amb AFM. Un mapa topogràfic està compost d'una matriu de n punts, on n és: nombre de columnes \times nombre de fileres del mapa. Un mapa té una direcció d'escombrat ràpida (la direcció en que s'adquireixen les línies) i una direcció d'escombrat lenta (la perpendicular a la ràpida). Monitoritzant el voltatge que s'aplica al tub piezoelèctric (V_P) en la direcció d'escombrat ràpida es pot detectar quan comença i quan acaba l'adquisició d'una línia de topografia. V_P té una forma

d'ona triangular centrada a 0V, amb una amplitud depenent del tamany de la imatge. Al principi d'una línia (Fig 2.27 posició A), V_p assoleix el seu valor màxim, al centre de la línia V_p passa per 0V i al final de la línia (Fig. 2.27 posició B) V_p assoleix el seu valor mínim. Mentre la punta es mou de la posició A a la B, adquireix la topografia el nombre de vegades (nombre de columnes) seleccionat. Llavors, la punta torna al començament de la línia (V_p és màxim un altra vegada), i la punta es mou un pas en la direcció d'escombrat lenta (Fig. 2.27 posició C). Aquest procés es repeteix el nombre de vegades seleccionat (nombre de fileres) per obtenir un mapa de corrent.

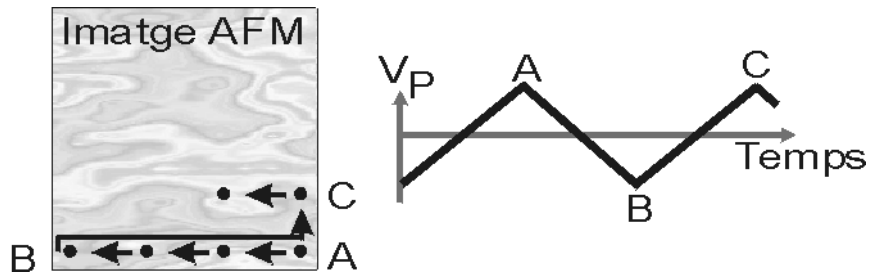


Fig. 2.27. Esquema del procés d'adquisició d'un mapa topogràfic. Els mapes estan formats per una matriu de dades. V_p és una forma d'ona triangular centrada a 0V, amb una amplitud que depèn del tamany de la imatge. Al principi d'una línia (posició A), V_p assoleix el seu valor màxim, al centre de la línia V_p passa per 0V i al final de la línia (posició B) V_p assoleix el seu valor mínim.

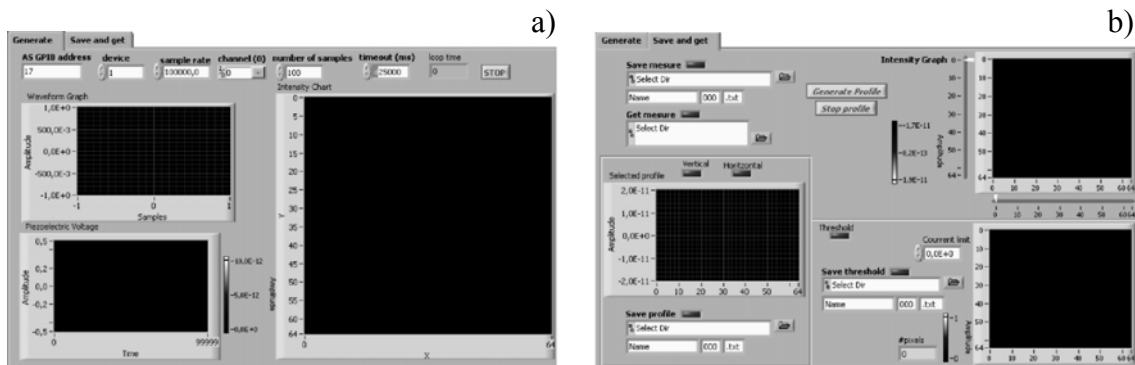


Fig. 2.28. Menús d'adquisició i visualització (a) i processat (b) de mapes elèctrics. El menú d'adquisició permet a l'usuari visualitzar l'última línia adquirida (en forma de perfil elèctric) i el conjunt de línies adquirides (en forma de mapa). Aquest software també proporciona eines elementals de processament dels mapes elèctrics, com l'extracció del perfil elèctric d'una determinada fila i/o columna, o binaritzar el mapa a partir d'un llindar elèctric fixat per l'usuari.

Per a la sincronització de l'adquisició de la topografia i de la variable elèctrica, el MSE utilitza V_p com a trigger: el MSE monitoritza V_p de manera que quan la punta està al començament d'una línia (Fig. 2.27 posició A) l'APS aplica una tensió (o corrent) constant de la mateixa duració que l'adquisició d'una línia de topografia i mesura el corrent (o tensió) per cada punt en que s'adquireix la topografia. Les dades elèctriques s'envien a l'ordinador de l'ECAFM i el procés es repeteix per la línia següent. El MSE representa en pantalla els valors de la magnitud elèctrica mesurada en un format de matriu per obtenir visualment un mapa de corrent o de voltatge, i es guarden les dades. El MSE utilitza dos menús per treballar amb mapes elèctrics. Un primer menú (Fig. 2.28.a) permet la configuració de l'adquisició i la visualització gràfica del perfil (elèctric) de la línia que s'està adquirint en aquell moment i del mapa elèctric que es va

generant a partir de les línies. El segon menú (Fig. 2.28.b) permet guardar i carregar els mapes adquirits i proporciona unes eines elementals de processat dels mapes elèctrics: extracció del perfil elèctric d'una determinada fila i/o columna i binaritzar el mapa a partir d'un llindar elèctric fixat per l'usuari (considera blancs tots els píxels corresponents a punts amb un valor de la magnitud elèctrica superior al llindar fixat, i negres la resta). Aquest procés és de gran utilitat per calcular l'àrea d'espots de ruptura.

La figura 2.29.a mostra un mapa de corrent de $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ adquirit amb ECAFM amb un voltatge de 3V i un límit de corrent de 1mA en una estructura MOS amb SiO_2 de 3.5nm on s'ha provocat la ruptura. A la regió central s'observa una zona molt més conductora (que correspon a la ruptura dielèctrica prèviament induïda amb la punta de l'ECAFM mitjançant un estrès constant). La figura 2.29.b presenta un perfil de corrent a través de l'espot de ruptura. A partir d'aquestes dues figures s'observa que el rang dinàmic de corrent és, com per les característiques I-V, de 1pA fins a 1mA. El mapa de la figura 2.29.a està compost de 64 fileres \times 64 columnes, per tant, cada punt està separat uns 30nm dels punts més propers en les direccions X i Y. La resolució es pot millorar reduint el tamany del mapa o augmentant el nombre de fileres i columnes.

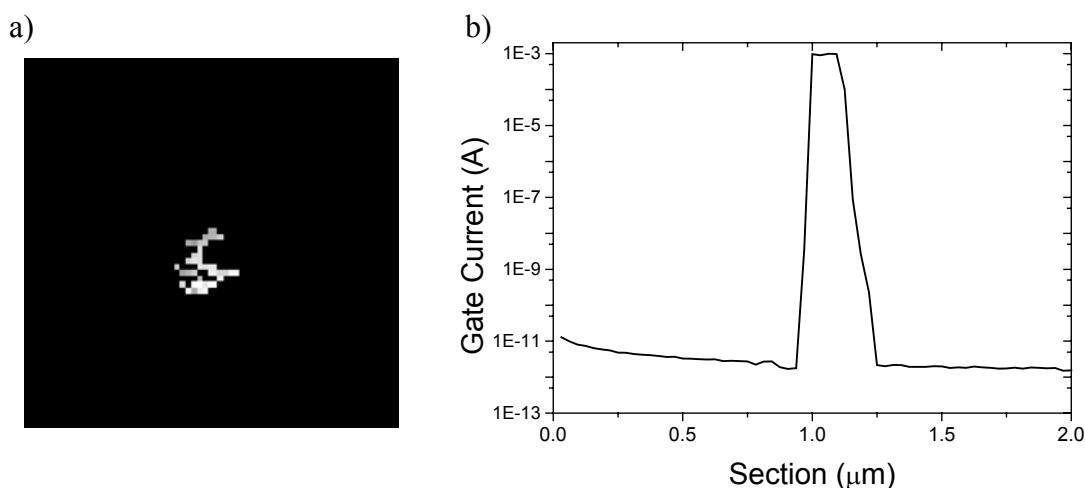


Fig. 2.29. a) Mapa de corrent adquirit amb ECAFM, en una estructura MOS amb SiO_2 de 3.5nm, d'una zona on s'ha produït ruptura dielèctrica. El tamany de la imatge és de $2 \times 2 \mu\text{m}^2$. El rang de corrent és de 1pA (negre) fins a 1mA (blanc). La tensió aplicada és de 3V. b) Perfil de corrent extret d'una de les columnes del mapa que creua l'espot trencat.

Per obtenir aquest mapa el temps d'adquisició de cada línia ha estat de 10s. La meitat d'aquest temps s'utilitza per mesurar el corrent (simultàniament a l'adquisició d'una línia de topografia). La resta del temps (mentre la punta es mou fins al començament de la següent línia) s'utilitza per enviar les dades des de l'APS a l'ordinador de l'ECAFM i per sincronitzar l'adquisició de la línia següent. Es pot aconseguir una velocitat d'adquisició lleugerament més alta, per que per mesurar corrents en el rang dels pA l'APS necessita un interval de temps de 50ms i per tant, el temps mínim per mesurar una línia amb la resolució seleccionada és de 6.4s ($50\text{ms} \times 64 \text{ mostres} = 3.2\text{s}$, més 3.2s per tornar al començament de la línia següent). Un CAFM comercial permet velocitats d'adquisició superiors, però a la pràctica, per un tamany de mapa com el de la figura 2.29.a s'ha d'utilitzar un temps d'escombrat de 2s (o més) per línia per evitar corrents de desplaçament que poden emmascarar el corrent túnel.

Per verificar si els mapes elèctrics adquirits amb ECAFM són consistents (des del punt de vista de les dimensions laterals dels motius representats) amb els adquirits amb un CAFM estàndard, s'ha mesurat l'àrea d'espots de ruptura amb els dos instruments (Fig. 2.30, cal fer notar que les imatges no corresponen al mateix espot). L'àrea elèctrica d'un espot de ruptura es defineix com l'àrea de la regió del mapa amb un corrent superior a un determinat llindar. En aquest cas s'ha triat com llindar el corrent màxim que permet mesurar el CAFM (300pA). Per les dues configuracions experimentals s'han trobat àrees de ruptura del mateix ordre ($\sim 10^5 \text{nm}^2$), confirmant que les mesures realitzades amb CAFM són reproduïbles amb l'ECAFM.

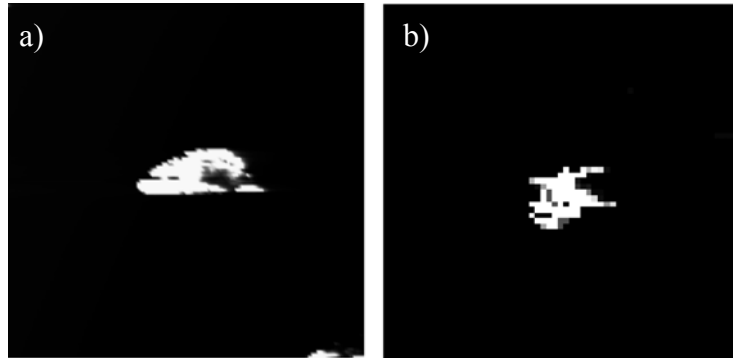


Fig. 2.30. Comparació de àrea de l'espot de ruptura a partir d'imatges adquirides amb CAFM (a) i ECAFM (b). Pels dos mapes el tamany és de $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ i el rang de representació de corrent és de 1pA (negre) fins a 300pA (blanc). Les imatges no corresponen al mateix espot, però per ambdues tècniques s'han triat imatges corresponents a espots de ruptura d'àrea propera al valor mig del conjunt d'espots estudiats.

2.5. Resum

En aquest capítol s'ha presentat una introducció a les microscopies de sonda propera (SPM) com tècniques de caracterització a escala nanomètrica de dielèctrics de porta ultra prim. Sota el nom genèric d'SPM s'agrupa tot un conjunt de tècniques en que una punta de dimensions nanomètriques escombra una superfície permetent adquirir la topografia de la mostra i, depenent de la tècnica, adquirir també una altra magnitud simultàniament. D'entre totes les SPM, ens hem centrat fonamentalment en l'AFM, donat que és la tècnica utilitzada en aquest treball.

S'ha presentat una visió introductòria a l'AFM. Aquesta tècnica té un gran potencial com eina nanolitogràfica, ja que permet créixer patrons d'òxid de dimensions de l'ordre dels 10nm. El potencial tecnològic de l'oxidació amb AFM no recau només en el fet de que permet generar estructures nanomètriques, si no també en que permet créixer òxid sobre un ampli ventall de materials com semiconductors, metalls o fotoresines. A banda de la vessant de nanofabricació, l'AFM ha esdevingut una eina molt potent per a la caracterització a escala nanomètrica gràcies principalment a la gran resolució que ofereix (permet adquirir la topografia d'una mostra amb resolució lateral de l'ordre dels pocs nm i resolució vertical millor que 1nm), al fet de poder operar en condicions ambient i que pot caracteritzar gairebé qualsevol tipus de mostra (aïllants, conductors, sòlids, líquids...). Des del punt de vista concret de la caracterització topogràfica dels

dielèctrics de porta, l'AFM s'ha utilitzat bàsicament per estudiar la morfologia de les seves superfícies e interfícies.

La segona part del capítol s'ha dedicat al CAFM que, a banda de les prestacions pròpies d'un AFM, permet caracteritzar elèctricament la mostra sota estudi. El CAFM ha resultat especialment apropiat per a l'anàlisi de dielèctrics de porta amb gruixos de pocs nm revelant fenòmens que quedaven ocults utilitzant tècniques estàndard. El CAFM ha revelat que les propietats elèctriques del SiO₂ no són homogènies a escala nanomètrica, ha permès determinar el mecanisme de conducció a escala nanomètrica a través de dielèctrics de porta ultra primos i determinar el seu gruix de forma molt acurada. Aquesta tècnica s'ha utilitzat també per comparar el comportament elèctric de diferents materials dielèctrics i diferents processos/tècniques de creixement. El CAFM, a més a més, ha demostrat ser una eina molt eficaç per a l'estudi de la degradació i ruptura dielèctrica dels dielèctrics de porta. A partir d'experiments realitzats amb CAFM s'ha estudiat l'evolució dels espots durant el procés de degradació dielèctrica. Així mateix, els tests realitzats han mostrat com evolucionen els modes de conducció en els règims de pre i post ruptura i com afecten diferents paràmetres elèctrics a la ruptura dielèctrica. Cal remarcar que molta d'aquesta fenomenologia no es pot apreciar (o com a mínim no tant clarament) a partir de mesures macroscòpiques.

Malauradament, per a la realització de determinats tests elèctrics sobre els dielèctrics de porta les prestacions dels CAFM comercials resulten insuficients. És per això que en l'última part del capítol s'ha presentat el prototipus de Microscopi de Forces Atòmiques amb Prestacions Elèctriques Millorades (ECAFM, de l'anglès Enhanced CAFM), que ha co-desenvolupat l'autor i que fa possible la realització de test elèctrics que a escala nanomètrica no poden ser realitzats amb cap altre instrument. El problema principal que presenten els CAFM comercials a l'hora d'estudiar elèctricament els dielèctrics de porta ultra primos és el reduït rang dinàmic de mesura de corrent (uns 3 ordres de magnitud), i la poca flexibilitat que ofereix per la definició de test elèctrics. L'ECAFM soluciona aquestes limitacions substituint els mitjans de generació de voltatge i mesura de corrent del CAFM per unitats SMU d'un analitzador de paràmetres de semiconductors (APS). Amb aquesta configuració, a més a més de poder adquirir característiques I-V i mapes de corrent amb un rang dinàmic molt superior al d'un CAFM convencional, es poden mesurar característiques I-t, V-t, V-I i mapes de voltatge (V(x,y)). Encara que gran part de l'operació del prototipus d'ECAFM es pot realitzar des del panell de l'APS directament, s'ha implementat un sistema de mesura més amigable, fent servir l'ordinador de control per gestionar l'operació de l'APS. Per gestionar l'operació de l'ECAFM ha calgut desenvolupar una aplicació de control específica.

Per avaluar les prestacions del nou instrument es van realitzar tests en un conjunt de capacitats CMOS amb una capa de SiO₂ de 3.5nm de gruix com dielèctric de porta. Els resultats mostren que l'ECAFM té un rang dinàmic de mesura de corrent des de pA fins a mA, amb una flexibilitat molt més alta que un CAFM convencional per a la definició de tests. S'ha parat especial atenció a la determinació dels factors que poden afectar a la vida útil de la punta de l'ECAFM. Aquests experiments han permès determinar que per maximitzar la durabilitat de la punta (i per tant, la repetibilitat de les mesures) cal fixar un límit de corrent (≤ 1 mA) i utilitzar paràmetres d'escombrat que minimitzin el desgast mecànic de la punta, com pot ser una velocitat d'escombrat relativament baixa.