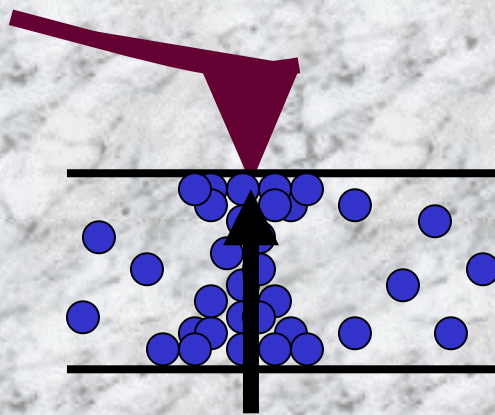




Universitat Autònoma de Barcelona

Caracterització a escala nanomètrica de la degradació i ruptura dielèctrica del SiO_2 en dispositius MOS mitjançant C-AFM.



Marc Porti i Pujal

Febrer 2003



Universitat Autònoma de Barcelona

Caracterització a escala nanomètrica de la degradació i ruptura dielèctrica del SiO_2 en dispositius MOS mitjançant C-AFM.

**Memòria presentada per
Marc Porti i Pujal
per a optar al grau de
Doctor en Enginyeria Electrònica**

Bellaterra, febrer 2003

El Dr. Xavier Aymerich Humet i la Dra. Montserrat Nafria Maqueda, Catedràtic i Professora Titular d'Electrònica, respectivament, del Departament d'Enginyeria Electrònica i de Materials de la Universitat Autònoma de Barcelona,

CERTIFIQUEN

que el treball *Caracterització a escala nanomètrica de la degradació i ruptura dielèctrica del SiO₂ en dispositius MOS mitjançant C-AFM* que presenta Marc Porti i Pujal per a optar al grau de Doctor en Enginyeria Electrònica, ha estat realitzat sota la seva direcció.

Bellaterra, febrer de 2003.

Dr. Xavier Aymerich Humet

Dra. Montserrat Nafria Maqueda

Als meus pares i a la Montse.

Agraïments.

Amb aquestes línies voldria expressar el meu sincer agraïment:

En primer lloc als meus co-directors de tesi, en Xavier Aymerich i na Montserrat Nafria, per haver-me donat l'oportunitat de realitzar-la i haver-me ofert en tot moment el seu recolzament i dedicació, així com per la supervisió de tot el treball realitzat i per tot el que he pogut aprendre.

A tots els membres de *Infineon Technologies*, Munich, en especial a l'Alex Olbrich, Bernd Ebersberger, Rainer Weiland i Birgit Simmnacher, per haver-me permès la realització de dues estades de tres mesos en els seus laboratoris durant els anys 1999 i 2001 i per tota la formació rebuda.

A Marie-Christine Blüm, Sasha Sadewasser i Salvatore Meli per haver col.laborat en la realització d'algunes de les mesures experimentals presentades en aquesta tesi.

A tots els membres del meu grup de recerca dins del Departament d'Enginyeria Electrònica, destacant al Xavier Blasco i a la Rosana Rodríguez, a qui dec el seu recolzament i el seu ajut desinteressat a l'hora de resoldre els problemes del dia a dia.

Al Departament d'Enginyeria Electrònica en general, i a tots i cadascun dels membres en particular, per la col.laboració mostrada en tot moment.

I, finalment, voldria agrair molt especialment als meus pares i a la Montse per la paciència i el recolzament que m'han donat en tot moment. Gràcies per animar-me i donar-me sempre el vostre suport incondicional.

A tots ells, gràcies.

Índex.

Relació d'articles inclosos en aquesta tesi.

Presentació	1
1. Introducció: Tècniques de caracterització elèctrica del SiO₂.....	3
1.1. La ruptura dielèctrica del SiO ₂	4
1.2. Tècniques de caracterització.....	4
1.3. Modes de fallada en òxids primers (<6nm).....	7
1.4. Els estressos limitats en corrent: una aproximació més real a les condicions d'operació.....	9
1.5. Tècniques de caracterització a escala nanomètrica: aplicació de les Microscopies de Sonda Local a la caracterització elèctrica del SiO ₂	11
2. Microscopia de Forces Atòmiques i tècniques afins: el C-AFM.....	17
2.1. Principi de funcionament d'un AFM.....	18
2.2. El C-AFM. Mesura del corrent elèctric.....	20
2.3. Especificacions dels C-AFMs utilitzats.....	22
2.4. La punta: sonda del microscopi de forces atòmiques.....	23
2.4.1. Requisits d'una punta per a la realització de mesures C-AFM....	23
2.4.2. Les puntes utilitzades: puntes de diamant, Co/Cr i Pt/Ir.....	26
2.5. El KPFM, una tècnica afí a l'AFM.....	28
3. La conducció de pre-ruptura del SiO₂.....	31
3.1. Les mostres.....	32
3.2. Resolució elèctrica del C-AFM i àrea de degradació.....	33
3.3. La conductivitat elèctrica d'un spot: el gruix elèctric.....	35
3.4. Conducció de pre-ruptura.....	38
3.4.1. Seqüències de rampes de tensió.....	38
3.4.2. Estressos a tensió constant.....	43

4. La ruptura dielèctrica del SiO₂: Efectes del límit de corrent.....	47
4.1. Ruptura del SiO ₂ induïda amb C-AFM.....	48
4.1.1. Conductivitat de post-ruptura: Efecte del límit de corrent.....	48
4.1.2. Anàlisi de post-ruptura mitjançant imatges C-AFM.....	51
4.1.2.i. Imatges topogràfiques: càrrega induïda per la ruptura dielèctrica.....	52
4.1.2.ii Imatges de corrent: propagació elèctrica de la ruptura.....	56
4.1.2.iii Interpretació qualitativa de l'efecte del límit de corrent en el procés de ruptura.....	60
4.1.3. La ruptura progressiva.....	61
4.2. Caracterització d'spots de ruptura induïts amb tests macroscòpics.....	65
Conclusions.....	69
Referències.....	73
Annex. Acrònims utilitzats en aquesta tesi.	
Articles (A-K).	

Relació d'articles inclosos en aquesta tesi.

Article A: Feasibility of the electrical characterization of single SiO₂ breakdown spots using C-AFM.

M. Porti, R. Rodríguez, M. Nafria, X. Aymerich, A. Olbrich i B. Ebersberger.
Journal of non-crystalline solids, Vol. 280/1-3, pp. 138-142 (2001).

Article B: Pre- and post-breakdown switching behaviour in ultrathin SiO₂ layers detected by C-AFM.

M. Porti, X. Blasco, M. Nafria, X. Aymerich, A. Olbrich i B. Ebersberger.
Nanotechnology, Vol. 12, pp. 164-167 (2001).

Article C: Nanometer-scale electrical characterization of stressed ultrathin SiO₂ films using conducting atomic force microscopy.

M. Porti, M. Nafria, X. Aymerich, A. Olbrich i B. Ebersberger.
Appl. Phys. Lett., Vol. 78/26, pp. 4181-4183 (2001).

Article D: Propagation of the SiO₂ breakdown event on MOS structures observed with conductive atomic force microscopy.

M. Porti, M. Nafria, X. Aymerich, A. Olbrich i B. Ebersberger.
Microelectronic Engineering, Vol. 59/1-4, pp. 265-269 (2001).

Article E: Electrical characterization of stressed and broken down SiO₂ films at a nanometer scale using a conductive atomic force microscope.

M. Porti, M. Nafria, X. Aymerich, A. Olbrich i B. Ebersberger.
Journal of Applied Physics, Vol. 91(4), pp. 2071-2079 (2002).

Article F: Post-breakdown electrical characterization of ultrathin SiO₂ films with conductive atomic force microscopy.

M. Porti, M. Nafria, X. Aymerich, A. Olbrich i B. Ebersberger.
Nanotechnology, Vol. 13, pp. 388-391 (2002).

Article G: Breakdown-induced negative charge in ultrathin SiO₂ films measured by atomic force microscopy.

M. Porti, M. Nafria, M. C. Blüm, X. Aymerich i S. Sadewasser.
Appl. Phys. Lett., Vol. 81/19, pp. 3615-3617 (2002).

Article H: Imaging breakdown spots in SiO₂ films and MOS devices with a Conductive Atomic Force Microscope.

M. Porti, M. C. Blüm, M. Nafria i X. Aymerich.
Acceptat per a publicació a IEEE Transactions on Device and Materials Reliability.

Article I: Atomic Force Microscope topographical artifacts after the dielectric breakdown of ultrathin SiO₂ films.

M. Porti, M. Nafria, M. C. Blüm, X. Aymerich i S. Sadewasser.
Acceptat per a publicació a Surface Science.

Article J: Current limit stresses of SiO₂ gate oxides with Conductive Atomic Force Microscope.

M. Porti, M. Nafria i X. Aymerich.
Enviat per a la seva publicació a IEEE Transactions on Electron Devices.

Article K: Pre-breakdown noise in SiO₂ gate oxides observed with Conductive Atomic Force Microscope.

M. Porti, S. Meli, M. Nafria i X. Aymerich.
Enviat per a la seva publicació a Microelectronics Reliability.

Treballs més rellevants presentats a conferències

Local current fluctuations before and after breakdown of thin SiO₂ films observed with C-AFM.

M. Porti, X. Blasco, M. Nafría, X. Aymerich, A. Olbrich i B. Ebersberger.
11th Workshop on Dielectrics in Microelectronics, Munich, p. 58, 2000.

Nanoscale observations of the electrical conduction of ultrathin SiO₂ films with Conducting Atomic Force Microscopy.

M. Porti, M. Nafría, X. Aymerich, A. Olbrich i B. Ebersberger.
Proc. IEEE International Reliability Physics Symposium, Orlando, p. 156, 2001.

Propagation of the SiO₂ breakdown event on MOS structures observed with Conductive Atomic Force Microscopy.

M. Porti, M. Nafría, X. Aymerich, A. Olbrich i B. Ebersberger.
Proc. Insulating Films on Semiconductors, Udine, p. 81, 2001.

Post-breakdown electrical characterization of ultrathin SiO₂ films with Conductive atomic Force Microscopy.

M. Porti, M. Nafría, X. Aymerich, A. Olbrich i B. Ebersberger.
Trends in Nanotechnology, Segovia, p. 161, 2001.

Imaging breakdown spots in SiO₂ films and MOS devices with a Conductive Atomic Force Microscope.

M. Porti, M. C. Blüm, M. Nafría i X. Aymerich.
Proc. IEEE International Reliability Physics Symposium, Dallas, p. 380, 2002.

Pre-breakdown noise in SiO₂ gate oxides observed with Conductive Atomic Force Microscope.

M. Porti, S. Meli, M. Nafría i X. Aymerich.
12th Workshop on Dielectrics in Microelectronics, Grenoble, 2002.

Presentació.

L'extraordinari progrés que la tecnologia microelectrònica ha experimentat en els darrers anys ha permès una reducció de les dimensions dels dispositius microelectrònics, que s'ha traduït en una velocitat de resposta superior dels circuits integrats i en un abaratiment dels costos de producció. Aquest continu escalat en les dimensions dels circuits integrats, en el cas de les capes primes de SiO_2 (dielèctric més utilitzat en la tecnologia de Si), ha donat lloc a una reducció constant del seu gruix fins al punt que els òxids que avui dia tenen interès estan situats en el rang dels pocs nanòmetres, molt a prop dels límits que estableixen les lleis físiques. En aquest rang de dimensions però, apareixen importants corrents de fuites (d'origen túnel) i problemes de fiabilitat. Per a superar els problemes que planteja un corrent de fuites excessiu, s'està buscant un aïllant d'alta constant dielèctrica per a substituir el SiO_2 amb la finalitat d'aconseguir el que s'anomena escalat equivalent: en comptes de reduir les dimensions de l'òxid, s'augmenta la constant dielèctrica del material aïllant per tal d'aconseguir prestacions similars amb òxids més gruixuts i, per tant, amb un corrent de fuites inferior. Tot i que els resultats obtinguts amb aquests materials són prometedors, la substitució del SiO_2 sembla encara, des d'un punt de vista tecnològic, massa llunyana. D'altra banda, en quant a la fiabilitat de l'òxid de porta, la contínua reducció del gruix de les capes de SiO_2 sense el corresponent escalat en tensions ha donat lloc a l'aparició de mecanismes de fallada (com ara la ruptura forta, HBD, el corrent de fuites induït per l'estrés, SILC, o la ruptura suau, SBD) que en limiten la seva fiabilitat, fins al punt que l'escalat del SiO_2 s'ha convertit en un dels factors més importants que poden frenar el futur desenvolupament de les tecnologies microelectròniques. Això ha fet que l'estudi d'aquests mecanismes adquireixi una importància fonamental dins del camp de la fiabilitat de les tecnologies CMOS. D'altra banda, l'aparició de mecanismes de fallada menys severes que la ruptura forta ha plantejat nous

interrogants a l'hora d'establir la relació que hi ha entre la ruptura (BD) de l'òxid i la fallada del dispositiu o circuit del qual en forma part. Recentment, s'ha demostrat que alguns circuits continuen essent funcionals fins i tot després que l'òxid de porta d'alguns dels dispositius que l'integren hagi experimentat un fenomen SBD o HBD. A fi de determinar el grau de sensibilitat dels circuits a la ruptura dielèctrica, cal estudiar amb més profunditat la conducció a través de l'spot trencat i els factors que en controlen la seva severitat. En aquest sentit, els tests tradicionals no representen de manera gaire acurada les condicions reals d'estrés a les que els dispositius MOS es veuen sotmesos en un circuit. Treballs recents indiquen, en canvi, que l'estrés limitat en corrent (CLS), entre d'altres, sí permet simular millor les condicions reals d'operació dels dispositius microelectrònics.

Tradicionalment, la ruptura dielèctrica s'ha analitzat sotmetent l'òxid de porta d'estructures de test (transistors o capacitats MOS, d'àrees típiques de 10^{-8} - 10^{-3} cm²) a estressos elèctrics (generalment estressos a corrent constant, CCS, i a tensió constant, CVS) fins a provocar-ne la seva fallada. Els resultats obtinguts apunten que la ruptura dielèctrica és (i), un fenomen extremadament local que es desencadena en àrees de l'ordre de 10^{-13} - 10^{-12} cm² i (ii), la conseqüència d'un procés de degradació de l'estructura de l'òxid, que s'ha associat a la generació de trampes durant l'estrés elèctric. A la vista d'aquests resultats, el principal inconvenient de les tècniques de caracterització elèctrica utilitzades fins ara és que no reflecteixen les variacions de les propietats elèctriques que poden produir-se a escala nanomètrica, doncs avaluen estructures de test d'àrees molt superiors a aquelles en les que es produeix la degradació i la ruptura. Aquestes variacions però, són les que permetrien analitzar més acuradament la fiabilitat de l'òxid de porta. Per aquest motiu, si es vol estudiar la dinàmica de degradació i els mecanismes de ruptura amb prou detall, cal dur a terme una caracterització elèctrica de les capes primes de SiO₂ a escala nanomètrica, que és l'escala on tenen lloc aquests fenòmens. Les tècniques que recentment s'han començat a utilitzar amb aquesta finalitat són les microscopies de sonda local (SPM, de l'anglès *Scanning Probe Microscopy*). D'entre aquestes, destaca el C-AFM (*Conductive Atomic Force Microscope*), doncs ofereix la possibilitat de treballar en condicions ambient i amb una alta resolució lateral. A més, permet obtenir informació topogràfica i elèctrica simultàniament. Fins ara, pocs han estat els grups de recerca que han utilitzat els SPMs (i menys el C-AFM) amb la finalitat de caracteritzar els mecanismes de degradació i la ruptura del SiO₂. En aquesta tesi, en canvi, aquesta tècnica es presentarà i s'utilitzarà com una eina molt prometedora a l'hora d'avaluar la fiabilitat d'òxids primis a escala nanomètrica (i que, d'ara endavant, també anomenarem escala local o microscòpica).

Per tant, aquesta tesi pretén ser una aportació en el camp de la fiabilitat dels dispositius microelectrònics i, més concretament, de l'òxid de porta (SiO₂) de les estructures MOS. Després d'un primer capítol on s'analitzarà amb més detall la problemàtica associada al continu escalat de les seves dimensions verticals, en el capítol 2 es descriurà la tècnica utilitzada: el C-AFM. Finalment, en els dos darrers capítols, es presentaran els resultats. En el capítol 3 s'avaluarà la fenomenologia observada abans de la ruptura dielèctrica (pre-ruptura) mentre que, en el capítol 4, s'analitzarà la ruptura pròpiament dita. Concretament, s'estudiarà la conducció de post-ruptura, els efectes de propagació i la càrrega induïda en l'àrea afectada per l'esdeveniment BD, fent especial èmfasi en la influència del límit de corrent en totes aquestes propietats. Per acabar, insistir un cop més que tots els experiments s'han realitzat amb C-AFM i, per tant, la degradació i la ruptura s'han analitzat a escala nanomètrica, que és l'escala on tenen lloc.

Capítol 1.

Introducció: Tècniques de caracterització elèctrica del SiO₂.

En aquest capítol es farà una breu introducció dels conceptes fonamentals i de les tècniques convencionals utilitzades per a la caracterització de les propietats elèctriques i dels mecanismes de degradació i ruptura de capes primes (<6nm) de SiO₂ d'estructures MOS (metall-òxid-semiconductor). Tot seguit s'exposaran les raons per les quals, degut al constant escalat de les seves dimensions verticals, aquestes tècniques presenten limitacions a l'hora de caracteritzar en detall l'òxid de porta d'aquestes estructures. D'aquí sorgirà la necessitat de realitzar un estudi a escala nanomètrica que requerirà la utilització de tècniques alternatives: les Microscopies de Sonda Local. S'exposaran quins han estat els resultats obtinguts fins ara en aquest camp i els avantatges que els SPMs (i en particular el C-AFM, que és la tècnica utilitzada en aquesta tesi) ofereixen respecte a les tècniques convencionals. Finalment, també es justificarà el motiu pel qual la ruptura dielèctrica, a més de caracteritzar-se a escala local, s'estudiarà mitjançant l'aplicació d'un test elèctric més proper a les condicions reals d'operació dels dispositius MOS: l'estrés limitat en corrent (CLS).

1.1. La ruptura dielèctrica del SiO₂.

La ruptura dielèctrica (BD, i més concretament el HBD, de l'anglès *Hard-Breakdown*) del SiO₂ està associada a la pèrdua sobtada de les seves propietats aïllants, passant d'un estat de baixa conductivitat a un altre de conductivitat molt més elevada. Molts han estat els estudis realitzats per a determinar els motius que porten a un òxid a perdre les seves propietats dielèctriques. Avui dia, és àmpliament acceptat per part de la comunitat científica que la ruptura és la conseqüència de la progressiva degradació de la seva estructura interna [DiMaria 93]. Per aquest motiu, l'estudi de la degradació ha merescut una especial atenció per a la major part dels grups de recerca que treballen en el camp de la fiabilitat del SiO₂. Tots aquests estudis semblen indicar que, d'una banda, aquesta degradació està associada a la generació de defectes durant l'estrés elèctric [DiMaria 93] i que, de l'altra, la ruptura dielèctrica és un fenomen extremadament local, doncs es desencadena en àrees molt més petites (~100nm²) [Suñé 90] que les àrees actives del dispositiu. Tot i que s'han proposat diferents models a fi d'explicar la generació de defectes quan l'òxid es sotmet a un estrés elèctric [Dumin 94, Schuegraf 94, DiMaria 97, Groeseneken 97, McPherson 98], els mecanismes físics responsables de la degradació encara no estan clars. Malgrat això, s'accepta àmpliament que la ruptura ve descrita pel model percolatiu, el qual considera que es desencadena com a conseqüència de la formació d'un camí conductor (path percolatiu) de trampes entre l'ànode i el càtode que, un cop format, permet el pas de corrent elèctric a través de l'òxid donant lloc a la pèrdua de les seves propietats aïllants [Degraeve 98].

1.2. Tècniques de caracterització.

L'estructura de test generalment utilitzada per a l'estudi dels mecanismes de fallada del SiO₂ és la capacitat MOS [Pierret 90], formada per una capa metàl·lica o porta (generalment Alumini o Polisilici), una capa de material aïllant (l'òxid de silici) i, finalment, un substrat semiconductor (dopat tipus N o P). Tot i que, clàssicament, degut a les propietats aïllants dels òxids, en aplicar una tensió entre la porta i el substrat d'una estructura MOS, el flux de corrent hauria d'ésser nul, quan el dielèctric és molt prim (de l'ordre dels nanòmetres), s'observa un flux de corrent associat a fenòmens quàntics: l'efecte túnel. Aquest corrent, un cop mesurat, s'utilitza per a determinar les propietats elèctriques de les capes primes de SiO₂. En funció de la tensió aplicada i del seu gruix (t_{ox}), la conducció pot ésser de dos tipus: túnel Fowler-Nordheim (Fig. 1.1.a) o túnel directe (Fig. 1.1.b). Quan els electrons travessen per efecte túnel una barrera triangular i passen del càtode a la banda de conducció de l'òxid, la conducció s'anomena túnel Fowler-Nordheim (FN) [Fowler 28, Simmons 63, Simmons 63b]. En canvi, en òxids molt prims, els electrons poden passar directament a la banda de conducció del Si (ànode) sense entrar a la banda de conducció del SiO₂. En aquest cas travessen una barrera trapezoïdal i la conducció rep el nom de túnel directe (TD) [Simmons 63].

Per a òxids amb $t_{ox} < 3\text{nm}$, el règim de conducció predominant és bàsicament el règim de túnel directe. En el nostre cas però, com que els òxids de porta que s'estudiaran tenen gruixos superiors als 3nm, la contribució de túnel directe es pot negligir, de manera que, d'ara endavant, si no s'indica el contrari, quan es faci referència al corrent túnel que flueix a través d'una estructura MOS, ens estarem referint únicament al corrent FN. En aquest mode de conducció, la intensitat de corrent varia exponencialment amb l'invers del camp elèctric segons l'expressió [Lenzinger 69, Cartier 97, Wienberg 82, Schenk 97] (en seccions posteriors s'analitzarà amb més detall):

$$I_{FN} = A_{eff} C_1 E_{ox}^2 \exp(-C_2 / E_{ox})$$

on I_{FN} és la intensitat FN; E_{ox} , el camp elèctric dins de l'òxid (degut a la diferència de potencial aplicada a l'estructura); A_{eff} , l'àrea efectiva d'emissió de corrent i C_1 i C_2 , constants que depenen del material i que es descriuran amb més detall al Capítol 3.

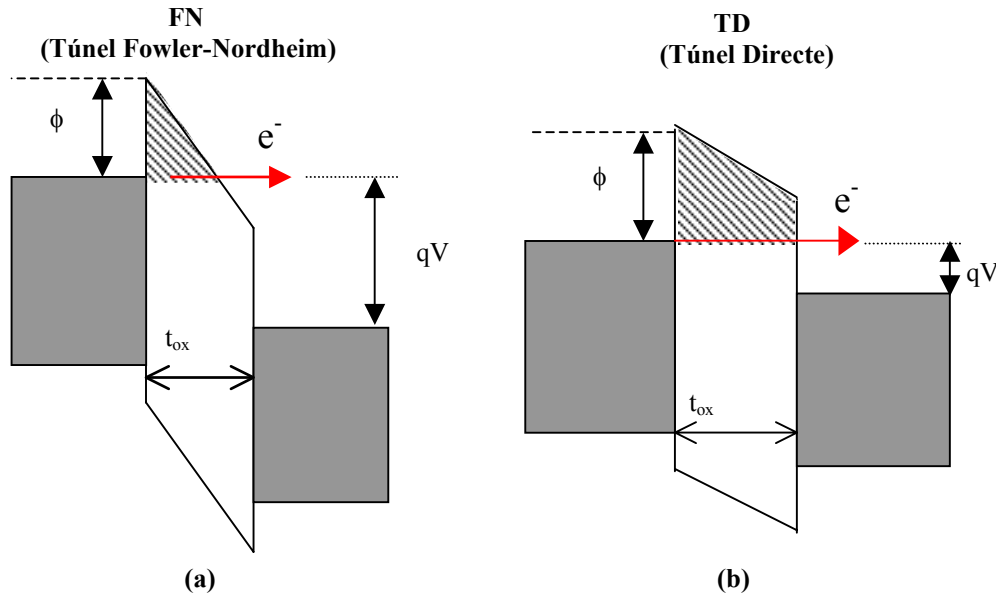


Fig. 1.1. Règims de conducció a través d'una barrera de potencial d'un òxid quan s'aplica una tensió tal que (a) $|q|V > \phi$ (Túnel Fowler-Nordheim) i (b) $|q|V < \phi$ (Túnel Directe). L'àrea ombrejada representa la barrera de potencial que veuen els electrons, triangular pel cas FN i trapezoïdal pel cas del TD. ϕ és l'alçada de barrera i $|q|$ la càrrega de l'electró.

La degradació i la ruptura s'estudien sotmetent l'òxid de porta a estressos elèctrics, que consisteixen en aplicar tensions o en injectar corrents (més alts que en les condicions habituals d'operació) a través de la capacitat MOS per tal de malmetre la seva estructura. Generalment, aquests tests s'apliquen a estructures de test macroscòpiques, és a dir, amb àrees de l'ordre de 10^{-8} a 10^{-3}cm^2 . Els tests convencionals habitualment utilitzats es poden classificar en dues categories: Estressos independents i dependents del temps.

Estressos independents del temps.

Consisteixen en aplicar rampes de tensió o de corrent fins que es desencadena la ruptura dielèctrica, que es produeix quan la magnitud d'estrés arriba al límit que l'òxid pot suportar. El més habitual és la rampa de tensió (RVS). En aquest tipus de test, s'aplica una tensió creixent (generalment de forma lineal) alhora que es mesura el corrent (i d'aquí s'obté la densitat de corrent, J) que flueix per l'estructura. El paràmetre de ruptura és la tensió o el camp de ruptura (V_{BD} o E_{BD}). A la Fig. 1.2 es mostra una característica J-V obtinguda en aplicar aquest test a una capacitat amb un òxid de 4.2nm de gruix. En la corba (a), entre 4 i $\sim 7.3 \text{V}$, la capacitat presenta el comportament Fowler-Nordheim (FN) típic per a aquest tipus d'estructures, mentre que a la tensió de $\sim 7.3 \text{V}$ s'observa un increment sobtat de la seva conductivitat, associat a la ruptura dielèctrica (HBD). En aquest instant, l'òxid perd les seves propietats aïllants, de manera que si es continuen aplicant RVS, s'obtenen característiques J-V com la que s'observa en la Fig. 1.2.b: per a qualsevol tensió, la intensitat que flueix i , per tant, la seva conductivitat, és molt més elevada que abans de la ruptura.

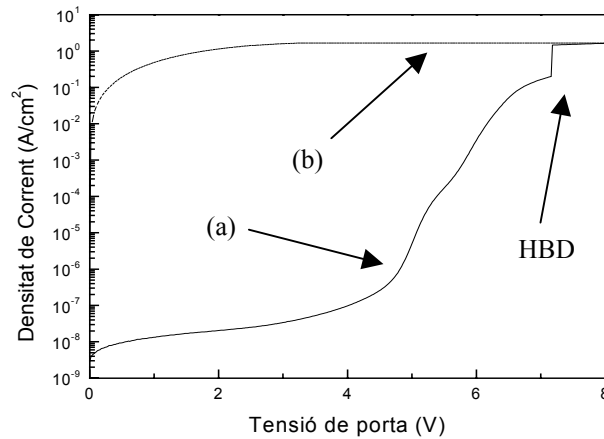


Fig. 1.2. Característica J-V obtinguda en aplicar una rampa de tensió a una capacitat MOS (a) quan encara conserva les propietats dielèctriques i (b) un cop les ha perdut després de la ruptura. El punt HBD de la corba (a) correspon a la tensió a la que la capacitat experimenta l'esdeveniment BD.

Estressos dependents del temps.

Aquest tipus de test elèctric consisteix en aplicar un corrent constant (CCS, *constant current stress*), o una tensió constant (CVS, *constant voltage stress*), fins a provocar la ruptura de l'òxid. En el primer cas, es registra la tensió en funció del temps mentre que, en el segon, es mesura l'evolució temporal del corrent. Una disminució brusca de la tensió o un augment sobtat del corrent en el primer o segon test indiquen, respectivament, la ruptura dielèctrica de l'òxid (HBD, veure Fig. 1.3). En aquest tipus de tests, els paràmetres utilitzats a fi d'avaluar la ruptura són el temps (temps de ruptura, t_{BD}) o la càrrega injectada (Q_{BD}) fins que l'òxid perd les propietats aïllants. A la Fig. 1.3.b es representa l'evolució típica del corrent obtinguda en aplicar un test a tensió constant a un òxid prou gruixut en el que l'atrapament de càrrega no és negligible (en seccions posteriors s'analitzarà què succeeix en òxids prou primos). Abans de produir-se la ruptura, poden distingir-se tres etapes. En la primera (I), s'observa un augment ràpid del corrent associat al desatrapament dels electrons situats a les trampes natives. La segona (II), en canvi, es caracteritza per un decreixement exponencial del corrent, atribuït a un atrapament dels electrons en trampes profundes de l'òxid [Nissan-Cohen 86]. Finalment, s'observa una tercera etapa (III) en la que el corrent disminueix lentament a causa de la generació i ocupació de noves trampes creades durant l'estrés [Nissan-Cohen 86]. Com que aquesta disminució es produeix de manera progressiva i, d'altra banda, és el resultat de l'ocupació de les trampes generades en tota l'estructura de l'òxid, s'acostuma a utilitzar com a paràmetre per a avaluar el grau de degradació induïda. Finalment, després d'uns 30s d'estrés, es desencadena la ruptura dielèctrica (HBD).

En aquest tipus de tests cal tenir en compte que, en condicions normals d'operació, el temps necessari per a que es produeixi la ruptura de l'òxid és molt alt, de manera que, per a poder realitzar aquests estudis en temps raonables, els estressos s'han d'accelerar (és a dir, els camps aplicats o els nivells de corrent injectats a les estructures han de ser molt més elevats). El problema consisteix en fer una correcta extrapolació d'aquestes condicions de camps o corrents alts a les condicions habituals d'operació [Alam 00, Hu 99, Wu 00]. A més, la necessitat creixent de trobar tests que simulin cada cop millor les condicions reals d'operació dels dispositius electrònics farà que apareguin nous tests de caracterització elèctrica, com ara els estressos dinàmics [Rodríguez 00b] o els estressos limitats en corrent (CLS) [Linder 00]. Aquest darrer s'analitzarà amb més detall a la secció 1.4, doncs és un dels tests utilitzats en aquesta tesi. D'ara endavant, sempre que es faci referència als tests convencionals de

caracterització elèctrica, ens estarem referint als tests tradicionalment utilitzats (CCS, CVS i RVS) per a avaluar els processos de degradació i de ruptura del l'òxid de porta a escala macroscòpica en estructures de dimensions microelectròniques (a diferència dels tests a escala microscòpica, realitzats amb C-AFM).

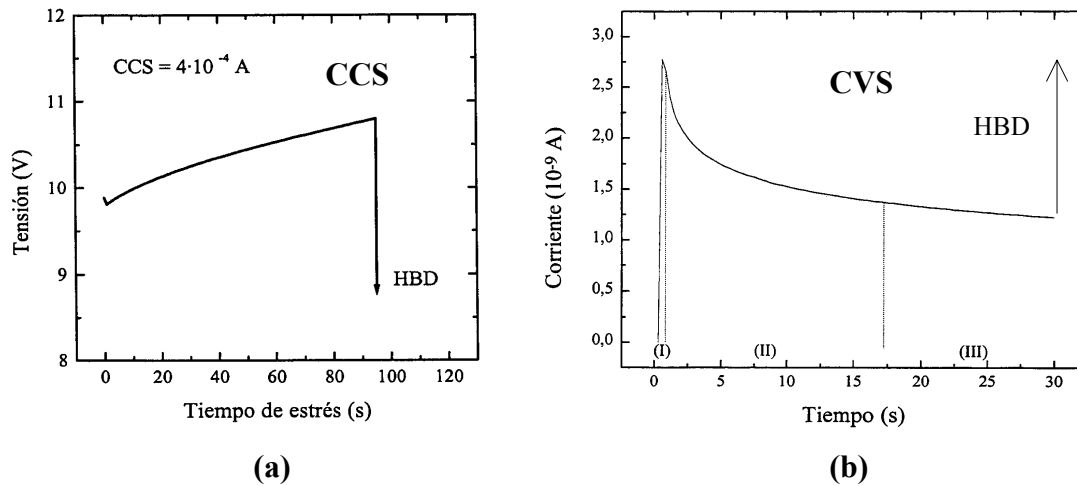


Fig. 1.3. Evolució temporal de (a) la tensió [Rodríguez 00] i (b) el corrent [Rodríguez 96] en un test a corrent i a tensió constant, respectivament. El punt HBD indica en quin instant es produeix la ruptura dielèctrica. Les diferents etapes indicades en el CVS corresponen a (I) un transitori inicial degut al desatrapament dels electrons de les trampes natives, (II) l'atrapament d'electrons a les trampes profundes de l'òxid i (III) l'atrapament d'electrons a les trampes creades durant l'estrés elèctric.

Estadística de la ruptura.

Per últim, val a dir que els valors de les variables de ruptura anteriorment esmentades (t_{BD} , Q_{BD} , E_{BD} i V_{BD}) poden mostrar una gran dispersió fins i tot en capacitats de les mateixes característiques i sota les mateixes condicions d'estrés. En conseqüència, si es vol realitzar una caracterització completa del fenomen de ruptura, cal dur a terme un estudi estadístic. S'ha demostrat que les distribucions estadístiques que millor ajusten els valors experimentals del camp elèctric i del temps de ruptura són les distribucions de valor extrem (la més utilitzada és la de Weibull [Wolters 86], que s'acostuma a representar en el que s'anomena el plot de Gumbel). Aquestes distribucions són aplicables quan es verifiquen les següents hipòtesis: (i) la ruptura es produeix en una àrea molt petita de l'òxid (spot) de dimensions molt reduïdes comparades amb l'àrea total de la capacitat, de manera que hi ha un nombre molt elevat d'spots on es pot produir aquest fenomen i (ii), la probabilitat que la ruptura es produeixi en un spot és independent del que succeeixi en els altres spots. L'spot que perd abans les seves propietats dielèctriques, és a dir, l'spot elèctricament més *feble*, és el que desencadena la ruptura dielèctrica del dispositiu [Wolters 86].

1.3. Modes de fallada en òxids prims (<6nm).

A mesura que l'òxid de porta ha reduït les seves dimensions verticals a fi de satisfer el continu escalat que ha exigut la tecnologia microelectrònica, han aparegut nous modes de fallada que no s'havien observat en òxids més gruixuts. Mentre que en òxids de gruix superior a 10nm, el mode de fallada predominant és el Hard-Breakdown, en òxids amb un gruix inferior poden aparèixer altres modes que fins aleshores eren desconeguts. Així, per exemple,

en òxids d'entre 3 i 7nm sotmesos a estressos elèctrics de camp elevat, apareix un corrent de fuites (que es registra a camps baixos) conegut amb el nom de SILC (*Stress Induced Leakage Current*) [Olivo 88, Jahan 91] (Fig. 1.4.b). Aquest corrent s'atribueix a fenòmens de túnel inelàstic assistit per trampes que, alhora, són una conseqüència de la degradació induïda en l'òxid durant l'estrés elèctric [Takagi 99, Wu 99]. Aquest corrent, a l'augmentar de manera contínua amb l'estrés (a diferència del fenomen HBD, que es manifesta mitjançant canvis sobtats de conductivitat) i, d'altra banda, ser el resultat del túnel inelàstic assistit per les trampes generades en tota l'àrea de l'estructura, s'acostuma a utilitzar com a paràmetre a fi d'avaluar la degradació induïda en l'òxid. El problema més important associat a la SILC és que es manifesta a baixos nivells de corrent i això dificulta la seva detecció experimental: mentre que per a òxids amb gruixos inferiors als 3nm queda emmascarada pel corrent túnel directe, en òxids amb un gruix superior a 7nm (i en règim FN), queda emmascarada per l'alt nivell de corrent d'aquest règim de conducció [Jahan 91].

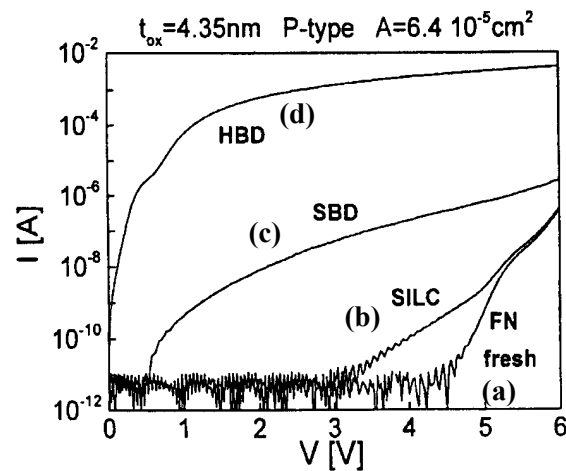


Fig. 1.4. Rampes de tensió aplicades a un òxid de 4.35nm on es pot observar el comportament FN corresponent a un òxid verge (a), i els diferents modes de fallada: (b), corrent de fuites (SILC), (c), Soft-Breakdown (SBD), i (d), Hard-Breakdown (HBD) [Miranda 99].

A més del fenomen HBD, en òxids amb un gruix inferior a 5nm, s'observa un nou mode de ruptura, el Soft-Breakdown (SBD) [Okada 94, Lee 94], que pot arribar a ser el mode de fallada predominant a mesura que t_{ox} disminueix. Tal com es pot veure a la Fig. 1.4.c, quan es desencadena un esdeveniment SBD, es produeix una pèrdua parcial de les propietats dielèctriques de l'òxid. Si l'estrés elèctric continua, generalment s'acaba desencadenant la ruptura forta (HBD) i l'òxid perd per complet la seva capacitat aïllant. Aquests dos modes de ruptura (SBD i HBD), a diferència de la SILC, es detecten en forma de canvis bruscos en el corrent o en la tensió, depenent del tipus d'estrés utilitzat. D'una banda, en un CCS, la ruptura SBD es manifesta en forma d'una disminució sobtada de la tensió de porta (Fig 1.5.a). Generalment, un cop s'ha desencadenat, apareixen una sèrie de fluctuacions que hom creu que són degudes a la inestabilitat dels estats ON/OFF dels diferents camins conductors creats durant l'etapa de degradació [Miranda 98]. D'altra banda, en un CVS, la ruptura suau es detecta quan es produeix un augment sobtat del corrent (Fig. 1.5.b). En ambdós casos però, els increments/decrements són inferiors als detectats en fenòmens HBD.

Finalment, afegir que treballs molt recents han demostrat que en òxids prou prims (<2.5nm), la ruptura dielèctrica pot no manifesta-se de manera sobtada (tal com s'observa en la ruptura forta i suau) sinó que, un cop creat el canal conductor, es produeix un increment progressiu del corrent fins a assolir els valors típics de post-ruptura [Monsieur 02, Linder 02].

Segons alguns autors però, aquest nou mode de fallada (anomenat ruptura progressiva, PBD, de l'anglès *Progressive Breakdown*), correspon al mateix fenomen que la ruptura suau i/o forta, però en escales de temps diferents. A mesura que el gruix de l'òxid disminueix, l'energia dissipada en el canal conductor en el moment de la seva formació és inferior [Monsieur 01] i la seva posterior degradació és més lenta fins al punt que la ruptura es manifesta de manera progressiva. Si això fos així, tant la ruptura suau/força com la progressiva, correspondrien a diferents manifestacions d'un mateix fenomen.

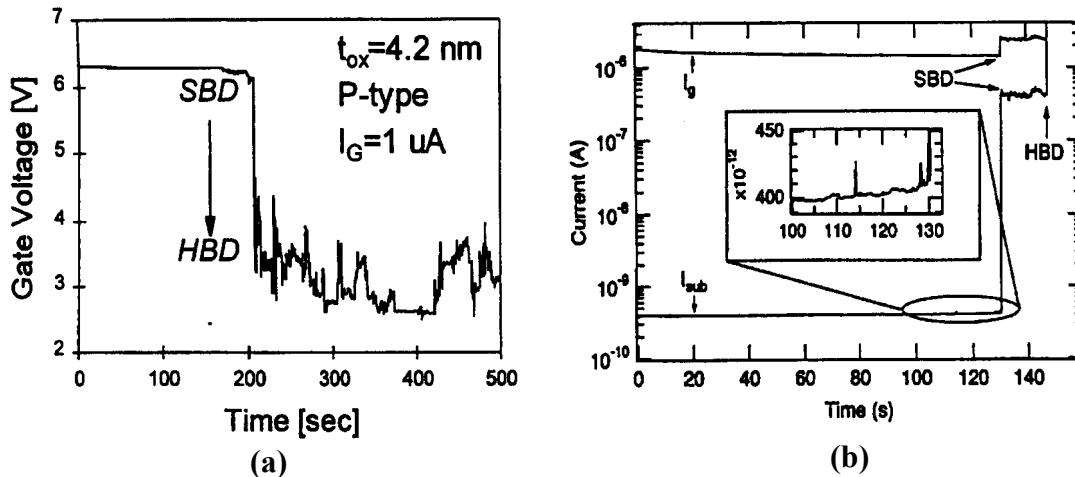


Fig. 1.5. Tests a) corrent constant [Miranda 99] i b) tensió constant [Crupi 98] on s'han registrat ruptures Soft-Breakdown i Hard-Breakdown. Al contrari de la ruptura HBD, la ruptura SBD només implica una pèrdua parcial de les propietats aïllants de l'òxid.

1.4. Els estressos limitats en corrent: una aproximació més real a les condicions d'operació.

En la secció anterior s'ha vist que, a mesura que la dimensió vertical dels dispositius microelectrònics disminueix (i, en particular, el gruix de l'òxid de porta), apareixen nous modes de fallada menys severos que el HBD (com ara el SBD o la PBD). Si això és així, la següent pregunta que ens podem plantejar és: fins a quin punt podem estar segurs que el primer esdeveniment de ruptura que experimenta un òxid de porta (que pot ser SBD o ruptura progressiva) pot malmetre el dispositiu electrònic i fer que deixi d'ésser funcional? En aquest sentit, molt recentment s'estan dedicant grans esforços per tal d'avaluar l'impacte que els diferents modes de fallada poden tenir en la funcionalitat del dispositiu microelectrònic afectat i, fins i tot, del circuit del qual forma part. En aquesta secció, s'exposaran alguns dels resultats presentats en aquesta direcció. També es justificarà la necessitat de buscar nous tests de caracterització elèctrica (enlloc del CCS i CVS) que s'aproximin més a les condicions reals d'operació d'un dispositiu i, per tant, permetin obtenir una informació més acurada de com els diferents modes de fallada poden afectar als circuits integrats. Tot això demostrarà que hi ha altres tests alternatius, com ara el CLS (un dels utilitzats en aquesta tesi), que són més adequats a l'hora d'avaluar l'impacte de la ruptura dielèctrica.

En un dels primers treballs on es va estudiar l'impacte de la ruptura en dispositius electrònics [Weir 97], es va analitzar el grau d'incidència del mode de ruptura suau a mesura que t_{ox} disminuïa. Els resultats mostraren que la probabilitat de registrar fenòmens SBD augmentava amb la disminució del gruix de l'òxid de porta fins al punt que la ruptura HBD s'observava molt esporàdicament. Fins i tot, en òxids molt prims ($t_{ox} < 2\text{nm}$), es va arribar a

detectar que la *duresa* del mateix fenomen SBD depenia tant del gruix de l'òxid com de les condicions d'estrés. Concretament s'observà que, a mesura que l'estrés avançava, la ruptura suau no donava lloc a canvis significatius en les característiques del transistor (tot i que alguns paràmetres, com ara la tensió llindar i la transconductància, experimentaven una degradació gradual). Això demostrava que el transistor continuava sent funcional fins i tot després de la ruptura. En canvi, en transistors amb òxids més gruixuts (5.5nm), i de manera similar al resultats presentats en [Okandan 96], es demostrava que la ruptura era més severa i, per tant, l'increment sobtat de corrent en podia malmetre les seves prestacions.

Treballs posteriors [Wu 98] demostraren que la incidència dels diferents modes de ruptura depenia no només del gruix de l'òxid, sinó també de les dimensions dels transistors. En concret, es va demostrar que hi havia una gran dependència del mode de ruptura amb la longitud de canal (L). Avaluant N-MOSFETS amb òxids de porta de gruix entre 2.1 i 5nm es va observar que, per a transistors amb $L < 1\mu\text{m}$, la ruptura degradava les prestacions de commutació del dispositiu tant punt es desencadenava. En canvi, per a valors de L superiors a $1\mu\text{m}$, la ruptura era més suau i, per tant, el transistor encara podia ésser funcional durant hores.

Resultats encara més recents [Henson 99, Degraeve 01] arriben fins i tot a demostrar que hi ha una relació entre el mode de ruptura i la posició on l'òxid s'ha trencat. Concretament, en [Henson 99] s'observa que quan la ruptura es produeix en zones properes a la font i/o drenador, aquesta és molt més severa, de manera que correspon a un esdeveniment HBD (i, per tant, pot malmetre la funcionalitat del transistor). En canvi, quan l'òxid es trenca en el canal (lluny de la font o drenador), el fenomen correspon quasi exclusivament a SBD. En [Degraeve 01] es suggereix que això és degut a que, prop del drenador i la font, la resistència dels elèctrodes és més petita, de manera que quan es desencadena la ruptura, la potència dissipada és més alta (donant lloc a una ruptura HBD). És interessant ressaltar que aquests resultats permeten justificar la incidència del mode de ruptura amb la longitud del canal observada per Wu [Wu 98]. Quan més gran sigui L , la probabilitat que la ruptura es produeixi en el canal és més alta. Aquesta, al ser menys severa, permet que el transistor continuï funcionant fins que no s'enregistra un fenomen de ruptura prop de la font o drenador (Fig. 1.6.a). En canvi, en transistors amb canal curt, sigui quina sigui la posició on es desencadena la ruptura, aquesta és prou a prop de la font i/o drenador com per a donar lloc a una ruptura forta (Fig. 1.6.b).

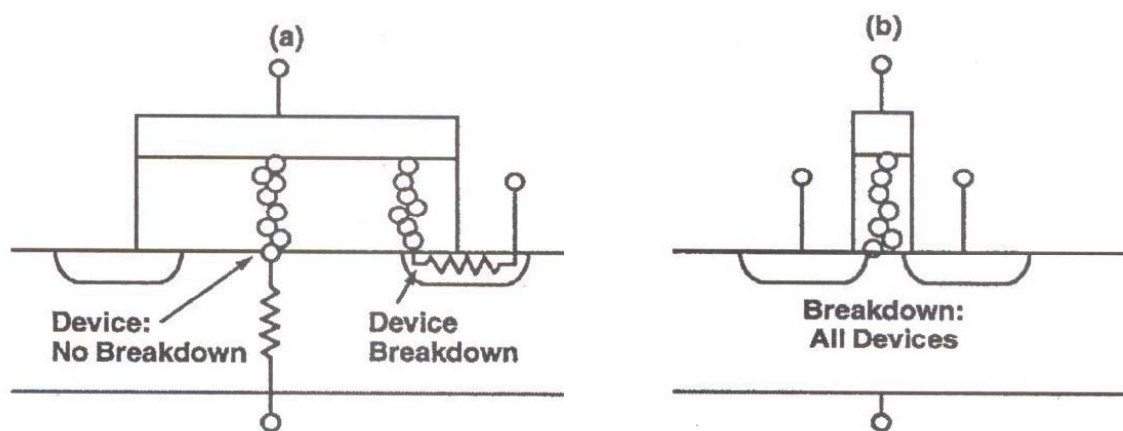


Fig. 1.6. Figura on s'il·lustra la relació que hi ha entre la localització de la ruptura i l'impacte en el dispositiu en (a) dispositius de canal llarg i (b) dispositius de canal curt [Wu 98].

A més de l'impacte de la ruptura dielèctrica en dispositius electrònics (bàsicament transistors MOSFET), alguns treballs han anat més enllà i han avaluat l'impacte que el SBD i el HBD tenen en la funcionalitat de circuits integrats [Pantisano 01, Rodríguez 02, Kaczer 02]. Com a exemple, en [Kaczer 02] es demostra que, fins i tot després de la ruptura forta, alguns circuits digitals poden continuar essent funcionals.

Tots aquests resultats suggereixen que, a diferència del que es creia fins ara, és difícil establir un criteri que permeti avaluar la fiabilitat dels dispositius electrònics. L'impacte que la ruptura té en el dispositiu/circuit depèn de factors com ara la seva funcionalitat i el mode de fallada el qual, alhora, pot dependre del gruix de l'òxid de porta, de les dimensions del canal i de la posició on es desencadena. En qualsevol cas, el que sí és cert és que per a determinar la sensibilitat real dels circuits a la ruptura dielèctrica cal conèixer d'una manera més acurada les condicions reals d'estrès i els factors que controlen la seva severitat [Stathis 02], doncs s'ha comprovat que aquesta determina en molts casos l'impacte sobre el dispositiu en qüestió. En aquest sentit, els tests elèctrics habitualment utilitzats (CVS i RVS) s'allunyen força de les condicions reals d'operació. Els transistors d'un circuit es veuen sotmesos a estressos variables en el temps (característica no reflectida en els tests convencionals), que poden afectar de manera significativa al temps de vida mitja de l'òxid [Nafria 96, Suehle 97]. D'altra banda, la tensió que alimenta a un dispositiu electrònic és, en molt casos, subministrada per dispositius MOS (generalment transistors) amb una impedància de sortida molt elevada i una capacitat limitada de subministrar corrent (a diferència dels tests convencionals). Per tenir en compte aquesta última consideració, Linder ha suggerit un nou test elèctric: estressos limitats en corrent (CLS) [Linder 00]. Aquest test consisteix en aplicar un estrès a tensió constant amb la particularitat que, fins i tot després de la ruptura, el corrent que flueix a través de l'estructura mai pugui superar un valor màxim, anomenat límit de corrent. Tot i que en aquest tipus de test t_{BD} no es veu afectat (doncs l'òxid s'estressa aplicant una tensió constant, com en el cas del CVS), la severitat de la ruptura (determinada per l'increment de corrent quan l'òxid perd les propietats aïllants) ve controlada pel límit de corrent. Concretament, en [Linder 00] es demostra que, quant més petit és aquest límit, més baix és el corrent de post-ruptura (mesurat a tensions relativament baixes). Com a exemple, a la Fig. 1.7 s'observa aquest efecte (veure peu de figura). Per tant, com que el límit de corrent determina la severitat de la ruptura i, alhora, aquesta determina l'impacte en la funcionalitat del dispositiu, el CLS constitueix un tipus de test molt més adequat a l'hora d'avaluar els efectes de l'esdeveniment BD. Per aquest motiu, a fi de simular unes condicions d'estrès més properes a les condicions reals d'operació, en aquesta tesi s'analitzarà quin és l'efecte del límit de corrent en el fenomen de ruptura dielèctrica. S'estudiaran òxids sotmesos a estressos limitats i no limitats en corrent (CLS i NLCS) i se n'avaluaran les seves propietats de post-ruptura.

1.5. Tècniques de caracterització a escala nanomètrica: aplicació de les Microscopies de Sonda Local a la caracterització elèctrica del SiO₂.

Una anàlisi estadística de la informació obtinguda mitjançant les tècniques de caracterització estàndards apunta (tot i que sense evidències experimentals directes) que els diferents modes de fallada (com ara el SBD i el HBD) són fenòmens extremadament locals [Suñé 90] que es produeixen en àrees de $\sim 10^{-13}$ - 10^{-12} cm². Tanmateix, els models de ruptura dielèctrica suggereixen que aquesta és el resultat final d'un procés de degradació de l'estructura interna de l'òxid, associat a la generació de defectes durant l'estrès elèctric [DiMaria 93]. A la vista d'aquests resultats, el principal inconvenient de les tècniques convencionals utilitzades fins ara és que no reflecteixen les variacions de les propietats elèctriques que poden produir-se a escala nanomètrica, doncs avaluen estructures de test

d'àrees molt superiors ($\sim 10^{-8}$ - 10^{-3} cm²) a aquelles en les que es produeix la degradació i la ruptura ($\sim 10^{-13}$ - 10^{-12} cm²). A tot això cal afegir que alguns d'aquests fenòmens tan locals (com ara la creació de trampes) es poden manifestar mitjançant fluctuacions de corrent molt inferiors a les variacions habitualment registrades amb les tècniques estàndard, de manera que poden quedar emmascarades pel corrent que flueix a través de la totalitat de l'estructura MOS. Aquestes variacions però, són les que permetrien fer una anàlisi més acurada de la fiabilitat de l'òxid de porta. Per aquest motiu, si es vol estudiar la dinàmica de degradació i els mecanismes de ruptura amb més *detall*, cal dur a terme una caracterització elèctrica de les capes primes de SiO₂ a escala nanomètrica, que és l'escala on aquests fenòmens tenen lloc.

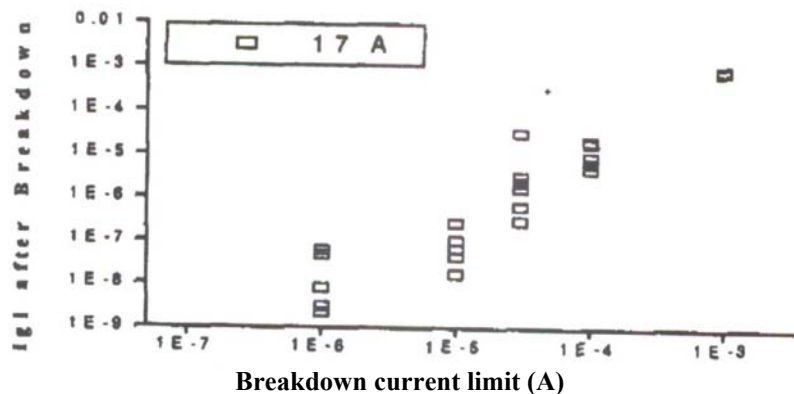


Fig. 1.7. Efecte del límit de corrent en la conducció de post-ruptura. S'observa que, a mesura que el límit de corrent augmenta, la intensitat que flueix a través de l'estructura (mesurada a 1.5V en un òxid de porta de 1.7nm) creix [Linder 00].

A mitjans dels anys 90 es van començar a utilitzar amb aquesta finalitat, tot i que molt esporàdicament, diferents microscopies de sonda local (SPM). Aquestes tècniques ofereixen la possibilitat d'analitzar superfícies amb una resolució lateral molt elevada (~ 10 nm). A més, en el cas de l'AFM (*Atomic Force Microscope*) i de l'STM (*Scanning Tunnelling Microscope*), permeten treballar directament sobre l'òxid d'estructures MOS sense porta, de manera que la punta fa el paper d'elèctrode metàl·lic. Tal com es pot veure a la Fig. 1.8, les estructures estudiades corresponen a capacitats MOS amb una àrea definida per l'àrea de contacte entre la punta i la mostra. Aquesta àrea és de l'ordre de pocs centenars de nanòmetres quadrats (\sim àrea d'un spot de ruptura segons estimacions estadístiques [Suñé 90] i del model de contacte puntual [Suñé 98]), de manera que aquestes tècniques de microscopia poden resultar molt adequades per a la caracterització elèctrica d'spots individuals.

Una tècnica basada en la Microscopia d'Efecte Túnel (STM) és l'anomenada tècnica BEEM (*Ballistic Electron Emission Microscopy*) [Wen 97, Kaczer 96]. Des de la punta d'un STM s'injecten electrons a l'elèctrode metàl·lic d'una estructura MOS. Un cop han travessat balísticament la porta i arriben a la interfície metall-òxid, són accelerats cap a l'òxid de l'estructura. Alguns d'aquests electrons rebotaran cap a la porta metàl·lica mentre que, d'altres, quedaran atrapats en trampes o travessaran l'òxid. El corrent que arriba al substrat és la variable que permetrà estudiar les propietats elèctriques de l'òxid en qüestió. Alguns dels treballs realitzats amb BEEM mostren spots elèctricament més febles (*weak spots* o spots amb una conductivitat superior) que la resta de l'òxid [Kaczer 96] mentre que, d'altres, suporten altes densitats de corrent sense experimentar un fenomen de ruptura. Aquests resultats evidencien la importància que té la caracterització de les propietats elèctriques a escala local per a detectar les inhomogeneïtats que hi ha en les diferents zones de l'òxid. Aquesta tècnica però, tot i permetre aquest tipus d'estudis, presenta alguns inconvenients, com ara la necessitat de treballar en condicions d'ultra-alt buit.

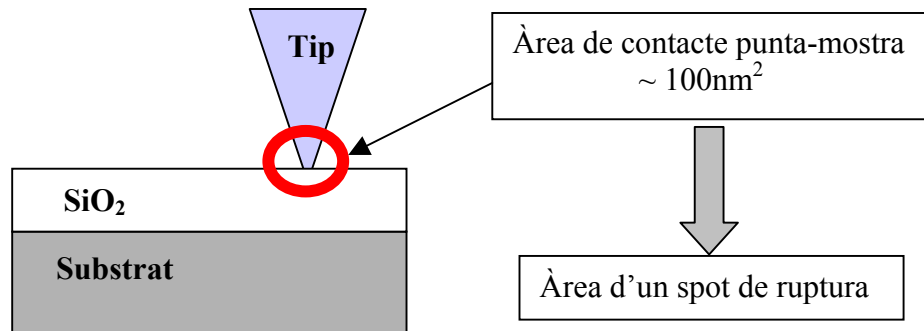


Fig. 1.8. Estructura MOS definida per la punta d'un SPM. Aquesta configuració experimental permet analitzar àrees de $\sim 100\text{nm}^2$.

Una altra Microscopia de Sonda Local utilitzada per a estudiar les propietats elèctriques de l'òxid de porta és l'STM [Daniel 97, Watanabe 98, Watanabe 99]. Tot i que, en principi, aquesta tècnica només permet treballar amb mostres conductores, si l'òxid de porta és prou prim com per a permetre un corrent túnel detectable pel set-up experimental, també es pot utilitzar a fi de caracteritzar les propietats elèctriques de materials aïllants. D'entre els diferents treballs publicats, destaquen els resultats presentats per Watanabe *et al.* [Watanabe 98, Watanabe 99]. Els seus experiments consistien bàsicament en fer un escombrat sobre una determinada àrea de l'òxid abans i després d'un estrés elèctric (que es duia a terme mitjançant un altre escombrat a una tensió més alta) per tal de comparar les seves propietats elèctriques i analitzar els efectes de la degradació. La Fig. 1.9 mostra dues imatges, una abans (a), i l'altra després (b) de l'estrés. En (b) s'observa un augment tant del nombre d'spots febles com de la seva intensitat. Aquest augment, d'acord amb la Fig. 1.9.c, s'ha atribuït al corrent túnel assistit per les trampes generades durant el procés de degradació (SILC). En el mateix treball, també es van mesurar característiques I-V (després de l'estrés elèctric) en les zones *fosques* (poca conductivitat) i en les zones més *brillants* (conductivitat alta) de la Fig. 1.9.b, per tal de comparar-les amb les característiques que s'havien registrat abans de l'estrés. Mentre que les corbes I-V obtingudes en les zones amb poc nivell de corrent eren similars a les prèvies a l'estrés elèctric (spots que havien experimentat poca degradació), les que es van registrar en les zones més *brillants* (*weak spots*) mostraven un nivell de corrent superior al mesurat abans de la degradació. Aquests resultats doncs, reafirmaven novament l'existència d'spots febles (considerats per aquests autors els precursors de la ruptura dielèctrica) i, d'altra banda, demostraven la capacitat que tenen les tècniques SPM a l'hora de detectar-los i caracteritzar-los elèctricament.

Tot i haver obtingut resultats prometedors amb STM, cal fer algunes consideracions d'interès: d'una banda, un STM només permet treballar en òxids ultraprims, de manera que els resultats obtinguts a escala local amb la Microscopia Túnel no es poden comparar amb els obtinguts amb altres tècniques de caracterització. A més, treballs realitzats per diferents grups de recerca semblen indicar que només es poden obtenir resultats fiables (compatibles amb les observacions macroscòpiques) en condicions d'ultra-alt buit, de manera que es requereix d'una configuració experimental força complexa. Per últim, el corrent mesurat no és independent de la topografia. Per tant, qualsevol fluctuació de corrent pot ser deguda a algun canvi en les propietats elèctriques o topogràfiques de l'òxid, essent impossible discernir quin de les dues n'és la responsable. A fi d'avaluar quin és l'impacte de cadascuna d'elles en les propietats aïllants de l'òxid de porta seria molt interessant poder mesurar simultàniament ambdues variables de manera independent.

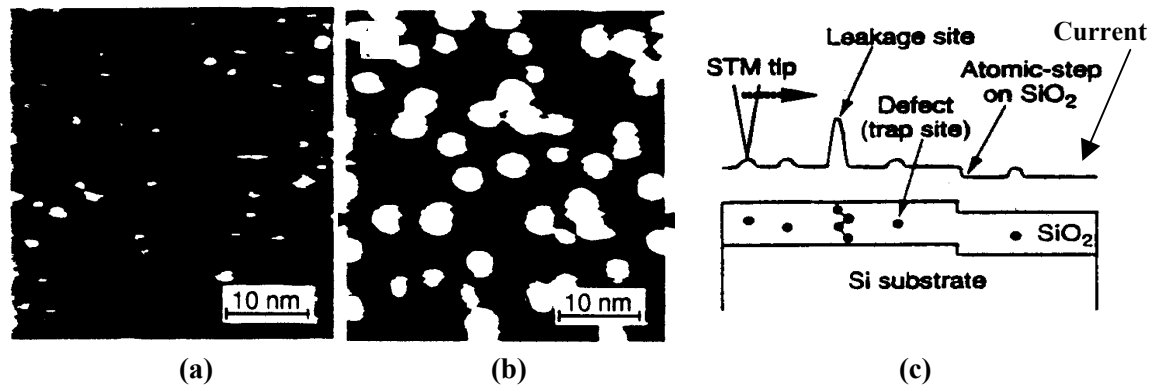


Fig. 1.9. Imatges STM obtingudes en un òxid (a) verge i (b) estressat. En (b) s'observen spots elèctricament febles a causa de les trampes generades durant l'etapa de degradació. (c) esquema que permet interpretar l'increment de corrent observat en les zones estressades [Watanabe 99].

Tots aquests inconvenients es poden resoldre mitjançant la utilització de tècniques basades en la Microscopia de Forces Atòmiques (AFM). D'una banda, permeten treballar sobre superfícies no conductores de qualsevol gruix, per aquest motiu han estat àmpliament utilitzades per a caracteritzar la morfologia de la superfície de les capes primes de SiO₂ [Tsai 97]. De l'altra, el set-up permet realitzar mesures en contacte amb l'aire. Això en simplifica molt la configuració experimental, tot i que cal tenir en compte els inconvenients relacionats amb la contaminació ambiental (tal com es comentarà en el capítol 2). Un AFM convenientment modificat, d'entre els quals destaquen l'SCM (*Scanning Capacitance Microscope*) [Tomiye 98, Kang 99] i el C-AFM (*Conducting Atomic Force Microscope*) [Murrell 93, O'Shea 95, Ruskell 96, Olbrich 98, Olbrich 98b, Ebersberger 96, Olbrich 99, Abusch-Magder 98], permet obtenir, simultàniament, informació topogràfica i elèctrica (capacitat i corrent elèctric, respectivament) de les capes de SiO₂. D'entre ambdues tècniques, l'SCM presenta una resolució lateral més limitada. A més, només permet mesurar la capacitat d'òxids de porta relativament gruixuts doncs, a mesura que el gruix disminueix, el corrent túnel dificulta l'obtenció de mesures fiables. Per aquest motiu, el C-AFM es converteix en una de les alternatives més prometedores a l'hora d'estudiar tant les propietats topogràfiques com les elèctriques d'òxids de porta d'estructures MOS amb una molt bona resolució lateral i una configuració experimental relativament senzilla.

Els primers treballs que van utilitzar un C-AFM per a analitzar les propietats elèctriques del SiO₂ a escala microscòpica es remunten a l'any 93 [Murrell 93]. Els experiments realitzats consistiren 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 spot per tal d'assolir un corrent de 25pA (valors superiors podrien malmetre la punta). Quant més gran és aquesta tensió, més alta és la capacitat aïllant de l'òxid i, per tant, quan es sotmet a un estrès elèctric, es comporta d'una manera molt més *robusta*. La Fig. 1.10. mostra una imatge de (a) la topografia i (b) la *robustesa dielèctrica* obtingudes en un òxid de 1.8μm² d'àrea. S'observa que, en la mateixa línia que en els treballs realitzats amb STM, hi ha spots que presenten un comportament elèctricament més feble que d'altres. En aquest treball, els autors aconseguiren una resolució lateral d'uns 20nm que, en treballs posteriors, arribaren a reduir fins a uns 10nm [O'Shea 95] mitjançant la utilització de puntes que oferien millors prestacions. L'any 1996, Ruskell *et al.* publicà un article on, en la mateixa línia que els resultats anteriors, s'assolia un resolució lateral d'uns 8nm [Ruskell 96].

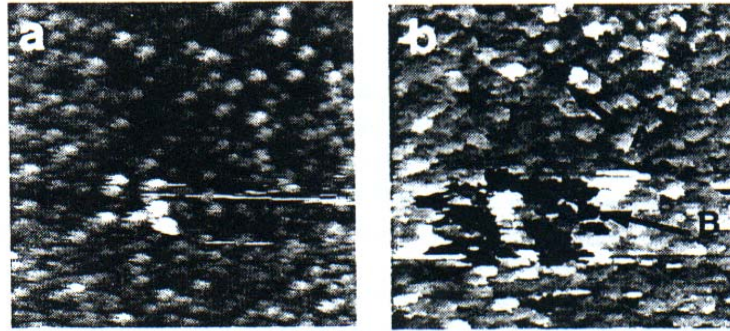


Fig. 1.10. Imatge de (a) la topografia i (b) la *robustesa dielèctrica* obtinguda en un àrea de $1.8\mu\text{m}^2$ d'òxid sobre un substrat de polisilici. Es va establir un corrent límit de 25pA, i el contrast entre les zones clares i fosques és, per a ambdues imatges, de 72nm i 24.3V respectivament [O'Shea 95].

Recentment, el C-AFM també s'ha utilitzat per a mesurar el gruix de l'òxid de porta (t_{ox}) d'estructures MOS [Olbrich 98, Olbrich 98b, Ebersberger 96, Olbrich 99] mitjançant l'ajust de les característiques I-V mesurades experimentalment en diferents zones de l'òxid a l'equació FN. La dependència exponencial del corrent túnel amb t_{ox} fa que variacions del gruix de només dècimes de nanòmetre puguin tenir repercussions fatals per a la fiabilitat de l'estructura analitzada. En aquests treballs s'ha demostrat que, amb C-AFM, t_{ox} es pot determinar a escala nanomètrica amb una sensibilitat de $\pm 0.3\text{nm}$ [Olbrich 98].

Ara bé, tots aquests estudis (realitzats amb C-AFM) s'han avaluat únicament en òxids verges. L'únic treball que analitza (tot i que de manera molt qualitativa i preliminar) la ruptura amb aquesta tècnica és el treball presentat per Yasue [Yasue 97], on s'observa que la distribució de tensions a les que l'òxid es trenca té una dispersió molt baixa només quan la ruptura s'indueix (amb la punta del C-AFM) en punts que estan prou separats entre ells (suggerint una possible propagació de la degradació a zones veïnes). Malgrat aquests resultats, fins ara, aquesta tècnica no s'havia utilitzat mai amb la finalitat d'avaluar la dinàmica de degradació i els modes de ruptura (així com les propietats elèctriques de pre- i post-ruptura) en òxids de porta d'estructures MOS. Els únics treballs publicats que mostren una primera observació dels efectes de la degradació sobre capes de SiO₂ amb Microscopies de Sonda Local són els resultats presentats per Watanabe *et al.* [Watanabe 98, Watanabe 99]. En aquest cas però, la tècnica utilitzada és, tal i com ja s'ha vist, un STM, amb totes les limitacions que comporta respecte de la Microscopia de Forces Atòmiques. Per aquest motiu, en aquesta tesi es caracteritzarà la dinàmica de degradació i la ruptura dielèctrica d'òxids de porta a escala local amb C-AFM. D'una banda, perquè els models macroscòpics prediuen que, tant els mecanismes de degradació (creació de defectes) com els modes de ruptura, són fenòmens extremadament locals, de manera que es requereixen de tècniques alternatives a les convencionals per tal de realitzar aquests estudis amb més detall (a escala nanomètrica). D'altra banda perquè, tal i com s'ha demostrat en aquesta secció, el C-AFM permet dur a terme aquest tipus de caracterització elèctrica amb un set-up experimental relativament senzill. En aquest sentit doncs, aquesta tesi és una aportació en el camp de la fiabilitat dels òxids de porta primers (<6nm) d'estructures MOS.

Capítol 2.

Microscopia de Forces Atòmiques i tècniques afins: el C-AFM.

Un cop presentada la motivació que ens ha portat a la caracterització elèctrica de l'òxid de porta amb C-AFM, en aquest capítol es descriurà el set-up experimental utilitzat per a la realització d'aquest tipus de mesures. En primer lloc, s'exposarà breument el principi de funcionament d'un AFM per a tractar, tot seguit, les modificacions que cal introduir per a convertir-lo en un C-AFM. Es descriuran les especificacions experimentals dels dos C-AFMs utilitzats en aquesta tesi, fent especial èmfasi en les seves diferències i en les implicacions que aquestes tindran a l'hora d'analitzar els resultats obtinguts. Degut a la importància que tenen les puntes en aquest tipus d'experiments, es dedicarà una secció del capítol a la descripció dels requeriments que cal exigir a una punta per a realitzar mesures elèctriques i del tipus de sondes utilitzades en aquesta tesi. Finalment, es descriurà molt breument una altra tècnica afí a la microscopia de forces atòmiques: el Kelvin Probe Force Microscope (KPFM), utilitzat per a mesurar la diferència del potencial de contacte entre la punta i la mostra.

2.1. Principi de funcionament d'un AFM.

El principi bàsic de funcionament d'un SPM consisteix en la mesura d'una magnitud física que es manifesta quan una sonda (també anomenada punta o *tip*) s'apropa a distàncies extremadament petites de la mostra (de l'ordre de nanòmetres o inferiors). Quan això succeeix, apareix una interacció sonda-mostra que depèn de la distància que les separa. La mesura d'aquesta interacció permet reproduir la topografia de la superfície analitzada. Les diferents tècniques SPM difereixen en el tipus d'interacció física a la que són sensibles. Així, per exemple, el primer SPM que es va desenvolupar, l'STM [Binnig 82], era capaç de detectar el corrent túnel que apareixia quan una sonda metàl·lica s'apropava a distàncies interatòmiques d'una mostra conductora i polaritzada respecte de la punta. Aquest corrent túnel permetia determinar diferents propietats de la mostra, com ara la topografia i les propietats elèctriques del material conductor estudiat. A partir d'aquest moment, les tècniques SPM van créixer espectacularment, d'entre les quals ens centrarem en la Microscopia de Forces Atòmiques (objecte d'aquesta tesi), desenvolupada l'any 1986 per G. Binnig, C. F. Quate i Ch. Gerber [Binnig 86].

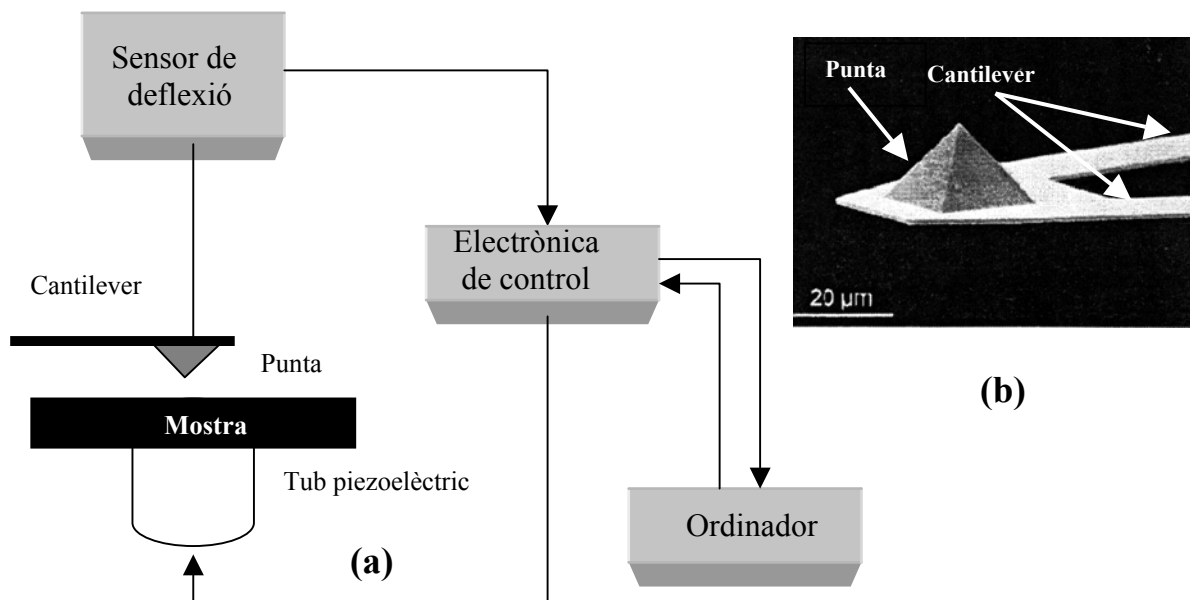


Fig. 2.1. (a) Esquema bàsic d'un AFM. Les forces atòmiques que apareixen entre la punta i la mostra provoquen una flexió de la palanca que és registrada mitjançant un sensor. El senyal detectat per aquest sensor és el que permetrà obtenir la topografia de la superfície estudiada. (b), palanca típica en forma de V d'un AFM, amb la punta al seu extrem.

El funcionament d'un AFM (Fig. 2.1.a) es basa en la mesura de la força que apareix entre la mostra i un sensor (anomenat palanca o *cantilever*) quan ambdós s'apropen fins a distàncies que en permeten la seva detecció. Aquest sensor, tal com es veu a la Fig. 2.1.b, consta d'una palanca molt petita (de l'ordre de les micres) amb una punta afilada col·locada perpendicularment en un dels seus extrems. Els àtoms del final de la punta són els que interaccionen amb la mostra. Quan això succeeix, apareix una força sobre la punta que provoca la deflexió de la cantilever. Aquesta deflexió és la variable que proporcionarà la informació necessària per a reproduir la topografia de la superfície.

La flexió de la palanca es mesura amb el que s'anomena sensor de deflexió (Fig. 2.2). El mètode més utilitzat consisteix en enviar un feix de llum làser a la part posterior de l'extrem mòbil de la cantilever que, un cop reflectit, incideix en un sistema de fotodíodes de quatre quadrants (Fig. 2.2). Quan la palanca no presenta cap deflexió (és a dir, quan està allunyada de la mostra), el feix incideix en el centre del sistema. En canvi, quan es flexiona, aquest es desvia fent que uns fotodíodes detectin més intensitat de llum que els altres. El balanç d'aquestes intensitats (convertida en tensió mitjançant un convertidor I-V) és precisament la variable que permet determinar la deflexió de la cantilever. Cal destacar que amb aquest sistema de detecció es poden mesurar tant els desplaçaments verticals, com els laterals, de manera que ens permet avaluar tant les forces normals com les forces de fricció que s'exerceixen sobre la punta a mesura que s'escombra la superfície de la mostra.

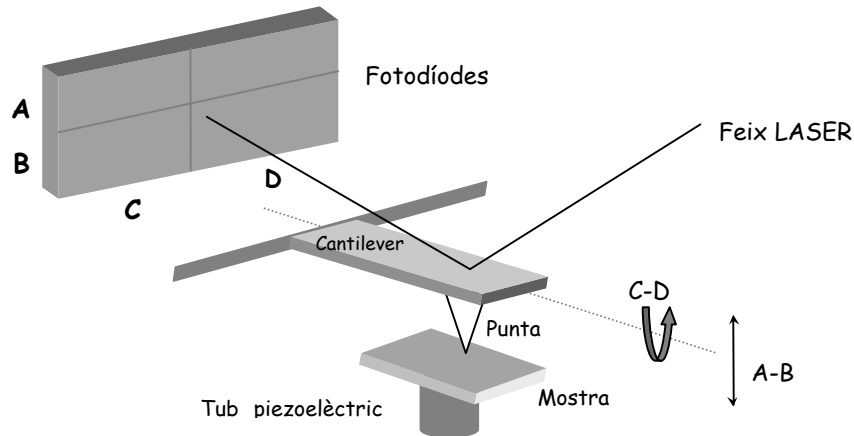


Fig. 2.2. Mètode de detecció de la flexió de la palanca que consisteix en registrar la direcció d'un feix làser després de reflectir-se en la cantilever.

La tensió proporcionada pel sistema de fotodíodes (proporcional a la deflexió) és recollida per l'electrònica de control de l'AFM, que és la que s'encarrega, mitjançant el sistema electrònic de realimentació (feedback), de mantenir la distància punta-mostra (i, per tant, la deflexió de la cantilever) constant a mesura que s'escombra la superfície. Així doncs, quan es fa un experiment amb AFM, un cop l'usuari ha triat un valor de referència per a la flexió de la palanca (setpoint), el sistema de realimentació mesura la flexió en cada punt de l'escombrat i la compara amb el valor de referència. A partir d'aquesta comparació, l'electrònica de control de l'AFM aplicarà sobre el piezoelèctric vertical la tensió necessària per tal que la punta recuperi la flexió (i, per tant, la distància punta-mostra) inicial. D'aquesta manera es venceran les irregularitats de la superfície i s'evitarà malmetre la punta. A més, aquesta tensió és la que el sistema utilitzarà com a variable per a reproduir la topografia de la superfície analitzada. L'últim element clau en un AFM és l'ordinador. Aquest és l'element que s'encarregarà de registrar i emmagatzemar les dades proporcionades per l'electrònica de control mitjançant un tarja d'adquisició de dades. També ha de disposar d'un *software* que permeti controlar l'AFM en temps real i poder així canviar els paràmetres que calgui mentre s'escombra la superfície.

Finalment, tampoc podem oblidar la necessitat de disposar d'un sistema mecànic antivibratori que permeti aïllar el set-up experimental de les vibracions externes i assolir així les excel·lents resolucions laterals i verticals d'un microscopi de forces atòmiques (de l'ordre del nanòmetre i de dècimes de nanòmetre, respectivament). Seria impossible resoldre distàncies tan petites si la sonda, a causa d'agents externs, vibrés amb amplituds superiors a les dècimes de nanòmetre.

Per últim, descriurem breument els diferents modes d'operació d'un AFM, així com el mode utilitzat en les mesures C-AFM. Depenent de la distància punta-mostra a la que es treballa, es detecta un tipus de força o un altre. Per a distàncies superiors als 0.5nm, es manifesten principalment forces atractives, com ara les electrostàtiques, magnètiques i de Van der Waals, les quals donen lloc al que s'anomena règim atractiu [Martin 89, Sarid 91]. D'altra banda, per a distàncies inferiors als 0.3nm, s'entra en un règim repulsiu en el que es diu que la punta està en contacte amb la mostra. També cal tenir present que, amb la tècnica AFM, quan els experiments es realitzen en condicions ambient, apareixen forces de capil·laritat (atractives o d'adhesió) que actuen sobre la punta i que són una conseqüència de la fina pel·lícula d'aigua que es forma sobre la superfície degut a la humitat ambiental [Digital]. Aquests dos règims de força donen lloc a dos dels modes de funcionament bàsics d'un AFM: el mode de contacte i de no contacte (més endavant se'n van desenvolupar d'altres que combinaven els avantatges d'aquests dos com, per exemple, el mode Tapping [Zhong 93]). La principal diferència d'aquests dos modes d'operació és que el de contacte ofereix una millor resolució vertical, però les forces que s'apliquen són molt elevades i produeixen un desgast excessiu tant de la punta com de la mostra. No obstant, com que en aquesta tesi es pretén analitzar les propietats elèctriques de l'òxid, caldrà assegurar un bon contacte entre la punta i la mostra i, per tant, serà necessari treballar en aquest mode.

2.2. El C-AFM. Mesura del corrent elèctric.

A fi de poder realitzar mesures elèctriques mitjançant un Microscopi de Forces Atòmiques, a més de tots els elements esmentats fins ara (necessaris en un AFM convencional), calen tres elements addicionals (veure Fig. 2.3): una punta conductora, una font de tensió que polaritzi el sistema punta-mostra i un preamplificador que permeti mesurar els baixos nivells de corrent (\sim pA) que flueixen a través de l'estructura de test. Pel que fa referència a les puntes, s'ha realitzat un estudi de les seves prestacions que serà analitzat amb més detall a la secció 2.4.

El preamplificador, juntament amb les puntes conductores, és un dels elements més delicats d'un C-AFM. Els nivells de corrent que interessa registrar són tan baixos que, a més de les fonts de soroll externes que poden afectar a les mesures (i de les que en cal aïllar el nostre sistema), n'hi poden haver d'altres associades al mateix preamplificador [Tiedje 90] que cal reduir al màxim mitjançant la utilització d'un preamplificador de baix soroll.

La Fig. 2.4 correspon al circuit esquemàtic d'un preamplificador en el qual es mostra un amplificador operacional d'alta impedància d'entrada amb la seva resistència de feedback (R_f), la capacitat paràsita (C_s) associada a R_f , la font de soroll en tensió de l'amplificador operacional (e_n), el soroll Johnson associat a la resistència de feedback (e_i) i una altra capacitat paràsita associada a les connexions d'entrada al circuit (C_i). Aquesta capacitat paràsita d'entrada determina en gran mesura l'amplificació del soroll (e_n) i l'amplada de banda del sistema. Per tal d'augmentar les prestacions del preamplificador (és a dir, disminuir el soroll i augmentar l'amplada de banda) cal que C_i sigui el més petita possible. A la pràctica, això s'aconsegueix col·locant el preamplificador tant a prop com sigui possible del capçal de l'AFM.

Un segon aspecte important a destacar és el compromís que cal prendre a l'hora de triar R_f segons quina sigui la mínima amplada de banda necessària i el màxim soroll Johnson permès per a la realització de les mesures que ens interessin. Una resistència molt gran millora la relació senyal/soroll però redueix l'amplada de banda del preamplificador

[Keithley]. Cal doncs, triar el valor adequat de R_f a fi d'assolir una amplada de banda adequada sense que el soroll superi el corrent túnel que es vol mesurar. Pel que fa referència a e_n , triant un preamplificador de baix soroll serà suficient com per a que sigui negligible en comparació amb la resta de fonts esmentades fins ara.

Finalment, en el cas d'un C-AFM, també cal aïllar el dispositiu experimental de les interferències elèctriques externes, doncs podrien alterar els resultats de les mesures. Generalment, això s'aconsegueix introduint el set-up en una caixa de Faraday.

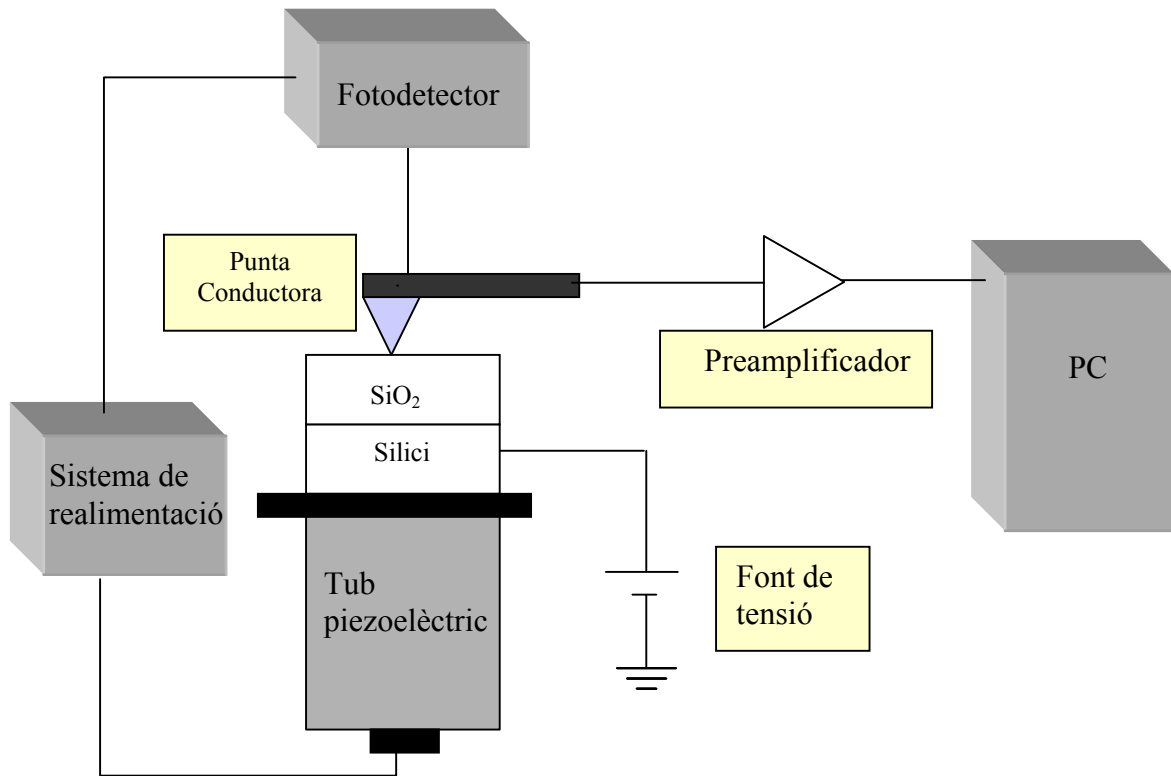


Fig. 2.3. Configuració experimental del C-AFM utilitzat en aquesta tesi per tal de realitzar les mesures elèctriques.

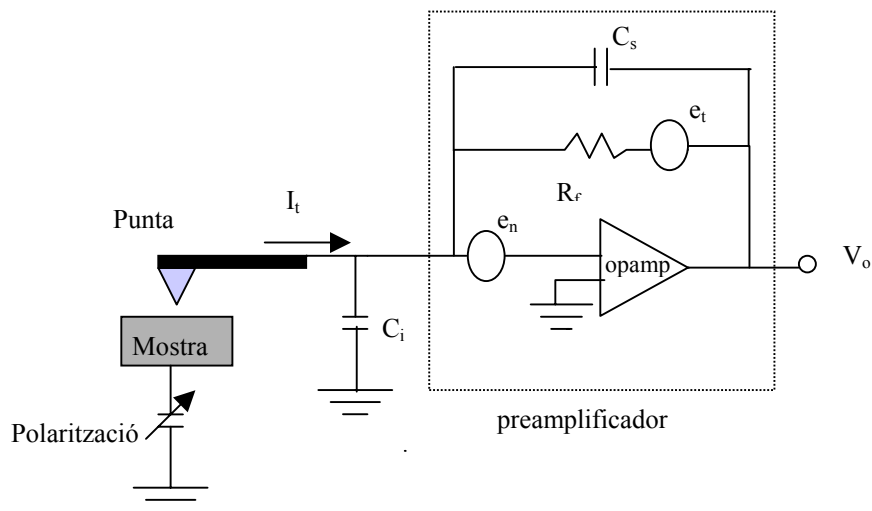


Fig. 2.4. Esquema bàsic d'un preamplificador per a un C-AFM [Tiedje 90].

2.3. Especificacions dels C-AFMs utilitzats.

Un cop s'han descrit els elements necessaris per a poder mesurar el corrent elèctric amb C-AFM, tot seguit es descriuran les especificacions dels dos set-ups experimentals utilitzats en aquesta tesi.

Set-up A

El set-up A és un AFM comercial de *Digital Instruments* (model *Contact Mode AFM*) [Digital] que es troba en el departament de *Failure Analysis 5*, a Infineon Technologies, Munich. Aquest AFM va ser adaptat a fi de caracteritzar elèctricament l'òxid de porta d'estructures MOS [Olbrich 98b]. Es va equipar amb un preamplificador (fabricat també per *Digital Instruments*) de guany 10^{10} i una amplada de banda de 180Hz. Cal remarcar que el preamplificador es troba situat en el mateix capçal de l'AFM per tal d'evitar connexions que poguessin captar sorolls externs. Al mateix temps, es blindava amb la mateixa finalitat. Un segon amplificador extern al capçal amplifica el corrent un factor 10 o 10^2 (a triar per l'usuari), de manera que el set-up permet una amplificació total de 10^{11} o 10^{12} V/A. Addicionalment, es disposa d'un filtre passa-baixes de 400Hz que permet eliminar components d'alta freqüència que poguessin ser generades o bé externament, o bé per la resposta del mateix amplificador. Amb totes aquestes precaucions, el soroll de fons s'aconsegueix reduir a uns 30fA rms.

L'electrònica de control disposa d'una DSP (*Digital Signal Processor*) que pot treballar a una freqüència màxima de 20MHz. Està equipat amb 4 DACs (*Digital to Analog Converters*) auxiliars amb sortides de 10, 12 i 220V, tots ells amb una resolució de 16 bits, que són els que permeten (i) controlar el moviment de la punta a partir de les tensions aplicades als piezoelèctrics i (ii), polaritzar el sistema punta-mostra. També disposa de 2 ADCs (*Analog to Digital Converters*) amb entrades de 10V i 14 bits de resolució. Aquests conversors són els que permeten digitalitzar la tensió analògica que prové del sistema de fotodíodes i la tensió proporcionada pel preamplificador que són, respectivament, les dades que permetran obtenir la informació topogràfica i elèctrica. Finalment, afegir que el *software* d'aquest C-AFM ha estat proporcionat per la casa *Nanoscope* (versió 443b3 i 444b1).

Set-up B

El set-up B és un AFM de *Nanotec Electrònica* [Nanotec], que es troba en el laboratori del grup de recerca *Nanofabricació i Fiabilitat de Dispositius Electrònics* del Departament d'Enginyeria Electrònica (UAB), on s'ha desenvolupat aquesta tesi. Una de les tasques inicials va consistir en adaptar-lo a fi de permetre la caracterització elèctrica a escala nanomètrica. Amb aquesta finalitat, es va equipar amb un preamplificador de baix soroll de la casa *femto* [Femto], model LCA-200-10G, amb un guany de 10^{10} i una amplada de banda de 200Hz. Un segon amplificador, equipat també amb un filtre passa-baixes de freqüència de tall 200Hz, amplifica el corrent un factor 1 o 10 (a triar per l'usuari), de manera que el set-up permet una amplificació total de 10^{10} o 10^{11} V/A. Tot i que el preamplificador és d'altres prestacions, al no haver-se pogut integrar i blindar dins del capçal de l'AFM, les connexions que van des de la punta fins a la seva entrada poden captar interferències externes que distorsionen els resultats de la mesura. Per aquest motiu, tot el sistema s'ha introduït dins d'una caixa de Faraday. Amb aquestes precaucions s'ha aconseguit un nivell de soroll d'uns 600fA. L'electrònica de control disposa d'una DSP que treballa a una freqüència màxima de 15KHz. Està equipat amb ADCs d'entrades màximes de 3V i 16 bits de resolució. Finalment, afegir que el *software* utilitzat també ha estat proporcionat per la casa *Nanotec*.

Ambdós dispositius experimentals (set-up A i B) permeten obtenir (i) imatges topogràfiques de la mostra, (ii) imatges de corrent quan l'escombrat es realitza aplicant una tensió constant entre la punta i la mostra i (iii), característiques corrent-tensió (I-V) o corrent-temps (I-t) en punts localitzats de l'òxid quan s'apliquen, respectivament, rampes de tensió (RVS) o estressos a tensió constant (CVS).

Malgrat les semblances que presenten, cal ressaltar una diferència que serà molt important a l'hora d'interpretar els resultats. En el set-up A, el corrent que flueix entre la punta i la mostra està sempre limitat a un valor màxim de 10 o 100pA (a triar per l'usuari). Per tant, els estressos aplicats són, de fet, estressos limitats en corrent (CLS). En canvi, en el set-up B, el corrent no està limitat, de manera que els estressos realitzats amb aquest C-AFM corresponen a estressos sense límit de corrent (NLCS). Val a dir però, que, encara que el corrent no estigui limitat, l'electrònica es satura quan la tensió d'entrada a la DSP (que prové del preamplificador) assoleix els 3V. Per tant, aquest set-up no permet mesurar corrents superiors a 30 o 300pA, quan el guany és 10^{10} o 10^{11} V/A, respectivament. Aquesta diferència entre els dos C-AFMs és la que permetrà avaluar com influeix la limitació del corrent en la ruptura de l'òxid de porta.

2.4. La punta: sonda del microscopi de forces atòmiques.

En les seccions anteriors s'ha vist que el principi físic d'un AFM es basa en la detecció de les forces atòmiques que apareixen entre una punta i la mostra quan ambdues estan suficientment a prop. D'això se'n dedueix que la punta és un dels elements més importants d'aquest tipus de tècniques de microscopia. Les seves propietats geomètriques i mecàniques poden influir de manera determinant a l'hora d'obtenir imatges topogràfiques de qualitat. Cal tenir en compte que la geometria i el material de fabricació determinaran la resolució lateral i la seva resistència al desgast mecànic. Si, a més de mesurar la topografia, també es vol dur a terme una caracterització elèctrica de la mostra, les propietats químiques i elèctriques també adquireixen una importància molt rellevant. En aquesta secció es descriurà breument quins són els requisits que cal demanar a una punta per tal (i) d'obtenir imatges topogràfiques amb una bona resolució lateral i (ii) poder mesurar el corrent elèctric que flueix entre la punta i la mostra. Finalment, es descriurà quines són les puntes que ofereixen millors prestacions per a la caracterització elèctrica a escala nanomètrica.

2.4.1. Requisits d'una punta per a la realització de mesures C-AFM.

Propietats geomètriques.

Per tal de reproduir mitjançant AFM la topografia d'una superfície, la sonda ha d'ésser capaç de resseguir el seu perfil de la manera més acurada possible. Les seves dimensions li han de permetre entrar dins de qualsevol cavitat que la mostra presenti, per profunda i estreta que sigui. Per tant, cal que sigui el més prima i allargada possible. A més, també és necessari que el radi de curvatura de l'extrem de la punta sigui molt petit. D'aquesta manera augmenta la resolució del microscopi i s'eviten fenòmens indesitjats com ara la presència de varies micropuntes a l'extrem de la sonda. Un radi excessivament gran podria donar lloc a l'aparició d'imatges fantasma de la punta [Loenen 90]. Els paràmetres que habitualment s'utilitzen per definir aquests aspectes geomètrics són:

- Radi de curvatura: Si es considera que l'extrem d'una punta es pot aproximar a una semiesfera de radi R (Fig. 2.5.b), el radi de curvatura es defineix com el radi d'aquesta semiesfera.
- Semiangle de conus: És l'angle que hi ha entre l'eix vertical i la paret lateral de la punta (Fig. 2.5.a). Una manera d'aconseguir puntes amb semiangles de conus petits consisteix en fabricar tips extremadament afilades i allargades [Nanosensors], o bé en fer créixer sobre una sonda típica (Fig. 2.5.b) una superpunta (Fig. 2.5.c). Quant més petit sigui aquest paràmetre, més profundes i estretes seran les cavitats topogràfiques que es podran resoldre.

La tecnologia més utilitzada avui dia per a la fabricació de puntes AFM és la tecnologia del Si. Avenços recents en aquest camp han permès la fabricació de puntes de Si o N_4Si_3 ja integrades en cantilevers amb unes prestacions realment altes (radis típics, 20-50nm). Ara bé, per a moltes de les aplicacions dels SPMs es necessita que el material de la punta tingui unes propietats físico-químiques determinades que no compleixen els materials esmentats. Per exemple: en el cas d'un STM, cal que sigui conductor; en un AFM en mode contacte, cal que sigui molt resistent al desgast mecànic; en el cas d'un MFM (*Magnetic Force Microscope*), cal que sigui sensible a les forces magnètiques i, en el cas d'un C-AFM, cal que sigui conductor i resistent alhora (doncs treballa en mode contacte).

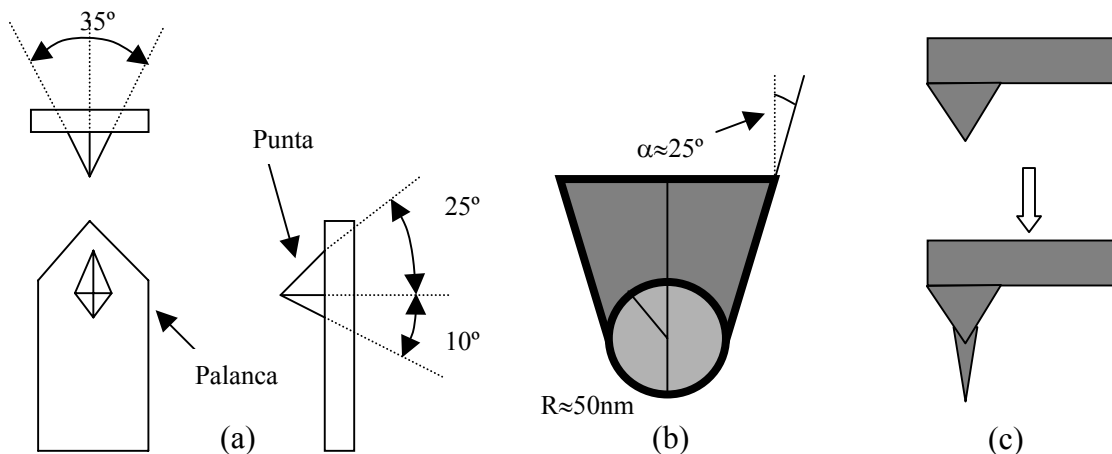


Fig. 2.5. (a) Especificacions d'una punta convencional típica amb forma piramidal. (b) Ampliació de l'extrem de la punta, amb un radi R i un semiangle de conus α . Els valors típics de R per a puntes comercials [Nanosensors] són de l'ordre de 20-50nm. (c) Creixement d'una superpunta (supertip) en l'àpex d'una punta convencional a fi de millorar-ne les prestacions geomètriques.

L'obtenció de puntes adequades per a cada aplicació es pot aconseguir de dues maneres: la primera, consisteix en fabricar tips íntegrament amb un material que compleixi les propietats requerides mentre que, la segona, consisteix en utilitzar puntes convencionals (generalment de Si o N_4Si_3) sobre les quals es diposita una capa del material desitjat. Aquesta segona opció és econòmicament i tècnicament més asequible que la primera, doncs els mètodes utilitzats per a créixer puntes de Si són molt més coneguts des d'un punt de vista tecnològic que no pas els mètodes utilitzats per a créixer puntes d'altres materials com ara metalls, materials magnètics, materials resistents (com el diamant), etc. No obstant, la deposició de recobriments a la punta presenta alguns desavantatges. D'una banda, la resolució

lateral es pot veure seriosament afectada, doncs el radi de la punta augmenta un valor similar al gruix de la capa dipositada, disminuint-ne les seves prestacions geomètriques. D'altra banda, si la capa és prou prima (a fi de mantenir una resolució lateral acceptable), el desgast per fricció pot donar lloc a la pèrdua de les propietats físico-químiques que se li demanen.

Propietats mecàniques.

A l'hora de triar el tipus de punta més adequat per a una certa aplicació AFM caldrà tenir present en quin mode d'operació treballarà el microscopi, doncs aquest condicionarà les prestacions mecàniques necessàries per a permetre aquest tipus de mesures. Tal com ja es va esmentar a la secció 2.1, a fi de garantir el flux de corrent entre la punta i la mostra en experiments C-AFM, és necessari treballar en mode contacte. Ara bé, en aquest mode d'operació, la resistència mecànica de la sonda adquireix una importància molt rellevant. Sobre la punta s'exerceixen forces laterals de magnituds considerables que acceleren el desgast i, en conseqüència, la pèrdua de les seves propietats geomètriques i físico-químiques (resolució, conductivitat...). Molts han estat els estudis dedicats a determinar quin és el material conductor més adequat per a treballar en mode contacte (per a aplicacions STM i C-AFM) sense que la punta pateixi un desgast excessiu. Inicialment es van utilitzar tips de Si altament dopades, però ràpidament es va comprovar que no eren gens adequades per a aquest tipus de mesures: d'una banda, es desgastaven i es trencaven amb molta facilitat i, de l'altra, l'òxid natiu i els processos d'oxidació anòdica als quals es veien sotmeses proporcionaven resultats erronis [O'Shea 95, Murrell 93]. Posteriorment, es va intentar millorar les seves prestacions dipositant una capa metàl·lica d'un material resistent en el seu àpex (com ara Cr, W, Ti, TiN) d'uns 25 a 100nm de gruix. Tot i augmentar el radi de l'extrem de la punta, la deposició d'un metall és prou uniforme com per a assolir resolucions laterals acceptables. Aquestes puntes però, tot i presentar millors prestacions que les de Si, seguien patint un desgast relativament ràpid de manera que perdien resolució lateral i, sobretot, conductivitat [O'Shea 95b]. Treballs posteriors van demostrar que puntes de Si_3N_4 recobertes amb una capa de carboni amorf de 35nm tenien una resistència mecànica més elevada, tot i que el seu radi de curvatura augmentava de manera considerable [Ebersberger 96].

Treballs més recents presenten les puntes de diamant dopat amb bor (resistivitat de 0.1-0.2 Ωcm) com les sondes que ofereixen millors prestacions mecàniques. Tips de Si recobertes amb una capa de diamant de 100nm de gruix [O'Shea 95b, Olbrich 98b, Snauwaert 96, Niedermann 96, Niedermann 98, Lantz 98] proporcionen mesures elèctriques de qualitat fins i tot després de molts escombrats degut a la seva resistència al desgast mecànic. A més, el diamant és una substància molt hidrofòbica, de manera que redueix les forces de capil·laritat que actuen sobre la punta en condicions ambient. Malauradament, degut al seu radi, de l'ordre dels 100nm, ofereixen una resolució lateral força pobre.

Propietats químiques.

Un altre aspecte molt important és l'estabilitat química de la sonda. Idealment, haurien de fabricar-se amb materials químicament inerts per tal d'evitar reaccions químiques amb els diferents components de l'atmosfera i/o de la mostra. D'aquesta manera s'evitarien canvis de la punta que estan fora de l'abast de l'usuari i que poden provocar alteracions en els resultats experimentals. Un dels problemes que presenten les sondes recobertes amb un metall és, a més del desgast mecànic, la seva inestabilitat química davant processos d'oxidació. En tota superfície metàl·lica en contacte amb l'aire s'indueix una oxidació de la capa més externa que provoca el creixement d'una fina pel·lícula d'òxid de l'ordre del nanòmetre, anomenat òxid

natiu. Tampoc cal oblidar altres processos, com ara l'oxidació anòdica de la punta(mostra), que es produeix quan aquesta es polaritza amb una tensió positiva(negativa) [Day 93, Gordon 95] (i que s'aprofita per als processos de nanolitografia amb AFM [Pérez-Murano 95]). Aquesta capa addicional d'òxid (ja sigui natiu, o bé per oxidació anòdica), pot alterar significativament els resultats experimentals. Una possible alternativa consisteix en triar un aliatge que sigui força estable. Estudis realitzats per altres autors [Olbrich 99c] han mostrat que, d'entre tots els aliatges metàl·lics, els que ofereixen millors prestacions són els de Co/Cr i Pt/Ir. La millor solució però, passa per la utilització de puntes d'un material completament diferent: el diamant. És un dels materials més estables que es coneixen i això el converteix en un dels més adients.

Altres propietats.

Un dels principals problemes que es deriva dels requisits mecànics i químics que cal exigir a les puntes és la pèrdua de la conductivitat elèctrica. Les propietats elèctriques són, ja sigui per desgast mecànic o a causa de l'oxidació, les que es veuen més afectades quan es fan experiments amb C-AFM [Porti 00]. Finalment, no hem d'oblidar que la caracterització elèctrica amb C-AFM també requereix de puntes tèrmicament estables. Els nivells de corrent que es mesuren (pA o superiors) són prou elevats com per a provocar la seva fusió degut a la calor alliberada per efecte Joule [Lantz 98]. Per aquest motiu, és convenient que les puntes estiguin fetes d'un material que tingui un punt de fusió alt, d'entre els quals destaca, novament, el diamant.

2.4.2. Les puntes utilitzades: puntes de diamant, Co/Cr i Pt/Ir.

Per a la realització d'aquesta tesi s'han fet servir puntes metàl·liques i puntes de diamant. Les primeres són puntes comercials de Si recobertes amb una capa d'un aliatge de Co/Cr o Pt/Ir. D'entre les puntes de diamant, cal diferenciar les de Si sobre les que se n'ha dipositat una capa i les que s'han fabricat íntegrament amb aquest material. Per tal que el diamant tingui propietats conductores, s'ha dopat amb Bor, adquirint una resistivitat final de 0.1-0.2Ωcm. Mentre que les de Co/Cr i Pt/Ir són comercials, les de diamant són el resultat del treball de recerca de diferents grups d'investigació [Niedermann 96, Niedermann 98, Olbrich 99b]. En aquesta secció, es descriurà quines són les característiques més importants de cadascuna d'elles.

Puntes metàl·liques de Co/Cr i Pt/Ir.

Corresponen a puntes de Si recobertes d'un aliatge de Co/Cr o Pt/Ir. Estudis previs [Olbrich 99c] demostren que els aliatges de Co són els que presenten una major resistència al desgast mecànic. D'altra banda, el Cr és un element químicament molt estable, de manera que l'aliatge de Co/Cr és un dels que pot oferir millors prestacions a l'hora de realitzar mesures elèctriques mitjançant un C-AFM. La constant de força (K) d'aquests cantilevers és ~3 N/m i el seu radi típic de curvatura s'ha determinat experimentalment mitjançant imatges SEM (*Scanning Electron Microscopy*, Fig. 2.6.a), obtenint-se valors de l'ordre dels 50nm (lleugerament superior al radi de les mateixes puntes de Si sense haver-hi dipositat cap capa metàl·lica). En aquesta tesi també s'han utilitzat tips recobertes de Pt/Ir. En aquest cas, la constant de força és ~0.2 N/m. El problema més important associat a aquestes sondes (tant les de Co/Cr com les de Pt/Ir) és la facilitat amb la qual poden perdre la conductivitat, ja sigui, o bé degut al desgast mecànic mentre s'escombra la superfície, o bé a causa de processos d'oxidació anòdica [O'Shea 95, Murrell 93, Porti 00].

Puntes de diamant.

Una millora substancial s'aconsegueix utilitzant puntes de Si recobertes amb una capa de diamant dopat amb Bor. El diamant ofereix unes prestacions en quant a duresa, resistència mecànica i estabilitat química i tèrmica, molt millors que no pas qualsevol altre aliatge metàl·lic, i això el converteix en un dels materials més idonis per a la realització de mesures elèctriques amb C-AFM. Amb aquest tipus de puntes és possible realitzar diferents escombrats sobre una mateixa mostra sense que pateixi canvis significatius. El problema més important és la resolució lateral. La tècnica de creixement de la capa de diamant (deposició per CVD, *Chemical Vapor Deposition*) requereix com a mínim un gruix de 100nm si es vol aconseguir un grau d'uniformitat prou elevat com per a permetre mesures amb C-AFM (Fig. 2.6.b).

La millor alternativa per a resoldre la baixa resolució lateral de les puntes recobertes amb una capa dipositada al seu extrem consisteix en la utilització de tips fabricades íntegrament amb un únic material. Com ja s'ha esmentat anteriorment, en el nostre cas, el material més adequat és el diamant. El problema resideix en desenvolupar una tecnologia que permeti créixer puntes molt afilades i amb un radi petit, doncs les tècniques utilitzades per a treballar aquest material no estan tan desenvolupades com les del Si. Malgrat això, en [Niedermann 98] es descriu un mètode per a la fabricació de puntes piramidals de diamant amb un radi típic de 20-40nm (tot i tenir un semiangle de conus relativament elevat). Poc després, es desenvolupà un mètode per al creixement d'una superpunta (mitjançant un Focus Ion Beam, FIB) [Olbrich 99b] sobre aquestes puntes de diamant amb unes prestacions geomètriques comparables a les puntes de Si. Amb aquesta tècnica es poden obtenir supertips amb radis de 30nm (Fig. 2.6.c). La seva resistència mecànica fa que puguin suportar forces de l'ordre de 100nN sense que experimentin un desgast significatiu en molts escombrats. Pel que fa referència a la seva conductivitat, sotmeses a forces petites (100nN) tenen una resistència elèctrica de contacte inferior a 1MΩ. Si s'augmenta la força de contacte (amb el perill però, d'augmentar el desgast mecànic) la resistència pot arribar a ser fins i tot inferior [Snauwaert 96].

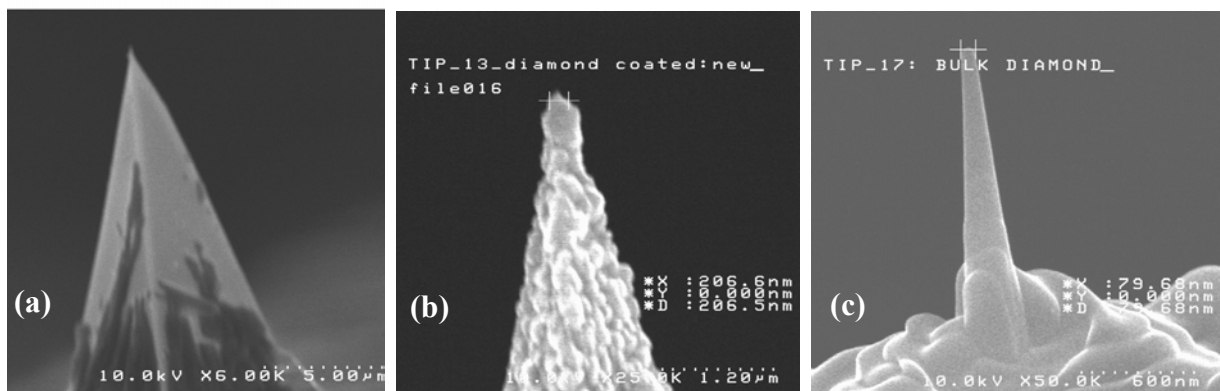


Fig. 2.6. Imatges SEM de (a) una punta de Co/Cr; (b) una punta de Si recoberta d'una capa de diamant i (c) una superpunta de diamant fabricada amb FIB a l'apex d'un tip del mateix material.

Com a conclusió final, en aquesta secció s'ha demostrat que, per a la caracterització elèctrica d'òxids, les puntes que ofereixen millors prestacions tant des d'un punt de vista mecànic com químic són les de diamant (veure taula 2.7). D'altra banda, les puntes metàl·liques es desgasten i s'oxiden amb més facilitat. Modificacions alternatives de les

puntes de diamant permeten millorar la seva geometria i, per tant, la seva resolució lateral. Malgrat això, depenent del tipus de test a realitzar, les puntes metàl·liques poden oferir prestacions suficients. Per exemple, en el cas d'estressos sobre punts localitzats, el problema associat a la pèrdua de la conductivitat degut al desgast mecànic desapareix.

	Si + capa de Co/Cr o Pt/Ir	Si + capa de diamant	Tip íntegra de diamant	Supertip de diamant
Radi	Mitjà	Gran	Mitjà	Petit
Resolució lateral	Mitjana	Baixa	Baixa	Alta
Duresa	Mitjana	Alta	Alta	Alta
Resistència mecànica	Mitjana	Alta	Alta	Alta
Estabilitat elèctrica	Mitjana	Alta	Alta	Alta
Estabilitat química	Mitjana	Alta	Alta	Alta
Estabilitat tèrmica	Mitjana	Alta	Alta	Alta

Taula 2.7. Característiques de les puntes utilitzades en aquesta tesi. En gris s'indiquen les puntes que ofereixen millors prestacions: les superpuntes de diamant.

2.5. El KPFM, una tècnica afí a l'AFM.

En aquesta secció es descriurà breument el *Kelvin Probe Force Microscope* (KPFM) [Weaver 91], una tècnica afí a la microscopia de forces atòmiques que, simultània i independentment a la topografia de la superfície, permet mesurar a escala nanomètrica la diferència de potencial de contacte (CPD) entre la punta i el substrat de l'estructura MOS.

Quan es posen en contacte dos materials diferents (com ara el metall i el semiconductor d'una estructura MOS), degut a la diferència de la seves funcions de treball (definida com l'energia que cal per alliberar un electró que es troba en un estat amb una energia equivalent a la del nivell de Fermi, Fig. 2.8.a), apareix un corrent d'electrons que flueix des del material amb una funció de treball inferior al material amb la funció de treball superior (Fig. 2.8.b). Aquest corrent dona lloc a una acumulació de càrregues en els dos elèctrodes (i, per tant, a una curvatura de les bandes de l'estructura) fins que s'assoleix l'equilibri, és a dir, fins que s'igualen els seus nivells de Fermi (Fig. 2.8.b) [Streetman 00]. L'estructura romandrà en aquesta situació mentre no s'apliqui cap tensió externa. En el moment que es polaritzi, els nivells de Fermi es desplaçaran i la unió quedarà novament fora de la situació d'equilibri (Fig. 2.8.c). La CPD es defineix com la tensió que cal aplicar per tal que els nivells de buit dels dos materials (elèctrodes en el cas de l'estructura MOS) tinguin la mateixa energia (Fig. 2.8.c). Tal com es pot veure a la Fig. 2.8, aquesta tensió correspon precisament a la diferència de les funcions de treball d'aquests materials. Aquest és precisament el principi de funcionament del KPFM. Aquesta tècnica permet determinar la diferència del potencial de contacte entre la punta i, en el nostre cas, el substrat de l'estructura MOS, mitjançant l'aplicació de la tensió necessària fins a igualar les energies de buit [Weaver 91]. Com que, en els experiments amb KPFM, un dels elèctrodes és la punta d'un AFM, aquesta tècnica permet reproduir mapes de la CPD amb una resolució nanomètrica.

Ara bé, cal tenir en compte que la CPD d'una estructura MOS no depèn només de la diferència de les funcions de treball dels elèctrodes, sinó també de la presència de càrrega en l'òxid de porta [Streetman 00]. D'altra banda, en seccions anteriors s'ha vist que un òxid, a mesura que es degrada, pot atrapar càrrega en el seu interior. Si això és així, la determinació de la CPD durant el procés de degradació i després de la ruptura podria aportar informació

adicional del fenomen BD. És en aquest sentit que s'ha utilitzat el KPFM. Concretament, s'ha mesurat la CPD d'òxids abans i després de la ruptura de manera que, si hi hagués alguna diferència, seria una indicació clara que durant el procés de ruptura s'ha atrapat càrrega al seu interior i que, per tant, se n'ha malmès la seva estructura interna. La informació aportada per aquesta tècnica doncs, complementarà la caracterització elèctrica realitzada amb C-AFM.

El KPFM utilitzat en aquesta tesi es troba a l'institut Hahn-Meitner, de Berlín, i consisteix en un AFM comercial (Omicron) que treballa en mode no-contacte. Tot i que un AFM pot treballar en condicions ambient, per a una determinació acurada de la CPD, el KPFM d'aquest laboratori ha estat equipat a fi de poder realitzar les mesures en condicions d'ultra-alt buit [Sommerhalter 99].

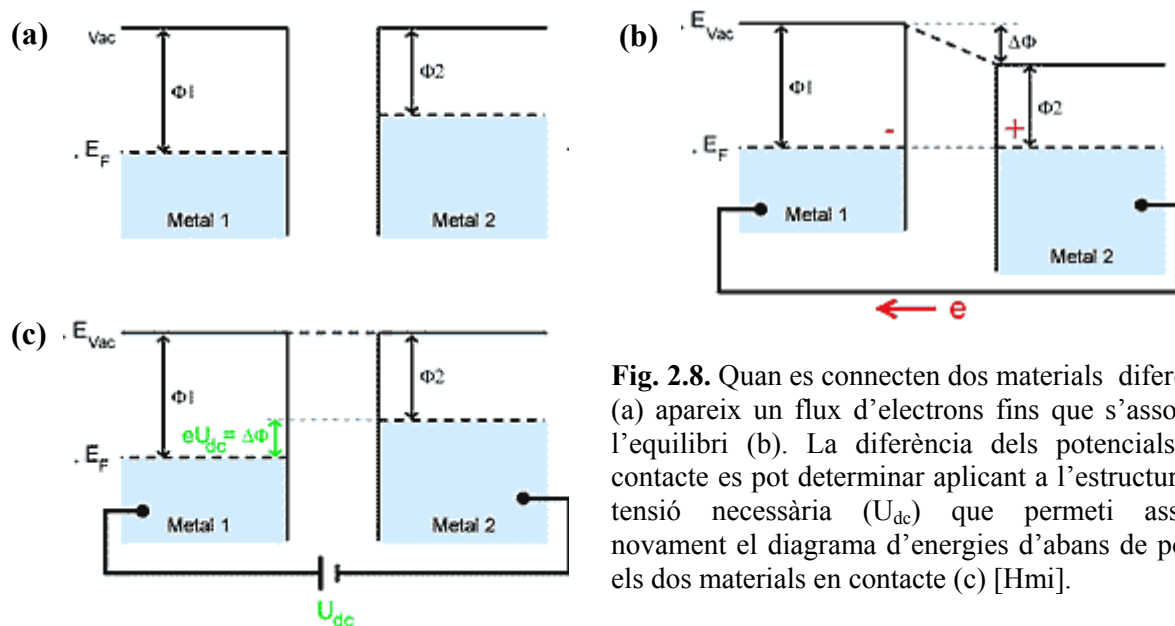


Fig. 2.8. Quan es connecten dos materials diferents (a) apareix un flux d'electrons fins que s'assoleix l'equilibri (b). La diferència dels potencials de contacte es pot determinar aplicant a l'estructura la tensió necessària (U_{dc}) que permeti assolir novament el diagrama d'energies d'abans de posar els dos materials en contacte (c) [Hmi].