

# La miniaturització dels circuits electrònics: efectes quàntics i dispositius nanoelectrònics

Pau Molinàs\* i Patrici Molinàs†

## Introducció

Des de mitjan anys setanta, els circuits electrònics que anomenem *integrats* o *IC* (de l'anglès *integrated circuits*), atès el seu elevat grau de miniaturització, constitueixen molts dels components electrònics dels aparells que ens envolten normalment. Estan fets bàsicament de silici i la seva existència ha modificat els costums de la societat. El resultat de la seva influència a la vida quotidiana és tan fort que podríem ocupar fàcilment l'article sencer enumerant les activitats humanes que, des de l'adveniment dels *IC*, han canviat. Esmentem-ne aquí tres per tal que el lector pugui copsar l'abast de les conseqüències d'aquesta miniaturització en un àmbit concret, el de les tecnologies de la informació i les comunicacions: les telecomunicacions, la mesura de magnituds de tota mena i la resolució de problemes numèrics.

Fabricar un circuit electrònic integrat significa alguna cosa més que disposar milions de transistors en una minúscula àrea de silici. No obstant això, el paradigma per assolir una capacitat de càlcul gran és la construcció de dispositius petits, distribuïts i connectats de manera òptima. Amb la disposició correcta dels dispositius en el circuit s'ha de facilitar la dissipació de la calor generada, per exemple, durant el procés de càlcul, i s'han de permetre freqüències de treball elevades i potències de consum baixes.<sup>1</sup> Calcular, comunicar i permetre la generació de coneixements més de pressa, utilitzant la informació necessària, i poder transportar físicament tant aquesta capacitat de càlcul com la mateixa informació, o accedir-hi des de la llunyania, justifica la necessitat de continuar la miniaturització dels circuits electrònics i dels suports físics d'emmagatzemament de la informació.

Si comparem els dispositius electrònics que s'empren actualment en els equips informàtics, en els ins-

truments i en els equips de comunicacions, amb els dispositius que s'utilitzaven majoritàriament en el passat —les làmpades de buit—, els *IC* converteixen qualsevol equip electrònic en un de molt més compacte, fiable i econòmic.<sup>2</sup> No obstant això, l'escala d'integració s'ha fet tan sorprenentment gran que la física clàssica té problemes a l'hora de descriure el comportament dels dispositius de la generació actual de circuits electrònics integrats. En efecte, cal incorporar resultats genuïns de la física quàntica, que és la que permet comprendre el mode de funcionament dels dispositius electrònics del futur que descriurem després, per poder explicar el comportament dels dispositius electrònics actuals. Això constitueix el que s'anomena la *descripció semiclàssica del seu funcionament*.

A l'hora de classificar tots els dispositius electrònics d'estat sòlid, els del passat, els del present i els que probablement ens trobarem en un futur immediat, hem triat un criteri com més sintètic millor. Atès que el funcionament dels dispositius del futur —vistes les seves dimensions reduïdes— només es pot descriure bé amb les lleis de la física quàntica, classifiquem els dispositius electrònics en funció de les lleis que permeten descriure'n el comportament. Per tal d'exemplificar aquest criteri, hem triat tres representants d'un dispositiu de dos terminals, el díode. El primer és un díode rectificador de silici, com ara l'1N4007, que és un dispositiu clàssic, ja que el corrent que el travessa ve descrit per la llei de Shockley, que s'obté avaluant el corrent de difusió de portadors minoritaris a les zones neutres, i on es tracten els electrons com a partícules. El segon és un díode túnel, com ara l'1N3718, que és un dispositiu semiclàssic, atès que, per tensions petites, de l'ordre d'algunes desenes de mil·livolts, el corrent s'obté integrant la transmissió electrònica per efecte túnel a través de la barrera que separa els estats buits de la banda de conducció dels plens de la banda de valència. L'efecte túnel és un fenomen quàntic derivat del comportament ondulatori que presenten també els electrons. Per a la resta de tensions, el corrent ve descrit correctament com a suma de l'anterior i el donat per l'equació de Shockley, que és el dominant per valors grans i positius de la

\* Pau Molinàs i Mata (Barcelona, 1961), és doctor en Ciències Físiques (Universitat Politècnica de Catalunya). És professor del Departament d'Enginyeria Electrònica d'aquesta universitat, [pmolin@eel.upc.es](mailto:pmolin@eel.upc.es).

† Patrici Molinàs i Mata (Barcelona, 1966), és doctor en Ciències Físiques (Universitat de Stuttgart). És investigador al centre de recerca de Sclay del Commissariat à l'Énergie Atomique, [pmolin@cea.fr](mailto:pmolin@cea.fr).

<sup>1</sup>No tractem aquí els avenços en computació quasiadiabàtica on s'evita esborrar informació i allunyar-se de l'equilibri per tal d'evitar la dissipació.

<sup>2</sup>No tractem aquí aquells àmbits de l'electrònica on les vàlvules continuen presents i no han estat desplaçades pels xips de silici.

tensió. Com a darrer representant hem triat un díode túnel ressonant, que és un dispositiu quàntic, ja que dins de tot l'interval de tensió, el corrent resultant ve donat a partir de la integració de la transmissió electrònica per efecte túnel, a través de la doble barrera; la transmissió i, per tant, el corrent són màxims quan es produeix el fenomen ondulatori de la ressonància. Els electrons, doncs, són descrits arreu en un díode túnel ressonant, com a ones. Aquest fet és habitual a l'hora d'explicar el comportament detallat de molts dels dispositius actuals que presenten especificitats que els diferencien de les seves versions clàssiques i que només es poden descriure bé dins del marc de la física quàntica.

Per tal d'avaluar la relació entre la capacitat de càlcul d'un circuit i la seva mida, podríem limitar-nos a considerar el nombre d'unitats d'un element concret, present arreu del circuit, i prescindir de l'arquitectura del circuit. Aquest element de referència podria ser el transistor, que és un dispositiu de tres terminals, amb el qual es poden realitzar tant les funcions electròniques de commutació com les d'amplificació. Atès que la majoria de funcions electròniques es poden realitzar amb circuits fets amb transistors, malgrat que hi hagi altres elements o blocs circuitals amb els quals fer aquestes funcions, escollim el transistor, ja que aquests altres elements, com ara un amplificador operacional o un sumador, inclouen transistors en el seu si, i per tant, les seves dimensions són més grans i ocupen més espai. A partir d'ara, doncs, considerarem el transistor com la unitat funcional, bàsica i mínima, de referència en el nostre propòsit de descriure els obstacles quàntics en la miniaturització de la majoria dels dispositius microelectrònics.

En la microelectrònica hi ha diferents menes de transistors, però les lleis que els descriuen són les mateixes i per això n'escollirem un de concret entre tots els que existeixen. Per fer-ho tindrem en compte una de les tecnologies de fabricació de dispositius electrònics més difosa actualment, la CMOS (de l'anglès *complementary metal-oxide-semiconductor*). Aquesta tecnologia de fabricació té per unitat elemental un transistor d'efecte de camp o FET (de l'anglès *field-effect transistor*), que rep el nom de MOSFET. D'ara endavant, l'agafarem com a representant de la resta de dispositius de la microelectrònica i analitzarem com l'afecta el procés de miniaturització a escala nanomètrica abans de presentar els dispositius que anomenarem nanoelectrònics. Això no obstant, les dificultats que descriurem són semblants a les que afecten altres transistors, com ara els transistors bipolars de junció o BJT (de l'anglès *bipolar junction transistors*), i la resta de dispositius microelectrònics.

Com a exemple de la relació entre el progrés en la capacitat de càlcul dels ordinadors i la mida dels seus transistors, podem esmentar que durant el darrer quart de segle<sup>3</sup> la mida lateral d'un MOSFET s'ha dividit per

50 aproximadament. Hem passat de 10  $\mu\text{m}$  a distàncies submicromètriques; d'una escala d'integració dels circuits gran o LSI (de l'anglès *large scale integration*), que comprèn entre  $10^3$  i  $10^5$  transistors en un mateix IC, i que ja havia succeït a la primera generació de circuits integrats, anomenada SSI (de l'anglès *small scale integration*), a una de molt gran o ULSI (de l'anglès *ultra large scale integration*), que s'assoleix quan es disposa d'entre  $10^6$  i  $10^7$  transistors per IC. La ULSI ha succeït la tercera generació de circuits integrats, anomenada VLSI (de l'anglès *very large scale integration*). El pas de la integració LSI a la ULSI ha representat poder integrar 1.000 cops més transistors en una mateixa àrea o dau de silici per formar un circuit integrat, popularment conegut també amb el nom de xip, de funcions i capacitats cada cop més espectaculars. Ara mateix, el futur immediat són els circuits d'una escala d'integració GSI (de l'anglès *giga scale integration*), 10 cops més gran, és a dir, que comprèn entre  $10^7$  i  $10^8$  transistors per IC.

En el cas del fabricant de xips Intel, líder mundial en la fabricació de microprocessadors, podem descriure l'augment de la capacitat de càlcul dels seus microprocessadors Pentium a partir del nombre de transistors que conté cada un: el Pentium (de l'any 1994) en tenia  $3,1 \cdot 10^6$ , el Pentium Pro (1996),  $5 \cdot 10^6$ , el Pentium II (1997),  $7,5 \cdot 10^6$  i en el Pentium III (1999), el nombre de transistors arriba pràcticament als deu milions d'unitats:  $9,5 \cdot 10^6$ .<sup>4</sup> Pel que fa a la velocitat de funcionament, es pot caracteritzar amb la freqüència de rellotge, que ha passat d'unes desenes de MHz (amb els primers Pentiums) a unes quantes centenars. Així doncs, en aquests darrers cinc anys la integració de transistors s'ha multiplicat per 3, mentre que la freqüència de rellotge ho ha fet per un factor 10. Tal com hem advertit, malgrat que en aquest article tractarem només la miniaturització, l'arquitectura del microprocessador i la seva programació tenen un pes cada cop més rellevant sobre la capacitat i la velocitat de càlcul d'un xip.

Els xips més avançats del mercat tenen MOSFET amb mides laterals de 0,35  $\mu\text{m}$ . Els investigadors que treballen en la miniaturització de transistors produïts en sèrie auguren que, en els propers 10 o 15 anys, les dimensions laterals d'aquests disminuiran per sota dels 100 nm. Una miniaturització tan significativa comportarà dificultats de producció encara no resoltes, i unes despeses de producció que, si tenim en compte la necessitat d'utilitzar altres tècniques que les usades en

incloua en el seu interior el microprocessador i la resta de sub sistemes que abans formaven unitats especialitzades i independents de l'ordinador, fet que significà un pas decisiu en la miniaturització dels dispositius.

<sup>4</sup>El nombre de transistors per IC continua augmentant, tal com predià la llei de Moore, malgrat que el ritme de miniaturització variï i depengui del tipus de circuit, i sigui diferent, per exemple, en les memòries que en els microprocessadors. El ritme de miniaturització depèn també de factors econòmics, com ara els costos de fabricació, els de distribució i l'existència de mercats.

<sup>3</sup>Recordem que l'any 1976 és quan va aparèixer el primer IC que

l'actualitat (com per exemple la microlitografia de raigs X), resultaran força més elevades, almenys en un principi, ateses les dificultats intrínseques de fabricació i les comprensibles noves disposicions legals —cada cop més restrictives— de respecte al medi ambient, tant durant la fabricació del circuit com després, durant el seu funcionament i, en acabat, en caure en desús. Aquests constreyniments demanen inversions importants en el disseny dels dispositius i circuits nanomètrics. Cadascuna de les etapes (SSI, LSI, VLSI i ULSI) del procés de miniaturització dels dispositius (primer mil·limètrics i després micromètrics) ha tingut els seus alts i baixos. Fins ara, els científics han trobat el desllorigador per seguir miniaturitzant i els factors econòmics favorables ho han permès.

La nova etapa de miniaturització (GSI), que ens ha de portar dispositius nanomètrics, tindrà un moment clau que afectarà les bases del disseny dels dispositius i dels circuits. Caldrà un canvi radical en el disseny dels circuits electrònics. Es passarà de dissenyar “malgrat” els efectes quàntics, a fer-ho tenint-los presents en el principi de funcionament no solament del dispositiu sinó també del circuit dissenyat. Per tant, per seguir miniaturitzant els circuits electrònics és necessari trobar alternatives al MOSFET que no operin gràcies al moviment de grans quantitats d'electrons en un volum de semiconductor, sinó basant-se en el comportament mecanico quàntic a escala nanomètrica. Per tal que aquests nous dispositius electrònics de mides nanomètriques puguin substituir els de la microelectrònica, han de realitzar les funcions pròpies del transistor (commutació i amplificació).

És important remarcar que en aquest treball descrivim únicament els límits derivats d'efectes quàntics en la miniaturització del MOSFET. Així doncs, la nova electrònica que està naixent respon a la pregunta: com hauríem de dissenyar una estructura funcional, bàsica i mínima (l'equivalent del transistor) i el seu entorn, si en lloc de fer-ho “malgrat” les lleis del món nanoscòpic ho féssim “a partir” de les lleis del món nanoscòpic? Seguir miniaturitzant els dispositius “malgrat” les lleis que regeixen el món nanoscòpic no correspon pas a una actitud generalitzada en el món de l'electrònica, ja que ja existeixen diversos dispositius al mercat el disseny dels quals s'ha fet fonamentant-se en efectes quàntics. Vegem-ho.

En la memòria EEPROM (de l'anglès *electrically erasable programmable read only memory*), d'ús generalitzat en electrònica digital, el funcionament d'un dels seus dispositius, el transistor de porta flotant, està basat en un efecte quàntic: l'efecte túnel. En aquest dispositiu la càrrega i descàrrega de la porta es realitza mitjançant un corrent túnel a través d'un òxid prim. Aquestes memòries són molt utilitzades per emmagatzemar la informació de configuració d'un sistema electrònic que es manté sense necessitat d'alimentar el sistema. Com a

exemple d'un altre dispositiu basat en efectes quàntics i d'importància tant en electrònica analògica com en digital, citem el ja esmentat díode túnel ressonant (RTD) que s'utilitza com a oscil·lador en les comunicacions a la banda de les microones i que fou incorporat per primer cop l'any 1993 en l'àmbit digital, en concret en el disseny d'un sumador, l'IC del qual fou comercialitzat per Texas Instruments. La incorporació d'uns quants RTD reduí considerablement l'àrea ocupada pel bloc circuital i permeté continuar el procés d'integració. Citem també, amb relació als suports de la informació, els discs durs dels ordinadors, i l'emmagatzemament magnètic de la informació, que també està afectat pel procés de la miniaturització. Pensem que l'efecte túnel de spin també posa un límit a la densitat d'informació emmagatzemada en aquests suports.

En aquest article discutirem, doncs, només els dispositius d'estat sòlid basats en efectes quàntics, com ara l'efecte túnel, la quantització dels nivells energètics o la discretització de la càrrega elèctrica, deixant de banda altres dispositius electrònics basats també en efectes quàntics deguts, però, a la interacció entre molècules. Sabem que la fabricació de dispositius nanoelectrònics d'estat sòlid basats en efectes quàntics constitueix l'aproximació al problema de fabricar dispositius nanomètrics més estesa dins de la comunitat científica internacional. La raó és fonamentalment històrica: la majoria de grups d'investigació segueixen aquesta via ja que suposa construir dispositius on el principi de funcionament és diferent del dels transistors clàssics, però les matèries primeres són les mateixes. En efecte, alguns investigadors ja han estat capaços d'aprofitar llur experiència de 50 anys treballant en semiconductors en volum, per desenvolupar, fabricar i emprar en circuits nous dispositius de propietats força prometedores. En el cas de l'electrònica molecular —que no discutirem aquí— no és tan sols el principi de funcionament, que és diferent al del transistor, sinó també els materials utilitzats.

Tot seguit analitzarem les possibles limitacions a la miniaturització del MOSFET. Després de proporcionar les bases per a la comprensió del funcionament dels dispositius nanoelectrònics, en descriurem quatre representants: el díode túnel ressonant (RTD), el transistor túnel ressonant (RTT), el punt quàntic (QD) i el transistor d'un únic electró (SET).

## Transistors de la microelectrònica: obstacles a la miniaturització

En els circuits digitals s'utilitza el transistor com un commutador o dispositiu de dos estats. L'estat en què es troba serveix per fixar la tensió d'un fil conductor de sortida, que pot ser alta o baixa. Aquesta tensió representa un 1 o un 0 en lògica binària. Les funcions lògiques i aritmètiques s'implementen en un circuit construït usant els transistors (o grups de transistors) com

a commutadors. L'altra funció del transistor en un ordinador és l'amplificació. Un senyal d'entrada petit pot controlar un senyal de sortida força més gran. L'amplificació permet la transmissió de senyals a través de commutadors sense que la intensitat del senyal disminueixi. Els tipus de transistors més usats actualment són el transistor d'efecte de camp (MOSFET) de tecnologia de metall, òxid i semiconductor complementària (CMOS) i el transistor bipolar de junció (BJT). Mentre que en el BJT la característica de sortida sol parametritzar-se a partir de la intensitat de base, en el MOSFET la sortida es controla amb la tensió de la porta.

## El MOSFET

El MOSFET s'ha convertit, sense cap dubte, en el transistor més habitual dels circuits digitals de la microelectrònica, des que Shockley inventà el dispositiu l'any 1951. Tot dispositiu CMOS està format per mitjà de l'unió de dos MOSFET. Un MOSFET està compost de

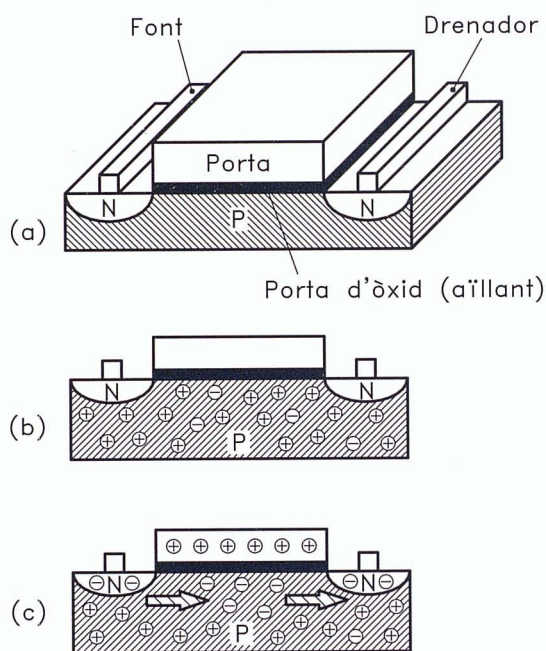


Figura 1: Esquema de la secció d'un MOSFET de tipus n d'acumulació. (a) El MOSFET consta de tres elements fonamentals: la font (*source*), la porta (*gate*) i el drenador (*drain*). En el MOSFET de tipus n o NMOSFET, font i drenador estan connectats a zones n-Si inserides en un volum de p-Si. (b) Quan no apliquem cap tensió a l'electrode, no hi ha cap corrent que circuli a través del dispositiu. (c) Per contra, quan s'aplica a l'electrode una tensió positiva, prou gran, els electrons (cercles negatius) s'agrupen prop de la banda aïllant i, per tant, se separen dels forats (cercles positius) formant així un "canal" que permet que un corrent (fletxes ratllades) circuli entre la font i el drenador

tres parts: una font, un drenador i una porta, que actua com a interruptor, i és responsable d'obrir i tancar el pas

del corrent que circula entre la font i el drenador (vegeu la figura 1). Una fina capa de diòxid de silici, l'aïllant de la porta, separa la porta de la resta del canal semiconductor. S'afegeixen durant el procés de fabricació dopadors i petites quantitats d'impureses al semiconductor per tal de crear excessos o déficits d'electrons a la font i al drenador.

En absència de tensió a la porta, en un MOSFET dels anomenats d'acumulació, una barrera de material dopat diferentment evita que el corrent circuli de la font al drenador. No obstant això, quan apliquem una tensió a la porta, el camp elèctric creat fa disminuir la barrera i permet que el corrent circuli. La tecnologia CMOS és "complementària" en el sentit que la polaritat de la tensió que fa que un dels MOSFET deixi passar el corrent, fa que el complementari no el deixi circular, ja que s'utilitzen dopadors diferents per formar les regions anàlogues del MOSFET complementari. Gràcies a aquest comportament complementari, cap corrent circula pel dispositiu excepte quan està commutant. D'aquesta manera, la majoria dels circuits CMOS, contràriament als circuits MOS ordinaris, que presenten circulació de corrent fins i tot en l'estat d'apagat (*off*), despenen molt poca potència. Aquí però, ens limitarem a parlar només del MOSFET com a unitat individual i a comparar-lo amb dispositius més recents.

Malgrat que el disseny de dispositius commutadors d'escala nanomètrica, que discutirem a continuació, funciona seguint principis força diferents dels d'un MOSFET, manté els mateixos elements bàsics del FET: la font, el drenador i, sovint, la porta, que fan les mateixes funcions que en el MOSFET. Segurament, el canal a través del qual circulen els electrons entre font i drenador és l'element que més s'ha alterat en la transició cap als dispositius nanoelectrònics. Conseqüentment, per introduir aquests dispositius des d'un context familiar i establir comparacions amb la tecnologia convencional, explicarem breument el mode de funcionament d'un MOSFET de tipus n, com el de la figura 1.

Un MOSFET es fabrica sobre un substrat de silici cristallí dopat. És necessari introduir impureses de valència III o V, com per exemple bor o arsènic, per tal de crear un excés de portadors negatius o positius i així augmentar la baixa conductivitat del silici intrínsec. El silici dopat negativament (n-Si) conté electrons lliures que poden moure's a través del semiconductor. El silici dopat positivament (p-Si) conté vacants d'electrons, anomenats també forats, que actuen com a càrregues positives lliures. Un electrode metàl·lic o de silici policristallí separat del semiconductor per una capa fina aïllant fa de porta del MOSFET. El camp elèctric associat a aquesta tensió regula el pas de corrent de la font al drenador. Aquesta és la raó per la qual el dispositiu rep el nom de transistor d'efecte de camp. Quan aquesta tensió és feble, en un MOSFET de

tipus n d'acumulació, la regió dins del material **p-Si** entre la font i el drenador conté pocs portadors negatius i, en conseqüència, el corrent resultant és molt petit (vegeu la figura 1a). Al contrari, en augmentar prou la tensió, els electrons s'agrupen a la regió de sota de la porta, de manera que s'obre un canal i es permet que una gran quantitat d'electrons passi de la font al drenador, sempre que existeixi una diferència de potencial entre el drenador i la font. Aquest dispositiu s'utilitza com a amplificador, ja que petites variacions de la tensió de la porta es converteixen en canvis molt grans de la conductivitat. Atès que aquest canvi és de molts ordres de magnitud, el MOSFET pot utilitzar-se també com un dispositiu digital binari i, de fet, aquest és l'ús majoritari que se li dona en la tecnologia CMOS. Els nanodispositius que presentarem aquí també permeten les esmentades modalitats de funcionament d'amplificació i commutació.

Fins ara, s'ha reduït moltíssim la grandària dels circuits en disminuir-ne les dimensions lineals dels elements constituents. La disminució no pot afectar d'igual manera tots els elements d'un transistor, tal com explicarem a continuació, ja que, aleshores, el transistor pot deixar de funcionar correctament. A principis dels anys setanta, Dennard, inventor de la memòria dinàmica d'accés aleatori o DRAM (de l'anglès *dynamic random access memory*), i els seus col·laboradors a IBM van determinar quines lleis d'escala havien de seguir els diferents paràmetres d'un transistor en funció de les seves dimensions lineals per tal que, encara que el transistor fos més petit, continués funcionant correctament. Una de les lleis d'escala de Dennard estableix que la intensitat del camp elèctric de la porta que crea el canal de conducció a l'interior del transistor ha de mantenir-se constant. Això significa que la tensió de porta utilitzada per commutar hauria de disminuir proporcionalment a les dimensions del transistor. No obstant això, Dennard i els seus col·laboradors van adonar-se que la disminució de la tensió de la porta necessària per commutar un transistor està limitada per l'energia tèrmica dels electrons. Atès que aquesta energia només depèn de la temperatura, no varia amb el factor d'escala. Això indica que hi ha un llindar inferior per a la tensió de porta. Habitualment es pren com a llindar inferior per a la tensió de la porta, una tensió 10 vegades superior a l'associada a l'energia tèrmica dels electrons, que és de l'ordre de 25-30 meV a temperatura ambient, és a dir,  $\approx 0,3$  V. Per sota d'aquest valor de la tensió de porta, el transistor treballa més lentament ja que el canal és menys conductor. Atès que un augment de la velocitat és un dels principals objectius de la miniaturització, no convé disminuir la tensió de porta per sota del llindar que acabem d'esmentar. Però mantenir la tensió de porta per damunt dels 0,3 V a la vegada que es disminueix el gruix de la capa d'òxid i el gruix del substrat, pot significar que electrons del canal s'introdueixin a l'inte-

rior de l'òxid i/o que sorgeixin corrents incontrolats a través del substrat entre diferents elements de transistors veïns.

El MOSFET continua sent popular i ha pogut sobreviure a la miniaturització dels circuits integrats perquè el seu rendiment ha canviat molt poc i s'ha mantingut la bona relació qualitat-preu en les successives miniaturitzacions. El fabulós avanç té per resultat els productes comercials disponibles avui al mercat: un xip Pentium III d'Intel, per exemple, conté pràcticament 10 milions de transistors amb una mida lateral aproximada de 300 nm per transistor. Tanmateix, a mesura que el MOSFET assoleix mides de l'ordre de 100 nm o menys, la miniaturització —fins ara imparable i econòmicament rendible— pot arribar a sentir els seus límits.

### Principals obstacles a la miniaturització

Malgrat els grans reptes que suposa la miniaturització, són molts els membres de la comunitat científica i de la indústria que prediuen variants molt semblants als transistors convencionals que podran ser miniaturitzats fins a l'escala nanomètrica. De fet, s'ha demostrat que alguns NMOSFETs de silici poden treballar *individualment* de forma correcta malgrat que la longitud de la seva porta sigui molt petita, de l'ordre de 40 nm. Encara és més curta la porta d'alguns transistors d'alta mobilitat electrònica (HEMT) fets de GaAs, amb portes de 25 nm. De qualsevol manera, no està clar que aquests transistors puguin ser reproduïts d'una manera suficientment uniforme i fiable per poder construir un ordinador on se'n trobin milions integrats en circuits electrònics.

A més a més, quan el diàmetre d'un fil metàl·lic disminueix a l'escala nanomètrica, la resistència augmenta uns quants ordres de magnitud, cosa que fa difícil el pas del corrent. Això suposa que una xarxa densa d'aquests transistors podria dificultar fàcilment el funcionament ràpid d'un circuit, ja que el corrent entre els minúsculs transistors hauria de passar d'un a l'altre a través de minúsculs fils metàl·lics.

Es poden trobar en els textos especialitzats estudis detallats de les limitacions fonamentals en l'ús d'un conjunt de circuits electrònics miniaturitzats així com dels problemes intrínsecs a la miniaturització dels MOSFET. Esmentem a continuació alguns dels obstacles que segurament apareixeran en intentar miniaturitzar els MOSFET a l'escala nanomètrica ( $\approx 10$  nm). A més a més del problema de la transmissió del senyal que hem comentat més amunt, presentem una llista d'altres obstacles a la miniaturització nanomètrica de MOSFET. L'ordre escollit correspon al grau de dificultat, de major a menor:

1. Aconseguir que la capa d'òxid situada sota la porta s'aprimí uniformement garantint l'aïllament elèctric entre la porta i el canal. Per a un bon funcionament del MOSFET és imprescindible que no flueixi cap corrent elèctric entre la porta i el canal. Si no és així parla-

rem d'un corrent de fuga, que es pot entendre com un fenomen de percolació elèctrica que involucra el pas d'electrons per *efecte túnel* o per *efecte de camp* a través de capes intermèdies de l'òxid de porta. La percolació elèctrica és el fenomen crític que consisteix en un canvi abrupte de la conductivitat d'un material.

2. Reduir la distància entre la font i el drenador sense que aquesta esdevingui prou transparent als electrons per fer aparèixer un corrent entre la font i el drenador quan la porta no està polaritzada. Modelem el canal entre la font i el drenador mitjançant una barrera de potencial. Aquest corrent espuri seria el resultat del flux d'electrons que, per efecte túnel, passarien de la font al drenador, en ser la barrera de potencial que els separa prou feble per observar aquest efecte quàntic.

3. Reduir la mida de totes les zones dopades sense que la manca d'uniformitat del dopat a l'escala nanomètrica suposi un canvi en les propietats de volum dels diferents elements del dispositiu. Sembla que aquesta dificultat pot ser superada suprimint la necessitat de dopar. En lloc de dopar s'utilitzen barreres de potencial que confinen o exclouen els electrons en les diferents regions del MOSFET afegint un contacte de porta a cada regió. Una altra solució al problema consisteix a situar els àtoms formant una estructura geomètrica per garantir una certa uniformitat en la zona d'interès. És evident que la segona solució requeriria un control a l'escala atòmica de la posició dels dopadors en volum, a excepció que n'hi hagués de sobres en superfície. Aleshores les microscòpies de nova generació, com la microscòpia d'efecte túnel o de forces atòmiques, podrien permetre ordenar els àtoms en les configuracions desitjades.

4. Reduir la dissipació tèrmica dels transistors sense que això comporti una deterioració o un funcionament incorrecte del dispositiu a causa d'un escalfament excessiu, atès que en miniaturitzar disminueixen les vies de dissipació de calor. Això sembla un problema que afectarà tot tipus de circuits basats en la interconnexió de dispositius en el cas d'una densitat d'integració més elevada que la ULSI, ja que la densitat de cablejat d'un xip augmenta exponencialment amb el nombre de dispositius. Per disminuir l'escalfament, es poden utilitzar tensions més baixes, amb l'inconvenient que disminueixi la fiabilitat de la transferència del senyal. Possibles solucions per evitar connexions de llarg abast provenen dels estudis de diferents configuracions de connexions basant-se en conceptes propis de les xarxes neuronals i automats cel·lulars. Esmentem aquí el fet que els circuits CMOS —contràriament als circuits més primitius de tecnologia no complementària pels quals circulen corrents fins i tot en l'estat apagat— consumeixen molt poca potència, cosa que permet d'integrar-ne molts en un mateix xip.

5. Evitar els efectes dels altíssims camps elèctrics, de l'ordre de  $10^8$  V/m, que apareixen en aplicar tensions de l'ordre del volt (1 V) entre punts separats alguns

nanòmetres ( $10\text{ nm} = 10^{-8}\text{ m}$ ). Aquests camps gegants poden produir allaus d'electrons que fan malbé el dispositiu. L'efecte allau o la ruptura elèctrica ja es produeix en volums micromètrics de material semiconductor i es tracta, doncs, d'una dificultat intrínseca a l'ús volumètric dels semiconductors que s'incrementa en utilitzar, en volums més petits, tensions del mateix ordre de magnitud, com hem discutit en introduir les lleis d'escala de Dennard. Recordem que la tensió de porta ha de ser uns 10 cops superior a la tensió associada a l'energia tèrmica dels electrons.

L'obstacle termodinàmic a la miniaturització d'un MOSFET, la dissipació de la calor, suggereix que fóra desitjable trobar substituïts dels MOSFET que permetin la construcció de circuits que puguin fer les mateixes funcions amb menys dispositius commutadors. En el següent apartat descriurem aquests dispositius. A part de la dissipació tèrmica (apartat 4) i la presència de camps elèctrics intensos (apartat 5), els obstacles més fonamentals, segons el nostre parer, sorgeixen perquè les propietats clàssiques del volum del sòlid deixen de ser les rellevants a favor de les propietats quàntiques d'uns quants àtoms. Entenem per dispositiu semiconductor microscòpic un dispositiu semiconductor a les zones actives del qual tinguin un volum de l'ordre de  $10^9$  àtoms o més, mentre que el nanoscòpic té  $10^4$  àtoms o menys.<sup>5</sup> Les propietats associades al conjunt d'àtoms són menys importants per al funcionament del dispositiu que les propietats de cada un dels àtoms si aquest està format, per exemple, només per uns 100 àtoms. Passar del món microscòpic al nanoscòpic comporta tenir en compte el caràcter discret de la matèria i de la càrrega elèctrica així com els efectes quàntics: l'efecte túnel i la quantificació de l'energia. A l'hora de construir un dispositiu d'electrons les dimensions del qual siguin nanomètriques o moleculars, sembla més prudent i avantatjós que el funcionament del dispositiu es basi en el caràcter discret de la matèria i de la càrrega, i en els efectes quàntics, en lloc de "treballar malgrat ells".

Fins aquí hem exposat els principals obstacles a la miniaturització del MOSFET, el mode de funcionament del qual ha estat descrit per tal de permetre la comparació amb els dispositius nanoelectrònics basats en els efectes quàntics que descrivim a continuació.

## Dispositius nanoelectrònics d'estat sòlid

Per tal de superar els obstacles a la miniaturització dels FET que hem descrit anteriorment, s'han fabricat dispositius d'estat sòlid de mides nanomètriques que aprofiten el comportament quàntic dels electrons. Tal com veurem, tots aquests dispositius tenen una característica comuna: la presència d'una petita illa metàl·lica o semiconductor on els electrons estan confinats. La composició,

<sup>5</sup>Un dispositiu *mesoscòpic* és aquell les dimensions del qual estan entre les dels microscòpics i les dels nanoscòpics.

la forma i les dimensions d'aquesta illa determinaran el tipus de dispositiu. El control d'aquests paràmetres permet al dissenyador de dispositius d'utilitzar de manera diferent els efectes quàntics per regular el pas dels electrons de la font a l'illa i de l'illa al drenador.

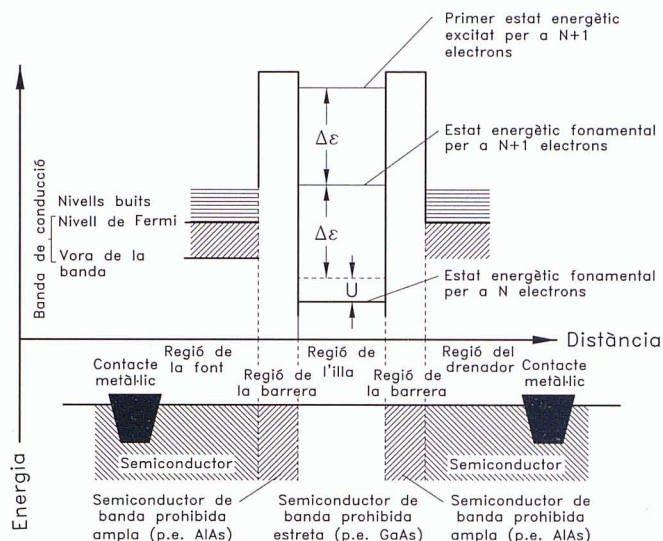


Figura 2: Pou quàntic per a un díode túnel ressonant. Les barreres de potencial que voregen l'illa creen el pou de potencial que veiem en la part superior de l'esquema. L'energia dels electrons que es troben atrapats en el pou no pot ser qualsevol; l'energia està quantitzada; tan sols es possible trobar electrons en els nivells o estats que hem assenyalat amb línies horitzontals. Els electrons lliures a la regió de la font (i a la regió del drenador) ocupen el continu d'estats entre la vora de la banda de conducció i l'energia de Fermi. Suposem que tenim  $N$  electrons atrapats en  $N$  nivells de l'illa, l'energia necessària per afegir un altre electró a l'illa, correspon a la suma d'una energia de càrrega,  $U$ , i d'una energia d'excitació,  $\Delta\epsilon$ . En el cas d'un RTD,  $U$  és molt més petita que  $\Delta\epsilon$ . A la figura, exagerem el valor de  $U$  per raó de claredat

Per exemple, la mitjana del recorregut espacial d'un electró entre dos xocs consecutius (o recorregut lliure mitjà) pot arribar a ser molt més gran en un semiconductor que en un metall. En altres paraules, un electró pot viatjar coherentment (sense xocar) a través d'una illa semiconductora mentre que no succeeix el mateix en el cas d'un metall a la mateixa temperatura. La conductivitat a través d'un dispositiu nanomètric semiconductor pot quedar suprimida o fortament augmentada si aprofitem la interferència mecanico quàntica que es produirà quan es trobin dos electrons que, sortits d'un mateix punt, han viatjat coherentment per camins de longitud diferent.

L'element material que envolta l'illa nanomètrica (5-100 nm) on els electrons estan confinats es pot construir de les dues maneres següents:

- Amb un material aïllant, és a dir, envoltant l'illa semiconductora o metàl·lica amb una capa no conductora (òxid del semiconductor o material aïllant en el cas del metall), o
- Amb un camp elèctric, és a dir, envoltant l'illa semiconductora o metàl·lica amb un camp elèctric establert aplicant una tensió a petites portes al voltant de l'illa.

En ambdós casos, garantirem que el moviment dels electrons estigui confinat com ensenyem a la figura 2, pel cas particular d'un díode túnel ressonant (RTD).

### Efectes quàntics en dispositius: l'efecte túnel i la discretització dels nivells energètics. L'energia electrostàtica de càrrega

Quan existeix un confinament d'electrons en illes nanomètriques per efecte de les barreres de potencial, com ara en el pou quàntic de la figura 2, cal tenir en compte dos efectes quàntics:

- L'efecte túnel, és a dir, la possibilitat que els electrons puguin passar a través d'una barrera de potencial tot i que la seva energia és inferior a l'alçada de la tanca. En efecte, segons la mecànica quàntica sabem que existeix una probabilitat finita que electrons amb energies inferiors a l'alçada d'una barrera de potencial puguin travessar-la i, per tant, entrar o sortir de l'illa on estan confinats. La probabilitat de travessar una o diverses barreres de potencial es quantifica amb la transmissió quàntica,  $T$ , el valor de la qual oscil·la entre 0, quan la probabilitat és nul·la, i 1, quan la probabilitat és màxima. A la figura 3 representem la transmissió a través d'una doble barrera de potencial o díode túnel ressonant, o RTD (de l'anglès *resonant tunnel diode*), per a una polarització nul·la a través de l'estructura. Apareix un màxim molt agut de la transmissió a través de totes les regions per uns certs valors de l'energia (valors denominats *energies de ressonància*). Els electrons amb l'energia de l'estat ressonant podran travessar el díode ressonant amb facilitat. És important subratllar, però, que un electró no podrà passar de la font al drenador travessant la barrera si, malgrat posseir una energia pròxima a la de la ressonància, no troba un estat buit en el drenador. Això és degut al caràcter fermiònic dels electrons que impedeix que dos d'ells puguin ocupar en un mateix sistema físic el mateix estat energètic.
- La discretització o quantització dels estats energètics possibles. La mecànica quàntica restringeix l'energia d'un electró confinat a uns valors discrets o nivells ressonants de l'energia. Com més petita és la distància entre les barreres i menor és la massa efectiva de l'electró, més espaiats estan els nivells permesos de l'energia. Emprarem el símbol  $\Delta\epsilon$  per representar l'espaiat entre dos nivells d'energia contigus en un pou de potencial.

Aquests dos fenòmens quàntics influencien el comportament del flux d'electrons a través d'un dispositiu nanomètric com l'RTD. En efecte, quan apliquem una tensió a través de l'estructura de manera que el drenador

estigui a un potencial més elevat que la font, existeixen electrons a la font que disposen d'una energia per a la qual els nivells del drenador amb aquesta mateixa energia estan buits, és a dir, disposen d'una energia per a la qual no hi ha electrons en el drenador (vegeu la figura 4b). En principi, aquests electrons d'energia alta podrien ocupar els estats buits en el drenador d'igual energia. L'obstacle al moviment dels electrons que suposa tenir una barrera de potencial no és insalvable en mecànica quàntica com si que ho és en mecànica clàssica. Com veiem a la figura 4c, per certs valors de la tensió a través del dispositiu, els nivells permesos dins del pou quàntic solapen part de la zona energètica ocupada a la font i desocupada en el drenador. D'aquesta manera es crea un corrent a través de l'RTD.

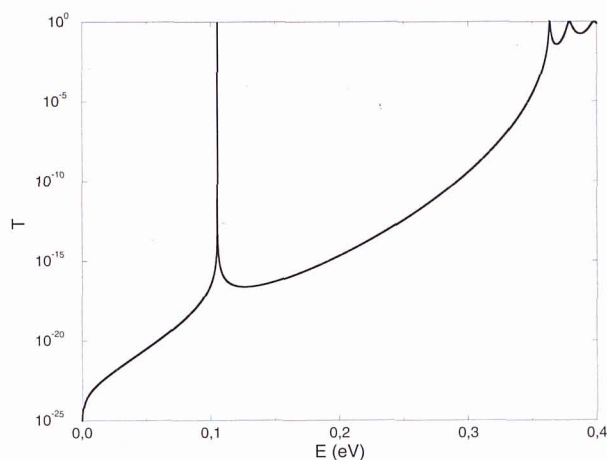


Figura 3: Transmissió d'un electró,  $T$ , en funció de la seva energia per a un díode túnel ressonant a polarització nul·la. Apareix un màxim important de la transmissió a l'energia de l'estat ressonant

### El díode túnel ressonant (RTD) i el transistor túnel ressonant (RTT)

Els dispositius túnel ressonants estan basats, com el seu nom indica, en aprofitar l'efecte túnel d'electrons a través d'estats ressonants d'una cavitat o illa on es produeix confinament electrònic. En primer lloc, descriurem aquests dispositius ja que il·lustren la quantització de l'energia i l'efecte túnel.

És essencial per al funcionament d'aquests dispositius (i també per a altres tipus de dispositius nanoelectrònics) que l'energia dels estats quàntics en el pou de potencial pugui ajustar-se respecte a l'energia de les bandes de conducció de la font i del drenador. Mostrem això a la figura 4 per a l'RTD, un dispositiu de dos terminals. Augmentant la tensió entre font i drenador, disminuïm l'energia dels estats ressonants a l'interior del pou (vegeu les figures 4b i 4c). Quan la tensió és prou gran perquè disminueixi l'energia

del primer estat ressonant de l'electró fins a situar-se dins del rang d'energies de la part ocupada de la banda de conducció, diem que el pou quàntic està "en ressonància" o, de l'anglès, *on*, ja que es produeix un corrent important de portadors de la font al drenador

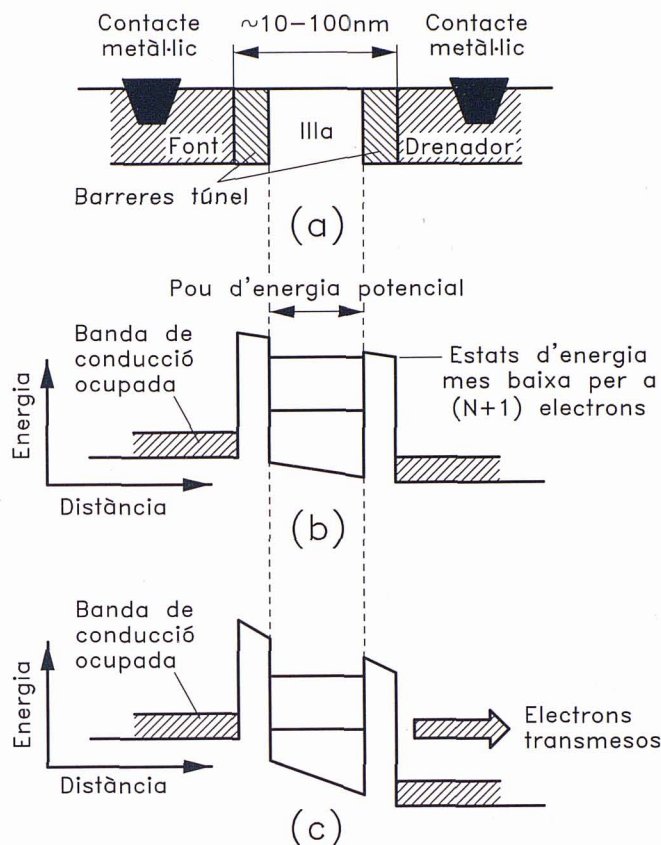


Figura 4: Representació esquemàtica de la secció transversal de l'RTD i del seu mode de funcionament. (a) El díode túnel ressonant està format per una petita regió entre barreres primes. (b) Aquestes barreres creen un pou de potencial al voltant de l'illa i eviten que els portadors puguin travessar el dispositiu amb facilitat. La transmissió, que indica la probabilitat que un portador travessi les dues barreres, és petita i, per aquest motiu, el corrent és feble. (c) Augmentant la tensió a través del díode, l'energia dels estats ressonants decreix i les energies dels electrons incidents i el nivell ressonant se solapen. Això dona lloc a una transmissió propera a 1 per a alguns estats i un augment del corrent (corrent de pic). Si continuéssim augmentant la tensió a través de l'estructura, el corrent disminuiria a causa del fet que l'espaiat entre nivells ressonants és més gran que el gruix de nivells ocupats a la banda de conducció. Això produiria la disminució del corrent (corrent de vall)

com indiquem a la figura 4c i a la figura 5. D'altra banda, per la tensió corresponent a 4b, no circula corrent a través del dispositiu, que no està en ressonància (estat *off*). L'ús d'un voltatge extern per commutar el corrent túnel entre dos estats, *on* i *off*, caracteritza el mode

d'operació del dispositiu túnel ressonant de només dos terminals, que anomenem díode túnel ressonant o RTD.

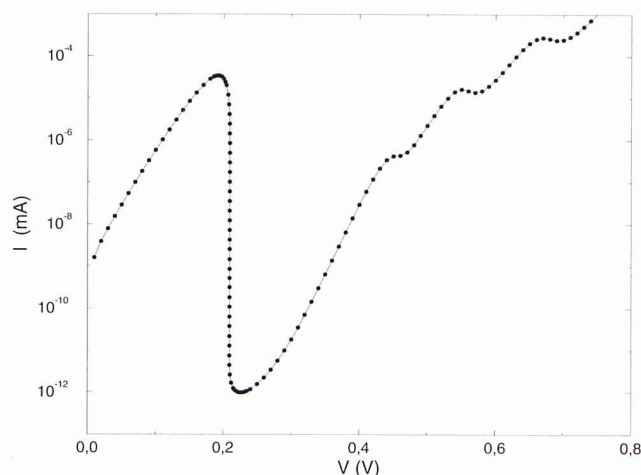


Figura 5: Característica  $I(V)$  d'un díode túnel ressonant de 4 nm d'amplada de pou (GaAs), 10 nm d'amplada de les barreres ( $Ga_{0,60}Al_{0,40}As$ ) i de 0,358 eV d'alçada de les barreres. Aquesta corba característica s'ha calculat a partir de la transmissió a través de la doble barrera per diferents polaritzacions

La introducció d'un nou terminal (porta) que polaritza l'illa allà on es troba el pou quàntic d'electrons permet modificar l'energia dels nivells ressonants sense modificar pràcticament la tensió a través del dispositiu. En aquest dispositiu, que rep el nom de transistor túnel ressonant (figura 6a), una petita tensió a la porta controla un corrent important a través del dispositiu (figures 6b i 6c). En conseqüència, l'RTT pot realitzar les funcions de commutador i amplificador, exactament com el MOSFET convencional que hem descrit en el capítol anterior.

De fet, els dispositius basats en efectes quàntics poden tenir propietats de commutació que són en alguns aspectes superiors a les dels MOSFET. Els RTD i RTT poden tenir múltiples estats *on* i *off* de conducció, atès que existeix la possibilitat que hi hagi més d'un únic estat ressonant a l'interior del pou quàntic com hem representat gràficament a la figura 4 i a la figura 6. Si l'espaiat energètic entre nivells és prou gran (és a dir, si  $\Delta\epsilon$  és més gran que la diferència d'energia entre la vora de la banda de conducció i el nivell de Fermi de la font) podem obtenir una successió d'estats de conducció elevada (*on*) i feble (*off*) en variar la tensió a través d'un RTD (vegeu la figura 7).

Els màxims de la intensitat corresponen a les tensions que suposen l'encavalcament dels nivells ressonants amb la part ocupada de la banda de conducció (vegeu els esquemes segon i quart de la figura 7a). També es pot

obtenir un comportament de múltiples estats *on* i *off* amb l'RTT. Per aconseguir-ho s'ha de variar la tensió de la porta.

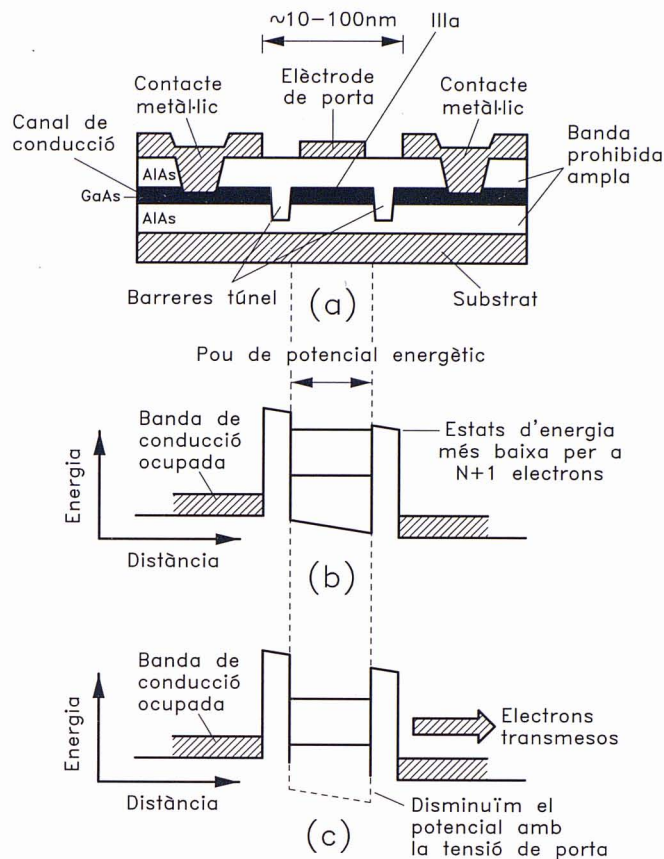


Figura 6: Esquema de la secció transversal i del funcionament del transistor túnel ressonant (RTT). (a) Secció transversal d'un RTT lateral. (b) Les barreres de potencial creen un pou quàntic i impedeixen als portadors que es desplacin a través del dispositiu si els estats ressonants no estan situats a la regió d'energies corresponents a la part ocupada de la banda de conducció. (Aquesta configuració és idèntica a la de la figura 4b.) (c) Quan augmentem la tensió de la porta —sense modificar la polarització entre la font i el drenador—, disminueix l'energia de tots els estats i podem aconseguir que algun d'ells se situï a la mateixa energia que els electrons mòbils de la banda de conducció, de manera que puguem fer circular un corrent a través del dispositiu

Es requereixen menys dispositius per implementar una funció lògica quan s'usa un dispositiu de múltiples configuracions *on* i *off* que emprant els MOSFET, que presenten només un estat *on* i un estat *off*. Això genera un conjunt de circuits amb una densitat més alta de funcions lògiques per commutador. Un nombre menor de dispositius per funció lògica podria suposar també menys dissipació per funció, la qual cosa permetria a aquests dispositius nanoelectrònics superar el problema de l'apartat 4, referent a la miniaturització del MOSFET, esmentat anteriorment.

## Diferències entre els dispositius túnel ressonants (RTD i RTT), els punts quàntics (QD) i els transistors d'un sol electró (SET): forma i dimensions

Hem d'admetre que els factors que determinen les energies dels electrons a l'interior d'un pou quàntic o estats ressonants són una mica més complexos que els que hem esmentat.

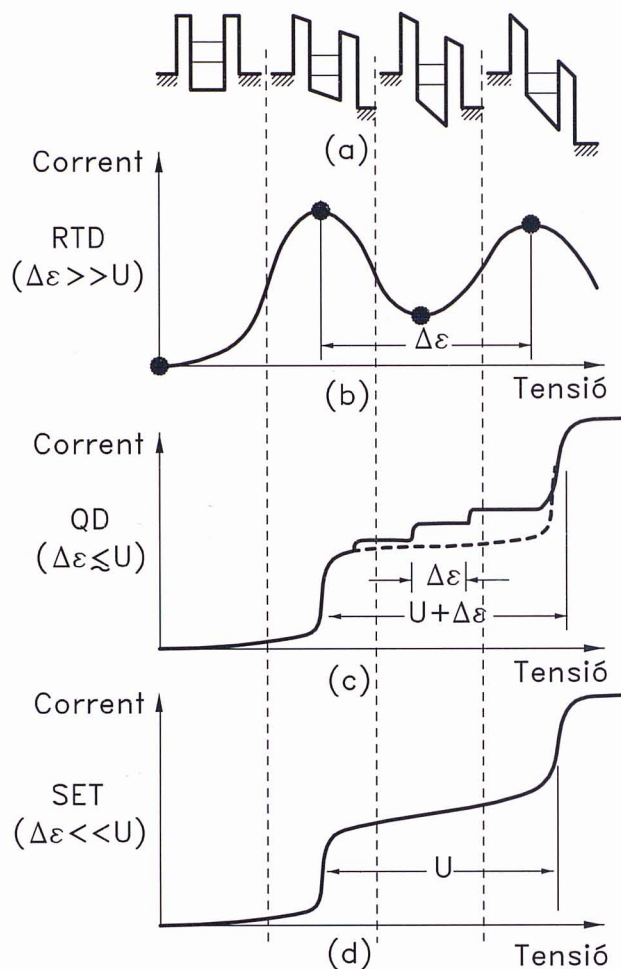


Figura 7: Corrent ( $I$ ) en funció de la tensió ( $V$ ) a través del dispositiu per a tres tipus de dispositius nanoelectrònics d'estat sòlid. (a) Evolució dels nivells energètics en un pou quàntic atesa la variació de la tensió a través del dispositiu. (b) En el cas de l'RTD (díode túnel ressonant), l'espaiat energètic,  $\Delta\epsilon$ , és força més gran que l'energia de càrrega,  $U$ . (c) En el QD (punt quàntic), l'espaiat energètic és inferior, però comparable a l'energia de càrrega. (d) Per obtenir el comportament típic del SET (transistor d'un sol electró), l'espaiat energètic entre nivells ha de ser molt més petit que  $U$ .

En conseqüència, abans de descriure en els pròxims apartats el punt quàntic (QD) i el transistor d'un sol electró (SET), analitzarem en profunditat la quantització de l'energia en una illa o cavitat, element comú a tots els dispositius nanomètrics. Per començar, si una

illa té dimensions diferents en cada una de les direccions  $x$ ,  $y$ , i  $z$ , l'energia dels electrons estarà quantitzada de manera separada per a cada direcció (desdoblament de l'equació de Schrödinger) amb espaiats energètics:  $\Delta\epsilon_x$ ,  $\Delta\epsilon_y$  i  $\Delta\epsilon_z$ , respectivament (generalment, aquests espaiats energètics són tots diferents).

La complicació no s'acaba aquí, ja que  $\Delta\epsilon$  és una magnitud calculada per a un hipotètic electró aïllat dins de l'illa, sense tenir en compte les interaccions repulsives que ocorren quan més d'un sol electró es troba a l'illa. Les interaccions esdevenen més importants com més electrons es troben a l'illa, atès que un electró que es disposi a penetrar a l'illa on ja hi ha  $N$  electrons, haurà de superar la repulsió electrostàtica dels  $N$  electrons de l'illa. Simbolitzem aquesta energia de repulsió o energia de càrrega mitjançant la lletra  $U$  (vegeu la figura 2).

Com mostrem a la figura 2, la diferència d'energia entre l'estat quàntic amb menor energia total de  $N + 1$  electrons i el seu equivalent per a  $N$  electrons és la suma de  $U$  més  $\Delta\epsilon$ . La quantitat d'energia addicional  $\Delta\epsilon$  sorgeix del principi d'exclusió de Pauli. Fins i tot suposant que no hi hagués repulsió electrostàtica entre els electrons, el principi d'exclusió prohibeix que l'electró  $N + 1$  ocupi el mateix estat que un dels electrons que ja es troben a l'illa. Conseqüentment, l'esmentat electró ha d'estar en un estat d'energia  $\Delta\epsilon$  superior a la de l'estat amb  $N$  electrons.<sup>6</sup>

Els valors de les magnituds  $U$  i  $\Delta\epsilon$  són sensibles a la forma i a la mida de l'illa. Com més reduïda és la mida de l'illa en una dimensió concreta, més gran és el  $\Delta\epsilon$  per a l'esmentada direcció. En aquest cas, diem que la quantització en l'esmentada direcció és més gran. Per contra, com més llarga és la dimensió, més petita és la quantització ( $\Delta\epsilon$  petit) i les energies possibles constitueixen aproximadament un continu, en la dimensió considerada. D'una manera aproximada, podem dir que  $\Delta\epsilon$  varia de manera inversament proporcional al quadrat de la dimensió més petita de l'illa.  $U$  també augmenta a mesura que l'illa es fa petita. No obstant això, la dependència en la forma de l'illa és diferent que en el cas de  $\Delta\epsilon$  atès que tenen orígens diferents. Com que representa una energia de repulsió,  $U$  augmenta quan la distància mitjana entre un parell d'electrons mòbils a l'illa disminueix. Es demostra que  $U$  varia de manera

<sup>6</sup>De fet, no tot electró que entra a l'illa d'un RTD ha de tenir forçosament una energia  $\Delta\epsilon$  més gran que la de l'estat dels electrons més energètics. Els electrons a l'illa d'un RTD tenen més graus de llibertat, com l'spin, ja que els nivells energètics poden estar degenerats. Per tant, si no tenim en compte l'energia de càrrega,  $U$ , més d'un electró amb la mateixa energia pot ocupar l'illa. Però quan tots aquests nivells degenerats, d'energies molt semblants (que varien només en  $U$ ), estan plens, cal una energia  $\Delta\epsilon$  (que ve determinada per la dimensió més petita de l'illa) per afegir l'electró següent. Aleshores, la característica  $I(V)$  ve dominada per la dimensió més petita de l'illa, com hem establert en el text.

inversament proporcional al radi efectiu de l'illa, que es pot considerar aproximadament com la dimensió més gran. Resumint: quan l'illa tingui com a mínim una dimensió llarga, els electrons podran distribuir-se seguint l'esmentat eix mantenint l'energia de repulsió,  $U$ , baixa. Per tant, és suficient que una sola dimensió sigui petita per crear una forta quantització en una dimensió i un  $\Delta\epsilon$  gran.

La magnitud relativa entre  $U$  i  $\Delta\epsilon$  governa el comportament del dispositiu. Així doncs, la forma de l'illa determinarà la magnitud relativa d'aquestes dues energies. A partir de la forma de l'illa, classifiquem els dispositius nanoelectrònics en tres tipus.

### Els dispositius túnel ressonants (RTD i RTT):

$$\Delta\epsilon \gg U$$

Un dispositiu túnel ressonant posseeix una illa llarga i estreta ( $\approx 5$ -10 nm) que anomenarem habitualment "fil quàntic" (de l'anglès *quantum wire*). Està feta d'un semiconductor que presenta una mobilitat raonable com el GaAs o també el Si. Les dimensions curtes garanteixen que  $\Delta\epsilon$  sigui gran, mentre que les dimensions restants mantenen  $U$  petit. És a dir:  $\Delta\epsilon \gg U$ . Això representa que l'espaiat entre les energies permeses pels electrons en el pou estan determinades només per  $\Delta\epsilon$  perquè  $U$  és un terme irrellevant en el càlcul de l'energia total necessària per afegir un electró al pou:  $\Delta\epsilon + U$ . Aleshores, quan apliquem una tensió a través d'un dispositiu túnel ressonant, la característica intensitat-tensió correspon a la de la figura 7b, on la distància entre els pics de corrent està dominada per  $\Delta\epsilon$  sense que cap tret significatiu del seu comportament pugui ser atribuït a l'energia de càrrega.

### El punt quàntic (QD): $\Delta\epsilon \approx U$

Els punts quàntics (en anglès *quantum dots*) posseeixen illes que són curtes en les tres dimensions. Així s'aconsegueix confinar els electrons en tres dimensions, fet que suposa que els electrons no disposen de cap grau de llibertat clàssic, no es poden desplaçar lliurement ni en  $x$ , ni en  $y$ , ni en  $z$ . Aquesta illa puntual pot ser metàl·lica o semiconductora. Aquestes petites illes poden consistir, per exemple, en petites regions produïdes per dipòsit o per gravat; en materials nanomètrics que s'ordenen en el creixement de manera espontània per autoorganització; o en nanocristalls fabricats *in situ* o dipositats damunt d'una capa prima.

Fent servir les idees físiques que hem presentat, veiem que l'illa d'un QD tindrà un espaiat energètic important per a cada una de les direccions de l'illa;  $\Delta\epsilon_x$ ,  $\Delta\epsilon_y$  i  $\Delta\epsilon_z$  seran grans respecte l'energia tèrmica,  $kT$ , i comparables entre si. L'energia de càrrega,  $U$ , també serà gran, atès que un parell d'electrons no podrà allunyar-se prou perquè la interacció entre ells sigui menyspreable. Lògicament, en aquest cas, tant la diferència d'energia entre nivells sense interacció ( $\Delta\epsilon$ ) com l'energia asso-

ciada a la interacció coulombiana ( $U$ ) influenciaran el comportament del corrent a través del punt quàntic. Això és el que mostrem en la característica  $I(V)$  a la figura 7c. Com que  $U$  i  $\Delta\epsilon$  presenten valors comparables, en variar la tensió apareixen un seguit d'"esglaons" en el corrent associats a les dues escales d'energia. Els petits canvis en el corrent a la figura 7c corresponen al pas d'electrons a través de l'estructura. En augmentar la tensió, els electrons comencen a passar un per un (quan la tensió és prou gran per "ocupar" un sol estat dins del pou), després de dos en dos (ja que són dos els estats que poden ocupar els electrons amb l'energia que posseeixen donada la tensió aplicada), per a tensions superiors, de tres en tres, etc. Aquesta successió s'acaba quan el valor de la tensió és suficientment gran perquè la configuració electrònica del pou admeti un altre electró en permanència i això es produeix abans que el nombre d'electrons que puguin passar de manera simultània sigui infinit. La incorporació d'un altre electró implica que apareix un nou canal per a la conducció i que, per tant, augmenta el corrent bruscament.

En la categoria dels QD incloem els punts individuals, formats estrictament per un sol punt quàntic (també anomenats *àtoms artificials*), els punts acoblats (o *molècules de punts quàntics*) i una altra classe d'unitats de punts, formats per 4 o 5 punts quàntics, que reben el nom de *celles de punts quàntics*. Aquesta última classe d'estructures té moltíssima importància, ja que constitueix un dispositiu quàntic de dos estats. De fet, hi ha una lògica basada en aquestes celles que fou desenvolupada a la Universitat de Notre-Dame (Indiana, EUA). És per aquesta raó que les celles de quatre punts quàntics també són conegudes com a portes de Notre Dame o *Notre Dame gates*. El seu funcionament està basat en els autòmats cel·lulars i no el discutirem aquí.

### El transistor d'un sol electró (SET): $\Delta\epsilon \ll U$

A diferència dels QD i els RTD, que només posseeixen dos terminals, un transistor d'un sol electró (SET) sempre és un dispositiu de tres terminals, amb porta, font i drenador. Un SET commuta el corrent d'electrons que va de la font al drenador, de *on* a *off*, en resposta a canvis molt petits de la càrrega de la porta, que poden ser d'un sol electró, la qual cosa justifica el seu nom. Malauradament, els acrònims SET i QD s'usen com a sinònims en certes publicacions científiques, malgrat que hi ha una clara diferència entre ambdós. Mentre que un QD no posseeix cap grau de llibertat clàssic, els SET en posseeixen tres. Aquesta diferència és fonamental, com veurem a continuació en descriure el funcionament d'un dispositiu d'aquest tipus.

Els SET estan fabricats amb una illa, normalment metàl·lica, que conté de l'ordre d'un milió d'electrons mòbils i està separada per dos aïllants o buits, de dos conductors (figura 8). Una porta, formada per un elèctrode metàl·lic que podem polaritzar se situa prop de

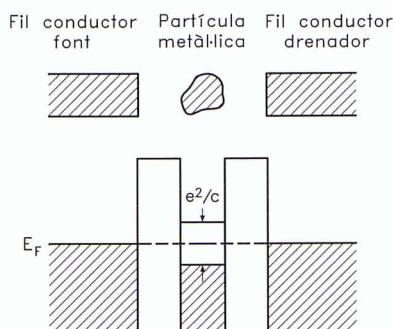


Figura 8: Gràfic superior: esbós d'un transistor d'un sol electró (SET): una illa metàl·lica nanomètrica, separada de dos conductors (la font i el drenador) per aïllants o buits, es polaritza a una tensió  $V_G$  mitjançant la porta  $G$ . Gràfic inferior: diagrama d'energia per a un electró en aquest sistema. Les zones ratllades corresponen a estats ocupats, mentre que la resta correspon a estats buits. Atès que l'energia de repulsió entre electrons  $U$  no és menyspreable, una banda prohibida o gap d'amplada  $e^2/C_\Sigma$  apareix a la regió de l'illa

l'illa, separada, com en els RTT, mitjançant un aïllant. S'empra una illa, que sol ser metàl·lica, per tal que, per a unes mateixes dimensions de l'illa i, per tant, uns valors de  $U$  semblants,  $\Delta\epsilon$  sigui bastant més petit que  $U$ . La condició que es persegueix és  $U \gg \Delta\epsilon$ ; és a dir, que els nivells quantitzats corresponguin només a la repulsió electrostàtica entre electrons. Cal recalcar que l'energia dels electrons està feblement quantitzada ( $\Delta\epsilon \approx 0$ ) a l'illa d'un SET, però que en confinar molts electrons en aquest espai molt petit, les energies necessàries per situar més electrons a l'illa estan discretitzades a causa de la repulsió electrostàtica. Un efecte purament clàssic: la repulsió electrostàtica desemboca en una quantització de l'energia necessària per situar un electró dins de l'illa d'un SET.

Com veiem a la figura 7d, la corba del corrent en funció del voltatge de polarització per a un SET presenta llindars associats amb  $U$ , però no amb  $\Delta\epsilon$ , que com hem dit és molt petit comparat amb  $U$ . La situació que observem en l'esmentada figura correspon al funcionament del SET per a uns valors particulars de la tensió de la porta. Variant la tensió de la porta podem variar la conductivitat entre la font i el drenador. Augmentant l'esmentada tensió a partir d'un dels valors crítics per als quals observem un corrent important, el corrent disminuirà fortament i després augmentarà i tindrà un altre màxim per al següent punt crític de la tensió de la porta. Així doncs, variant la tensió de la porta podem repetir aquest cicle *on/off*. Malgrat les semblances amb l'RTD, el SET opera seguint principis físics diferents.

Els electrons podrien, en principi, passar per efecte túnel a l'illa un a un des de la font, i, en acabat, cap al drenador. Això produiria un corrent apreciable. No obstant això, els electrons de la font no poden passar a

l'illa atesa la repulsió electrostàtica dels electrons que ja s'hi troben i, per tant, no circula corrent. Aquest fenomen, anomenat *bloqueig de Coulomb* (de l'anglès *Coulomb blockade*), és un efecte clàssic que es dona quan l'illa es troba tan aïllada que un electró no pot "estendre's" quànticament entre l'illa i la font o l'illa i el drenador. Fixeu-vos que en l'RTD l'oposició al corrent depèn d'efectes quàntics diferents, malgrat que el resultat sigui força similar.

Amb la finalitat de controlar el nombre d'electrons a l'illa, s'hi situa una porta metàl·lica a prop. Un augment o disminució suficient de la tensió de la porta provoca que un electró de la font passi a l'illa. Aquest electró sortirà també per efecte túnel de l'illa cap al drenador. Aquest doble procés túnel es repeteix milions de vegades per segon, creant un corrent mesurable a través de l'illa. Atès que el corrent entre la font i el drenador és sensible a les variacions de càrrega de l'ordre d'un electró a la porta, el factor d'amplificació o "guany" pot arribar a ser molt alt.

Si augmentem la tensió de la porta, el nombre d'electrons de l'illa s'estabilitza en un valor superior a l'anterior d'1 i, novament, no passa corrent a través del dispositiu. Així, contràriament a allò que succeeix en l'RTD, que exhibeix pics de corrent en variar la tensió a través del dispositiu, en el cas del SET observem un comportament semblant al de la figura 7b quan variem la tensió de la porta.

No obstant això, a temperatures elevades l'energia tèrmica dels electrons a la font i al drenador pot vèncer el bloqueig de Coulomb. Fins ara, les baixes temperatures necessàries per garantir que el SET pugui commutar el corrent *on* i *off* ha estat el principal obstacle per a la seva aplicació pràctica. Un grup d'NTT al Japó ha aconseguit realitzar un SET d'una mida lateral de només 30 nm. L'esmentat dispositiu exhibeix clarament oscil·lacions periòdiques del corrent font-drenador, atès que ja hi ha bloqueig de Coulomb a una temperatura de 150 K. Aquesta temperatura se situa per sobre de la temperatura del nitrogen líquid, un refrigerant relativament barat que bull a 77 K. El treball d'aquest grup de l'NTT pot permetre un ús més rutinari dels SET i, fins i tot, el seu funcionament a temperatura ambient (300 K).

## El bloqueig de Coulomb

A continuació ampliïm l'anàlisi del mode de funcionament del transistor d'un sol electró (SET) que hem esbossat en l'apartat anterior. A partir de la visió detallada del principi operatiu del SET que presentem aquí, podrem comprendre les dificultats de produir-ne un que funcioni a temperatura ambient.

Per a dues barreres túnel separades per una illa metàl·lica, com la que mostrem a la figura 8, es podria esperar que els electrons passessin del conductor a l'illa i després de l'illa a l'altre conductor en polaritzar el drenador respecte a la font. No obstant això, atesa

la interacció coulombiana entre els electrons de l'illa i l'electró que intenta travessar-la, el pas de l'electró a través de l'estructura no està controlat només per l'efecte túnel. Per tal que el corrent circuli a través del dispositiu, és necessari que l'illa vegi augmentar el nombre d'electrons o forats com a mínim una unitat.

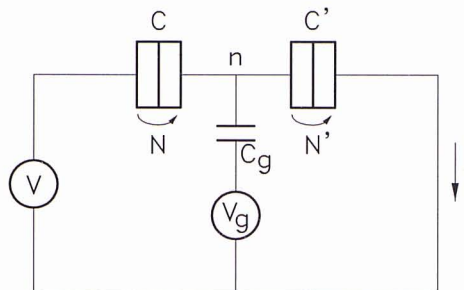


Figura 9: Esquema circuital d'un transistor d'un sol electró (SET). Dues unions conductor-aïllant-conductor juntament amb un condensador separen l'illa conductora de la font (a la seva esquerra) i del drenador (a la seva dreta) i de la porta (a baix), respectivament. La càrrega de l'illa correspon a  $n$  cops la càrrega de l'electró. Mitjançant la tensió de la porta,  $V_G$ , controlem la tensió de l'illa a través de la capacitat d'un condensador,  $C_G$

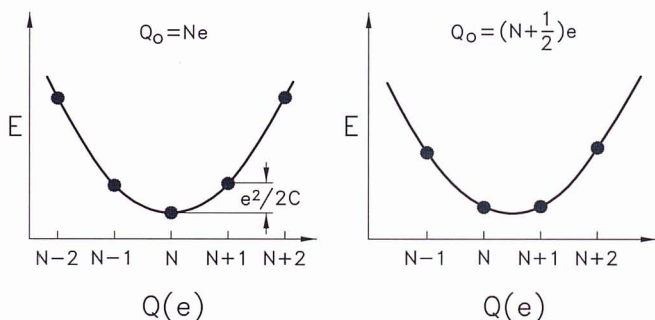


Figura 10: Energia electrostàtica d'una partícula metàl·lica aïllada com ara la del transistor d'un sol electró (SET) en funció de la càrrega electrònica que conté. A l'esquerra, mostrem la corba esmentada quan la mitjana del nombre d'electrons,  $\bar{n}$ , és sencer i, a la dreta, quan és semisencer. Només aquells valors de l'energia il·lustrats amb un cercle corresponen a energies permeses atès el caràcter discret de la càrrega i la feble quantització de l'energia,  $\Delta E$ . L'espaiat de l'energia apareix a la figura exageradament més gran del que és habitual en un SET

Afegir una càrrega  $Q$  a l'illa metàl·lica costa una energia  $Q^2/2C_\Sigma$ , on  $C_\Sigma$  és la capacitat total entre l'illa i la resta de l'univers. Per afegir un sol electró es requereix una energia  $e^2/2C_\Sigma$ . Com a resultat d'això apareix una banda prohibida o gap en l'espectre d'estats possibles de l'electró incident a l'illa. Només aquells electrons que tinguin una energia superior a  $e^2/2C_\Sigma$  respecte al

nivell de Fermi podran travessar el dispositiu per efecte túnel.

Un SET posseeix un funcionament més complex que una illa separada per dues barreres de potencial, ja que podem variar la mitjana del nombre d'electrons dins l'illa,  $\bar{n}$ , mitjançant el potencial aplicat a la porta com mostrem a la figura 9. Si la diferència de potencial entre la porta i el gas d'electrons és  $V_G$ , aleshores l'energia electrostàtica,  $U$ , de la càrrega,  $Q$ , a l'illa del SET ve donada per:

$$U = -QV_G + Q^2/2C_\Sigma \quad (1)$$

El primer terme correspon a la interacció atractiva entre l'electrode de porta carregat positivament i la càrrega,  $Q$ , situada a l'illa. El segon terme correspon a la interacció entre els portadors de l'illa. L'equació anterior pot ser reescrita, desplaçant l'origen d'energia, com:

$$U = (Q - Q_0)^2/2C_\Sigma \quad (2)$$

on  $Q_0$  és igual a  $C_\Sigma V_G$ .

Podem escollir qualsevol valor de  $Q_0$ , la càrrega que minimitza l'energia, variant  $V_G$ . No obstant això, atès que la càrrega és sempre un nombre múltiple de la de l'electró, únicament seran possibles valors discrets de l'energia, per a una  $Q_0$  donada. Mostrem això a la figura 10 per als dos casos més contraposats. Quan  $Q_0$  és igual a un nombre sencer d'electrons,  $Ne$ , l'energia  $U$  és mínima. Aleshores la interacció coulombiana representa un augment de l'energia  $e^2/2C_\Sigma$  quan el nombre d'electrons dins l'illa,  $N$ , augmenta o disminueix en una unitat. Sota aquestes circumstàncies serà necessària una energia d'activació  $e^2/2C_\Sigma$  per tal que circuli corrent (figura 11).

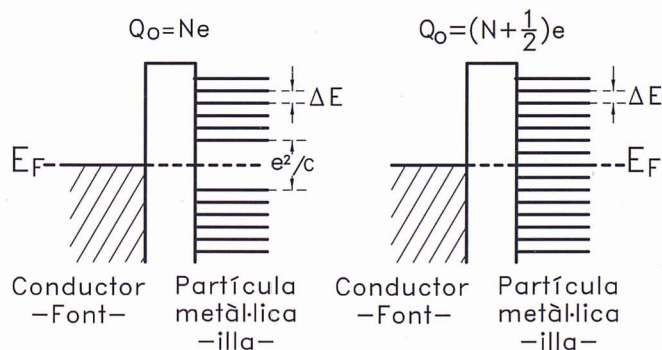


Figura 11: Diagrama esquemàtic de l'energia electrostàtica dels electrons que intenten penetrar per efecte túnel l'illa d'un transistor d'un sol electró quan la mitjana de la càrrega de l'illa és un nombre sencer d'electrons (esquerra) i quan és un nombre semisencer (dreta)

Al contrari, quan  $Q_0 = (N + \frac{1}{2})e$ , els estats amb  $Q = Ne$  i amb  $Q = (N + 1)e$  estan degenerats, és

a dir, tenen la mateixa energia, com mostrem a la figura 10. En aquest cas, la càrrega fluctua entre dos valors a qualsevol temperatura, i d'aquesta manera la banda prohibida o gap de l'energia desapareix. La conductància està activada tèrmicament per a tots els valors del voltatge de la porta excepte per a aquells que corresponen a una mitjana de la càrrega a l'illa,  $\bar{n}e$ , equivalent a  $(N + \frac{1}{2})e$ . Això produeix, a baixes temperatures, una conductància que consisteix en pics periòdics molt aguts. El període en  $V_G$  ve donat senzillament per  $e/C_\Sigma$ , que és la tensió necessària per variar  $Q_0$  d'un electró. Hem descrit, doncs, les característiques essencials del transistor d'un sol electró (SET) utilitzant només arguments clàssics basats en el caràcter discret de la càrrega elèctrica.

### L'efecte de la temperatura

Per tal que hi hagi un bloqueig de Coulomb efectiu per als electrons que intenten entrar a l'illa d'un SET, és necessari —com hem dit— que el valor de la polarització de la porta del transistor,  $V_G$ , sigui tal que l'energia total de l'illa presenti un mínim per a un valor de la mitjana temporal d'electrons dins de l'illa,  $\bar{n}$ , que sigui sencer. Afegim, ara, un detall important referent a la temperatura: l'energia d'activació tèrmica ha de ser inferior a l'electrostàtica. Si aquesta condició no se satisfà, els efectes originats pel caràcter discret de la càrrega elèctrica desapareixeran completament com podem veure a la figura 12.

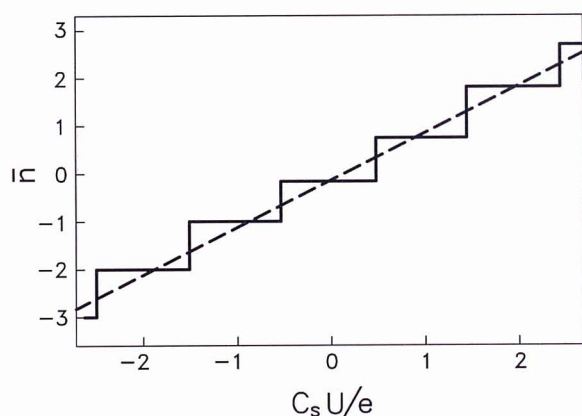


Figura 12: Efecte de la temperatura en la mitjana del nombre d'electrons a l'interior de l'illa d'un SET en funció del potencial de la porta,  $V_G$ . La línia de traç continu correspon al comportament a temperatures baixes, on la mitjana del nombre d'electrons a l'interior de l'illa,  $\bar{n}$ , apareix discretitzat. En canvi, a temperatura ambient, aquesta mitjana augmenta de forma lineal amb el potencial de la porta

Per tal que l'activació tèrmica dels electrons no sigui prou important com per impedir que el bloqueig de Coulomb governi el transport a través del dispositiu, s'ha de complir que l'energia per situar un electró més dins l'illa sigui molt més gran que l'energia tèrmica:

$$U = E_{Coulomb} = \frac{e^2}{2C_\Sigma} \gg kT. \quad (3)$$

A temperatura ambient ( $kT \approx 25$  meV) la condició se satisfà per a capacitats molt petites, inferiors a l'atofarad, aF ( $1 \text{ aF} = 1 \cdot 10^{-18} \text{ F}$ ), mentre que a 50 mK, es pot observar la discretització de la càrrega treballant amb illes de capacitats no tan petites, per sota del femtofarad, fF ( $1 \text{ fF} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ F}$ ). Les dificultats per construir illes metàl·liques petitíssimes de capacitat diminuta limita ara per ara l'ús del SET a molt baixes temperatures. Les tensions que es mesuren típicament amb capacitats de l'ordre del fF se situen en el rang de 100  $\mu\text{V}$  a 1 mV. Treballant amb capacitats inferiors al aF, la tensió de treball requerida se situaria entre 150 mV i 1,5 V, amb la qual cosa es podria controlar de manera encara més precisa el funcionament del SET a partir de la polarització de la porta  $V_G$ .

### El SET i el MOSFET comparats

En un SET, es commuta de corrent nul a un corrent de l'ordre de  $10^9$  electrons per segon ( $\approx 0,1 \text{ nA}$ ) variant la mitjana del nombre d'electrons a l'interior de l'illa,  $\bar{n}$ , de tan sols 0,5 electrons. No existeix cap altre dispositiu tan sensible a la càrrega com el SET. De fet, la sensibilitat d'un SET supera en 6 ordres de magnitud la dels electròmetres convencionals construïts amb FET. Tanmateix, la capacitat d'entrada del SET és, per construcció, tan petita que la sensibilitat en voltatge no és tan gran com en el FET. Així doncs, en aquest segon aspecte, el FET té un rendiment més gran. No obstant això, el SET no està sotmès a les limitacions de funcionament d'origen físic del MOSFET i, per tant, el podem fer més petit, i augmentar, així, la densitat de components per unitat d'àrea. Pel que fa a la velocitat, el SET no representaria un canvi important en la velocitat d'activació. Això, juntament amb el seu consum, que és molt més baix que no pas el del MOSFET, representa un seriós avantatge del SET respecte del MOSFET.

### Bibliografia

- HOROWITZ, P. i HILL, W., *The Art of Electronics*, Cambridge University Press (Cambridge, 1980).  
 HEY T. i WALTERS P., *The Quantum Unvers*, Cambridge University Press (Cambridge, 1987).  
 SHUR, M., *Physics of Semiconductor Devices*, Prentice Hall (New York, 1990).  
 TURTON, R., *The Quantum Dot*, W.H. Freeman and Company Limited (Oxford, 1995).