

# EFECTE TÚNEL EN LA MINIATURITZACIÓ DELS TRANSISTORS



Elisa Rovira Montcalm



## *Agraïments*

*A tota la meva família per donar-me empenta en els moments difícils*

*A en Xavier Oriols per haver acceptat ajudar-me*

*A la persona a qui li dec tot aquest treball, el meu tutor*

## Índex

0	Introducció al treball.....	1
1	Marc teòric .....	2
1.1	Transistors.....	2
1.1.1	Què és un transistor? .....	2
1.1.2	Transistor d'unió bipolar (BJT - Bipolar Junction Transistor) .....	3
1.1.3	Transistors d'efecte de camp (FET-Field Effect Transistor).....	6
1.2	Evolució dels transistors. Llei de Moore .....	12
1.3	L'efecte túnel.....	14
1.3.1	Fonaments quàntics .....	14
1.3.2	Explicació de l'efecte túnel.....	16
2	Objectius i preguntes de recerca .....	21
3	Resultats dels objectius de recerca i anàlisi .....	22
3.1	Recerca 1: Importància de l'efecte túnel en els transistors.....	22
3.1.1	Importància de la solució al problema.....	23
3.1.2	Com es presenta l'efecte túnel en els transistors.....	24
3.2	Pregunta de recerca 1 i hipòtesi .....	26
3.2.1	Part pràctica 1: Demostració matemàtica.....	27
3.3	Recerca 2: Com sorgeix el dielèctric high-k.....	29
3.3.1	Capacitància i ruptura dielèctrica.....	29
3.4	Pregunta de recerca 2 i hipòtesi .....	32
3.4.1	Part pràctica 2: Comprovació matemàtica de la hipòtesi .....	33
4	Conclusió .....	39
5	Bibliografia .....	40
	Annex .....	44

# 0. Introducció al treball

---

En el treball que exposarem es tracten un bon conjunt de matèries atès que es tracta d'un treball interdisciplinari, tals com la química o les matemàtiques. Ara bé, els temes que més destaquen són, sens dubte, la física (quàntica) i l'electrònica. Més enllà d'aquí, la majoria de conceptes que es tracten eren totalment desconeguts per a mi en un principi, i és per aquesta raó que la motivació principal per fer aquest treball ha sigut la curiositat per entendre tot aquest món no molt conegut normalment.

Quan es parla de la miniaturització dels transistors, l'efecte túnel resulta ser un problema bastant greu que pot influir considerablement al món macroscòpic, tal com veurem en aquest treball. Per aquesta raó, quan vaig veure la relativa importància de les qüestions que anava a tractar, em vaig donar compte que aquesta ignorància que es té sobre el tema (que al principi del treball jo mateix també tenia) no hauria de ser tan gran. Al cap d'un temps, quan vaig començar la recerca, vaig entendre perquè hi havia tanta ignorància al respecte, i és que certament, el cert grau de complexitat que tenia aquest tema i la poca divulgació que hi havia, podia fer tirar enrere aquell qui volgués saber aprendre aquest món. Al pensar aquest fet, a l'objectiu d'aquest treball se li va sumar la intenció de fer un escrit còmode i entenedor per a tots els públics, explicant totes les coses una per una, sense pèrdua a l'hora d'entendre el contingut, que espero haver aconseguit.

Per dur a terme aquesta tasca, el treball s'ha dividit en varis grups i subgrups per tal de que fer una estructura més ordenada i que ajudés a un correcte seguiment de les idees que s'hi exposen. En el marc de l'estructura, es comença parlant dels conceptes més bàsics sobre els dos camps de treball principals en el Marc Teòric: 1. Sobre l'electrònica i els transistors, justament amb els seu origen, el funcionament del transistor més bàsic (BJT) i el més utilitzat (MOSFET). 2. Sobre la física i concretament la física quàntica, on es parlarà d'unes certes propietats quàntiques que ens ajudaran a explicar l'efecte túnel just després d'aquestes.

Un cop aclarits tots aquests fets i havent fet un breu esquema dels objectius que es tenen en ment, s'entra en un apartat on es comencen a fusionar els conceptes explicats anteriorment i on es faran unes demostracions mitjançant equacions mencionades durant el treball per tal de poder explicar i donar resposta a les nostres preguntes de recerca.

En si mateix, l'objectiu del treball (a part d'explicar aquests fenòmens amb claredat) és trobar una solució a un problema que afecta els transistors. Essencialment, aquests components electrònics són una peça fonamental en tots els circuits integrats, i avui en dia, s'estan miniaturitzant tant, que es comencen a presentar problemes (relacionats amb la quàntica, i amb ella l'efecte túnel) que poden fer augmentar el consum de tots els dispositius electrònics considerablement i, sobretot, poden produir greus errors en el seu funcionament amb conseqüències nefastes.

Tenint tot això en ment, podem veure que en aquest treball de recerca s'intenta fer un certa investigació relativament actual, que intenta aportar llum a un tema no molt conegut entre la gent (tot i ser important).

Havent introduït breument el treball, ens disposarem a explicar els conceptes més bàsics tal i com hem dit anteriorment.

# 1 Marc teòric

---

## 1.1 Transistors

---

### 1.1.1 Què és un transistor?

És un dispositiu electrònic bàsic creat en el 1947 pels Laboratoris Bell que va revolucionar tot el món de l'electrònica i de les comunicacions en general perquè, entre altres coses, va donar lloc als circuits integrats, dels quals encara n'és un component essencial.

#### 1.1.1.1 Característiques i funció

El transistor és un component electrònic discret<sup>1</sup>, actiu<sup>2</sup> i format principalment per materials semiconductors basats en silici. Aquesta última característica és un dels factors clau més importants, i això és així gràcies a les propietats específiques que tenen els materials semiconductors, les quals permeten al transistor el comportament tant de conductor com d'aïllant elèctric (veure annex: Naturalesa dels semiconductors).

Degut a aquest comportament, el transistor adquireix les funcions d'interruptor del corrent elèctric i d'amplificador del senyal, unes funcions molt bàsiques però essencials per a tot component electrònic.

#### 1.1.1.2 Utilitat

A partir de les seves funcions, els transistors poden ser utilitzats de moltes maneres, entre altres, per amplificadors de senyals de ràdio o per formar portes lògiques (la seva principal utilitat)<sup>3</sup> En essència, les portes lògiques són la base de tot dispositiu electrònic, per aquesta raó són tan importants i consegüentment els transistors també.

---

<sup>1</sup> *Component electrònic discret* ≠ integrat. Són aquells encapsulats individualment sense estar formats per més components electrònics. (Un component integrat format per transistors serien les portes lògiques).

<sup>2</sup> *Component electrònic actiu* ≠ passiu. Són aquells capaços de controlar el flux de corrent dels circuits o de realitzar guanys.

<sup>3</sup> Són dispositius compostos per transistors i essencials en tots els circuits integrats i microcontroladors, els quals són els fonaments de tots els dispositius electrònics. Les portes lògiques són capaces de realitzar algunes operacions digitals com les anomenades operacions lògiques OR, AND, i INVERT; o altres funcions com suma i resta.

### **1.1.1.3 Precedents del transistor i la seva importància mediambiental**

Els transistor van ser l'invent que va reemplaçar les vàlvules de buit. Tots fan la mateixa funció i es poden utilitzar pel mateix, tanmateix, el transistor va resultar una gran revolució car pot ser extremadament més petit que una vàlvula de buit, consumeix molta menys electricitat i pràcticament no s'esclafa en comparació de la considerable calor que desprèn una vàlvula de buit. En conseqüència d'aquests fets els transistors van resultar una alternativa molt més eficaç i pràctica.

Més enllà d'aquí, les vàlvules de buit havien de ser reemplaçades constantment per la seva curtíssima durabilitat, per aquest motiu, els transistors també van resultar ser una petita revolució mediambiental en el món de l'electrònica ja que eren molt més sostenibles pel medi ambient.

### **1.1.1.4 Tipus**

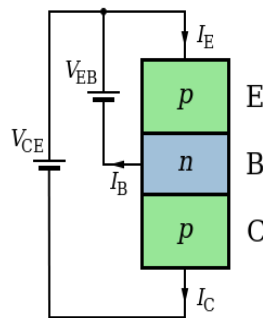
Tots els transistors que existeixen comparteixen les funcions essencials i la utilitat. Així i tot, hi ha una gran varietat de transistors amb diferents estructures, funcionaments i materials. A més a més, de cada tipus de transistor hi ha diversos subtipus que introdueixen nous models dels mateixos.

No obstant això, la majoria de circuits integrats utilitzen un únic tipus de transistor, el MOSFET. Aquest serà en els que ens centrarem. Per explicar-lo però, primer hem d'entendre el seu precursor més simple, el transistor d'unió bipolar, d'on parteixen, a part del MOSFET, la majoria de transistors actuals.

## **1.1.2 Transistor d'unió bipolar (BJT - Bipolar Junction Transistor)**

És un tipus de transistor que té tres parts ben diferenciades on a cadascuna de les quals es troba un punt de connexió: porta (B), font (S) i drenador (C). Totes tres estan fetes a partir d'una base de semiconductor intrínsec (normalment silici o germani) dopat o amb impureses, de manera que dues de les quals es troben dopades negativament i una dopada positivament (veure annex: Dopatge) o a la inversa (fenomen explicat més endavant). Les tres parts es posicionen de manera intercalada de tal manera que queda una estructura NPN o PNP (part negativament dopada-part positivament dopada-part negativament dopada / part positivament dopada-part positivament dopada-part positivament dopada, la qual es podria interpretar com dos díodes units oposadament (veure annex: Funcionament dels díodes). Per aquesta raó, en els transistors, a diferència dels díodes convencionals, es formen dues barreres internes de potencial en comptes de només una.

Aquesta peculiar estructura, juntament amb un sistema de dos circuits connectats entre si i amb 3 punts de connexió a cadascuna de les parts diferentment dopades (porta, font i drenador), tal i com es mostra en la imatge 1.1, permet als transistors BJT un funcionament molt diferent al dels díodes.



Imatge 1.1

Transistor PNP juntament representat amb el sistema de dos circuits i els seus respectius punts de connexió *E*: emissor. *B*: porta *C*: drenador. La part blava es correspon a la part dopada negativament (N) i les parts verdes a les dopades positivament (P).

BJT(2016,12)[enlínea]<<http://semesters.in/bipolar-junction-transistor-fixed-base-biasing-electronics-engineering-notes-1st-year/>>[consulta: 4 de juny del 2019]

En aquesta estructura, la part dopada N acostuma a ser més petita que parts dopades P i, per altra banda, la part dopada P de l'emissor està molt més dopada que les altres dues de manera que s'aconsegueix tenir un excés de forats. A part, tal com hem mencionat anteriorment es poden observar dos circuits: un del sistema central (de  $V_{CE}$ ) i un altre d'extern (el més petit, de  $V_{EB}$ ), el qual és el que es vol modificar (generalment, amplificar o interrompre).

El corrent resultant, o sigui el que tenim en compte, és el corrent  $V_{CE}$ ; això és així perquè és impossible amplificar el senyal d'un corrent si aquest no té la capacitat suficient per a fer-ho, per això s'ha d'afegir un altre circuit amb més capacitat en el que es pugui donar lloc un corrent més potent. En el cas del transistor, el nostre objectiu és incrementar la intensitat del corrent extern, i com que el mateix circuit extern no té la capacitat suficient, l'objectiu del transistor és traslladar el senyal elèctric a un altre circuit amb més capacitat (circuit central) que pugui reproduir-lo sense cap modificació menys en la intensitat.

Un cop explicada l'essència del transistor anem a explicar el seu funcionament. Si es vol utilitzar el transistor com a simple interruptor, l'únic que s'ha de fer és no activar el circuit central (en la imatge 1.1  $V_{CE} = 0$ ). Com la part de la porta (dopada negativament) i la part del drenador (dopada positivament) estan sotmeses a una polarització inversa, el corrent no podrà fluir entre la connexió de l'emissor i del drenador. No obstant això, la unió entre la part de l'emissor (dopada positivament) i de la porta (dopada negativament) sí que es troba en una polarització directa, i per tant, el corrent podrà fluir des de la connexió emissor fins a la connexió porta, retornant així al circuit extern com si d'un díode amb polarització directa es tractés.

A part d'això, també cal mencionar que els forats que s'incorporen a la part N, procedents de la part P de l'emissor (fortament dopat) i del corrent extern, es recombinen amb els electrons d'aquesta part N afavorint així la barrera de potencial interna formada entre la part P del drenador i la N.





Figura 1.1

Representació esquemàtica dels dos díodes invertits que podem comparar amb el transistor BJT quan  $V_{CE} = 0$  i com una de les barreres de potencial és afavorida per un corrent invers al seu díode.

Ara bé, com que el corrent que nosaltres considerem el resultant és el del circuit central, en aquest cas, com el corrent central té valor 0, podríem dir que el senyal resultant ha estat parat, té valor 0.

Per altra banda, si el circuit central s'activa, tenim de igual manera la polarització inversa que es formava entre la part N i la part P del drenador. A conseqüència d'aquest fet, se'n presenten un altre cop les recombinacions mencionades en el paràgraf anterior. No obstant això, aquesta vegada la situació es desenvolupa diferent.

Per començar, hi ha un nombre de forats molt més elevat que passen per la part N ja que s'hi sumen els forats aportats pel circuit central. Com hi ha molta més quantitat de forats, la connexió porta no pot donar a l'abast amb tots ells (atès que no té suficient capacitat), i si a això se li suma el fet de que la part N és molt prima, podem observar que el nivell de càrregues positives acumulades a la part N va augmentant progressivament.

Si aquesta quantitat de càrregues positives acumulades augmenta significativament, es pot donar el cas on la barrera de potencial formada entre la part N i la part P del drenador (que inicialment impedia el pas del corrent pel circuit central) no tingui la suficient alçada/energia suficient com per impedir l'atracció entre la gran quantitat de forats acumulats (carregats positivament) i el born negatiu del circuit central. En altres paraules, la repulsió exercida per la barrera de potencial es faria insuficient. Conseqüentment, la barrera de potencial desapareixeria i per tant, els forats, prèviament acumulats a la part N, podrien finalment fluir cap a la connexió drenador i acabar el seu recorregut al circuit central on finalment hi hauria, lògicament, un corrent fluïnt per ell.

Aquest mateix corrent és el resultat final del transistor. Al compartir una mateixa part del circuit amb el corrent extern, el corrent central també té la mateixa freqüència que aquest, és a dir, transmeten la mateixa informació. Amb això, tenim un circuit (el circuit central) que conté la mateixa informació que l'original (el corrent extern) però amb més potència i més fàcil de modificar (més manejable).

En resum, modificant la intensitat del circuit central, podem aconseguir augmentar el senyal tant o més que en el circuit extern, obtenint finalment una amplificació del senyal.

Tal com hem dit anteriorment, a part del BJT PNP també hi ha el NPN. Aquest tipus de transistor funciona exactament igual que el que hem explicat però amb la diferència de que el sentit del corrent és invers als PNP, per tant, tot el que hem explicat que passa amb els forats passa de igual manera però amb els electrons. Al ser contraris també tenen símbols electrònics diferents tal i com es veu en la figura 1.2.

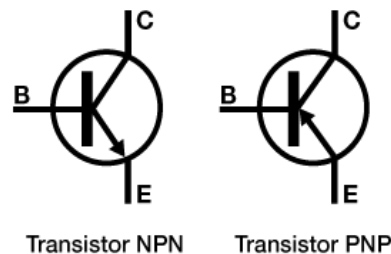


Figura 1.2

Símbols electrònics dels transistors NPN i PNP.

Transistores[enlínea]< <https://rawmsk.wordpress.com/2015/11/30/255/>>[consulta:12 juny 2019]

### 1.1.3 Transistors d'efecte de camp (FET-Field Effect Transistor)

Encara que els transistors BJT siguin de gran utilitat en gran nombre d'ocasions, presenten un petit desavantatge, i és que la seva impedància d'entrada és molt baixa<sup>4</sup> i que, tant el circuit extern com el circuit central consumeixen energia. Per solucionar aquest inconvenient es van crear uns altres tipus de transistors que funcionen amb un sol tipus de portador de càrregues (per tant són unipolars), els quals són anomenats transistors d'efecte de camp (FET).

L'essència del canvi i la principal característica que diferencien aquests transistors dels altres és que es basen en un camp elèctric per controlar la conductivitat del canal que passa pel material semiconductor generat pel voltatge entre la porta i la font. En altres paraules, el corrent extern que fèiem servir per controlar el corrent central en els BJT s'elimina en els FET, sent, en aquests, un camp electromagnètic el que controla el corrent. Aquesta diferència és molt significativa perquè, en el cas dels FET, s'estalvia tota la potència dissipada destinada per fer funcionar el corrent extern que fèiem servir en els BJT, solucionant la baixa impedància d'entrada d'aquests.

Malgrat les diferències, els FET tenen una estructura semblant als transistors BJT. Estan fets a partir de silici dopat positivament i negativament i tenen tres terminals ben diferenciats: la porta (G), el drenador (D) i la font (S).

Aquesta és l'essència dels FET, però de fet, hi ha una gran varietat de FETs que tenen certes diferències, com per exemple, en la seva estructura. Alguns exemples de FET poden ser el JFET, el MESFET o el HEMT.

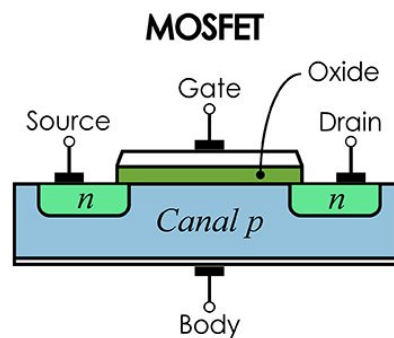
<sup>4</sup> Baixa impedància d'entrada: es refereix a l'entrada de corrent no desitjat al circuit des de la connexió porta.

L'ús d'aquests tipus però és quasi nul en comparació amb el transistor per excel·lència: el MOSFET<sup>5</sup>. Aquest FET, és el transistor més utilitzat en l'indústria microelectrònica, i en ell es basen quasi tots els microprocessadors comercials.

El MOSFET es caracteritza per utilitzar un aïllant (elèctric) en el terminal de la porta i que en realitat presenta un quart terminal afegit anomenat substrat (B).

Tot i que la finalitat i les bases dels BJT i MOSFET són les mateixes, les seves estructures i funcionaments tenen diverses diferències, tal com hem mencionat anteriorment. Per aquest motiu, a continuació estudiarem a fons el MOSFET.

### 1.1.3.1 Estructura i funcionament del MOSFET



Imatge 1.2

Estructura de MOSFET de canal N (Source: font / Gate: porta Drain: drenador / Body: substrat / Oxide: òxid).

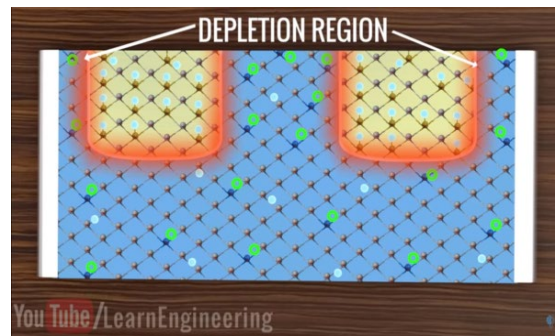
¿Qué es y cómo se utiliza un MOSFET?[enlínea]<<http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-mosfet/>>[consulta:12 de juny del 2019]

#### 1.1.3.1.1 Estructura

A diferència dels BJT, els MOSFET tenen una part dopada predominant (la P en les imatges 1.2, 1.3 i 1.4) en la qual s'hi troben dues regions dopades del tipus contrari (la N en les imatges 1.2, 1.3 i 1.4) que estan connectades cada una d'elles a un terminal diferent (una a la font i l'altre al drenatge). Entremig d'aquestes dues parts se situa el terminal porta, el qual és separat de la part dopada predominant per un aïllant elèctric, normalment diòxid de silici, SiO<sub>2</sub>.

Entre les parts dopades de signe contrari es creen regions d'esgotament les quals impedeixen el flux de corrent igual que en els BJT tal i com es mostra en la imatge 1.3 on les regions d'esgotament vindrien a ser les zones vermelles (*depletion regions* en anglès).

<sup>5</sup> Sigles de *transistor d'efecte de camp metall-òxid-semiconductor* en anglès: (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*)



**Imatge 1.3**

Representació de les regions d'esgotament d'un MOSFET formades entre les parts dopades negativament (grogues) i la part dopada positivament (blava).

MOSFET[enlínea] < <https://www.youtube.com/watch?v=stM8dgcY1CA&t=351s> > [consulta: 12 de juny del 2019]

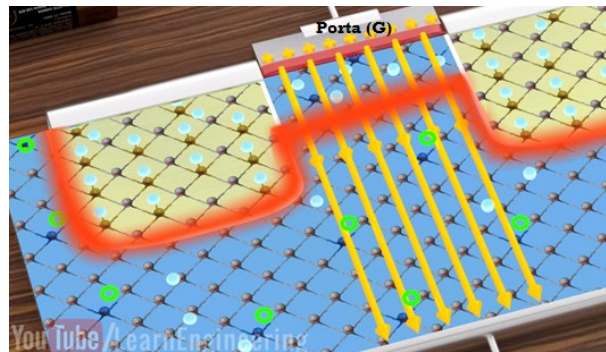
### 1.1.3.1.2 Funcionament

Per tal d'explicar el procés en un transistor MOSFET ens basarem en una estructura NPN (anomenat NMOS). En aquest transistor NMOS, quan hi ha un corrent extern/general que vol ser modificat, aquest és connectat al terminal de la porta, de tal manera que la porta queda carregada positiva o negativament (segons la tensió aplicada). En el cas que la tensió sigui positiva, el que es fa és generar un camp elèctric positiu que atrau els electrons del silici p cap a la porta.<sup>6</sup>

En aquest sentit, els electrons dels àtoms de la part P dopada es desplacen a través dels forats atrets per la tensió de la porta (carregada positivament) i repel·lits pel substrat (carregat negativament), situat a sota de la part P. La majoria d'ells es recombinen amb els forats d'aquella zona, però a mesura que el camp electromagnètic (format per la diferència de carregues entre la porta i el substrat) vagi atraient els electrons, aquests pararan de recombinar-se amb els forats (perquè cada vegada hi haurà menys) i es començaran a posicionar lliurement al costat de l'aïllant.

Aquesta zona és molt important perquè, si ens fixem (imatge 1.4), la disposició de les regions d'esgotament canvia. Gràcies als electrons sobrants, que han sigut atrets per la porta, s'ha format una zona molt fina prop de la porta que permet el pas d'electrons entre les dues parts dopades negativament (N): el canal.

<sup>6</sup> Igual que passa en els condensador, si un aïllant se situa entre mig de dues plaques conductores carregades elèctricament, es crearà un camp electromagnètic a través de l'aïllant.



**Imatge 1.4**

Formació del canal i les noves regions d'esgotament un cop se li ha aplicat una tensió (en aquest cas positiva) a la porta.

MOSFET[enlínea]< <https://www.youtube.com/watch?v=stM8dgcY1CA&t=351s>>[consulta:12 de juny del 2019]

En aquest punt, el canal ja està obert. Si apliquem una tensió entre la font i el drenador, es podrà generar un corrent elèctric que podrà fluir des de la font fins al drenador, fet que no seria possible si no s'hagués creat aquest canal.

D'aquesta manera, la tensió del corrent provinent de la porta serà la que controla l'energia que tingui el camp electromagnètic format entre la porta i el substrat, tantmateix, aquest camp electromagnètic serà el responsable de definir el nombre d'electrons que es posicionin al costat de l'aïllant i, consegüentment, també serà el responsable del gruix del canal i de la intensitat del corrent entre font i drenador.

#### 1.1.3.1.3 Estats de funcionament

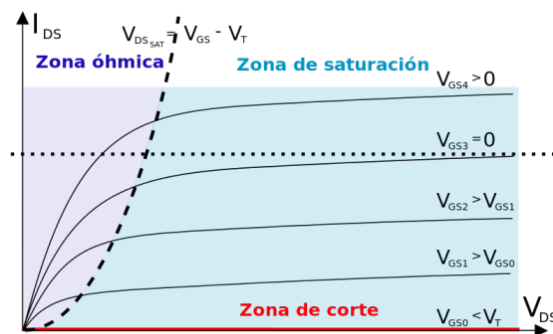
Arribats a aquest punt, cal mencionar que els MOSFETs únicament funcionen amb senyals digitals, és a dir, només treballen amb senyals que transmeten la informació de manera binària (en zeros i uns).

És per aquest motiu que només existeixen tres estats possibles per a qualsevol MOSFET.

- *Estat de tall.* En aquest estat la tensió aplicada a la porta no és suficientment intensa com per crear cap canal en la zona p per on puguin fluir els electrons<sup>7</sup>, i per tant, no hi ha corrent que pugui fluir entre la font i el drenador. Essencialment, la resposta del transistor en aquest estat és nul·la, i per tant la informació que donarà es podria equiparar amb el valor "0" en codi binari.

<sup>7</sup> La tensió mínima que s'ha d'aplicar a la porta d'un MOSFET per tal de que es creï el canal és representada com:  $V_T$  (voltatge Threshold).

- *Estat de conducció lineal.* Quan el transistor està en aquest estat vol dir que es troba en la zona òhmica. En aquesta zona, la tensió supera  $V_T$ , i per tant, es crea el canal en la part p. Nogensmenys, com la tensió de la porta encara és mínima, el transistor actua com una resistència variable connectada entre la font i el drenador en el circuit<sup>8</sup>. D'aquesta manera, si la tensió del corrent entre font i drenador no varia, es pot aconseguir manipular la intensitat de la corrent en qüestió, tal i com diu la llei d'Ohm:  $V = I \cdot R$  (on  $V$ : voltatge,  $I$ : intensitat,  $R$ : resistència). A part d'això, també s'ha de tenir present que la informació que dona el transistor en aquest estat és la de "1" en codi binari, ja que, a diferència de l'estat de tall, en aquí es transmet corrent.
- *Estat de saturació.* Quan el transistor està en aquest estat vol dir que es troba en la zona no òhmica. En aquest últim estat s'arriba quan la tensió del corrent entre la font i el drenador supera un determinat valor (propi de cada transistor) anomenat tensió de saturació ( $V_{DS\text{SAT}}$ ). L'amplada del canal no pot augmentar més (està al màxim), i per tant, arriba el punt on la intensitat del corrent font-drenador es torna independent de la tensió del mateix canal.



Gràfica 1.1

Gràfica on es representen els estats del MOSFET depenent de la intensitat del corrent font-drenador ( $I_{DS}$ ), la tensió del corrent font-drenador ( $V_{DS}$ ), i la tensió provinent de la porta ( $V_{GS}$ ).

Cruvas-MOSFET[enlínea]<<https://www.luisllamas.es/wp-content/uploads/2016/07/arduino transistor-mosfet-curvas.png>>[consulta:22 d'agost del 2019]

Com tal veiem, la tensió aplicada a la porta té un paper molt important en funcionament del transistor; no obstant això, la tensió del corrent que passa per la font i el drenador també són una peça clau pels transistors, ja que si aquesta tensió s'augmenta en l'estat de saturació, no influeix a la intensitat del mateix corrent i a l'hora permet una ampliació general del flux d'energia final.

<sup>8</sup>El valor de la resistència ve determinat pel voltatge provinent de la porta, el qual farà el canal més ample o més estret.

A part de la funció d'amplificador, també cal remarcar que si no s'aplica cap tensió entre la font i el drenador simplement no es crea cap corrent en el transistor i per tant no hi ha flux d'energia, d'aquesta manera s'observa com el transistor ha tallat el corrent (funció d'interruptor).

Observant-t'ho amb perspectiva, podem concloure que el flux d'energia final (el corrent resultant) ve determinat per les tensions aplicades en la terminal font i la terminal porta respectivament.

#### 1.1.3.1.4 Especificacions

Els MOSFET, tal com hem mencionat, també poden tenir una part predominant N. Si són d'aquest estil, el seu funcionament és exactament igual que el que tenen la part predominant P amb la única diferència que els electrons es substitueixen per forats i a la inversa, igual que passa amb els dos tipus NPN i PNP dels BJT, i a conseqüència d'aquest fet, el corrent que s'obté dels transistors de canal N<sup>9</sup> (el corrent resultant) és el que surt del drenador, i el corrent que s'obté dels transistors de canal P és el que surt de la porta.

Al ser un component electrònic, també té un símbol electrònic específic i diferent dels BJT. De fet, té dos símbols associats per la mateixa raó que els tenen els BJT (figura 1.3).

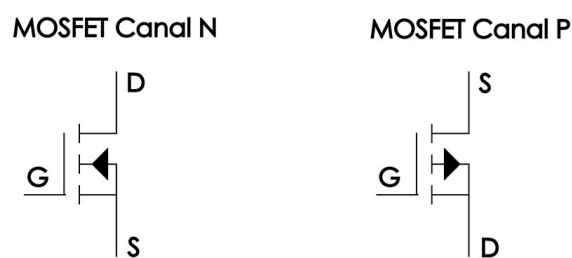


Figura 1.3

Símbols electrònics del MOSFET amb P dopatge predominant i el MOSFET amb N dopatge predominant respectivament.

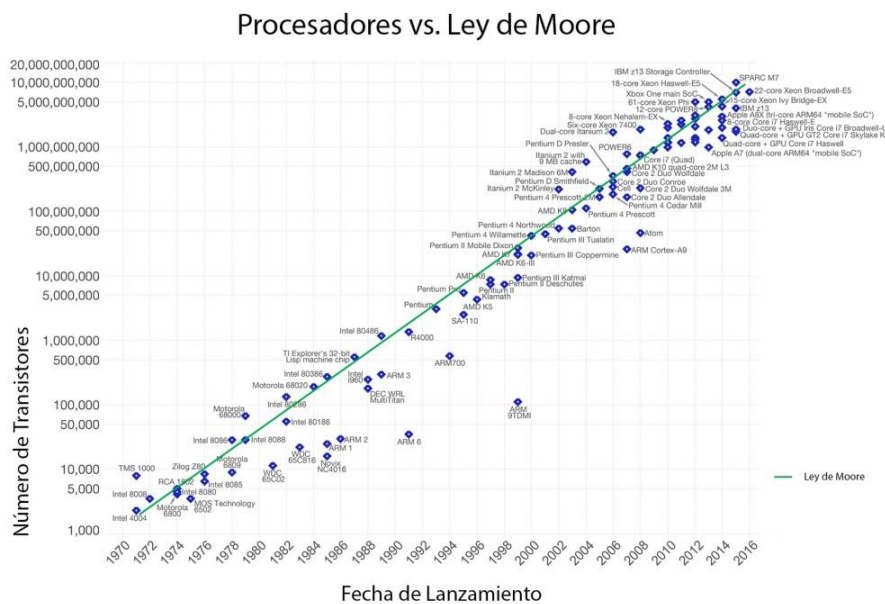
*Funcionamiento de un MOSFET*[enlínea]< <http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-mosfet/>>[consulta:22 d'agost del 2019]

<sup>9</sup>Els FET de canal N són els que tenen la part predominant dopada P, i a la inversa.

# 1.2 Evolució dels transistors. Llei de Moore

Tal com hem mencionat anteriorment, els transistors són una eina fonamental per l'electrònica. Gràcies a aquests components podem crear ordinadors que poden processar un número inimaginable d'operacions per segon i la clau d'això és simplement el fet de fer cada transistor el més petit possible. Això és així atès que si som capaços de posar molts transistors en un espai reduït, aquests poden fer moltes més operacions que un sol transistor que ocupi el mateix espai.

De fet, aquest mètode revolucionari de miniaturització de transistors va ser imaginat pels científics just al moment de crear el primer transistor, i de fet, un dels propis fundadors de l'empresa multinacional *Intel*, Gordon Earle Moore, va fer una predicció de futur que deia que el ritme de miniaturització dels transistors seria tan ràpid que va predir que cada dos anys, a partir d'aquell moment, el nombre de transistors que podria tenir un circuit integrat seria cada vegada el doble. Aquesta predicció és anomenada la Llei de Moore en honor al seu creador i és impressionant el fet de saber que Moore tenia raó i que des de la creació del primer microprocessador en xip (1971 - l'Intel 4004), s'ha anat complint la llei quasi a la perfecció tal i com mostra la gràfica 2.1.



**Gràfica 2.1**  
 Llei de Moore comparada amb la realitat dels transistors.  
 Nanomentros en CPUs [enlínea] < <https://www.geeknetic.es/Editorial/1406/La-realidad-sobre-los-nanometros-en-procesos-de-fabricacion-de-CPU-y-GPU.html> > [consulta: 17 juliol del 2019]



Tot i això, actualment està apareixent un greu problema. Un problema lògic i fonamental que s'escapa de la predicció de Moore i ens deixa a la intempèrie davant el trencament del que fins ara era el perfecte funcionament dels transistors.

Molt essencialment el problema és la mecànica quàntica.

La veritat és que sembla inimaginable que la física quàntica pugui haver arribat als transistors, però la veritat és que la tecnologia ha evolucionat tant que ha arribat el punt en que els transistors convencionals no poden funcionar correctament per culpa dels efectes quàntics.

Però per què? Doncs certament, tal com Moore va pensar, per crear ordinadors cada vegada més eficients també s'han de crear transistors cada vegada més petits, i està arribant el punt en que els transistors són tan petits que els efectes quàntics els hi afecten, i malauradament no com a benefici, ans el contrari, impedeixen el seu correcte funcionament.

Particularment, l'efecte principal de la mecànica quàntica que crea aquest problema es diu **efecte túnel**.

## 1.3 L'efecte túnel

### 1.3.1 Fonaments quàntics

#### 1.3.1.1 Fonaments 1: Dualitat ona-partícula i l'equació de De Broglie

Abans d'entrar en detall de què és l'efecte túnel i per quin motiu es manifesta, comencem pel més bàsic quan parlem de mecànica quàntica: el concepte de la dualitat ona-partícula.

El que explica *la dualitat ona-partícula* és exactament el que el seu propi nom indica, que en realitat no hi ha diferència entre ones i partícules, ja que els dos conceptes són en realitat la mateixa cosa. Tal és així que totes les partícules que nosaltres podem apreciar tenen una funció d'ona associada i presenten característiques d'ona (i, per tant, també es poden considerar ones).

Experiments com el de la doble reixa van fer plantejar als científics de l'època la naturalesa de la matèria, és a dir, si es tracta d'una ona, una partícula o les dues a l'hora, i va ser a causa d'experiments com aquest que finalment es va poder consolidar la teoria de la dualitat ona-partícula.

Aquesta teoria explica que totes les partícules tenen una funció d'ona associada, però això no vol dir que tots els objectes tinguin la mateixa longitud d'ona associada. La longitud d'ona que tenen els objectes amb una massa relativament petita és molt superior a la longitud d'ona que presenten els objectes amb una massa molt més gran. És per aquest motiu pel qual a escala macroscòpica no s'aprecien els efectes de les funcions d'ones de la matèria (la dualitat ona-partícula) i únicament es posa de manifest a escales microscòpiques (atès que quant més massa, més petita serà la longitud d'ona). Aquest fet va ser descrit pel físic De Broglie, qui va formular una equació per explicar-ho (equació 3.1) (veure annex: Deducció de l'equació de De Broglie). En aquesta equació es pot veure que la massa ( $m$ ) i la longitud d'ona ( $\lambda$ ) són inversament proporcionals, és a dir, quan una augmenta l'altre disminueix i viceversa.

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

#### Equació 3.1

Equació de De Broglie on es pot veure que la massa i la longitud d'ona són inversament proporcionals.

Si ens posem a pensar sobre l'essència de la naturalesa dual, ens donarem compte que hi ha un problema, i és que si les partícules són també a la vegada ones, com les veurem nosaltres? Com les percebrem? Se'ns presentaran com a corpuscles?, com a ones?, o veurem una nova cosa que sigui la unió d'ones i partícules? Malauradament el mateix fet de *mesurar* no permet el fet d'observar units aquests dos conceptes tan diferents. I malgrat tenir experiments que poden comprovar que les partícules tenen comportament d'ona, quan ens disposem a *mesurar* una partícula per veure el seu funcionament, la funció d'ona associada a la partícula en qüestió col·lapsa, presentant-se com un sol punt en l'espai.

Aquest fet és increïble i molt difícil d'entendre car encara no hi ha cap explicació lògica que mostri què és el col·lapse de funció d'ona en si i perquè succeeix. Per aquesta raó, la física quàntica ortodoxa està començant a ser qüestionada en la societat científica presentant-se com un gran debat en l'actualitat<sup>10</sup>. No obstant això, com el debat és actual, encara no hi ha proves sòlides al respecte, i per tant, la física ortodoxa encara és la que regeix la física pràctica. Arran d'això, en aquest treball es mostrarà tot a partir del que la quàntica ortodoxa descriu. Havent explicat aquest fet, retornarem al punt on parlàvem sobre la probabilitat i, amb ella, el principi d'incertesa.

### 1.3.1.2 Fonaments 2: Principi d'incertesa de Heisenberg i equació de Schrödinger

El descobriment de la veritable naturalesa dual de la matèria (encara que avui dia estigui sent tema de debat), en el passat va portar a replantejar molts temes de la física del moment, en especial la cinemàtica.

Això és així perquè segons la mecànica Newtoniana, utilitzada abans del descobriment, les partícules es podien estudiar com si fossin punts en l'espai, amb un lloc i un estat definits que podien ser mesurats, però amb la reformulació de la naturalesa de la matèria que explica que les partícules també presenten propietats d'ona, aquests paràmetres concrets que tenien les partícules, d'espai i estat, deixaven de ser plenament definits, i com a conseqüència es va haver de començar a estudiar aquests aspectes mencionats mitjançant exclusivament la probabilitat<sup>11</sup>.

En aquest punt és on apareixen diferents postulats i fórmules que els millors físics del moment van elaborar per intentar descriure aquella nova realitat en que s'havien trobat. Entre aquests, podem destacar el principi d'incertesa de Heisenberg i l'equació de Schrödinger.

El principi d'incertesa formulat per Werner Heisenberg el 1927, essencialment estableix que ni la posició ni la quantitat de moviment d'una partícula poden ser determinats amb precisió absoluta, sinó que les incerteses dels dos factors mencionats són inversament proporcionals. Per tant, quan augmentem la precisió d'un dels factors (quantitat de moviment o posició) disminueix necessàriament la precisió de l'altre factor. Aquesta explicació s'expressa amb una petita fórmula (equació 3.2) proposada pel propi Heisenberg, en la que  $\hbar$  és la constant de Dirac (o constant de Planck ( $h$ ) dividida entre tau), la qual adquireix un valor de:  $1,05457 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ . A part,  $\Delta x$  representa la incertesa de la coordenada  $x$  i  $\Delta p$  la incertesa de la component respectiva a la quantitat de moviment.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Equació 3.2

Principi d'incertesa de Heisenberg.

<sup>10</sup> Això no vol dir que la física ortodoxa/del segle passat estigui equivocada, únicament no està completada.

<sup>11</sup> En el col·lapse de la funció d'ona, saber la posició on apareixerà la partícula és totalment probabilística. Aquesta probabilitat ve totalment relacionada amb la intensitat que presenta la funció d'ona associada a la partícula en l'espai.

Per la seva banda, l'equació de Schrödinger (equació 3.3) elaborada pel famós físic austríac Erwin Schrödinger, és homòloga a l'equació d'ona però que en comptes de descriure ones, descriu com evoluciona qualsevol sistema quàntic a partir de la funció d'ona de les partícules que el constitueixen. Aquesta equació representa l'eina fonamental per treballar en mecànica quàntica, i per aquesta raó resulta tan important.

$$\frac{-\hbar^2}{2 \cdot m} \cdot \nabla^2 \cdot \psi \cdot (r) + V \cdot (r) \cdot \psi \cdot (r) = E \cdot \psi \cdot (r)$$

Equació 3.3

Equació de Schrödinger

### 1.3.2 Explicació de l'efecte túnel

Certament, l'efecte túnel és, en si mateix, una propietat que deriva de la dualitat ona-partícula.

Així doncs, per explicar l'efecte mencionat i poder-lo entendre millor, presentarem un exemple simple i concret: el d'una pilota llençada horitzontalment contra un mur.

En aquest cas, la mecànica clàssica prediu que la pilota xocarà i rebotarà contra el mur. Òbviament, les possibilitats de que la pilota acabi a l'altre banda del mur (sense haver-lo alterat) són nul·les. El pensament de que un objecte no travessarà mai una barrera que ho impedeix físicament és clàssic i lògic, però a escala microscòpica, com les masses dels cossos es redueixen significativament, les accions que poden arribar succeir són molt diferents a les quotidianes en el món macroscòpic

A escala quàntica, el que es pot arribar a deduir mitjançant la ja mencionada equació de Schrödinger és que les possibilitats de que al final la pilota (ara microscòpica) es trobi a l'altra banda del mur no són nul·les.

La causa d'aquest fet és una altra equació, la de De Broglie, on podem observar que les longituds d'ona associades a les partícules en el món microscòpic (on hi ha molt poca massa) poden arribar a tenir valors molt alts. Tenint això en ment, si repetim tot l'experiment a escala microscòpica, podem veure que la funció d'ona associada a la pilota (ara amb més longitud d'ona) no ha de perquè desaparèixer al topar contra el mur, ja que, a més a més, aquest mur ha disminuït proporcionalment el seu gruix<sup>12</sup> i consegüentment l'únic que podrà fer és disminuir la intensitat de la funció d'ona.

<sup>12</sup> Tant la grandària de la pilota com la del mur han disminuït proporcionalment, però al tenir molta menys massa, ara la funció d'ona de la pilota té molta més força que abans, podent arribar a l'altre banda del mur (on abans no podia arribar perquè no tenia suficient força).

Explicat d'una altra manera, la funció d'ona de la pilota s'aniria propagant a través del mur tenint cada vegada menys intensitat, de tal manera que si el mur fos suficientment gran, la funció d'ona es "perdria" a poc a poc fins a ser imperceptible; però pel contrari, com també reduïm el gruix del mur a una escala molt petita, podria cabre la possibilitat que la funció d'ona no es "perdés" del tot mentre travessa el mur i que, per tant, aparegués a l'altre banda del mur microscòpic.

Aquesta analogia és molt pràctica per encetar l'explicació de l'efecte túnel, ja que en certa manera, la realitat és exactament la mateixa situació essent la pilota una partícula (com per exemple, un electró) i el mur una barrera de potencial.

Resumidament, si agafem els conceptes que hem tingut present en l'exemplificació i els traslладem a la realitat (amb electrons i barreres de potencial), veurem que la funció d'ona de l'electró també es pot trobar a l'altre cantó de la barrera (i a més a més amb una probabilitat molt més alta que en la pilota, puix que la seva massa és ridículament més petita). I certament, si això passa, quan la funció d'ona de l'electró col·lapsi, la possibilitat de que l'electró aparegui a l'altre banda de la barrera de potencial no és nul·la.<sup>13</sup> (veure referència número 11)

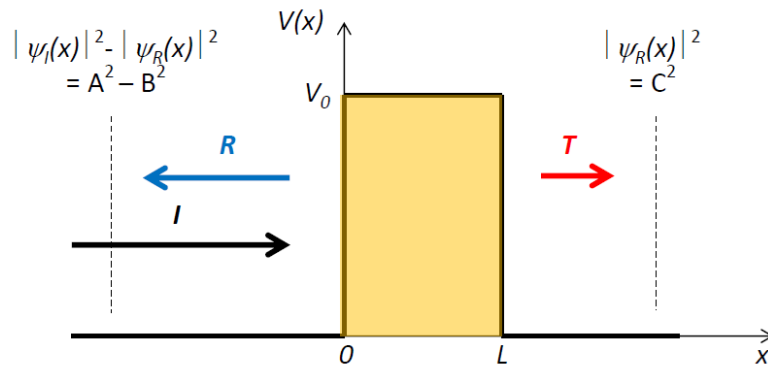
Ara que comencem a entendre l'efecte túnel, encetarem un altre apartat on procedirem a explicar amb més detall aquest fenomen.

### **1.3.2.1 Equacions per calcular la probabilitat d'efecte túnel**

Tal com hem mencionat, sense la mirada quàntica, si l'electró no té suficient energia per superar la barrera, aquest rebotarà completament, i si pel contrari té l'energia necessària per superar-la, la travessarà. Però, realment, el que passa a escala quàntica és que l'electró mai es reflecteix completament ni travessa completament la barrera; sinó que sempre es troba en una situació parcial entre la reflexió i la transmissió (imatge 3.1). Dit en altres paraules, un percentatge (de probabilitat) de la funció d'ona de l'electró es troba a una banda de la barrera i el percentatge (de probabilitat) sobrant es queda a la mateixa banda de la barrera.

---

<sup>13</sup> De fet, fins i tot, en el primer cas de la pilota i el mur en el món macroscòpic les possibilitats de que la pilota acabi apareixent a l'altre banda del mur no són nul·les tal i com la mecànica clàssica diu, sinó que hi ha una petitíssima possibilitat (ridículament apreciable) de que la pilota traspassi el mur, ja que encara que tinguin una massa molt elevada, l'equació de De Broglie no nega en cap moment que tinguin una funció d'ona associada, i sempre que hi ha una funció d'ona, sempre pot hi ha la possibilitat (encara que sigui ridículament minúscula) que la pilota macroscòpica col·lapsi a l'altre banda del mur on la seva funció d'ona també hi és (amb intensitat baixíssima però no nul·la).

**Imatge 3.1**

Representació de la reflexió i transmissió. *I*: energia inicial / *R*: coeficient de reflexió / *T*: coeficient de transmissió.

Presentació proporcionada pel tutor. *Diapositives del Capítol 3: fenòmens quàntics (Professor Jordi Pascual)*.

Aquests coeficients de transmissió i reflexió poden variar molt perquè depenen directament d'uns quants factors tals com l'energia de la barrera de potencial, l'energia de la partícula, l'amplada de la barrera de potencial o la massa de la partícula (per simplificar les operacions no es fa servir la massa en si, sinó la massa efectiva<sup>14</sup>). Per exemple, si l'energia de la partícula és molt superior a l'energia de la barrera de potencial el percentatge de transmissió serà superior al de reflexió (seguint una proporcionalitat inversa).

Certament, podem arribar a calcular el percentatge de probabilitat que hi ha perquè succeeixi la transmissió (i reflexió) mitjançant fórmules que deriven de l'equació de Schrödinger i que tenen en compte tots els factors mencionats prèviament. Així mateix, dintre d'aquest mateix fenomen, es poden diferenciar dues situacions que corresponen respectivament al cas on: l'energia de la partícula ( $E$ ) és superior a l'energia de la barrera ( $V_0$ ) (per tant  $E > V_0$ ), i quan l'energia de la partícula ( $E$ ) és inferior a l'energia de la barrera ( $V_0$ ) (per tant  $E < V_0$ ).

En conseqüència d'aquesta diferenciació, també s'han deduït diferents equacions (molt similars entre si) que descriuen aquestes dues situacions en que es pot presentar l'efecte túnel.

Les equacions en qüestió que es mostren en els requadres d'equacions 3.4 i 3.5 presenten (en tant per u) la probabilitat de que hi hagi efecte túnel en dos diferents casos.

<sup>14</sup> La massa efectiva ve a ser la massa que es considera que tenen els electrons tenint present els xocs que hi ha entre ells. En altres paraules, és la massa que s'utilitza per no considerar les conseqüències dels xocs i per tant, simplificar les operacions (les conseqüències dels xocs entre els electrons ja són considerades dintre de la massa efectiva).

- Equació 3.4: Quan  $E > V_0$ . Les seves equacions són:

$$R = \frac{V_0^2 \sin^2 \left[ \frac{2m_{eff}(E - V_0)}{\hbar^2} \right]^{1/2} L}{4E(E - V_0) + V_0^2 \sin^2 \left[ \frac{2m_{eff}(E - V_0)}{\hbar^2} \right]^{1/2} L}$$

$$T = \frac{4E(E - V_0)}{4E(E - V_0) + V_0^2 \sin^2 \left[ \frac{2m_{eff}(E - V_0)}{\hbar^2} \right]^{1/2} L}$$

**Equació 3.4**

Equacions per calcular el tant per u de transmissió (T) i reflexió (R) quan  $E > V_0$ .

Presentació proporcionada pel tutor. *Diapositives del Capítol 3: fenòmens quàntics (Professor de Jordi Pascual)*.

- Equació 3.5: Quan  $E < V_0$ . Les seves equacions són:

$$R = \frac{V_0^2 \sinh^2 \left[ \frac{2m_{eff}(E - V_0)}{\hbar^2} \right]^{1/2} L}{4E(E - V_0) + V_0^2 \sinh^2 \left[ \frac{2m_{eff}(E - V_0)}{\hbar^2} \right]^{1/2} L}$$

$$T = \frac{4E(E - V_0)}{4E(E - V_0) + V_0^2 \sinh^2 \left[ \frac{2m_{eff}(E - V_0)}{\hbar^2} \right]^{1/2} L}$$

**Equació 3.5**

Equacions per calcular el tant per u de transmissió (T) i reflexió (R) quan  $E < V_0$ .

Presentació proporcionada pel tutor. *Diapositives del Capítol 3: fenòmens quàntics (Professor de Jordi Pascual)*

En aquestes equacions:

- $V_0$ : Energia/alçada de la barrera de potencial
- $E$ : energia de la partícula en qüestió
- $m_{eff}$ : massa efectiva de la partícula
- $L$ : gruix de la barrera
- $h$ : constant de Plank
- $\hbar$ : constant de Planck reduïda ( $h$  dividida entre  $2\pi$ )

Les equacions 3.4 i 3.5 representen els percentatges en tant per u, per tant, es pot demostrar que  $R + T = 1$ .

Si ens fixem, ens donarem compte que en el segon cas (equació 3.5) s'està produint l'efecte túnel, ja que una partícula (amb la seva funció d'ona) amb una energia inferior a la de la barrera de potencial té la possibilitat de travessar-la (encara que una part del percentatge predigui que pot ser reflectida).

En aquest mateix cas, on  $E < V_0$ , si la barrera de potencial pot ser considerada suficientment gran (essent  $\left[ \frac{2m_{eff}(E-V_0)}{\hbar^2} \right] \gg 1$ ), l'equació T de l'equació 3.5 es pot simplificar tal i com es presenta en l'equació 3.6:

$$T = G \cdot e^{-2 \cdot K \cdot L}$$

#### Equació 3.6

Aproximació de l'equació T de l'equació 3.5 quan la barrera de potencial és considerable/ bastant gran.

Presentació proporcionada pel tutor. *Diapositives del Capítol 3: fenòmens quàntics (Professor de Jordi Pascual)*

En aquesta equació:

- **T** és el coeficient d'efecte túnel
- **G** és  $16 \cdot \frac{E}{V_0} \cdot \left(1 - \frac{E}{V_0}\right)$
- **K** és  $\sqrt{\frac{2 \cdot m_{eff} \cdot (V_0 - E)}{\hbar}}$
- **L** és l'amplada/gruix de la barrera de potencial

On **E** és l'energia de la partícula, **V<sub>0</sub>** és l'energia de la barrera, **m<sub>eff</sub>** és la massa efectiva de la partícula.

Finalment, hem obtingut una equació que descriu, en forma de tant per u, l'efecte túnel i, concretament, en el cas que l'alçada de la barrera sigui gran. Mirant aquesta equació, s'observa que el gruix/amplada de la barrera resulta ser un factor molt decisiu quan es parla d'efecte túnel (podem veure que la "L" fa reduir el resultat "T") i no només l'alçada d'aquesta barrera de potencial com caldria esperar. Més endavant, es discutirà la importància d'aquest fet en els transistors.



## 2 Objectius i preguntes de recerca

---

Feta aquesta introducció sobre els transistors i els fenòmens quàntics, més concretament sobre l'efecte túnel, cal que definim quines són les nostres preguntes de recerca i, alhora, quins són els objectius de la recerca per tal de donar-hi resposta.

Les preguntes de recerca són:

- 1) Quina relació hi ha entre l'evolució dels transistors i els efectes quàntics com l'efecte túnel?
- 2) Com els nous materials com els high-k dielèctrics poden ajudar a resoldre el problema dels transistors cada vegada més petits?

Així mateix, els nostres objectius de la recerca són:

- 1) Fer una cerca bibliogràfica sobre la importància de l'efecte túnel en els transistors.
- 2) Fer una cerca bibliogràfica sobre com es poden solucionar els problemes de l'efecte túnel en els transistors, centrant-nos en els high-k dielèctrics.
- 3) Demostrar matemàticament que els models teòrics que expliquen l'efecte túnel en una barrera de potencial i el corrent no desitjat a través de la porta d'un transistor (models teòrics utilitzats en la literatura) són similars.
- 4) Calcular els gruixos de diferents òxids (high-k dielèctrics) que mantenen constant la capacítància de la porta en un transistor actual.
- 5) Calcular la probabilitat d'efecte túnel per diferents tipus d'aïllants i diferents gruixos.
- 6) Analitzar la influència de l'augment del gruix d'una barrera en la probabilitat d'efecte túnel.

## 3 Resultats dels objectius de recerca i anàlisi

---

### 3.1 Recerca 1: Importància de l'efecte túnel en els transistors

---

En un principi l'efecte túnel no pot semblar tan important pels transistors ja que es tracta d'una propietat que només succeeix perceptiblement a escales quàntiques, però com tal hem dit anteriorment, aquests petits aparells estan arribant a escales tan petites que les probabilitats de que es faci perceptible l'efecte túnel són cada vegada més elevades.

Si ens posem a comparar, el transistor MOSFET<sup>15</sup> també presenta tots els components que fèiem servir per exemplificar l'efecte túnel en l'apartat anterior: l'electró solitari és substituït pels propis electrons que dirigeixen cap al terminal porta, i per altra banda, l'aïllant elèctric, situat entre la porta i la resta del transistor, representa la barrera de potencial.

Un cop aclarits els factors, podem observar que l'efecte túnel també és present en els transistors, i per tant, també s'ha de tenir en compte que hi ha electrons no desitjables que passen des del terminal porta fins al nostre corrent entre el drenador i la font.

Explicat d'una altra manera, podem arribar a entendre que la porta ja no només funciona com a regulador del canal que es forma en el transistor, sinó que ara també fa passar electrons a l'altre banda de l'aïllant.

A partir d'aquest fet, se'ns presenten diversos escenaris depenent de l'estat en que es troba el transistor.

Quan el transistor es troba en estat de conducció lineal o saturació (veure apartat 1.1.3.1: *Estructura i funcionament del MOSFET*), els electrons que travessen l'aïllant (a causa de l'efecte túnel) no representen cap problema greu car les alteracions que aquests poden arribar a causar al corrent resultant són tan mínimes que es poden negligir sense preocupació. Amb altres paraules, la intensitat que aquests electrons aporten al corrent entre font i drenador és massa petita com per poder-la apreciar conjuntament amb la intensitat de tot el flux d'electrons que passa pel canal. Així doncs, si ens fixem en el corrent total en conjunt, la intensitat causada per l'efecte túnel pot ser menyspreada perquè, proporcionalment, el corrent total quasi no varia.

Per altra banda, tenim el cas on el MOSFET es troba en estat de tall. En aquesta situació hi torna a haver l'efecte túnel que es produïa en el cas anterior; però a diferència d'aquest, ara no hi ha cap corrent resultant, i per tant, el mínim corrent produït pels electrons provinents de la porta deixa de ser irrellevant.

---

<sup>15</sup> Agafem els MOSFET perquè, com hem dit anteriorment, són els més utilitzats a escala mundial.

Aquest fet adquireix importància perquè fa consumir una certa energia al transistor quan es troba en estat de tall<sup>16</sup>. Més enllà d'aquí, si aquest mateix fet el traslladem a gran escala, podrem veure que un aparell que contingui milers de milions de transistors que es trobin en estat de tall consumirà una certa energia extra, la qual provindrà de la suma de totes les fuites d'electrons que hi ha en els seus processadors. Aquesta energia extra consumida pot resultar bastant important tal i com es pot suposar ja que es energia gastada "inútilment". Aquest fet, tal i com es pot suposar, converteix l'efecte túnel en un problema en l'eficiència dels transistors.

Sumat a això, també podem veure que les probabilitats de que hi hagi efecte túnel augmenten quan el gruix de la barrera es fa més petit. En conseqüència d'aquest fet i tots els explicats amb anterioritat, podem concloure que quant més petit sigui el transistor més petits seran els gruixos dels aïllants/barreres, per tant, més probabilitats d'efecte túnel hi haurà, per tant, més electrons seran transmesos a través de l'aïllant, i per tant, més energia es consumirà quan el transistor estigui en estat de tall (o sigui, quan no hauria de consumir energia).

Al fi podem veure com l'efecte túnel es presenta com un gran inconvenient en el procés de miniaturització dels transistors, i per tant, en l'evolució d'aquests.

### 3.1.1 Importància de la solució al problema

La solució al problema en la miniaturització dels transistors és de gran importància no només pel món de l'electrònica sinó que també pel propi desenvolupament tecnològic humà.

Si recordem, els transistors representaven una de les peces més importants pels dispositius electrònics. Tenint present això, és fàcil de veure el fet de que si apareix un problema l'evolució dels transistors, també hi haurà un problema en l'evolució i el desenvolupament dels dispositius electrònics. Això és així perquè quants més transistors hi puguin cabre en un mateix circuit integrat, més processos podrà dur a terme aquest circuit integrat i per tant, més eficient i ràpid podrà processar el dispositiu electrònic. Doncs bé, si ho ajuntem tot, podem veure com, si no es poden miniaturitzar més els transistors, no es podran fabricar circuits integrats més eficients, i consegüentment, si no es poden fabricar microprocessadors més eficients, no es poden crear dispositius més ràpids sense augmentar l'espai ocupat.

Amb això en ment es pot veure que mai més es podrien crear ordinadors més potents i l'evolució tecnològica s'hauria estancat. L'impacte social d'aquest fet seria considerable tenint present que en el nostre dia a dia utilitzem constantment els mòbils, els quals destaquen per la immensa quantitat de processos que fan sense ocupar molt espai. Per aquesta raó, buscar una solució a aquest problema i intentar continuar el procés de miniaturització d'aquests transistors permetria aportar grans avenços tecnològics a les generacions futures. D'aquesta manera, si ens fixem, fins i tot podríem considerar l'acceleració en el desenvolupament com a espècie humana, i amb això, la possibilitat de que els ordinadors ens donessin les respostes a les preguntes i problemes que tenim com a humans en un futur.

---

<sup>16</sup> En teoria, quan el transistor es troba en estat de tall hauria de consumir 0 energia. D'aquí rau la importància d'aquest corrent mínim.

### 3.1.2 Com es presenta l'efecte túnel en els transistors

Tal com estem veient, el fet de predir les conseqüències de l'efecte túnel en els transistors està adquirint bastanta importància. Per aquesta raó hi ha hagut molt estudis al respecte, entre els quals podem destacar el fet per l'IEEE<sup>17</sup> fa relativament pocs anys, al 2003, anomenat *MOSFET Gate Leakage Modeling and Selection Guide for Alternative Gate Dielectrics Based on Leakage Considerations*.

Entre altres coses, en aquest estudi, Yee-Chia Yeo et al. exposen un model teòric amb el qual es pot calcular la intensitat de corrent per unitat d'àrea, que passa per l'aïllant de la porta dels MOSFET com a conseqüència de l'efecte túnel.

L'equació general que ells formulen és l'equació 4.1, la qual pot resultar bastant difícil ja que hi ha molts factors desconeguts. Doncs bé, per tal de fer-la més entenedora exposarem cada factor què representa.

$$J_G = \frac{q^2}{8\pi h \epsilon \phi_b} \cdot C(V_G, V, L, \phi_b) \cdot \exp\left[-\frac{8\pi \sqrt{2m_{eff}} (q\phi_b)^{\frac{3}{2}}}{3 h q |E|} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{|V|}{\phi_b}\right)^{\frac{3}{2}}\right]\right]$$

#### Equació 4.1

Model teòric per calcular la intensitat de corrent per unitat d'àrea que passa a través de la porta dels MOSFET.

*MOSFET Gate Leakage Modeling and Selection Guide for Alternative Gate Dielectrics Based on Leakage Considerations*. (2003,04)[enlínea]< <https://people.eecs.berkeley.edu/~hu/PUBLICATIONS/PAPERS/783.pdf>>[consulta: 4 de setembre del 2019]

<sup>17</sup> Sigles de *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, en anglès Institut d'Enginyers Elèctrics i Electrònics.

En aquesta equació:

- $J_G$ : Intensitat de corrent per unitat d'àrea
- $q$ : Càrrega de l'electró:  $-1,602\ 176\ 565(35) \times 10^{-19}$  C
- $h$ : Constant de Planck:  $1,05457 \cdot 10^{-34}$  J · s
- $\varepsilon$ : permitivitat de l'aïllant en qüestió (factor que estudiarem més endavant)
- $\Phi_b$ : Energia potencial elèctrica entre l'electró i la barrera (eV) =  $\frac{(V_0 - E)}{q}$
- $V_0$ : Energia/alçada de la barrera de potencial
- $E$ : Energia de la partícula
- $C$ : factor de correcció
- $V_G$ : tensió a la porta
- $V$ : potencial de la barrera
- $L$ : amplada/gruix de la barrera de potencial
- Exp: exponent
- $m_{eff}$ : Massa de l'electró efectiva
- $|V|$ : El potencial elèctric =  $L \cdot |E|$
- $|E|$ : Camp elèctric
- $L$ : Gruix de la barrera de potencial

Tot i haver especificat totes les lletres, aquesta equació pot resultar bastant llarga i. Per sort, els mateixos que la van formular van poder fer una aproximació molt més simple tot mitjançant una expansió binomial i negligint els termes d'ordre superior. El resultat d'aquest procediment va donar l'equació 4.2.

$$J_G = b \cdot \exp \left[ - \frac{8 \pi \sqrt{2m_{eff}} (q\phi_b)^{\frac{3}{2}}}{3 h q |E|} \left[ \frac{3 |V|}{2 \phi_b} \right] \right]$$

#### Equació 4.2

Aproximació de l'equació de la equació 4.1 feta a partir d'una expansió binomial on es negligeixen aquells termes d'ordre superior.

*MOSFET Gate Leakage Modeling and Selection Guide for Alternative Gate Dielectrics Based on Leakage Considerations.* (2003,04)[enlínea] < <https://people.eecs.berkeley.edu/~hu/PUBLICATIONS/PAPERS/783.pdf> > [consulta: 4 de setembre del 2019]

En aquesta equació apareix una lletra nova,  $b$ . Aquesta és un factor preexponencial que no canvia significativament, és a dir, el que fa que hi hagi un major o menor corrent túnel ve donat principalment pel factor exponencial, no el preexponencial.

En conclusió, Yee-Chia Yeo et al. van aconseguir posar números a aquell fenomen que succeïa en els MOSFET, aportant un model teòric molt important en quan a transistors es tracta.

## 3.2 Pregunta de recerca 1 i hipòtesi

**“Quina relació hi ha entre l'evolució dels transistors i els efectes quàntics com l'efecte túnel?”**

La hipòtesi de partida és que si la probabilitat de que es doni l'efecte túnel (T) depèn de la l'equació 3.5<sup>18</sup>, en un transistor el corrent no desitjat a través del dielèctric també dependrà d'aquesta probabilitat T. Per tant, la probabilitat d'efecte túnel (T) també ens donarà informació sobre si un material amb un cert gruix pot disminuir aquest corrent no desitjat.

Així doncs, per demostrar que la nostra hipòtesi és certa, haurem de comprovar si les dades que ens donen els models teòrics que expliquen l'efecte túnel en una barrera de potencial concorden amb el corrent no desitjat a través de la porta d'un transistor (equació 4.2<sup>19</sup>).

En primer lloc, desenvoluparem el model teòric utilitzat en la literatura (equació 4.2<sup>20</sup>), i entre altres coses, substituïm el valor del potencial elèctric per una de les seves definicions: el producte del camp elèctric per el gruix de la barrera de potencial. Això ens resultarà més simple a l'hora de comparar les equacions.

En segon lloc, desenvoluparem de igual manera la formula que ens diu la probabilitat d'efecte túnel agafant però l'aproximació pels casos on la barrera és considerable car estem parlant de l'aïllant d'un transistor. En aquest cas, substituïm  $(V_0 - E)$  per  $q \cdot \phi_b$ , ja que ens farà més fàcil la comparació entre les dues equacions i a part ho podem fer perquè l'energia potencial elèctrica entre l'electró i la barrera ( $\phi_b$ ) és igual a  $\frac{(V_0 - E)}{q}$ .

Finalment, observarem les dues equacions per separat i les compararem per a veure si concorden.

$$^{18}\text{Equació 3.5: } T = \frac{4E(E-V_0)}{4E(E-V_0) + V_0^2 \sinh^2 \left[ \frac{2m_{eff}(E-V_0)^{1/2}}{\hbar} \right] L}$$

$$^{19}\text{Equació 4.2: } J_G = b \cdot \exp \left[ - \frac{8\pi \sqrt{2m_{eff}} (q\phi_b)^{3/2}}{3\hbar q |E|} \left[ \frac{3|V|}{2\phi_b} \right] \right]$$

<sup>20</sup> Ibídem

### 3.2.1 Part pràctica 1: Demostració matemàtica

- Per una banda, desenvolupem l'aproximació del model teòric de Yee-Chia Yeo et al.:

$$J_G = b \cdot \exp^{-\frac{8\pi \sqrt{2m_{eff}} (q\phi_b)^{\frac{3}{2}}}{3h q |E|} \left[ \frac{3|V|}{2\phi_b} \right]},$$

- Tenint present que  $|V| = L \cdot |E|$ , podem veure que:

$$J_G = b \cdot \exp^{-\frac{8 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{m_{eff}} \cdot q \cdot \phi_b \cdot \sqrt{q} \cdot \sqrt{\phi_b}}{3h q |E|} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L \cdot |E|}{\phi_b}},$$

$$J_G = b \cdot \exp^{-\frac{8 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{m_{eff}} \cdot q \cdot \phi_b \cdot \sqrt{q} \cdot \sqrt{\phi_b}}{3h q |E|} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L \cdot |E|}{\phi_b}},$$

$$J_G = b \cdot \exp^{-\frac{8}{2} \cdot \frac{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{m_{eff}} \cdot \sqrt{q} \cdot \sqrt{\phi_b} \cdot L}{h}},$$

Per tant, el resultat d'aquest desenvolupament ens dona que:

$$J_G = b \cdot \exp^{-4 \cdot \pi \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot m_{eff}} \cdot q \cdot \phi_b \cdot L}{h}}$$

- Per altra banda, agafem l'equació que dona la probabilitat d'efecte túnel. En aquest cas agafarem l'aproximació pels casos on la barrera és considerable car estem parlant de l'aïllant d'un transistor.

$$T = G \cdot e^{-2 \cdot K \cdot L}$$

$$T = \left[ 16 \cdot \frac{E}{V_o} \cdot \left( 1 - \frac{E}{V_o} \right) \right] \cdot \exp^{-2 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot m_{eff} \cdot (V_o - E)}}{\hbar} \cdot L} ,$$

- Com que sabem que  $(V_o - E) = q \cdot \phi_b$ , aleshores:

$$T = \left[ \frac{16 \cdot E \cdot (V_o - E)}{V_o^2} \right] \cdot \exp^{-\frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot m_{eff} \cdot (V_o - E)}}{\hbar} \cdot L} ,$$

$$T = \left[ \frac{16 \cdot E \cdot (V_o - E)}{V_o^2} \right] \cdot \exp^{-\frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot m_{eff} \cdot q \cdot \phi_b}}{\frac{\hbar}{2\pi}} \cdot L} ,$$

$$T = \left[ \frac{16 \cdot E \cdot (V_o - E)}{V_o^2} \right] \cdot \exp^{-\frac{2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot m_{eff} \cdot q \cdot \phi_b}}{\hbar} \cdot L}$$

Per tant, el resultat d'aquest altre desenvolupament matemàtic ens dona que:

$$T = \left[ \frac{16 \cdot E \cdot (V_o - E)}{V_o^2} \right] \cdot \exp^{-4 \cdot \pi \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot m_{eff} \cdot q \cdot \phi_b} \cdot L}{\hbar}}$$

Així doncs, si comparem ambdues equacions observem que totes dues són proporcionals al mateix factor exponencial

$$J_G \propto \exp^{-4 \cdot \pi \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot m_{eff} \cdot q \cdot \phi_b} \cdot L}{\hbar}} \qquad T \propto \exp^{-4 \cdot \pi \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot m_{eff} \cdot q \cdot \phi_b} \cdot L}{\hbar}}$$

Per tant, de tot això en resulta que:

$$J_G \propto T$$

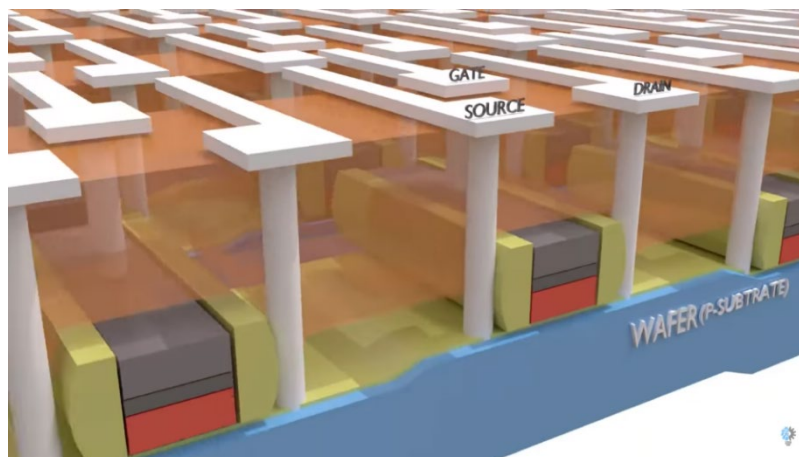
Les equacions en qüestió són proporcionals, i per tant, es comprova la nostre hipòtesi veient que conserven una certa relació.



## 3.3 Recerca 2: Com sorgeix el dielèctric high-k

Davant del problema de l'efecte túnel, la solució més lògica seria, senzillament, augmentar el gruix de l'aïllant elèctric, normalment SiO<sub>2</sub>. D'aquesta manera es disminuirien les probabilitats d'efecte túnel i per tant, totes les seves conseqüències explicades anteriorment. A més a més, d'entrada no hi hauria gaire problema atès que actualment no importa tant miniaturitzar "l'alçada" dels transistors, el que més importa en la miniaturització és la quantitat de transistors que es poden posar de costat per tal de crear el major nombre de transistors a partir d'una mateixa part predominant dopada, tal i com es veu en la imatge 6.1.

Malauradament, la realitat no resulta ser tan simple com es presenta i la solució resulta complicar-se a mesura que aprofundim en el problema. Això és així per culpa d'una propietat dels aïllants anomenada capacítància. Aquesta propietat resulta molt important, per aquesta raó en parlarem estesament en el següent punt juntament amb la ruptura dielèctrica.



Imatge 6.1

Representació d'un conjunt de MOSFETs compartint la part dopada predominant P. (Drain= drenador, Source= font, Gate= porta)

MOSFET[enlínea] < <https://www.youtube.com/watch?v=stM8dgcY1CA&t=351s> > [consulta: 12 de setembre del 2019]

### 3.3.1 Capacítància i ruptura dielèctrica

La capacítància és la magnitud física que diu la capacitat que té un cos per acumular càrrega elèctrica. Amb altres paraules, és la propietat que descriu el poder que té un objecte per suportar un corrent elèctric sense que es generi cap ruptura dielèctrica. D'aquesta manera, quanta més capacítància tingui el cos, més facilitat hi haurà de que es generi la ruptura dielèctrica.

Ara bé, què és la ruptura dielèctrica? Senzillament és el fet pel qual un material aïllant perd la seva no conductivitat i es torna conductor per un període curt de temps a qualsevol escala (tant macroscòpica com microscòpica).

El fenomen té la paraula dielèctric perquè fa referència al concepte de material dielèctric, el qual no és més que un aïllant col·locat entre dues peces conductores<sup>21</sup>. Vist d'una altra manera, els dielèctrics són l'aïllant d'un condensador. La seva funció doncs, és crear un camp electromagnètic quan se li aplica una diferència de voltatge als seus extrems<sup>22</sup>.

Això no resulta cap inconvenient d'entrada, però si el voltatge entre les dues plaques conductores augmenta fins a un cert punt, per arribar el moment en que les molècules estables de l'aïllant/dielèctric s'ionitzin per culpa de la diferència de potencial. Si s'arriba a aquest punt, les molècules ionitzades del dielèctric sí que deixarien passar el corrent entre les dues plaques conductores convertint així el dielèctric (aïllant) en conductor per uns breus instants. En aquests mateixos instants, la ruptura dielèctrica s'estaria produint. Aquest fenomen el podem observar quotidianament amb la formació dels llamps: l'aire és un dielèctric que es trenca (s'ionitzen les partícules que formen l'aire) perquè la diferència de potencial entre els núvols i el terra és molt elevada.

Veient-ho amb perspectiva, l'efecte túnel i la ruptura dielèctrica tenen les mateixes conseqüències: la transmesa d'electrons a través d'una barrera/aïllant que ho impedeix. Nogensmenys, les diferències entre aquests dos fenòmens són molt significatives (veure annex: Principals diferències entre la ruptura dielèctrica i l'efecte túnel).

Ara bé, tant la ruptura dielèctrica en si com la capacítància d'un cos (conceptes que parteixen del mateix) van estretament relacionades amb les característiques de l'aïllant/dielèctric. Tant la seva estructura física com el material de que estigui fet són factors que determinen la capacítància del cos, i per tant, si la ruptura dielèctrica succeirà amb tant sols poca diferència de potencial o bé aguantarà bastant.

Les equacions que permeten calcular la capacítància són les del requadre d'equacions 6.1

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon \cdot A}{L} = \frac{\epsilon_0 \cdot K \cdot A}{L}$$

Equació 6.1

Equacions per calcular la capacítància.

<sup>21</sup> Per tant, un material dielèctric pot ser qualsevol material que no transporti el corrent: vidre, aigua pura, paper, plàstic, fusta, etc.

<sup>22</sup> S'ha de mencionar que aquest camp electromagnètic acumula una certa càrrega elèctrica, la qual podrà ser utilitzada posteriorment.

En aquestes equacions:

- C : capacitància (Farad.)
- Q : càrrega elèctrica posada
- V : potencial elèctric
- A : àrea del cos en qüestió
- L: gruix del cos en qüestió
- $\varepsilon$  : permitivitat del material =  $\varepsilon_0 \cdot K$
- $\varepsilon_0$  : permitivitat en el buit ( $8.8541878176 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$ )
- K: constant dielèctrica del material (del cos)

Com ja hem dit, uns quants factors fan referència a l'estructura física del cos, però també hi ha un factor propi de la naturalesa del material: la constant dielèctrica. Aquesta és un valor que varia segons el tipus de material dielèctric i descriu quina facilitat té el material per ser efecte de la ruptura dielèctrica.

Tal com podem suposar, aquest fenomen també pot succeir en l'aïllant que es troba en els transistors. Per aquest motiu, saber la constant dielèctrica dels materials a l'hora de fer els transistors és un factor clau, tant a escala macroscòpica com microscòpica.

Doncs bé, si la constant dielèctrica és important, i aquesta està dintre de la definició de capacitància, consegüentment es pot veure com la capacitància dels aïllants dels MOSFETs també resulta important.

Tenint això en ment, retornem al primer punt d'aquest apartat ("Com sorgeix el *high-k dielectric*?"). Si volíem augmentar el gruix de l'aïllant per tal de disminuir les probabilitats d'efecte túnel, ara ens donem compte que quan variem el gruix també estem alterant la seva capacitància ( $C = \frac{\varepsilon_0 \cdot K \cdot A}{L}$ ).

Com hem dit, la capacitància de l'aïllant en un MOSFET és bastant important, i per tant, és lògic que alterar-la no resulti ser una bona idea.

Ara bé, la veritat és que hi ha petita solució a aquest problema: augmentar algun factor del numerador per compensar l'augment del denominador. D'aquesta manera es compensaria el resultat de la divisió<sup>23</sup> i per tant, no alteraria el resultat, o sigui la capacitància.

Tenint això en ment, per tal de que es disminueixi l'efecte túnel, si augmentem el gruix de l'aïllant (L), també haurem d'augmentar algun factor del numerador (la constant dielèctrica (K) de l'aïllant/dielèctric) per tal de que la capacitància de l'aïllant no variï.

Aquest fet resulta senzill de fer car únicament s'ha de canviar el material convencional per un que tingui una constant dielèctrica més alta<sup>24</sup>.

En aquest punt és on finalment entren en joc els **dielèctrics high-k**.

---


$$^{23} C = \frac{\varepsilon_0 \cdot K \cdot A}{L} ; C = \frac{10 \cdot \varepsilon_0 \cdot K \cdot A}{10 \cdot L} ; C = \frac{10 \cdot \varepsilon_0 \cdot K \cdot A}{10 \cdot L} ; C = \frac{\varepsilon_0 \cdot K \cdot A}{L}$$

<sup>24</sup> Recordem que les constants dielèctriques són pròpies de cada dielèctric, i per tant, per canviar la constant dielèctrica s'haurà de canviar de dielèctric.

## 3.4 Pregunta de recerca 2 i hipòtesi

---

***“Com els nous materials com els high-k dielèctrics poden ajudar a resoldre el problema dels transistors cada vegada més petits?”***

Els high-k dielèctrics són senzillament dielèctrics que tenen una constant dielèctrica més elevada que el dielèctric usual, SiO<sub>2</sub>.

Recopilant tota la informació donada en el punt anterior i tenint en ment la pròpia definició de high-k dielèctric, podem proposar una hipòtesi per a nostra segona qüestió que havíem proposat en l'apartat 2 i que encapçala aquest apartat.

La hipòtesi en qüestió és que el fet de substituir l'aïllant convencional dels MOSFETs per un altre material amb una constant dielèctrica més elevada (high-k dielèctric) faria solucionar el problema de l'efecte túnel ja que ens permetria augmentar el gruix de l'aïllant sense alterar la capacítància d'aquest. En conseqüència de disminuir el gruix de l'aïllant també es disminuirien les probabilitats d'efecte túnel<sup>25</sup>, i per tant, es reduirien també el nombre d'electrons transmesos des de la porta a través de l'aïllant. En conseqüència de tot això, menys energia seria consumida quan el transistor es trobés en estat de tall (per tant, quan no hauria de consumir cap energia).

Un cop resolta la pregunta hipotèticament, hem de comprovar si l'ús dels dielèctrics high-k ens permet reduir l'efecte túnel, ampliant el seu gruix, però mantenint un valor bastant important pels dielèctrics: la capacítància.

Per fer aquesta tasca, l'essencial és comprovar, mitjançant els models teòrics que hem esmentat, si realment l'augment del gruix del dielèctric fa reduir l'efecte túnel, i per tant, totes les seves conseqüències.

Abans d'analitzar això, primer haurem de veure, mitjançant l'equació  $c = \frac{\epsilon_0 \cdot K \cdot A}{L}$ , si l'ús dels dielèctrics high-k permet augmentar el gruix d'aquests sense altera'ls-hi la capacítància respecte els valors mínims que s'utilitzen amb els dielèctrics convencionals (de SiO<sub>2</sub>), sota dels quals es considera que l'efecte túnel es torna massa important<sup>26</sup>.

Per tant, primer de tot haurem d'igualar els valors de la capacítància entre el dielèctric més utilitzat, SiO<sub>2</sub>, i els dels dielèctrics que volem utilitzar. Llavors, traiem els valors que no varien segons el material ( $\epsilon_0 \cdot A$ ), i ens queda la relació entre les constants dielèctriques dels materials i els seus gruixos. Posteriorment, substituïm els valors de la nova equació per les dades que tenim (constants dielèctriques de SiO<sub>2</sub> i del dielèctric corresponent, i el gruix considerat mínim per tal de que l'efecte túnel no tingui conseqüències considerables) i ens quedarà, per cada material dielèctric que posem, el seu gruix considerat mínim per tal de que l'efecte túnel no prengui massa importància, sense tenir cap alteració a la capacítància respecte al SiO<sub>2</sub>.

<sup>25</sup> En les equacions de 3.4, 3.5, i 3.6 la “T” és la probabilitat d'efecte túnel i la “L” el gruix de l'aïllant/barrera. En aquí podem veure la relació de que quan un augmenta l'altre disminueix.

<sup>26</sup> Segons <https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee130/sp06/chp7full.pdf>

Tenint el gruix dels dielèctrics que volem utilitzar, procedirem a incloure'ls en l'equació que descriu la probabilitat d'efecte túnel (T).

Per fer això, utilitzarem l'aproximació pels casos on el gruix de la barrera és molt significatiu car estem parlant de l'aïllant del transistor, i a part, farem unes petites substitucions en l'equació per tal de que, amb les dades que tenim, puguem donar el resultat.

Unes de les quals, serà substituir el valor de  $(V_0 - E)$  per  $q \cdot \phi_b$ , i el valor de  $V_0$  per  $q \cdot \phi_b + E$ .

Després d'aquests canvis, substituïrem el valor de E per  $1.602176462 \times 10^{-19}$  J (=1 eV ja que és l'energia que és adquirida per un electró al travessar una barrera de potencial d'un volt).

Arribats a aquest punt, sí que podrem afegir totes les dades corresponents als diferents dielèctrics que trobarem a la taula que hi ha més endavant, i, finalment, obtenir els resultats de la probabilitat d'efecte túnel d'aquests diferents dielèctrics, els quals els compararem i veurem si realment hi ha la diferència que nosaltres preveïem.

### 3.4.1 Part pràctica 2: Comprovació matemàtica de la hipòtesi

#### 3.4.1.1 Primera part

Obtenció dels gruixos de diversos dielèctrics-high-k sense alterar la capacítància mínima que es considera que ha de tenir un aïllant per tal de que l'efecte túnel no adquireixi massa importància <sup>27</sup>.

$$C_{dielèctric} = \frac{k_{dielèctric} \cdot \epsilon_0 \cdot A}{L_{dielèctric}}$$

$$C_{SiO_2} = C_{dielèctric}$$

$$\frac{k_{SiO_2} \cdot \epsilon_0 \cdot A}{L_{SiO_2}} = \frac{k_{dielèctric\ high-k} \cdot \epsilon_0 \cdot A}{L_{dielèctric\ high-k}},$$

$$\frac{k_{SiO_2}}{L_{SiO_2}} = \frac{k_{dielèctric\ high-k} \cdot \epsilon_0 \cdot A}{L_{dielèctric\ high-k} \cdot \epsilon_0 \cdot A},$$

$$\frac{k_{SiO_2}}{L_{SiO_2}} = \frac{k_{dielèctric\ high-k}}{L_{dielèctric\ high-k}}$$

Per tant, el resultat d'aquest desenvolupament ens dona que:

$$\frac{k_{dielèctric\ high-k} \cdot L_{SiO_2}}{k_{SiO_2}} = L_{dielèctric\ high-k}$$

<sup>27</sup> Ibídem

Amb aquesta fórmula procedirem trobar els gruixos corresponents de cada material tot sabent la constant dielèctrica del material, que  $k_{SiO_2} = 3.9$  i que el mínim gruix de  $SiO_2$  sota del qual es considera que l'efecte túnel es torna massa important = 1.5 nm <sup>28</sup>.

$$- \text{Si}_3\text{N}_4 \quad k_{Si_3N_4} = 7$$

$$\frac{k_{Si_3N_4} \cdot L_{SiO_2}}{k_{SiO_2}} = L_{Si_3N_4} \quad ,$$

$$\frac{7 \cdot 1.5}{3.9} = L_{Si_3N_4} = 2.7$$

$$L_{Si_3N_4} = 2.7 \text{ nm}$$

$$- \text{Al}_2\text{O}_3 \quad k_{Al_2O_3} = 10$$

$$\frac{k_{Al_2O_3} \cdot L_{SiO_2}}{k_{SiO_2}} = L_{Al_2O_3} \quad ,$$

$$\frac{10 \cdot 1.5}{3.9} = L_{Al_2O_3} = 3.8$$

$$L_{Al_2O_3} = 3.8 \text{ nm}$$

$$- \text{HfO}_2 \quad k_{HfO_2} = 20$$

$$\frac{k_{HfO_2} \cdot L_{SiO_2}}{k_{SiO_2}} = L_{HfO_2} \quad ,$$

$$\frac{20 \cdot 1.5}{3.9} = L_{HfO_2} = 7.7$$

$$L_{HfO_2} = 7.7 \text{ nm}$$

$$- \text{La}_2\text{O}_3 \quad k_{La_2O_3} = 27$$

$$\frac{k_{La_2O_3} \cdot L_{SiO_2}}{k_{SiO_2}} = L_{La_2O_3} \quad ,$$

$$\frac{27 \cdot 1.5}{3.9} = L_{La_2O_3} = 10.4$$

$$L_{La_2O_3} = 10.4 \text{ nm}$$

---

<sup>28</sup> Ibídem

<b>Taula de resultats</b>					
	$La_2O_3$	$HfO_2$	$Al_2O_3$	$Si_3N_4$	$SiO_2$
$K_{material}$	<b>27</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>3.9</b>
$L (m)$	$1.4 \cdot 10^{-8}$	$7.7 \cdot 10^{-9}$	$3.9 \cdot 10^{-9}$	$2.7 \cdot 10^{-9}$	$1.5 \cdot 10^{-9}$

Taula 7.1

Taula de valors on s'aprecia l'alteració de l'amplada/gruix (L) quan es varia la constant dielèctrica de diferents materials. Resultats obtinguts de les operacions fetes anteriorment mitjançant l'equació de la capacítància.

Tal com veiem a la taula, s'observa que quan més petit sigui el valor de la constant dielèctrica del material, més gruix caldrà per arribar a obtenir una mateixa capacítància. D'aquesta manera podem concloure que l'ús dels dielèctrics high-k permet augmentar tenir un gruix més gran sense alterar la capacítància del dielèctric utilitzat.

### 3.4.1.2 Segona part

Comprovació de la disminució d'efecte túnel amb els gruixos dels dielèctrics extrets en la primera part, fent servir l'equació de percentatge de probabilitat. En aquest cas igualment agafarem l'aproximació pels casos on la barrera és considerable car de igual manera estem parlant de l'aïllant d'un transistor.

Tal com hem vist anteriorment en la part pràctica 1:

$$T = G \cdot e^{-2 \cdot K \cdot L}$$

$$T = \left[ \frac{16 \cdot E \cdot (V_0 - E)}{V_0^2} \right] \cdot \exp^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot m_{eff} \cdot q \cdot \phi_b} \cdot L}{h}},$$

- Substituïm  $(V_0 - E) = q \cdot \phi_b$ :

$$T = \left[ \frac{16 \cdot E \cdot (q \cdot \phi_b)}{V_0^2} \right] \cdot \exp^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot m_{eff} \cdot q \cdot \phi_b} \cdot L}{h}},$$

- Ara substituïm  $V_o = q \cdot \phi_b + E$ , i finalment ens queda l'equació que nosaltres utilitzarem:

$$T = \left[ \frac{16 \cdot E \cdot (q \cdot \phi_b)}{(q \cdot \phi_b + E)^2} \right] \cdot \exp^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot m_{eff} \cdot q \cdot \phi_b} \cdot L}{h}}$$

Tal com hem mencionat anteriorment, ara substituïrem els valor de la taula següent en l'equació anterior per als 5 diferents tipus de material.

<b>Taula de dades</b>					
	<b><math>La_2O_3</math></b>	<b><math>Al_2O_3</math></b>	<b><math>HfO_2</math></b>	<b><math>Si_3N_4</math></b>	<b><math>SiO_2</math></b>
$\phi_b$ (eV)	2.3	2.8	1.13	1.9	3.1
$m_{eff}$ ( $m_{eff}/9,11 \cdot 10^{-31}$ )	0.26	0.35	0.22	0.41	0.40
$L$ (m) <sup>29</sup>	$1.4 \cdot 10^{-8}$	$3.9 \cdot 10^{-9}$	$7.7 \cdot 10^{-9}$	$2.7 \cdot 10^{-9}$	$1.5 \cdot 10^{-9}$

**Taula 7.2**

Taula de valors dels dielèctrics que utilitzarem en les equacions posteriors.  $\phi_b$ : Energia potencial elèctrica entre l'electró i la barrera.  $m_{eff}$ : massa efectiva. L: gruix barrera

Font de les dues primeres files: *MOSFET Gate Leakage Modeling and Selection Guide for Alternative Gate Dielectrics Based on Leakage Considerations*. (2003,04)[enlínea]<

<https://people.eecs.berkeley.edu/~hu/PUBLICATIONS/PAPERS/783.pdf>>[consulta: 27 de setembre del 2019]

Aplicant  $E = 1.6 \times 10^{-19}$  J i  $q = -1,6 \times 10^{-19}$  C en l'equació:

$$T = \left[ \frac{16 \cdot E \cdot (q \cdot \phi_b)}{(q \cdot \phi_b + E)^2} \right] \cdot \exp^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot m_{eff} \cdot q \cdot \phi_b} \cdot L}{h}}$$

I substituint els valors de la taula 7.2 per a cada dielèctric podem obtenir que:

<sup>29</sup> Extrems de la part pràctica anterior.



- **SiO<sub>2</sub>** (dielèctric que s'utilitza quotidianament)

$$T = \left[ \frac{16 \cdot E \cdot (q \cdot 3.1)}{(q \cdot 3.1 + E)^2} \right] \cdot \exp^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot 0.4 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot q \cdot 3.1 \cdot 1.5 \cdot 10^{-9}}}{h}}$$

$$T_{SiO_2} = 1.10 \cdot 10^{-7}$$

- **Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**

$$T = \left[ \frac{16 \cdot E \cdot (q \cdot 1.9)}{(q \cdot 1.9 + E)^2} \right] \cdot \exp^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot 0.41 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot q \cdot 1.9 \cdot 2.7 \cdot 10^{-9}}}{h}}$$

$$T_{Si_3N_4} = 5.56 \cdot 10^{-10}$$

- **HfO<sub>2</sub>**

$$T = \left[ \frac{16 \cdot E \cdot (q \cdot 1.13)}{(q \cdot 1.81 \cdot 10^{-19} + E)^2} \right] \cdot \exp^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot 0.22 \cdot 1.13 \cdot q \cdot 1.13 \cdot 7.7 \cdot 10^{-9}}}{h}}$$

$$T_{HfO_2} = 3.32 \cdot 10^{-16}$$

- **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

$$T = \left[ \frac{16 \cdot E \cdot (q \cdot 2.8)}{(q \cdot 2.8 + E)^2} \right] \cdot \exp^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot 0.35 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot q \cdot 2.8 \cdot 3.9 \cdot 10^{-9}}}{h}}$$

$$T_{Al_2O_3} = 4.39 \cdot 10^{-16}$$

- **$La_2O_3$**

$$T = \left[ \frac{16 \cdot E \cdot (q \cdot 2.3)}{(q \cdot 2.3 + E)^2} \right] \cdot \exp^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot 0.26 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot q \cdot 2.3 \cdot 1.04 \cdot 10^{-8}}}{h}}$$

$$T_{La_2O_3} = 1.48 \cdot 10^{-33}$$

<b>Taula de resultats</b>					
	$La_2O_3$	$HfO_2$	$Al_2O_3$	$Si_3N_4$	$SiO_2$
$T_{tant\ per\ u}$	$1.48 \cdot 10^{-33}$	$3.32 \cdot 10^{-16}$	$4.39 \cdot 10^{-16}$	$5.56 \cdot 10^{-10}$	$1.10 \cdot 10^{-7}$
$L\ (m)^{30}$	$1.4 \cdot 10^{-8}$	$7.7 \cdot 10^{-9}$	$3.9 \cdot 10^{-9}$	$2.7 \cdot 10^{-9}$	$1.5 \cdot 10^{-9}$

Taula 7.3

Taula de valors on es relacionen els percentatges de probabilitat d'efecte túnel (T) i el gruix dels dielèctrics estudiats

Comparant tots els tants per u d'efecte túnel, podem veure que en la majoria dels casos, els materials que tenen un gruix més gran són aquells que tenen la probabilitat d'efecte túnel més baixa. Nogensmenys, el diòxid de hafni, tot i tenir un gruix més gran que l'òxid d'alumini, té una probabilitat d'efecte túnel més alta que l'òxid en qüestió; aquest fet ha de ser conseqüència d'un altre factor que pot alterar l'equació. Aquest factor en qüestió hauria de ser  $\phi_b$  atès que la diferència entre aquest valor i tots els dels altres materials és bastant considerable (1.3 respecte 2.3, 2.8, 1.9 i 3.1).

Així doncs, segons els resultats que hem obtingut, el que podem afirmar és que la probabilitat d'efecte túnel tendeix a reduir-se quan se li aplica un gruix més elevat.

Per tant, la nostre qüestió definitivament queda resolta i la nostra hipòtesi confirmada. L'ús de dielèctrics high-k permet la disminució de l'efecte túnel en els transistors sense perdre la capacítància del dielèctric convencional.

Actualment, gràcies a aquest fet, la indústria ja produeix transistors amb dielèctrics high-k, la qual cosa suposa un petit avenç en aquesta guerra entre l'evolució dels transistors i el món quàntic.

<sup>30</sup> Extrems de la part pràctica anterior.

## 4 Conclusió

---

Havent finalitzat el treball, podem veure com hem complert el nostre objectiu inicial: mitjançant les equacions que hem anat esmentant en diferents apartats, hem pogut veure com es podia reduir l'efecte túnel tot utilitzant dielèctrics high-k, i per tant, hem aconseguit trobar una solució al problema que es presentava en els transistors: les conseqüències de l'efecte túnel (objectiu primerenc en el nostre treball).

Per arribar a aquest punt, a mesura que avançàvem en el marc teòric, hem anat augmentant el grau de complexitat, començant per la simple explicació dels BJT, passant per la naturalesa dual de la matèria, i acabant amb les explicacions de les equacions que descriuen la intensitat del corrent a través de la porta dels MOSFET.

Deixant la part teòrica a un costat, la pràctica també ha acabat adquirint una certa importància en el treball. A banda d'això, aquesta part ha sigut la que ha causat més problemes, i és que en veritat, el fet de fer recerca sobre temes prèviament desconeguts pot suposar un problema greu si no tens eines de recerca bones. En el cas d'aquest treball, a mesura que s'avançava la matèria, més difícil es feia trobar informació al respecte. Com a conseqüència d'això, la part final del treball ha sigut la més difícil d'elaborar car contra més costa trobar informació al respecte, més costa d'entendre-ho, i per tant, més difícil és d'explicar.

Més enllà del treball en si, també es podrien haver explicat altres solucions a part dels dielèctrics high-k, com per exemple l'ús dels RTD<sup>31</sup>. Nogensmenys, no ha sigut possible incloure'ls per limitacions de temps i espai en el treball. A part d'aquesta limitació, tampoc s'ha pogut fer una part bastant important del treball, la qual consistia en aportar simulacions informàtiques de l'efecte túnel per els diferents dielèctrics mitjançant el programa BITLLES. Al final, això no s'ha pogut fer per manca de temps i per problemes de compatibilitat d'agenda amb el professor de l'UAB Xavier Oriols (creador del programa BITLLES).

Tot i haver patit aquests petits inconvenients però, podem dir que durant tot el treball s'ha intentat desenvolupar la feina mitjançant un cert ordre i claredat per tal de complir amb un dels altres primers objectius: fer un escrit còmode i entenedor per a tots els públics d'un fet inusual però no poc important.

---

<sup>31</sup> Sigles de *Resonant-Tunneling Diode*, díode túnel ressonant en anglès.

## 5 Bibliografia

---

TIPLER, Paul; MOSCA, Gene (2010). *Física per a la ciència i la tecnologia. Traducció de la 6a edició nord-americana* (6 ed., Vol. 2, pp. 1289-1315). Barcelona, EDITORIAL REVERTÉ.

YOUNG, Hugh; FREEDMAN, Roger (2009). *Física universitària con física moderna* (12 ed., Vol. 2, pp. 1365-1386). Mèxic, Addison-Wesley.

---

¿Qué son los diodos? (2015,09)[enlínea]<

<https://www.youtube.com/watch?v=UxCtnTLKAh0>>[consulta: 3 de febrer del 2019]

Bipolar junction transistor (2019,06)[enlínea]<

[https://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar\\_junction\\_transistor](https://en.wikipedia.org/wiki/Bipolar_junction_transistor)>[consulta: 29 juny del 2019]

Bipolar Transistor[enlínea]< [https://www.electronics-](https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/trans_1.html)

[tutorials.ws/transistor/trans\\_1.html](https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/trans_1.html)>[consulta: 21 juny del 2019]

CANTÚ, Claudia. *Transistores en compuertas lógicas*. (2016,07)[enlínea]<

<https://tantakatanblog.wordpress.com/2016/09/18/transistores/>>[consulta: 18 juliol del 2019]

Capacitancia(2013,09)[enlínea]< <http://emamigegamayoc.blogspot.com/>>[consulta: 4 setembre del 2019]

Ch. 7 MOSFET Technology Scaling, Leakage Current, and Other Topics [enlínea]<

<https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee130/sp06/chp7full.pdf> >[consulta: 20 de setembre del 2019]

CHIARENA, Miguel. *Componentes Electrónicos Básicos* [enlínea]<

<https://sites.google.com/site/electronica4bys/componentes-electronicos-basicos>>[consulta: 15 juny del 2019]

CHIARENA, Miguel. *El transistor bipolar* (2011,05)[enlínea]<

<https://sites.google.com/site/399electronicatransistores/el-transistor-bipolar>>[consulta: 21 juny del 2019]

CINON, Charles. *¿Qué es un Capacitor?* (2015,05) [enlínea]<

<https://www.youtube.com/watch?v=7jpS3FHmoWU>>[consulta: 3 de febrer del 2019]

Common Emitter Amplifier[enlínea]< [https://www.electronics-](https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amp_2.html)

[tutorials.ws/amplifier/amp\\_2.html](https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amp_2.html)>[consulta: 24 juny del 2019]

Como amplificar en un transistor (2012,08)[NOenlínea]<

[http://rabfis15.uco.es/transistoresweb/tutorial\\_general/eltransistorcomoamplificador.html](http://rabfis15.uco.es/transistoresweb/tutorial_general/eltransistorcomoamplificador.html)>[consulta: 21 juny del 2019]

- Efecto túnel de la mecánica cuántica* (2012,12)[enlínea]<  
<http://www.astronoo.com/es/articulos/efecto-tunel.html>>[consulta: 20 juny del 2019]
- El Transistor NPN – estructura y aplicaciones* (2017,10)[enlínea]< <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/transistor-npn/>>[consulta: 20 juny del 2019]
- How Does a Transistor Work?* (2013,07)[enlínea]<  
<https://www.youtube.com/watch?v=lcrBqCFLHIY>>[consulta: 27 de març del 2019]
- KIROSS, Kahsay. *How is the electric field E equivalent to voltage V divided by length l?* (2017,11)[enlínea]< <https://www.quora.com/How-is-the-electric-field-E-equivalent-to-voltage-V-divided-by-length-l>>[consulta: 22 setembre del 2019]
- KRISHNAN, Gokul. *How transistors work - Gokul J. Krishnan* (2016,06)[enlínea]<  
<https://www.youtube.com/watch?v=WhNyURBiJcU>>[consulta: 29 juny del 2019]
- Logic gates*(2009,01)[enlínea]< <http://www.technologyuk.net/computing/computer-hardware/logic-gates.shtml>>[consulta: 18 juliol del 2019]
- MORALES, Daniel. *Dispositivos semiconductores* (2012,09)[enlínea]<  
<https://es.slideshare.net/DanielMoralesMexico/dispositivos-semiconductores>>[consulta: 17 juliol del 2019]
- MOSFET Amplifier* [enlínea]< <https://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/mosfet-amplifier.html>>[consulta: 17 juliol del 2019]
- Mosfet\_ Funcionamiento* [enlínea]<  
[https://es.slideshare.net/Pekemanzaniitha/mosfetfuncionamiento-36674477?qid=1fd069ee-998f-4d80-8291-2c51498d7988&v=&b=&from\\_search=8](https://es.slideshare.net/Pekemanzaniitha/mosfetfuncionamiento-36674477?qid=1fd069ee-998f-4d80-8291-2c51498d7988&v=&b=&from_search=8)>[consulta: 21 juny del 2019]
- MOSFET Gate Leakage Modeling and Selection Guide for Alternative Gate Dielectrics Based on Leakage Considerations.* (2003,04)[enlínea]<  
<https://people.eecs.berkeley.edu/~hu/PUBLICATIONS/PAPERS/783.pdf>>[consulta: 20 de setembre del 2019]
- MOSFET, modes of operation*(2019,06)[enlínea]<  
[https://en.wikipedia.org/wiki/MOSFET#Modes\\_of\\_operation](https://en.wikipedia.org/wiki/MOSFET#Modes_of_operation)>[consulta: 17 juliol del 2019]
- NAVE, Rod. *P-N Junction* [enlínea]< <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/pnjun.html>>[consulta: 3 de febrer del 2019]
- Puertas lógicas XOR XNOR unicos tecnologia* (2015,07)[enlínea]<  
<https://www.youtube.com/watch?v=o0736nvpys4>>[consulta: 18 juliol del 2019]
- ROBINETTE, Rob. *How Vacuum Tubes Work* (2016,02)[enlínea]<  
[https://www.youtube.com/watch?v=nA\\_tglygvNo](https://www.youtube.com/watch?v=nA_tglygvNo)>[consulta: 3 de febrer del 2019]
- RODAS, Pedro. *Ruptura dieléctrica y efecto corona* (2012,05)[enlínea]<  
<https://es.slideshare.net/peterodas/ruptura-dielctrica-y-efecto-corona>>[consulta: 22 de maig del 2019]

*Ruptura dielèctrica* (2009,6)[enlínea]<

[http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ruptura\\_diel%C3%A9ctrica](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ruptura_diel%C3%A9ctrica)>[consulta: 22de maig del 2019]

SÁNZ, Chistian. *¿En que consiste la Ley de Moore? | Breve explicación* (2017,09)[enlínea]<

<https://www.youtube.com/watch?v=AFFf7Z3iZV4>>[consulta: 20 de gener del 2019]

SCHUSTER, Chis. *Dieléctricos en condensadores y lo contrario | Física doc* (2013,01)[enlínea]<

<https://www.youtube.com/watch?v=P8A1U-RZDao>>[consulta: 22de maig del 2019]

*Semiconductor Electronics/Semiconductor/Doping* (2019,05)[enlínea]<

[https://en.wikibooks.org/wiki/Semiconductor\\_Electronics/Semiconductor/Doping](https://en.wikibooks.org/wiki/Semiconductor_Electronics/Semiconductor/Doping)>[consulta: 19 juliol del 2019]

*Transistor de unión bipolar* (2019,06)[enlínea]<

[https://es.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_de\\_uni%C3%B3n\\_bipolar](https://es.wikipedia.org/wiki/Transistor_de_uni%C3%B3n_bipolar)>[consulta: 29 juny del 2019]

*Transistores - El invento que cambió el mundo* (2016,09) [enlínea]<

<https://www.youtube.com/watch?v=OwS9aTE2Go4>>[consulta: 3 de febrer del 2019]

*Transistors, How do they work ?* (2016,07)[enlínea]<

<https://www.youtube.com/watch?v=7ukDKVHnac4>>[consulta: 11 de març del 2019]

*TRANSISTORES DE EFECTO CAMPO*[enlínea]<

<http://www.ifent.org/lecciones/fet/default.asp>>[consulta: 19 juliol del 2019]

*Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor*(2019,07)[enlínea]<

[https://es.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_de\\_efecto\\_de\\_campo\\_metal-%C3%B3xido-semiconductor](https://es.wikipedia.org/wiki/Transistor_de_efecto_de_campo_metal-%C3%B3xido-semiconductor)>[consulta: 20 juliol, 5 agost del 2019]

WOODFORD, Chirs. *Transistors* (2019,06)[enlínea]<

<https://www.explainthatstuff.com/howtransistorswork.html>>[consulta: 27 març del 2019]

*Working of Transistors | MOSFET* (2018,08)[enlínea]<

<https://www.youtube.com/watch?v=stM8dgcY1CA>>[consulta: 27 de març del 2019]

Presentació proporcionada pel tutor. *Diapositives del Capítol 3: fenòmens quàntics* (Professor de Jordi Pascual)



# Annex

---

## - Naturalesa del semiconductors

A diferència dels conductors, que tenen les bandes de valència i de conducció totalment seguides una de l'altre, les dels semiconductors tenen les bandes de valència i conducció separades entre si per una regió prohibida on no hi pot haver electrons.

Per aquesta raó es podria considerar que els semiconductors són aïllants, i en certa manera és així perquè aquests també presenten les bandes de conducció i de valència separades. Malgrat això, només es podrien dir en certa manera, i és que hi ha una gran diferència entre els semiconductors i els aïllants: la grandària de la regió prohibida.

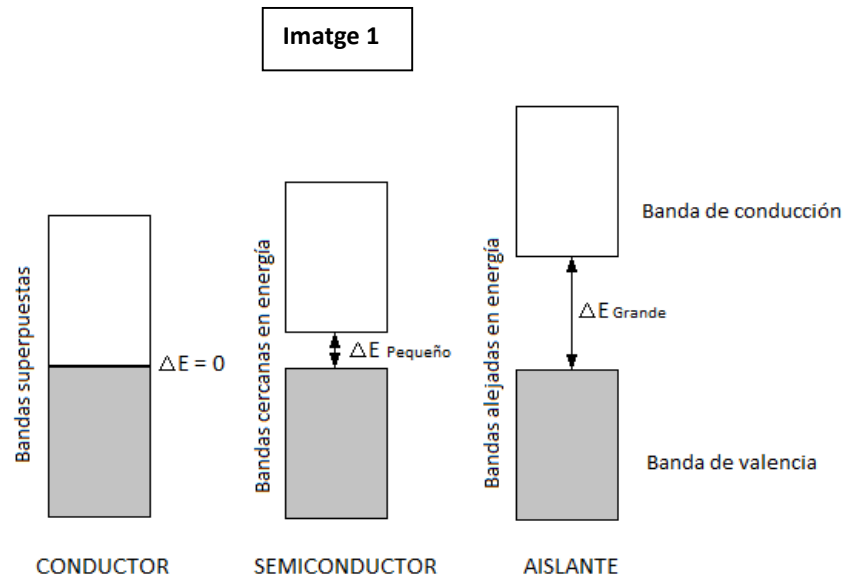
Els aïllants acostumen a tenir una gran separació entre la banda de valència, plena d'electrons, i la banda de conducció, lliure d'electrons; i per tant, als electrons els hi és molt difícil tenir llibertat de moviment malgrat adquirir una temperatura molt elevada (ja que la banda de conducció on es podrien moure lliurement té una energia massa elevada). En conseqüència d'aquest fet, aquests materials en qüestió no presenten molt bona conducció elèctrica.

A diferència dels aïllants, els semiconductors tenen les bandes de valència i conducció no tan separades entre si, fet que explica per què a determinades condicions els materials semiconductors poden arribar a conduir el corrent elèctric. En específic, si escalfes un d'aquests materials (a una certa temperatura no molt elevada) pots aconseguir excitar els electrons de tal manera que adquireixin l'energia necessària per poder saltar des de la banda de valència fins a la banda de conducció, passant per la regió prohibida.

Així és com s'aconsegueix crear una zona de conducció igual que la que hi ha present en els materials conductors.

Gràcies a aquests fet, la conducció elèctrica en els materials semiconductors pot ser possible juntament amb la propietat aïllant d'aquests.





Representació de les bandes de valència i conducció en aïllants, conductors i semiconductors.

*Nuevo Método de dopaje para el Óxido de Titanio (IV)* (2014,01)[enlínea]<

<https://mariecuriesnews.wordpress.com/tag/dioxido-de-titanio/>>[consulta: 27 de abril del 2019]

## - Dopatge en els semiconductors

El dopatge és una tècnica que s'utilitza molt sovint en enginyeria i es basa en introduir impureses en un material semiconductor intrínsec (pur) canviant així la seva estructura i propietats tant òptiques com electròniques.

Els semiconductors purs més comuns són els elements del grup 14, ja que aquests tenen la característica de poder fer enllaços covalents amb tots els electrons que posseeixen, la qual cosa permet crear estructures cristal·lines covalents molt dures, com el diamant en el cas del carboni. L'element de tots ells més comú per a fer transistors és el silici (a vegades també s'utilitza el germani).

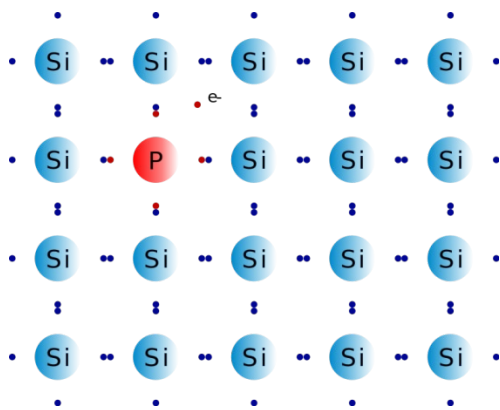
Hi ha dos tipus de dopatge, el tipus P i N. En el dopatge tipus N s'introdueixen àtoms d'elements del grup 15 tals com el fòsfor o l'arsènic en una base del material semiconductor intrínsec (el silici).

Consegüentment, a l'hora de formar els enllaços covalents amb els àtoms de silici, com els àtoms dels elements del grup 15 tenen un electró més que els del grup 14, aquest electró es queda lliure sense enllaçar-se i col·locant-se entre les banda de valència i conducció del material en qüestió (el silici) (imatge 2 i 3), disminuint així la separació entre elles, i per tant, disminuint també l'energia necessària per saltar de la banda de valència a la de conducció. Això permetria augmentar les possibilitats de conducció del material semiconductor.

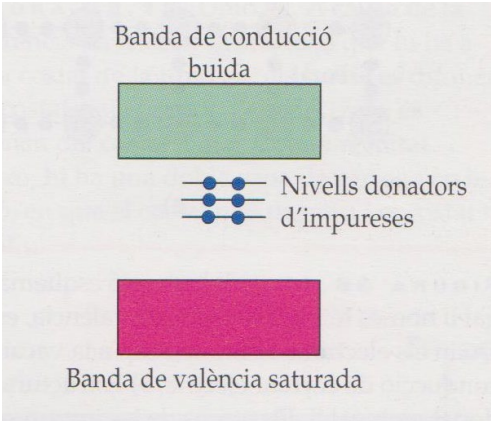
En el dopatge tipus P passa exactament el mateix que en el tipus N però amb la diferència de que en comptes de posar àtoms d'elements del grup 15, són del 13. Com aquests tenen un electró menys que els del grup 14 (com és el silici), quan s'enllaça amb aquests, es produeix un "forat" (hole), el qual és el nom de l'espai que deixa l'electró en l'enllaç covalent que no es pot formar (imatge 4).

Aquests forats formats, com en el cas del dopatge tipus N, alteren les bandes d'energia del material ja que, en aquest cas, es transformen en uns anomenats nivells acceptors (imatge 5) que se situen entre la banda de valència i la banda de conducció, els quals afavoreixen al flux d'electrons entre aquestes dues bandes i per tant, el corrent d'elèctric.

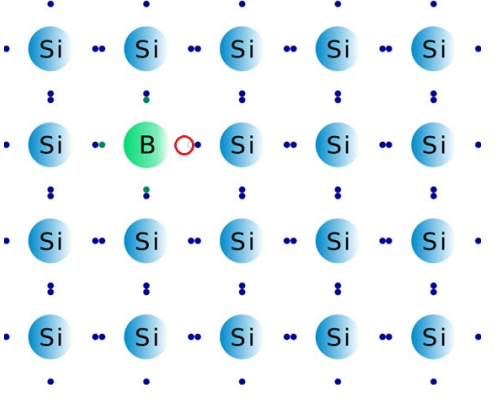
Imatge 2



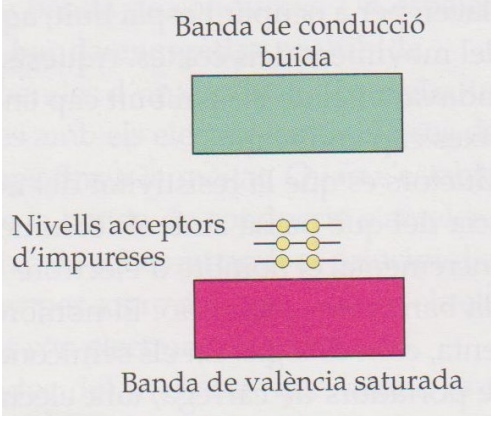
Imatge 3



Imatge 4



Imatge 5



Representació del dopatge tipus N (2 i 3) i P (4 i 5)

TIPLER, Paul; MOSCA, Gene (2010). *Física per a la ciència i la tecnologia. Traducció de la 6a edició nord-americana* (6 ed., Vol. 2, p. 1289-1315). Barcelona, EDITORIAL REVERTÉ.

## - Funcionament d'un díode

Els díodes són components electrònics fets a partir de material semiconductor (silici) on es presenten els dos tipus d'impureses; per tant, la seva estructura està composta d'una part dopada N i una part dopada P successiva a aquesta.

Els díodes són responsables de que el corrent només flueixi en un mateix sentit, impedit el pas del corrent en el sentit contrari.

Per a fer aquesta funció, tant la part P com la part N del díode han de tenir un punt de connexió. Per tal de que el corrent flueixi amb normalitat (polarització directa) el punt de connexió situat a la part N ha de ser el lloc per on els electrons entren al díode, i per consegüent, la part P per on hi surten. Si el corrent canviés de sentit i els electrons volguessin entrar pel cantó P (polarització inversa) el díode els ho impediria i no es podria tancar el circuit.

Aquest fet es dona gràcies a la diferència de dopatge que hi ha en els díodes, i l'explicació d'això té a veure amb la zona que hi ha entre la part P i la N.

Si no hi ha corrent, en la zona on les dues regions de diferent dopatge es toquen, els electrons lliures de la part N, aportats pel dopatge, ocupen els forats disponibles en la part dopada P. Com a conseqüència d'aquests desplaçaments, una petita regió<sup>32</sup> d'àtoms de la part N adquireix càrrega positiva (perquè ha cedit electrons) i de igual manera, una petita regió d'àtoms de la part P adquireix càrrega negativa (perquè han rebut electrons), com es veu en la imatge 6.

Aquest conjunt de les dues regions amb càrrega formen una barrera interna de potencial anomenada **regió d'esgotament**<sup>33</sup>, la qual es fa encara més gran quan la polarització del díode és inversa.

Això és així per culpa de la fluctuació del corrent, atès que els electrons lliures de la part N són atrets per el born positiu de la font de corrent, el qual està connectant amb el díode mitjançant la connexió situada a la mateixa part N (quan està en polarització inversa), i aquest fet ve a ser el contrari del que es vol, ja que la intenció és que els electrons travessin la regió d'esgotament i vagin a parar a l'altre connexió situada a l'altre part de díode (imatge 6) i no es quedin al punt de connexió de la mateixa part dopada N.

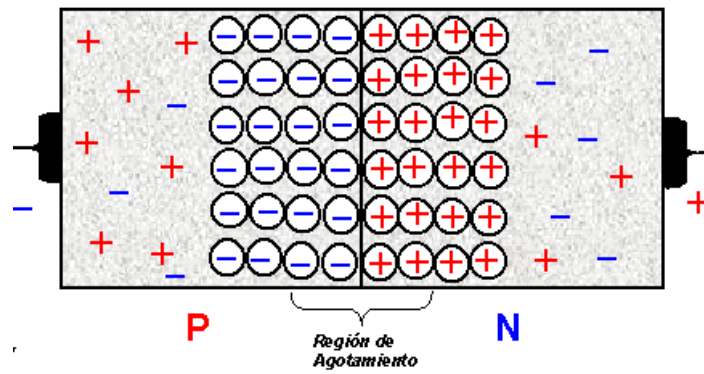
En la polarització directa, a diferència de la inversa, els borns i les connexions estan ben disposades, fent que els electrons tant del corrent extern com de la part N vagin a parar a la connexió de la part dopada P, podent acabar el circuit. Per això només és necessari que els electrons obtinguin la suficient energia com per poder superar la barrera de potencial interna/regió d'esgotament.

---

<sup>32</sup> Només afecta una petita regió perquè la conductivitat dels materials en qüestió no es suficientment bona com per aconseguir moure tanta distància els electrons.

<sup>33</sup> La regió d'esgotament ve a ser una barrera ja que els àtoms carregats negativament d'aquesta regió impedeixen el pas a aquells electrons que haurien de fluir a través d'aquest espai.

Imatge 6



Representació esquemàtica d'un díode i la regió d'esgotament.

*Polarización Inversa De La Unión PN (2012,05)[enlínea]<*

<http://karengonzaleztorres.blogspot.com/2012/05/polarizacion-inversa-de-la-union-pn.html>>[consulta: 9 de maig del 2019]

## - Deducció de l'equació de De Broglie

L'equació de De Broglie es basa en dues altres equacions les quals expliquen diferents relacions. La primera, l'anomenada relació de Planck-Einstein, i la segona, l'equivalència entre massa i energia.

- La relació de Planck-Einstein explica que l'energia d'un fotó ( $E$ ); i la seva freqüència ( $\nu$ ) són proporcionals d'una manera en que:  $E = h \cdot \nu$ , on  $h$  és la constant de Planck.
- L'equivalència entre massa i energia és la famosíssima "equació d'Einstein":  $E = m \cdot c^2$ , on  $c$  és la constant de la velocitat de la llum en el buit.

Si ens fixem en la relació de Planck-Einstein, podem veure que la freqüència és velocitat entre longitud de ona, per tant:  $E = \frac{h \cdot \nu}{\lambda}$ , i com la constant  $c$  també és velocitat (atès que tenen les mateixes unitats ( $m/s^2$ )), podem veure que  $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ .

Si ara igualem l'energia ( $E$ ) d'aquestes dues equacions incloent aquest últim desenvolupament, podem veure que  $\frac{h \cdot c}{\lambda} = m \cdot c^2$ . Si ara ens disposem a arreglar aquesta igualtat aïllant la longitud d'ona ( $\lambda$ ), podem deduir fàcilment que  $\frac{h}{m \cdot c} = \lambda$

Per últim, substituïm la constant de la velocitat per la velocitat (ja que tenen les mateixes unitats ( $m/s^2$ )) i en queda ni més ni més la relació entre la massa i longitud d'ona formulada per De Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

## - **Diferenciació entre ruptura dielèctrica i efecte túnel**

La ruptura dielèctrica ja s'ha tingut present des de sempre a l'hora de fer els transistors, però ara també ha aparegut l'efecte túnel, el qual és un problema amb efectes similars a la ruptura dielèctrica (ja que en els dos casos es produiria un pas de corrent per la porta) però totalment diferent a nivell conceptual.

Tal com hem vist, aquests dos fenòmens poden ocasionar greus errors en el funcionament dels transistors, i per entendre'ls del tot bé, aquí anem a analitzar les seves principals diferències.

Primerament, tal com hem mencionant amb anterioritat, la ruptura dielèctrica dels materials pot succeir normalment tant en escala macroscòpica com en microscòpica mentre que les conseqüències de l'efecte túnel només són apreciables en termes microscòpics.

Segonament, també hi ha una gran diferència si tenim present l'aïllant/dielèctric, atès que pel que respecta l'efecte túnel, aquest no suposa cap alteració en la composició de l'aïllant, mentre que en la ruptura dielèctrica s'altera temporalment l'estructura, polaritzant-lo momentàniament per tal de que pugui passar el corrent per ell.

