



**Universitat de les
Illes Balears**
Facultat de Ciències

Memòria del Treball de Fi de Grau

Anàlisi d'alternatives per a l'emissió electrònica integrada

Rafel Perelló Roig

Grau de Física

Any acadèmic 2013-14

DNI de l'alumne: 41535433D

Treball tutelat per Jaume Segura Fuster
Departament de Física



S'autoritza la Universitat a incloure el meu treball en el Repositori Institucional per a la seva consulta en accés obert i difusió en línea, amb finalitats exclusivament acadèmiques i d'investigació

Paraules clau del treball:
CMOS, microelectrònica, buit

ÍNDEX

1.	INTRODUCCIÓ	3
1.1.	Díodes	3
1.2.	Tríodes.....	3
1.3.	Propietats i aplicacions	4
2.	EMISSIÓ ELECTRÒNICA.....	6
2.1.	Emissió Termoiònica	6
2.2.	Emissió de camp.....	8
2.3.	Propostes d'estructures	10
3.	DISSENY I CARACTERITZACIÓ.....	12
3.1.	Tecnologia emprada.....	13
3.2.	Consideracions generals dels models.....	13
3.3.	Estructura bàsica	14
3.4.	Càtode i porta amb forma de pinta	17
3.5.	Gruix dels braços.....	20
3.6.	Longitud dels braços	22
3.7.	Superfície rugosa.....	25
3.8.	Potencial aplicat	26
3.9.	Densitat de corrent.....	27
4.	CONCLUSIONS	28
5.	REFERÈNCIES.....	30

1. INTRODUCCIÓ

Un dels objectius de la societat actual és l'optimització dels aparells electrònics que fem diàriament i que tant ens han facilitat les tasques quotidianes. Aquesta optimització va lligada a diferents aspectes claus com puguin ser la seva mida, fins a arribar a distàncies característiques de micròmetres i nanòmetres, el consum, la robustesa o la capacitat d'operació en condicions adverses ja siguin de radiació o temperatura.

És en aquest marc de desenvolupament que apareixen amb força els dispositius microelectrònics de buit (MEB), aparells que empen les principals característiques dels seus predecessors, vàlvules de buit (VB), per adaptar-se a les necessitats actuals.

Les VB van ser els primers dispositius electrònics que es van comercialitzar a l'engròs i van suposar la primera gran passa en el món de l'electrònica. De forma senzilla els podem caracteritzar com a elements macroscòpics emprats per al tractament de senyal mitjançant l'emissió termoiónica

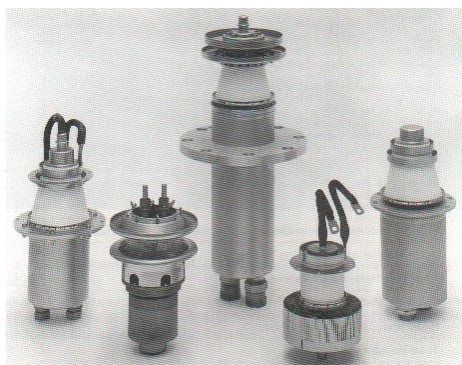


Figura 1. Fotografia d'alguns models de VB

(fenomen explicat a continuació) d'electrons des d'un càtode a un ànode recol·lector a través del buit [1]. En el seu moment foren dispositius molt emprats en televisors, ràdio, sistemes d'amplificació, sistemes de so, etc. Actualment només s'empen en aparells de so d'alta fidelitat degut als grans avantatges que va suposar l'aparició dels transistors: menor temperatura de treball, possibilitat d'integració, menor consum, vida de treball més llarga, etc. Aquests dispositius poden ser englobats en dos grups bàsics: díodes i tríodes.

1.1. Díodes

Presenten l'estructura més simple necessària: un càtode emissor d'electrons per mitjà d'emissió termoiónica i un ànode recol·lector, al qual s'aplica una diferència de potencial, ambdós encapsulats dins una ampolla de vidre a la qual s'ha fet el buit. La funció principal d'aquest element

és la de rectificació d'una senyal alterna, de forma similar als díodes de semiconductor (SC). El seu símbol i la seva corba característica són els de la Figura 2 [2].

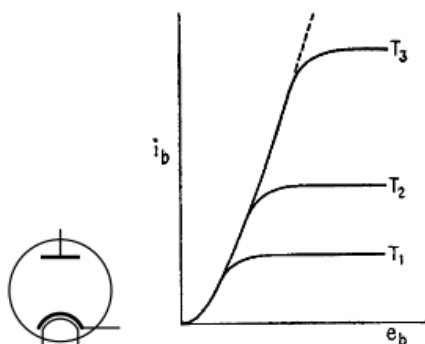


Figura 2. Símbol del díode i corba característica

Té una zona lineal al voltant de l'origen, a mesura que augmenta el voltatge aplicat perd la linealitat fins a arribar a una zona de saturació donada per la temperatura del càtode, a la qual no es poden extreure més electrons.

1.2. Tríodes

L'estructura es basa en la del díode, afegint un tercer elèctrode en forma de reixa, anomenat porta, que regula el pas de corrent i al qual s'aplica un voltatge negatiu respecte l'ànode [3]. Aquest és ja

un element actiu que permet l'amplificació en el tractament de senyal. El seu símbol i les corbes característiques (hi ha tres terminals) són els de la Figura 3:

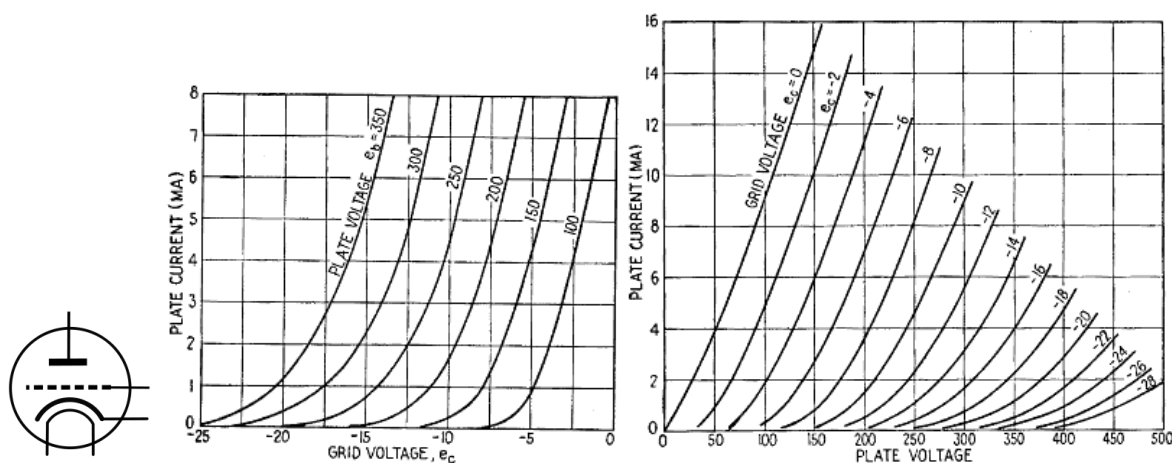


Figura 3. Símbol del tríode i corbes característiques ($I-V_g$, $I-V_a$)

El fet que la reixa sigui propera al càtode permet que petites variacions en el seu voltatge derivin a variacions més grans en el corrent d'ànode o placa, és això el que permet l'amplificació de senyal. A diferència dels díodes, aquests encara tenen alguna aplicació puntual a l'actualitat com puguin ser els sistemes d'amplificació de so, ja que el nivell de renou és pràcticament nul [4].

1.3. Propietats i aplicacions

És així que desenvolupem aquest treball per tal d'analitzar la viabilitat de fabricació dels dispositius esmentats en competència amb els operatius actualment i oferir una visió global dels seus avantatges en front dels elements de SC que actualment presenten un domini aclaparador, així com possibles aplicacions pràctiques immediates. Algunes de les propietats que els fan tan atractius són les següents [5]:

Resistència a la radiació. Com és ben sabut els dispositius SC son altament sensibles a la radiació ionitzant ja que aquesta indueix la creació de càrregues elèctriques al substrat i en modifiquen les propietats. Per altra banda, els elements MEB condueixen els electrons a través del buit (major part del dispositiu) de forma que aquests efectes es minimitzen considerablement de forma natural, a més de l'aplicació de tècniques de disseny adequades. Aquest és un resultat important en el control electrònic de dispositius que han de treballar en llocs amb alts nivells de radiació com puguin ser les centrals nuclears i les aplicacions en tecnologia aeroespacial.

Resistència a la temperatura. Una altra característica important dels SC és la seva sensibilitat en front als canvis de temperatura, fins al punt que podem arribar a perdre l'operativitat ja que es comporten com a aïllants a baixes temperatures i com a conductors a elevades. Com a conseqüència, és necessària la disposició de l'electrònica en ambients d'alta temperatura lluny dels sensors, de forma que es necessiten fils de conducció excessivament llargs. Això desemboca en pèrdues de senyal, moltes vegades greus. Amb la mateixa idea anterior, els elements MEB sofreixen menys canvis degut a la temperatura a causa de la conducció a través del buit. Per tant, permeten minimitzar aquests efectes.

Velocitat d'operació. El fet de poder transportar els electrons per balística a través del buit permet que aquests adoptin velocitats elevades i per tant, poden ser operatius a freqüències majors

que les actuals. Per exemple, amb un camp aplicat de $3 \cdot 10^7 \text{ V/cm}$ els electrons tenen unes velocitats de l'ordre de 10^9 cm/s , mentre que per un SC de Silici aquesta es veu limitada a 10^7 cm/s durant la saturació. La diferència es de 2 ordres de magnitud i pot augmentar amb l'aplicació de camps elèctrics de major intensitat.

Absència de corrents de fuga. Un dels grans problemes de l'escalat actual dels dispositius basats en SC està relacionat amb el control del corrent de fuga que apareix en la zona del canal degut als díodes paràsits que es formen en la creació dels terminals dels transistors a més d'altres components de fuga paràsites derivades de la utilització d'un substrat semiconductor. Aquests corrents no es produïrien en dispositius que operen en el buit.

No dissipació de calor durant el transport. El fet de treballar dins el buit fa que no hi hagi dissipació de calor en aquesta etapa. En conseqüència, permet la utilització dels dispositius per treballar en aplicacions d'alta potència i freqüències elevades.

Aquestes propietats són les que permeten focalitzar l'estudi en aquestes estructures, com es fa palès se'n poden treure grans avantatges que no són disponibles en l'ús de dispositius SC. Per tant, la idea principal és que puguin representar una alternativa als sistemes actuals i obtenir noves vies de desenvolupament. Per tal que això sigui possible s'han d'assolir uns requisits bàsics com són l'aplicació de les tecnologies actuals de fabricació a aquests dispositius per tal de facilitar el procés, densitat de corrents elevades, voltatges d'operació baixos, mides comparables als dispositius actuals i compatibilitat amb els processos de buit. Seguint amb aquesta idea de presentació, s'han establert algunes aplicacions pràctiques d'interès, així com aplicacions futures, tant en el sentit de millorar els sistemes actuals com en el desenvolupament de diferents. Com és de suposar, aquestes aplicacions es veuen basades en les propietats comentades anteriorment.

Pantalles d'alta resolució. L'ús de dispositius MEB permet el disseny de pantalles planes amb baix voltatge d'operació, que esdevindran d'alta lluminositat i resolució [6]. Aquest sistema es pot dur a terme mitjançant matrius d'emissió electrònica, el que es coneix com a *Field Emission Arrays (FEA)* [7].

Sistemes òptics de molt alta resolució. Poder emprar càtodes d'emissió de camp de mida nanomètrica permet desenvolupar aquesta classe de sistemes: microscopis electrònics de transmissió, sistemes de litografia per electrons, espectròmetres d'electrons Auger i microscòpia d'efecte túnel [5].

Elements actius a circuits integrats. Amb funcions idèntiques als transistors, díodes, etc. Actuals, però amb els avantatges esmentats anteriorment que ofereixen una solució alternativa [8].

Dispositius de microones amplificadors de potència

Calibratge de pressions i camp magnètics

Fonts de ions i raig-X

Sensors

Amb tot això, l'objectiu d'aquesta tasca és fer una revisió general de les diferents propostes realitzades i dels fenòmens que tenen lloc en el procés d'emissió d'electrons i el seu transport. D'aquesta forma s'arribarà al disseny d'un dispositiu MEB i se'n farà un estudi de la viabilitat del mateix, centrat bàsicament en les característiques de densitat de corrent. El desenvolupament

d'aquesta part es durà a terme amb l'entorn gràfic de resolució numèrica *COMSOL Multiphysics* que es basa en la resolució de les equacions diferencials dins un volum emprant una malla tetraèdrica. Més concretament, s'emprarà el *AC/DC module* per calcular la distribució de camp elèctric dins el dispositiu i poder fer una estimació del corrent mitjançant l'equació de Fowler-Nordheim per a l'emissió electrònica que es descriurà a continuació.

2. EMISSIÓ ELECTRÒNICA

El fenomen bàsic a qualsevol dels dispositius esmentats anteriorment és l'emissió d'electrons i la seva conducció, a través del buit en el cas de les VB. Per tant, és important analitzar de forma acurada quins són els processos més comuns que es poden emprar per a realitzar aquesta tasca i fer una comparativa entre ells per tal d'optimitzar-lo. Un dels grans desavantatges de les VB de buit en front dels dispositius de SC fou la seva temperatura de treball, fet que no fa possible la integració de les primeres. L'elevada temperatura necessària a les VB és deguda a que l'emissió es de tipus termoiònic i es basa en l'augment de l'energia dels electrons mitjançant escalfament. Per tant, és necessari emprar un altre sistema que sigui capaç d'operar a temperatura ambient si es vol integrar aquest tipus de dispositius.

2.1. *Emissió Termoiònica*

Com és ben sabut, els metalls presenten propietats de conducció elèctrica degut als electrons de valència, mentre que la resta es troben lligats als nuclis. Els primers són els responsables del corrent elèctric ja que tenen mobilitat per dins la xarxa, encara que es troben confinats dins el cos del metall. Si un d'aquests electrons intenta sortir del confinament, es veurà sotmès a una força que podem entendre mitjançant una càrrega imatge.

$$F_x = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0(2x)^2}$$

(Eq 1)

Degut a la temperatura, els electrons tenen energia que poden emprar per vèncer aquesta força. Si la temperatura augmenta també ho fa l'energia, de forma que si aquest arriba fins a un valor que els permet superar la força anterior, el flux d'electrons que té l'energia necessària és el que es coneix com a emissió termoiònica [9]. Per recollir aquests electrons és necessari un ànode recol·lector al qual hem aplicat una diferència de potencial. El primer que va estudiar aquest fenomen fou Owen Richardson a l'any 1901 i la llei que el modela porta el seu nom. Aquesta llei és entesa sota la idea que el corrent es troba saturat pel camp elèctric a l'ànode, és a dir, que tots els electrons que emet la superfície del metall són recollits. Si la superfície separa el cos del metall i el buit, la densitat de corrent en la direcció perpendicular (x) es pot escriure a partir de la densitat d'electrons i la velocitat d'aquests.

$$J_x = \int qn(E)v_x(E)dE$$

(Eq 2)

Els electrons són partícules d'espí semi-enter de tal forma que obeeixen l'estadística de Fermi-Dirac, així la densitat d'aquests s'escriu a partir de la densitat d'estats $g(E)$ i la probabilitat d'ocupació $f(E)$ d'un estat amb energia E i un nivell de fermi E_F .

$$n(E) = g(E)f(E)$$

(Eq 3)

$$g(E) = \frac{8\sqrt{2}\pi}{h^3} m^{3/2} \sqrt{E}$$

(Eq 4)

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \approx \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$$

(Eq 5)

La probabilitat d'ocupació s'ha aproximat per la funció de Boltzmann ja que el rang d'energies necessàries per tal de que s'esdevingui l'emissió és molt més gran que l'energia de Fermi. Per tal de facilitar el càlcul s'empra la velocitat, mitjançant l'energia cinètica clàssica, com a variable, de tal forma que la densitat d'electrons serà

$$n(E)dE = \frac{8\pi}{h^3} m^3 \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right) v^2 dv$$

(Eq 6)

Emprant aquesta igualtat a (Eq 2) i tenint en compte que hi ha una velocitat mínima perpendicular en el límit d'integració, pertanyent a l'energia necessària per a sortir del metall, obtenim la densitat de corrent.

$$v_{x,min} = \sqrt{\frac{2U}{m}}$$

(Eq 7)

$$\begin{aligned} J_x &= \frac{2qm^3}{h^3} \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) \int_v^{+\infty} v_x \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right) dv_x \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{mv_y^2}{2kT}\right) dv_y \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{mv_z^2}{2kT}\right) dv_z \\ &= \frac{4\pi qmk^2}{h^3} T^2 \exp\left(\frac{E_F - U}{kT}\right) = A_R T^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right) \end{aligned}$$

(Eq 8)

En l'expressió s'ha emprat la definició de funció de treball $\phi \equiv U - E_F$ que és l'energia mínima d'un electró per sortir del metall i la constant de Richardson $A_R = 1.2 \cdot 10^6 A/m^2 K^2$. De la mateixa expressió ja s'observa que la dependència amb la temperatura és elevada i predomina en el terme exponencial. Així és interessant veure com canvia la densitat de corrent a mesura que augmenta la temperatura en un metall molt emprat com pot ser el Tungstè ($\phi_W = 4.55 eV$), de tal forma que es té una idea de la temperatura de treball.

Taula 1. Valors representatius del corrent d'emissió termoiònica en funció de la temperatura

$T(K)$	$J(mA/cm^2)$
300	$4.17 \cdot 10^{-67}$
1000	$1.43 \cdot 10^{-12}$
2000	1.66

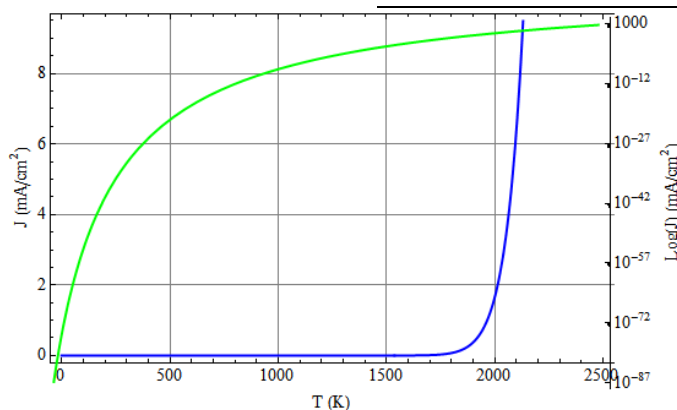


Figura 4. Característica d'emissió termoiònica del Tungstè

La temperatura de treball és de l'ordre de 2000K, temperatures inassolibles en dispositius integrats. A més, es pot observar un comportament molt abrupte degut al caràcter exponencial del fenomen (Figura 4). Per a temperatures lleugerament inferiors no hi ha corrent apreciable, en canvi en arribar al valor de treball aquest creix sobtadament.

2.2. Emissió de camp

De la mateixa forma que els electrons mòbils d'un metall poden guanyar energia tèrmica fins al punt que un nombre considerable en tenen la suficient per sobrepassar la barrera de potencial del metall, un camp elèctric intens aplicat a la superfície d'aquest pot reduir la barrera i augmentar considerablement la probabilitat d'efecte túnel. Aquest és el fenomen que coneixem com emissió de camp i fou estudiat per primera vegada per Fowler i Nordheim a l'any 1928_ [10]. La primera visió és la que pot semblar més clara i és la que s'emprarà en aquesta discussió, encara que hi hagi algunes simplificacions significatives, ja que no és necessari un desenvolupament més complet per fer una estimació del corrent d'emissió. Les simplificacions que es van dur a terme són tals com suposar que la barrera de potencial amb el buit és triangular, no hi ha impureses a la superfície que es considerada plana, la relació de dispersió per a l'energia és parabòlica, temperatura absoluta de

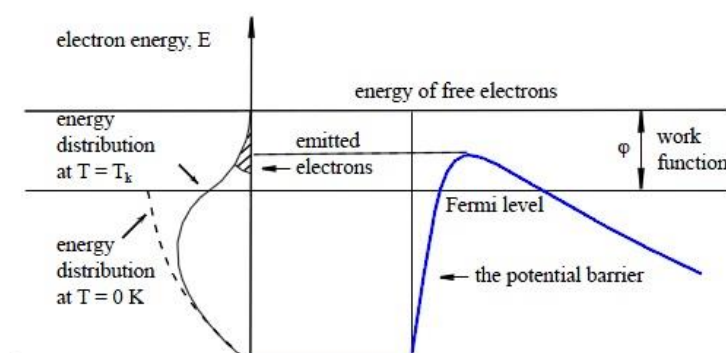


Figura 5. Diagrama representatiu de la barrera de potencial en l'emissió per efecte camp

0K i l'aplicació del model de Sommerferld per als electrons dins un metall. Aquest model tracta els electrons com un gas lliure dins el metall (no hi ha interaccions entre ells), exceptuant col·lisions instantànies que en desvien la trajectòria i perden tot el moment, a més aplica la Mecànica Quàntica i

l'estadística de Fermi-Dirac_ [11].

A la Figura 5 es mostra de forma senzilla l'acció del camp elèctric sobre la barrera de potencial creada per la càrrega imatge $U(x) = -e^2/4x$. Bàsicament disminueix el seu valor efectiu a mesura que s'allunya de la superfície, de forma que obtenim una barrera de potencial quasi-triangular que permet els electrons sobrepassar-la mitjançant l'efecte túnel, amb una probabilitat d'èxit significativa. Amb el camp

elèctric aplicat (F), la barrera de potencial és de la forma següent i la densitat de corrent es pot escriure com

$$U(x) = -\frac{e^2}{4x} - eFx$$

(Eq 9)

$$J = \frac{a}{\phi} F^2 \exp\left(-\frac{b\phi^{3/2}}{F}\right)$$

(Eq 10)

on a i b són constants universals definides de la forma següent

$$a \equiv \frac{e^3}{8\pi h} = 1.541434 \cdot 10^{-6} \frac{A eV}{V^2}$$

$$b \equiv \frac{4\sqrt{2m}}{3 e\hbar} = 6.830888 \cdot 10^9 \frac{V}{eV^{3/2}m}$$

Per tal que tingui lloc aquest procés són necessaris camps elèctrics de l'ordre de $10^7 V/cm$, de tal forma que es veurà afavorit per estructures acabades en forma de punta. Encara que s'ha obtinguda per a 0K i a temperatura ambient és lleugerament diferent, no hi ha dependència directa amb la temperatura, per això també es coneix com a emissió freda. Aquest es un gran avantatge en front de l'emissió termoiònica. A continuació, a la Figura 6 es representa la densitat de corrent per a un interval de camp elèctric típic i de la mateixa forma que abans pel tungstè, així se'n fa una comparació directa.

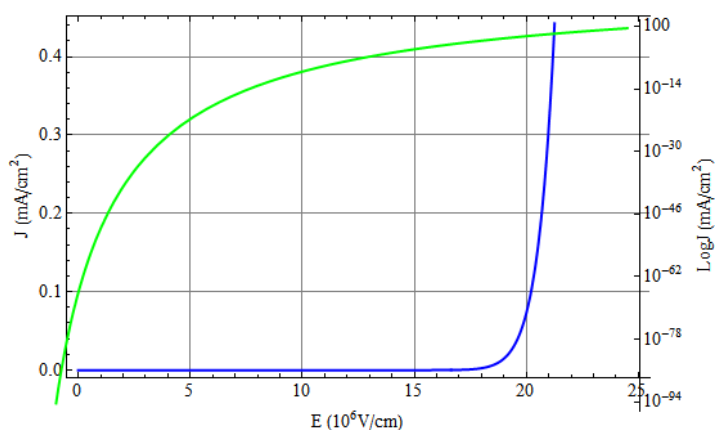


Figura 6. Característica d'emissió de camp del Tungstè

Taula 2. Valors representatius del corrent d'emissió per efecte camp dependent del camp a la interfície

$E (10^6 V/cm)$	$J (mA/cm^2)$
1	$4.02 \cdot 10^{-283}$
10	$5.46 \cdot 10^{-19}$
30	77.0

També s'observa el comportament abrupte de l'emissió termoiònica, fet que dificulta la caracterització ja que una petita variació en les condicions de treball pot suposar la diferència entre la validesa del dispositiu o no.

2.3. Propostes d'estructures

Totes aquestes característiques i propietats fan que l'estudi d'aquests dispositius sigui un tema actual i en vies de desenvolupament. Varis grups de recerca han proposat models i possibles solucions a aquestes idees per tal d'obtenir-ne tots els possibles beneficis. A continuació se'n comenten alguns dels exemples més significatius.

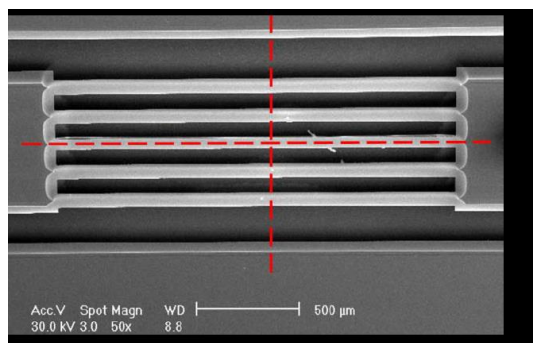


Figura 7. Fotografia ME microfilaments de SiC

Microfilaments de SiC - Emissió termoiònica.

L'estructura consisteix en 5 microfilaments de 1-4 mm de llargària i 100 μm de gruixa, connectats en paral·lel en forma de pont a un substrat conductor [12]. S'han analitzat les característiques d'emissió dins una cambra d'alt buit ($P < 10^{-6} Torr$) amb una temperatura de treball superior als 1000°C. Sota aquestes condicions no s'ha observat emissió de

camp i molt baixa emissió termoiònica (10 – 100 nA).

És un dispositiu de mides considerables, que no

permet la integració i treballa a temperatures excessives. A més, només s'ha pogut verificar el funcionament un cop degut a l'estrès tèrmic.

Nanotubs de Carboni - Emissió termoiònica. Estudi de l'emissió de corrent mitjançant diferents tipus de nanotubs també dins cambra de buit_[14]. S'aconsegueixen electrons a partir de 800°C

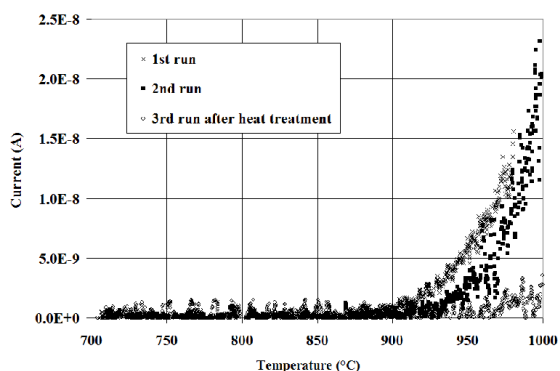


Figura 8. Corrent d'emissió termoiònica dels nanotubs de carboni en funció de la temperatura de treball

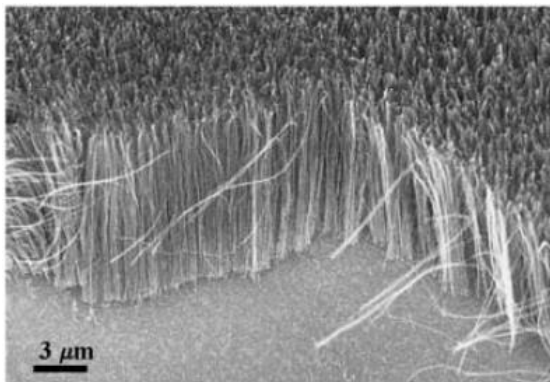
però amb densitats molt baixes i corrents totals de l'ordre de nA com s'observa a la figura adjunta. La temperatura òptima de treball és superior als 1000°C i l'estructura no és capaç de suportar-la més de 2 seqüències de mesura. Aquesta si que té les mides adequades per poder ser integrada, encara que la temperatura de treball no ho permeti.

Tríode - Nanotubs de Carboni.

Es desenvolupen matrius de nanotubs alineats que presenten una distribució de camp elèctric uniforme en el seus

extrems_[13]. Es segueix l'estructura de tríode amb un ànode recol·lector i una porta que treballa a diferents voltatges (0 – 80 V). S'obtenen corrents significatius (1 μA), encara que amb 1000 V aplicats a l'ànode, amb una densitat de corrent de l'ordre de 2 mA/cm². S'entén que el comportament es deu únicament a l'efecte de camp i els corrents de fuga a través de la porta són menyspreables, què és un dels objectius.

Nanotubs de Carboni – Emissió de camp. L'estructura bàsica és la mateixa que en el cas anterior encara que amb distàncies ànode-càtode diferents, així com el voltatge aplicat. La diferència



principal és la disposició dels nanotubs, en aquest cas tenen una orientació determinada, que permet obtenir densitats de corrent més elevades (14 mA/cm^2) durant períodes de treball significatius [15]. El punt més important d'aquest estudi però, és l'aplicació directe a alguns dispositius pràctics que ja s'empraven amb altres fonts d'emissió. Aquests són les pantalles de fòsfor i els tubs de raig-X.

Figura 9. Fotografia ME dels nanotubs de carboni

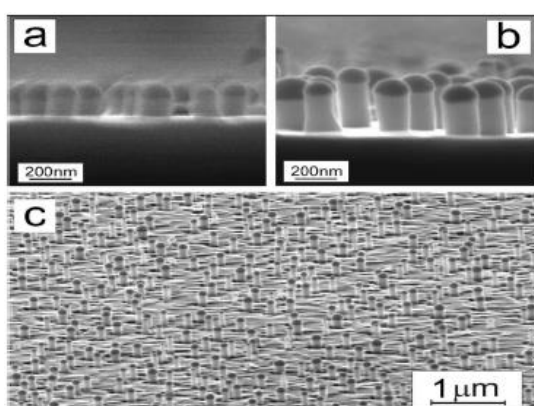


Figura 10. Fotografia ME dels nanofilaments de Si a diferents escales de resolució

Nanofilaments de Si. Estructures similars als nanotubs de carboni que permeten l'obtenció d'emissió de camp [16]. En aquest cas s'han analitzat les seves propietats mitjançant un díode i no un tríode, a més d'alguns sistemes funcionals com pantalles de fòsfor amb un a densitat de corrent de 1.8 mA/cm^2 treballant a un voltatge d'ànode menor a 10 V . El gran avantatge d'aquests resideix en el procés de fabricació, ja que son de Si i es poden créixer en un substrat tal com s'empra en la tecnologia CMOS actual.

És clar el fet que l'emissió termoiónica fou la responsable de la impossibilitat de renovació de les VB per tal d'entrar en competència dins el mercat dels SC. Com s'ha vist en aquests exemples anteriors, és necessària una temperatura de treball excessivament gran per tal de fer els dispositius operatius en unes condicions adequades. A més, el consum associat a aquest tipus d'emissió és major respecte al que requereix l'emissió de camp, ja que és necessari l'escalfament del càtode. Amb aquestes característiques no es viable dissenyar estructures de mides micro-nanomètriques degut a la insuficient densitat de corrent i a la descomposició de les mateixes per acció tèrmica com s'ha vist als microfilaments de SiC. Tots aquests inconvenients de l'emissió termoiónica són corregits per l'emissió de camp, que a més està més adaptada a les tècniques de fabricació actuals. Amb tot això el treball desenvolupat anirà enfocat cap a un dispositiu d'emissió de camp.

Taula 3. Comparació qualitativa entre l'emissió termoiónica i l'emissió per efecte camp

<i>Emissió termoiónica</i>	<i>Emissió de camp</i>
Temperatures d'operació elevades	Operatiu a temperatura ambient
Ruptura per efectes tèrmics	No s'observa ruptura elèctrica
Dificultat d'acoblament a integració	Possibilitat d'integració
Potència dissipada	Baix consum
No acceptat a tecnologies actuals	Facilitat de fabricació actual

3. DISSENY I CARACTERITZACIÓ

Un dels objectius principals d'aquesta tasca és el de dissenyar una estructura a partir dels treballs analitzats fins el moment, ja sigui per determinar quin tipus d'emissió s'ha d'emprar o la forma del càtode emissor. Per tal de poder dur-ho a terme s'ha de seleccionar una tecnologia de disseny sota la qual s'optimitzarà el dispositiu. El treball es centrarà en una tecnologia amb viabilitat d'operació i disponibilitat real, ja que s'ha de tenir la opció de fabricació tot i que aquesta possibilitat no es contempli com part del treball actual en el que fàcies realitzarà una verificació numèrica de les possibilitats i una estimació del corrent que pot arribar a proporcionar l'estructura. Aquesta tecnologia es detallarà breument a continuació. Després de la discussió realitzada s'entén que hi ha una sèrie de factors quals per tal d'optimitzar el disseny que es vol realitzar. No es repetiran cadascun dels avantatges que suposa aplicar aquests criteris, però sí que es recordarà quins són els mateixos per tal de fer palès les pautes a seguir. En primer lloc, s'ha d'emprar l'emissió de camp per a obtenir els electrons. Per tal d'optimitzar aquest procés serà necessari que les distàncies entre elèctrodes siguin mínimes (maximitzen el camp elèctric a un potencial donat) i així treballar amb diferències de potencial adequades per a la tecnologia a emprar. A més, és important entendre que el camp elèctric que realment interessa en l'emissió és aquell que es troba a la superfície de separació entre metall i buit, de tal forma que es pot augmentar evitant superfícies planes, és a dir, superfícies amb rugositats. El fet que el camp augmenti a superfícies on hi ha estructures acabades en punta es pot entendre a partir de la idea que les distàncies característiques d'aquestes són més petites. Amb això, s'estableix una relació entre el camp macroscòpic aplicat i el camp que hi ha a la superfície, és el que es coneix com a factor d'augment. En segon lloc, remarcar que l'estructura desitjada és de tipus tríode, de tal forma que serà necessari planificar la geometria del càtode i de la porta de forma acurada per tal d'aprofitar al màxim possible el corrent emès i minimitzar el corrent de porta. La forma de l'ànode no influeix en el procés ja que només s'encarrega de la recol·lecció dels electrons després que hagin superat la porta, és aquesta la que controla el camp d'extracció. Finalment s'ha de disposar de la major àrea d'emissió respecte a les mides del conjunt, ja que el que determina l'equació de F-N és la densitat de corrent. Aquests dos punts darrers es veuran sotmesos a un balanç ja que estan directament relacionats. La base d'un bon disseny és la seva planificació, és així que es seguirà el mateix esquema de procediment per a cada una de les alternatives que es vulgui estudiar.



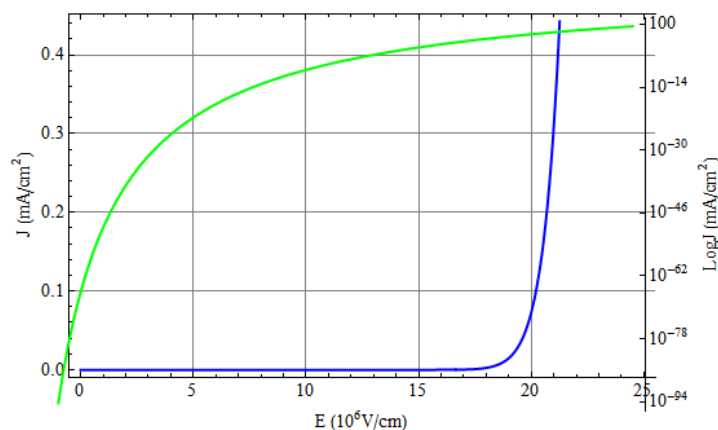


Figura 11. Característica d'emissió per efecte camp del polisilici

Figura 11.

3.1. Tecnologia emprada

Per a la realització d'aquest treball s'ha escollit la tecnologia comercial de $0.35 \mu\text{m CMOS 2-Poly 4-Metal} - 5\text{V}$ del fabricant AMS (*Austria Microsystems*).

Pel que fa al disseny de dispositius actuals aquesta és ja una tecnologia relativament madura, però permet aplicar les regles de disseny bàsiques que es necessiten i també presenta viabilitat operativa amb l'avantatge de permetre dos nivells de polisilici. La distància mínima entre els aquests nivells és de 41 nm, sent la gruixa del primer de 282 nm i la del segon de 200nm. La distància del primer nivell de polisilici amb el nivell d'alumini és de 645 nm. Finalment comentar que les tires de polisilici poden tenir una amplada mínima de 650nm i una distància entre elles mínima de 500nm.

3.2. Consideracions generals dels models

Amb les pautes de disseny que permet aquesta tecnologia s'han d'aplicar les optimitzacions comentades anteriorment. És així que, respectant l'estructura de tríode, s'emprarà el polisilici per al càtode i la porta ja que són els dos nivells que es troben més propers, no sent possible per disseny modificar el paràmetre de fabricació de 41 nm de separació. Pel que fa a l'ànode, no és necessari disposar-lo a una distància propera per tal de recollir electrons, pel que es pot utilitzar el primer nivell d'alumini. Aquestes són les mides principals en parlar d'una secció frontal de qualsevol dels models, ja que a tots ells és la mateixa i fixada pel procés de fabricació. Les mides de la secció horitzontal es determinen durant el disseny del dispositiu. És necessari que la porta tingui unes estructura en forma de reixa o semblant per tal de facilitar el pas dels electrons cap a l'ànode. Per aquest motiu s'analitzaran diferents alternatives de porta sempre tenint en compte les distàncies mínimes entre tires de polisilici. L'ànode serà una placa uniforme ja que és necessari maximitzar l'àrea de recol·lecció, d'igual forma que el càtode. A aquest segon se li aplicaran diferents alternatives per tal de complir amb els objectius establerts. Un darrer punt a tenir en compte és la mida del dispositiu. En aquest cas es realitzarà una estructura de mides reduïdes comparades amb les distàncies característiques que s'empren a la tecnologia, és a dir, si es fa una graella tindrà pocs espais buits (per exemple 4) quan una estructura real en tindria podria tenir molts més. S'ha fet d'aquesta forma ja que el que interessa realment és la caracterització bàsica per obtenir la densitat de corrent, i aquesta s'assoleix amb la idea proposada. L'obtenció de dispositius

Cal remarcar que l'obtenció de la funció de treball és un procés que es pot dur a terme experimentalment si es disposa d'una estructura adequada amb el material que es vol caracteritzar, en aquest cas polisilici. Degut a què no ha estat possible fer-ho d'aquesta forma, en la tasca actual s'ha obtingut la funció de treball de la bibliografia_ [17]. Per a aquest valor determinat, corresponent a un polisilici degenerat tipus N, la característica d'emissió és la de la

de mides majors es directe repetint la mateixa estructura i ampliar-la adequadament. De forma que els resultats obtinguts no perdran cap validesa. Com més gran sigui, més superfície d'emissió i per tant més corrent s'obté, sempre limitats per les dimensions desitjades.

La simulació numèrica de l'estructures realitza amb el programa de simulació COMSOL multiphysics creant un dispositiu col·locat dins un espai amb aire ja que el programa necessita definir-hi una malla per a poder resoldre. Si el que es vol és emprar aquests dispositius en el buit, només cal reduir la densitat / pressió de l'aire fins a arribar a valors realistes amb les tecnologies actuals de buit, aquest és el procediment que s'ha dut a terme. A més, aquest és un volum finit que s'ha agafat com a esfèric per temes de simetria, facilitant la integració numèrica sense regions amb dificultat de resolució o comportament anòmal dels camps com podria ocórrer treballant amb una regió cúbica.

3.3. Estructura bàsica

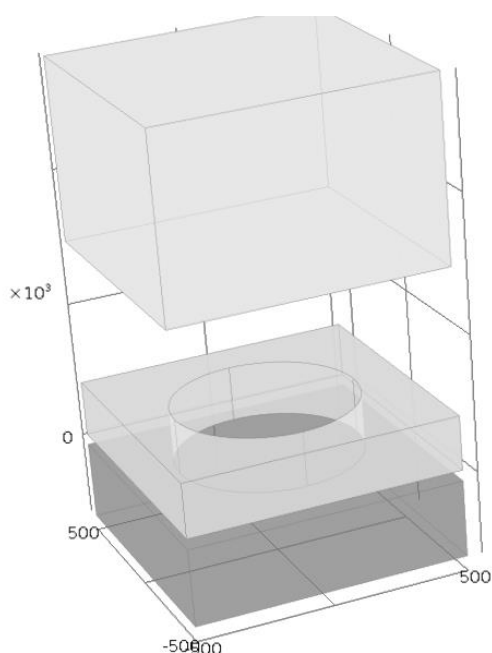


Figura 12. Representació 3D de l'estructura de referència

Aquest primer model s'ha utilitzat com a referència bàsica per realitzar un primer anàlisi general del problema, ja que es tracta d'una estructura molt senzilla. Amb això es pot tenir una idea del procés de disseny i de les característiques que s'han d'aplicar al dispositiu per tal de seguir les pautes establertes. A més d'aquesta estructura, també se'n coneix a priori la distribució de camp elèctric i de potencial, què és un dels valors necessaris per a obtenir la densitat de corrent, fet que permet verificar la resolució del programa. També serà útil per veure les formes de visualització dels resultats obtinguts, ja que en models posteriors no pot ser tan clar el resultat com en aquest. Bàsicament es simula l'estructura de tríode: un càtode, un ànode i una porta disposats en plans paral·lels. La porta presenta un orifici central, circular per qüestió de simetria, que permet el pas dels electrons cap a l'ànode. Com s'ha esmentat abans el

potencial que s'aplica és de 50V a la porta i de 60V a l'ànode, amb el càtode connectat a terra. Encara que aquesta estructura només sigui de referència, ja hi apliquem la idea que la diferència de potencial gran s'estableix entre la porta i el càtode, tal com es pretén a fer a l'estructura final.

La representació del camp elèctric i el potencial en una estructura 3D que ofereix el programa de simulació no és senzilla, de forma que s'ha escollit fer aquesta representació en plans verticals al llarg de l'estructura, caracteritzats mitjançant una lletra. Això permet visualitzar com és el potencial elèctric a les diferents regions, però necessitem una segona representació per al camp ja que aquesta no és suficientment clara. Un solució és representar la component vertical del camp elèctric sobre la línia que separa el càtode del buit, ja que aquests valors superficials determinen les característiques d'emissió. Aquesta línia ve definida sobre el pla vertical de tall com s'observa a la Figura 13

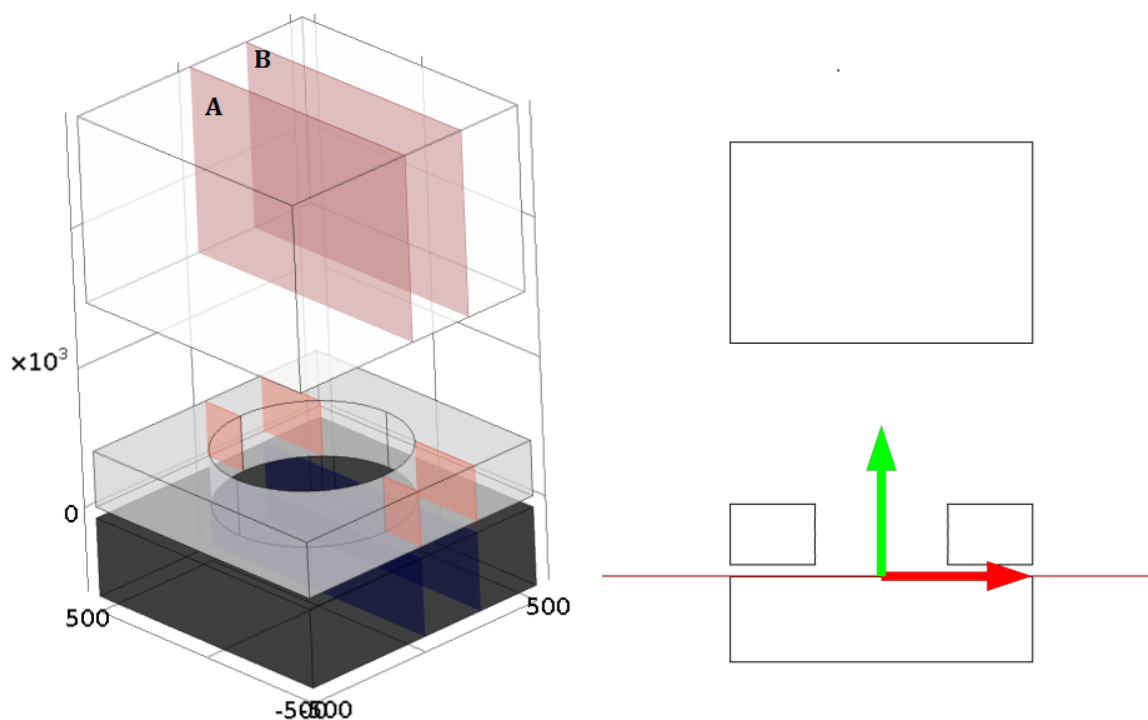


Figura 13. Visualització dels plans i de la línia de tall de representació

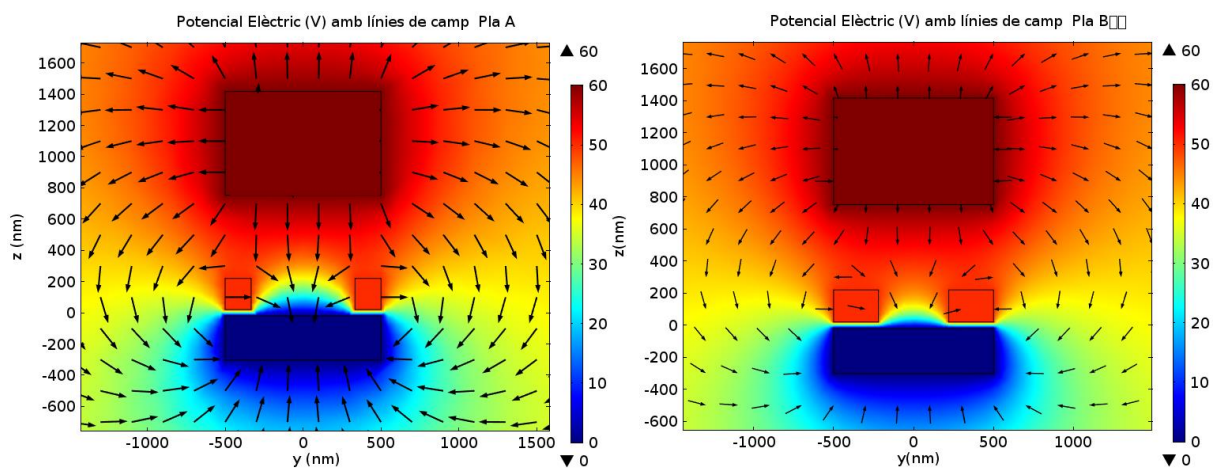


Figura 14. Distribució de camp i potencial a plans verticals de l'estructura de referència

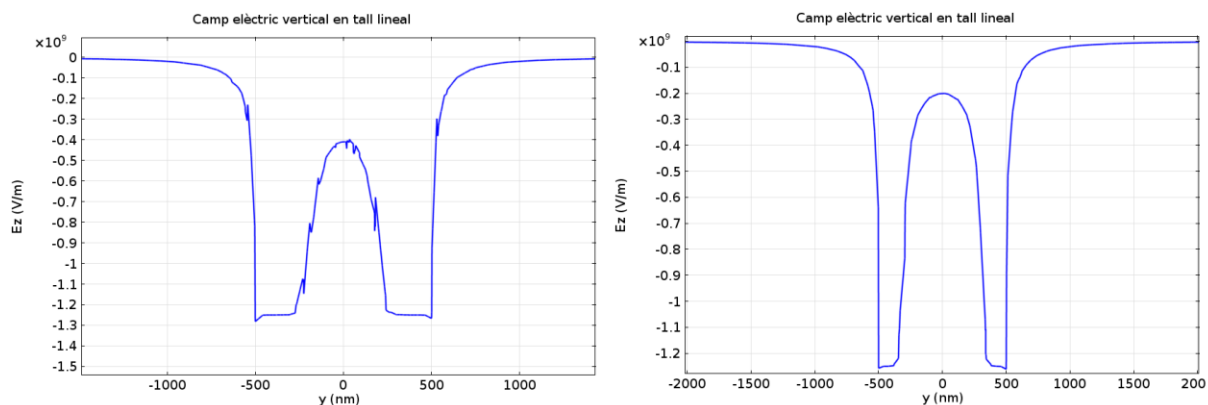


Figura 15. Representació de la component vertical del camp elèctric en funció de la posició per als plans A i B

El fet que el component més important del camp sigui el vertical es pot entendre a partir de la simetria de l'estructura, ja que té una forta direccionalitat. Per confirmar-ho, es poden representar les altres components en la mateixa escala, només per a la segona superfície ja que el comportament és idèntic a l'altra.

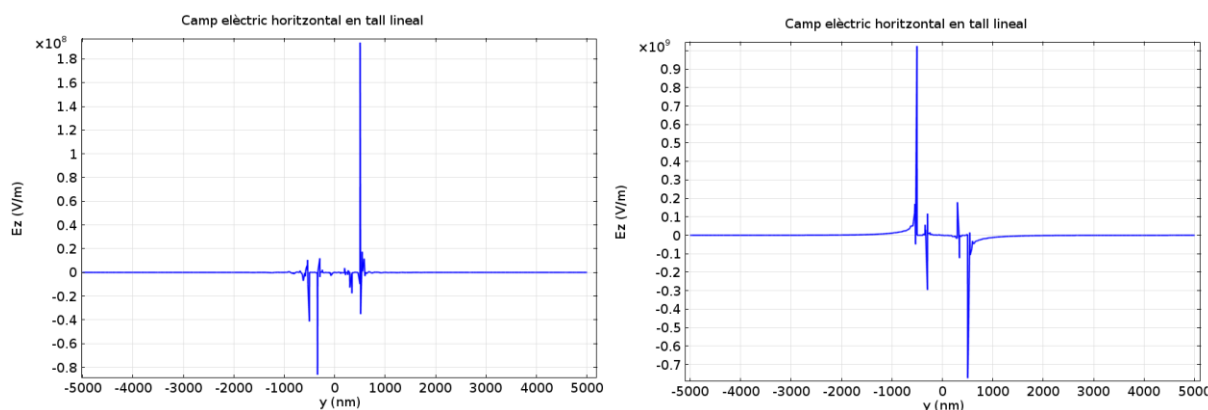


Figura 16. Representació de les components horitzontals del camp elèctric en funció de la posició per al pla B

És clar que els components horitzontals tenen un ordre de magnitud menor. Encara que presentin pics locals, aquests són deguts a la resolució, que no s'ha pogut millorar amb els aparells disponibles. Cal entendre que a regions amb forta interacció aquest és un fenomen que es repetirà al llarg de la tasca. Aquesta idea de direccionalitat es conservarà al llarg de totes les estructures presentades, de forma que es mantindrà la representació de les components verticals.

A partir d'aquestes representacions s'observa que tant les línies de camp com el potencial tenen la forma esperada: el potencial és constant dins els elèctrodes (condició imposada en la resolució) i varia uniformement a les zones on la distància entre plaques és constant (l'orifici central ho distorsiona lleugerament), mentre que el camp és sempre perpendicular a aquesta variació i es dirigeix de potencials elevats cap a baixos. El fet que a la separació entre càtode i porta no hi hagi camp representat és degut a la distància que no ho permet. En aquesta regió hi ha una gran variació del potencial de forma que és la regió amb camp més intens. Aquest resultat és pot entendre clarament a partir de la segona representació en la que es veu que el camp presenta valors de pic en aquestes regions i és fonamentalment constant. En la part central, corresponent a l'orifici, apareix una reducció considerable del mateix i fins i tot algunes perturbacions locals en les quals el camp es fa positiu en passar de la regió amb porta al forat.

Aquests valors màxims de camp obtingut ($10^9 V/m$) són valors interessants ja que permeten obtenir un corrent significatiu. Així i tot, aquesta estructura no és la més adequada ja que tots els electrons emesos en aquestes regions anirien a parar a la porta (no tenen espai suficient per a desviar-se per l'orifici) i contribuirien a un corrent, el de porta, que no és desitjat per qüestions de consum. A més, si van a parar a la porta no arribaran a l'ànode i no formaran part del corrent que es vol maximitzar. Amb això s'entén que els valors de camp assolits són importants, però l'estructura presentada no és la correcte per a maximitzar la superfície d'emissió útil. En aquest cas, la superfície d'emissió útil seria la projecció de l'orifici sobre el càtode, en la qual el camp ja disminueix considerablement ($10^8 V/m$), a valors que no permeten la generació de corrent. Els valors d'aquest corrent obtingut es calcularan a un apartat posterior, per tal de ser comparats amb els altres models.

En els models següents també es revisarà com influeix el canvi de potencial al camp elèctric que aconseguim sobre la superfície, el que s'anomena microscòpic.

3.4. Càtode i porta amb forma de pinta

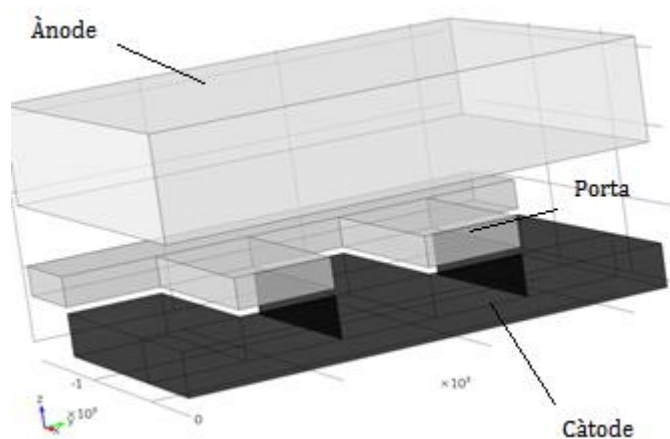


Figura 17. Representació 3D de l'estructura amb forma de pinta

Amb el model anterior s'ha aconseguit un camp elèctric òptim, encara que fora de la superfície útil d'emissió. En conseqüència, l'objectiu de les estructures següents serà aconseguir el valor màxim de camp a la superfície útil, sempre mantenint un valor considerable. En aquest sentit es proposa una estructura en forma de pinta tant pel càtode com per la porta amb un desplaçament relatiu entre els dos de tal manera que no hi hagi superposició. Amb aquesta idea s'aconsegueix que la gran majoria dels electrons que surten de

l'emissor es recol·lectin a l'ànode contribuint al corrent, mentre que es minimitza el corrent de porta. Una estructura molt emprada en diferents àmbits és la de reixa, encara que no és aplicable al nostre model ja que tenim una gruixa mínima de les tires del polisilici relativament elevada. Aquest tipus d'estructura ha tingut una aplicació més històrica en dispositius macroscòpics.

Aquesta estructura conté paràmetres que es poden canviar i s'haurà d'arribar a un valor òptim, a més del potencial aplicat pel que només es té un suposat límit superior. Per tal de dur a terme aquesta discussió es començarà amb un primer model com a base, a sobre el qual s'aniran fent modificacions successives per a aconseguir diferents paràmetres de disseny que optimitzen el resultat. El valor inicial del gruix de les tires que formen la pinta és el mínim que permeten les regles de disseny, tot tenint en compte que es vol obtenir un encaixament total entre càtode i porta. Així mateix, la longitud dels braços és el doble que la gruixa d'aquests. Finalment, comentar que el model s'ha resolt aplicant un potencial de 50V a la porta i de 60V a l'ànode, aquest és un tema que es tractarà a continuació.

La representació es farà en plans verticals, tant perpendiculars com paral·lels a l'eix dels braços, per tal de determinar com canvia el camp en les dues direccions. En aquest cas no s'hi representarà

el potencial com en el cas anterior, ja que ara és necessari determinar com és el camp, mentre que en el cas anterior només s'emprava per fer una revisió general i és més senzilla per mitjà del potencial. Més concretament es representa el valor del component vertical del camp ja que altres la resta de components són molt menors degut a la simetria de l'estructura. A més, amb la representació de la línia de tall és més senzill determinar els valors numèrics del camp, també sobre la superfície de separació. Aquesta distribució de camp permet caracteritzar l'estructura pel que fa a la densitat de corrent, ja que s'observa allà on apareixen pics o regions amb un valor de camp més constant. S'ha d'entendre que intereas obtenir el major nombre de pics ja que són punts de densitat de corrent més alta, sempre que no es comprometi algun altre aspecte negatiu.

Un detall a tenir en compte és que les representacions es faran per a dues regions significatives de l'estructura: un pla central on no s'observen els efectes de vorera i un pla més extrem on si s'observen aquests efectes. Els tipus de pla emprats venen representats a la Figura 18, caracteritzats per una lletra.

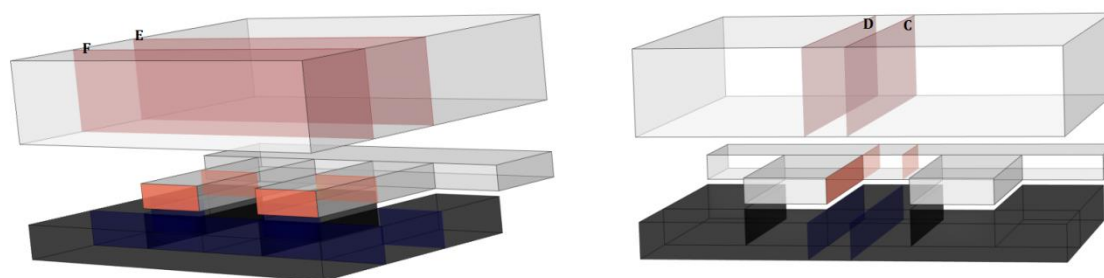


Figura 18. Visualització dels plans de representació

Per a aquesta primera estructura es farà una representació completa, és a dir, considerant tots els diferents plans que s'han analitzat. Això no serà així per a varietats posteriors degut a què en variar un paràmetre hi ha alguns patrons que romanen inalterats, de forma que només es representarà allò imprescindible en l'estudi del canvi.

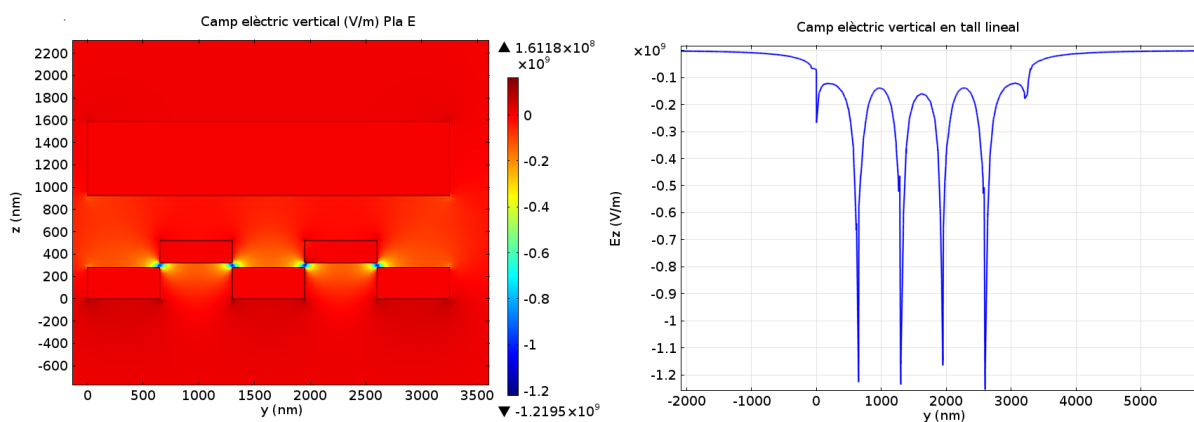


Figura 19. Distribució de la component vertical del camp elèctric en un pla E i representació de la mateixa sobre la línia de tall a la superfície de separació en funció de la posició

Aquesta primera representació sobre el pla E és representativa de la gran major part de l'estructura ja que es tracta d'un pla central. S'observa clarament que el camp assoleix els valors més alts a les superfícies de separació vertical entre porta i càtode ja que són els punts amb menor distància. A mesura que s'allunya d'aquestes regions, el camp es va suavitzant fins a arribar a un valor quasi uniforme corresponent a la distància entre càtode i ànode. El fenomen més important és la repetició d'aquests pics de camp a les arestes a més d'un lleuger increment del camp en el braç central respecte els laterals. Tot i que aquest augment és molt petit, s'ha d'entendre que pot suposar un gran augment del corrent degut al caràcter exponencial de l'equació de F-N. Aquest és un resultat molt important ja que duu a pensar que en repetir aquesta estructura amb nombre de 20-30 braços, els centrals presentaran un camp més elevat.

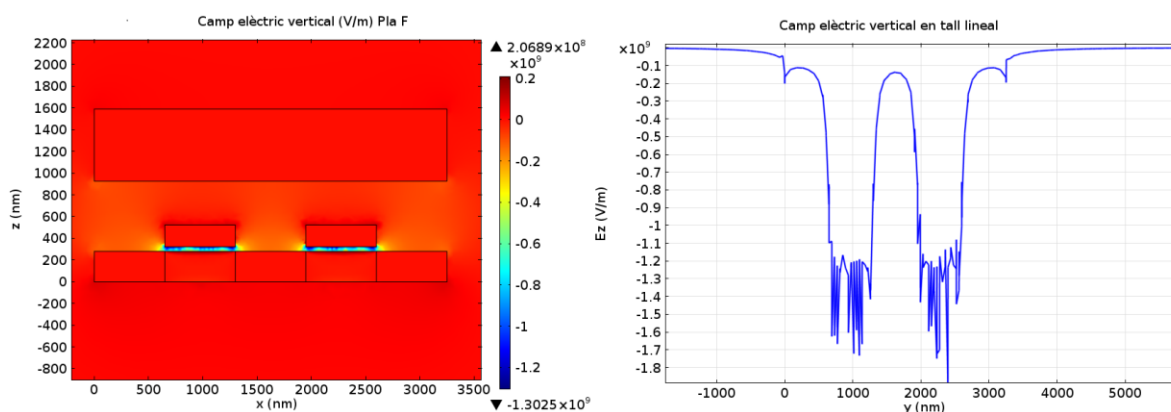


Figura 20. Distribució de la component vertical del camp elèctric en un pla F i representació de la mateixa sobre la línia de tall a la superfície de separació en funció de la posició

Quan es fa referència a un pla extrem la superposició entre càtode i porta augmenta notablement fins a aconseguir que els valors de camp, que abans eren de pic, ara tendeixin a la uniformitat en aquestes regions. Per tant, aquestes també són zones òptimes per a obtenir una gran densitat de corrent, sempre i quant el nivell superior no obstrueixi el pas dels electrons. És en aquest sentit que s'ha escollit l'extrem de la porta i no l'extrem del càtode per a fer la representació. Com a conseqüència de la forma de l'estructura, a l'extrem del càtode es té una superposició total de la porta, pel que s'anomena zona d'emissió inutilitzable, mentre que l'altre extrem no pateix d'aquest desavantatge. Mitjançant aquestes dues primeres representacions, un es pot fer a la idea, com ja s'havia avançat, que aquelles regions amb arestes, puntes, major superposició útil,... són les que ofereixen millors prestacions per a l'emissió.

Un cop analitzada la distribució de camp al llarg dels plans perpendiculars, s'analitza el comportament en plans paral·lels per analitzar l'optimització de la llargària dels braços. Similarment al cas anterior, s'analitzen els plans d'extrem i els que no ho són.

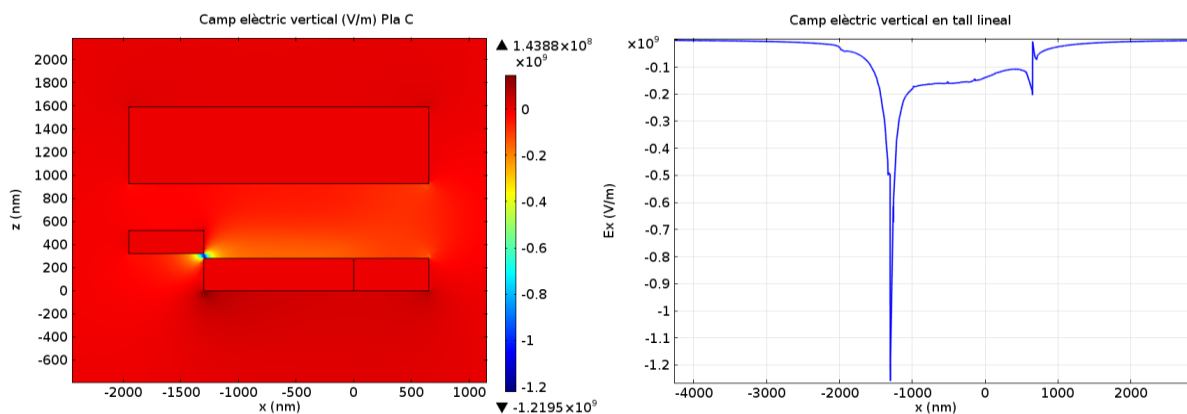


Figura 21. Distribució de la component vertical del camp elèctric en un pla F i representació de la mateixa sobre la línia de tall a la superfície de separació en funció de la posició

La Figura 21 fa referència a un pla central de forma que les característiques es repeteixen. A la regió més pròxima de superposició apareix el pic de camp que interessa, mentre que la resta de la regió presenta un camp més o menys uniforme i amb poques oscil·lacions. Anant cap a la representació de línia si que hi ha un detall a tenir en compte, i és que cap a la part on els braços es subjecten al suport s'observa una lleugera disminució del camp que pot influir notablement en els resultats d'emissió. En analitzar la llargària òptima se'n faran alguns comentaris addicionals sobre aquest aspecte.

Pel que fa al pla extrem (Figura 22) presenta un comportament idèntic al pla extrem perpendicular, és a dir, els valors de pics passen a ser quasi estables al llarg del braç i la disminució al final és major.

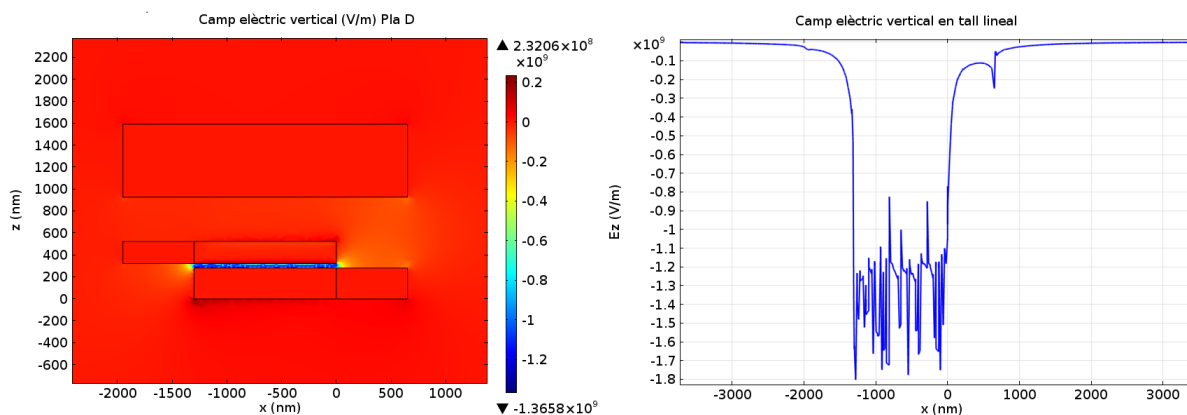


Figura 22. Distribució de la component vertical del camp elèctric en un pla D i representació de la mateixa sobre la línia de tall a la superfície de separació en funció de la posició

3.5. Gruix dels braços

Aquest és el primer paràmetre de l'estructura que es sotmetrà a anàlisi per tal d'obtenir-ne un valor òptim. Cal entendre que es pot pensar en un gruix variable ja que augmenta la superfície útil d'emissió si el que s'incrementa és el càtode. Per altra banda, un augment del gruix de porta condueix també a un increment de la seva superfície i, en conseqüència, a un major corrent de porta no desitjat, sense un augment significatiu del camp. Aquest increment del càtode per tal de

millorar la superfície útil d'emissió s'ha de contrastar amb el camp que s'aconsegueix al seu centre, és a dir, un camp insuficient també ens faria aquest augment de superfície inutilitzable fins al punt que només s'introdueixen més pèrdues. No s'ha tingut en compte un augment del gruix d'ambdós degut a que possible aquest és un paràmetre fixat per la tecnologia que no es pot modificar pes disseny.

Com ja s'ha comentat amb anterioritat, en aquestes discussions només es farà la representació del canvi. En aquest cas només canvia la secció perpendicular, de forma que aquests són els plans que es representaran, tant extrems com centrals.

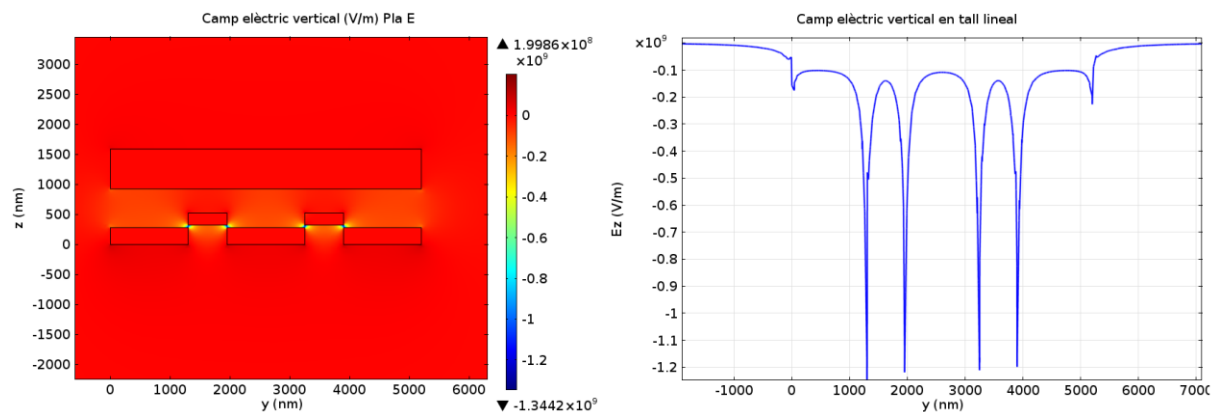


Figura 23. Distribució de la component vertical del camp elèctric en un pla E i representació de la mateixa sobre la línia de tall a la superfície de separació en funció de la posició, per a un gruix doble que el mínim permès per la tecnologia

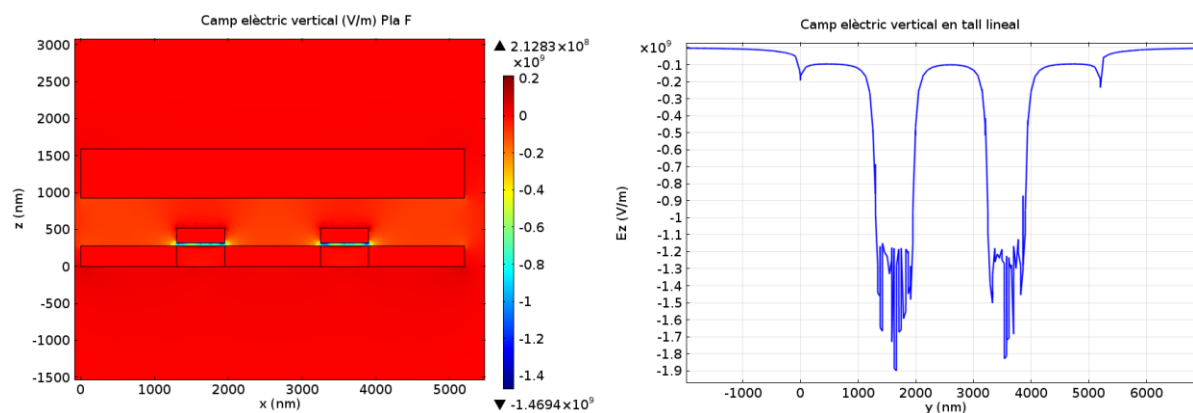


Figura 24. Distribució de la component vertical del camp elèctric en un pla F i representació de la mateixa sobre la línia de tall a la superfície de separació en funció de la posició, per a un gruix doble que el mínim permet per la tecnologia

De les Figura 23 i Figura 24 es pot observar que la forma general de la distribució és la mateixa que en el cas considerat amb anterioritat, bàsicament el que interessa són les arestes, així com els valors numèrics. Aquest comportament es pot estendre a tota l'estructura, excepte la regió central del pla E, en la que el camp té l'espai suficient per a establitzar-se i prendre un valor menor del que es tenia abans. Aquest pot ser un punt clau per a l'elecció d'una mida o altra, de forma que s'ha augmentat el gruix fins a 3 i 4 vegades l'inicial per confirmar aquest comportament. No es representarà la distribució ja que és idèntica, encara que si es representarà l'evolució d'aquest camp central per a diferents gruixos, representació de la qual ja se'n podran extreure algunes conclusions.

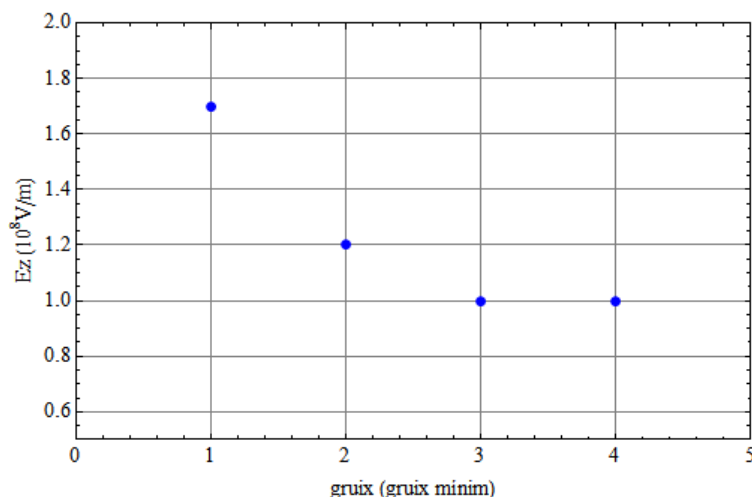


Figura 25. Canvi de la component vertical del camp elèctric en funció del gruix dels dits

La conclusió és clara si es té en compte que volem el major valor de camp possible, i és que aquest s'aconsegueix amb el gruix mínim, com es podia esperar. La tendència d'aquest gràfic és d'apropar-se a un valor estable que ve donat per la distància amb l'alumini. És a dir, per a un gruix petit, la influència dels braços de la porta encara és notable i el camp és major, en canvi, a mesura que augmenta, la influència desapareix fins a fer-se nul·la i per tant queda el camp residual degut a la diferència de potencial amb l'alumini. De forma general i qualitativa es pot dir que a partir de 3 vegades la gruixa mínima ja no s'observen efectes de la porta sobre el càtode, de forma que no interessa arribar a aquests gruixos.

3.6. Longitud dels braços

De la mateixa forma que amb el gruix, es durà a terme un estudi per determinar la longitud òptima. Bàsicament els dos efectes que s'han de contrastar són un augment del valor de pic del camp, encara que això suposi un augment de la superfície (també de la porta) i per tant, més corrent de porta. Al mateix temps suposa un augment de la superfície útil, però si no ve acompanyat d'una millora del valor de pic aquest augment es pot aconseguir de formes més efectives com pugi ser una repetició de l'estructura com a unitat funcional. Seguint amb la idea que s'ha exposat al començament de l'apartat, només es farà la representació per a plans paral·lels, ja que és en els que es pot observar la variació introduïda. En aquest cas si que es representarà per a una valor de longitud més curt i un de més llarg. Més concretament, el valor inicial era considerat és de dues vegades el gruix mínim i ara s'agafarà una longitud igual al gruix mínim (Figura 26 i Figura 27) i l'altra quatre vegades aquest (Figura 28 i Figura 29).

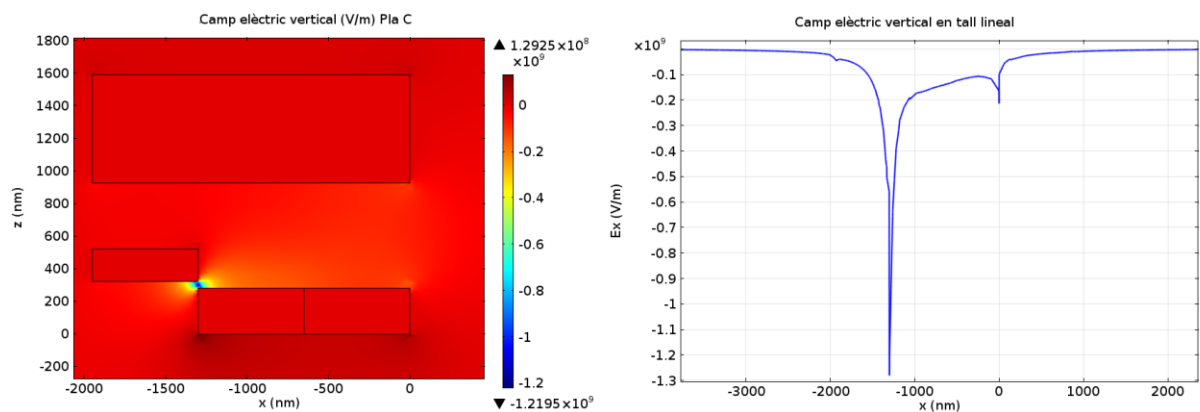


Figura 26. Distribució de la component vertical del camp elèctric en un pla C i representació de la mateixa sobre la línia de tall a la superfície de separació en funció de la posició, per a una longitud igual al gruix mínim

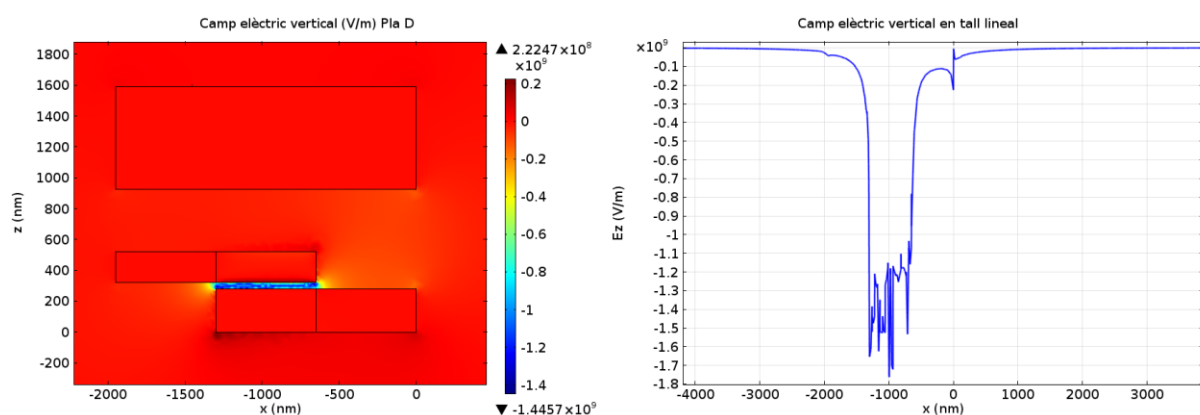


Figura 27. Distribució de la component vertical del camp elèctric en un pla D i representació de la mateixa sobre la línia de tall a la superfície de separació en funció de la posició, per a una longitud igual al gruix mínim

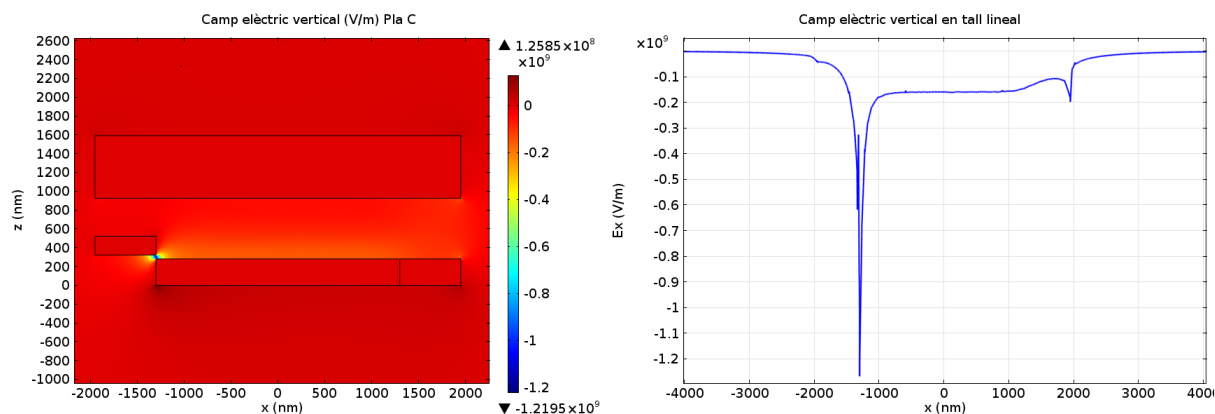


Figura 28. Distribució de la component vertical del camp elèctric en un pla C i representació de la mateixa sobre la línia de tall a la superfície de separació en funció de la posició, per a una longitud quatre vegades el gruix mínim

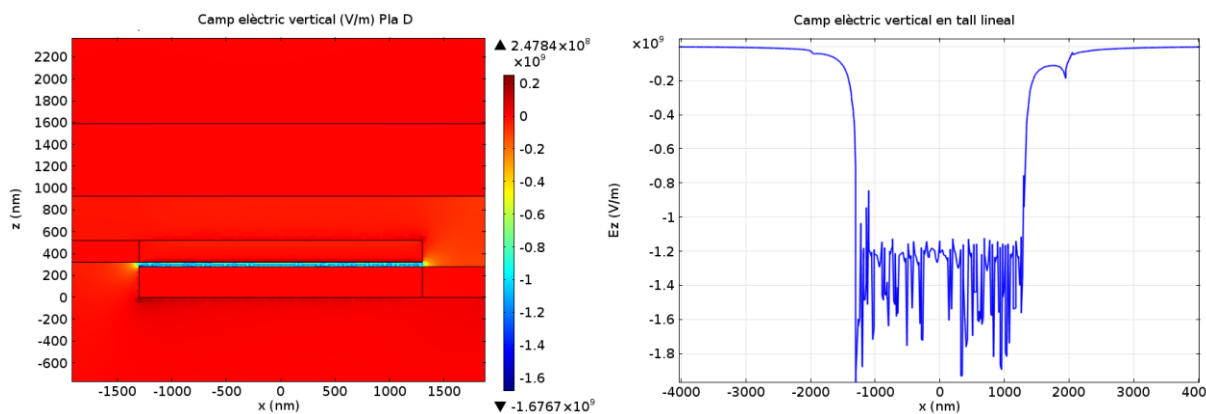


Figura 29. Distribució de la component vertical del camp elèctric en un pla D i representació de la mateixa sobre la línia de tall a la superfície de separació en funció de la posició, per a una longitud quatre vegades el gruix mínim

Aquestes representacions permeten distingir aquells aspectes que diferencien una d'altra i per tant, aquells que s'han d'analitzar. Parlant en caire general, l'estructura és la mateixa amb els pics a les mateixes posicions, excepte pel valor d'aquests. El pic més accentuat, que apareix al final del càtode, canvia lleugerament el seu valor amb la longitud, així com també ho fa la depressió a l'inici d'aquest. Per tant, aquests seran els dos valors a analitzar, interessa que el pic sigui el més alt possible i la depressió el menys accentuada.

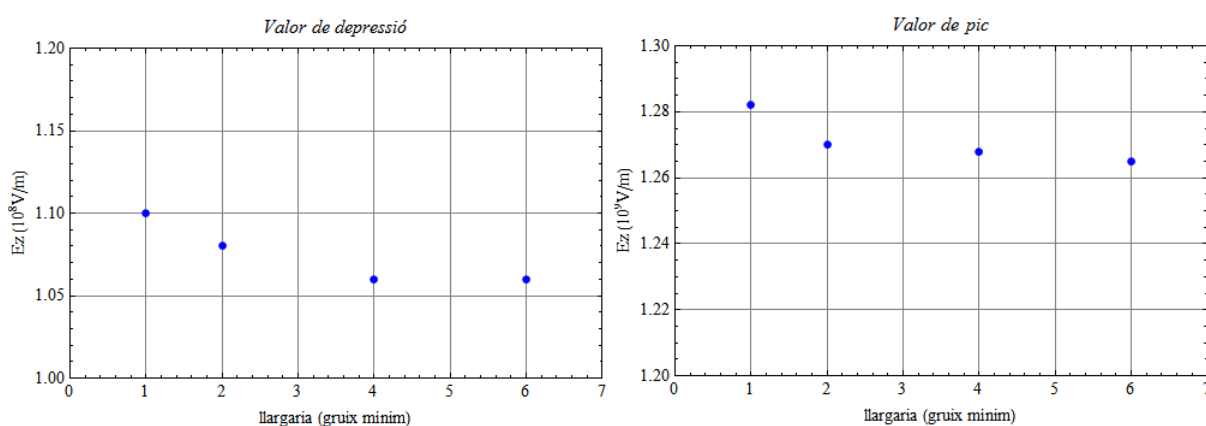


Figura 30. Evolució dels valors de depressió i pic de la component vertical del camp elèctric en funció de la longitud

En primera instància el comportament observat és que la variació sobre aquests valors és mínima ja que els canvis són més o menys dos ordres de magnitud inferiors al valor absolut del camp. Fent referència a l'objectiu inicial, es pot dir que la longitud mínima és la més òptima ja que presenta els valors majors, encara que amb molt poca diferència, i minimitza les pèrdues per mitjà del corrent de porta. Així i tot, si es revisa l'estructura de camp en el tall lineal, es pot observar que per a la menor longitud no s'arriba a un valor estable entre el pic i la depressió, sinó que la disminució és més brusca i en un espai major. Aquest fet pot ser ja determinant, ja que els aspectes en un principi més representatius no han aportat informació rellevant. Amb això es pot concloure que la longitud òptima seria el doble que el gruix mínim: per a una longitud menor tenim que la depressió s'assoleix a una distància menor, mentre que per a una distància major no tenim un augment significatiu i si que augmenta el corrent de porta.

3.7. Superfície rugosa

Fins al moment s'han analitzat diferents aspectes de la geometria, més concretament les diferents mides de l'estructura, però no s'ha fet incís en la idea que les estructures punxegudes incrementen notablement el camp. És així que un gran avanç en la tasca seria aconseguir el màxim nombre d'estructures punxegudes en la superfície d'emissió. Aquest objectiu es pot dur a terme mitjançant un atac químic de la superfície per tal de deixar al descobert les protuberàncies dels policristalls, amb el que s'obté una estructura d'aquest estil. Aquest procés fou dut a terme pel GSE de la UIB amb els resultats següents:

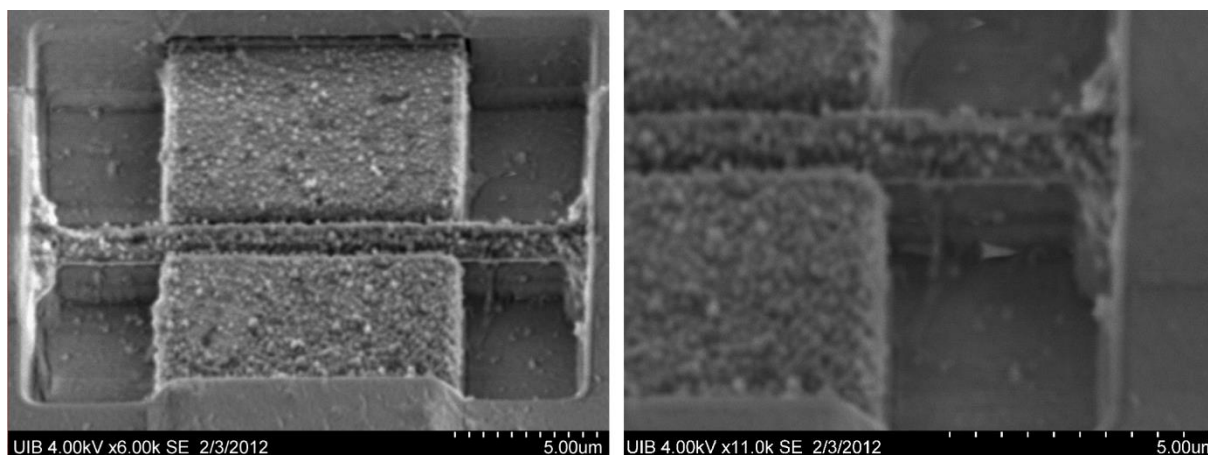


Figura 31. Fotografia ME d'una estructura sobre la qual s'ha fet l'atac químic. S'observen les protuberàncies i les seves mides característiques (100nm)

Es pot observar que l'estructura queda granulada en la superfície degut a l'atac químic que afecta de forma diferent als cristalls amb diferent orientació. Amb això es pot incrementar de forma considerable el camp obtingut a la superfície, de forma que el que es farà a continuació és una simulació d'una estructura semblant a aquesta per estudiar-ne el resultat. Bàsicament, es simularan petits cons situats sobre la superfície, la simetria radial dels quals permet una simulació més fidedigne. A aquesta estructura ja es fa la simulació amb les regles de disseny dels apartats anteriors. A més, comentar que només es farà la representació per a plans del tipus E ja que són en els que s'observa millor la diferència. En aquest cas, la línia sobre la qual es fa la representació és sobre els vèrtex de cada con, ja que és allà on hi ha un major augment del camp.

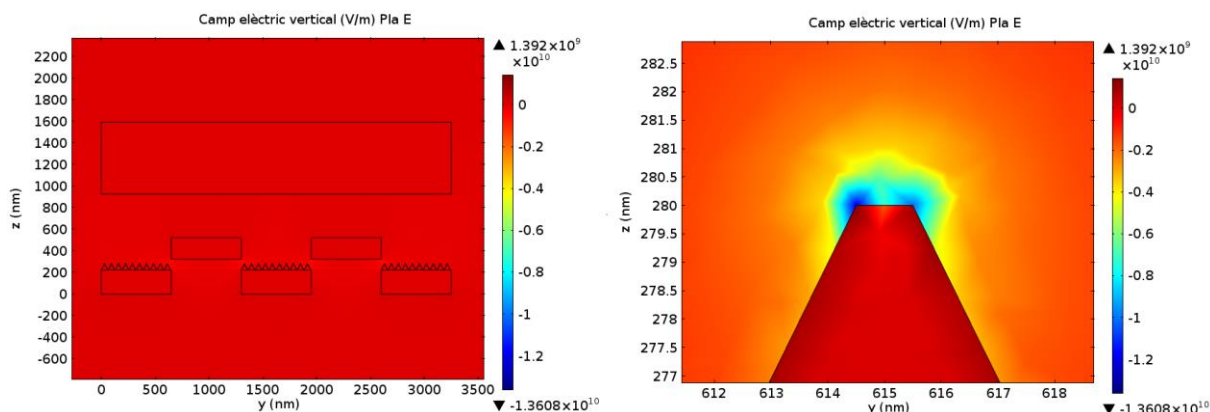


Figura 32. Distribució de la component vertical del camp elèctric en un pla E i representació de la mateixa a una escala menor per tal de visualitzar la intensitat sobre la interfície, per al model amb protuberàncies

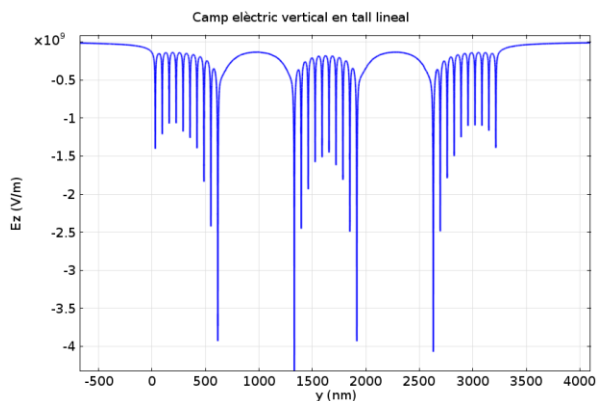


Figura 33. Representació de la component vertical del camp elèctric per a un pla E en funció de la posició, per al model amb protuberàncies

l'ordre de $1.5 \cdot 10^9 \text{ V/m}$, suficients per a tenir lloc l'emissió de camp de forma considerable.

Amb aquest anàlisi es pot concloure clarament que si s'aconsegueix aquest tipus de procés de forma controlada i fiable, el camp resultat augmenta i per tant és un dels factors que més permet optimitzar-ho.

3.8. Potencial aplicat

Aquest és un dels punts més importants de l'estructura degut a que, juntament amb la seva geometria determina el camp elèctric i per tant, la densitat de corrent. Cal a dir que un augment significatiu del potencial aplicat suposa un augment proporcional del camp, encara que les limitacions són fortes. És important tenir en compte que aquestes limitacions venen donades per la ruptura dielèctrica de l'òxid que actuarà com a suport per a l'estructura, en aquesta tecnologia SiO_2 , que és de 10^7 V/cm [18]. Per aquest apartat no es representarà l'estructura completa ja que la distribució és idèntica, simplement es farà una representació del valor mig dels pics de camp per a diferents potencials de porta, sempre emprant l'estructura amb les rugositats. No es té en compte el canvi de potencial a l'ànode ja que aquest no controla el camp a la interfície, simplement té una funció recol·lectora que es compleix si es major que el potencial de porta.

Fonamentalment s'observa un comportament lineal com era d'esperar, pel que es tracta d'establir

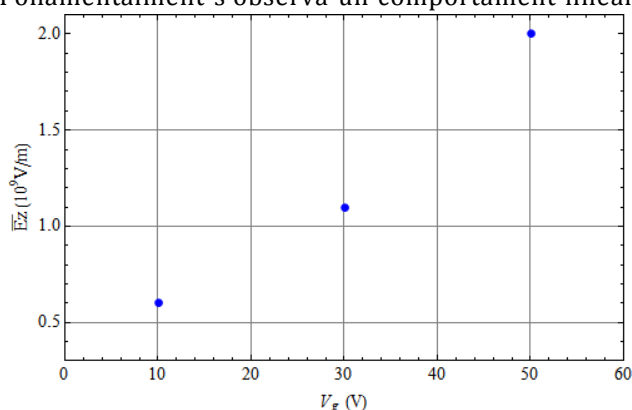


Figura 34. Evolució de la component vertical del camp elèctric en funció del potencial de porta

entre la porta i el substrat, exceptuant entre càtode i substrat ja que es poden posar al mateix

En primera instància no s'observen diferències en el camp creat al llarg de l'estructura perquè els valors accentuats són a una regió molt petita al voltant de l'extrem, així i tot aquests són els punts interessants. Per a més claredat s'ha fet una representació d'aquest extrem ampliat, en el qual es veu el fort camp elèctric que s'hi estableix. Parlant de valors numèrics, en la

representació lineal apareixen pics de fins a $4 \cdot 10^9 \text{ V/m}$, encara que aquests són els més extrems. En valor mitjà aquests pics són de

potencial. Si s'assumeix que la distància entre substrat i càtode és del mateix ordre que la distància entre els dos nivells de polisilici (41nm), es té que la distància entre porta i substrat és de l'ordre de 400nm. Amb aquesta distància de separació és permet l'aplicació d'una diferència de potencial de l'ordre de 400V. Cal entendre que aquest és un valor extrem del potencial al qual no s'arribarà en condicions de treball, però si que permet treballar amb seguretat a un potencial de l'ordre de 100V.

3.9. Densitat de corrent

Per acabar amb la discussió dels diferents models i de les seves millores es calcularà la densitat de corrent que s'obté, equivalent a l'optimització del camp. Amb aquesta idea el càlcul es centra en l'estructura rugosa amb les regles de disseny anteriors, ja que són aquestes les que optimitzen els resultats. L'únic paràmetre que si es tindrà en compte és el potencial aplicat, a causa de la seva importància. Aquest anàlisi es farà per mitjà dels diferents valors mitjans de camp que s'han obtingut de les simulacions.

Taula 4. Valors de la densitat de corrent mitjana per a diferents potencials de porta aplicats

V_g (V)	J (mA/cm ²)
10	$1.2 \cdot 10^{-31}$
30	$1.9 \cdot 10^{-12}$
50	0.073
80	33
100	$4.2 \cdot 10^4$

Cal remarcar que aquests valors són per a una estimació mitjana del camp elèctric resultant, és a dir, que tenim valors inferiors i superiors. Pel que fa als inferiors es poden considerar menyspreables ja que una petita disminució del camp redueix notablement la densitat de corrent. En canvi, per a aquests valors de pic superiors es pot entendre que la densitat augmentarà notablement. Per exemple, alguns d'aquests pics de valor numèric més gran permeten les densitats de corrent següents, sempre referits al potencial de porta de 100V:

Taula 5. Densitat de corrent per a diferents valors de camp elèctric referents als pics de l'estructura amb protuberàncies

E (10 ⁷ V/cm)	J (mA/cm ²)
5.0	$1.1 \cdot 10^7$
8.0	$2.0 \cdot 10^9$

En un principi es pot pensar que aquests valors de camp poden conduir a la ruptura dielèctrica, però no és així ja que aquests són valors puntuals sobre la interfície i és el camp macroscòpic el que condueix a la ruptura. Aquestes són densitats de corrent molt elevades, bàsicament de l'ordre de 0.1 – 10 mA/μm², que ofereixen gran versatilitat d'emissió encara que només es donen localment. A més, la densitat de corrent mitjana és de l'ordre de 10 A/cm², fet que es tradueix a corrents totals per a l'estructura proposada ($S \sim 10 \mu\text{m}^2$) de desenes de μA. Si a aquest corrent se li afegeix la contribució dels pics locals, es pot fer una estimació d'un corrent total de 10 μA.

4. CONCLUSIONS

L'objectiu d'aquesta tasca s'ha centrat en estudiar la viabilitat d'integrar estructures de MEB i en fer una revisió de les diferents propostes més recents. El procés dut a terme per a dissenyar un dispositiu es pot resumir en les passes següents: escollir un mecanisme d'emissió electrònica que s'adapti a les característiques requerides per a la seva integració i les condicions de treball, planejar una geometria eficient i de fàcil caracterització, fer la simulació numèrica d'aquesta sota diferents condicions i obtenir-ne la densitat de corrent final.

En primer lloc, cal a dir que els avantatges de l'emissió de camp en front de la termoiònica són clars i dominants, bàsicament fent referència a la possibilitat de treball a temperatura ambient. Així i tot, aquest tipus d'emissió es troba en vies d'investigació i desenvolupament, com s'ha vist en alguns dels exemples inicials, per poder aplicar-lo a escales micro i nanomètriques de forma efectiva. És a dir, s'han d'assolir voltatges de treball realistes aplicats a geometries relativament senzilles que es pugin aplicar a tecnologies conegudes i emprades actualment. Aquest és un tema que encara no té resultats clars ja que s'analitzen nanotubs de carboni i estructures semblants per tal d'optimitzar al màxim aquest mecanisme d'emissió. Pel que fa al dispositiu proposat s'ha partit d'una tecnologia CMOS madura i per tant econòmica, emprant materials molt coneguts, com és el polisilici, a causa de la seva viabilitat i la relativa facilitat de fabricació en una tecnologia àmpliament estesa fa uns anys. La gran diferència entre aquest material i els proposats en altres estructures és el valor de la funció de treball, allò que determina la qualitat d'emissió. És així que emprant un material amb una funció de treball menor, la del polisilici és de 4.1eV, seria viable aconseguir la mateixa densitat de corrent per a camps lleugerament menors, o el que és el mateix, aconseguir més densitat de corrent per a la mateixa intensitat de camp. Per tant, una primera conclusió que se'n pot extreure sobre la tasca és que el polisilici obre la viabilitat que es cercava en un principi, però l'aplicació d'altres materials podria incrementar-la.

En segon lloc, és important adonar-se'n que un dels aspectes claus és el disseny d'una geometria adequada, ja que aquesta influeix fortament en el resultat final. Bàsicament, com s'ha incidit al llarg de l'estudi, és necessari disposar d'elements amb protuberàncies o amb arestes. Això s'ha aconseguit amb l'estructura de pinta, que presenta un gran nombre d'arestes, a més de les rugositats superficials. Cal entendre que els resultats sobre aquestes rugositats s'han d'agafar més com a l'augment considerable de camp que produeixen i no com a valors numèrics fidedignes, ja que el model que s'ha emprat per a simular-les no deixa de ser una representació simplificada de les mateixes. Per tal de poder conèixer-ne el comportament real és imprescindible una caracterització mitjançant l'experimentació amb un dispositiu físic, tasca que no s'ha realitzat donat que l'objectiu inicial era el de fer un anàlisi de viabilitat. D'altra banda, queda com a treball futur determinar el control de forma acurada de l'atac químic que permeti de forma sistemàtica l'obtenció d'aquestes estructures protuberants, treball que ha de completar un especialista en la matèria. Per acabar amb aquesta idea, es pot concloure que allò que diferencia una estructura viable d'una que no ho és són aquest tipus d'estructures. Com s'ha pogut observar, en afegir aquesta idea al disseny s'ha fet la passa que condueix a densitats de corrent significatives i per tant, a un dispositiu amb capacitat d'anàlisi real i viabilitat d'integració.

Finalment, és de vital importància fer una revisió sobre la distribució de camp i si en conjunt permet arribar a un corrent total significatiu. Per això, cal recordar que els pics de camp més elevats poden arribar a oferir una densitat d'alguns $m A/\mu m^2$, fet que obre un gran ventall de

possibilitats, encara que aquests només són puntuals. Per a tenir una millor idea de la mitjana total de corrent es pot tenir en compte quin és el valor mínim que s'assoleix, en aquelles zones on el camp es fa mínim, obtenint un valor menyspreable. Aquestes regions són també puntuals només, ja que apareix un camp en constant variació. En definitiva, per fer una caracterització adequada s'ha d'agafar un valor mitjà de la densitat i veure quina superfície útil d'emissió es té. Aquest valor, tal com s'ha plantejat a l'apartat anterior, és de l'ordre de 100 A/cm^2 sempre i quan es considerin de forma qualitativa els pics locals. Si aquests són menyspreables, tasca que es pot dur a terme amb un estudi pràctic, la densitat de corrent és un ordre de magnitud menor. De forma general s'han obtingut densitats de corrent dos ordres de magnitud majors que les dels exemples. Així i tot, alguns treballs consideren voltatges menys elevats i altres empenen estructures molt més optimitzades com poden ser nanotubs de carboni o semblants. La conclusió que es pot extreure és que el resultat obtingut amb el dispositiu es troba en la línia d'altres estudis recents ja que els valors obtinguts aquí són de caràcter teòric i en la caracterització pràctica segurament aquestes densitats serien lleugerament menors. És així que presenta les característiques adequades per a una continuació de l'estudi, de forma que aplicant-hi algunes millores més de caire tecnològic, que no estan a l'abast d'aquest treball, es millori l'emissió.

És clar que el desenvolupament d'aquesta conclou amb resultats satisfactoris, després d'haver dut a terme una caracterització amb viabilitat d'operació a llarg termini i una comparació positiva amb altres resultats. Així i tot hi ha alguns aspectes a millorar, ja sigui amb la possibilitat d'incloure altres materials o amb un estudi físic que permet un anàlisi més detallat.

5. REFERÈNCIES

- [1] J.F. Rider 1945, "Inside the vacuum tube", 1st Edition, John F. Rler Publisher, New York
- [2] E.L. Chaffee, J.D. Cobine, H.R. Mimno 1947, "Electronic circuits and tubes", 1st Edition, Mcgrawhill book company inc., New York and London
- [3] D.G. Fink 1938, "Engineering Electronics", 1st Edition, Mcgrawhill book company inc., New York and London
- [4] Radio Coropration of America 1962, "Electron Tube Design", 1st Edition, Harrison, New Jersey
- [5] G. Fursey 2005, "Field Emission in Vacuum Microelectronics", 1st Edition, I. Brodie and P.Scwoebel Editors
- [6] J.S. Fang, C.C. Kuo, D. Yeh, C.Y. Hsiao, T.F. Chan "Application of Carbon Nanotubes Field Emission Devices", TECO Electric & Machinery Co., TECO Nanotech Co.
- [7] Spindt, C.A.; Holland, C.E.; Rosengreen, A.; Brodie, I., "Field-emitter arrays for vacuum microelectronics," *Electron Devices, IEEE Transactions on* , vol.38, no.10, pp.2355,2363, Oct 1991
- [8] Han, Jin-Woo and Sub Oh, Jae and Meyyappan M., "Vacuum nanoelectronics: Back to the future?—Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor", *M., Applied Physics Letters*, 100, 213505 (2012)
- [9] M. Grilj, "Thermionic Emission", Seminar, University of Ljubljana, Department of Physics, 2008
- [10] R.H. Fowler, L. Nordheim, "Emission in Intense Fields", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, Vol. 119, No. 781 (May 1, 1928), pp. 173-181
- [11] A. Knápek, "Methods of preparation and chacacterization of experimental fiel-emission cathodes", Doctoral Thesis, Brno University of Technology (2013)
- (<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/25138/sablona.pdf?sequence=2>)
- [12] J.-H. Lee, I. Bargatin, J. Provine, W.A. Clay, J.W. Schwede, F. Liu, R. Maboudian, N.A. Melosh, Z.-X. Shen, and R.T. Howe, "Thermionic Emission from microfabricated Silicon Carbide Filaments," in *Digest Tech. Papers PowerMEMS 2009 Conference*, Washington DC (2009).
- [13] Shi-Dong Liang; Lu Chen, "Theory of field and thermionic electron emissions of carbon nanotubes," *Vacuum Nanoelectronics Conference, 2009. IVNC 2009. 22nd International* , vol., no., pp.101,102, 20-24 July 2009
- [14] "Carbon Nanotubes as Thermionic Emitters", Loutfy, R. O. and Samandi, M. and Moravsky, A. and Strange, S., *AIP Conference Proceedings*, 699, 773-780 (2004)

- [15] "Electron field emission from carbon nanotubes", Yuan Cheng, Otto Zhou, C. R. Physique Vol 4, 1021 C1033 (2003)
- [16] S- Thongpang, "Vacuum Field Emission Microelectronic devices based on Silicon Nanowhiskers", Doctoral Thesis, University of Canterbury (2011)
- [17] Colinge, J.P. 2004, "Silicon-on-Insulator-Technology: Materials to VLSI", 3rd Edition, Kluwer Academic Publishers
- [18] "The General Properties of Si, Ge, SiGe, SiO₂ and Si₃N₄", Virginia Semiconductor, June 2002