



Desenvolupament de microgeneradors inercials electromagnètics en tecnologia de micro sistemes per a la recuperació d'energia mecànica residual de l'ambient

Núria Fondevilla Sala

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT DE BARCELONA

Facultat de Física

Departament d'Electrònica

DESENVOLUPAMENT DE
MICROGENERADORS INERCIALS ELECTROMAGNÈTICS
EN TECNOLOGIA DE MICROSISTEMES PER A LA RECUPERACIÓ
D'ENERGIA MECÀNICA RESIDUAL DE L'AMBIENT

Núria Fondevilla Sala

Director tesis:

Dr.Christophe Serre

Barcelona, Maig 2012

FABRICACIÓ I CARACTERITZACIÓ D'UN DISPOSITIU ELECTROMAGNÈTIC RESSONANT

IV.1. Introducció

En el capítol anterior es descriu la construcció d'un prototip preliminar amb una bobina d'Al, realitzada amb unes màscares recuperades d'un altre experiment, per comprovar la validesa dels models simulats. Basant-se en aquest dispositiu es vol construir un primer joc de prototips electromagnètics, incloent-hi algunes optimitzacions, realitzats amb bobines micromecanitzades de Cu. Aquestes microbobines s'han fabricat d'acord amb el "roadmap" descrit anteriorment, per tal d'optimitzar la variació del flux magnètic i la resistència en sèrie. Pel que fa a la variació de flux, $d\Phi/dz$, augmenta amb la mida de l'imant, essent el cas òptim quan omple tot el nucli de la bobina i a la vegada presenta un màxim quan la superfície superior de l'imant coincideix amb el pla de la bobina.

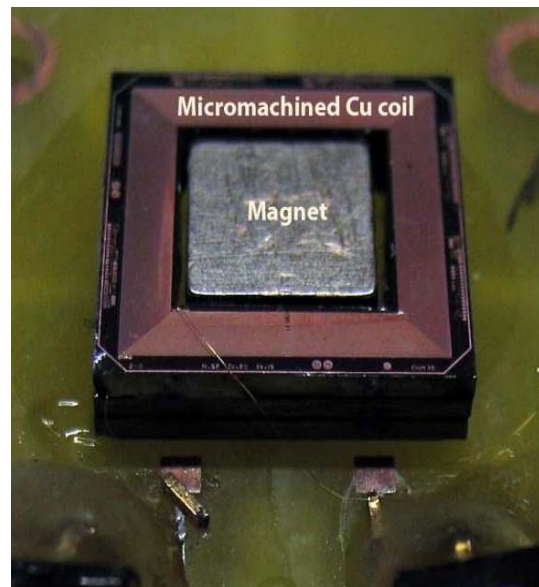


Fig.IV.1 Imatge del dispositiu microgenerador electromagnètic amb una microbobina de Cu.

En aquesta segona tanda de prototips, mostrats en la imatge de la Fig.IV.1, els ressonadors s'han construït amb un imant de NdFeB, amb una magnetització de $M_z=954.9\text{kA/m}$, i unes membranes de Kapton (unes sense forats i unes altres foradades) de $127\mu\text{m}$ de gruix i de diferents mides: 11×11 , 13×13 i $15\times 15\text{mm}^2$. La membrana del ressonador utilitzada és de Kapton. Es tracta d'un polímer amb un mòdul de Young de 2.5GPa , bastant més petit que el dels altres materials relacionats amb el Si. En tenir un mòdul de Young baix el fa adequat per treballar amb aplicacions de baixa freqüència, entre els Hz i uns pocs kHz. Aquesta membrana, fixada entre uns marcs de PCB, suporta l'imant en el seu centre. Així, el mateix imant fa de massa inercial del ressonador. Per evitar col·lisions, l'imant és una mica més petit que el nucli de la bobina. Per a les mesures experimentals s'ha pogut disposar d'una cambra de buit per disminuir l'esmoreïment paràsit, en no haver-hi cap flux d'aire, i per evitar derives relacionades amb l'absorció de la humitat.

IV.2. Arquitectura del prototip

Per a la construcció d'aquest prototip, s'haurà d'optimitzar la geometria de la bobina i fixar les etapes del procés de fabricació.

IV.2.1. Geometria de les bobines. Simulacions

Com s'ha explicat en el capítol anterior, l'acoblament electromagnètic es pot incrementar optimitzant la geometria de les bobines en termes de densitat de flux. En un principi, una millora de la variació del flux magnètic es pot aconseguir amb un augment de la densitat d'espores de la bobina, tot baixant l'amplada i la separació de pistes i, a la vegada, augmentant el número d'espores. No obstant, per a una densitat d'espores donada, l'anàlisi de la variació de flux màxima en funció del número d'espores mostra

l'existència d'un valor de saturació. Això és degut a què conforme s'allunyen les espires de la bobina planar de l'imant capten cada vegada menys flux. D'altra banda, com que l'augment del número d'espires va associat a un augment de la resistència en sèrie, que provoca pèrdues i redueix la potència útil, s'ha d'arribar a un compromís entre augmentar la potència generada i optimitzar la variació de flux magnètic. Per tant, per millorar l'acoblament electromagnètic s'ha de minimitzar la resistència en sèrie tot mantenint una densitat d'espires elevada. Aquest és l'objectiu que es vol aconseguir amb la implementació de l'electrodeposició de pistes de Cu gruixut.

En les gràfiques de les Fig.IV.2 i Fig.IV.3 es mostren les simulacions dels voltatges i potències obtingudes emprant una resistència de càrrega òptima, R_{Lopt} , pels diferents valors d'amplades i separacions de pistes d'una bobina de Cu de $15\mu\text{m}$ de gruix, per tal d'optimitzar el prototip. L'imant emprat és de NdFeB, amb un volum total de $7 \times 7 \times 6 \text{mm}^3$. En aquestes simulacions, s'han assumit les condicions d'excitació corresponents a les vibracions induïdes per un forn de microones de 120Hz de freqüència i una amplitud d'excitació de $Y_o=4.4\mu\text{m}$. Segons l'anàlisi realitzat per Roundy [1], aquestes condicions són les representatives de vibracions de baix nivell que apareixen normalment en ambients domèstics i d'oficines i s'han utilitzat per caracteritzar el comportament de diferents tipus de microgeneradors amb un volum similar al d'aquest disseny. El mòdul del transductor electromagnètic ha estat dissenyat amb una bobina fixa micromecanitzada, amb una superfície total al voltant d' 1cm^2 , limitant el número màxim d'espires de la bobina. Les bobines simulades, van des de les més conservadores, corresponents a les de tipus A, amb una amplada de pista de $30\mu\text{m}$ i una separació de $20\mu\text{m}$, fins a les de tipus D, les més ambicioses respecte de la tecnologia al nostre abast, amb una separació i una amplada de pista de $6\mu\text{m}$. Les dimensions d'aquestes últimes corresponen al límit esperat de la tecnologia emprada en el dipòsit de capes de metall de $15\mu\text{m}$ de gruix, degut a la limitació en resolució en l'etapa de fotolitografia.

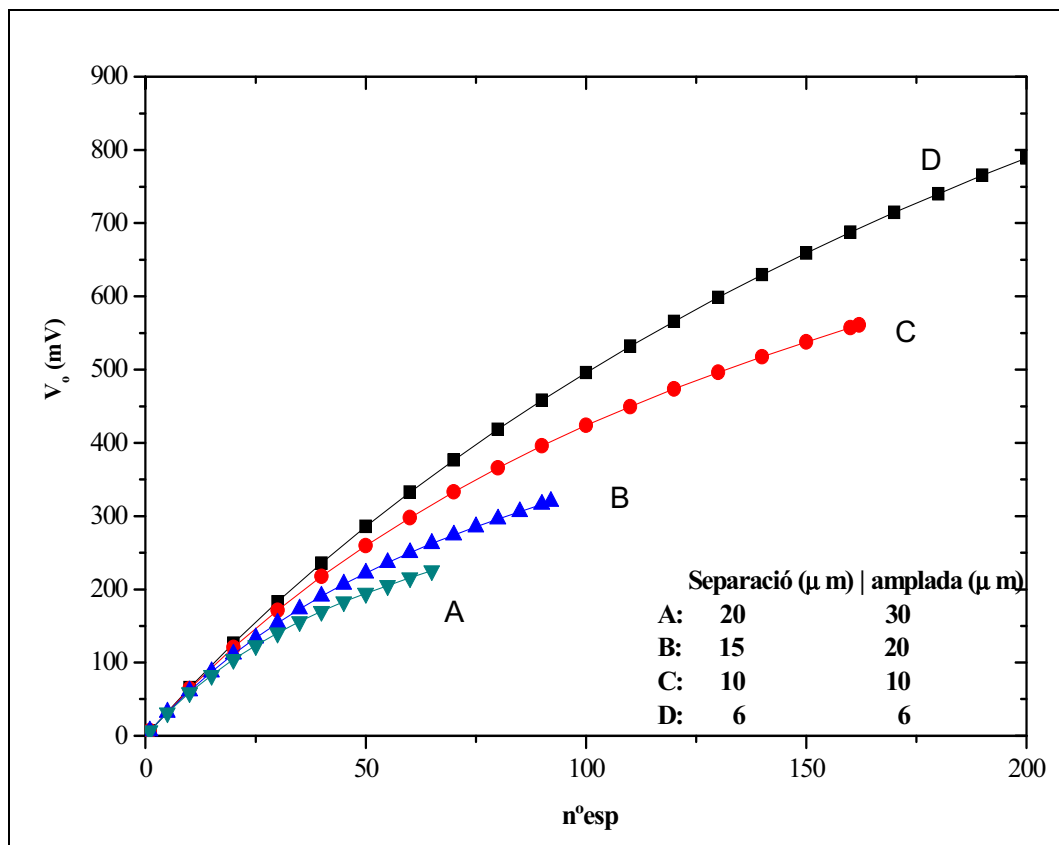


Fig.IV.2 Simulació de la tensió generada, V_{opt} , emprant una resistència de càrrega òptima R_L , en funció del número d'espires, n^{esp} .

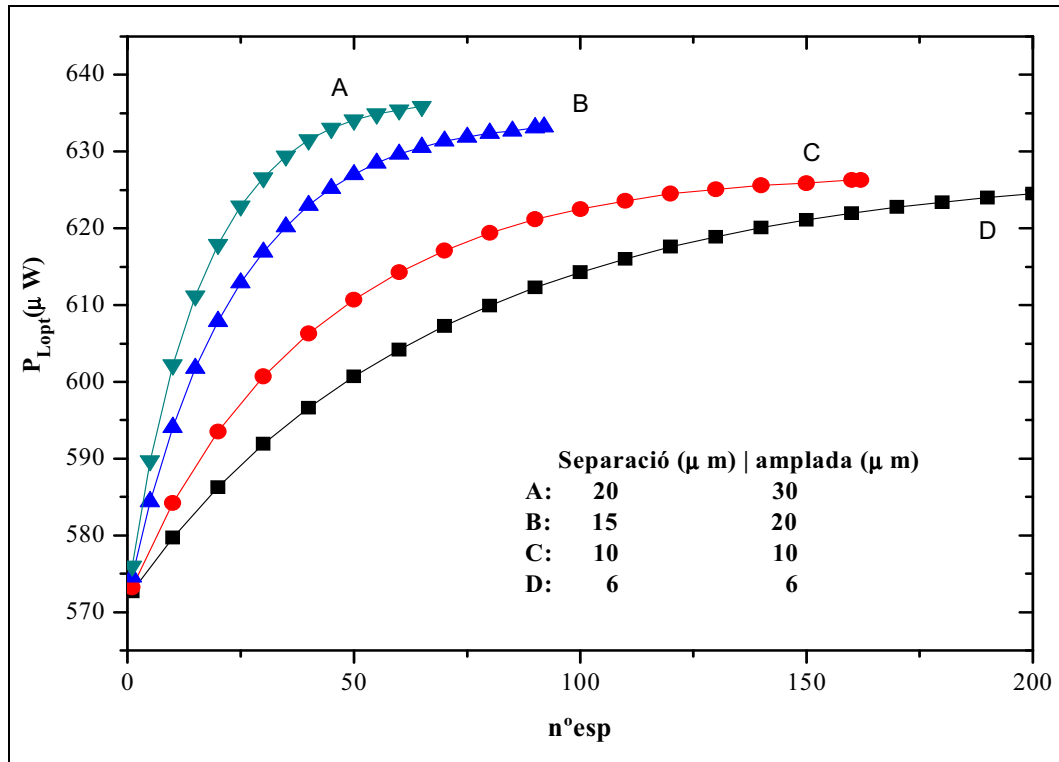


Fig.IV.3 Simulació de la potència òptima generada, P_{Lopt} , aplicada en la resistència de càrrega òptima, R_{Lopt} , en funció del nombre d'espases.

Aquestes simulacions mostren la possibilitat d'assolir nivells de potència òptima en el rang dels 500-650μW amb voltatges de sortida de fins a 800mV, assumint un esmoreïment paràsit del ressonador de $\zeta_p = 0.001$.

IV.3. Fabricació

Per a la realització d'aquest prototip s'ha emprat un procés de construcció modular, fabricant de forma separada el ressonador mecànic i el transductor electromagnètic (bobina). En la fabricació de la bobina es combinen processos estàndards de la tecnologia de microsisemes amb el post procés d'electrodipòsit de capa gruixuda de Cu per a dipositar les pistes metàl·liques.

IV.3.1. Procés de fabricació modular

Al ser un procés de fabricació modular, s'han construït per separat les bobines micromecanitzades i el ressonador, com es mostra la representació esquemàtica de la Fig.IV.4.

Pel que fa a les bobines micromecanitzades, s'han emprat processos propis de les tecnologies de microsisemes que inclouen la generació de capes, la litografia i l'addició de materials.

D'altre banda, els ressonadors han estat fabricats enganxant amb "superglue" les membranes entre dos marcs de PCB i acollant-los amb cargols. La funció de massa inercial del ressonador la realitza un imant, que s'ha fixat i alineat en el centre de la membrana sense necessitat d'encolar-lo gràcies a un segon imant situat a sota, Fig.IV.4. Com que la porció de membrana lliure està perfectament definida entre els imants i el marc exterior, ha comportat una millora significativa del procés de fabricació i de la reproductibilitat en el funcionament del dispositiu.

Per assegurar que la freqüència de ressonància del marc de PCB del dispositiu no cau dins del rang en el que es treballarà, es realitza la corresponent simulació per conèixer el seu valor. En aquestes simulacions, realitzades mitjançant ANSYS, s'han introduït els principals paràmetres del material de la que està fabricada la PCB (fibra de vidre).

Segons les dades del fabricant el seu mòdul de Young és de 17GPa, el coeficient de Poisson val 0.118 i la densitat és de $1.91 \cdot 10^{-15} \frac{\text{Kg}}{\mu\text{m}^3}$. A la PCB utilitzada, amb una àrea de $3 \times 3 \text{cm}^2$ i un gruix de 1.5mm, li correspon una freqüència de ressonància de l'orde dels 7kHz, que es trobarà molt per sobre del rang de baixes freqüències dels dispositius ressonadors a fabricar. Això assegura que les possibles ressonàncies dels marcs no afectin a les mesures.

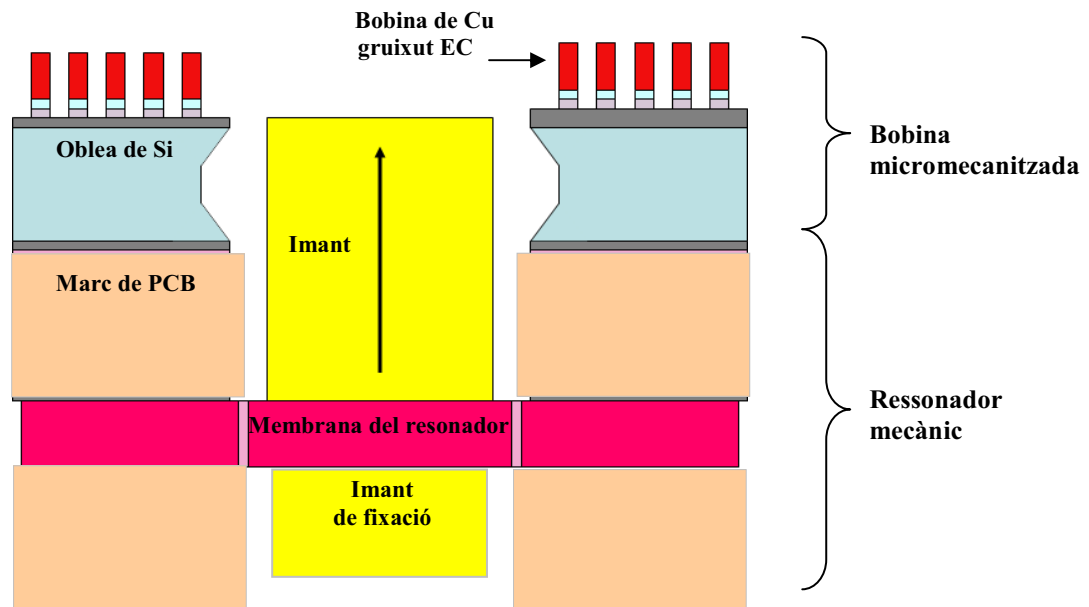


Fig.IV.4 Esquema del microgenerador inercial electromagnètic format per una bobina fixa i un imant mòbil (massa inercial) muntat en una estructura ressonant

IV.3.2. Descripció dels processos de fabricació de les microbobines

En la fabricació de les bobines micromecanitzades de Cu gruixut s'han emprat processos propis de les tecnologies de microsisemes. Dins dels processos compatibles amb la tecnologia de Si s'utilitzaran: la generació de capes mitjançant un creixement tèrmic, els processos de fotolitografia, dos tipus de gravat (humit i sec), i finalment processos electroquímics d'electrodipòsit i d'atac d'un metall.

Aquests processos han estat finançats en el marc del projecte GICSERV ofert pel ICTS (Infraestructura Científica i Tecnològica Singular) denominada "Sala Blanca Integrada de Micro i Nanofabricació" gestionada pel IBM-CNM (Institut de Microelectrònica de Barcelona - Centre Nacional de Microelectrònica). En aquesta sala blanca s'han fabricat les microbobines utilitzant la tecnologia disponible a les instal·lacions d'aquest centre de recerca i desenvolupament públic, que forma part de les grans infraestructures del Consell Superior d'Investigacions Científiques (CSIC).

IV.3.3.1. Generació de capes

Entre els mètodes de generació de capes hi ha el creixement tèrmic.

Creixement tèrmic (del SiO₂)

El creixement d'una capa d'òxid a partir del semiconductor del substrat té lloc per la simple acció de la temperatura i de l'espècie oxidant. Aquest procés, malgrat representar un consum del substrat, permet créixer un òxid de qualitat.

Les capes d'òxid poden ser utilitzades com a aïllants separant dues capes de materials conductors, per a separar dispositius, i com a màscara en altres processos.

Existeixen dos tipus d'oxidació tèrmica:

Oxidació seca : $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$

Oxidació humida: $\text{Si} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$

L'oxidació seca és més lenta que la humida (per exemple, es necessitarien 8 hores per créixer 200nm a 1000°C mentre que amb l'oxidació humida es necessitaria menys d'una hora), però produeix un SiO_2 més dens i de millor qualitat.

La velocitat d'oxidació augmenta amb la pressió parcial de l' O_2 , permetent treballar més ràpidament a temperatura més baixa.

Spinning

El "spinning" és un procés de dipòsit de capes primes, en el que es dispensa la solució en un dissolvent líquid i volàtil sobre la superfície d'una oblea i es fa girar fins a evaporar el dissolvent donant lloc a una capa uniforme, *Fig.IV.5*. Les velocitats de gir típiques són de 3000 a 7000rpm, durant uns 20-30 segons.

Malgrat que generalment les capes produïdes són desordenades, és un procés molt utilitzat en la indústria per a dipositar fotoresines. Els principals avantatges són la seva rapidesa i simplicitat. En canvi, els principals problemes són l'aparició de discontinuïtats en la fotoresina quan la mostra original conté esglaons més grans que el gruix de la capa, un alt nivell d'estrès (degut a un encongiment durant l'evaporació) i un gruix mal controlat determinat per la viscositat, la velocitat i l'acceleració.

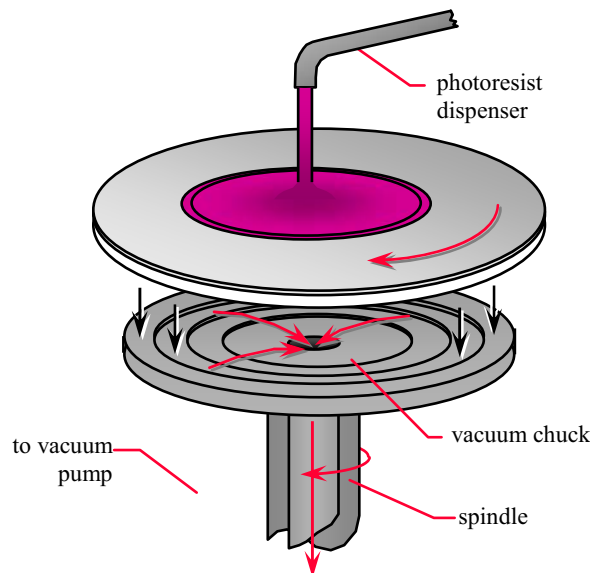


Fig.IV.5 Representació esquemàtica del procés de dipòsit de capes primes per spinning

Dipòsit per polvorització catòdica o "sputtering"

Aquesta polvorització catòdica és un procés de dipòsit realitzat en alt buit, en que el material a dipositar s'arrenca carregant-lo negativament i bombardejant-lo amb ions positius d'Ar del plasma ionitzats gràcies a l'elevat voltatge aplicat entre el càtode i l'ànode. Això provoca que els ions de gas del plasma impactin contra el blanc arrencant-ne els àtoms. Les múltiples col·lisions en cascada fan que alguns dels àtoms del material s'adhereixin a la superfície del substrat, com es mostra en l'esquema representat en la *Fig.IV.6*. El principal avantatge sobre un procés d'evaporació és la seva versatilitat: més tipus de materials per a dipositar, més uniformitat i un millor control del gruix. Inclús es pot realitzar un codipòsit controlant la composició de la capa final dipositada, ajustant les condicions de temperatura de cada blanc, la pressió de la cambra...

Aquest mètode s'acostuma a utilitzar per dipositar capes fines, que es podrien emprar com a capa llavor. Per altra banda, els problemes associats són el redipòsit, la càrrega del substrat i els danys per radiació.

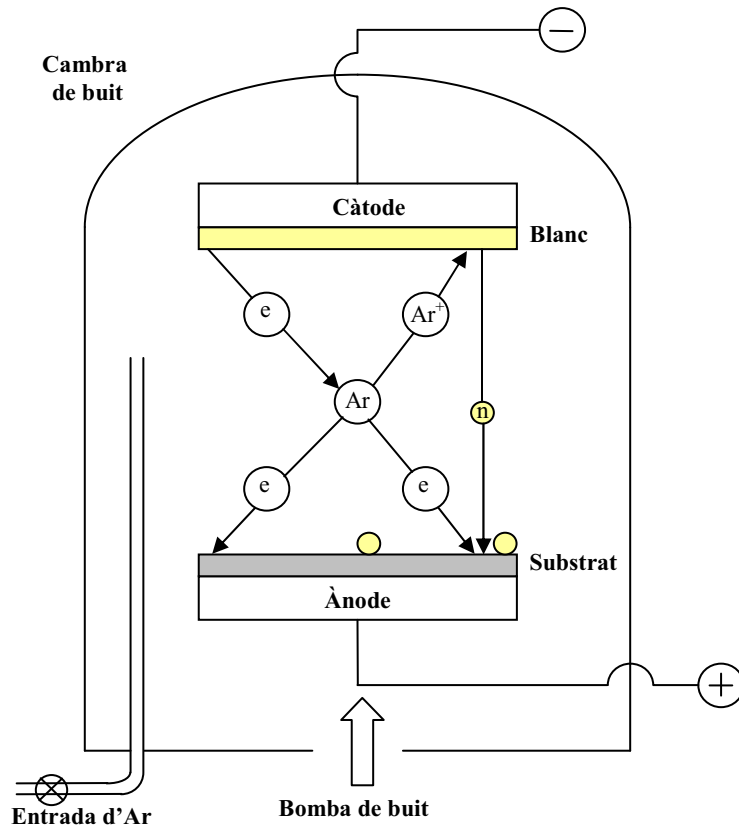
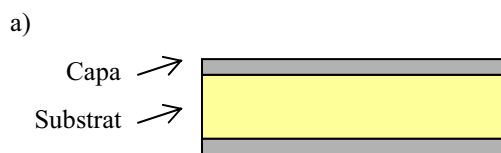


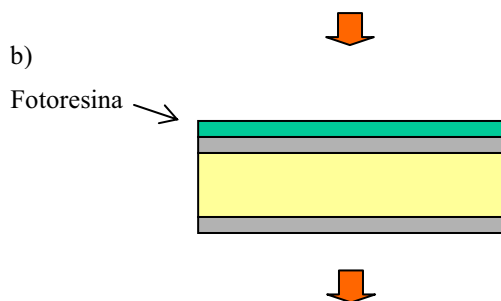
Fig.IV.6 Representació esquemàtica del procés de polvorització catòdica

IV.3.3.2. Processos de litografia

La fotolitografia és el principal procés de litografia per transferir els motius geomètrics de la màscara a la superfície de l'oblea. Consta de les següents etapes, Fig.IV.7:

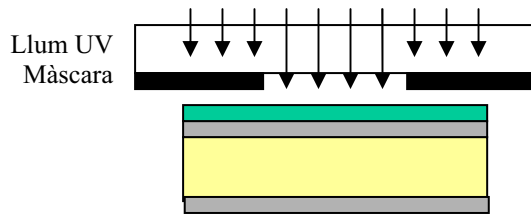


- Primerament, per millorar l'adherència de la resina a dipositar, s'elimina la humitat de l'oblea escalfant-la.

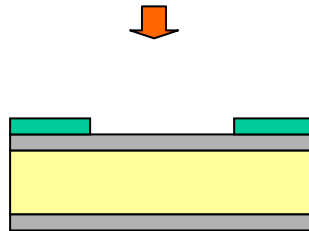


- Dipòsit d'una fotoresina coneguda (per exemple: MAP1275, PMMA, PDMS ...) a sobre de l'oblea mitjançant la centrifugació amb un "spinner" per uniformitzar-ne el gruix (determinat per les condicions de dipòsit de la fotoresina: velocitat, acceleració, temps de gir).
- "Soft-Bake" és el secad de la fotoresina dipositada en l'oblea. Consisteix en posar l'oblea en un forn entre 80°C i 150°C per tal d'eliminar-ne els dissolvents.

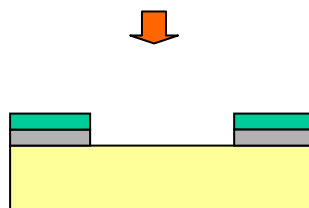
c)



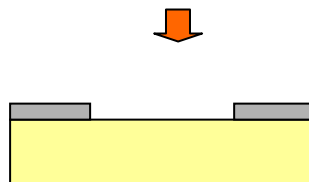
d)



e)



f)



- Insolació de la mostra amb llum UV (ultraviolada) a través d'una màscara de quars on hi ha dibuixats en crom els motius a reproduir. Cal controlar:

- Quantitat d'energia transmesa, que es tradueix en el temps d'exposició i potència de la llum incident.
- Alineament amb motius previs. Aquests factors afecten a la resolució i repetitivitat. Tot i que el fabricant de la resina especifica les condicions d'il·luminació s'han d'acabar d'ajustar a les característiques de cada cas.

- Prèviament al revelat es realitza un "Hard-Bake". Consisteix en posar les oblees al forn perquè s'endureixi la fotoresina amb els motius definits i s'eviti la degradació amb la llum.

- Revelat de la fotoresina (revelador específic per cada resina): s'elimina la resina transformada per la llum. El temps n'és un paràmetre crític, per no atacar la resina no degradada, perquè l'especificitat no és del 100%, i a la vegada el temps ha de ser suficient per poder atacar completament les zones degradades.

- Gravats de la capa

- Supressió de la fotoresina restant i neteja amb acetona.

Fig.IV.7 Etapes del procés de fotolitografia

Els processos de fotolitografia es poden classificar segons el tipus de resina emprat i el mètode d'insolació de les màscares.

Els dos tipus de resina a utilitzar són la positiva i la negativa, *Fig.IV.8*:

○ Positiva: les parts de fotoresina exposades a la llum es degraden tornant-se solubles mentre que les parts protegides pels motius de quars de la màscara opaca romanen inalterades.

○ Negativa: les parts degradades de la fotoresina són les no exposades a la llum. El revelador penetra dins la resina provocant un augment en volum de la zona exposada, conegut com a fenomen d'inflament, que degrada la resolució del procés.

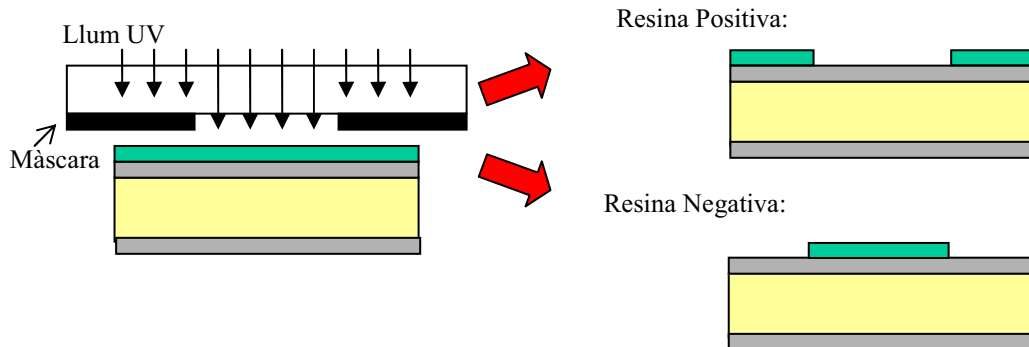


Fig.IV.8 Representació esquemàtica dels dos tipus principals de resina.

Els mètodes d'insolació de les màscares es divideixen en:

1. Màscares de contacte: en situar-se a sobre l'oblea, s'obté una difracció menor i per tant una millor resolució. No obstant, el contacte provoca un deteriorament més ràpid de la màscara.

2. Màscares de proximitat: malgrat que la seva separació respecte l'oblea és només d'unes poques micres apareixen efectes de difracció. Per tant, són adequades quan la resolució no és molt crítica.

3. Màscares de projecció: se situen a una certa distància de l'oblea per evitar el contacte. Els seus inconvenients són l'elevat cost de l'equip de fabricació i els problemes de la difracció.

IV.3.3.3. Gravat

Els tipus d'atac realitzats es classifiquen en isòtrops i anisòtrops, *Fig.IV.9*:

○ Atac isòtrop: l'atac té lloc a la mateixa velocitat en totes direccions, originant esglaons més suaus, produint deformacions dels motius i presentant el problema del sobreatac lateral.

○ Atac anisòtrop: produeix una transmissió més exacta del motiu a la capa atacada. Les parets són verticals. Permet tenir un millor control de les dimensions i geometries.

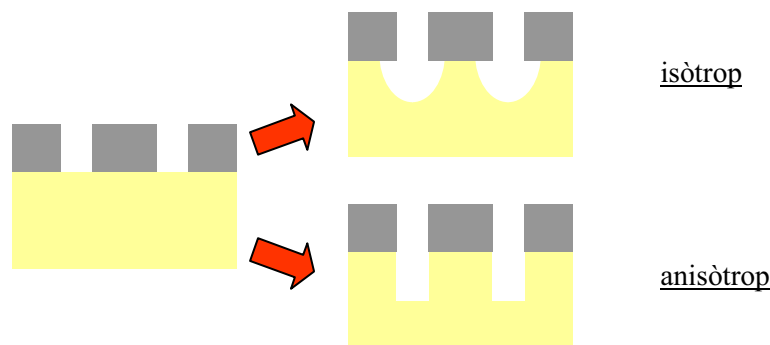


Fig.IV.9 Representació esquemàtica dels diferents tipus d'atac.

Els tipus de gravat es poden classificar en humits i secs:

o Gravat humit: Aquests tipus de processos d'eliminació de les parts protegides de la capa estructural es realitzen mitjançant reaccions químiques amb una elevada selectivitat respecte la capa de màscara. La reacció té lloc quan es submergeix l'oblea sencera durant uns segons en una solució composta per un líquid atacant, com ara el HF, el KOH o el TMAH, un accelerador de l'atac i un líquid de suspensió, que no intervé en la reacció i acostuma a ser H₂O. Per parar el gravat es submergeix l'oblea en aigua per aclarir-la.

HF:

El procés de gravat del HF és isòtrop i adequat per la realització d'un atac ràpid del SiO₂. Malgrat ser molt utilitzat, es tracta d'un procés perillós degut a l'alta corrosivitat de l'àcid fluorhídric, HF.

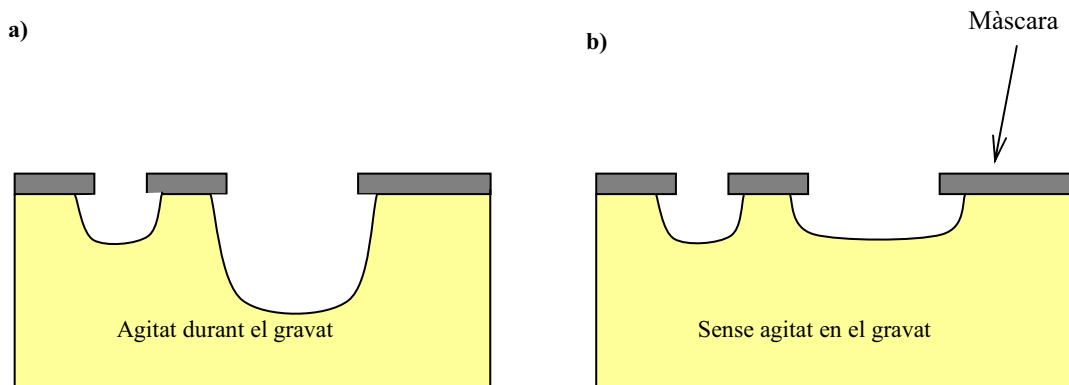


Fig.IV.10 Esquema d'un procés de gravat humit per HF a) amb un agitat durant el gravat b) sense agitat durant el gravat

Les característiques del gravat depenen de si s'agita o no l'oblea durant el procés, com es mostra en la representació esquemàtica de la Fig.IV.10. No obstant, les profunditats i les dimensions laterals del gravat són de difícil control. Per tant, aquest tipus de gravat és adequat per gruixos petits per a minimitzar els problemes de sobreatac lateral.

KOH:

Aquest procés d'atac anisòtrop presenta una direcció de gravat preferent segons el pla $\langle 100 \rangle$ del Si, que és unes 100 vegades més ràpid que el pla $\langle 111 \rangle$. Per tant, el gravat d'un forat rectangular en una oblea de Si (100) es realitzarà amb ranures en forma de piràmide, amb unes parets que formaran un angle de 54.74° respecte la superfície, com s'observa en l'esquema de la Fig.IV.11. Tot i que la velocitat d'atac no depèn dels dopants de As, P, Sb, una alta concentració de dopant de B reduirà l'atac en la direcció $\langle 110 \rangle$. Per altra banda, la velocitat d'atac es pot modificar en les direccions $\langle 100 \rangle$ i $\langle 110 \rangle$ afegint isopropanol a la solució.

El principals problemes que presenta aquest gravat són la toxicitat i la contaminació dels semiconductors degut als ions K⁺ (petits i amb molta mobilitat).

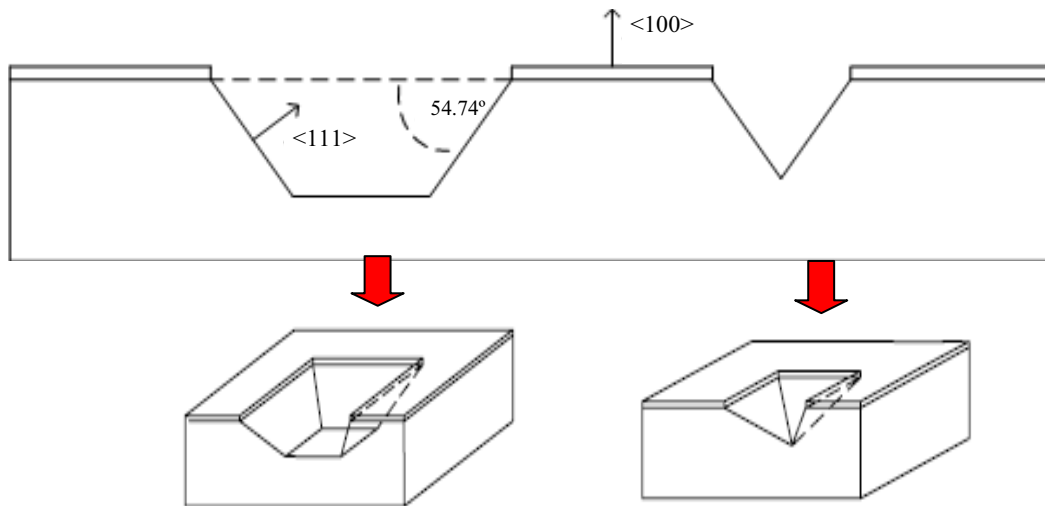


Fig.IV.11 Esquema d'un procés de gravat humit per KOH

TMAH:

L'hidròxid de Tetramethylammonium, TMAH, dona un gravat anisòtrop similar al de KOH. La seva velocitat de gravat és de l'ordre de 0.1nm/minut i, per tant, s'utilitza per gravats ràpids. La velocitat en la direcció <100>, generalment augmenta amb la temperatura i disminueix amb la concentració de TMAH. La temperatura de treball, per als micromecanitzats de Si, es troba entre els 70° i 90°C.

○ Gravat sec: Aquests tipus de gravat són anisòtrops, poc selectius, en què els atacants són gasosos en un plasma. Es produeix un atac químic i físic alhora. Els principals tipus de gravat sec són els atacs reactius RIE i DRIE i el "sputtering".

Atac reactiu per ions o plasma (RIE, Reactive Ion Etching)

Aquest gravat utilitza el bombardeig iònic per l'atac direccional i un gas químicament reactiu per tenir una bona selectivitat de la capa de gravat. Els ions incideixen verticalment sobre la superfície de l'oblea on reaccionen per a formar substàncies volàtils, que s'eliminen mitjançant un sistema de buit a baixa pressió (10^{-3} a 10^{-1} torr). Malgrat que el gravat per plasma a baixa pressió és molt més vertical que l'humit, no és adequat per atacar gruixos de materials superiors als 10µm degut als problemes d'atac lateral.

Atac reactiu profund per ions o plasma (DRIE, Deep Reactive Ion Etching)

L'atac del material per DRIE es realitza mitjançant un bombardeig d'ions, generalment un plasma de SF₆, Ni, Cl i/o BCl₃, que arrenca el material de la superfície exposada per la màscara.

Aquest procés de gravat és molt anisòtrop i s'utilitza per crear de forma ràpida forats profunds, superiors als 10µm, en les oblees i, a la vegada, permetre un bon control de la geometria. Durant el procés de gravat disponible a la sala blanca del CNM, tenen lloc una seqüència de passos d'atac i passivació cada 100nm, com s'observa en la Fig.IV.12. El pas de passivació es realitza dipositant tefló tant en les parets laterals com en el fons. En canvi, en l'etapa d'atac, el tefló del fons desapareix ràpidament mentre que el de les parets resisteix més, tot minimitzant l'atac lateral. La relació d'aspecte aconseguida, relació entre l'altura i les dimensions laterals, pot arribar fins a 20:1.

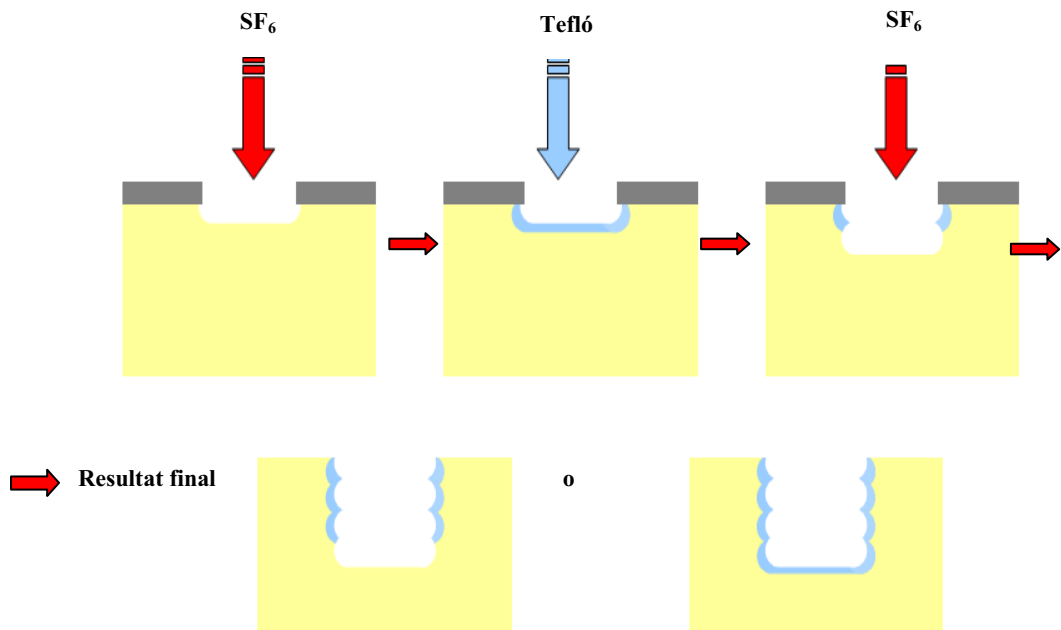


Fig.IV.12 Representació esquemàtica del procés de Deep RIE: alternança dels passos d'atac (SF_6) i passivació (tefló).

Atac per polvorització catòdica "Sputtering" i Ion milling

Aquest procés d'atac físic, realitzat en alt buit ($\sim 10^{-7}$ torr.), consisteix en l'extracció d'àtoms de la superfície d'un elèctrode degut a l'intercanvi de moment amb ions atòmics o moleculars amb energies superiors als 500eV, que incideixen sobre la superfície de la mostra amb poca selectivitat i molta anisotropia. S'acostuma a utilitzar per a la neteja de superfícies i la delimitació de pistes.

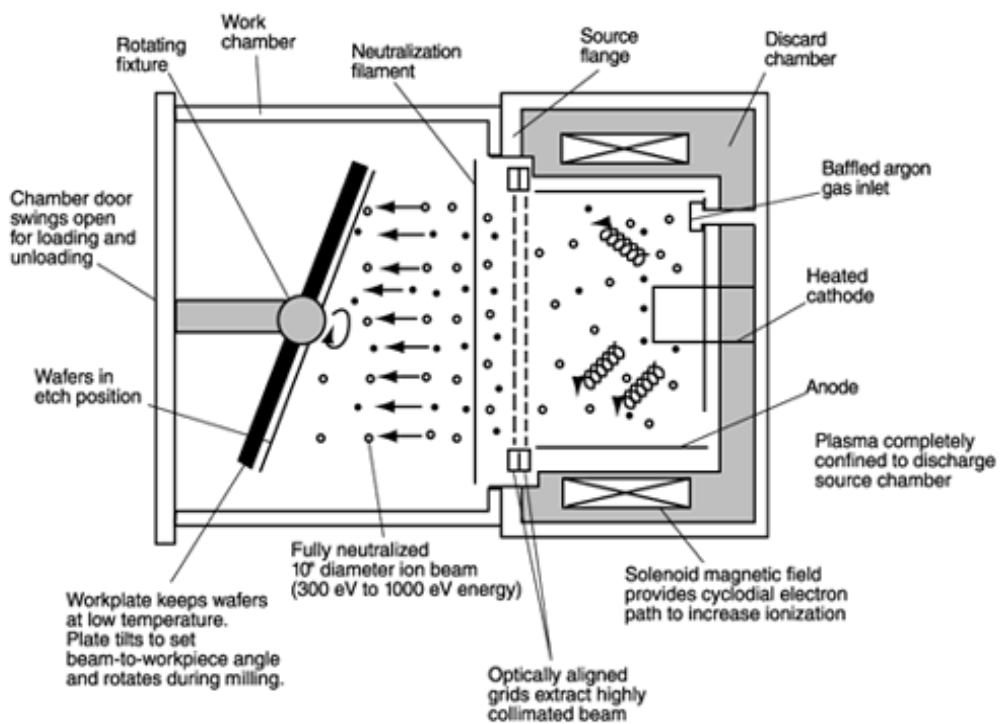


Fig.IV.13 Representació esquemàtica del procés d'atac per polvorització catòdica [34].

Com a qualsevol procés de gravat s'ha aplicat un protector selectiu (fotoresina) prèviament a l'entrada de la mostra en la cambra de buit, mostrat en l'esquema de la Fig.IV.13. Malgrat que tot s'exposa al feix d'ions col·limats de 15 polzades de diàmetre, el gravat del blanc metàl·lic és de 3 a 10 vegades més ràpid que la resina.

Els ions d'Argó impacten amb gran precisió contra la mostra, independentment del seu material. Els impactes es produeixen mentre la mostra rota assegurant un gravat uniforme i una repetibilitat del procés.

IV.3.2.4. Processos electroquímics:

Electrodeposició d'un metall:

L'electrodeposició d'un metall és un procés d'addició de materials similar a la generació de capes. Aquest procés electroquímic té lloc en una cel·la electroliítica, en la qual s'estableix un corrent elèctric per a reduir els cations (metalls) de la solució aquosa. El metall reduït precipita sobre un objecte conductiu, el càtode de la cel·la, creant un fi recobrint al voltant seu, Fig.IV.14. La reducció és un procés de dipòsit d'un metall amb la captura d'electrons del càtode.

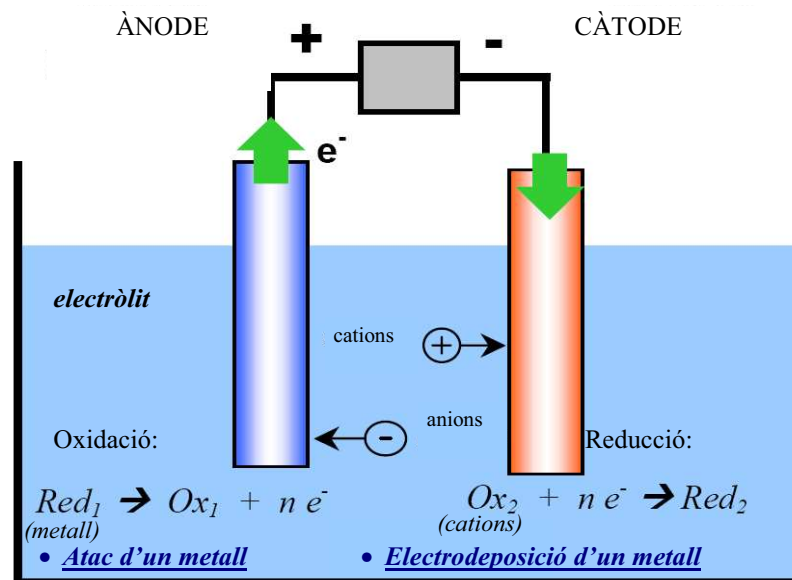


Fig.IV.14 Esquema del procés d'electrodeposició

Per tant, l'electrodeposició és una tècnica de creixement de capes metàl·liques. Aquest procés de dipòsit electroquímic industrial és compatible amb la tecnologia de micro sistemes de baix cost i, a la vegada, permet un bon control del gruix, de la composició de les capes i de l'estructura, a nivell de mida de gra, de l'estrès i de l'orientació preferencial. En comparació amb les tècniques mencionades anteriorment, permet el dipòsit sobre superfícies no planars, assolint velocitats de creixement superiors i, alhora, obtenint gruixos més grans que estarien entre els 100nm i els 100µm .

Per dipositar un metall sobre una capa aïllant de SiO₂ es necessita una capa metàl·lica per assegurar la conducció durant el procés electroquímic. En el cas de la fabricació de bobines per electrodeposició, serà imprescindible un atac posterior d'aquesta capa metàl·lica, que actua com a capa llavor i que es troba situada sota les espines, per evitar-ne el curtcircuit.

Atac d'un metall:

L'atac d'un metall consisteix en un procés electroquímic d'oxidació dels àtoms. Es produeix alliberant electrons que després són capturats per l'ànode. Per tant, és el procés invers del de dipòsit, on hi ha una reducció dels àtoms.

IV.3.3. Flux de fabricació: Fabricació de les microbobines de Cu i del ressonador

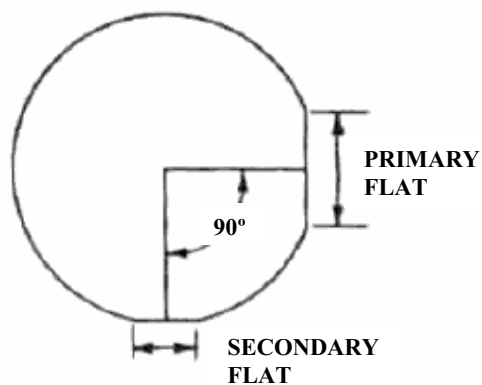
IV.3.3.1. Microbobina

Dins dels processos compatibles amb la tecnologia de Si, els de dipòsit electroquímic són els que constitueixen la millor opció per al creixement de capes metàl·liques de gruix elevat segons la tesi de N. Yakoubi [13] i l'estudi realitzat per S. Martinez [14]. En comparació amb les tècniques clàssiques basades en processos de dipòsit físic o químic, les de dipòsit electroquímic es caracteritzen per presentar velocitats de dipòsit molt superiors i, a la vegada, compatibles amb el creixement de capes gruixudes, amb gruixos que van des de valors inferiors a $0.1\mu\text{m}$ fins a més de $100\mu\text{m}$. A més a més, permeten controlar de forma molt precisa les característiques de la capa dipositada mitjançant tècniques d'instrumentació força senzilles.

Per tots aquests motius, s'ha escollit un procés electroquímic de creixement de capes de Cu per optimitzar la resistència en sèrie de la bobina mitjançant un augment del seu gruix. La selecció d'aquest material per a fabricar les bobines correspon a la seva facilitat per a ser dipositat de forma controlada mitjançant aquests processos i a una resistivitat elèctrica baixa. L'ús d'un procés de dipòsit electroquímic ha fet necessari la incorporació d'una capa metàl·lica per assegurar la conducció durant l'etapa de dipòsit.

Les oblees de partida són de Si (100) tipus p de 1mm de gruix per assegurar la robustesa del substrat, (enfrent de les $350\mu\text{m}$ de les convencionals) i de 100mm de diàmetre, *Fig.IV.15*. No obstant, la utilització d'aquestes oblees gruixudes presenta problemes en la fotolitografia. Es comença amb el creixement tèrmic sobre l'oblea d'una capa dielèctrica de SiO_2 de $1\mu\text{m}$, per aïllar les pistes de la bobina del substrat de Si.

A continuació hi ha una etapa de dipòsit del Cu, realitzada com a etapa final fora de la Sala Blanca per evitar-ne una possible contaminació.

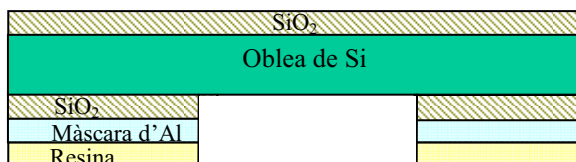


{100} p-TYPE

Fig.IV.15 Oblea de Si(100) tipus p

El conjunt de tots aquests condicionants, plantegen un procés de fabricació amb les següents etapes, *Fig.IV.16*:

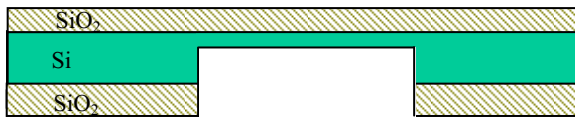
a)



▪ Mitjançant una oxidació humida es fa créixer tèrmicament una capa de $1\mu\text{m}$ de SiO_2 , per les dues cares de l'oblea. Actua com a capa aïllant per evitar un curtcircuit entre les espirales de la bobina. En el dors, a més a més, s'hi afegeix una màscara d'Al per resistir a un atac DRIE molt llarg degut al gruix de 1mm de la oblea.

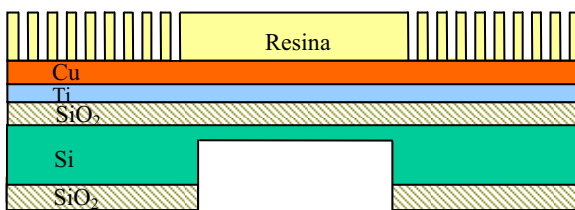
▪ A continuació es realitza la fotolitografia per l'obertura d'una finestra en la cara dors, per permetre el pas de l'imant.

b)



▪ Amb un procés de DRIE s'ataquen unes 800µm, per la cara posterior. Es deixen per atacar unes 200µm per assegurar la robustesa mecànica del substrat durant la fotolitografia i manipulacions posteriors en la resta del procés.

c)



▪ En la cara superior es diposita, per "sputtering", la capa llavor de Ti/Cu, 100/1000 Å respectivament. De les diferents capes llavors provades aquesta és la que millors resultats ha donat. La capa de Ti millora l'adherència, sobre la superfície de SiO₂, d'una capa llavor sobre la que creixerà el Cu.

En un primer moment s'havia utilitzat una capa llavor d'Au [15], però degut a la diferència entre els paràmetres de xarxa entre el Au i el Cu apareixia un alt gradient d'estrès amb conseqüències destructives. La seva substitució per Cu com a capa llavor ha permès reduir de forma significativa les tensions produïdes pel creixement de la capa de Cu electrodepositada augmentant-ne dràsticament l'adherència. Per realitzar la fotolitografia en la cara superior amb una màscara on hi ha dibuixades les bobines s'utilitzarà una resina gruixuda, AZ4562, de 15µm que serveix de motllo. El gruix de la resina determina el del Cu però la resolució de la fotolitografia disminueix amb l'augment del gruix, limitant les dimensions laterals de les bobines i l'elecció de l'amplada de pista i separació.

El principal problema d'aquest mètode additiu és que només que resti algun residu de fotoresina provocarà un tall en la pista, deixant inutilitzada tota la bobina.

A més a més, es presenten unes dificultats especials durant la fotolitografia degudes a:

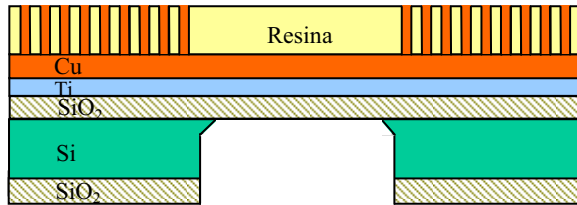
○ Gruix de l'oblea: problemes de pes, presenta inèrcia durant el "spinning".
○ Gruix de la resina: problemes tant en la insolació com en el revelat. Com que la resina és molt gruixuda la llum no penetrarà fins al fons del tot amb igual intensitat, per tant s'haurà d'ajustar-ne el temps d'exposició a la llum UV, *Fig.IV.16d*). Si es deixa revelar poc temps quedaran restes de resina provocant un tall en les pistes de la bobina, en canvi si el temps d'atac és massa llarg es produiria un atac lateral que podria modificar o degradar la geometria de les bobines amb el risc d'arribar a curtcircuitar-ne les pistes.

En un principi es va provar d'utilitzar la resina estàndard del CNM, MAP1275, però va donar una mala definició de les parets. Finalment, la resina fotosensible escollida ha estat la AZ4562. Aquesta resina, resistent a la dissolució utilitzada en el dipòsit electroquímic, ha permès l'obtenció d'una capa entre 1 i 100µm de gruix per a dipositar el Cu. Experimentalment, s'ha aconseguit mantenir una resolució satisfactòria amb dipòsits de Cu de fins a 15µm de gruix [13].

Una alternativa, per solucionar els problemes que presenta el mètode additiu, seria la utilització d'un mètode subtractiu. A l'electrodipòsit d'una capa de Cu se li realitzaria un gravat per alliberar les pistes de les bobines amb una màscara fotolitogràfica. D'aquesta manera, un defecte en el gravat només produiria el curtcircuit de dues espines, enlloc d'un tall en la pista que seria destructiu.

○ Una altra limitació és la causada per la utilització del Cu com a capa llavor, fent que la temperatura del recuit durant la fotolitografia no pugui superar els 80°C. Si es supera aquesta temperatura s'ha observat una electromigració dels àtoms de Cu, fet que provoca una degradació de la superfície.

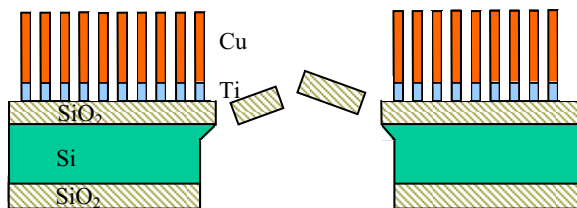
d)



- Electrodeposició del Cu, amb el mateix gruix que la resina, per la cara superior. El dipòsit electroquímic d'aquesta capa de Cu es realitza selectivament a través de la màscara de resina.

La cel·la electroquímica ha estat dissenyada pel processat d'obles de 4" de diàmetre. La separació entre l'ànode i el càtode és d'uns 5mm, per evitar les turbulències de l'electròlit durant el dipòsit. Com a contraelèctrode (ànode), es fa servir una placa de Cu de 10x10mm² i d'1mm de gruix mentre que la pròpia oblea de Si s'utilitza com a elèctrode de treball (càtode).

e)



- Gravats per TMAH del nucli de la bobina per la cara posterior.
- Obertura del nucli per "lift off" espontani durant el gravat, incloent la membrana formada de SiO₂.
- Eliminació de la capa llavor entre pistes de la cara superior. Amb un atac per plasma (RIE), malgrat ser molt vertical, el plasma arriba amb una certa inclinació que en limita la separació entre les espirals per poder arribar al fons. Per evitar-ho, es va emprar l'opció d'utilitzar un atac electroquímic.

Fig.IV.16 Etapes del procés de fabricació de les microbobines de Cu.

IV.3.3.2. Ressonador

S'ha construït un conjunt de ressonadors amb membranes de Kapton de 127µm de gruix amb unes dimensions laterals de 11x11, 13x13 i 15x15mm². Aquestes membranes han estat enganxades entre dos marcs de PCB que s'han apretat amb uns cargols.

L'imant emprat és permanent, de NdFeB, disponible comercialment amb unes dimensions de 7x7x4mm³, i la seva magnetització és de $M_z=954.9\text{KA/m}$. Aquest imant a la vegada actua com a massa inercial i ha estat centrat i fixat manualment, amb l'ajuda d'un altre imant de 7x7x2mm³ situat a sota, en la membrana. La presència d'aquest segon imant millora tant la fixació dels imants a la membrana del ressonador com la definició de l'àrea lliure de la membrana.

IV.3.4. Optimització dels processos electroquímics (EC, Electro Chemical)

L'electrodeposició és una tècnica útil per a la fabricació de les microbobines de Cu gruixut amb poc estrès i amb una bona adherència al substrat de Si. Aquest procés compatible amb la tecnologia de Si, requereix de superfícies amb un substrat conductor. Per millorar l'electrodipòsit del Cu, s'han realitzat estudis de voltametria del procés d'electrodeposició, de l'estructura i de l'estrès en les capes mitjançant difracció per raigs

X, i de la morfologia del Cu de les bobines amb imatges SEM, testejant els diferents paràmetres que intervenen en el procés. Aquests paràmetres són la capa llavor i la composició dels banys electroquímics, segons les concentracions d'electròlits i additius emprats [25].

L'anàlisi d'aquestes influències en el dipòsit del Cu es realitza amb un estudi de l'estrès residual i de la textura (aparició d'una orientació preferent, $2\cdot\theta/\theta$) mitjançant el mètode de difracció de raigs X, (XRD, X-Ray Diffraction), conegut també com a tècnica del $\sin^2\Psi$. La importància de l'estrès, que apareix en el dipòsit, rau en que és la propietat mecànica que condiciona l'adherència del material dipositat al substrat i que podria fer perillar la integritat del dispositiu. Una vegada s'ha dipositat una capa llavor conductora, s'analitza l'estrès produït en les capes de Cu, crescudes a sobre mitjançant processos electroquímics. En l'estructura multicapa que s'estudia, descrita en la figura Fig.IV.17, el Ti s'empra com una primera capa llavor que augmenta l'adherència entre la superfície de l'oblea i la segona capa llavor sobre la qual creixerà el Cu.

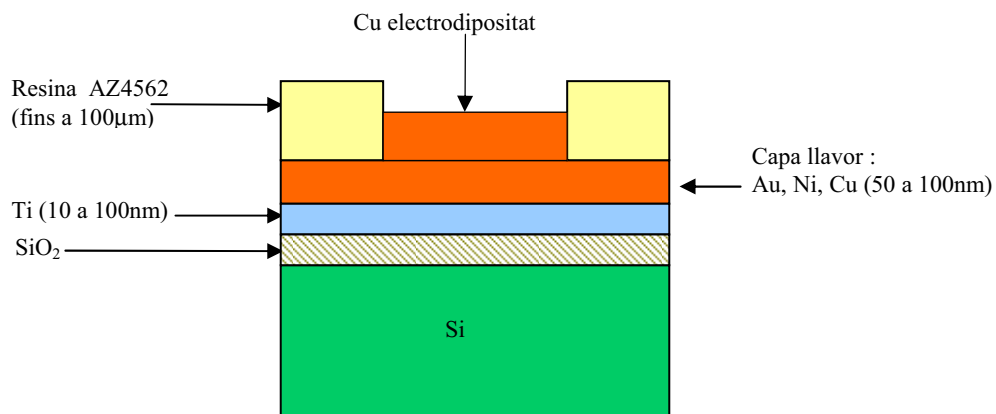


Fig.IV.17 Esquema del procés del dipòsit del Cu

D'altra banda, la composició del bany del dipòsit electroquímic també influeix en l'estrès i l'orientació preferent dels plans cristal·lins. Per a concentracions baixes de Cu(II) i d'additius, l'orientació preferent dels plans és paral·lela a la superfície i les capes dipositades tenen nivells d'estrès alts. Per tant, si es vol baixar l'estrès, s'hauran d'augmentar les concentracions de Cu(II) i d'additius de la solució.

Voltametria

L'estudi de voltametria dels processos EC ha estat realitzat per diferents banys i substrats. Cada escanejat de voltametria s'inicia a un voltatge on no hi té lloc cap procés. Després, se'n va cap a potencials negatius i posteriorment es canvia el sentit cap a positius, per tal d'estudiar els processos de reducció i oxidació respectivament.

S'analitza la influència de les concentracions de Cu(II), H₂SO₄, NaCl i additius del bany en el dipòsit del Cu. En aquests tipus de processos un augment en la concentració del Cu(II) implica un increment en la rapidesa del dipòsit del Cu.

Aquest estudi ha de permetre trobar tant la dissolució com la densitat de corrent i la capa llavor que optimitzaria el procés d'electrodeposició.

Estructura i anàlisi d'estrès

La importància de l'estudi de l'estrès del Cu dipositat és deguda a que presenta una influència negativa en l'adherència al substrat. Tal i com s'ha comentat anteriorment, una mala adherència del dipòsit de Cu acostuma a ser destructiva per a la bobina a fabricar.

La difracció dels raigs X, (XRD), és una tècnica no destructiva d'anàlisi de materials, basada en la difracció dels raigs X que incideixen en els cristalls dels materials. La forma

en què difracten depèn de la seva estructura. Amb els mètodes de difracció, la distància entre plans cristal·lins, d , d'una família de plans (h,k,l), pot ser calculada mitjançant la llei de Bragg, amb l'angle de difracció (angle controlat experimentalment, format pel raig difractat i el transmès), 2θ , i la longitud d'ona dels raigs X, λ , com es pot veure en l'esquema de la Fig.IV.18. La relació que estableix la llei de Bragg és [27]:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (IV.1)$$

essent θ , l'angle del raig incident respecte el pla de dispersió i n , l'ordre de difracció.

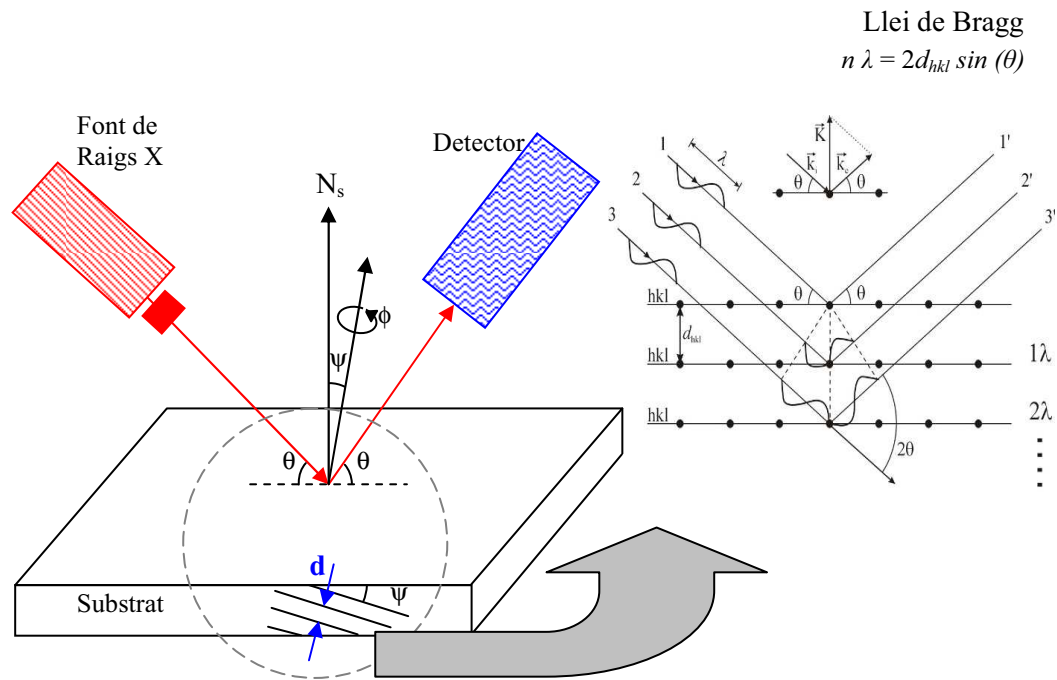


Fig.IV.18 Representació esquemàtica d'una difracció per raigs X, XRD

En un material policristal·lí, una variació de la distància entre plans cristal·lins d'una mateixa família (h k l) segons l'orientació del gra indica l'existència d'estrès. Les seves components dependran de les característiques de les capes:

- En capes primes, l'estrès és biaxial i es troba en el pla de la capa $\rightarrow \sigma_z = 0$
- En capes policristal·lines, el gra estressat per una compressió o estirament produeix una deformació amb una modificació en la distància entre plans, d .

$$d \neq d_0$$

essent d_0 , la distància entre plans en absència d'estrès.

Malgrat que les components de l'estrès en les direccions principals d'estrès són σ_x , σ_y i σ_z , en la superfície lliure d'un pla únicament existiran les dues paral·leles a la superfície, essent $\sigma_z = 0$, com s'observa en la Fig.IV.19a). Per tant, l'estrès a mesurar serà el σ_ϕ , que actua en la direcció OC de la superfície del substrat que forma un angle ϕ amb la direcció principal x , (paral·lela a la superfície).

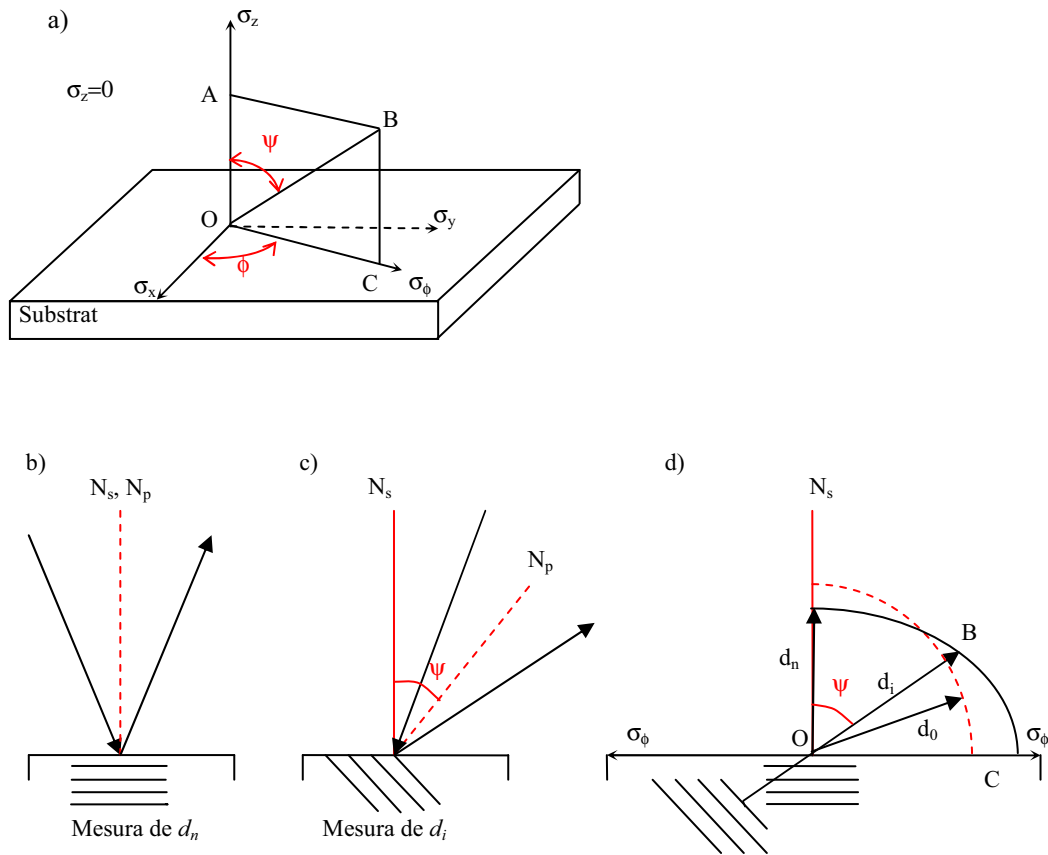


Fig.IV.19 a)Estrès biaxial a la superfície d'una capa prima $\sigma_z=0$ b)Mesura de d_n c)Mesura de d_i d)Diagrama de vectors dels espaiats entre plans d per un estrès σ_ϕ N_s és la normal a la superfície de la mostra i N_p és la normal als plans de reflexió.

No obstant segons [28], ϵ_z , la deformació normal a la superfície és diferent de 0 i es pot expressar com:

$$\epsilon_z = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) \quad (IV.2)$$

essent E el mòdul de Young i ν , el coeficient de Poisson. El valor de ϵ_z es pot trobar mesurant l'espaiat dels plans paral·lels a la superfície.

$$\epsilon_z = \frac{d_n - d_0}{d_0} \quad (IV.3)$$

on d_n és la distància entre plans en situació d'estrès i d_0 és la distància entre els mateixos plans en absència d'estrès. Substituint l'equació (3) en la (2), s'obté:

$$\frac{d_n - d_0}{d_0} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) \quad (IV.4)$$

La distància entre plans paral·lels en situació d'estrès valdrà d_n si la seva normal és perpendicular a la superfície de la mostra. En canvi, quan la normal estigui inclinada en la direcció OB, formant un angle Ψ , valdrà d_i . Les Fig.IV.19b) i Fig.IV.19c) mostren les orientacions dels raigs X per mesurar d_n i d_i respectivament. De la mateixa manera que la deformació ϵ_z prové de la distància entre plans paral·lels a la superfície d_n , la deformació ϵ_ψ serà deguda a la distància entre plans d_i amb la normal segons la direcció OB.

Segons la teoria de l'elasticitat, en un sòlid isòtrop [28] la deformació en la direcció OB de la Fig.IV.19d) és:

$$\varepsilon_{\psi} = \frac{1}{E} \left(\sigma_{\phi} (1+\nu) \sin^2 \psi - \nu (\sigma_x + \sigma_y) \right) \quad (IV.5)$$

essent Ψ , l'angle entre la normal a la superfície dels plans reflectants, N_p , i la normal a la superfície de la mostra, N_s . Restant (5) de (2) i expressant les deformacions en termes de l'espaiat entre plans, s'obté :

$$\varepsilon_{\psi} - \varepsilon_z = \frac{\sigma_{\phi}}{E} (1+\nu) \sin^2 \psi = \frac{d_i - d_o}{d_o} - \frac{d_n - d_o}{d_o} = \frac{d_i - d_n}{d_o} \quad (IV.6)$$

En ser les distàncies d_i , d_n i d_o molt similars, es pot considerar vàlida l'aproximació de substituir d_o per d_n . Per tant, la relació entre el desplaçament del pic i l'estrès residual és:

$$\frac{d_i - d_n}{d_n} = \frac{(1+\nu)}{E} \sigma_{\phi} \sin^2 \psi \quad (IV.7)$$

D'aquesta equació prové el nom del mètode $\sin^2 \Psi$. Es tracta d'una tècnica molt acurada per mesurar l'estrès residual d'un material policristal·lí de gra molt petit [29]. En l'esquema de la Fig.IV.20 s'observa la deriva en la posició del pic de difracció produïda en fer girar la mostra un angle Ψ . Es vol observar l'evolució de la distància entre plans, fixant un $2\theta/\theta$ per agafar una família de plans, $[h,k,l]$. Si presenta una dependència lineal de $\sin^2 \Psi$ amb la distància entre plans, voldrà dir que l'estrès és constant en una direcció perquè la distància entre plans depèn linealment en funció de $\sin^2 \Psi$.

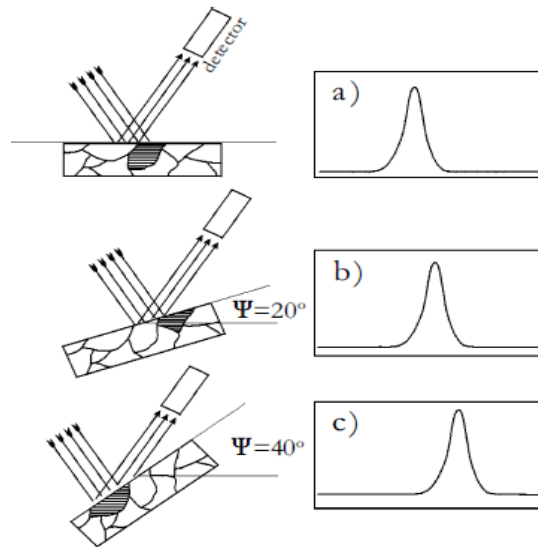


Fig.IV.20 Deriva del pic de difracció amb el canvi de l'angle ψ .

L'anàlisi XRD de les capes dipositades, mostra com els pics de difracció corresponen a una estructura policristal·lina de Cu de tipus cúbica centrada en les cares (fcc, face centered cubic) en les mesures $\theta-2\theta$. Els pics de difracció obtinguts en funció de la càrrega de dipòsit no varien si els valors de càrrega són superiors a $20C/cm^2$.

D'altra banda, l'orientació preferencial dels plans cristal·lins del dipòsit paral·lels a la superfície presenten una forta influència amb la composició de la solució de dipòsit i amb l'estructura de la capa llavor.

Per això, s'ha analitzat l'estrès del dipòsit en funció del substrat emprat. Entre els diferents materials susceptibles de ser utilitzats com a llavor destaca l'Au. Aquest material té una gran estabilitat química, una bona conductibilitat elèctrica i una facilitat per ser dipositat en forma de capa prima utilitzant, per exemple, tècniques de dipòsit per "sputtering", i en estructures multicapa de Cu/Ni [15]. No obstant, en un estudi anterior, l'anàlisi de les mesures d'estrès d'una capa de Cu electrodepositada sobre un substrat d'Au, va revelar l'existència d'un alt gradient d'estrès tensiu en la zona de la interfície Cu/Au. Aquest estrès, degut a la diferència entre els paràmetres de xarxa del Cu i del Au i a l'orientació preferencial (111) de l'Au, on el Cu crescut a sobre ho fa amb una orientació preferencial (2,2,0), provoca una mala adherència de les bobines al substrat. En ser l'estrès destructiu per les microbobines de Cu, l'ús del Au com a capa llavor és inviable.

Posteriorment, com a alternativa a l'Au, s'estudien els dipòsits realitzats sobre tres classes de substrats diferents mitjançant tècniques potencioestàtiques i galvanoestàtiques [25]:

- Oblees de Si amb una bicapa de Ti(100nm)/Ni(50nm) dipositada per “sputtering”.
- Oblees de Si cobertes per una capa de SiO₂ amb 1µm de gruix, i amb una bicapa de Ti(100nm)/Cu(50nm) dipositada a sobre per “sputtering”.
- Oblees de Si cobertes per una capa de SiO₂ amb 1µm de gruix, i amb una bicapa de Ti(10nm)/Cu(100nm) evaporada a sobre.

La utilitat de la capa de Ti és la de millorar l'adherència de la capa electrodepositada. Les capes de Ni o Cu són capes llavor i la funció de la capa de SiO₂ és la d'aïllar la base de Si per evitar el curt circuit de les pistes de la bobina.

En tots els dipòsits, els substrats són netejats amb etanol i aclarits amb aigua abans del dipòsit. Pel cas dels substrats amb una capa llavor de Ti/Ni, es necessita un rentat previ d'acetona.

En les gràfiques de la Fig.IV.21 es mostren els tres pics de difracció, per a dos dipòsits diferents de Cu en funció de la composició del bany:

- Bany A) : presenta una baixa concentració de Cu i d'additius

200g/l H₂SO₄ + 70g/l CuSO₄

S'observa una orientació preferent de creixement del Cu en la direcció (220). La relació d'intensitats entre el pic (111) i el de l'orientació paràsita (220) és d'un 100% enlloc del 40-50% esperat per a un material orientat aleatòriament.

- Bany B) : caracteritzat per un augment tant de la concentració de Cu com la dels additius:

70g/l H₂SO₄ + 200g/l CuSO₄ + 10ml/l solvent + 0.5ml/l potenciador + 0.4ml/l anivellador de la solució

Es perd l'orientació preferent dels plans cristal·lins del Cu. La relació d'intensitats dels pics obtinguts: (111), (200) i (220) és la característica de la majoria dels materials policristal·lins.

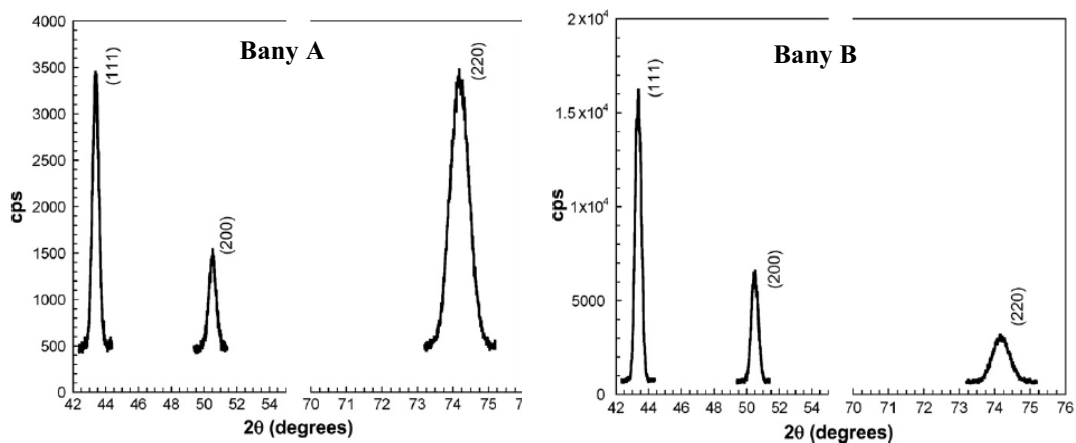


Fig.IV.21 Pics de difracció d'una estructura Fcc de Cu (111), (200) i (220) dipositada sobre un substrat de Si/Ti/Ni a 60rpm: BanyA)Baixa concentració de Cu i baixes concentracions d'additius BanyB)Augment de la concentració de Cu i de les concentracions d'additius

Per tant, malgrat l'orientació preferent del Cu dipositat quan els banys presenten concentracions baixes de Cu(II) i sense o amb pocs additius, aquesta es perdrà en augmentar les concentracions de Cu i d'additius del bany. D'altra banda, no s'han observat diferències entre els dipòsits sobre capes llavor de Ni i Cu.

En l'estudi de l'estrès amb el mètode $\sin^2\Psi$, s'ha observat una correlació entre l'existència d'una orientació preferent en (220) i l'estrès de les mostres.

Si el dipòsit de Cu s'ha realitzat sobre una capa llavor Ti/Ni i amb una solució sense additius i una baixa concentració de Cu(II) (Bany A), la gràfica de la Fig.IV.22a) mostra uns valors d'estrès compressiu molt elevats i amb una zona d'interfície amb un fort gradient d'estrès. Aquest comportament dona una baixa adherència del dipòsit.

El tipus d'estrès associat a una pitjor adherència és el compressiu, però si a més a més presenta una interfase amb un alt gradient d'estrès, la combinació d'aquests dos factors esdevé destructiva per a la capa dipositada.

En canvi, en utilitzar una solució amb una major concentració de Cu(II) i en presència d'additius (Bany B), en la gràfica de la Fig.IV.22b) s'observa una reducció significativa amb un canvi de signe en el nivell d'estrès de les capes dipositades, (estrès tensiu) i una millor adherència, sobre un substrat de Ti/Ni.

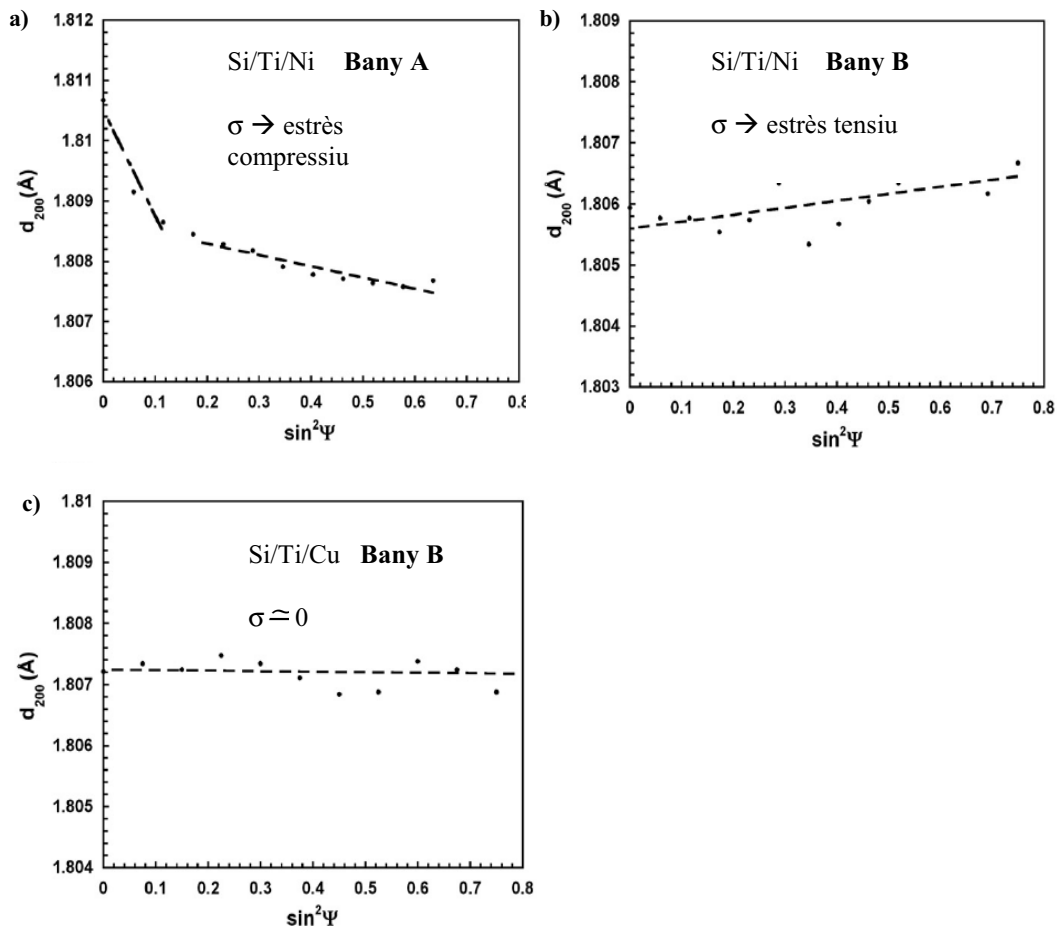


Fig.IV.22 Estrès en el pla dels dipòsits de Cu de les reflexions (200) a) Solució amb baixa concentració de Cu i sense additius (Bany A) en substrat de Si/Ti/Ni b) Solució amb major concentració de Cu i en presència d'additius (Bany B) en substrat de Si/Ti/Ni c) Solució amb una alta concentració de Cu i en presència d'additius (Bany B) en substrat de Si/Ti/Cu.

Finalment, per a una composició de la solució del bany amb una alta concentració de Cu i en presència d'additius (Bany B), el dipòsit de Cu sobre una capa llavor de Ti/Cu està gairebé lliure d'estrès Fig.IV.22c). Això és conseqüència d'una major afinitat en els paràmetres de xarxa entre el dipòsit i la capa llavor.

Els resultats evidencien els avantatges de l'ús d'una capa llavor de Cu tant per baixar l'estrès com per millorar-ne l'adherència del Cu electrodepositat [13]. Això és degut a que la diferència entre els paràmetres de xarxa és menor en ser la capa llavor del mateix material que el del dipòsit.

Per tant, es pot concloure que la millor opció per reduir l'estrès del Cu electrodepositat serà l'ús d'un substrat de Ti/Cu.

Anàlisi morfològica a del Cu de les bobines

Un estudi morfològic mitjançant SEM (Scanning Electron Microscope), dels electrodipòsits de Cu realitzats segons les composicions de les solucions ha permès observar que les solucions amb altes concentracions de Cu(II) en presència d'additius (Bany B) que afavoreixen el creixement de dipòsits sense orientació preferent, i amb un baix nivell d'estrès (capa llavor de Ti) o sense estrès (capa llavor de Cu), també afavoreixen una menor mida del gra. El creixement d'aquestes capes, en condicions de menor rugositat de la superfície i en la mida de gra, comporta una millora de la resolució espacial i de la qualitat de les microestructures de Cu, com es pot comprovar en la Fig.IV.23.

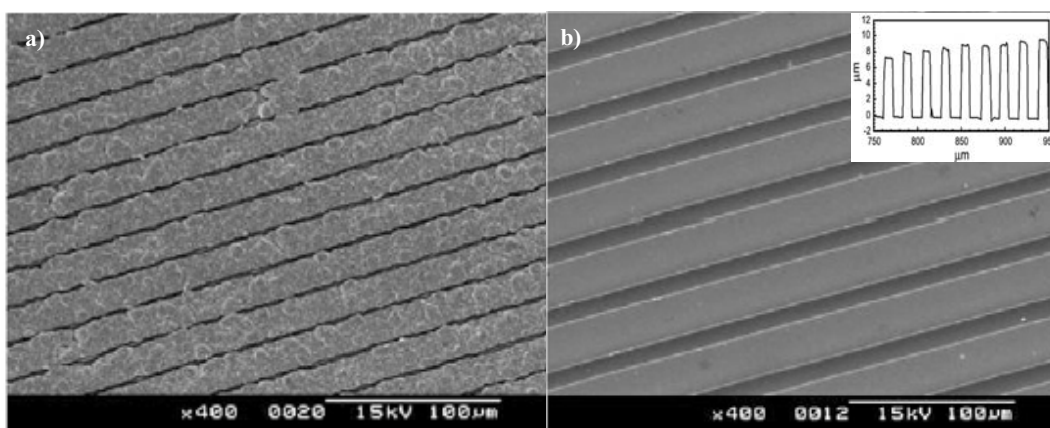


Fig.IV.23 Imatges SEM de les estructures de test després de treure la fotoresina electrodepositades amb solucions de diferents composició. a) solució amb baixa concentració de Cu(II), (bany A) b) Solució amb alta concentració de Cu(II) (bany B).

De tots aquests estudis s'ha arribat a la conclusió de la idoneïtat d'una primera capa llavor de Ti, perquè n'augmenta l'adherència, i de les diferents segones capes llavor estudiades: Au, Ni i Cu es va escollir la de Cu, perquè és la que presenta millors resultats degut a una major afinitat amb el dipòsit.

Pel que fa a la dissolució òptima per al dipòsit de Cu, és la que correspon a:

70g/l H_2SO_4 + 200g/l $CuSO_4$ + 10ml/l portador + 0.5ml/l dissolvent + 0.4ml/l solució tampó
(Bany B)

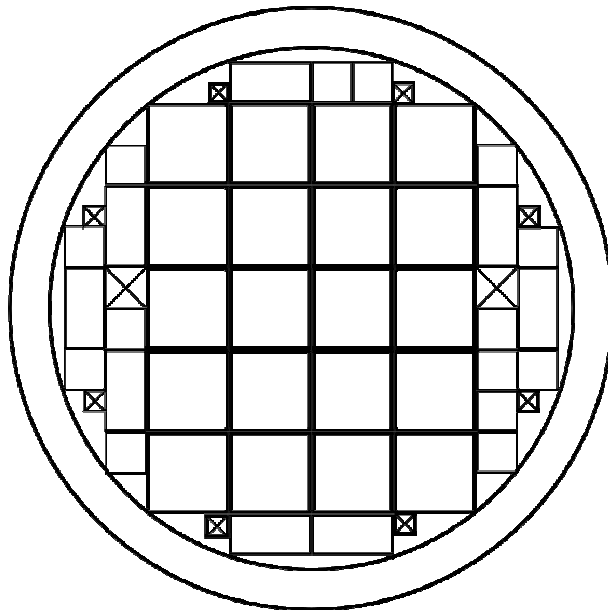
A la capa llavor de Ti/Cu, el potencial de dipòsit aplicat ha de ser moderat, de l'ordre dels -250mV.

Malgrat que tots aquests mètodes potencioestàtics i galvanostàtics emprats donen lloc a dipòsits de Cu uniformes, independentment de la capa llavor utilitzada, la configuració d'estrès mínim de la capa de Cu i de millor resolució espacial de les estructures fabricades correspon al cas d'un electrodipòsit de Cu sense l'orientació preferencial i amb la menor mida de gra, s'obté sobre una capa llavor de Ti/Cu realitzada amb un bany amb altes concentracions de Cu(II) i en presència d'additius (Bany B).

IV.3.5. Disseny de la màscara

Per a la fabricació d'una microbobina de Cu electrodepositada, es requereix del disseny i construcció dels diversos nivells de màscara. El disseny s'ha realitzat amb el programa Cadence i posteriorment s'ha generat el fitxer GDS. A continuació es descriurà la ordenació general del disseny i els motius que hi apareixen.

La màscara, identificada com CNM300, està prevista per ser emprada en unes oblees de partida de Si (100) de tipus p, amb un diàmetre de 10cm. L'oblea pot acollir 20 xips de 1.36cm repartits com es mostra en la Fig.IV.24. A més a més, els xips de l'oblea s'han dissenyat de forma que, malgrat haver-hi xips més petits, es puguin tallar a un pas horitzontal i vertical de 1.36cm.



S'ha deixat un marge de 3mm en la vora de l'oblea amb la capa llavor conductora lliure per a realitzar el contacte elèctric durant el dipòsit electroquímic i per a poder manipular les oblees amb membranes (chucks de les màquines de fotolitografia). Amb aquest requisit, s'obtenen:

-20 xips "normals" a on estan les bobines.

-10 xips de mida $\frac{1}{2}$ amb altres motius.

-10 xips de mida $\frac{1}{4}$ amb altres motius.

Els xips marcats amb X són semitransparents i contenen els motius d'alineament a doble cara.

Fig.IV.24 Disseny de la distribució de xips en l'oblea

La fabricació de les bobines de Cu ha requerit el disseny de dos nivells de màscares, CNM300-UB-1-DRIE i CNM300-UB-2-METALL, més un altre addicional per a la microfabricació integrada en microtecnologia de Si de membranes polimèriques: CNM300-UB-3-POLYMER. Els 3 nivells s'han dissenyat en camp fosc.

Per començar, es descriu de forma general el disseny dels xips de $1.36 \times 1.36 \text{cm}^2$ on estan ubicades les microbobines mostrades en la Fig.IV.25. Les zones verdes marquen els límits de la zona útil i no surten en la màscara. En el contorn del xip, la pista verda serveix per a definir la pista de tall. En la zona central del xip, l'exterior de la zona verda marca el final del silici (buit central de la bobina o lloc on estarà situada la membrana). L'interior de la pista verda del centre marca la posició de l'imant de $7 \times 7 \text{mm}^2$. En gris fosc està dibuixat el nivell Deep RIE, per tant, aquestes àrees correspondran a forats. Finalment, mentre que en blau és on s'hi electrodepositarà el Cu, a les àrees en color morat hi aniran les membranes de resina SU-8. S'ha de tenir present que les parts dibuixades seran transparents en la màscara.

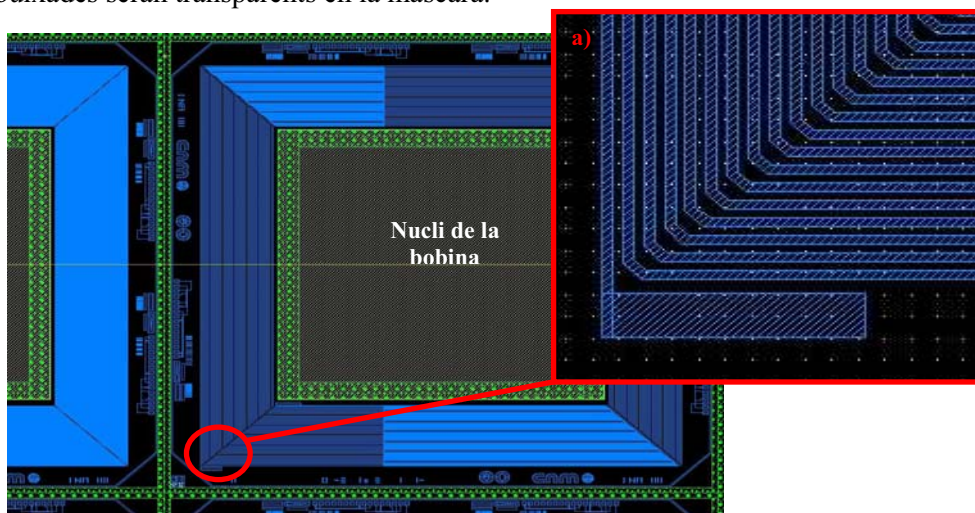


Fig.IV.25 Disseny d'un xip de 1.36cm de la màscara de la bobina (no apareix el nivell de SU-8).

Les pistes de la bobina estan dissenyades amb cantonades a 45° per a facilitar l'evacuació de les bombolles d'aire en les cantonades durant el procés de dipòsit electroquímic del Cu, detall mostrat en la Fig.IV.25a).

Nivell de METALL:

El nivell de màscara de metall serà el corresponent a la distribució del Cu de les bobines. En el disseny de la Fig.IV.26, es mostra la ubicació de les bobines en la superfície de la màscara essent R_c , la resistència teòrica de cada un dels dissenys de bobina, N , el número d'espires, Cu , l'amplada de pista en micres i Es , l'espai entre espires en micres.

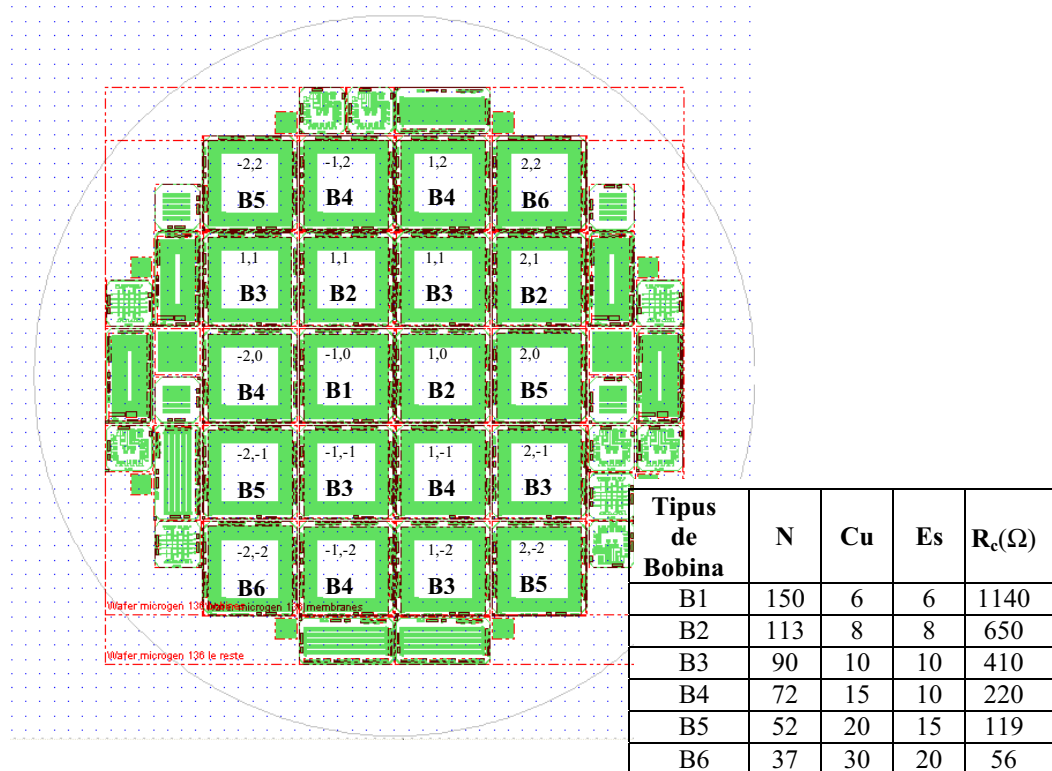


Fig.IV.26 Nivell de metall: disseny de la distribució de bobines de Cu en la màscara mostrant els diferents dissenys Bx segons les coordenades i, j.

Els motius que apareixen blaus en el dibuix en la Fig.IV.27 són les zones on s'hi diposita el Cu electroquímic. El gris fosc és el forat que quedarà definit després del gravat profund.

En aquests motius, hi ha :

- Els logos de la **UB** i del **CNM**.
- La referència de la màscara, **CNM300**.
- Motius de prova, “test”, repartits al voltant del xip.
- La bobina.
- Un identificador del xip que indica la posició respecte al centre de la oblea, *id* (coordenades i, j).
- Un identificador de la bobina, **N,Cu,Es** amb:
 $N = ZZ \quad Cu = YY \quad Es = XX$ (número de espires, amplada de pista de Cu i espai entre espires)

En tots els xips sencers, de 1.36x1.36cm² d'aquest nivell, hi ha els mateixos motius de test, únicament canvia la bobina central, les coordenades del xip i la descripció de la bobina.

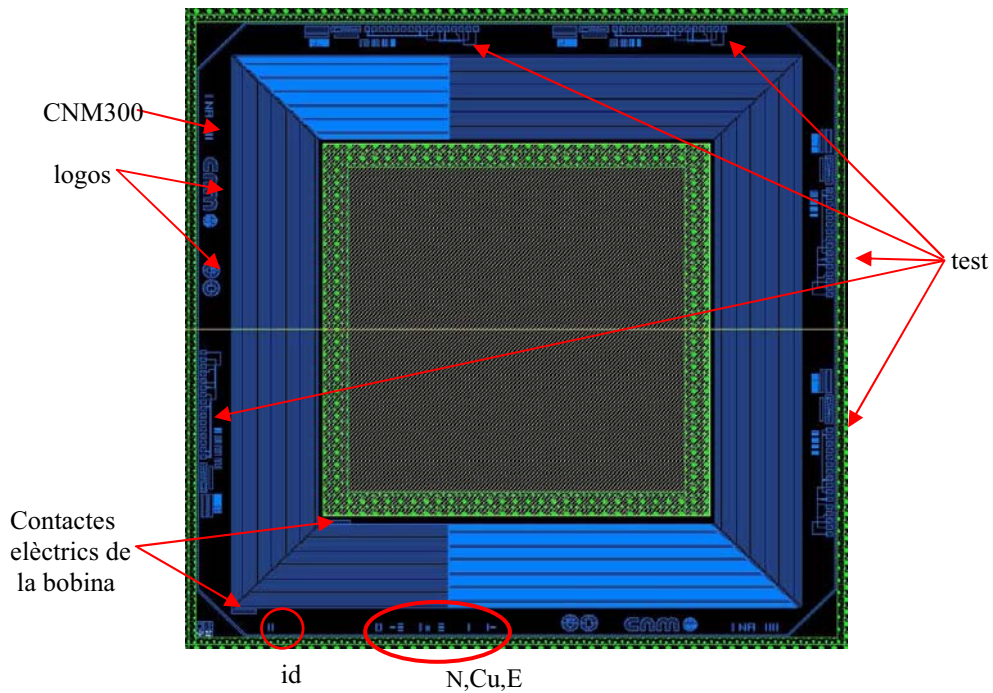


Fig.IV.27 Disseny del nivell de Cu + Deep RIE



Fig.IV.28 Els motius de test.

La Fig.IV.28 mostra el detall dels motius de test que s'han posat al voltant de cada bobina.

Nivell de DRIE:

El nivell de màscara de DRIE ha d'estar d'acord amb el nivell de màscara anterior, on les dimensions externes de la pista verda són $8 \times 8 \text{mm}^2$ i, per tant, s'espera que el forat sigui aproximadament d'aquesta mida. En el dibuix de la Fig.IV.29 es mostra la distribució dels forats en la oblea.

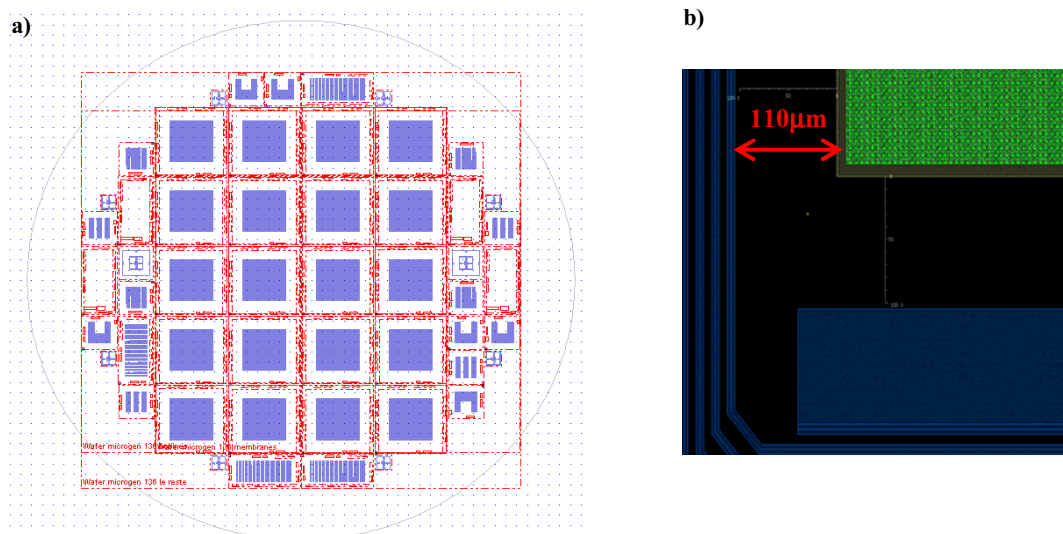


Fig.IV.29 a) Representació esquemàtica del nivell DRIE, corresponent als forats de l'oblea b) La posició del forat respecte al Cu

Per realitzar els forats de l'oblea es començarà mitjançant un gravat per DRIE d'uns $800\mu\text{m}$ a l'oblea de Si (1mm de gruix) i es finalitzarà el procés acabant de foradar les $200\mu\text{m}$ restants amb un atac per TMAH.

Per una banda, tot i que es considera que l'atac DRIE és vertical, en realitat presenta un perfil amb un angle d'uns 3° respecte la vertical, *Fig.IV.30*. Aquest angle de 3° en $800\mu\text{m}$ de gruix equival a unes $50\mu\text{m}$ de variació lateral. Per tant, l'amplada del forat podria mesurar fins a $100\mu\text{m}$ més de l'esperat.

D'altra banda, l'atac TMAH donarà un angle de 54.74° , reduint la mida del forat en funció del gruix de Si deixat en el DRIE. Per tant, si l'atac del TMAH és d'unes $200\mu\text{m}$ de gruix es redueixen les dimensions del forat en unes $50\mu\text{m}$ per cada costat. D'aquesta forma, s'haurien de compensar les incerteses dels dos tipus d'atac.

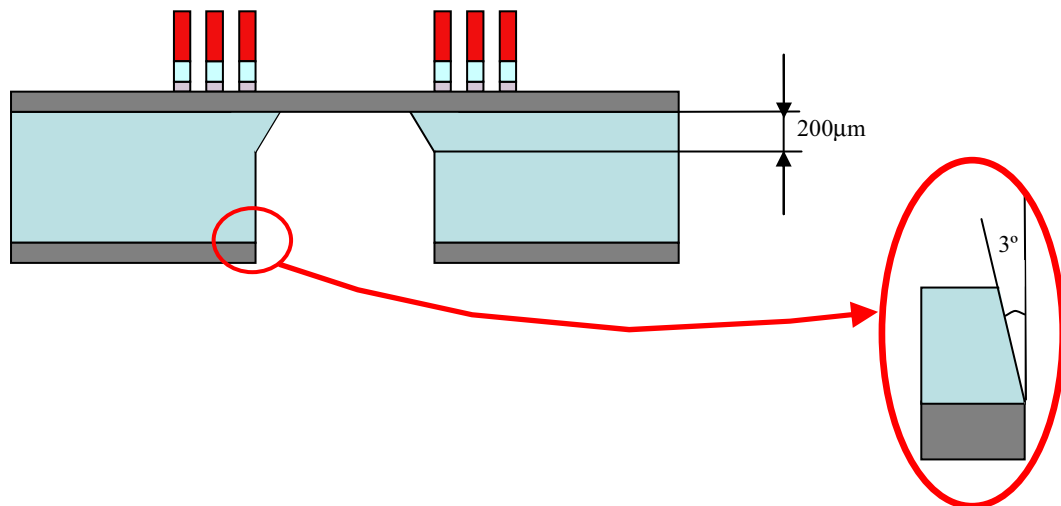


Fig.IV.30 El resultat del procés de gravat: DRIE + TMAH

Aquestes incerteses condicionen l'elecció de les mides dels forats i dels marges. Per a minimitzar el risc d'un possible trencament de la bobina, s'ha arribat a un equilibri entre definir marges grans i l'espai que resta per les espirs deixant un marge de $110\mu\text{m}$ entre la marca del forat en la màscara i la meitat de la primera espira, *Fig.IV.29b*).

Nivell de POLYMER

De forma addicional, s'ha realitzat un nivell de màscara per a la microfabricació de membranes polimèriques (resina de SU-8) emprant processos integrats en la tecnologia de Si. S'han dibuixat 4 tipus de membranes per als xips quadrats de $1.36 \times 1.36 \text{cm}^2$, repartides com s'observa en la *Fig.IV.31*, essent:

- M1: membranes amb 5 forats rodons de $300\mu\text{m}$ de diàmetre en cada costat de l'imant, *Fig.IV.31c*).
- M2: membranes amb 4 forats rodons de $300\mu\text{m}$, *Fig.IV.31c*).
- M3: membranes amb 3 forats ovalats de $300 \times 700 \mu\text{m}^2$, *Fig.IV.31c*).
- M4: membranes amb forats per a formar uns braços "molla" de longituds caracteritzades pels paràmetres a i b corresponents respectivament a la longitud i a l'amplada del braç de la *Fig.III.23*, amb unes freqüències de ressonància d'uns 500Hz , per a un gruix de resina de $100\mu\text{m}$, *Fig.IV.31c*).

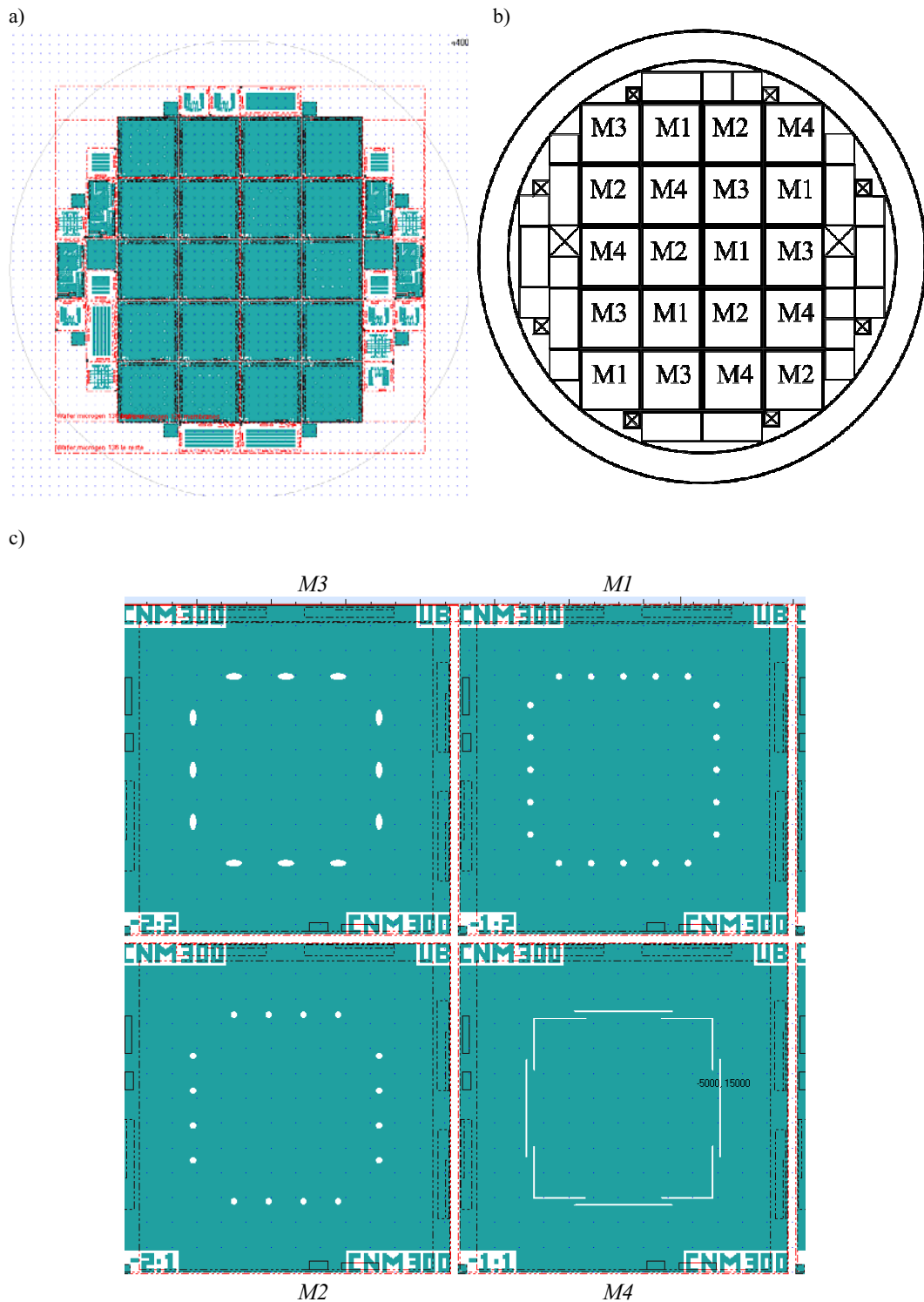


Fig.IV.31 Nivell de polímer: a) Dibuix de les membranes SU-8 b) La repartició de les membranes en l'oblea c) Un primer plànol del disseny de les membranes M3, M1, M2 i M4 a sota a la esquerra de cada membrana apareixen les coordenades en xips : n° de columna (x) de -2 a 2, i n° de línia (y) de -2 a 2.

IV.3.6. Prototip fabricat

La fabricació del dispositiu consta d'un ressonador i d'una bobina planar de Cu com es mostra a la imatge fotogràfica de la Fig.IV.32a). De totes les bobines de la màscara, les més ambicioses en quant a dimensions laterals es podrien descartar d'entrada. Això es degut a què la fotolitografia emprada en la fabricació permet una relació d'aspecte

màxima de l'ordre de 1, i hauria suposat un gruix massa petit per augmentar significativament la potència generada. La bobina d'aquesta figura té 52 espires amb $15\mu\text{m}$ de gruix de Cu, una amplada de pista de $20\mu\text{m}$ i $15\mu\text{m}$ de separació i per tant, una resistència en sèrie d'uns 100Ω . Una visió més detallada la dona la imatge SEM de la Fig.IV.32b), que mostra el prototip final de la bobina de Cu electrodepositat. En la imatge de la Fig.IV.32c) s'observa que les cantonades de cada una de les espires estan truncades per permetre que l'electròlit flueixi millor durant el procés d'electrodeposició.

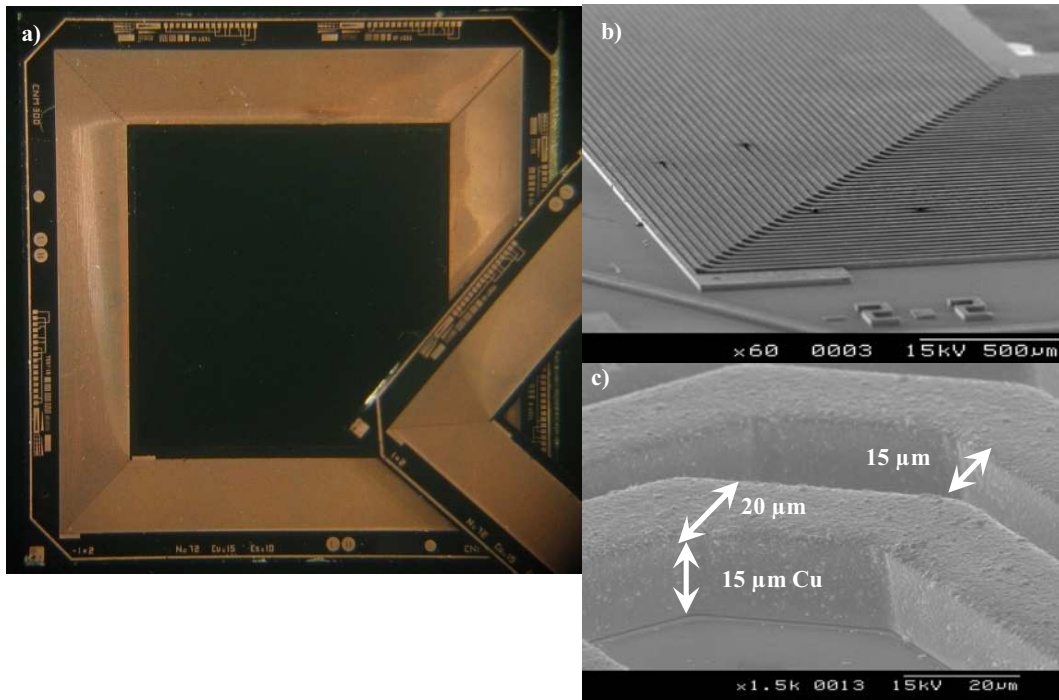


Fig.IV.32 a) Imatge del microscopi òptic de les microbobines de Cu, b) i c) Imatges SEM de les microbobines electrodepositades de Cu de $15\mu\text{m}$.

Una vegada realitzada la unió amb *superglue* de l'oblea, on es troba la microbobina de Cu, a la part fixa del marc de PCB del resonador, s'obté el dispositiu complet representat en la Fig.IV.33.

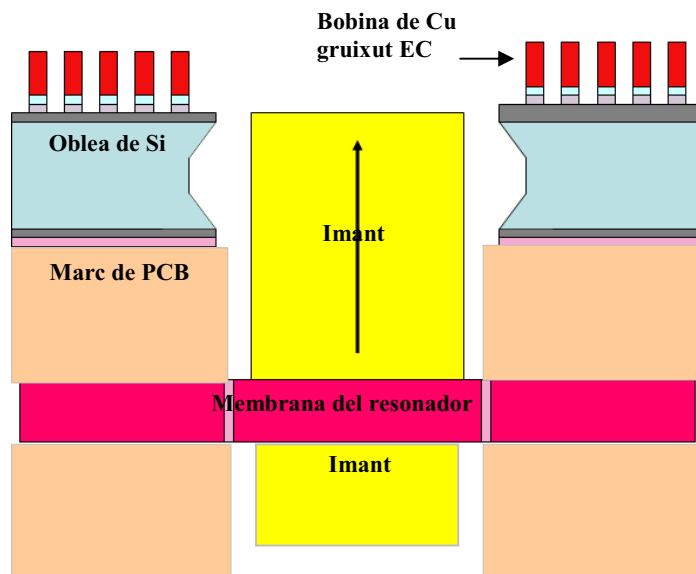


Fig.IV.33 Esquema del microgenerador inercial electromagnètic format per una bobina fixa i un imant mòbil (massa inercial) muntat en una estructura ressonant.

Amb aquests paràmetres i processos de fabricació descrits anteriorment, la superfície de l'imant queda 200µm per sota del pla de la bobina. La posició de la bobina respecte l'imant és molt propera al punt òptim que maximitza la variació de flux, $d\Phi/dz = 0.3\text{Wb/m}$, tal i com s'ha pogut comprovar mitjançant les simulacions ANSYS, mostrada en la gràfica de la Fig.IV.34, que calculen la variació de flux en la direcció vertical. A més a més, la mida del nucli de la bobina ha estat dissenyada de forma que sigui lleugerament superior a la mida de l'imant, de $7\times 7\text{mm}^2$, per evitar una possible col·lisió i a la vegada perdre el mínim possible de flux magnètic.

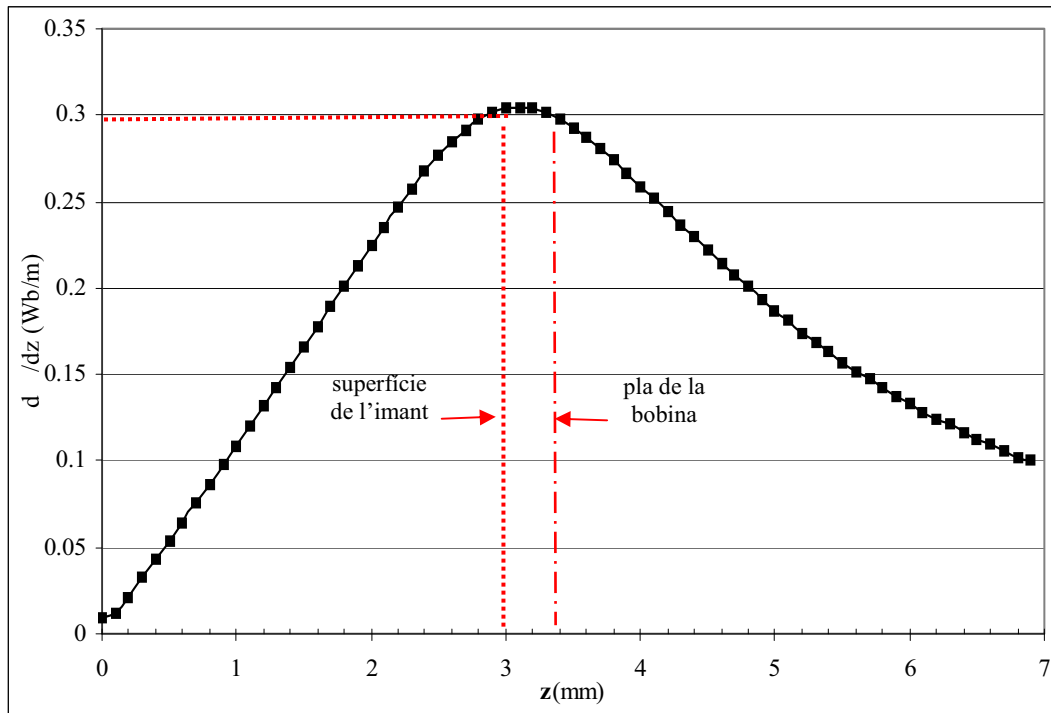


Fig.IV.34 Simulació de la variació de flux, ($d\phi/dz$), en funció de l'altura de l'imant, z , agafant com a origen el centre de l'imant $7\times 7\times 6\text{mm}^3$.

IV.4. Caracterització

Un cop assemblats els ressonadors, amb membranes de Kapton de diferents mides, amb el transductor electromagnètic, tal i com s'ha descrit en l'apartat anterior, s'ha realitzat tota una sèrie de mesures experimentals, per caracteritzar-los tant a nivell elèctric com a nivell mecànic.

IV.4.1. Mètodes i materials de caracterització

Es descriuen els diferents sistemes de caracterització dels prototips fabricats per mesurar el desplaçament i el voltatge en funció de la freqüència, i del voltatge i la potència en funció de la resistència de càrrega, per a diferents amplituds d'excitació.

IV.4.1.1. Sistemes de mesura del desplaçament

Per mesurar el desplaçament de la massa inercial de forma manual es realitza el muntatge experimental de la imatge de la Fig.IV.35.

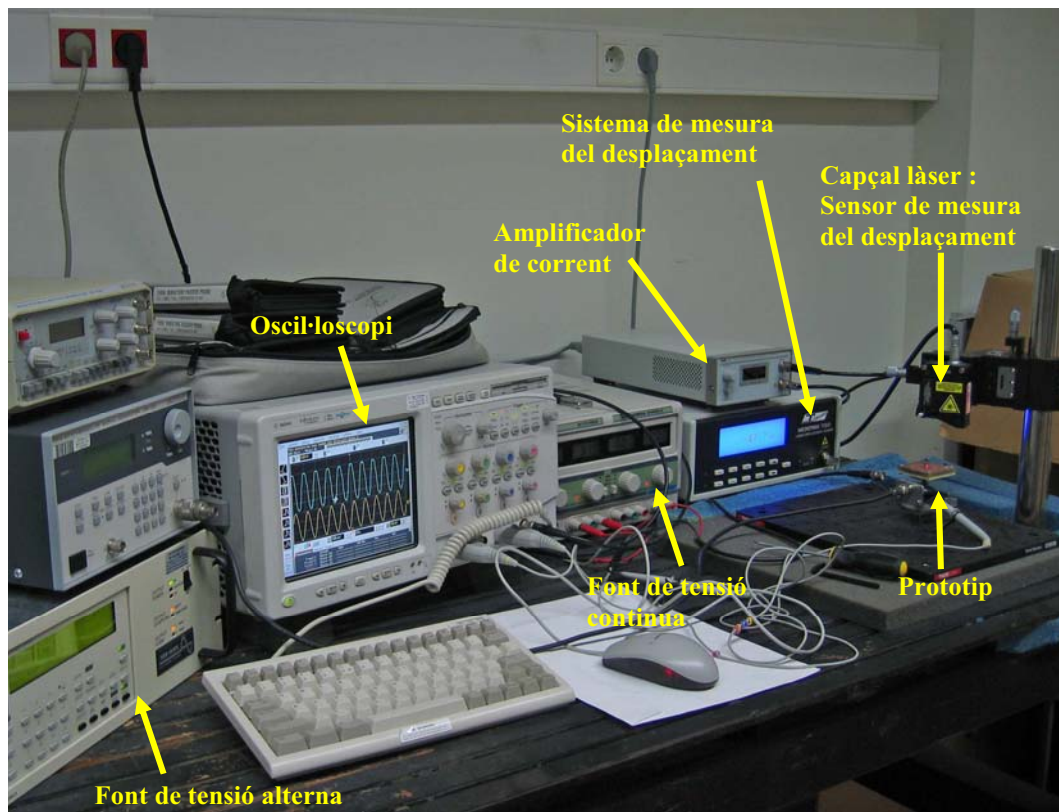


Fig.IV.35 Muntatge experimental de la mesura del desplaçament.

El sistema utilitzat per mesurar el desplaçament és un **Microtak 7000**, Fig.IV.36, acoblat a un capçal làser **MT-250-200** de “**MTI Instruments Inc.**”. El procés de mesura es realitza mitjançant el principi de triangulació, amb el qual es poden calcular distàncies respecte un punt fix de referència, Fig.IV.37. Aquesta tècnica s’anomena de triangulació perquè les posicions del punt del làser sobre l’objecte, el làser i el sensor formen un triangle. En funció de la distància del làser a la superfície de l’objecte, el punt del làser apareixerà en diferents llocs de l’interior del sensor. D’aquesta manera, es pot conèixer la distància, Δz , entre la posició de referència i la posició de l’objecte al relacionar-lo amb el desplaçament del punt del làser en el sensor, Δz_0 .



Fig.IV.36 Sistema de mesura del desplaçament Microtak 7000 acoblat a un capçal làser.

Abans de començar les mesures, s’ha de posar a 0 el Microtak quan el detector làser mesura un cert punt fix, situat a una altura propera de la zona on es volen fer les mesures. Aquest valor servirà de referència per realitzar les mesures. Per tant, la sortida donarà un valor analògic de tensió relacionat amb la situació de l’objecte dins el rang de detecció i, a la vegada, permetrà assegurar que no hi hagi deriva. El coeficient de proporcionalitat entre tensió i desplaçament donat pel fabricant és de: $0.635\mu\text{m}/\text{mV}$.

Característiques del sensor difusor:

- Mida de la taca làser = 60 x 180µm.
- Resolució: 0.5µm
- Rang: 5mm
- Rang de freqüència: fins 20kHz

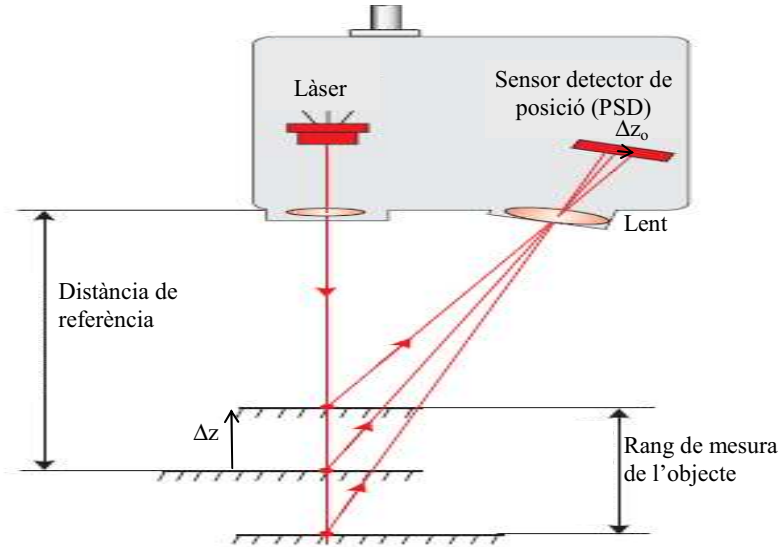


Fig.VI.37 Funcionament del capçal làser com a sensor de posició.

Al dispositiu se li aplica una excitació externa amb un actuator piezoelèctric, com s'observa en la Fig.IV.38. L'actuator utilitzat és el **AE0505D18** controlat amb un amplificador de corrent **MDT694A** (Single Channel Piezoelectric Controller), ambdós de **Thorlabs**. Aquest actuator és un "stack" de gran recorregut, que en aplicar-se-li un camp elèctric produeix un desplaçament mecànic molt precís. Segons les especificacions del fabricant, el desplaçament màxim que es pot obtenir és de 15micres en aplicar-li una tensió de 100V. Com que el piezoactuator no pot ser alimentat amb tensions negatives, a la senyal de tensió sinusoidal aplicada se li afegeix un valor offset de tensió, V_{offset} , amb la font contínua, Fig.IV.39.

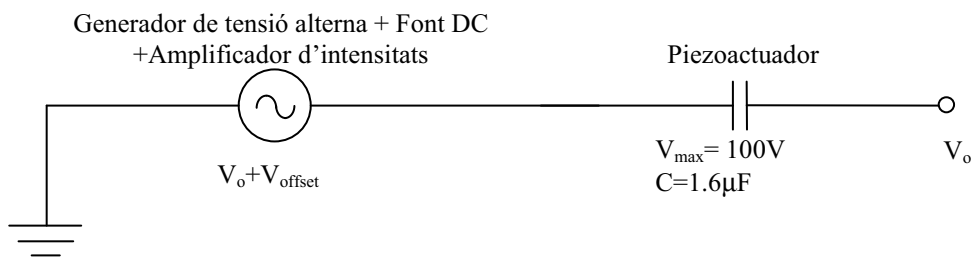
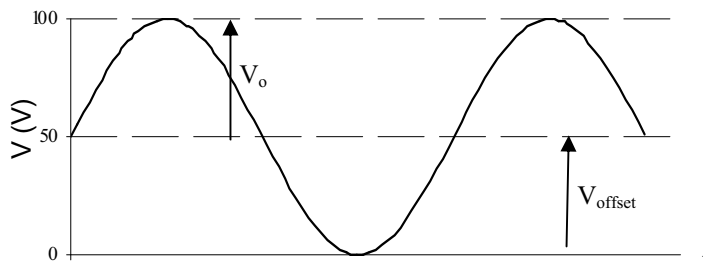


Fig.IV.38 Esquema del muntatge experimental per aplicar una excitació sinusoidal al actuator piezoelèctric.



$$V_{max} = 50 \sin \omega t$$

$$\left(\frac{dV}{dt} \right)_{max} = 50 \omega \cos \omega t$$

$$\left| \frac{dV}{dt} \right|_{max} \leq 50 \cdot \omega = 50 \cdot 2\pi f$$

Fig.IV.39 Senyal d'excitació aplicada al piezoactuator.

La font de contínua emprada per posar un offset de tensió és la **DC power supply DF1731SB5A**. La intensitat màxima d'aquesta font contínua doble dependrà del mode en el que s'aplica la tensió (sèrie o paral·lel). Si es connecten en paral·lel les dues sortides de la tensió contínua, la intensitat màxima és de 2A i el voltatge de 30V, mentre que si es connecten en sèrie, la intensitat màxima només serà de 1A i el voltatge d'offset podrà arribar als 60V. Per a una amplitud de la senyal d'excitació de $V_o=50V$ el desplaçament del piezoelèctric correspondrà a 15 μ m.

En connectar l'actuador a un circuit, actua com un condensador i la intensitat que passa per l'actuador es pot expressar com:

$$I = C \frac{dV}{dt} = C \cdot V_o \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) = C \cdot V_o \cdot 2\pi \cdot f \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = C \cdot V_{pp} \cdot \pi \cdot f \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (IV.8)$$

essent V_o , l'amplitud de tensió aplicada, f , la seva freqüència, ω , la freqüència angular de la oscil·lació, t , el temps, C , la capacitat del piezoactuador i V_{pp} , la tensió pic a pic subministrada per la font, que es pot expressar com:

$$V_{pp} = 2\sqrt{2}V_{rms} \quad (IV.9)$$

on V_{rms} és el valor de tensió eficaç (RMS, Root Mean Square) que dona la sortida coaxial del generador.

El mòdul de la intensitat és:

$$|I| = C \cdot V_{pp} \cdot \pi f \quad (IV.10)$$

Segons el “*datasheet*” del fabricant el valor de capacitat del piezoactuador és de 1.6 μ F i si la tensió V_{pp} màxima aplicada és de 100V i la freqüència és de l'ordre de 1kHz, la intensitat obtinguda serà:

$$|I| = 1.6 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot \pi 10^3 = 0.5A \quad (IV.11)$$

Per tant, d'aquesta equació es dedueix que per a treballar per sobre dels kHz es necessiten nivells d'intensitat elevats.

No obstant, s'haurà de mantenir la intensitat per sota dels 60mA, que és el límit de la sortida de l'amplificador d'intensitats, escollint una freqüència i/o amplitud adequades. Per a treballar a una determinada freqüència s'haurà de limitar la tensió d'excitació del piezoactuador:

$$V_{pp} \leq \frac{|I|}{C\pi f} \quad (IV.12)$$

Per tant, si es vol treballar a una freqüència de 1kHz, l'amplitud de tensió ha d'estar limitada a 6V.

Els diferents canals de l'oscil·loscopi permeten mesurar simultàniament: la sortida de la senyal del generador de funcions, la senyal rebuda pel dispositiu piezoelèctric un cop amplificada i per últim la sortida del *Sensor Microtak 7000* que mesura les vibracions de l'imant.

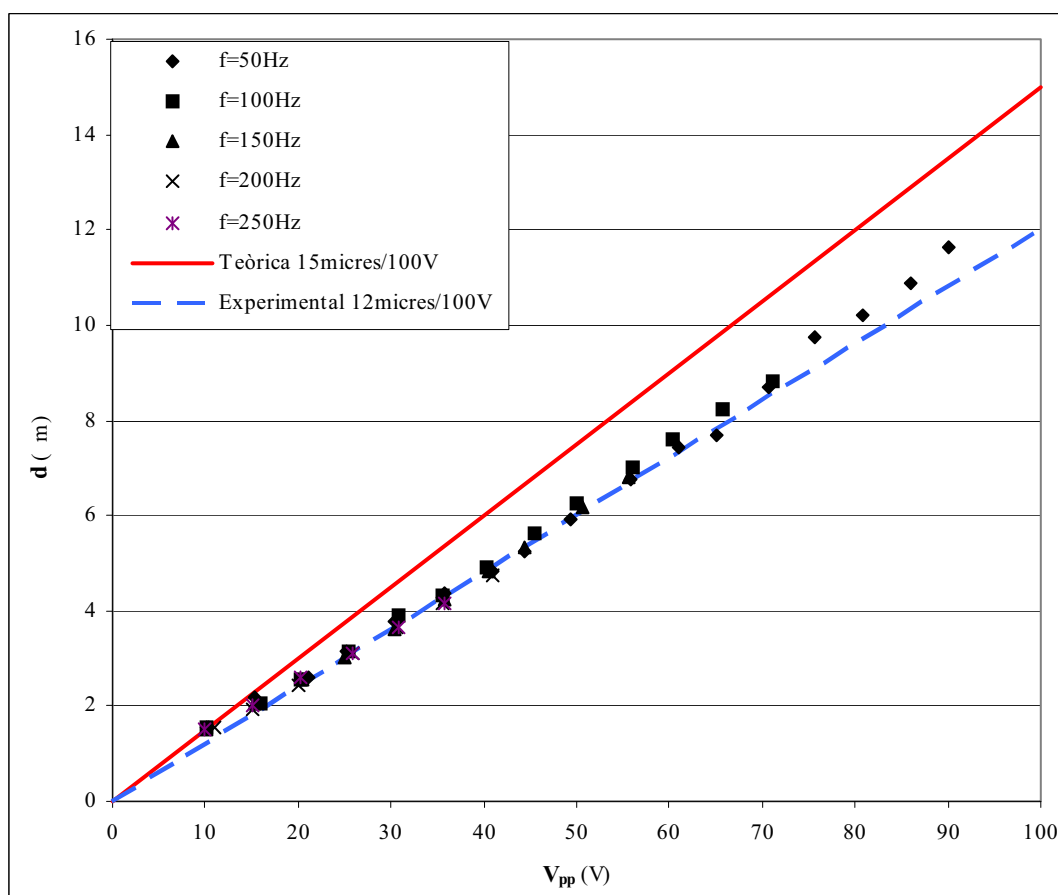


Fig.IV.40 Desplaçament de l'actuador piezoelèctric en funció de V_{pp} aplicada.

Es comença calibrant l'actuador piezoelèctric amb el detector de desplaçament. La gràfica de la Fig.IV.40 mostra la relació entre el desplaçament, d , produït per l'actuador en funció de la tensió pic a pic, V_{pp} , aplicada per a diferents freqüències, comparant-la amb la donada per les especificacions teòriques del piezoactuador. Segons el "datasheet" del piezoactuador, el seu desplaçament en funció de la tensió aplicada és proporcional a les $15\mu\text{m}/100\text{V}$. En canvi, a nivell experimental el desplaçament produït per les amplituds de les tensions d'excitació a diferents freqüències és proporcional a les $12\mu\text{m}/100\text{V}$.

El desplaçament del piezoactuador en micres, Y_o , en aplicar una amplitud tensió eficaç V_{rms} , correspon a:

$$Y_o = 2\sqrt{2}V_{rms} \cdot 0.12 \quad (\text{IV.13})$$

D'altra banda, segons el "datasheet" del fabricant, la freqüència de ressonància del piezoelèctric és 69kHz, molt per sobre de les freqüències de treball utilitzades.

Per poder agilitzar l'adquisició de mesures del generador de forma sistemàtica per la seva caracterització, s'ha automatitzat mitjançant un programa realitzat amb LABVIEW. Aquest programa controla els diferents instruments del muntatge experimental, Fig.IV.41 i recull les mesures a través del port USB d'entrada d'un ordinador portàtil. El port USB està connectat amb els aparells de mesura mitjançant una targeta **GPB-USB-HS National Instruments**.

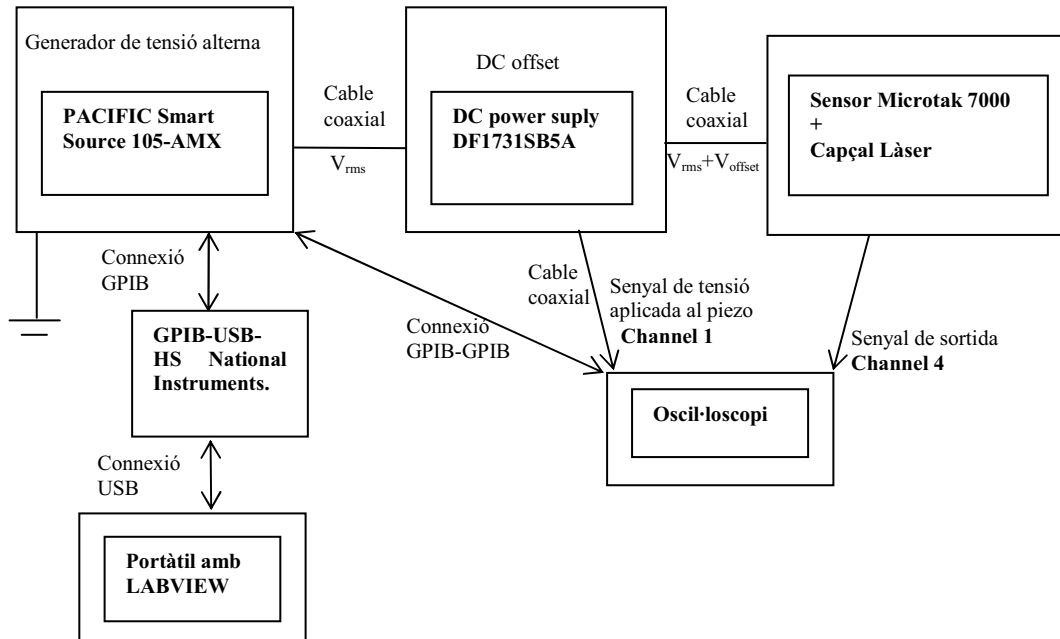


Fig.IV.41 Esquema del muntatge experimental per mesurar de forma automàtica el desplaçament en funció de la freqüència.

En la resta dels experiments, degut a les limitacions del controlador de *Thorlabs*, s'haurà d'utilitzar un generador de tensió alterna més potent per a excitar el piezoactuador perquè pugui donar un corrent (o voltatge) prou elevat a freqüències que poden arribar als kHz. El generador triat ha estat la **PACIFIC Smart Source 105-AMX**, que pot generar senyals amb unes freqüències entre els 50Hz i els 5KHz a tensions de sortida altes (V_{rms} de fins a 135V) i amb una intensitat màxima de sortida de la font de $I_{out,rms}=4A$. A més a més, aquest generador també es pot controlar externament de forma automàtica mitjançant una connexió GPIB.



Fig.IV.42 Generador de tensió alterna PACIFIC Smart Source

El funcionament manual del generador de tensions, *Fig.IV.42*, es realitza introduint el valor de freqüència $Freq$, el valor de tensió eficaç a aplicar V_{rms} , i la forma d'ona (sinusoïdal) amb la tecla PROGRAM. Tal i com s'ha mencionat abans, els valors de V_{rms} i $Freq$ s'han d'escollir de forma que la intensitat I donada per la font sigui suficient per alimentar l'actuador piezoelèctric. En la *Fig.IV.43* es mostren els valors calculats de la intensitat amb la que s'hauria d'alimentar l'actuador piezoelèctric en funció de la V_{pp} i de la freqüència.

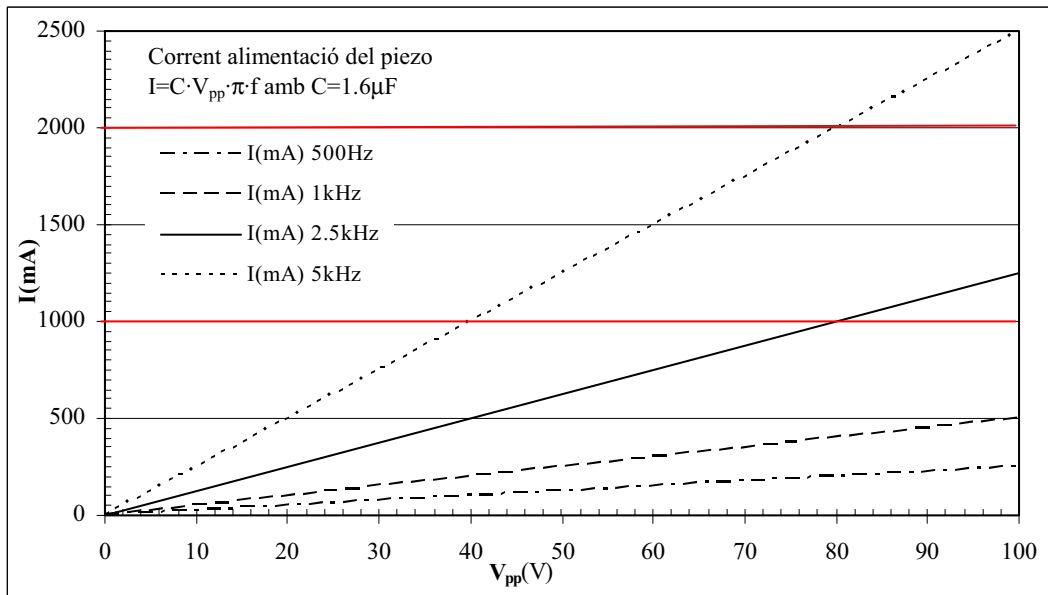


Fig.IV.43 Intensitat d'alimentació, I , en funció de la tensió pic a pic, V_{pp} aplicada en el piezoactuador.

D'aquesta gràfica es pot comprovar com la intensitat es manté inferior a 2.5A en tot el rang de tensions necessàries per alimentar el piezoactuador (fins a 100V) i de freqüències (fins a 5kHz). En ser una intensitat menor que el corrent màxim proporcionat per la font assegura una resposta correcta en el desplaçament del piezoactuador.

En aquestes condicions sempre es fixa manualment la tensió d'offset a 50V per assegurar que el piezoactuador no s'alimentarà mai negativament.

El programa de captura de la Fig.IV.44 realitza una gràfica del desplaçament, d , en funció de la freqüència, $Freq$, i una altra del desplaçament normalitzat al màxim, d/d_{max} , en funció de la $Freq$.

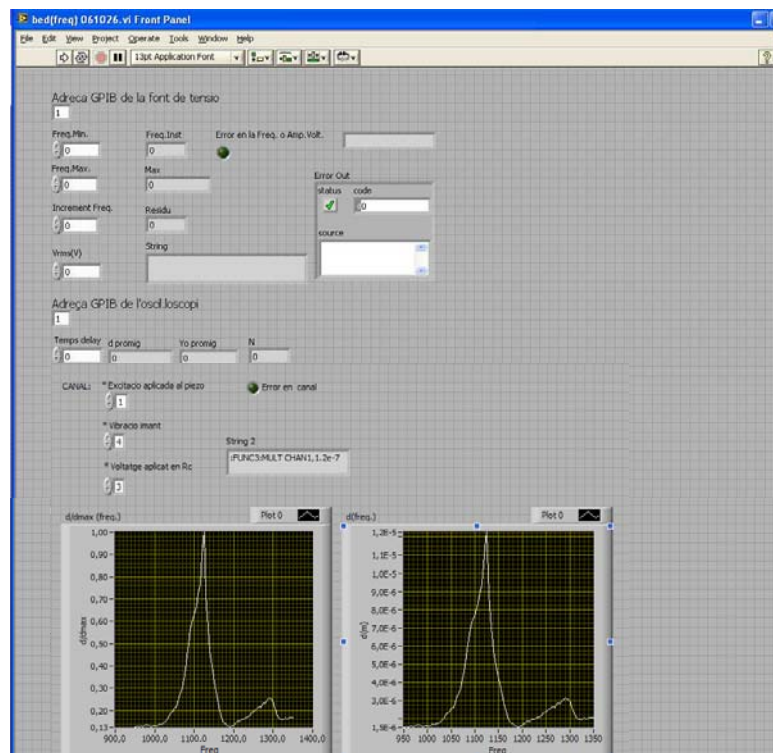


Fig.IV.44 Programa automàtic de mesura del desplaçament, d , en funció de la freqüència, $Freq$. Membrana de SU8 de $8 \times 8 \text{mm}^2$ i $100\mu\text{m}$ de gruix amb forats allargats i un imant de $7 \times 7 \times 2 \text{mm}^3$ per un $V_{rms}=2V$ i $R_L=600\Omega$.

En el programa es necessitarà entrar la freqüència mínima donada pel generador de tensió alterna per excitar el piezoactuador, *Freq.Min.*, la freqüència màxima, *Freq.Max.*, i el seu increment *Increment Freq.*, el valor de tensió eficaç del generador d'alterna, *Vrms* i finalment l'interval de temps entre mesures, *Temps delay*.

De forma anàloga, el programa de captura de la *Fig.IV.45* realitza una gràfica del desplaçament, *d*, en funció de la tensió, *Vrms*, i una altra del desplaçament normalitzat al màxim, *d/dmax*, en funció de la *Vrms*.

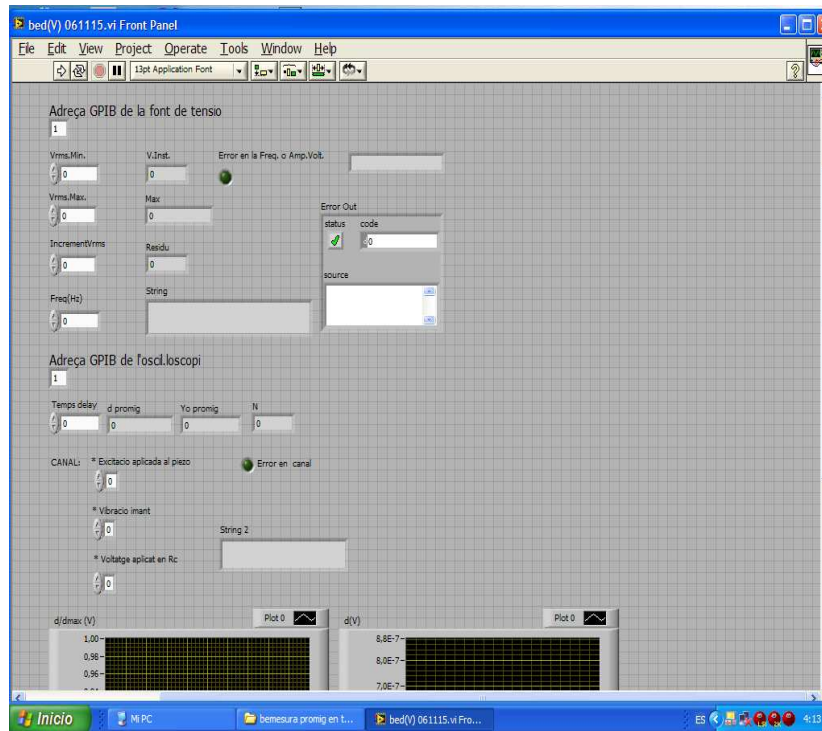


Fig.IV.45 Programa automàtic de mesura del desplaçament, *d*, en funció de la tensió, *Vrms*.

En aquest programa únicament s'hauran d'entrar les tensions mínima, màxima i el seu increment (expressades en valors eficaços del generador d'alterna), aplicades al piezoactuador, que corresponen a *Vrms.Min.*, *Vrms.Max.* i *IncrementVrms* respectivament, la seva freqüència de treball del generador d'alterna, *Freq* i els intervals de temps entre mesures, *Temps delay*.

IV.4.1.2. Sistemes de mesura del voltatge generat

La imatge de la *Fig.IV.46* mostra el muntatge experimental per caracteritzar elèctricament el dispositiu.

El dispositiu a caracteritzar s'acostuma a posar dins d'una cambra de buit, *Fig.IV.47*, per evitar l'esmoreïment paràsit de l'aire i els problemes associats a l'absorció de la humitat, especialment crític quan les membranes són polímers com ara el kapton amb uns paràmetres mecànics molt sensibles a aquests canvis.

Aquesta cambra té per una banda una entrada coaxial per alimentar el piezoactuador i per altra banda, li surten uns connectors per recuperar el senyal del dispositiu. Aquestes sortides corresponen als extrems de la bobina, on se li connecta una resistència de càrrega, *R_L* i se'n mesura la caiguda de tensió entre els extrems amb una sonda de l'oscil·loscopi.

Per a caracteritzar elèctricament i de forma automàtica els dispositius ressonadors, mesurant-ne les tensions i/o potències generades, s'ha realitzat un programa en LABVIEW. Aquest programa permet controlar els diferents instruments que intervenen en el sistema de mesura.

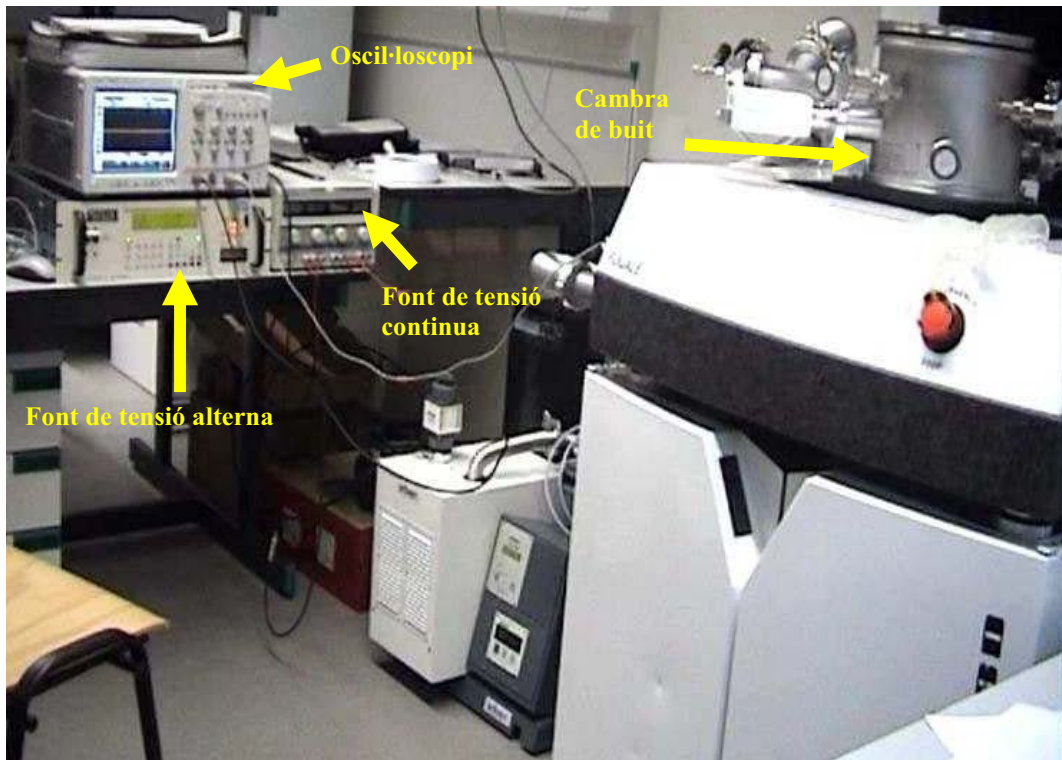


Fig.IV.46 Imatge fotogràfica del muntatge experimental per caracteritzar elèctricament el dispositiu ressonador.

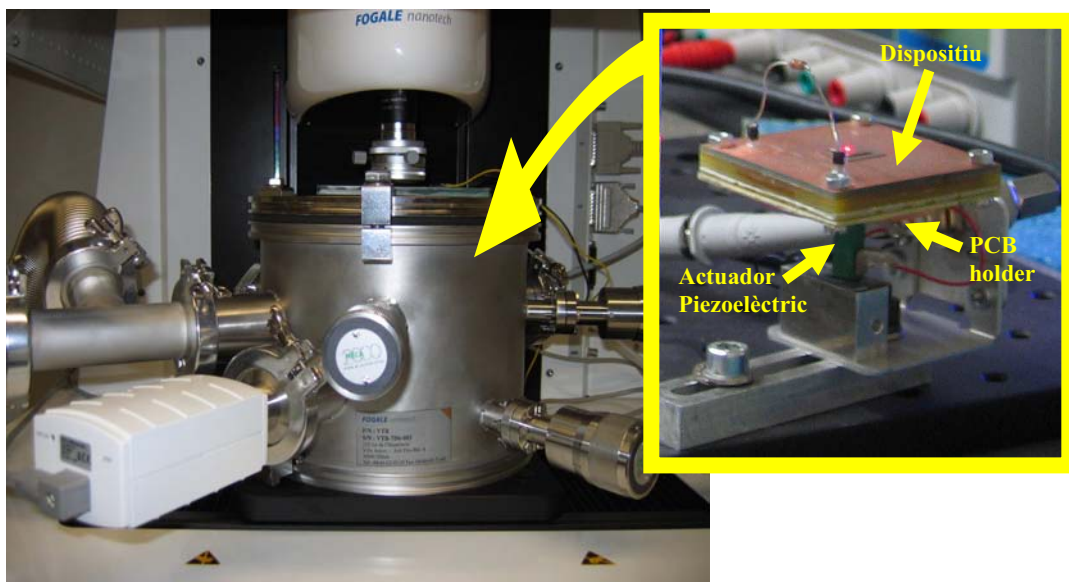


Fig.IV.47 La imatge de la cambra de buit dins de la qual es col·loca el prototip a caracteritzar sobre un actuador piezoelèctric al qual se li aplica una vibració controlada.

IV.4.1.2.1. Voltatge en funció de la freqüència

Una forma de caracteritzar elèctricament la bobina es mesurant el voltatge generat mitjançant un escombrat en freqüència que pot ser de forma creixent o decreixent. Es realitzarà automàticament mitjançant un programa LABVIEW que controli els diferents instruments del muntatge experimental, segons l'esquema de la Fig.IV.48.

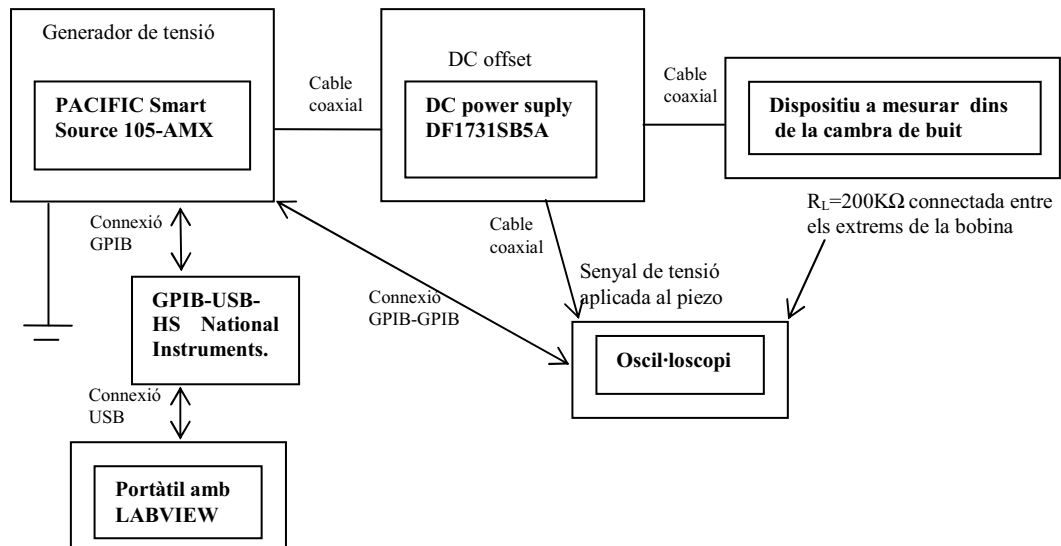


Fig.IV.48 Esquema del muntatge experimental per mesurar de forma automàtica la tensió generada en funció de la freqüència.

Per aquestes mesures, s'ha escollit un valor alt de $R_L = 200\text{k}\Omega$, amb l'objectiu de poder mesurar la tensió màxima generada, $V_{o\ max}$.

El programa d'automatització de la Fig.IV.49, a més a més de les mesures de la tensió generada en funció de la freqüència, $V(freq)$, permet mesurar el desplaçament si les mesures es realitzen en l'aire. Es necessitarà entrar els següents paràmetres: els valors de les freqüències de treball mínima, màxima i el seu increment donades pel generador de tensió alterna, $Freq.Min.$, $Freq.Max.$ i $Increment\ Freq.$ respectivament, els valors rms. de les tensions mínima, màxima i el seu increment del generador en alterna: $Vrms.Min.$, $Vrms.Max.$ i $Increment\ Vrms$ respectivament i els intervals de temps entre mesures $Temps\ delay$. En executar-lo es generen els gràfics de la tensió generada en funció de la freqüència per a les diferents amplituds d'excitació de l'actuador piezoelèctric.

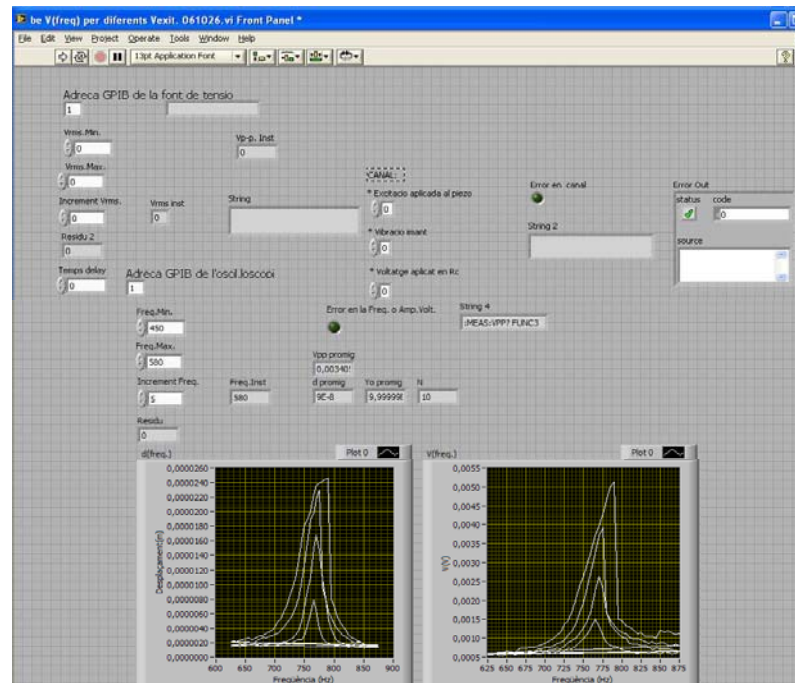


Fig.IV.49 Programa automàtic de mesura del voltatge generat en funció de la freqüència. Membrana de SU8 de $8 \times 8\text{mm}^2$ i $100\mu\text{m}$ de gruix amb forats rodons i un imant de $7 \times 7 \times 2\text{mm}^3$ per unes tensions aplicades al piezoactuador, $V_{rms} = 1, 2, 3$ i 4V (que corresponen a unes amplituds d'excitació de $0.8, 1.7, 2.5$ i $3.4\mu\text{m}$ respectivament) i una resistència de càrrega de $R_L = 125\Omega$.

IV.4.1.2.2. Voltatge i potència en funció de la resistència de càrrega

S'ha caracteritzat les tensions i potències generades pel dispositiu quan es troba en ressonància en funció de la resistència de càrrega, R_L , per diferents amplituds de la tensió d'excitació. L'objectiu és poder estimar els valors de l'esmoreïment paràsit, ζ_p , per cada excitació mitjançant l'ajust les dades experimentals amb les teòriques donades pel model del resonador esmoreït en velocitat, desenvolupat en el capítol anterior.

Aquestes caracteritzacions de la tensió i la potència es realitzaran, també de forma automàtica, amb LABVIEW utilitzant el muntatge experimental segons l'esquema de la Fig.IV.50.

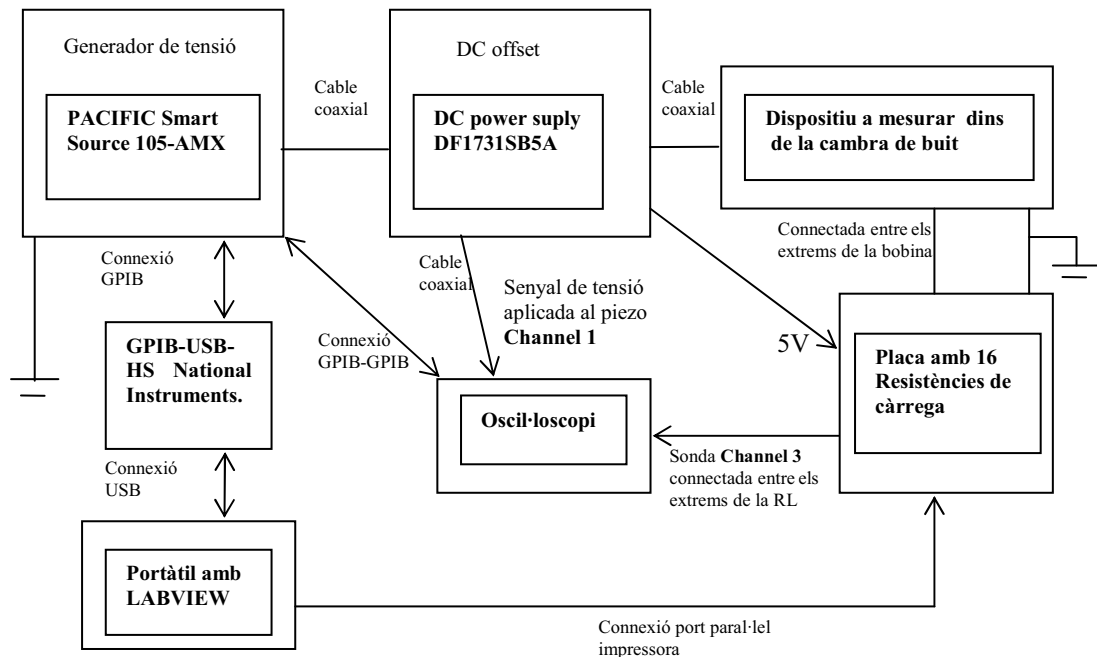


Fig.IV.50 Esquema del muntatge experimental per mesurar de forma automàtica la tensió i la potència generada en funció de la resistència de càrrega, R_L .

Per poder automatitzar el canvi de les diferents resistències de càrrega, es dissenya una placa amb un circuit que conté totes les resistències a escollir. Per realitzar-ho s'utilitza el programa PCAD-2006 i el rutejat es duu a terme amb el programa Espectra. El control de la placa amb les diferents R_L es realitza a través del port paral·lel del portàtil.

Per al muntatge de la PCB, Fig.IV.51, s'han emprat els següents components :

- Demultiplexor **CD74HCT154**: consta de 4 entrades i 16 sortides. La seva funció és l'elecció d'una de les 16 resistències de càrrega possibles en funció de les entrades.
- Inversors **SN74LS04N**: se n'utilitza un per a cada una de les sortides del demultiplexor.
- Transistors N-MOS **IRF520**: actuen com a interruptors. Depenent de si la tensió aplicada entre la porta *gate* G i el *source* S és 0 o 5V l'interruptor estarà obert o tancat. La resistència interna d'aquest transistor és $R_{DS(on)} < 0.27\Omega$, segons el datasheet de **SGS Thomson**. Per tant, el seu valor és suficientment petit com per no influir en la mesura de la R_L .
- Resistències de diferents valors per actuar com a resistències de càrrega i unes altres de 120Ω davant la porta *gate* G de cada transistor per protegir-lo de sobreintensitats. La placa s'haurà de connectar a una tensió de 5V per alimentar el demultiplexor i els inversors.

A més, hi haurà una sortida per tal de connectar en paral·lel la resistència de càrrega escollida als extrems de la bobina del nostre dispositiu i poder mesurar la tensió de sortida del generador.

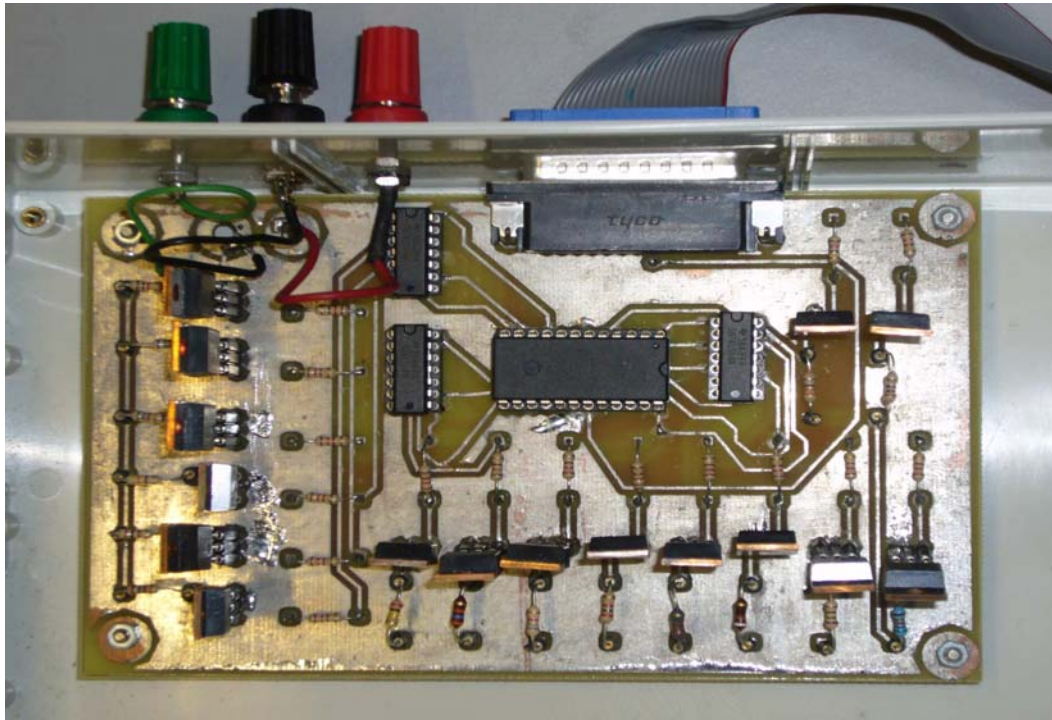


Fig.IV.51 Imatge fotogràfica de la PCB amb les 16 resistències.

En el programa d'automatització de la Fig.IV.52 únicament s'ha d'entrar el valor de la freqüència del generador de tensió alterna en la que el prototip a caracteritzar es troba en ressonància, *Freq.resonancia*, el valor de tensió alterna eficaç aplicada al piezoactuador, *Vrms* i els intervals de temps entre les mesures, *Temps delay*. Els valors de les 16 resistències de càrrega emprades, *R*, *R2*, *R3*...i *R16*, que es poden modificar físicament en la placa PCB (perquè estan muntades de forma extraïble), s'introdueixen en el programa.

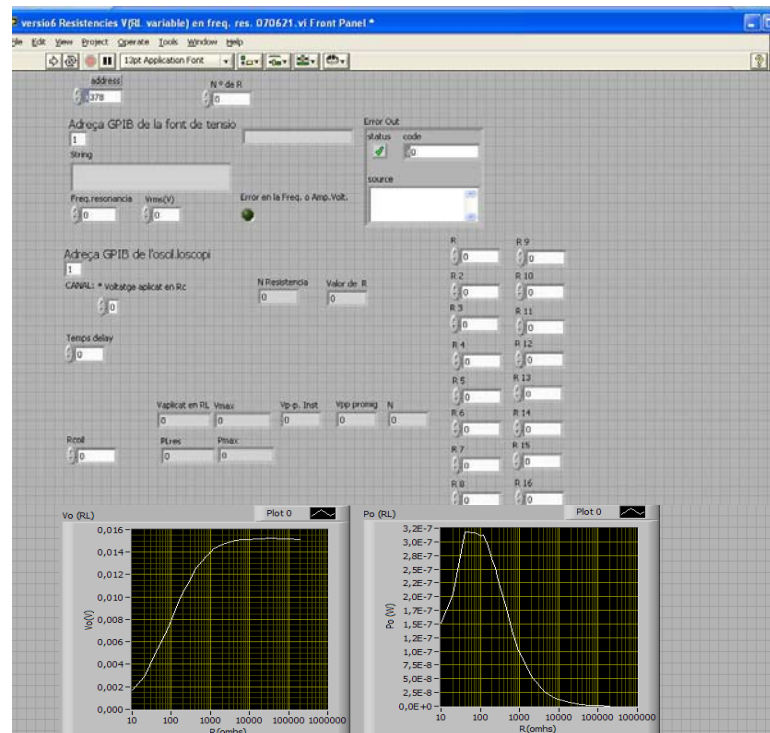


Fig.IV.52 Programa automàtic de mesura del voltatge generat quan el dispositiu està en ressonància en funció de la resistència de càrrega, R_L . Membrana de Kapton de $13 \times 13 \times 127 \text{ mm}^3$ i un imant de $7 \times 7 \times 4 \text{ mm}^3$ per una tensió d'excitació $V_{rms} = 2 \text{ V}$.

Cal tenir present que la freqüència de ressonància varia suaument amb la R_L . Per tant, pot succeir que per a una mateixa amplitud de la tensió d'excitació, en canviar la R_L , s'hagi d'ajustar la freqüència de ressonància, aturar el programa i tornar-lo a engegar amb la nova freqüència.

IV.4.2. Resultats

Els resultats elèctrics i mecànics dels prototips fabricats s'obtenen de les caracteritzacions realitzades amb els muntatges experimentals descrits en l'apartat anterior.

Es comença enganxant cada un dels prototips a caracteritzar a l'actuador piezoelèctric de llarg recorregut. Aquest actuador aplica al dispositiu, situat a dins d'una cambra de buit, una vibració controlada de fins a $15\mu\text{m}$ de desplaçament en alimentar-lo amb una tensió sinusoidal de 100V pic a pic a la que se li ha sumat un offset de 50V, per evitar tensions negatives. De la cambra de buit, surten unes connexions per alimentar el dispositiu piezoelèctric i unes altres per recuperar el senyal de sortida del dispositiu amb l'oscil·loscopi.

Per realitzar la caracterització mecànica avançada, dins d'una cambra de buit on no hi pot entrar el dispositiu sensor de desplaçament, s'utilitzarà la pròpia bobina del microgenerador com a sensor mecànic.

IV.4.2.1. Caracterització elèctrica

Per a la caracterització elèctrica del prototip generador connectat a una resistència de càrrega, R_L , es mesuren les potències generades pel prototip en funció de la freqüència per a diferents amplituds d'excitació. Les mesures, representades en la gràfica de la *Fig.IV.53*, es realitzen mitjançant un escombrat en freqüència creixent i emprant la resistència de càrrega òptima per a la microbobina utilitzada, $R_{Lopt} = 83\Omega$, (formada per 52 espiras de Cu de $15\mu\text{m}$ de gruix, amb una amplada de pista de $20\mu\text{m}$ i $15\mu\text{m}$ de separació), que en maximitza la potència generada, P_{Lopt} , (equació III.22). Aquesta gràfica mostra com en augmentar l'amplitud de l'excitació apareixen fenòmens d'histèresi que causen una pèrdua de simetria dels pics i un desplaçament de la freqüència de ressonància, F_{res} , amb l'amplitud. No obstant, en la gràfica petita s'observa com per a una amplitud d'excitació baixa, de $0.8\mu\text{m}$, el comportament és lineal: el pic de ressonància és simètric perquè encara no ha aparegut la histèresi.

Posteriorment, s'analitzen les potències òptimes, P_{Lopt} , i les tensions màximes de sortida, $V_{o\ max}$. Aquest estudi es fa en condicions de ressonància. Es comparen els resultats de la tensió de sortida, V_o , (equació III.27) i la potència de sortida, P_L , (equació III.21) en funció de la resistència de càrrega, obtinguts per a una membrana foradada, *Fig.IV.54* i *Fig.IV.55* i una altra sense forats, *Fig.IV.56* i *Fig.IV.57*, assolint la ressonància mitjançant un escombrat en freqüències creixent (no lineal). En el buit no s'observen diferències significatives entre els dos tipus de membranes degut a que els forats no han introduït canvis notables en l'elasticitat del material. En ambdós casos, la freqüència de ressonància varia entre els 250 i 400Hz en funció de l'excitació aplicada. Aquesta variació és deguda al fenomen d'histèresi, que apareix quan s'arriba a la freqüència de ressonància mitjançant un escombrat en freqüència creixent. Amb aquestes condicions, es poden obtenir unes amplituds de vibració més grans però com a contrapartida són inestables. En aquesta situació, s'arriba a una tensió de sortida, $V_{o\ max}$, de més de 180mV, *Fig.IV.54*, i a una potència de sortida, P_{Lopt} , de l'ordre dels $50\mu\text{W}$, *Fig.IV.55*, per a una amplitud d'excitació de $5\mu\text{m}$.

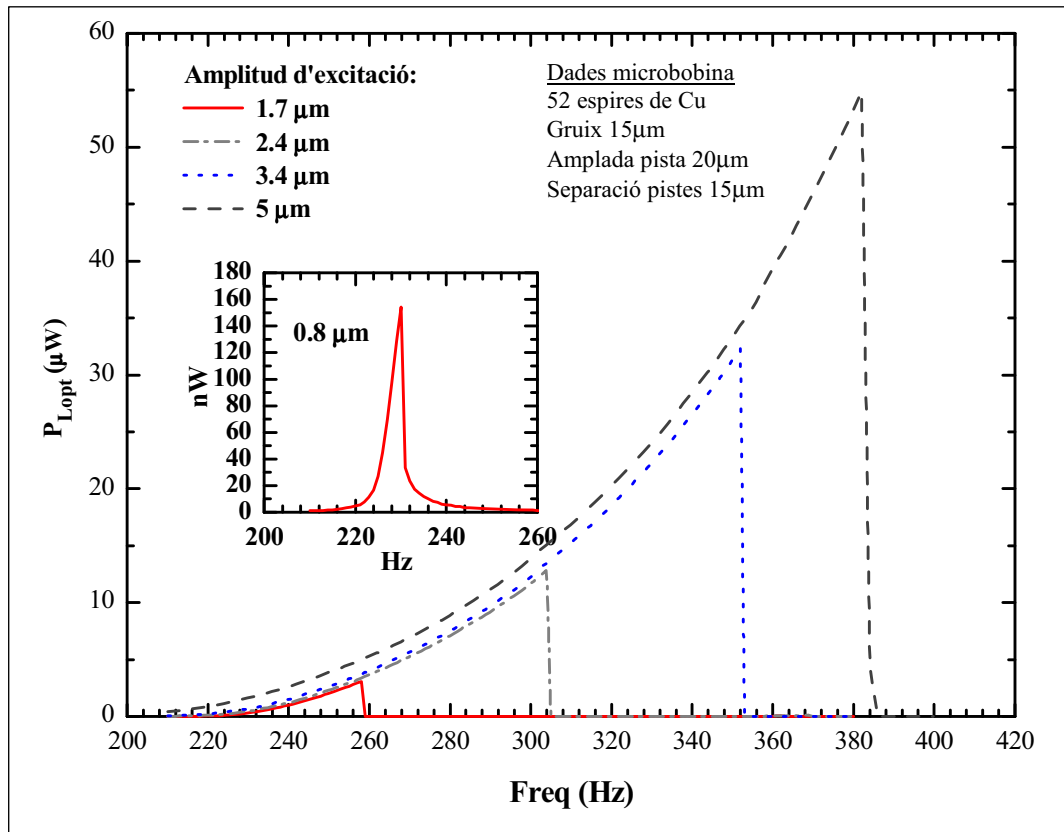


Fig.IV.53 Potència òptima de sortida, P_{Lopt} , mesurada amb una resistència de càrrega òptima, $R_{Lopt}=83\text{ohms}$ en funció de la freqüència, $Freq$, amb un escombrat creixent (no lineal) d'una membrana foradada de Kapton de $15 \times 15 \text{mm}^2$.

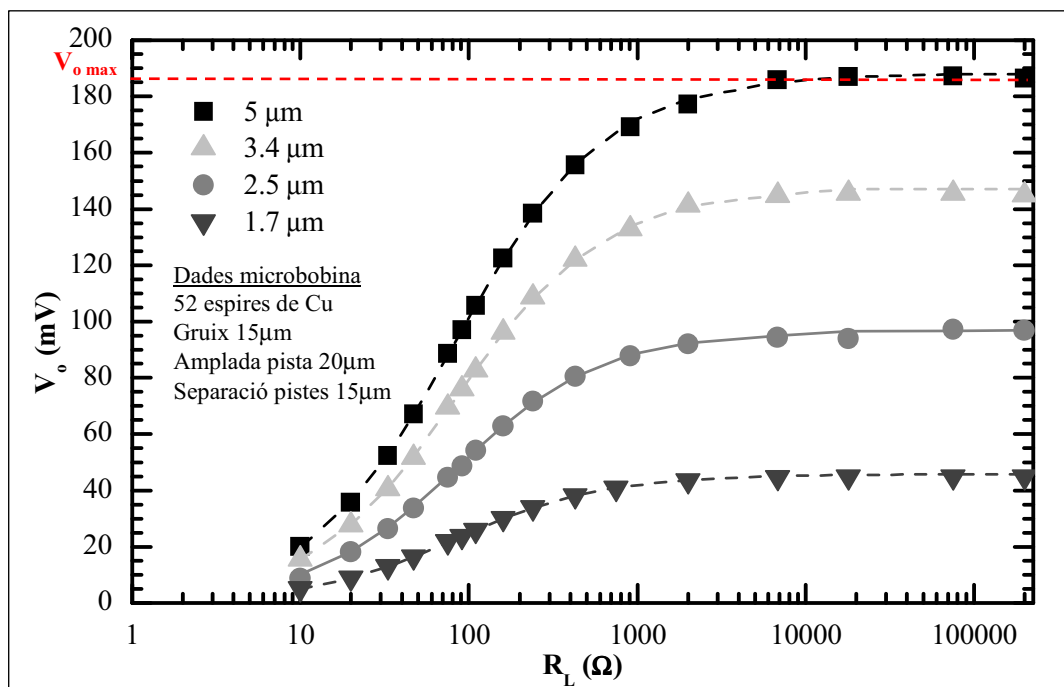


Fig.IV.54 Tensió de sortida, V_o , mesurada en condicions de ressonància (obtinguda amb un escombrat en freqüència creixent) en funció de la resistència de càrrega, R_L , per a diferents amplituds d'excitació. El dispositiu consta d'una membrana foradada de kapton ($15 \times 15 \text{mm}^2$).

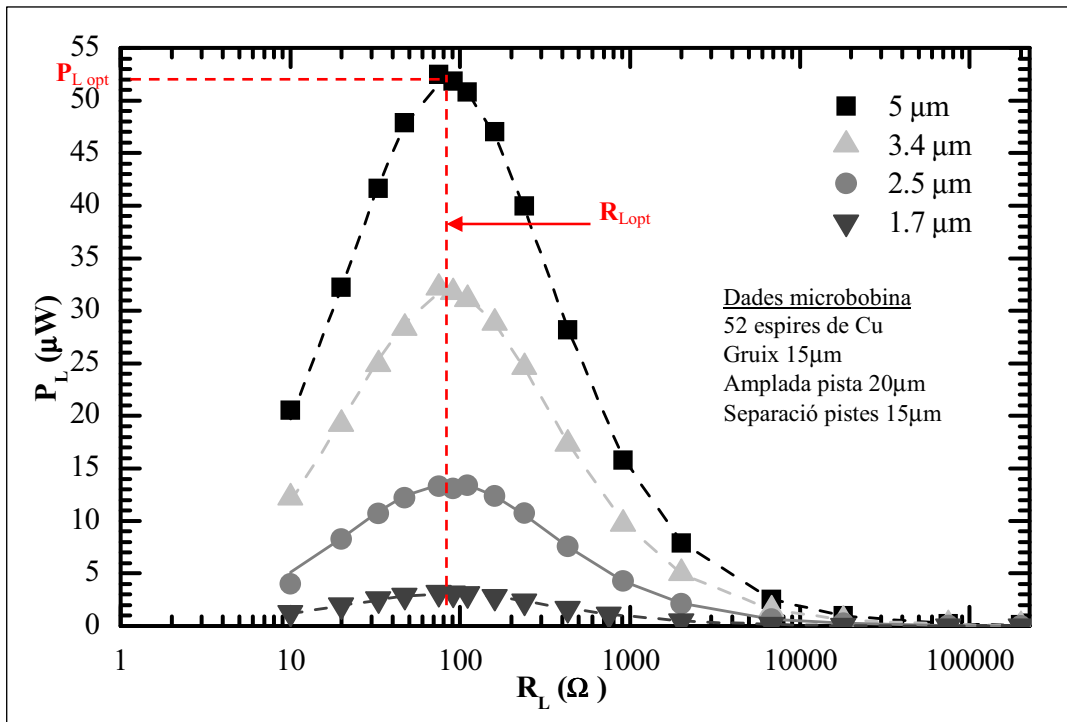


Fig.IV.55 Potència de sortida, P_L , mesurada en condicions de ressonància (obtinguda amb un escombrat en freqüència creixent) en funció de la resistència de càrrega, R_L , per a diferents amplituds d'excitació. El dispositiu consta d'una membrana foradada de kapton ($15 \times 15 \text{mm}^2$).

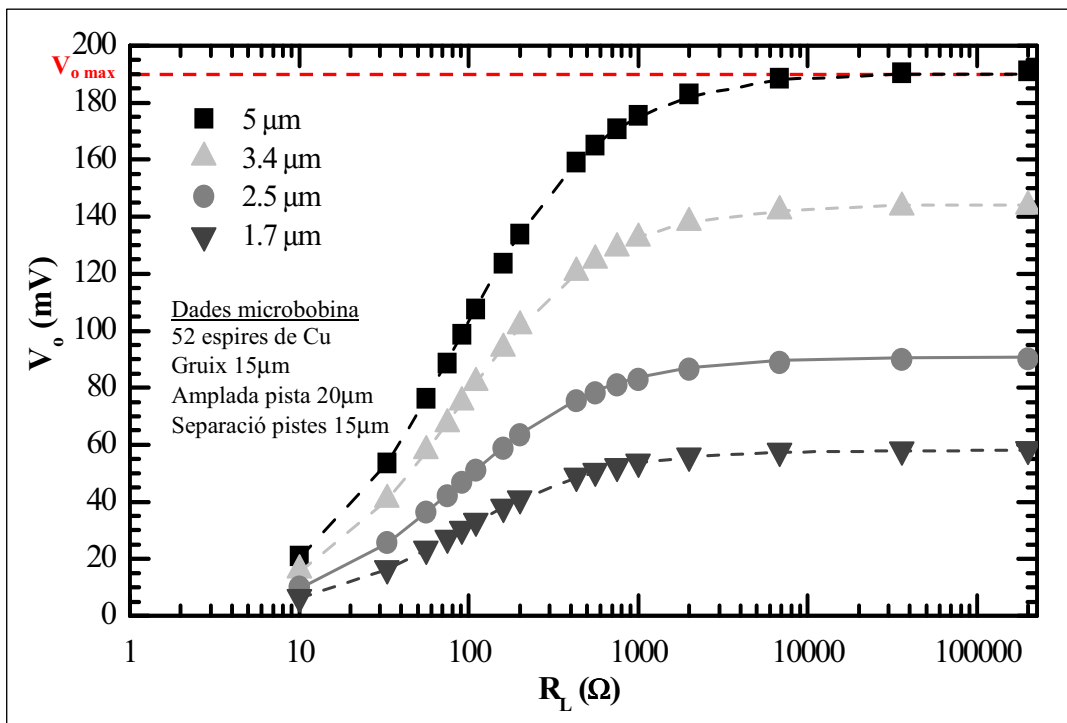


Fig.IV.56 Tensió de sortida, V_o , mesurada en condicions de ressonància (obtinguda amb un escombrat en freqüència creixent) en funció de la resistència de càrrega, R_L , per a diferents amplituds d'excitació. El dispositiu consta d'una membrana sense forats de kapton ($15 \times 15 \text{mm}^2$).

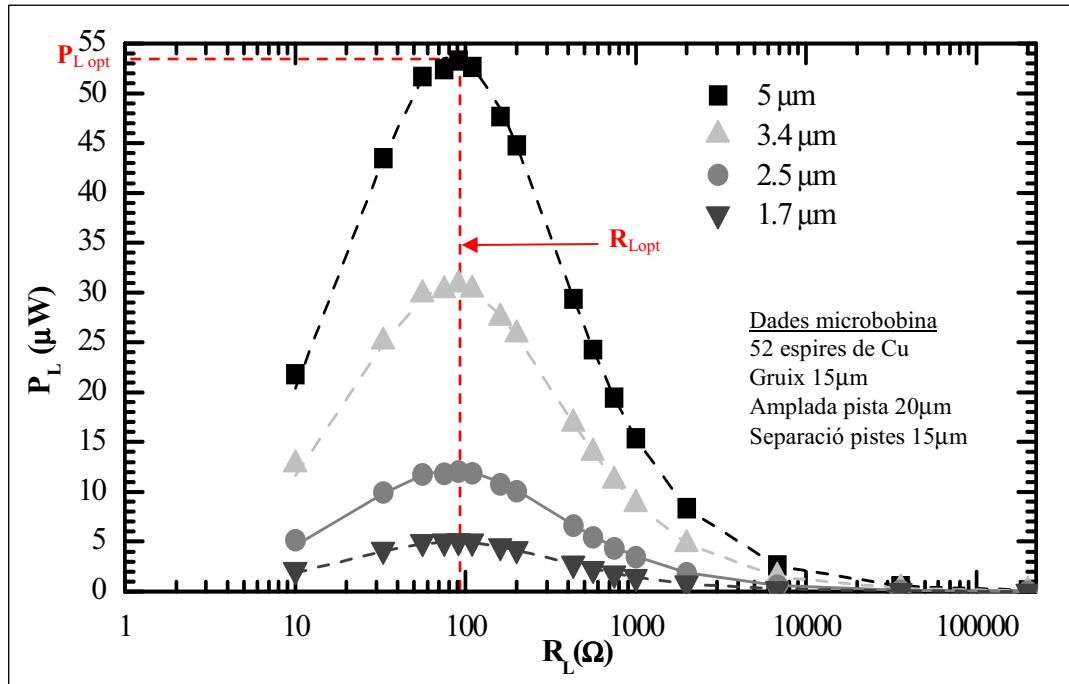


Fig.IV.57 Potència de sortida, P_L , mesurada en condicions de ressonància (obtinguda amb un escombrat en freqüència creixent) en funció de la resistència de càrrega, R_L , per a diferents amplituds d'excitació. El dispositiu consta d'una membrana sense forats de kapton ($15 \times 15 \text{mm}^2$).

Per altra banda, en les gràfiques de les Fig.IV.58 i Fig.IV.59 s'han estudiat respectivament les tensions màximes i les potències òptimes generades per a una membrana de Kapton sense forats en condicions de ressonància i sense histèresi. La freqüència de ressonància, trobada mitjançant un escombrat en freqüències decreixent (cas lineal), està al voltant dels 230Hz.

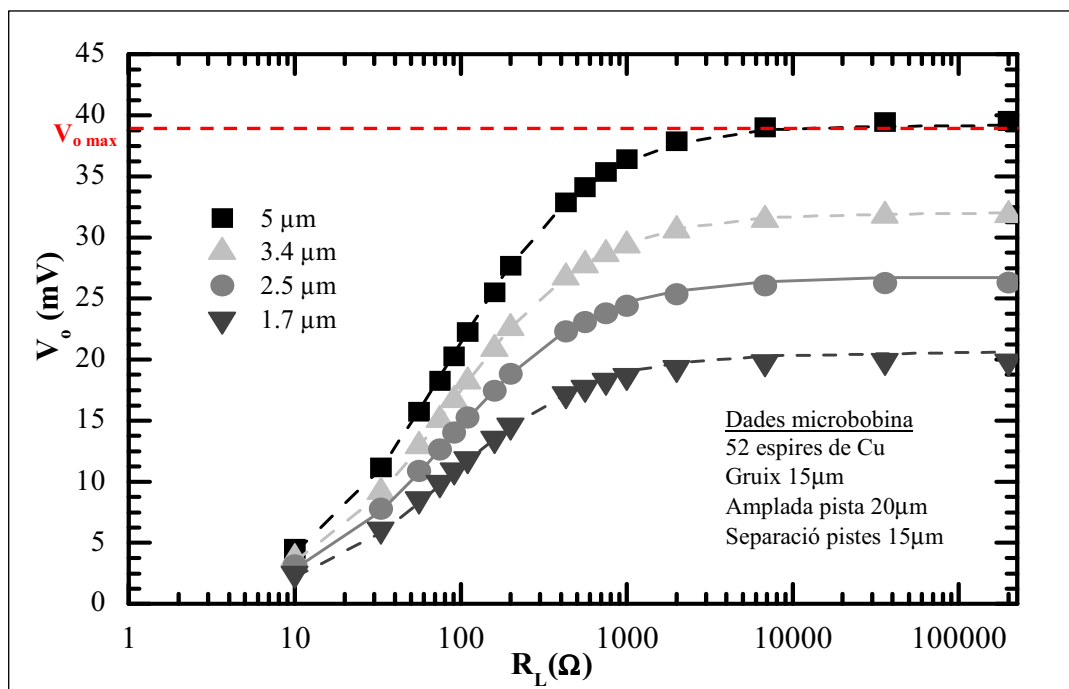


Fig.IV.58 Tensió de sortida, V_o , mesurada en condicions de ressonància (obtinguda amb un escombrat en freqüència decreixent) en funció de la resistència de càrrega, R_L , per a diferents amplituds d'excitació. El dispositiu consta d'una membrana sense forats de kapton ($15 \times 15 \text{mm}^2$).

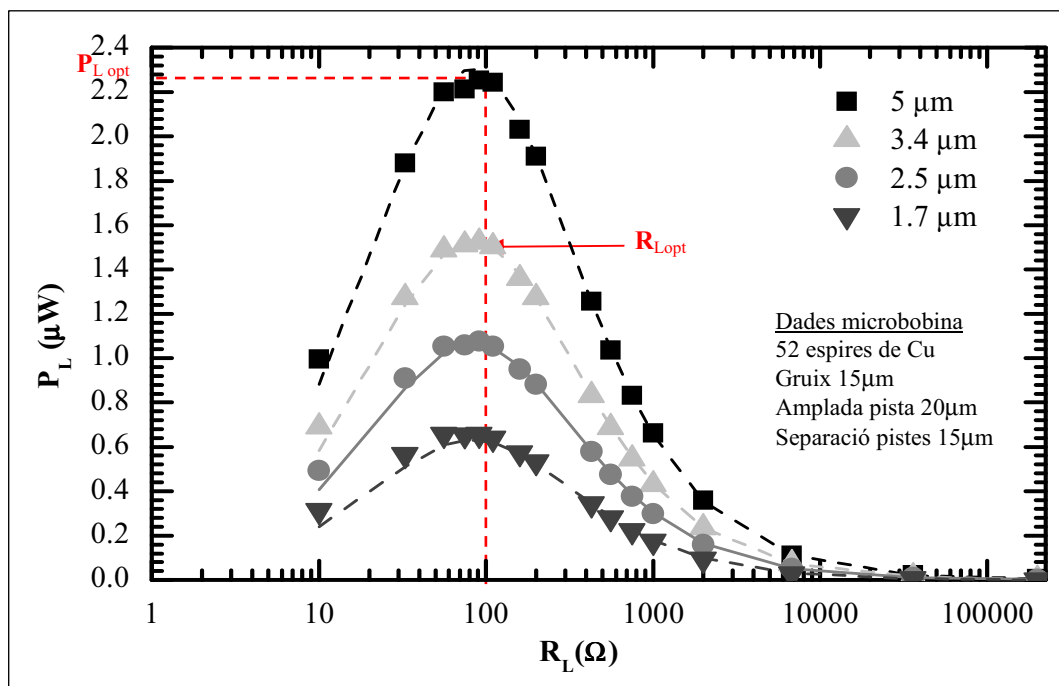


Fig.IV.59 Potència de sortida, P_L , mesurada en condicions de ressonància (obtinguda amb un escombrat en freqüència decreixent) en funció de la resistència de càrrega, R_L , per a diferents amplituds d'excitació. El dispositiu consta d'una membrana sense forats de kapton ($15 \times 15 \text{ mm}^2$).

Els resultats, basats en la fórmula teòrica de V_o (equació III.35) que relaciona l'esmoreïment paràsit amb la tensió, indicarien una disminució de l'esmoreïment paràsit aparent entre l'escombrat decreixent i creixent (casos lineal i no lineal respectivament), degut a que per una mateixa excitació s'obté una major amplitud de tensió.

A més a més, a partir de l'evolució de $V_{o \max}$ amb l'amplitud d'excitació, s'observa una saturació de la tensió de sortida que suggereix un augment de l'esmoreïment paràsit, Fig.IV.60.

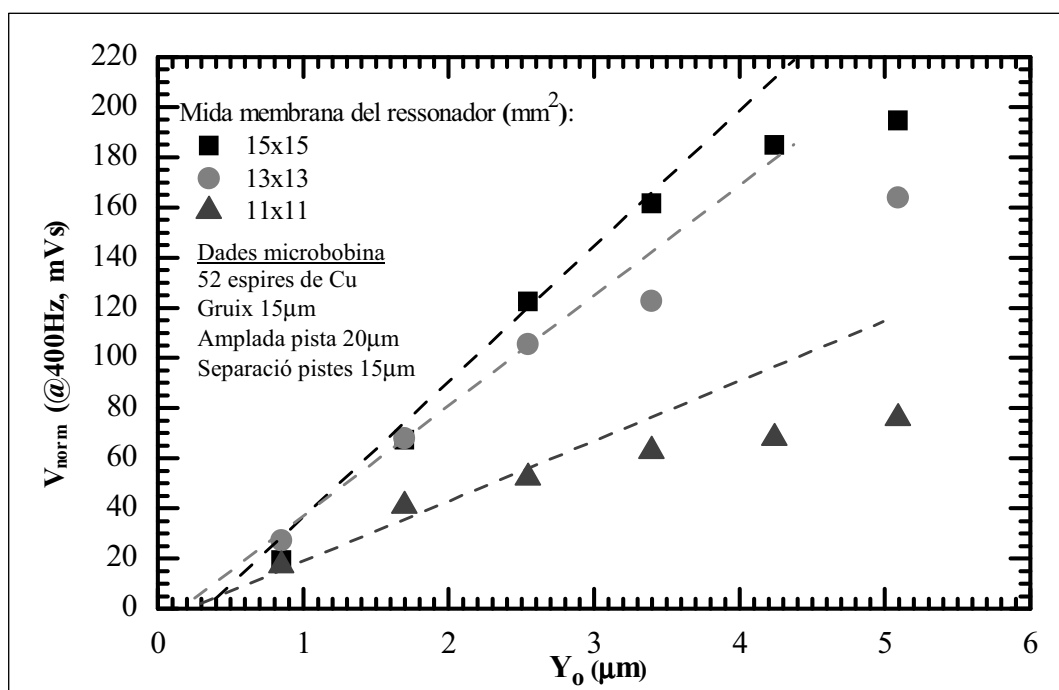


Fig.IV.60 Tensió màxima de sortida normalitzada a la freqüència de 400 Hz, V_{norm} , (obtinguda amb un escombrat de freqüència creixent) en funció de l'amplitud d'excitació, Y_o .

Aquest augment de l'esmoreïment paràsit aparent amb l'amplitud d'excitació és degut probablement a l'existència de pèrdues mecàniques causades per un fenomen conegut com a “*spring stiffening*” característic dels polímers [7].

Així doncs, s'ha vist que per a amplituds d'excitació altes es produeix un comportament no lineal caracteritzat per fenòmens d'histèresi. Aquests resultats suggereixen l'existència d'una limitació intrínseca en la utilització de polímers per a la fabricació de membranes ressonants. Tot i que es poden aconseguir nivells de sortida més alts, aquest comportament pot implicar greus limitacions en el disseny i funcionament del dispositiu.

IV.4.2.2. Caracterització mecànica

Degut als fenòmens observats a l'apartat anterior, es vol analitzar, a nivell mecànic, la influència del comportament no lineal del dispositiu ressonador amb el polímer de la membrana. Es realitzarà mitjançant un escombrat en freqüència creixent per al comportament no lineal i un altre de decreixent per al lineal.

El principal avantatge de fabricar membranes amb forats seria a nivell de reduir l'esmoreïment paràsit degut a l'aire. Per comprovar-ne la seva influència, es van foradar les membranes de Kapton i es van realitzar mesures en aire. No obstant, els resultats no varen ser concloents degut a la gran influència de la humitat ambiental absorbida per les membranes en la freqüència de ressonància. Aquesta era més gran que la introduïda per la geometria dels forats. Per altra banda, la fabricació de membranes de SU8 amb forats, encara que no sigui un material tant susceptible a la humitat, en feia augmentar la fragilitat. Per tant, si es vol obtenir una millor reproductibilitat de les mesures seria molt millor encapsular el dispositiu al buit que foradar-ne la membrana, fetl que introduiria una fragilitat addicional al ressonador.

Per tant, aquesta caracterització mecànica del prototip es realitza en la cambra de buit, emprant la pròpia microbobina com a dispositiu sensor.

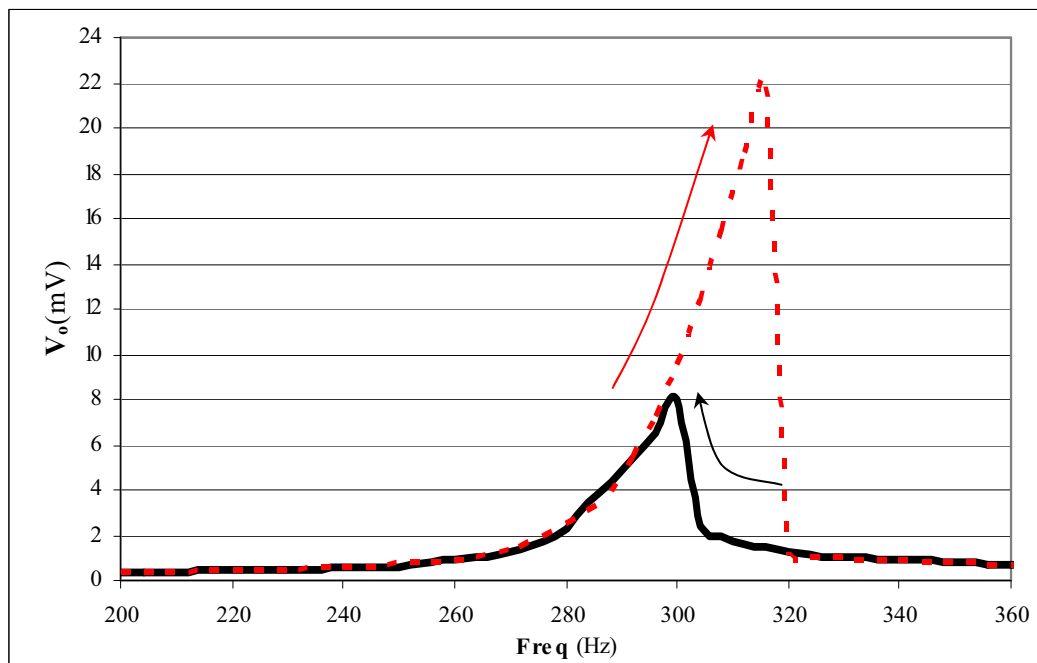


Fig.IV.61 Tensió de sortida, V_o , en funció de la freqüència per un dispositiu amb un ressonador de $11 \times 11 \text{mm}^2$ mesurada mitjançant un escombrat creixent (línia puntejada) i un de decreixent (línia contínua)

La gràfica de la Fig.IV.61 mostra els valors del voltatge de sortida obtinguts amb un dispositiu fabricat amb la bobina micromecanitzada de Cu de la Fig.IV.32 i un ressonador de 11x11mm². La sortida està connectada a una resistència de càrrega, $R_L=100k\Omega$ i l'amplitud d'excitació aplicada és de $Y_o=0.8\mu m$. Les corbes de la gràfica corresponen a mesures realitzades amb un escombrat de freqüències creixent (mostren un comportament no lineal) i un altre de decreixent (comportament lineal). Aquestes dades mostren l'existència d'un fenomen d'histèresi relacionat amb la presència dels efectes no lineals de les membranes polimèriques.

En la gràfica de la Fig.IV.62 s'estudia l'esmoreïment paràsit del dispositiu ressonador, format per una membrana de kapton de 15x15mm² i 127micres de gruix, en funció de l'amplitud d'excitació. Els valors d'esmoreïment paràsit depenen de les mesures experimentals elèctriques en virtut de la fórmula de referència (equació III.28):

$$\zeta_p = \frac{Y_o \omega_n}{2V_{o \max}} \left(\frac{d\phi}{dz} \right) \quad (IV.14)$$

Per tant, a partir de la mesura de les tensions màximes de sortida (amb $R_L=200K\Omega$) en condicions de ressonància (amb o sense histèresi) es pot trobar ζ_p .

En el cas lineal, quan no hi ha el fenomen d'histèresi, els valors de l'esmoreïment aparent paràsit de la membrana creixen amb l'amplitud d'excitació. En canvi, en el cas no lineal, l'histèresi augmenta amb l'amplitud d'excitació. Aquest comportament és característic dels polímers, en què el coeficient d'esmoreïment paràsit aparent disminueix donant una elasticitat addicional a la membrana. Aquest augment de la elasticitat comporta una major amplitud de vibració de l'imant i un increment en la potència generada. Per tant, tot i que el comportament no lineal dels polímers en augmentar l'excitació és inestable, la disminució "artificial" de l'esmoreïment paràsit augmenta la generació d'energia del dispositiu. No obstant, malgrat que en un primer moment l'esmoreïment paràsit disminueix, després torna a augmentar d'acord amb la saturació de la sortida comentada anteriorment en la Fig.IV.60.

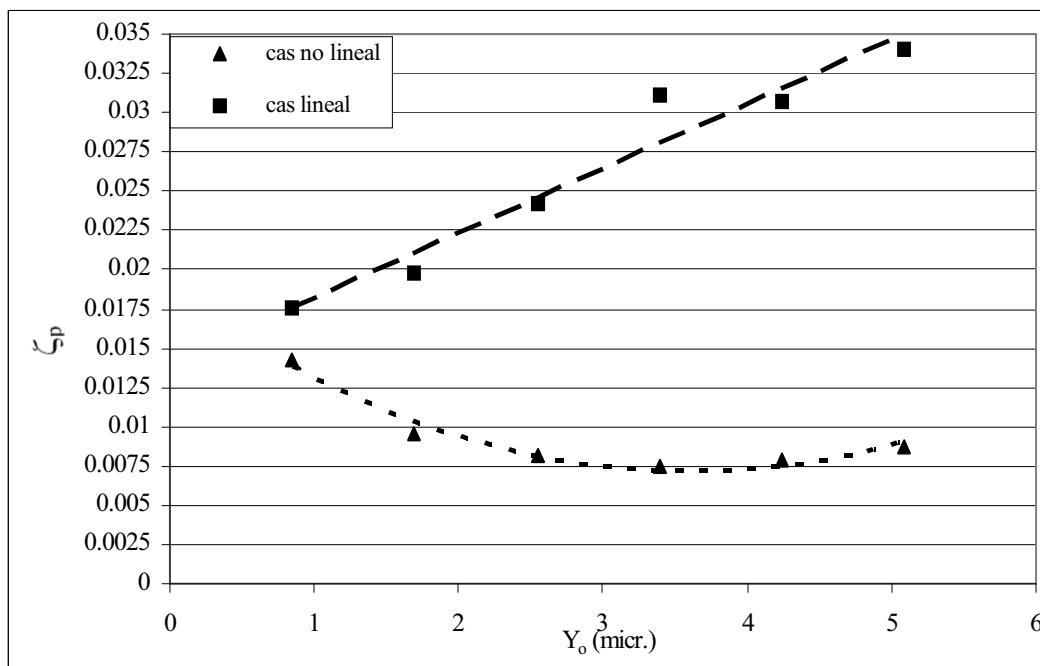


Fig.IV.62 Esmoreïment paràsit, ζ_p , en funció de l'amplitud d'excitació, Y_o , per a una membrana de kapton de 15x15mm² sense forats encapsulada al buit.

El comportament metastable del ressonador implica la necessitat de treballar sota condicions de freqüències d'excitació creixent per assolir els valors màxims de potència. A més a més, la dependència del pic de freqüència de ressonància amb l'amplitud de l'excitació s'haurà de tenir en compte en el disseny del dispositiu. Per a una aplicació pràctica, el pic de freqüència hauria d'estar ajustat a la freqüència de les vibracions de l'ambient.

IV.5. Comparació dels resultats amb els d'un prototip amb bobines de Cu convencionals

Es pretén estudiar la influència que tindria la substitució de la bobina planar micromecanitzada per una bobina convencional en el transductor electromagnètic, tant a nivell de potència com de voltatge. Es comença realitzant un conjunt de simulacions prèvies a la fabricació d'una bobina convencional amb fil de Cu i un cop s'ha fabricat i caracteritzat el dispositiu es comparen els resultats obtinguts amb els de les bobines micromecanitzades.

Pel que fa al comportament mecànic serà idèntic perquè el ressonador utilitzat serà el mateix. Aquest està format per una membrana de Kapton de $127\mu\text{m}$ fixada entre dos marcs de PCB i dos imants enganxats formant un imant de $7\times 7\times 6\text{mm}^3$.

IV.5.1. Simulacions

La bobina convencional emprada en les simulacions, *Fig.IV.63*, està realitzada amb espires de fil de Cu de $200\mu\text{m}$ de diàmetre, organitzades en n capes de m espires, donant un número total $n^{\circ}\text{esp}=n\cdot m$. Per generalitzar les simulacions es defineix una densitat vertical d'espores, $\text{dens}_{v.\text{esp}}$:

$$\text{dens}_{v.\text{esp}} = \frac{n}{\phi_{\text{esp}}} \quad (\text{IV.15})$$

essent ϕ_{esp} , el diàmetre del fil de Cu.

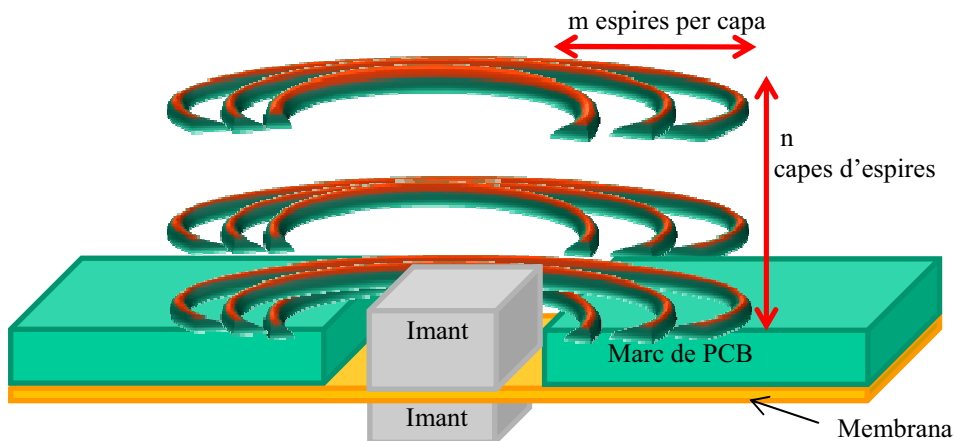


Fig.IV.63 Representació esquemàtica del dispositiu realitzat amb bobines de Cu convencionals

Per a fabricar el prototip, es realitzen unes simulacions seguint una optimització preliminar, tant del número d'espores com en la seva distribució. Per a cada número i distribució d'espores, es simula la variació de flux en funció de la distància relativa de la superfície superior de la bobina respecte el centre de l'imant, z , *Fig.IV.64*. D'aquesta manera, es troba cada una de les posicions $2z_{\text{max}}/a_{\text{imant}}$, normalitzades a la meitat de l'alçada de l'imant, que maximitzen la variació de flux i es representen en la gràfica de la *Fig.IV.65* en funció de la densitat vertical d'espores per a diferents números d'espores per capa, $\text{dens}_{v.\text{esp}}$.

La distància z_{max} que maximitza la variació de flux per a bobines amb poques espirees és lleugerament superior a la meitat de l'alçada de l'imant, a_{imant} . Aquest fet implica que, a diferència de les bobines planars d'un nivell estudiades fins ara, el pla de la cara superior de l'imant sempre quedarà per sota de la superfície superior de la bobina. En augmentar el número d'espirees per capa i , sobretot, el número de capes, la distància z_{max} augmenta allunyant la superfície superior de la bobina de l'imant. Aquest desplaçament no presenta simetria respecte al centre de la bobina, com es pot comprovar en la gràfica de la Fig.IV.66, on s'observa que la distància entre el centre de la bobina i el de l'imant, d_{cent} , augmenta amb el número d'espirees.

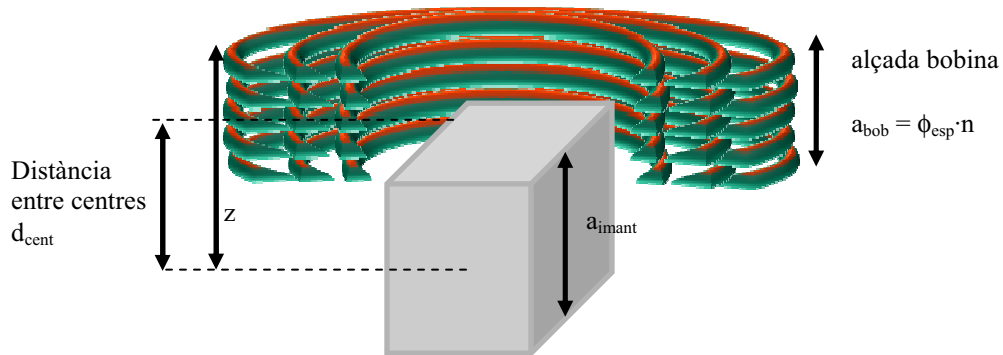


Fig.IV.64 Representació esquemàtica dels paràmetres del dispositiu

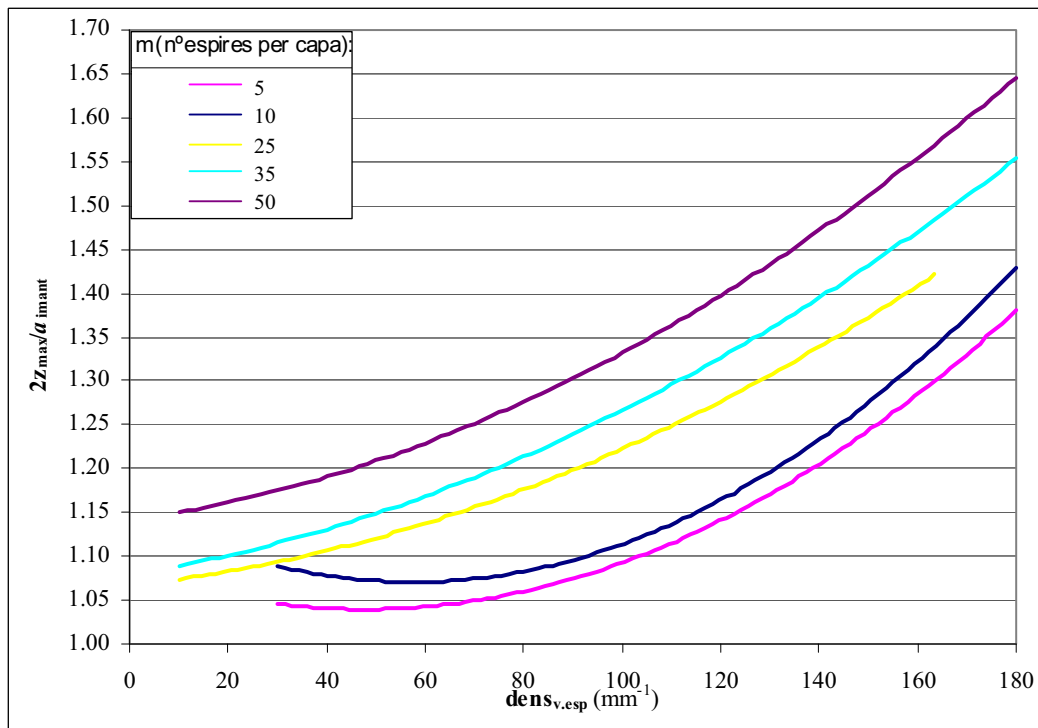


Fig.IV.65 Simulacions de la posició, $2z_{max}/a_{imant}$, de la superfície superior de la bobina respecte el centre de l'imant que maximitza la variació de flux normalitzada a la meitat de l'altura de l'imant en funció de la densitat vertical d'espirees, $dens_{v,esp}$, per diferents ocupacions de cada capa, m .

A més a més, la gràfica de la Fig.IV.66 mostra com la distància, $2d_{cent}/a_{imant}$, entre els centres de la bobina i de l'imant, normalitzada a la meitat de l'altura de l'imant, disminueix quan la densitat vertical d'espirees de la bobina, $dens_{v,esp}$, i el número d'espirees per capes, m , augmenten. Això significa que els centres de la bobina i de l'imant tendeixen a coincidir per a una densitat d'espirees molt gran.

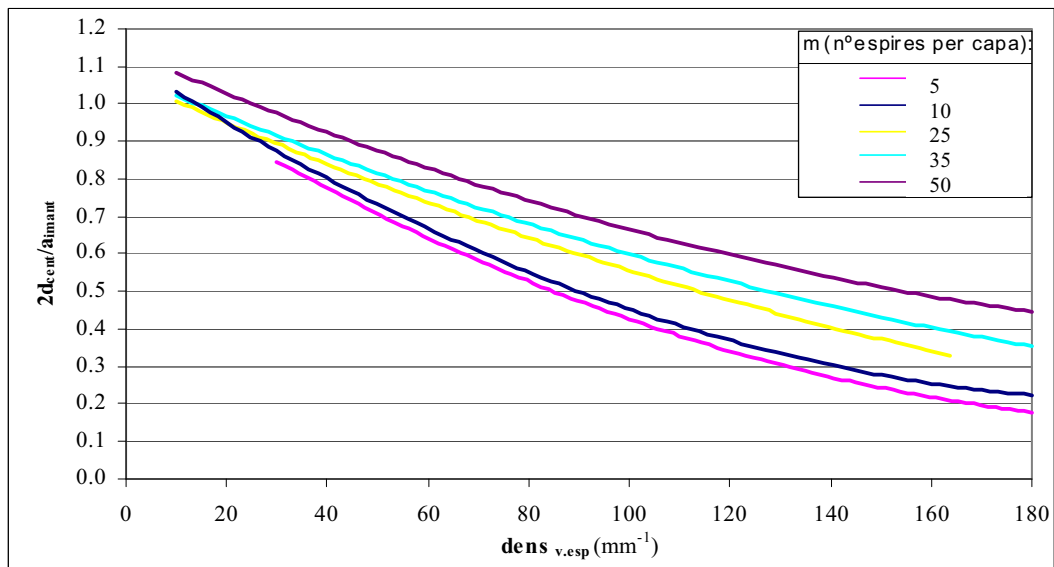


Fig.IV.66 Simulacions de la posició, $2d_{cent}/a_{Imant}$, del centre de la bobina respecte el centre de l'Imant que maximitza la variació de flux normalitzada a la meitat de l'altura de l'Imant en funció de la densitat vertical d'espines, $dens_{v,esp}$, per diferents ocupacions de cada capa, m .

En la gràfica de la Fig.IV.67 es mostren les simulacions de la variació de flux, $(d\Phi/dz)_{max}$, generada per una bobina, en la posició relativa imant-bobina, z_{max} , que la maximitza en funció del número d'espines, $n^{o}esp$, de fil de Cu de $200\mu m$ de diàmetre pels dos casos extrems: per una banda, quan totes les espines estan distribuïdes en una única capa i per altra banda, quan cada una de les espines està situada en una capa diferent. De les simulacions es dedueix que la variació de flux màxima és una mica més gran per a una distribució d'espines en una única capa fet que estaria relacionat amb la forma de les línies del camp magnètic. Per tant, per maximitzar la variació de flux, $(d\Phi/dz)_{max}$, s'hauria de fabricar una bobina amb un número d'espines per capa, m , lleugerament superior al número de capes, n . D'altra banda, igual que en el cas de les bobines planars anteriors, el nucli de la bobina serà quadrat, per ajustar el nucli de la bobina a la forma de l'Imant i així maximitzar la variació de flux obtinguda amb el desplaçament de l'Imant.

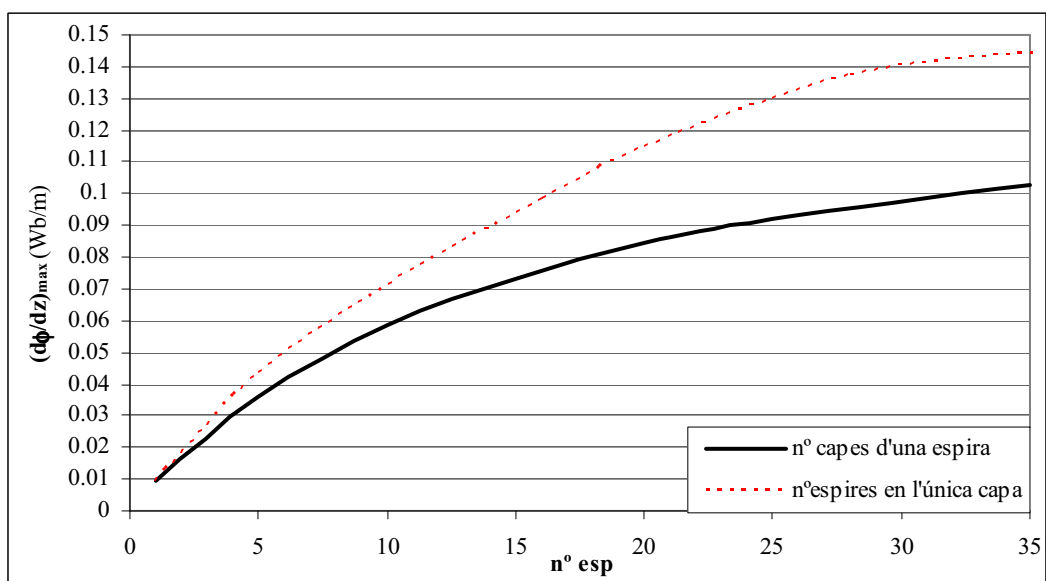


Fig.IV.67 Simulació de la variació de flux total de la bobina, $(d\phi/dz)_{max}$, en funció del número d'espines segons la seva distribució, en una o en diferents capes. El fil de Cu de les espines simulades tenen $200\mu m$ de diàmetre

S'ha realitzat un estudi comparatiu de la variació de flux, $(d\phi/dz)_{max}$, la tensió de sortida, $V_{o\ opt}$ i la potència de sortida òptima, P_{Lopt} , aplicades a les resistències de càrrega òptimes, R_{Lopt} , en funció del número total d'espises, $n^{o\ esp}$, d'una bobina convencional de fil de Cu de 200 μ m de diàmetre per diferents distribucions d'espises en les gràfiques de les Fig.IV.68, Fig.IV.69 i Fig.IV.72 respectivament. A més, s'ha analitzat la tensió de sortida generada, $V_{o\ opt}$, en funció de la distribució de les espises, com ara el número de capes, n , i el número d'espises per capa, m , en les Fig.IV.70 i Fig.IV.71, respectivament i la potència de sortida òptima, P_{Lopt} , en funció del número de capes, n , Fig.IV.73. En cada cas, s'ha situat la bobina en la posició òptima respecte l'imant, segons les gràfiques anteriors i també s'ha hagut de calcular la resistència R_{Lopt} degut a la seva dependència amb el número d'espises. Les condicions d'excitació aplicades són també les corresponents a les vibracions induïdes per un forn de microones de 120Hz de freqüència i una amplitud d'excitació de $Y_o=4.4\mu$ m segons l'anàlisi realitzat per Roundy [1].

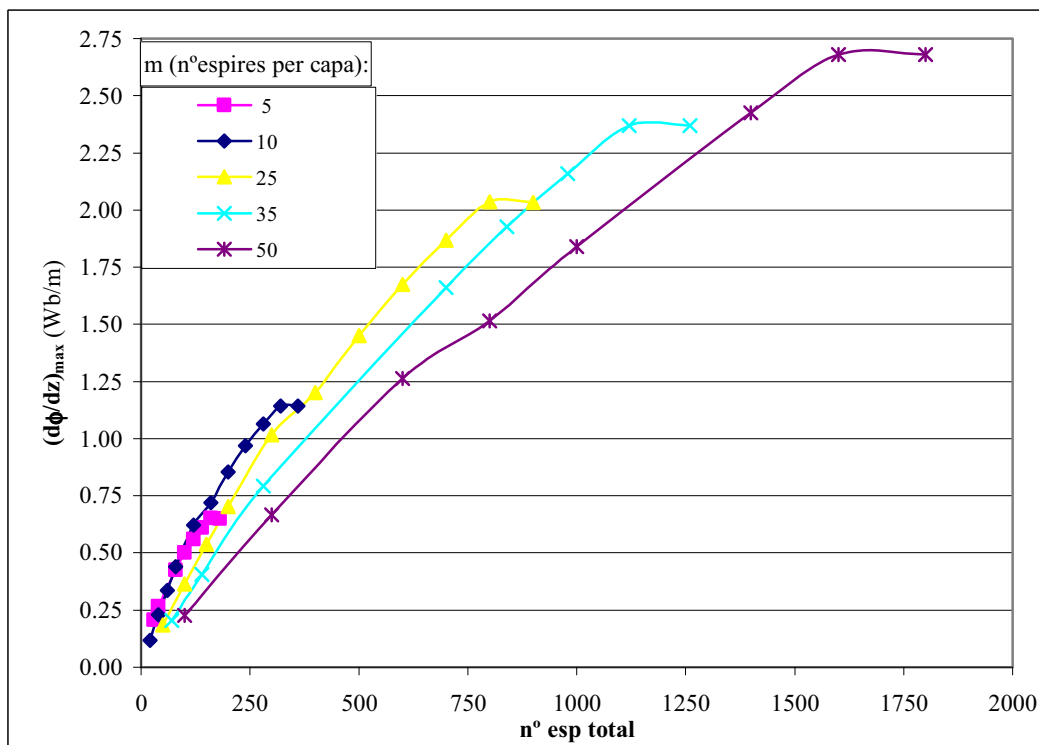


Fig.IV.68 Simulació de la variació de flux total de la bobina, $(d\phi/dz)_{max}$, en funció del número total d'espises segons el número d'espises per capa, m .

A partir d'un cert número d'espises segons les simulacions de la gràfica de la Fig.IV.68, s'observa una saturació de la variació de flux.

Des del punt de vista de les prestacions dels dispositius, aquests resultats es poden traduir al transformar amb l'equació III.35 els valors de les variacions de flux, obtenint les tensions de sortida, $V_{o\ opt}$, aplicades en la resistència R_{Lopt} , en funció del número d'espises total segons la distribució entre les diferents capes, representades en la Fig.IV.69. En aquesta gràfica s'observa com el número d'espises total a la que es produeix la saturació de la tensió, $V_{o\ opt.sat}$ augmenta amb el número d'espises per capa i el seu valor també.

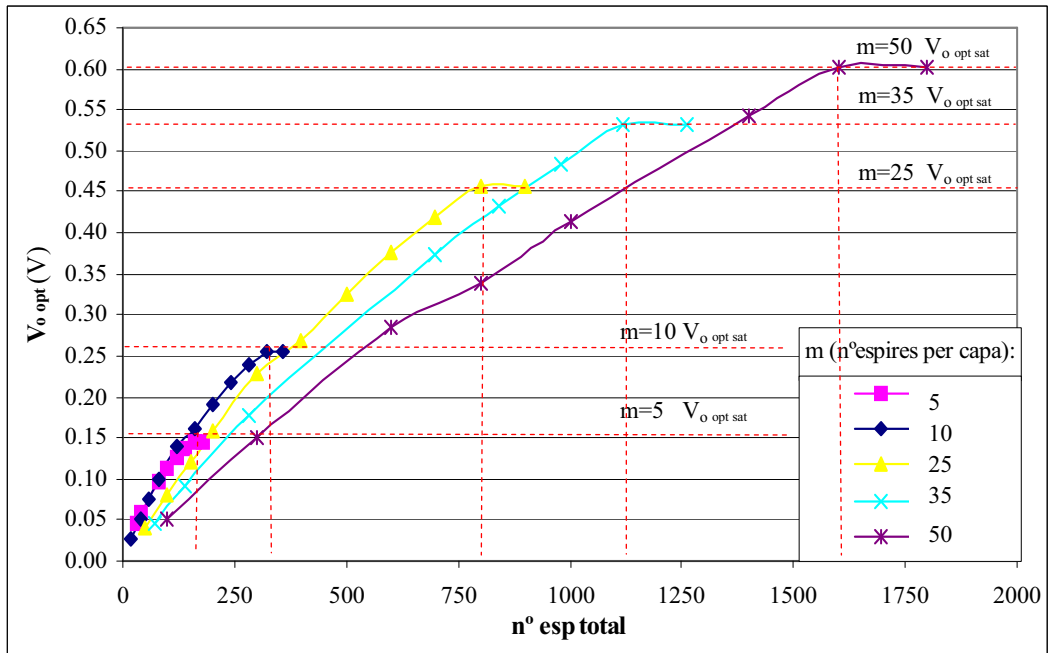


Fig.IV.69 Simulació de la tensió de sortida, $V_{o\ opt}$, aplicada a la resistència de càrrega òptima calculada per cada simulació en funció del nombre total d'espines, $n^{\circ}\ esp$, segons la seva distribució entre les diferents capes.

S'observa que per a un mateix nombre total d'espines, inferior a la saturació, la tensió és més elevada al disminuir el nombre d'espines per capa. Això implicarà incrementar el nombre de capes.

En la gràfica de la Fig.IV.70, on es representa la tensió generada en funció del nombre de capes, n , segons el nombre d'espines per capa, m , s'observa que a partir d'un determinat nombre de capes independentment de quin sigui el seu nombre d'espines es satura la tensió.

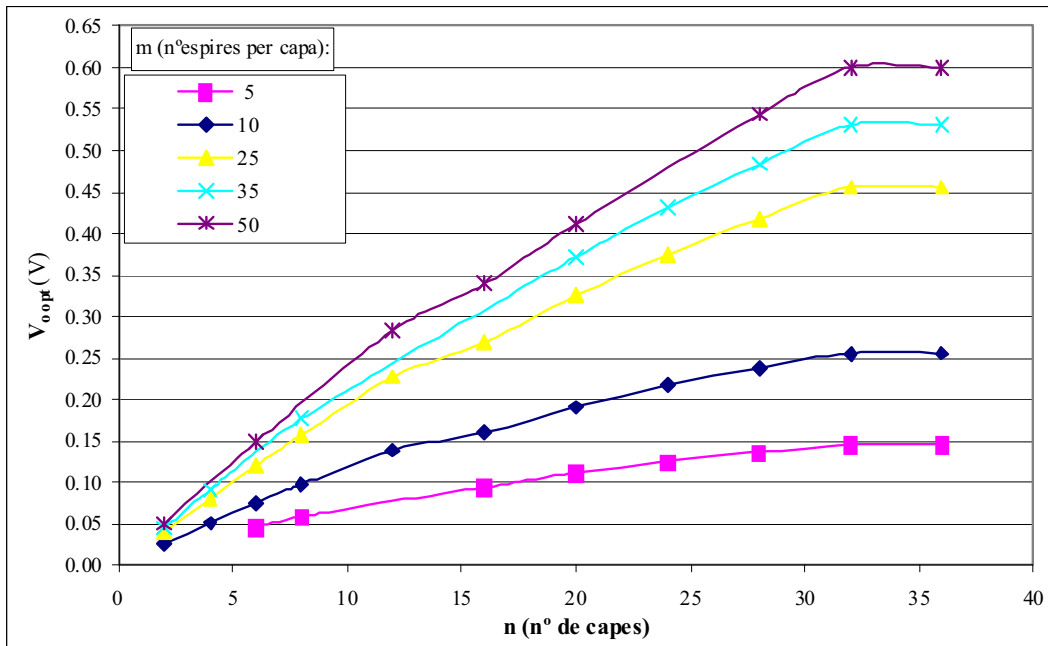


Fig.IV.70 Simulació de la tensió de sortida, $V_{o\ opt}$, aplicada a la resistència de càrrega òptima calculada per cada simulació en funció del nombre de capes, n , segons la seva distribució entre les diferents capes.

Si la densitat horitzontal d'espises és constant, un increment del número d'espises per capa comportarà un augment de la distància a l'imant, fent que el flux disminueixi fins a un punt que pràcticament ja no contribueix. Per tant, les simulacions anteriors són coherents.

Això vol dir que a nivell de disseny, per optimitzar la tensió de sortida, es convenient omplir el número de capes fins a la saturació, i després expandir-se lateralment augmentant el número d'espises per capa, com s'ha representat en les simulacions de la gràfica de la Fig.IV.71.

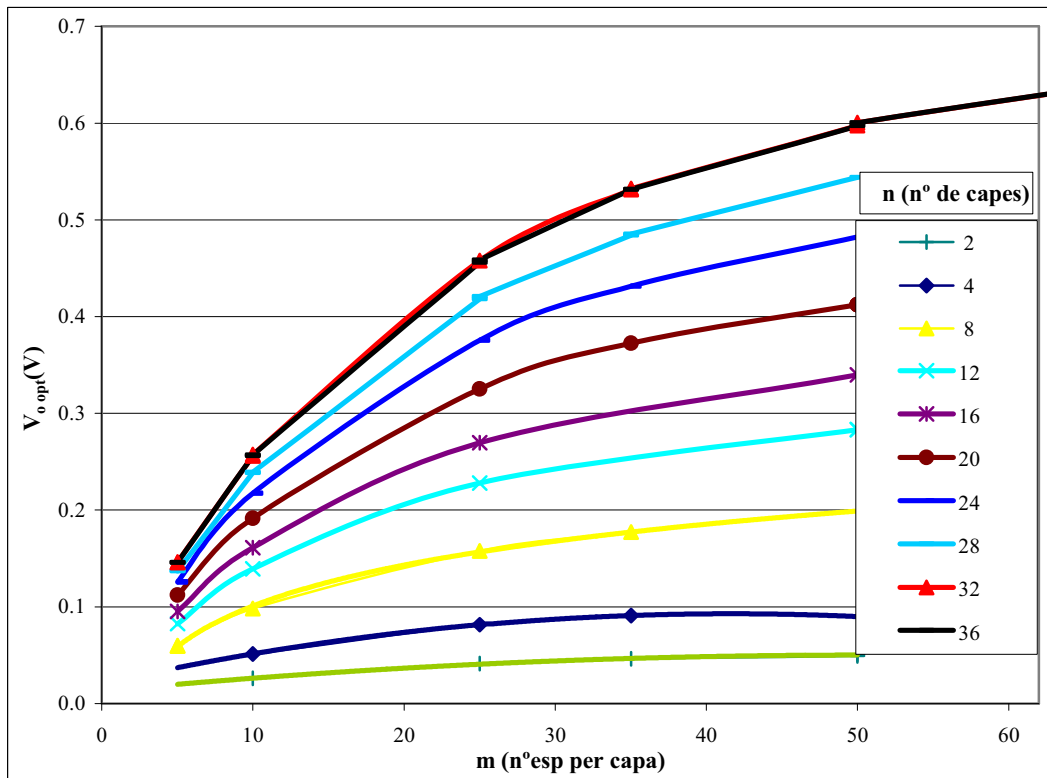


Fig.IV.71 Simulació de la tensió de sortida, $V_{o\ opt}$, aplicada a la resistència de càrrega òptima calculada per cada simulació en funció del número d'espises per capa, m , segons el número de capes, n .

Si s'augmentés el número d'espises per capa en aquesta gràfica, es podria observar una saturació en la tensió generada.

En canvi, a nivell de potència, a partir d'un cert nombre d'espises, la potència de sortida P_{Lopt} , aplicada en la resistència R_{Lopt} , calculada amb l'equació III.26, es manté gairebé constant a un valor $P_{Lopt\ max}$ i és pràcticament independent de la seva distribució com s'observa en la gràfica de la Fig.IV.72. Aquests efectes es deuen a què en augmentar la distància a la superfície de l'imant, l'increment en la variació de flux que travessa la superfície de les espises es compensa amb l'augment de la resistència en sèrie de la bobina.

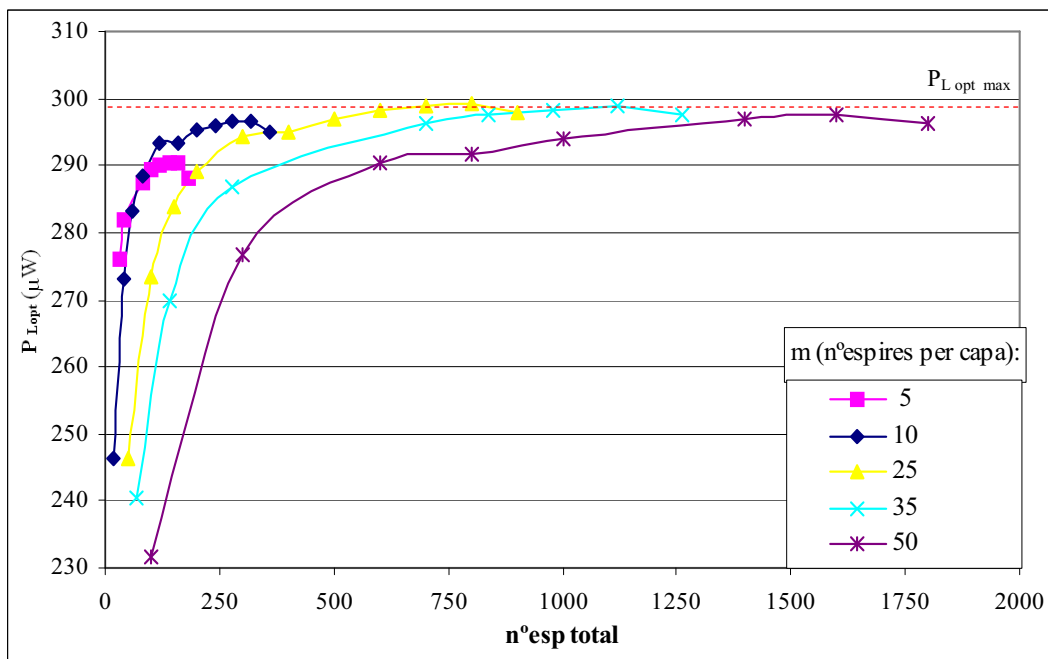


Fig.IV.72 Simulació de la potència de sortida generada aplicada en la resistència de càrrega òptima calculada per cada simulació, P_{Lopt} , per la bobina en funció del nombre total d'espores, $n^{\circ}esp$, segons la seva distribució entre les diferents capes.

Tal i com succeïa en el capítol anterior, per al cas de les bobines micromecanitzades, s'observa com el nombre d'espores òptim del dispositiu a nivell de potència no és el mateix que a nivell de tensió.

Per altra banda, tot i que el nombre de capes presenta poca influència en la potència generada, $P_{Lopt\ max}$, com es veu en la Fig.IV.73, el nombre de capes que la maximitza són 32, que corresponen a una bobina de uns 6.5mm de gruix de fil de Cu de 200µm de diàmetre, pel cas d'un imant de dimensions iguals al prototip anterior.

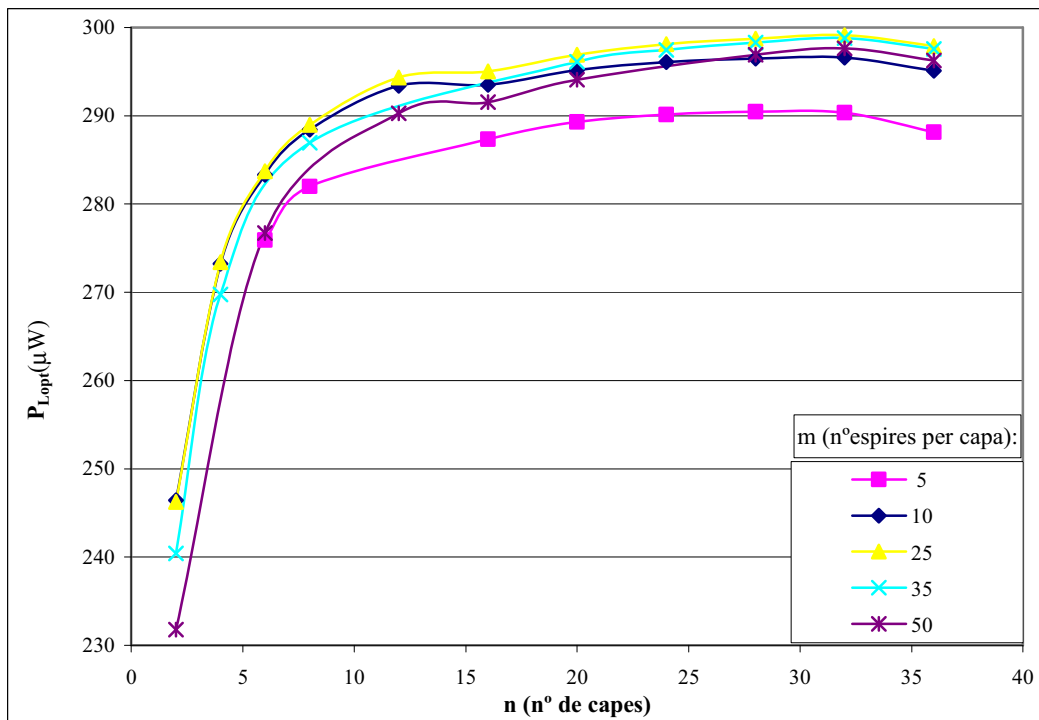


Fig.IV.73 Simulació de la potència de sortida, P_{Lopt} , en funció del nombre de capes, n .

A diferència de la potència òptima de sortida aplicada a la resistència de càrrega, $P_{Lopt,max}$, que és més o menys constant a partir d'un cert nombre d'espises, el que realment varia en funció del nombre d'espises per capa és la tensió de saturació, $V_{o\ opt\ sat}$. Això es representa en la gràfica de la Fig.IV.74 en funció del nombre d'espises per capa, m , pel número de capes que maximitza la potència $P_{Lopt,max}$, $n = 32$.

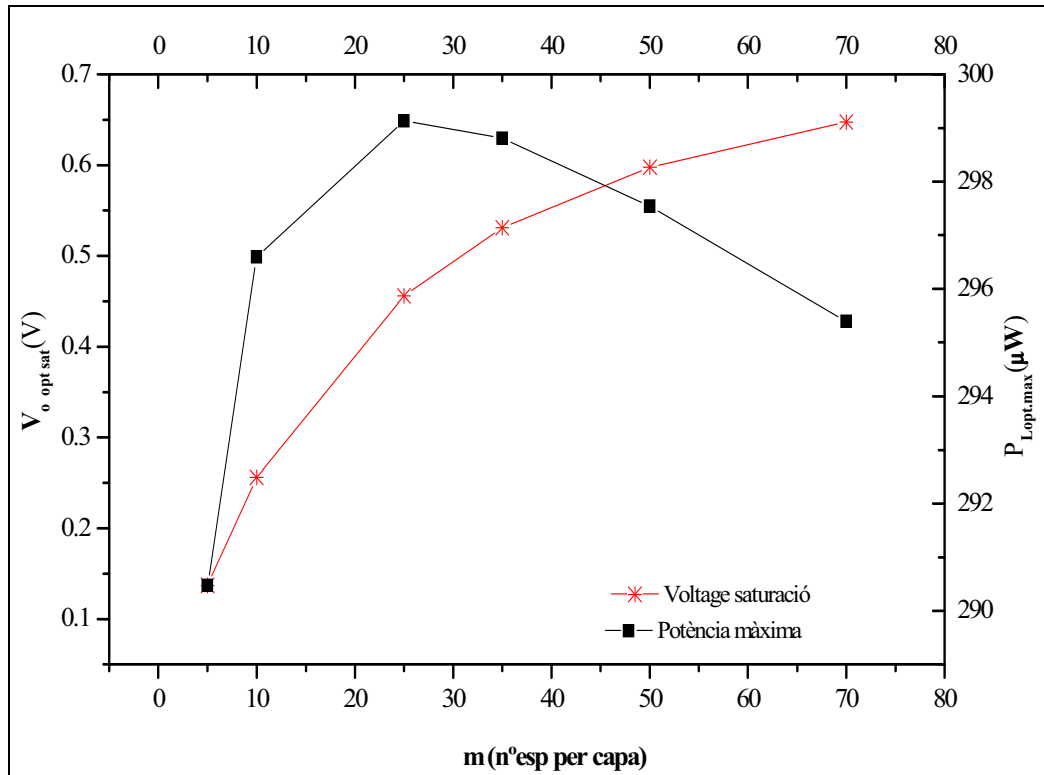


Fig.IV.74 Simulació de la tensió de saturació, $V_{o\ opt\ sat}$, i de la potència de sortida màxima, $P_{Lopt,max}$, en funció del número d'espises per capa, m , per 32 capes..

Per tant, s'observa com en el rang simulat, per optimitzar la bobina s'hauria d'incrementar el número d'espises per capa, maximitzant la tensió i amb pèrdues mínimes a nivell de potència.

IV.5.2. Fabricació del prototip i caracterització

A partir de les simulacions de potència i tensió es dissenya, fabrica i caracteritza un primer prototip amb bobines de Cu convencionals tot comparant-lo amb els de bobines micromecanitzades.

IV.5.2.1. Disseny i fabricació

Mitjançant les simulacions de l'apartat anterior, s'ha pogut construir el prototip que es mostra en la fotografia de la Fig.IV.75. El prototip dissenyat consta d'un mòdul ressonador i un transductor electromagnètic. El ressonador emprat està fabricat amb una membrana de Kapton de $15 \times 15 \text{ mm}^2$ i un gruix de 127 micres a on s'ha fixat i centrat l'imant de $7 \times 7 \times 4 \text{ mm}^3$ a sobre, gràcies a un segon imant de $7 \times 7 \times 2 \text{ mm}^3$ situat a sota, Fig.IV.63.

Quant al disseny del transductor electromagnètic, format per una bobina convencional, està construït amb un fil de Cu de 200micres de diàmetre. Aquesta bobina està formada per 100 espires distribuïdes en 8 capes d'unes 12 o 13 espires cada una i la seva resistència és de 2Ω . Aquest valor és molt inferior a la de les bobines planars fabricades amb tecnologia MEMS.

En un prototip fabricat manualment ha estat tècnicament difícil posar més de 100 espires. No obstant, segons les simulacions de les *Fig.IV.69* i *Fig.IV.72*, tot i que la tensió que es pot obtenir $V_{o\ opt}$ és únicament de l'ordre dels 100mV, la potència, P_{Lopt} , esperada es troba en el rang dels $290\mu\text{W}$ (a 120Hz), que és un valor considerable per a un primer prototip.

Segons les simulacions representades a la gràfica de la *Fig.IV.65*, la posició, z_{max} , de la superfície superior de la bobina ha d'estar a una distància d'uns 3.25mm respecte el centre de l'imant.

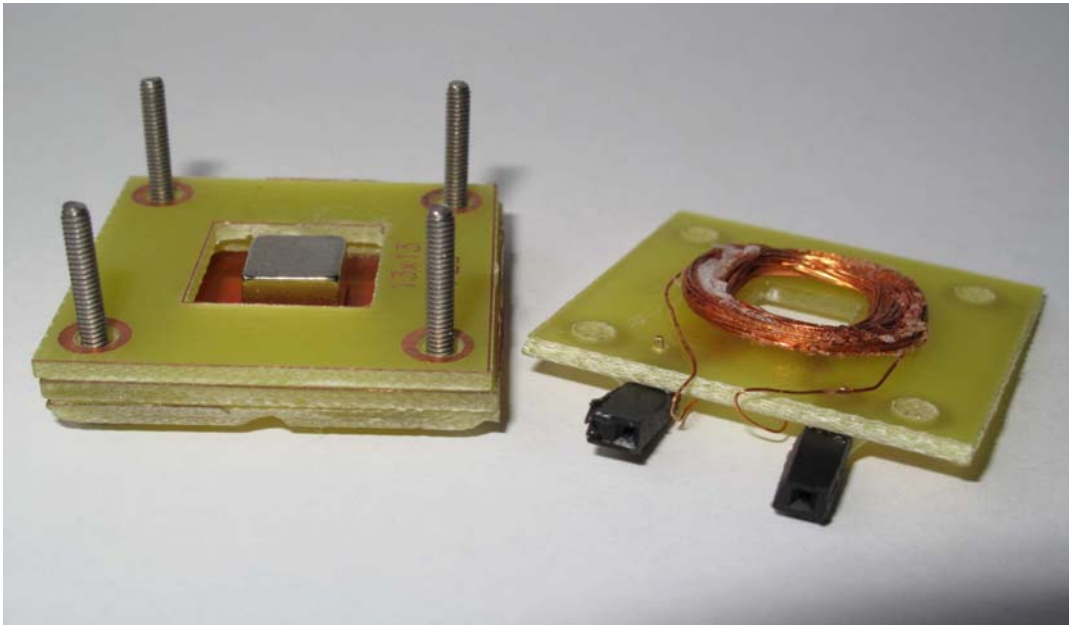


Fig.IV.75 Imatge del microgenerador electromagnètic realitzat amb una bobina de Cu convencional

IV.5.2.2. Caracterització de les bobines convencionals i comparació amb les micromecanitzades

En les gràfiques de les *Fig.IV.76* i *Fig.IV.77* es comparen les mesures experimentals de tensió i potència generades pels dispositius amb les bobines convencionals respecte a les micromecanitzades, normalitzades a un mateix valor de freqüència de 400Hz.

Com era d'esperar la potència generada pel dispositiu amb la bobina de Cu planar és menor que per la bobina convencional amb fil de Cu. A nivell de potència segons les mesures de la gràfica de la *Fig.IV.77*, amb el dispositiu que empra una bobina convencional s'obté una potència de 1.7mW mentre que amb la bobina planar és de $59\mu\text{W}$.

En canvi, pel que fa al voltatge màxim que es pot obtenir en circuit obert és més o menys el mateix en ambdós casos. No obstant, en el cas de la bobina convencional el número d'espires està per sota del òptim per raons pràctiques del procés de fabricació i això, d'acord amb les simulacions, influirà principalment en què la tensió generada sigui menor.

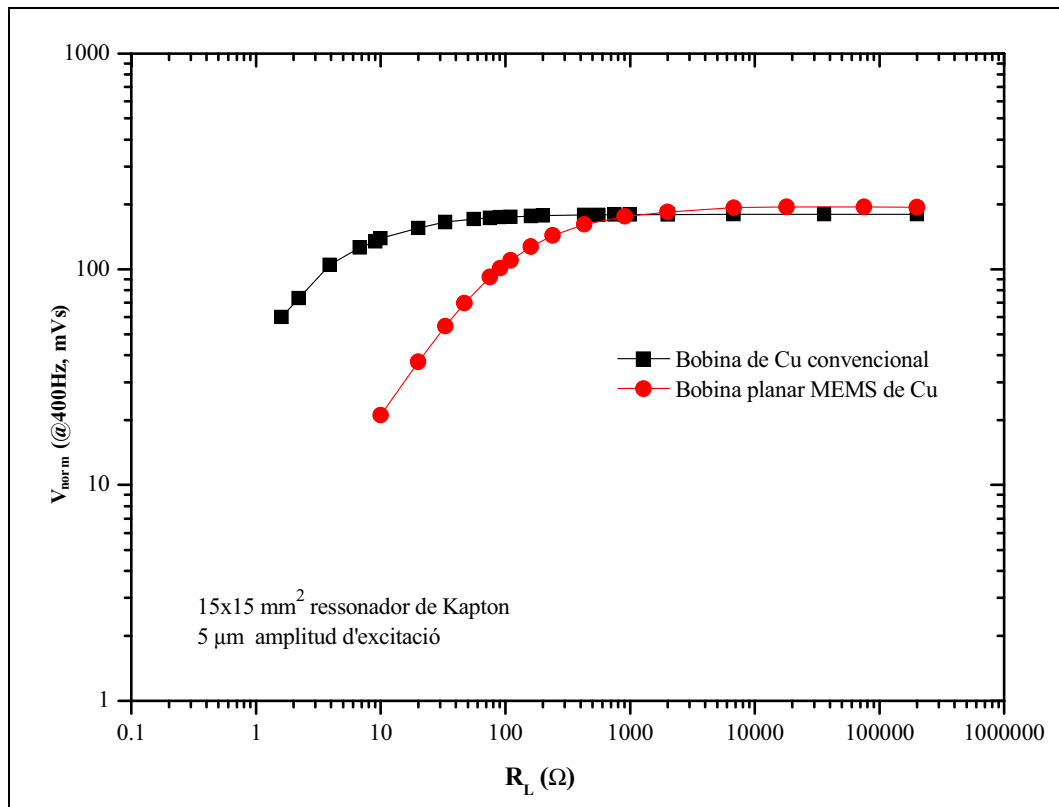


Fig.IV.76 Comparativa de les tensions normalitzades, V_{norm} , generades en funció de la R_L .

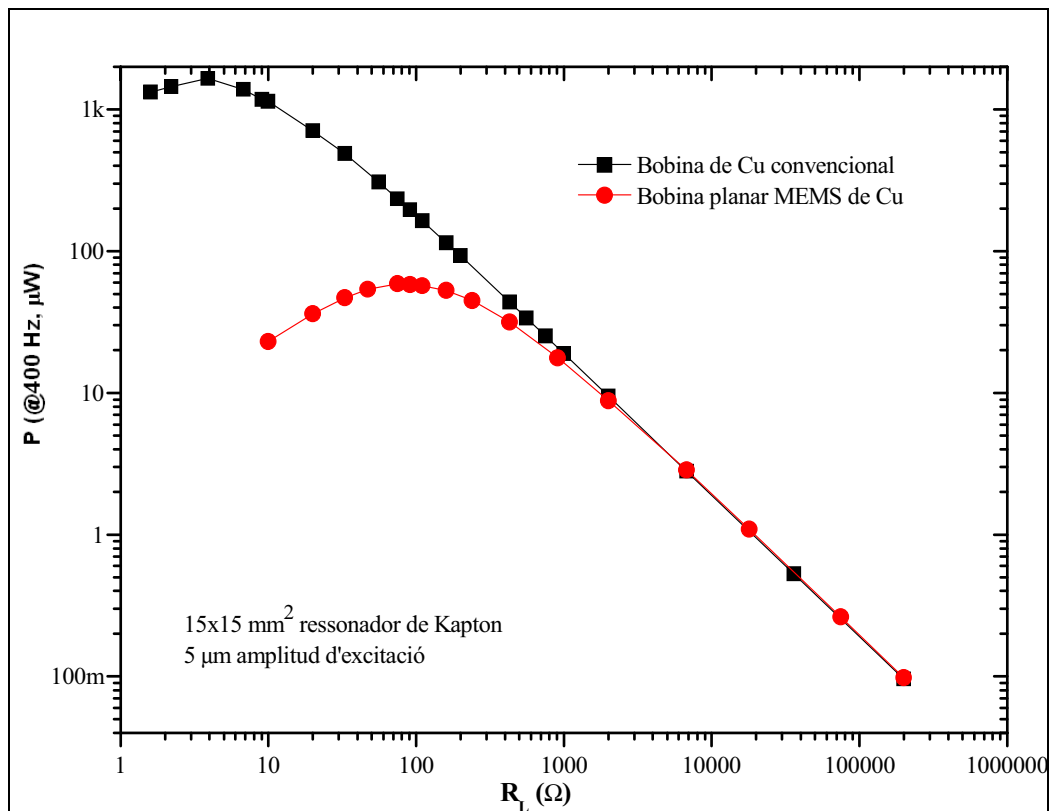


Fig.IV.77 Comparativa de les potències normalitzades, P_{norm} , generades en funció de la R_L per una amplitud d'excitació de 5 μm.

A partir d'aquests resultats es poden comparar les densitats de potència mesurades, per a un dispositiu amb un volum actiu (volum de la bobina més el del ressonador) d'uns

1.35cm³ i 2.17cm³ en funció de si la bobina emprada és planar o convencional. La densitat obtinguda amb la bobina planar, de l'ordre dels 45μW/cm³, és menor que la de la bobina convencional de 630μW/cm³, degut a què presenta una elevada resistència. En canvi, si les densitats de potència s'obtenen considerant únicament el volum definit per les espires (sense el substrat), la de la bobina planar de Cu de 15μm de gruix valdrà 18mW/cm³ i per tant, serà superior a la generada per la convencional, de 2.1mW/cm³. No obstant, a la bobina convencional li falten moltes espires per ser l'optimitzada. Partint d'una bobina convencional amb un número de capes òptim $n=32$, es busca el número d'espires per capa, m , que optimitza la densitat de potència i la de tensió. La gràfica de la Fig.IV.78 mostra com varien aquests valors de potència i tensió normalitzats al volum actiu en funció del número d'espires per capa. Aquest volum actiu també varia en funció del número d'espires m .

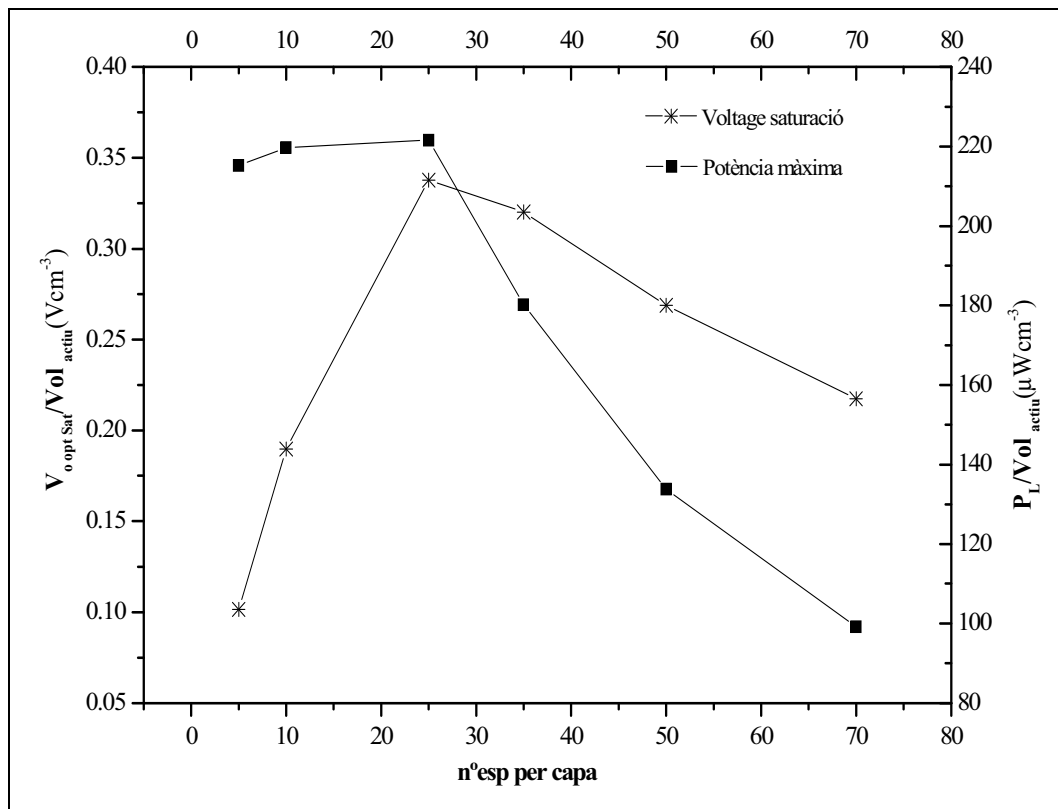


Fig.IV.78 Simulació de la tensió de saturació, $V_{o\ opt\ sat}$ i de la potència de sortida màxima, $P_{L\ opt\ max}$ normalitzades al volum actiu del dispositiu, Vol_{actiu} en funció del número d'espires per capa, m , per 32 capes..

En aquest cas el número d'espires per capa òptim, tant per la densitat de tensió com per la de potència, coincideixen.

D'aquesta gràfica s'obté la densitat de tensió i potència, de 0.34V/cm³ i 220μW/cm³ respectivament, per a una bobina convencional optimitzada de 32 capes de 25 espires cada una. La relació entre l'extensió d'aquestes 25 espires de la bobina òptima amb el "radi de l'imant és de l'ordre de 1.

Per altra banda, per poder comparar els valors de tensió i potència obtingudes mitjançant les simulacions amb les mesures, s'ha de tenir en compte que aquestes últimes estan normalitzades a una freqüència de treball de 400Hz mentre que les simulacions s'han utilitzat les condicions d'excitació de Roundy [1], ($Y_o = 4.4\mu m$ i $freq = 120Hz$).

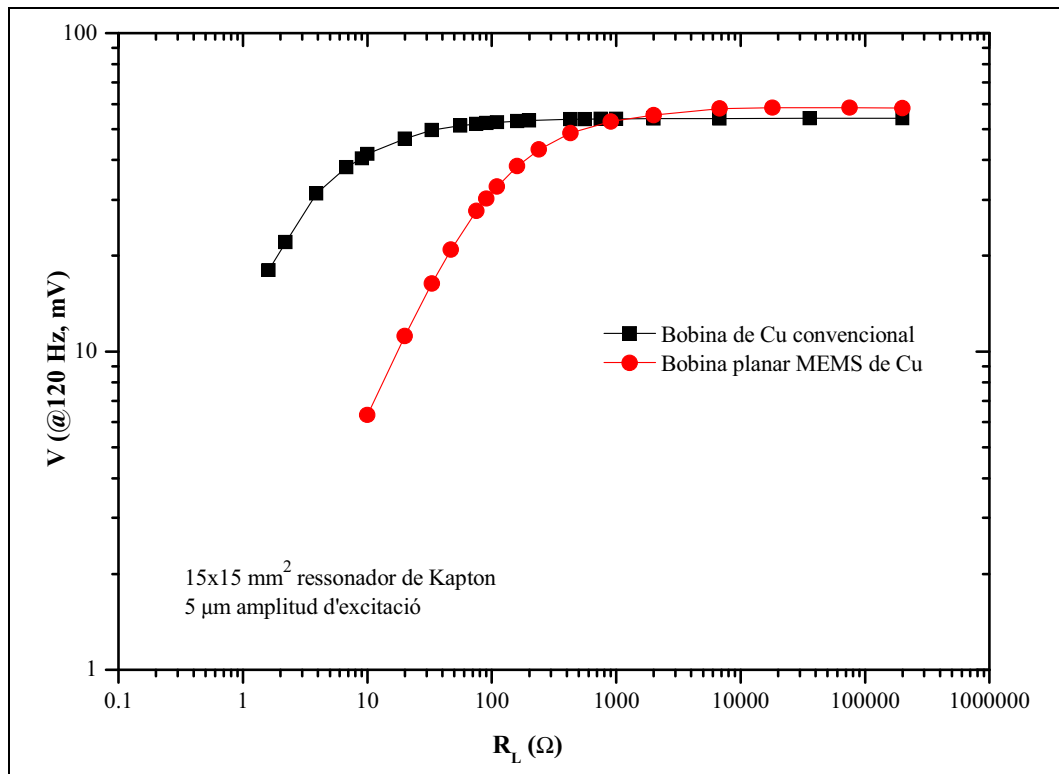


Fig.IV.79 Comparativa de les tensions normalitzades a una freqüència d'excitació de 120Hz, V_{norm} , generades en funció de la R_L .

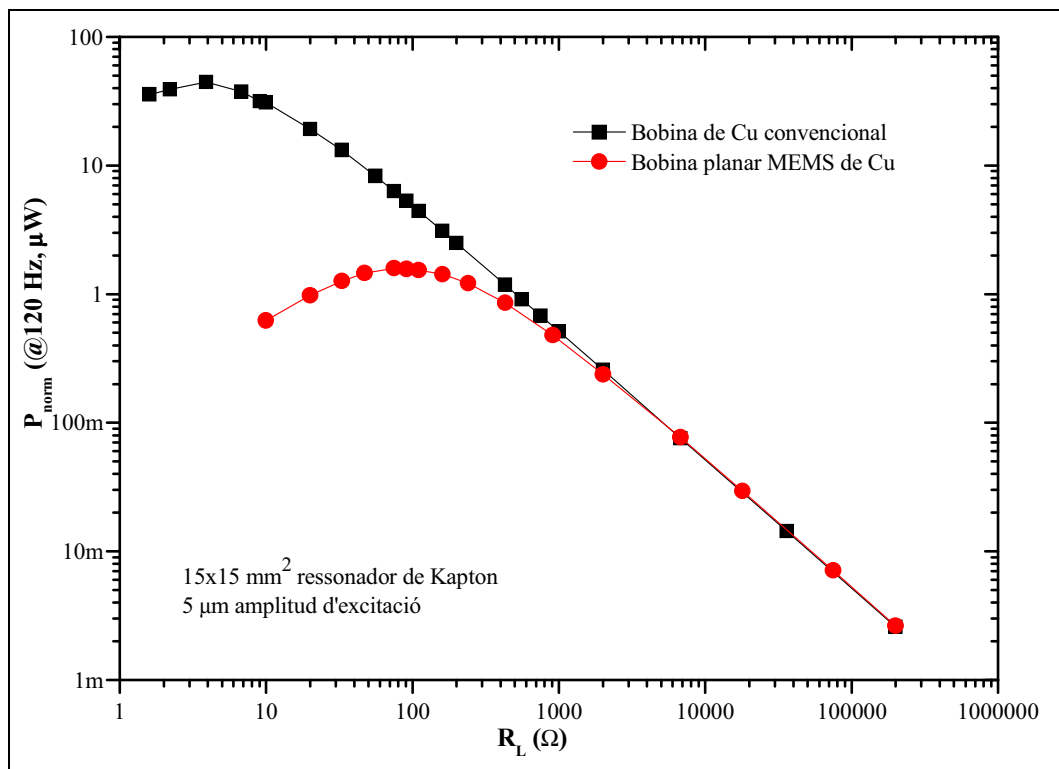


Fig.IV.80 Comparativa de les potències normalitzades a una freqüència d'excitació de 120Hz, P_{norm} , generades en funció de la R_L .

Les mesures de tensió i potència normalitzades a les condicions d'excitació de Roundy presenten uns valors màxims d'uns 55mV i 45μW, segons les gràfiques de les Fig.IV.79 i Fig.IV.80 respectivament. Si es comparen amb les simulacions de les gràfiques de les

Fig.IV.69 i *Fig.IV.70*, en què s'esperava obtenir per a aquest disseny una tensió de 100mV i una potència, P_{Lopt} , en el rang dels 290 μ W, s'observa que els valors mesurats són inferiors degut a què la posició relativa imant bobina no és l'òptima.

El nivell de voltatge generat és generalment més crític que el de potència, ja que la sortida generada és alterna i necessita ser rectificada mitjançant díodes que requereixen un nivell mínim de tensió i, en canvi, la potència requerida cada cop és més petita degut a la miniaturització dels xips.

El principal avantatge de la micromecanització de la bobina de Cu és permetre'n la integració en tecnologia MEMS.

IV.6. Conclusions

En aquest capítol s'ha descrit la realització d'un joc de prototips amb un procés de fabricació modular. S'ha construït de forma separada el ressonador mecànic, format per una membrana de Kapton de 127 μ m de gruix i un parell d'imants de NdFeB amb un volum total de 7x7x6mm³, i el transductor electromagnètic, format per una bobina micromecanitzada de Cu gruixut.

Per a la fabricació de la bobina micromecanitzada s'han emprat processos compatibles amb la tecnologia del Si com són: la generació de capes per creixement tèrmic, la fotolitografia, els gravats (humit i sec) i el dipòsit electroquímic. S'han descrit les etapes de fabricació de les microbobines, a partir d'una oblea de Si de 1mm de gruix, i el disseny dels diferents nivells de màscares emprades. Per al procés de dipòsit electroquímic del Cu, mitjançant una dissolució optimitzada, s'ha emprat una primera capa llavor de Ti per augmentar-ne l'adherència seguida d'una segona capa de Cu per la seva afinitat amb el dipòsit.

Un cop assemblet el ressonador amb la microbobina de Cu, s'ha caracteritzat mecànicament i elèctrica amb els diferents sistemes automàtics de mesura del desplaçament, voltatge i potència emprats, descrits prèviament. S'ha treballat en el buit, per evitar els efectes de la humitat tot millorant la reproductibilitat de les mesures i també per reduir l'esmoreïment paràsit de l'aire sense foradar la membrana, que malgrat no modificar-ne pràcticament la freqüència de ressonància introduiria una fragilitat addicional al ressonador.

S'analitzen els resultats experimentals obtinguts amb el dispositiu format per un imant de NdFeB amb un volum total de 7x7x6mm³. Amb una membrana de Kapton de 15x15x0.127mm³ i una microbobina de Cu de 52 espines amb 15 μ m de gruix, una amplada de pista de 20 μ m i 15 μ m de separació (donant una resistència en sèrie d'uns 100 Ω) i considerant que el volum actiu d'aquest dispositiu (volum de la bobina més el de l'imant) és d'uns 1.35cm³, s'ha aconseguit una densitat de potència de l'ordre dels 40 μ W/cm³. És superior a la majoria dels diferents microdispositius de la literatura [23]. Per exemple, el grup de la universitat de Michigan [30], ha realitzat un cantilever que genera una densitat de potència de 1.7 μ W/cm³. El prototip construït per la Tyndall/U.Southampton [31], amb un volum de 0.1cm³ genera 1.2 μ W/cm³. El fabricat pel grup de Sheffield obté una densitat de potència de 12 μ W/cm³ [32]. No obstant el de Hong Kong genera 830 μ W/cm² [33] però el desplaçament de l'imant és més gran.

D'altra banda, les mesures experimentals han permès observar l'aparició de fenòmens d'histeresi per a amplituds d'excitació altes. Aquest comportament no lineal característic dels polímers permet obtenir una major amplitud de vibració de l'imant i un increment dels nivells d'energia generats degut a una disminució de l'esmoreïment paràsit aparent. No obstant, malgrat els avantatges, s'hi associa el problema de la inestabilitat del funcionament del dispositiu, el que farà necessari més estudis sobre el seu comportament.

Finalment, s'ha simulat i construït un prototip fabricat amb una bobina convencional per estudiar-ne la influència tant en voltatge com en potència. La seva fabricació manual ha limitat el nombre d'espines total a unes 100, fet que segons les simulacions no hauria

d'afectar pràcticament els nivells de potència, esperant-ne uns $290\mu\text{W}$, però que produirà una disminució de la tensió obtinguda a uns 100mV . No obstant, les mesures han estat inferiors (de 55mV i $45\mu\text{W}$), probablement degut a que faltaria optimitzar la posició relativa bobina imant.

Malgrat que la densitat de potència del dispositiu amb la microbobina de Cu és inferior a la de la bobina convencional de Cu (45 i de $630\mu\text{W}/\text{cm}^3$ respectivament), l'ús d'una bobina micromecanitzada en permetria una integració en tecnologia MEMS.

Bibliografia:

- [1].-S. Roundy, P.K. Wright, J. Rabaey, "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes", *Computer Communications* 26, 1131-1144 (2003)
- [2].-R. Amirtharajah, A.P. Chandrakasan, "Self-powered signal processing using vibration-based power generation", *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 33, 687-695 (1998)
- [3].-E.P. James, M.J. Tudor, S.P. Beeby, N.R. Harris, P. Glynne-Jones, J.N. Ross, N.M. White, "An investigation of self-powered systems for condition monitoring applications", *Sensors and Actuators A* 110, 171-176 (2004)
- [4].-T. Sterken, P. Fiorini, R. Puers, "Parametrical study of miniature generators for large motion applications", *Proceedings of the 19th European Conference on Solid-State Sensors Eurosensors XIX*, 2005 (in press)
- [5].-P.D. Mitcheson, T.C. Green, E.M. Yeatman, A.S. Holmes, "Architectures for vibration-driven micropower generators", *Journal of Microelectromechanical Systems* 13, 429-440 (2004)
- [6].-W.-S. Huang, K.-E. Tzeng, M.-C. Cheng, R.-S. Huang, "Design and fabrication of a vibrational micro-generator for wearable MEMS", *Proceedings of the 17th European Conference on Solid-State Sensors Eurosensors XVII*, 2003, 695-697
- [7].-C.B. Williams, C. Shearwood, M.A. Harradine, P.H. Mellor, T.S. Birch, R.B. Yates, "Development of an electromagnetic microgenerator", *IEE Proc. Circuits, Devices and Systems* 148, 337-342 (2001)
- [8].-N.M. White, P. Glynne-Jones, S. Beeby, "A novel thick-film piezoelectric micro-generator", *Smart Mater. Struct.* 10, 850-852 (2001)
- [9].-T. Sterken, K. Baert, C. Van Hoof, R. Puers, G. Borghs, P. Fiorini, "Comparative modelling for vibration scavengers", *Proceedings IEEE Sensors*, 2004
- [10].-M. Woytasik, E. Dufour-Gergam, J.-P.-Grandchamp, E. Martincic, M. Poirier-Quinot, J.C. Ginefri, L. Darrasse, J. Vautier, "Copper microcoils dedicated to NMR imaging", *Proceedings 15th MicroMechanics Europe Workshop MME*, 2004, 143-146
- [11].-A. Pérez-Rodríguez, C. Serre, N. Fondevilla, C. Cereceda, J.R. Morante, J. Esteve, J. Montserrat, 2005, "Design of electromagnetic inertial generators for energy scavenging applications", *Proceedings of Eurosensors XIX*, Barcelona, Spain, paper MC5
- [12].-C. Serre, A. Pérez-Rodríguez, N. Fondevilla, J.R. Morante, J. Montserrat and J. Esteve "Vibrational Energy Scavenging with Si Technology Electromagnetic Inertial Microgenerator", *DTIP 2006 Stresa*, Lake Maggiore, Italy
- [13].-N. Yakoubi, "Desarrollo de microactuadores magnéticos en tecnología de Si", Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, 2003.
- [14].-S. Martínez, N. Yaakoubi, A. Pérez-Rodríguez, C. Serre, P. Gorostiza, J.R. Morante, J. Esteve, "Electrochemical deposition of metal layers and structures for Si-based microsystems", *Sensors and Actuators A* 99 (2002), 41-44

- [15].-C. Serre N. Yaakoubi, S. Martínez, A. Pérez-Rodríguez, J.R. Morante, J. Esteve, J. Montserrat “Electrochemical deposition of Cu and Ni/Cu multilayers in Si microsystem Technologies”, *Sensors and Actuators A* 123-124 (2005), 633-639.
- [16].-Peter Hagedorn, “Non-linear Oscillations”, Oxford Engineering Science Series -10.
- [17].-Atam P. Arya, “Introduction to Classical Mechanics”, Benjamin-Cummings Publishing Company.
- [18].- H. Yamakawa, “Modern Theory of Polymer Solutions” , Harper & Row, Publishers.
- [19].- Sergio R. Aragon, R. Pecora “Dynamics of wormlike chains”, *Macromolecules*, 1985, 18 (10), pp 1868–1875.
- [20].-N. Fondevilla, C. Serre, A. Pérez-Rodríguez, J.R. Morante, J. Montserrat and J. Esteve “Design and fabrication of Si technology microgenerators for vibrational energy scavenging”, Proceedings 7th Spanish Conference on electronic Device, Santiago de Compostela Spain (2009).
- [21].-W. J. Li *et al.*, Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2000, pp. 235-239
- [22].-C. Serre, N. Fondevilla, E. Martincic, A. Pérez-Rodríguez, J.R. Morante, J. Montserrat, and J. Esteve, “Development of a Si technology based modular manufacturing process for vibrational microgenerators optimization”, Euroensors, poster, 2006, Göteborg, Suecia.
- [23].-D.P. Arnold, “Review of microscale magnetic power generation,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no.11, pp. 3940-3951, Nov. 2007.
- [24].-P. Hagedorn, “Non-linear oscillations”, Clarendon Press, Oxford, 1981.
- [25].-M. Cortés, E. Gómez, A. Pérez-Rodríguez, C. Serre, E. Vallés, ”Optimisation of copper electrodeposition processes for Si technology based inductive microsystems “ *Journal of Electroanalytical Chemistry* , Volumes 619-620, 15 July 2008, pp. 176-182.
- [26].-J.W. Kane, M.M. Sternheim, “Física”, Reverté, S.A. , 1991.
- [27].-<http://fys.kuleuven.be/iks/nvsf/experimental-facilities/x-ray-diffraction-2013-bruker-d8-discover>
- [28].-B.D. Cullity, S.R. Stock “Elements of X-Ray Diffraction”, Addison-Wesley, 1956
- [29].- http://www.h-and-m-analytical.com/pdfs/residual_stress.pdf
- [30].-H. Kulah and K. Najafi, “An electromagnetic micro power generator for low-frequency environmental vibrations,” in *Proc. 17th Int. Conf. MEMS (MEMS 2004)*, Maastricht, The Netherlands, Jan. 2004, pp.237–240.
- [31].-E. Koukharenko, S.P. Beeby, M.J. Tudor, N.M. White, T. O’Donnell, C. Saha, S. Kulkarni, and S. Roy, “Microelectromechanical systems vibration powered electromagnetic generator for wireless sensor applications”, *Microsyst. Technol.*, vol. 12, no. 10–11, Sep. 2006.
- [32].-C. Shearwood and R.B. Yates, “Development of an electromagnetic microgenerator”, *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 22, pp. 1883–1884, Oct.1997.
- [33].-Neil N. H. Ching, H. Y. Wong, Wen J. Li, Philip H. W. Leong and Zhiyu Wen, “A laser-micromachined multi-modal resonating power transducer for wireless sensing systems”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 97-98, pp.685-690, 2002.
- [34].-http://www.ionbeammilling.com/ABOUT_THE_ION_MILLING_PROCES.