



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



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**

Memòria presentada a optar al grau de Doctora per la Universitat de Barcelona

Programa de Doctorat: Enginyeria i Tecnologies Avançades

Autora: Núria Fondevilla Sala

Director: Dr. Christophe Serre

El Dr. Christophe Serre, professor titular de la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona.

CERTIFICA:

Que la memòria titulada “**Desenvolupament de microgeneradors inercials electromagnètics en tecnologia de micro sistemes per a la recuperació d’energia mecànica residual de l’ambient**”, que presenta Na Núria Fondevilla Sala per optar al grau de Doctora per la Universitat de Barcelona, ha estat realitzada sota la seva direcció.

Barcelona, 18 de Maig de 2012

Dr. Christophe Serre

Agraïments

En primer lloc vull mostrar el meu agraïment al Dr. Christophe Serre pel seu suport i la seva ajuda. Sense totes les hores que m'ha dedicat aquest treball no hauria estat possible. No menys important ha estat el Dr. Alejandro Pérez. Li estic profundament agraïda pels seus consells i per dedicar-me el seu valuós temps sempre que l'he necessitat.

Gràcies també al Dr. Emile Martincic de l'Institut d'Electronique de París per la seva imprescindible col·laboració en els processos de fabricació. Gràcies al Dr. Josep Montserrat per la seva experiència i coneixements en la realització de les màscares. Gràcies al Dr. Jaume Esteve per la seva ajuda i orientació i un agraïment especial a tota la gent del Centre Nacional de Microelectrònica, CNM, amb menció al personal de la sala blanca.

Agraïments al Dr. Joan Ramon Morante per deixar-me formar part del seu grup d'investigació en l'EME a través d'un projecte a nivell europeu i a les facilitats donades pel Departament d'Electrònica coordinades pel seu director el Dr. Albert Cornet.

Gràcies a la gent del Taller del Departament d'Electrònica que han participat en la construcció dels prototips i també a tot el personal d'administració i serveis que m'han ajudat en els diferents tràmits.

Gràcies a les Annes, Xavi, Carlos, Manolo, Ivone, Neus i a molts altres companys i professors del Departament d'Electrònica, per les bones estones que hem compartit al llarg de tots aquests anys.

Finalment un especial agraïment a la meva família i amics. Al meu marit Joan Anton pel seu amor, valuosa ajuda i constant recolzament i al meu fill Ivan per l'alegria i il·lusió que m'ha aportat. També, a la meva germana Esther per donar-me ànims i a l'Antonio i la M^a Àngels pel seu suport i estimació incondicionals.

Aquesta tesi està dedicada a tots vosaltres.

Barcelona maig de 2012

INDEX

	Pàgines
I.PRESENTACIÓ.....	1
I.1. Introducció. Xarxes de sensors sense fils. Fonts d'alimentació basades en la utilització d'energia residual.....	1
I.2. Energy harvesting.....	2
I.2.1. Opcions.....	2
• <u>Fonts d'energia inesgotable (residual)</u>	2
• <u>Fonts d'energia finita</u>	12
I.2.2. Justificació de l'ús de vibracions i quines són les seves aplicacions.....	28
I.2.3. Problemes relacionats amb la densitat de potència al miniaturitzar.....	29
I.3. Tipus de generadors inercials.....	30
I.3.1. Dispositius electrostàtics.....	30
I.3.2. Dispositius piezoelèctrics.....	31
I.3.3. Dispositius electromagnètics.....	32
I.4. Objectiu de la tesi.....	32
Bibliografia.....	33
II.MICROGENERADOR INERCIAL ELECTROMAGNÈTIC	39
II.1. Introducció.....	39
II.2. Estat de l'art. Tipus de generadors inercials.....	39
II.2.1. Generadors vibracionals.....	39
II.2.1.a. Dispositius a nivell d'investigació.....	40
• <u>Imant fix i bobina mòbil</u>	42
• <u>Imant mòbil i bobina fixa</u>	47
II.2.1.b. Dispositius comercials.....	50
II.2.2. Generadors híbrids.....	53
II.2.2.a. Dispositius a nivell d'investigació.....	53
II.2.2.b. Dispositius comercials.....	55
II.3. Problemàtica en la miniaturització i conseqüències en la densitat de potència.....	57
• <u>Camps magnètics</u>	58
• <u>Resistència de la bobina</u>	59
• <u>Esmorteïment electromagnètic</u>	60
• <u>Esmorteïment paràsit</u>	60
• <u>Anàlisi dels efectes de l'escalat</u>	61
II.4. Conclusions.....	63
Bibliografia.....	64
III.MODELITZACIÓ I DISSENY D'UN DISPOSITIU ELECTROMAGNÈTIC RESSONANT	69
III.1. Introducció.....	69
III.2. Principi d'operació.....	69
III.3. Disseny del ressonador.....	77
III.3.1. Estudi de la freqüència de ressonància segons la geometria del ressonador.....	77

III.3.1.a.	Mida de la membrana quadrada	78
III.3.1.b.	Gruix de la membrana quadrada	78
III.3.1.c.	Mida de l'imant	79
III.3.1.d.	Altres possibles dissenys de la membrana del ressonador	80
	• Membrana allargada amb 2 costats lligats	80
	• Dues membranes allargades en paral·lel	82
	• Dues membranes allargades en creu	83
	• Membrana amb forats rodons	85
	• Membrana amb braços de suspensió	86
III.3.1.e.	Conclusions	90
III.3.2.	Estudi de la freqüència en funció del material de la membrana	91
III.3.2.a.	Introducció	91
III.3.2.b.	Membranes basades en el Si	93
	• Si	93
	• SiO ₂	93
III.3.2.c.	Membranes basades en polímers	94
	• Resina SU-8	94
	• Kapton	98
III.3.2.d.	Membranes metàl·liques	99
III.3.2.e.	Conclusions	101
III.4.	Disseny del transductor electromagnètic	101
III.4.1.	Introducció	101
III.4.2.	Disseny	101
III.4.2.a.	Relació bobina imant	102
III.4.2.b.	Configuració bobina	104
III.4.2.c.	Reducció de la resistència en sèrie de la bobina	105
III.5.	Fabricació d'un primer prototip: Bobines d'Al (1.5micres de gruix)	108
III.5.1.	Fabricació de la bobina d'Al	109
III.5.2.a.	Especificacions	109
III.5.2.b.	Processos de fabricació	109
III.6.	Prova de concepte. Resultats previs	111
III.6.1.	Caracterització mecànica	111
III.6.2.	Caracterització elèctrica	112
III.7.	Discussió dels resultats	113
III.7.1.	Validació del model	113
III.7.2.	Creació d'un "roadmap" per a optimitzacions	115
III.7.2.a.	Millora mecànica del ressonador: esmorteïment paràsit	115
III.7.2.b.	Millores elèctriques: variació de flux magnètic i resistència en sèrie	116
III.7.3.	Dependència de les característiques del generador optimitzat amb les condicions d'excitació.	120
III.8.	Conclusions	121
	Bibliografia	122

IV.FABRICACIÓ I CARACTERITZACIÓ D'UN DISPOSITIU ELECTROMAGNÈTIC RESSONANT123

IV.1.	Introducció	123
IV.2.	Arquitectura del prototip	123
IV.2.1.	Geometria de les bobines. Simulacions	123
IV.3.	Fabricació	125
IV.3.1.	Procés de fabricació modular	125
IV.3.2.	Descripció dels processos de fabricació de les microbobines	126
IV.3.2.1.	Generació de capes	126

• <u>Creixement tèrmic (del SiO₂)</u>	126
• <u>Spinning</u>	127
• <u>Dipòsit per polvorització catòdica o “sputtering”</u>	127
IV.3.2.2. Processos de litografia.....	128
IV.3.2.3. Gravat.....	130
• <u>Gravat humit</u>	131
• <u>Gravat sec</u>	132
IV.3.2.4. Processos electroquímics:.....	134
<u>Electrodeposició d’un metall</u>	134
<u>Atac d’un metall</u>	134
IV.3.3. Flux de fabricació: Fabricació de les microbobines de Cu i del ressonador.....	135
IV.3.2.4. Microbobina.....	135
IV.3.3.2. Ressonador.....	137
IV.3.4. Optimització dels processos electroquímics (EC, Electro Chemical).....	137
• <u>Voltametria</u>	138
• <u>Estructura i anàlisi d’estrès</u>	139
• <u>Anàlisi morfològic del Cu de les bobines</u>	144
IV.3.5. Disseny de la màscara.....	144
• <u>Nivell de METALL</u>	146
• <u>Nivell de DRIE</u>	147
• <u>Nivell de POLYMER</u>	148
IV.3.6. Prototip fabricat.....	149
IV.4. Caracterització.....	151
IV.4.1. Mètodes i materials de caracterització.....	151
IV.4.1.1. Sistemes de mesura del desplaçament.....	151
IV.4.1.2. Sistemes de mesura del voltatge generat.....	158
IV.4.1.2.1. Voltatge en funció de la freqüència.....	159
IV.4.1.2.2. Voltatge i potència en funció de la resistència de càrrega.....	161
IV.4.2. Resultats.....	163
IV.4.2.1. Caracterització elèctrica.....	163
IV.4.2.2. Caracterització mecànica.....	168
IV.5. Comparació dels resultats amb els d’un prototip amb bobines de Cu convencionals.....	170
IV.5.1. Simulacions.....	170
IV.5.2. Fabricació del prototip i caracterització.....	177
IV.5.2.1. Disseny i fabricació.....	177
IV.5.2.2. Caracterització de les bobines convencionals i comparació amb les micromecanitzades.....	178
IV.6. Conclusions.....	182
Bibliografia	183

V. DISCUSSIÓ DELS RESULTATS	185
V.1. Introducció.....	185
V.2. Optimització segons el “roadmap”.....	185
V.3. Discussió dels resultats.....	187
V.3.1. Situació del prototip construït respecte l’estat de l’art.....	187
V.3.2. Dificultats trobades.....	190
V.3.3. Optimitzacions i millores futures.....	190
V.4. Efectes no lineals, histèresi.....	191
V.4.1. Introducció.....	191
V.4.2. Propietats elàstiques típiques d’un sòlid sota estrès.....	192
• <u>Estirament “Stretching”</u>	192
• <u>Elasticitat dels polímers “Bending module”</u>	193

V.4.3.	Mecanismes de deformació dels polímers.....	194
	• <u>Elastòmers</u>	194
	• <u>Termoplàstics</u>	194
	• <u>Termostables:</u>	195
V.4.4.	Discussió sobre el comportament no lineal del ressonador	196
V.4.5.	Modelització d'un moviment oscil·latori no lineal.....	197
	V.4.5.a. Plantejament de l'equació diferencial de la modelització	197
	V.4.5.b. Resolució de l'equació diferencial	199
	V.4.5.c. Anàlisi dels resultats	202
	V.4.5.d. Influència de la pertorbació de tercer ordre en la histèresi de la resposta	206
	V.4.5.e. Estudi de l'estabilitat de les solucions	207
	V.4.5.f. Càlcul de la potència generada	209
	V.4.5.g. Conclusions	214
V.4.6.	Estudi de la dependència de la no linealitat amb els paràmetres físics del ressonador	214
	V.4.6.a. Dues dimensions: corda elàstica.....	214
	V.4.6.b. Tres dimensions: membrana ressonant.....	217
V.5	Conclusions	233
	Bibliografia	234
	CONCLUSIONS	237