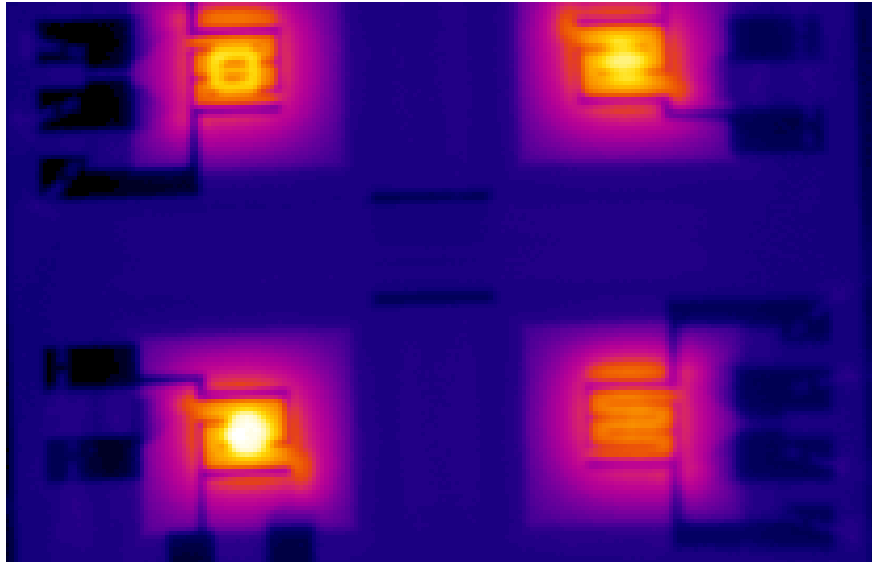


# Anàlisi termomecànica d'estructures micromecanitzades per a sensors de gas



**Jordi Puigcorbé Punzano**

Departament d'Electrònica  
Facultat de Física  
**Universitat de Barcelona**

## **Anàlisi termomecànica d'estructures micromecanitzades per a sensors de gas**

Memòria presentada per optar al títol de Doctor en Ciències Físiques

**Programa de doctorat:** Enginyeria i tecnologia electròniques

**Bienni:** 1998-2000

**Tutor:** Santiago Marco Colás

**Autor:** Jordi Puigcorbé Punzano

**Directors de tesi:** Joan Ramon Morante i Lleonart  
Anna Vilà i Arbonès

El Dr. JOAN RAMON MORANTE I LLEONART, Catedràtic d'Universitat de la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona i la Dra. ANNA VILÀ I ARBONÈS, Professora Titular d'Universitat de la Facultat de Física de la Universitat de Barcelona,

CERTIFIQUEN:

Que la memòria 'Anàlisi termomecànica d'estructures micromecanitzades per a sensors de gas' que presenta en JORDI PUIGCORBÉ PUNZANO per optar al grau de doctor en Ciències Físiques, s'ha realitzat sota la seva direcció.

Barcelona, a 16 de Juliol de 2003

Dr. Joan Ramon Morante i Lleonart

Dra. Anna Vilà i Arbonès

En primer lloc vull donar les gràcies al Dr. Joan Ramon Morante, primer per permetre'm formar part del departament d'Electrònica de la Universitat de Barcelona, i en segon lloc per dirigir, conjuntament amb la Dr. Anna Vilà a la que afegixo a aquest agraïment, la tesi doctoral que teniu a les mans.

Molt especialment vull donar les gràcies al Dr. Santiago Marco, amb qui vaig començar a treballar al departament, i qui em va permetre, conjuntament amb el Dr. J. R. Morante, iniciar-me en el món dels elements finits, que ara alimenten la meitat de la meua família.

També a la gent del CNM, la Neus, el Dr. Carles Cané i especialment la Dr. Isabel Gràcia, qui ha preparat les mostres que he estudiat i pacientment ha respost a totes les meves preguntes al llarg d'aquests anys.

Al grup de persones que em van ensenyar Ansys, l'apreciat Dr. Carmona, el professor Dr. Sieiro i el Dr. Leseduarte.

A la gent del departament *Mechanical Reliability and Micro Materials* del *Fraunhofer Institute (IZM)* de Berlín, especialment al Dr. B. Michel i al Dr. D. Vogel, per permetre'm dur a terme part de les mesures experimentals d'aquest treball.

Finalment a la gent del departament, sobretot a la gent del cau on estàvem confinats, a l'Albert, la Susanna, la Bea, en Genis, el Dj, l'Àngel, l'Enric, i sobretot al Merino i l'Olga, pels bons moments de cafè, tertúlia i temps perdut.

*A l'Ariadna,  
i al fill que portes dins*

---

# Índex

<b>1. Introducció</b> .....	<b>1</b>
1.1 Introducció .....	2
1.2 Sensors de gas semiconductors .....	3
1.2.1 Materials sensors .....	5
1.2.2 Substrats .....	7
1.3 Problemes tèrmics i mecànics en sensors de gas micromecanitzats .....	11
1.4 Objectiu de la Tesi .....	13
1.5 Referències .....	14
<b>2. Sensors de gas micromecanitzats</b> .....	<b>17</b>
2.1 Descripció .....	18
2.2 Estructures micromecanitzades per a sensors de gas .....	18
2.2.1 Dissenys .....	19
2.2.2 Membrana .....	23
2.2.3 Microresistència .....	24
2.2.3.1 Polisilici .....	25
2.2.3.2 Platí .....	26
2.2.3.3 Topologia de la microresistència .....	26
2.2.4 Electrodes .....	27
2.2.5 Dipòsit del material sensor .....	28
2.3 Descripció dels substrats micromecanitzats analitzats .....	30
2.4 Comportament tèrmic de membranes micromecanitzades .....	36
2.4.1 Revisió de les propietats tèrmiques dels materials emprats .....	36
2.4.2 Transferència de calor en sensors de gas micromecanitzats .....	39
2.4.2.1 Conducció de calor a través de la membrana .....	40
2.4.2.2 Pèrdues de calor a través de l'aire. Convenció .....	42

---

2.4.2.3 Radiació .....	45
2.4.3 Aspectes a tenir en compte per a la minimització de les pèrdues de calor .....	46
2.5 Comportament mecànic de substrats micromecanitzats .....	47
2.5.1 Propietats mecàniques dels materials emprats .....	47
2.5.1.1 Òxid de Silici .....	47
2.5.1.2 Nitrur de Silici .....	47
2.5.1.3 Polisilici .....	49
2.5.2 Estressos residuals .....	50
2.5.2.1 Òxids tèrmics .....	50
2.5.2.2 Òxid PECVD .....	50
2.5.2.3 Nitrurs PECVD .....	51
2.5.2.4 LPCVD Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	52
2.5.2.5 Polisilici .....	52
2.6 Simulació a nivell físic. Comportament electro-termo-mecànic. Models MEF emprats .....	53
2.7 Referències .....	57
<b>3. Anàlisi tèrmic i termomecànica de membranes tancades .....</b>	<b>63</b>
3.1 Anàlisi tèrmic de membranes tancades .....	64
3.1.1 Model analític enfront simulacions MEF .....	64
3.1.2 Simulacions electrotèrmiques i tèrmiques .....	67
3.1.2.1 Simulacions electrotèrmiques acoplades .....	67
3.1.2.2 Simulacions del consum en potència .....	70
3.1.3 Mesures elèctriques I-V .....	71
3.1.3.1 Calibració de les microresistències de polisilici .....	72
3.1.3.2 Consum en potència .....	74
3.1.4 Mesures mitjançant termografia infraroja .....	76
3.1.5 Comportament tèrmic de membranes tancades cobertes amb microgotes de SnO <sub>2</sub> .....	82
3.1.5.1 Simulacions tèrmiques .....	82
3.1.5.2 Consum en potència .....	85
3.1.5.3 Distribució de temperatures en la microgota .....	89

---

---

3.1.6 Comportament tèrmic dinàmic .....	90
3.2 Anàlisi termomecànica de membranes tancades .....	94
3.2.1 Vinclament de membranes quadrades .....	94
3.2.2 Deformació residual i estrès residual mig .....	97
3.2.3 Deformació a diferents temperatures .....	100
3.2.3.1 Vinclament bimetal·lic .....	100
3.2.3.2 Relaxació a altes temperatures .....	103
3.2.4 Comportament post relaxació .....	105
3.2.5 Distribució d'estressos i mecanismes de degradació en els substrats .....	109
3.2.5.1 Nitru de silici .....	110
3.2.5.2 Polisilici .....	110
3.2.5.3 Electrodes de Pt-Ti .....	111
3.2.5.4 Òxid de silici .....	113
3.2.6 Trencament de la membrana .....	114
3.2.7 Comportament termomecànic dels substrats coberts amb microgotetes de SnO <sub>2</sub> .....	116
3.2.7.1 Deformació a diferents temperatures .....	117
3.2.7.2 Distribució d'estressos i mecanismes de degradació .....	122
3.2.7.2.1 Microgotetes .....	122
3.2.7.2.2 Membrana .....	125
3.3 Referències .....	127
<b>4. Estudi termomecànic de capes primes metàl·liques per aplicacions en microsensors de gas .....</b>	<b>129</b>
4.1 Tècniques per la caracterització termomecànica de capes primes metàl·liques .....	131
4.1.1 Tècniques per a la caracterització de capes primes metàl·liques al damunt de substrats .....	131
4.1.1.1 Nanoindentació .....	132
4.1.1.2 Mesura de la curvatura de la mostra durant ciclats tèrmics .....	133
4.1.1.3 Difracció de raigs X .....	135
4.1.2 Corbes estrès-temperatura. Plasticitat en capes primes metàl·liques .....	137
4.1.3 Model elasto-plàstic de l'Alumini en capa prima .....	141

---

---

4.2 Fatiga tèrmica en microsensors de gas .....	146
4.2.1 El fenomen de la fatiga .....	146
4.2.2 Estudi a fatiga de microsensors amb metalitzacions d'Alumini .....	152
4.3 Caracterització termomecànica del Pt-Ti .....	156
4.3.1 Mesures de Nanoindentació i AFM .....	156
4.3.2 Difracció de raigs X. Corbes estrès-temperatura .....	160
4.4 Referències .....	170
<b>5. Anàlisi tèrmica i termomecànica de membranes suspeses .....</b>	<b>173</b>
5.1 Anàlisi tèrmica de membranes suspeses .....	174
5.1.1 Simulacions tèrmiques i termoflúidiques .....	174
5.1.1.1 Simulacions tèrmiques lineals .....	175
5.1.1.2 Simulacions tèrmiques no lineals i termoflúidiques .....	176
5.1.2 Calibració de les microresistències de Pt-Ti .....	180
5.1.3 Consum en potència i distribució de temperatura .....	182
5.1.4 Convecció natural en membranes suspeses .....	186
5.1.5 Comportament tèrmic dinàmic .....	188
5.2 Anàlisi termomecànica de membranes obertes .....	190
5.2.1 Deformació residual .....	190
5.2.2 Deformació a diferents temperatures .....	191
5.2.3 Fractura de la membrana .....	194
5.2.4 Comportament termomecànic de membranes suspeses cobertes amb micro gotes .....	196
5.3 Degradació del Pt-Ti a altes temperatures .....	197
5.4 Referències .....	203
<b>6. Conclusions .....</b>	<b>205</b>