

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

*Departament d'Enginyeria Electrònica*

**CONTRIBUCIÓ A L'ESTUDI DE  
L'ACOBLEMENT PER SUBSTRAT EN  
CIRCUITS INTEGRATS MIXTES**

Autor: Xavier Aragonès i Cervera

Director: Antonio Rubio Solá

# Agraïments

Seria injust no deixar constància del meu agraïment a totes aquelles persones que amb el seu recolzament i ajuda han fet possible la finalització exitosa d'aquesta tesi.

En primer lloc, voldria agrair al professor Antoni Rubio la confiança dipositada en donar-me l'oportunitat de formar part del seu equip. La seva direcció, la seva constant aportació d'idees, encoratjament i optimisme han estat sempre un estímul per a avançar en el meu treball.

De la mateixa manera, he d'agrair especialment als meus companys de grup, en Patxi, en Diego, en Josele i en Pep, tots els seus consells, col·laboració i esperit crític que han mostrat al llarg d'aquests anys. Ells han fet més fàcil superar les dificultats que han anat sorgint, i les seves discussions han repercutit sempre en profit dels continguts de la tesi. Voldria destacar en particular la col·laboració d'en Josele al capítol vuitè.

A nivell personal, em considero afortunat d'haver coincidit amb un grup de persones que no només han estat companys de treball, sinó que han ofert la seva amistat i amb els que he compartit aficions, lleure i viatges. Els quatre companys de grup esmentats abans, en Dani, en Toni, l'Eva, en Pau, en Vicente, la *connexió mallorquina* –Jaume i Miquel–, i com no la Núria han fet que, malgrat tot, aquests hagin estat els millors anys de la meua vida. Una abraçada molt gran a tots vosaltres.

Un apartat especial per la Belén i en Santi, mags que sempre han estat disposats a solventar a l'instant qualsevol dels innombrables problemes informàtics que sorgeixen, i ajudar sempre que se'ls demana. A hores d'ara encara no entenc la paciència que tenen amb tots nosaltres.

Finalment no voldria oblidar-me de la resta de companys del departament, de la Dolors i les noies d'administració, i dels que van deixar la seva empremta i ara són lluny d'aquí. Tots ells han fet que la feina hagi estat menys feixuga del que podria semblar.

Per últim, agrair a la meua família, i molt especialment als meus pares, Teresa i Manel, el suport incondicional que m'han ofert sempre. Part d'aquesta tesi també és vostra.

*Campus Nord, Octubre del 97*

# Índex

<b>1.- Introducció</b> .....	<b>1</b>
1.1. Tendències en la tecnologia microelectrònica .....	2
1.2. Tipus d'acoblament en circuits mixtes .....	6
1.2.1. Acoblament entre interconnexions .....	6
1.2.2. Soroll acoblat a través de les línies d'alimentació .....	7
1.2.3. Soroll acoblat a través del substrat .....	8
1.3. Objectius i organització de la tesi .....	8
<b>2.- Caracterització de l'acoblament per substrat</b> .....	<b>11</b>
2.1. Mecanismes d'injecció i recepció del soroll .....	12
2.1.1. Mecanismes d'injecció de soroll al substrat .....	12
2.1.1.a. <i>Injecció capacitiva a través de les junctons</i> .....	12
2.1.1.b. <i>Injecció a través dels contactes</i> .....	13
2.1.1.c. <i>Altres mecanismes</i> .....	13
2.1.2. Mecanismes de recepció de soroll del substrat .....	15
2.1.2.a. <i>Recepció capacitiva a través de les junctons</i> .....	15
2.1.2.b. <i>Efecte substrat</i> .....	15
2.1.2.c. <i>Recepció a través dels contactes</i> .....	16
2.2. Acoblament entre dispositius MOS .....	16
2.2.1. Característiques generals .....	16
2.2.2. Dependència del soroll amb paràmetres tecnològics i de disseny .....	20
2.2.2.a. <i>Dependència amb la distància entre dispositius</i> .....	20
2.2.2.b. <i>Dependència amb el dopat del substrat</i> .....	22
2.2.2.c. <i>Dependència amb el gruix de la oblia</i> .....	23
2.2.2.d. <i>Dependència amb l'àrea del drenador</i> .....	24
2.2.2.e. <i>Dependència amb la profunditat de les junctons</i> .....	24
2.2.2.f. <i>Dependència amb el gruix de la capa epitaxiada</i> .....	25
2.2.2.g. <i>Dependència amb el punt de polarització del dispositiu sensible</i> ..	25
2.2.2.h. <i>Dependència amb el temps de pujada/baixada del senyal sorollós</i> .	26
2.3. Acoblament entre dispositius en tecnologies BiCMOS .....	27
2.3.1. El transistor bipolar com a font de soroll .....	28
2.3.1.a. <i>Configuració d'emissor comú</i> .....	28
2.3.1.b. <i>Configuració de col·lector comú</i> .....	30
2.3.2. El transistor MOS com a font de soroll .....	31
2.4. Mesures realitzades sobre circuits de test .....	32
2.4.1. Tecnologia CMOS 1.5 $\mu\text{m}$ .....	32
2.4.2. Tecnologia CMOS 0.5 $\mu\text{m}$ .....	35
2.4.3. Tecnologia BiCMOS 3 $\mu\text{m}$ .....	37
<b>3.- Propagació del soroll en substrats de silici</b> .....	<b>41</b>
3.1. Conceptes sobre la conducció del soroll en el silici .....	42
3.2. Tècniques atenuadores del soroll en condicions ideals .....	44
3.2.1. Tècniques atenuadores del soroll en oblies tipus P .....	45
3.2.2. Tècniques atenuadores del soroll en oblies tipus N .....	49

3.3. Anàlisi tridimensional de la propagació del soroll en el substrat . . . . .	51
3.3.1. Característiques de l'anàlisi i validació de l'eina . . . . .	51
3.3.2. Propagació del soroll i eficiència de tècniques per a la seva reducció . . . . .	54
3.3.3. Efecte de les dimensions i localització dels anells de guarda . . . . .	57
3.3.4. Continuitat dels anells de guarda . . . . .	60
3.3.5. Característiques de les capes enterrades . . . . .	62
3.4. Conclusions . . . . .	64
<b>4.- Modelació de l'acoblament per substrat . . . . .</b>	<b>67</b>
4.1. Modelació del substrat amb mètodes numèrics . . . . .	68
4.1.1. Mètodes basats en la resolució de l'equació de Poisson . . . . .	68
4.4.1.a. Model de comportament del substrat . . . . .	68
4.4.1.b. Discretització del substrat . . . . .	69
4.4.1.c. Obtenció del macromodel del substrat . . . . .	70
4.4.1.d. Resolució dels sistemes d'equacions . . . . .	71
4.1.2. Mètodes basats en l'obtenció de la funció de Green . . . . .	72
4.2. Modelació del substrat amb mètodes aproximats . . . . .	74
4.2.1. Avaluació del soroll al substrat per superposició de signatures . . . . .	74
4.2.2. Obtenció de models per triangulació de Delaunay . . . . .	75
4.2.3. Expressions per al càlcul de la resistència entre dos ports . . . . .	77
4.2.4. Validació d'un macromodel resistiu per al substrat . . . . .	78
4.2.4.a. Validació del model en substrats $P^+$ . . . . .	80
4.2.4.b. Validació del model en substrats $P^-$ . . . . .	81
4.2.5. Expressions semi-empíriques proposades . . . . .	83
4.2.5.a. En substrats $P^+$ . . . . .	83
4.2.5.b. En substrats $P^-$ . . . . .	85
<b>5.- Influència de la polarització en el soroll al substrat . . . . .</b>	<b>87</b>
5.1. Introducció . . . . .	88
5.1.1. Motivació . . . . .	88
5.1.2. Descripció de la situació analitzada . . . . .	88
5.1.3. Terminologia . . . . .	91
5.2. Estudi de la polarització de substrats $P^-$ . . . . .	91
5.2.1. Mecanismes d'acoblament i estratègia de polarització . . . . .	91
5.2.2. Efecte de l'anell de <i>pads</i> . . . . .	94
5.2.3. Polarització d'un anell de guarda . . . . .	94
5.2.4. Efecte del valor de la inductància dels terminals d'alimentació . . . . .	95
5.3. Estudi de la polarització de substrats $P^+$ . . . . .	97
5.3.1. Mecanismes d'acoblament i estratègia de polarització . . . . .	97
5.3.2. Efecte de l'anell de <i>pads</i> . . . . .	100
5.3.3. Polarització d'un anell de guarda . . . . .	102
5.3.4. Efecte del valor de la inductància dels terminals d'alimentació . . . . .	102
5.4. Implicacions de <i>latch-up</i> . . . . .	104
5.4.1. El fenomen de <i>latch-up</i> . . . . .	104
5.4.2. <i>Latch-up</i> induït per soroll en el substrat . . . . .	106
5.4.3. <i>Latch-up</i> induït per soroll a les línies d'alimentació . . . . .	107
5.5. Conclusions . . . . .	110

<b>6.- Propostes alternatives per a la reducció del soroll per substrat</b> . . . . .	<b>113</b>
6.1. Capes enterrades . . . . .	114
6.1.1. Descripció de l'anàlisi . . . . .	114
6.1.2. Alternatives de disseny . . . . .	115
6.1.3. Aspectes tecnològics . . . . .	117
6.2. Compensació del soroll . . . . .	120
6.3. Guardes actives . . . . .	123
<b>7.- Mesures de soroll sobre un circuit mixte</b> . . . . .	<b>129</b>
7.1. Descripció del circuit dissenyat . . . . .	130
7.1.1. Característiques generals . . . . .	130
7.1.1.a. Aspectes tecnològics . . . . .	130
7.1.1.b. Distribució de l'alimentació i contactes . . . . .	131
7.1.2. Descripció de la part digital . . . . .	132
7.1.3. Descripció dels sensors . . . . .	132
7.1.3.a. Element sensor . . . . .	133
7.1.3.b. Comparador amb auto-zero . . . . .	133
7.1.3.c. Amplificador diferencial . . . . .	135
7.2. Resultats de les mesures sobre l'element sensor . . . . .	137
7.2.1. Entorn d'experimentació . . . . .	137
7.2.2. Formes d'ona del soroll en funció del sentit de la commutació . . . . .	138
7.2.3. Soroll en funció del punt de treball del sensor . . . . .	140
7.2.4. Simulació de l'extracció del circuit . . . . .	142
7.2.5. Soroll en funció de l'activitat de la part digital . . . . .	145
7.2.6. Soroll en funció de l'estratègia de polarització . . . . .	145
7.3. Resultats de les mesures sobre comparadors . . . . .	148
7.3.1. Efectes del soroll sobre un comparador amb auto-zero . . . . .	148
7.3.2. Efectes del soroll sobre un amplificador diferencial com a comparador . . . . .	151
<b>8.- Tendències del soroll de commutació</b> . . . . .	<b>153</b>
8.1. Escenaris d'escalat de tecnologies CMOS . . . . .	154
8.2. Tendències del soroll a les alimentacions (SSN) . . . . .	157
8.2.1. Situació analitzada . . . . .	157
8.2.2. Tendències per un circuit de complexitat fixa . . . . .	158
8.2.3. Tendències tenint en compte l'augment de complexitat . . . . .	160
8.3. Tendències del soroll acoblat a través del substrat . . . . .	162
8.3.1. Tendències en substrats P- . . . . .	162
8.3.1.a. Per un circuit de complexitat fixa . . . . .	162
8.3.1.b. Tenint en compte l'augment de complexitat . . . . .	163
8.3.2. Tendències en substrats P+ . . . . .	164
8.3.2.a. Per un circuit de complexitat fixa . . . . .	164
8.3.2.b. Tenint en compte l'augment de complexitat . . . . .	165
<b>9.- Conclusions</b> . . . . .	<b>167</b>
<b>Referències</b> . . . . .	<b>173</b>