

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

Capítol 9

Conclusions

L'acoblament de perturbacions a través del substrat de silici en circuits integrats mixtes representa un important problema que sovint limita les prestacions de la circuiteria analògica. Existeix una incomprensió de les característiques de l'acoblament i els factors que en determinen la seva importància, de manera que manquen criteris per a emprendre accions que solventin el problema. Als últims anys s'han proposat diverses tècniques per a la reducció del soroll, tot i que no hi ha criteris clars sobre el seu rang de validesa i les condicions que s'han de complir per a la seva eficàcia. La major part de l'esforç de recerca que s'ha fet en aquest camp s'ha centrat en el desenvolupament de models que facilitin la incorporació del substrat a les eines CAD utilitzades a la fase de simulació d'un circuit. Per tant, aquesta recerca no ofereix aportacions en la comprensió dels aspectes rellevants del fenomen.

A la tesi doctoral presentada s'ha realitzat un estudi analític i experimental que ha permès determinar les característiques tecnològiques i de disseny que faciliten l'acoblament vers la circuiteria analògica. S'ha partit d'una caracterització de l'acoblament mitjançant un simulador de dispositius, on s'ha pogut comprovar la importància d'aspectes com el tipus de substrat, la velocitat de commutació dels dispositius, les seves dimensions, o el punt de polarització. La caracterització s'ha realitzat tant per tecnologies CMOS com BiCMOS, i ha estat completada amb mesures sobre estructures de test. Posteriorment s'ha portat a terme un anàlisi de la propagació del soroll en el substrat, amb el què s'han esbrinat les característiques tecnològiques i de polarització que determinen l'atenuació del soroll. L'anàlisi s'ha realitzat suposant condicions de polarització ideals, i ha permès determinar el potencial d'algunes mesures per a la minimització de l'acoblament. A continuació s'ha fet una revisió de les diverses tècniques de modelació del substrat, i utilitzant algun dels models s'han pogut realitzar simulacions circuitals per a estudiar l'acoblament en circuits de dimensions realistes, tenint en compte factors com els elements paràsits dels terminals de

l'encapsulat, la influència dels *pads*, o l'estratègia de polarització. Aquest estudi s'ha complementat amb el disseny d'un circuit mixte de test sobre el que s'han fet mesures per a verificar els resultats obtinguts, i corroborar els mecanismes que determinen l'acoblament. La tesi s'ha completat amb una revisió de l'eficàcia d'algunes tècniques específiques per a la reducció del soroll, i amb un estudi de l'evolució en tecnologies futures tant del soroll de commutació a les línies d'alimentació, com del soroll acoblat a través del substrat.

Les pertorbacions són originades per l'activitat dels circuits digitals, i són introduïdes al substrat bé per acoblaments des de línies d'alimentació sorolloses, o bé pels propis dispositius, a través de les junccions de drenadors en commutació o per electrons calents (*hot carriers*). El soroll produït es propaga a través del silici, i arriba als dispositius analògics bé a través de les línies d'alimentació, o bé directament des del substrat, afectant el transistor a través de l'efecte substrat (*body-effect*) o a través de les junccions de drenador o surtidor. Els nivells de soroll que es tenen en un dispositiu degut a aquest acoblament poden ser de l'ordre dels centenars de mil·livolts, i s'ha comprovat experimentalment que poden portar a una important pèrdua de resolució en convertidors A/D, i a lectures errònies dels valors emmagatzemats en cel·les de memòria.

En substrats P+ la pertorbació introduïda travessa la capa epitaxiada, i es propaga a través de la part molt dopada. Donada la poca resistivitat del substrat en relació a la impedància a massa dels contactes, el soroll no s'atenua en la seva propagació, comportant-se tot el substrat com un sol node. Idealment un contacte connectat a la part posterior del xip ofereix un camí de retorn a la pertorbació, de forma que pràcticament es podria eliminar el soroll. A la realitat però, la impedància associada a les connexions de l'encapsulat al contacte fan que la fracció de soroll que es deriva a massa a través d'aquest camí sigui molt petita, esdevenint totalment inefectiu. A més, per les components freqüencials més elevades –per sobre els gigahertz– el contacte posterior perd la seva efectivitat degut a l'aparició de l'efecte pel·licular (*skin-effect*).

Degut a la no atenuació del soroll amb la distància, s'ha comprovat tant per simulació com experimentalment que en aquest tipus de substrats el soroll és injectat i rebut a través de les línies d'alimentació de les respectives seccions. La grandària de la circuiteria digital junt amb l'elevat nombre de contactes, fa que la impedància entre les línies d'alimentació digital i el substrat sigui molt baixa, de forma que el soroll present a les primeres és fàcilment introduït al segon. Encara que la secció analògica sigui de petites dimensions, els contactes i capacitats paràsites associades als *pads* analògics resulten suficients per a que les línies d'alimentació analògiques adquireixin el soroll i el transmetin als dispositius. La facilitat amb que això succeeix depèn únicament del nombre i característiques dels *pads*, i no de la seva proximitat a la circuiteria sorollosa. El mecanisme de propagació i l'efecte dels *pads* fa que la quantitat de soroll rebuda sigui independent de l'estratègia de polarització del substrat a l'interior (*core*) del circuit.

El fet que en el mecanisme d'acoblament tinguin un paper predominant les línies d'alimentació, fa que la impedància de les connexions (*pins*) de l'encapsulat associades a aquestes línies tinguin una gran importància. Aquesta impedància depèn bàsicament de l'autoinductància de la connexió. Si s'aconseguissin valors d'inductàncies suficientment baixos, es tindria un camí de retorn per la pertorbació de molt baixa impedància, a través dels contactes de polarització, que permetria la derivació fins i tot del soroll injectat pels propis dispositius. A la pràctica les inductàncies elevades no sols inhabiliten el camí de retorn sinó que fan augmentar la quantitat de soroll present a les línies d'alimentació digital, que és acoblat a través del substrat. Degut a la independència del soroll amb la distància, els anells de guarda no tenen sentit en aquest tipus d'oblies, sinó que només importa el nombre –àrea– total dels contactes de polarització. Donat que els contactes tenen en sèrie la inductància dels

pins de l'encapsulat, no té sentit augmentar arbitràriament el nombre de contactes, ans al contrari, com major és el nombre de contactes, amb major facilitat s'introdueix o s'adquireix el soroll de commutació vers les línies d'alimentació.

Si es vol minimitzar el soroll en aquest tipus de substrats, resulta fonamental minimitzar el soroll de commutació a les línies d'alimentació digitals. A la literatura es poden trobar un nombre de tècniques proposades per aquest fi [115]. Convindrà minimitzar l'acoblament entre línies d'alimentació digital o analògica i el substrat, minimitzant les capacitats paràsites –cuidant l'amplada de les línies, el nivell de metalització, implementant pous sota seu–, així com evitant els contactes de polarització connectats a aquestes línies. Aquests aspectes hauran de ser tinguts especialment en compte en el disseny de l'anell de *pads*. El substrat hauria de polaritzar-se a través de línies dedicades, lliures de soroll i que no afectin la circuiteria analògica. La polarització hauria de ser bé amb contactes a la superfície o amb un contacte posterior, però en tot cas haurien de proporcionar un camí de retorn del soroll de molt baixa impedància. Per això les inductàncies efectives dels terminals connectats a les línies de polarització haurien de ser molt més baixes que les que es tenen a l'actualitat, de valor depenent de l'activitat de la part digital, però en tot cas per sota 1 nH. L'assignació de múltiples *pins* a una sola línia pot ajudar a aconseguir l'objectiu. En tot cas la relació entre nombre de portes i terminals d'alimentació hauria de ser inferior al que hi ha a l'actualitat, i en substrats P+ menor que en substrats P-. Només aconseguint una línia de polarització lliure de soroll tindrà sentit incrementar el nombre de contactes. Els anells de guarda no tenen més sentit que qualsevol altre contacte de polarització. Donat que el soroll augmenta amb el nombre de portes commutant, serà també important particionar el circuit per a poder inhabilitar aquelles parts que no s'estiguin utilitzant.

Els objectius de minimitzar inductàncies i eliminar el soroll a les línies de polarització i alimentació són molt difícils d'aconseguir, de manera que a la pràctica, en igualtat de condicions els substrats P+ faciliten més l'acoblament que els substrats P-. La circuiteria diferencial acaba essent la millor tècnica de reducció de soroll, tot i que s'han d'aconseguir rebutjar elevats nivells de soroll.

En oblies P- el soroll s'atenua amb la distància en la mesura que es troben contactes de polarització que faciliten un camí de retorn per la pertorbació. En aquests substrats el camí de propagació és resistiu, de forma que com més a prop de la font de soroll es trobi el contacte de polarització, menor és la impedància a massa a través d'aquest camí de retorn. Per aquesta mateixa raó els contactes de polarització posteriors resulten totalment ineficients, donat el gruix i la resistivitat d'aquest tipus d'oblies. En canvi, els anells de guarda sí resulten eficients i han d'estar situats en el camí de la propagació vers la circuiteria analògica. No és necessari per tant que rodegin tot el circuit a protegir, de la mateixa manera que es poden permetre obertures per a facilitar la connectivitat. Els anells de guarda haurien d'estar polaritzats amb una línia d'alimentació dedicada, i consistir només en implantacions del mateix tipus que el substrat. Les simulacions han mostrat que la propagació a través del *channel-stop layer* és relativament poc significativa.

Els contactes de polarització situats a la secció analògica haurien d'estar connectats a la línia d'alimentació analògica, o millor encara a una línia de polarització dedicada, de manera s'eviti que el soroll arribi a l'alimentació dels circuits a través dels contactes. Els contactes de la secció digital haurien d'estar connectats a les alimentacions digitals, per raons de *latch-up*. En tot cas una mateixa línia no hauria de ser utilitzada per a polaritzar tot el substrat. L'experimentació ha mostrat però que la impedància del camí de retorn a través dels contactes és tant elevada –degut a la inductància dels *pins*– que a la pràctica el soroll experimenta una moderada atenuació amb la distància. Per aquesta raó el mecanisme

d'acoblament és a la realitat molt semblant al que es té en substrats P+: el soroll és injectat majoritàriament per les línies d'alimentació digitals, i arriba a les línies d'alimentació analògica tot i la distància. Tot i això l'atenuació és major que en oblies P+, de forma que el nivell de soroll és més petit, una tercera part en les nostres mesures.

Les tècniques per a reduir el soroll passen pels mateixos punts que en substrats P+: minimitzar el soroll de commutació a les línies digitals, minimitzar la inductància dels terminals d'alimentació per tal d'oferir camins de retorn de baixa impedància, i evitar l'acoblament a les línies d'alimentació analògica, especialment en el disseny dels *pads*. Si es compleixen aquestes condicions, aleshores es podrà pensar en anells de guarda o estratègies de polarització adient. Altrament el soroll que arriba a les alimentacions analògiques és molt major que el què es pot evitar amb tècniques de *layout*.

Les tècniques de modelació de substrats P+ basades en considerar el substrat com un sol node, i modelar únicament les resistències entre ports –transistors, contactes o línies d'alimentació– i el node substrat, han demostrat ser prou efectives i donar resultats acurats. En canvi, en substrats P-, un model del substrat que contempli només les resistències entre dispositius propers s'ha mostrat eficient només en situacions simples. Atès que a la pràctica el soroll no s'atenua tant amb la distància com era previsible, es fa necessari que el model contempli la propagació del soroll a través de l'interior del substrat, cosa que un model excessivament senzill no contempla.

S'ha considerat l'aplicació d'altres tècniques per a la reducció del soroll al substrat, que per la seves contraprestacions poden no ser atractives per un ús generalitzat. Les capes enterrades han mostrat ser una forma efectiva de reducció de l'acoblament, no només perquè ofereixen una camí de baixa impedància vers els contactes de polarització, sinó perquè l'alternància de capes i pous tipus N i P incrementa la resistència del camí entre la secció sorollosa i la secció sensible. Serà important disposar de capes tant sota la secció digital com sota l'analògica, i és especialment important que es polaritzin a través de contactes profunds. La complexitat tecnològica afegida que representa la implementació de capes enterrades és significativa respecte a processos CMOS –tres màscares, una epitàxia–, però no respecte a processos BiCMOS –només una màscara extra–. Les característiques tecnològiques de la capa també són importants, ja que han de minimitzar la resistència fins els contactes de polarització. La verificació experimental de l'eficàcia de les capes enterrades es deixa com a línia de recerca futura.

La possibilitat de compensar polsos de soroll mitjançant la commutació simultània i en contrafase de *dummy buffers* no és viable a la pràctica, ja que la pertorbació és majoritàriament injectada al substrat per les línies d'alimentació digital, i el soroll en aquestes línies té la mateixa forma d'ona independentment del sentit de la commutació. A més, les exigències de sincronisme i velocitat de commutació dels *buffers* serien molt riguroses.

L'anul·lació del soroll a través de realimentació negativa utilitzant guardes actives ha mostrat ser viable a baixa freqüència. El fet que la guarda s'implementi amb un amplificador operacional limita l'ample de banda d'aquesta tècnica. A més, en funció del valor de resistències del substrat pot veure's afectat tant l'ample de banda com el funcionament en zona lineal de l'amplificador. La implementació de la guarda activa *on-chip* afegeix encara més complicacions. Per tant, a la pràctica les guardes actives són tant poc atractives com poc eficaces.

Per últim, s'ha realitzat una previsió de l'evolució del soroll de commutació en tecnologies futures, fins a 0.2 μm . Mentre les tensions d'alimentació s'han mantingut constants, sense escalar, el soroll de commutació no ha fet més que augmentar. La reducció de la tensió

d'alimentació fa que, encara que en valors absoluts els temps de transició de les portes disminueixen, els pendents de les transicions són més suaus. Això porta a una disminució del soroll de commutació, i a un límit en la degradació de la relació senyal a soroll.

En l'acoblament a través de substrats P-, l'escalat de dimensions dels dispositius i la reducció de la tensió d'alimentació farà que el nivell de soroll es redueixi fortament amb la tecnologia, portant a una lleugera recuperació de la relació senyal/soroll. En tant que el soroll s'atenua amb la distància, la recuperació de la relació senyal/soroll es donarà tot i l'augment de complexitat dels circuits. En substrats P+, però, l'augment del nombre de portes en el futur farà que la relació senyal/soroll no es recuperi, tot i que tampoc no es degradarà més. En canvi, implementar un mateix circuit –amb un nombre de portes donat– en una tecnologia més avançada porta a una forta reducció del soroll acoblat a través del substrat.

El límit en la degradació del senyal no implica una eliminació del problema de l'acoblament de soroll en un futur, en tant que no es preveu una acusada recuperació de les relacions senyal/soroll, mentre que sí es preveu una major demanda de resolució a conseqüència d'una major exigència en les prestacions dels circuits.