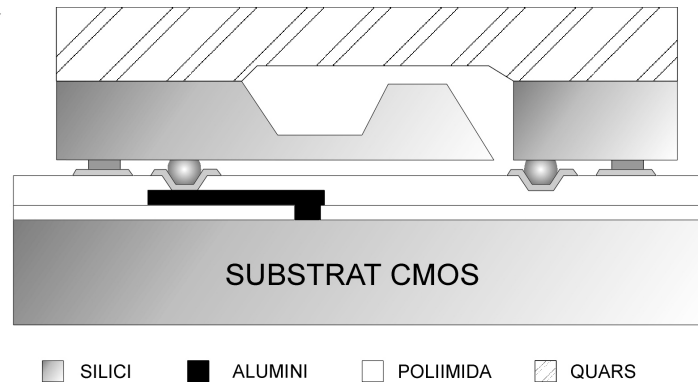


## Capítol 4 . Fabricació i muntatge del mòdul multixip.

En aquest capítol es descriu la fabricació dels diferents xips que formaran part del mòdul multixip, així com el procés de muntatge i encapsulat del conjunt que donarà lloc a un *Smart Sensor*. Concretament, es detallen els passos realitzats per l'adaptació de la tecnologia d'acceleròmetres a l'encapsulat MCM i la fabricació d'aquests. Es descriu també, la fabricació dels substrats MCM, que com s'ha explicat a l'apartat 3.5, són de dos tipus: un de tecnologia MCM pura i un altre amb tecnologia combinada MCM-CMOS25 de doble metall. El substrat amb tecnologia MCM pura servirà únicament com a substrat de test del procés de muntatge mentre que el fabricat amb tecnologia MCM-CMOS25 inclourà una primera etapa pre-amplificadora del senyal del transductor. S'il·lustra tot el procés d'encapsulat *flip-chip* d'aquests dispositius i els requeriments especials que el disseny d'un marc tancat ha introduït en la tècnica de dipòsit de pasta de soldadura, *l'screen-printing*. A la Figura 4.1 es mostra un tall esquemàtic de l'arquitectura final del mòdul multixip.



**Figura 4.1:** Tall esquemàtic de l'estructura d'un mòdul multixip amb acceleròmetre.

El sensor d'acceleració, amb un vidre soldat al dors, es munta en configuració *flip-chip* sobre un substrat MCM que pot tenir només línies d'interconnexió o una etapa pre-amplificadora de tecnologia CMOS de doble metall. Com a detalls, es fan notar la presència de les boles de soldadura o *solder bumps* i del marc tancat, exterior a aquestes, fet també amb pasta de soldadura. Els *solder bumps* són els que proporcionen el contacte elèctric entre l'acceleròmetre i el substrat, mentre que el marc extern protegeix aquestes connexions i les parts mòbils del sensor. Les connexions elèctriques cap a l'exterior són pads per la soldadura amb fil (*wire-bonding*) situats a la perifèria del substrat MCM.

Un cop fet l'encapsulat *flip-chip*, i gràcies al vidre del dors i al marc tancat de soldadura, l'acceleròmetre queda totalment enllestit per a un encapsulat tradicional, i pot ser introduït en una cadena estàndard d'encapsulat. Queda així un encapsulat completament tancat i a la vegada molt robust. El segon gran avantatge d'aquest encapsulat és la possibilitat de que el substrat multixip sigui a més un substrat intel·ligent, convertint així l'encapsulat en un **Smart Sensor**.

#### 4.1 Fabricació d'acceleròmetres sobre oblies BESOI.

La tecnologia de fabricació d'acceleròmetres en que es basa aquest projecte és una combinació de micromecanitzat en volum i en superfície sobre oblies BESOI. L'ús d'aquest tipus d'oblies ens permet la realització d'estructures de protecció contra xocs i un mètode d'aturada de l'atac anisòtrop molt precís. Com ja hem explicat al capítol 3, la tecnologia de fabricació d'acceleròmetres necessita unes modificacions per poder realitzar el muntatge *flip-chip*. Aquestes modificacions són bàsicament una variació en la tecnologia de pads i el disseny d'un marc tancat que encercli les parts micromecanitzades del sensor.

A continuació passem a descriure el procés de fabricació dels acceleròmetres. El joc de màscares CNM149 per alineadora de contacte és el dedicat a la fabricació d'acceleròmetres pel seu posterior encapsulat en MCM. Aquest joc de màscares consta d'un total de 9 etapes fotolitogràfiques que detallem a continuació a la Taula 4.1. L'última d'aquestes màscares, la màscara DAMP, no s'empra sobre silici sinó sobre el vidre que es solda a la cara dors de la oblia per protecció d'aquesta cara. També es detalla la seqüència d'alineament i les característiques de camp de cadascun dels layers.

Nom	Camp	Alineat	Descripció
M1	FOSC	-----	Gravat RIE de 2000Å que deixa marques al silici per l'alineament doble cara amb la KOH i posteriors.
KOH	CLAR	M1	Definició de les zones del gravat anisòtrop.
PIEZO	FOSC	M1	Definició de les piezoresistències de silici mitjançant la implantació de dopants.
CONTACT	CLAR	M1	Estructuració d'una capa d'òxid sota les pistes d'alumini.
ALU_SI	CLAR	CONTACT	Definició de pistes d'alumini i de contactes amb les piezoresistències.
OX_PROT	CLAR	ALU_SI	Estructuració del òxid PECVD dipositat com a protecció de l'alumini.
MGOLD	CLAR	OX_PROT	Definició dels pads MCM i del marc de soldadura.
RIE_SI	FOSC	MGOLD	Atac sec per l'alliberament de les estructures mòbils.
DAMP	FOSC	-----	Disseny de cavitats al vidre soldat al dors, per permetre moviment a les masses i controlar l'amortiment .

**Taula 4.1: Seqüència i descripció de les màscares del joc CNM149 per a la fabricació d'acceleròmetres.**

El material de partida són oblies BESOI de 4", tipus n i orientació <100>. Aquestes oblies estan formades per una capa de silici de 15µm, una capa d'òxid enterrat de 2µm i un *bulk* de 433µm. Les característiques de les oblies de partida ens condicionen alguns dels paràmetres més importants dels components que s'hi fabriquen. La capa de silici sobre òxid ens defineix amb molta exactitud el gruix dels ponts dels dispositius, i per tant té una influència important en la sensibilitat dels sensors. Tal i com s'ha explicat a l'apartat 2.1.2.3, degut a l'existència d'estructures de protecció contra xocs, el recorregut de les masses està limitat al gruix de la capa d'òxid enterrada, limitant així el desplaçament màxim d'aquestes estructures i en conseqüència la sensibilitat i el rang d'operació dels components.

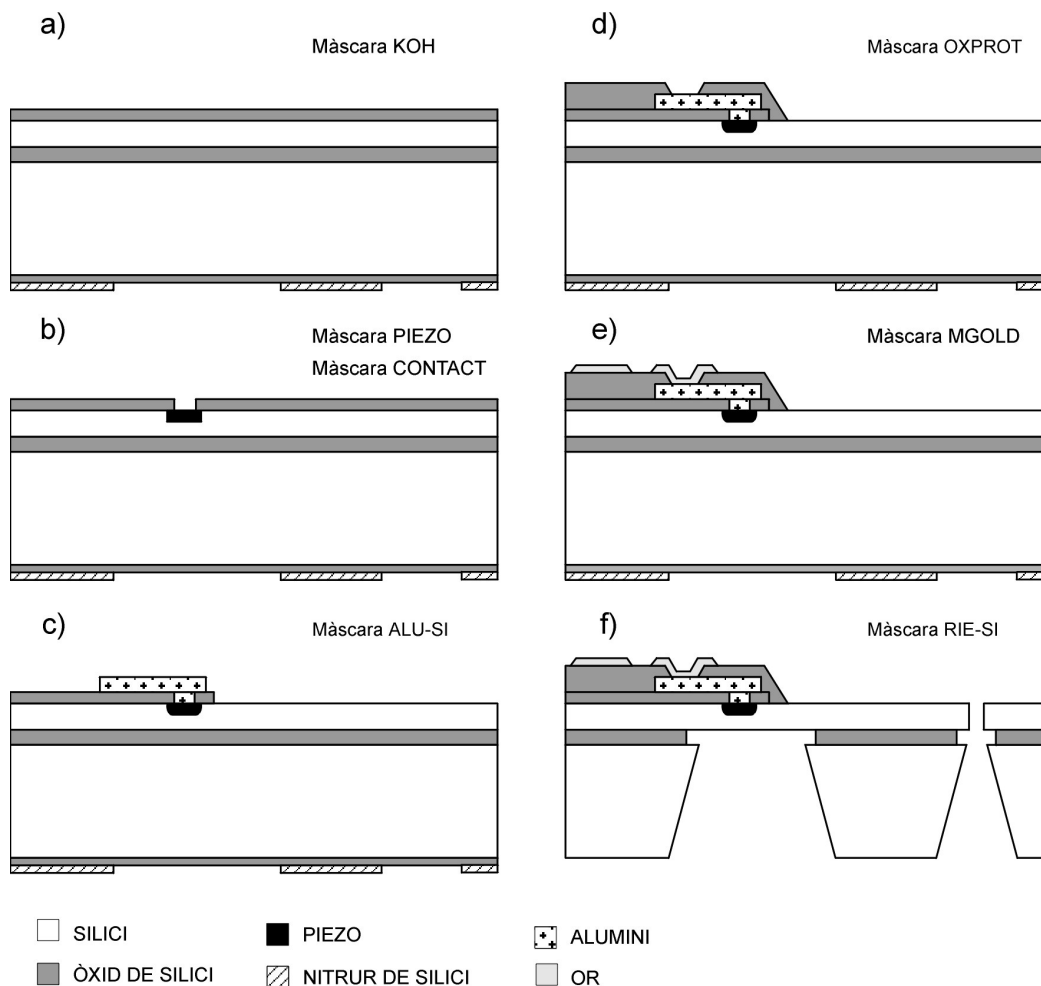
La primera màscara del procés de fabricació és la CNM149-M1. Aquesta màscara serveix per a la definició de motius d'alineament doble cara mitjançant un atac poc profund (2000Å) del silici a la cara components de la oblia. Amb aquest atac, també es defineixen marques per les subseqüents etapes fotolitogràfiques a la cara components. Això es va considerar necessari, degut a que l'etapa de definició de les piezoresistències mitjançant una implantació iònica, no deixa marques apreciables pels posteriors alineaments. D'aquesta manera tots els alineaments fins a la màscara CONTACT es fan sempre contra M1.

A continuació es preparen les oblies per l'atac anisòtrop fent créixer una doble capa d'òxid i nitrur de silici. L'òxid de silici s'emprarà com a màscara durant el procés de gravat del silici amb KOH. La màscara CNM149-KOH estructura la capa de nitrur a la cara dors de la oblia, i, per tant, es fa necessari un alineament a doble cara (veure figura 4.2.a). A la seva vegada, el nitrur de silici fa de màscara en el posterior gravat de l'òxid. Posteriorment, la capa de nitrur dipositada a la cara components es decapa totalment.

A continuació es defineixen les piezoresistències de tipus p sobre el nostre substrat tipus n. La màscara utilitzada és l'anomenada CNM149-PIEZO. Degut a que els motius dissenyats són molt petits, la resina és sotmesa a un procés de millora enfront el gravat. Seguidament es

realitza el gravat de l'òxid de 6000Å de la cara components. Aquest òxid és el que efectivament farà de màscara enfront de la implantació. Malgrat tot, per evitar danys a la superfície del silici es creix un òxid tèrmic prim de 300Å. A continuació es realitza la implantació de Bor amb una dosi de  $1.22 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-2}$  i una energia de 50KeV. Aquests paràmetres són els establerts per obtenir una resistència quadre de  $100 \Omega/\text{quadre}$ . Finalment es decapa tot l'òxid de la cara components i es realitza l'activació de les impureses.

El següent pas és l'estructuració d'un òxid sobre el qual definir les pistes de metall. L'òxid escollit va ser 1000Å d'òxid PECVD. L'obertura dels contactes per accedir a les piezoresistències es realitza amb la màscara CNM149-CONTACT (veure figura 4.2.b). Com que el procés anterior no deixa marques apreciables, resulta difícil fer l'alineament entre aquestes dues etapes fotolitogràfiques. Aquest problema es va tenir en consideració a l'etapa de disseny dels motius d'alineament i va ser resolt fent que la màscara M1 deixés un motiu per totes les altres etapes fotolitogràfiques. Degut que l'òxid pot afegir estressos intrínsecs als components, aquest es retira de tota la superfície tret de sota les pistes i de sobre les piezoresistències. D'aquesta manera es veu reduït considerablement el nivell d'estressos inicials dels components.



**Figura 4.2:** Seqüència d'etapes en el procés de fabricació d'acceleròmetres sobre oblies BESOI per l'encapsulat MCM.

La metal·lització consisteix en un capa d'Al/Cu de  $0.7\mu\text{m}$  de gruix que s'estructura amb la màscara CNM149-ALU\_SI (veure figura 4.2.c). Seguidament es realitza la recuita de l'alumini. Els passos que es descriuen a continuació formen part del procés d'adaptació del sensor a la tecnologia MCM.

Degut a que l'alumini no és un metall adequat pel muntatge *flip-chip* propi de la tecnologia MCM, els *bump pads* o pads de soldadura es defineixen amb un metall soldable. El gravat d'aquesta capa metàl·lica perjudica el metall d'interconnexió, l'alumini, i per tant es fa necessari que aquest estigui protegit. Així doncs, es diposita novament una capa d'òxid PECVD de  $1500\text{\AA}$  i s'estructura, deixant-lo només a sobre de l'alumini i les piezoresistències. S'obren, també, obertures per accedir a l'alumini des dels *bumps pads* típics de la tecnologia MCM. La màscara emprada en aquesta etapa és l'anomenada CNM149-OXPROT (veure figura 4.2.d)

La definició dels *bump pads* i del marc de soldadura que encercla la estructura mòbil del sensor, es fa mitjançant el dipòsit i el gravat d'una tricapa metàl·lica amb la màscara CNM149-MGOLD (veure figura 4.2.e). Aquesta tricapa està formada per titani, níquel i or, les funcions dels quals ja s'han comentat a l'apartat 2.2.4. Tant els pads de soldadura com el marc tancat s'han definit sobre regions amb òxid PECVD. El disseny dels pads és octogonal per facilitar la formació de boles, mentre que el marc s'ha dissenyat completament quadrat, però deixant dues obertures per a l'expulsió de gasos durant el procés de refosa de la soldadura. Normalment en la tecnologia MCM aquesta tricapa és diposita sobre poliimida. El gran avantatge de la poliimida com a dielèctric és la seva gran capacitat de recobriment dels esglaons i la seva planaritat. En aquest cas la tricapa metàl·lica s'ha dipositat sobre una capa d'òxid PECVD. Es coneguda la presència de cracks en les capes d'òxid dipositades amb tècniques de dipòsit químic. Això va provocar que visualment l'or presentés un efecte com amb cracks tal i com es mostra a la Figura 4.3. En cap moment, però, s'ha observat que això dificultés la seva adherència o la seva funció com a capa soldable. En aquesta fotografia es pot veure també la obertura de  $150\mu\text{m}$  dissenyada al marc d'or que no permetrà que el marc de soldadura es tanqui completament durant la refosa.

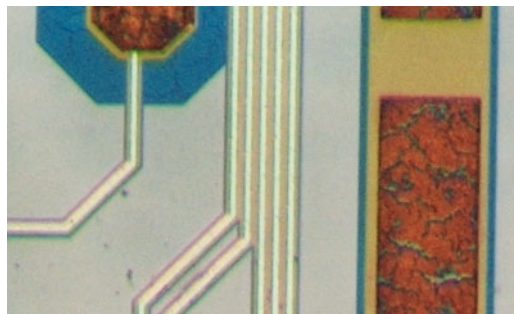
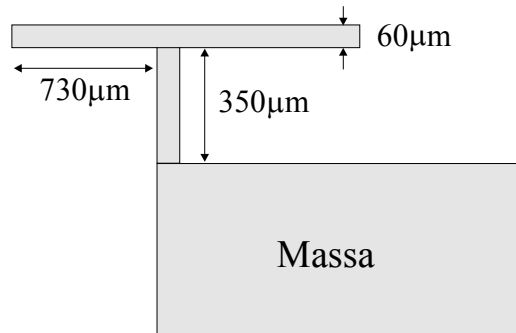


Figura 4.3: Detall del marc d'or sobre els xips sensors.

L'última etapa fotolitogràfica és la dedicada a la definició de les zones on s'ha de realitzar el gravat sec que allibera les estructures. Aquesta etapa es realitza abans del gravat anisòtrop, ja que les oblies són molt fràgils després del micromecanitzat en volum. Per aquesta fotolitografia s'empra fotoresina gruixuda de  $8\mu\text{m}$  perquè resisteixi l'atac llarg de les  $15\mu\text{m}$  de silici.

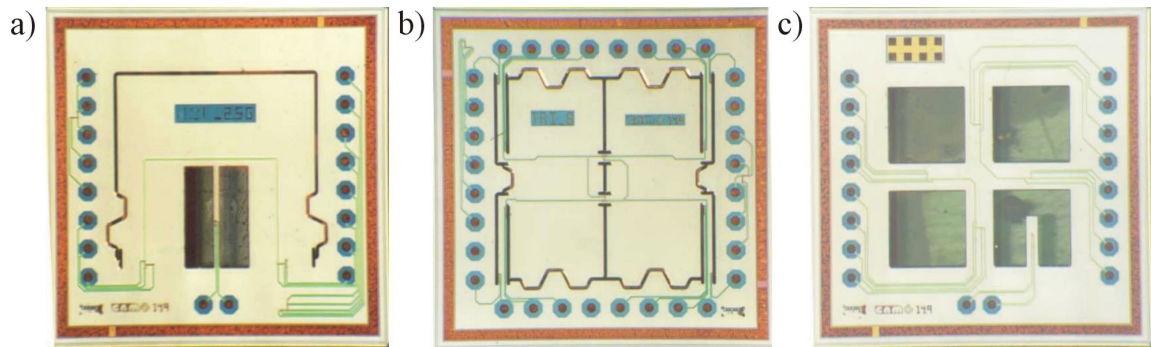
A continuació es realitza l'atac anisòtrop amb KOH del *bulk* de la oblia, unes  $433\mu\text{m}$ , fins arribar a l'òxid enterrat on s'atura l'atac. La velocitat d'atac del KOH sobre l'òxid de silici és de  $2200\text{\AA}/\text{hora}$  cosa que permet fer un petit sobreatac del silici per assegurar-nos de l'alliberament de les estructures. En acabat es realitza una neteja amb HCl per evitar la contaminació amb KOH. Després d'això s'ataca l'òxid de silici amb HF. El gruix de la capa enterrada és de  $2\mu\text{m}$  però, tal com s'explica a l'apartat 2.1.2.3, les estructures de protecció s'estenen sobre el marc del xip, de manera que per alliberar completament aquestes estructures cal fer un sobreatac lateral de l'òxid de fins  $70\mu\text{m}$ . La distància d'aquest atac lateral es controla fàcilment per temps. Un atac final de  $1000\text{\AA}$  de silici en TMAH, deixarà les superfícies de les estructures de protecció més rugoses. D'aquesta manera s'intenta evitar el problema inherent d'aquest tipus d'estructures: l'adhesió amb el marc o *sticking*. Un atac sec, decaparà totalment el nitrur i l'òxid de la cara dors de la oblia que han fet de màscara durant l'atac anisòtrop. El gravat anisòtrop necessita d'estructures de compensació en els vèrtexs. El sobreatac lateral del silici en KOH a  $40\%wt$  i  $75^\circ\text{C}$  és de 2.9, d'on s'extreu que la longitud de compensació requerida per un gruix de *bulk* de  $450\mu\text{m}$  és de  $1300\mu\text{m}$ . La Figura 4.4 és un dibuix del tipus de barra de compensació implementada en el nostre dissenys i de les seves dimensions.



**Figura 4.4: Detall de les estructures de compensació per l'atac anisòtrop.**

Tot aquest llarg procés ha pogut perjudicar la qualitat de la fotoresina per l'atac sec, prèviament insolada. Així doncs, se la sotmet a una recuita a  $100^\circ\text{C}$ . Seguidament es realitza el gravat RIE de les  $15\mu\text{m}$  de silici per l'alliberament de les estructures i la definició dels ponts (veure figura 4.2.f). Quan finalitza aquesta etapa tota la oblia esdevé molt fràgil.

Amb aquest procés finalitza la fabricació dels acceleròmetres. Una descripció exhaustiva de les etapes del run de fabricació, així com la disposició dels xips a la oblia, es mostren a l'annex C d'aquesta memòria. La Figura 4.5 mostra les fotografies dels tres tipus de components inclosos al joc de màscares CNM149.



**Figura 4.5: Fotografies dels tres tipus diferents de xips fabricats:**  
**a) Acceleròmetre uniaxial, b) triaxial i c) xip de test.**

Els dissenys a) i b) són acceleròmetres de tipus uniaxials i triaxials, respectivament, dels quals se n'han fabricat tres variants per a cadascun d'ells, tal i com s'ha explicat a l'apartat 3.2. La figura 4.5.c) és una fotografia del xip de test dissenyat per caracteritzar la tecnologia d'encapsulat. La mida dels xips es va fixar a un quadrat de 5.5mm de costat i per tant l'amplada del marc dels xips queda a disposició d'aquest requeriment. La distància del marc quadrat respecte a l'extrem del xip és de 250µm, la mateixa distància que el separa dels *bumps pads*. El pitch entre els pads, en la nostra tecnologia, és de 400µm i ve fixada per les limitacions en la tecnologia de dipòsit de pasta.

## 4.2 Fabricació del substrat MCM.

A continuació es detalla el procés de fabricació del substrat MCM. Per a la fabricació d'aquest substrat es va dissenyar el joc de màscares CNM156, que en les seves dues versions donarà lloc bé al substrat de test, bé al substrat amb circuiteria CMOS.

### 4.2.1 Fabricació del substrat de test.

A l'apartat 3.5 del capítol 3 es va explicar el disseny del substrat de test pels acceleròmetres. Aquest està basat en una tecnologia MCM Pura, és a dir, que conté únicament línies d'interconnexió per permetre el testejat dels acceleròmetres i de les estructures de test incloses en aquests. Un únic nivell de metall és necessari per treure les connexions del sensor cap a l'exterior. Així doncs, tres úniques màscares són necessàries per a la fabricació del substrat de test. La Taula 4.2 mostra una breu descripció d'aquestes màscares.

Nom	Camp	Alineat	Descripció
MALU2	Clar	-----	Metall d'interconnexió
MPMIDA2	Clar	MALU2	Obertura de vies a la poliimida de protecció
MGOLD	Clar	MPMIDA2	Estructuració dels bump pads, marc de soldadura i bonding pads.

**Taula 4.2: Seqüència i descripció de les màscares del joc CNM165 per a la fabricació de substrats MCM.**

El procés comença sobre oblies tipus p i orientació  $\langle 100 \rangle$  i amb una resistivitat d'entre 0.1 i 1.4  $\Omega\text{cm}$  sobre les quals es fa créixer una primera capa d'òxid humit d'1 $\mu\text{m}$  de gruix. A continuació es diposita per *sputtering* el metall d'interconnexió o de *rerouting*. Es tracta d'una capa de 1.5 $\mu\text{m}$  d'alumini que formarà les interconnexions necessàries entre els *flip-chip* i el substrat i s'estructura, per gravat humit, amb la màscara CNM156-MALU2.

A continuació es diposita una capa dielèctrica, en la nostra tecnologia, la poliimida. Aquest material requereix d'un processat especial. Primer es realitza una recuita per endurir el material i preparar-lo per la fotolitografia, seguidament es fa la insolació. Cal esmentar que aquesta poliimida és negativa, és a dir, la polimerització es produeix gràcies a la llum ultraviolada de manera que la zona exposada esdevé resistent al revelador i, per tant, desapareixen les zones no exposades a la llum. La màscara CNM156-MPMIDA2 estructura la poliimida obrint contactes per accedir al metall de *rerouting* a les zones on han d'anar els *bump pads* i allà on han d'anar els pads de soldadura amb fil. L'estructura dels pads, en general, es dibuixa octogonal degut a que la poliimida, durant la seva recuita, redueix la seva espessors fins a un 50% i poden arribar a produir-se esquerdes. El disseny octogonal minimitza aquest risc.

Sobre la capa de poliimida es diposita ja la tricapa de metalls soldables que proporcionen l'estructura adequada pel contacte *flip-chip*. La màscara CNM156-MGOLD definirà els pads per les boles de soldadura i per la soldadura amb fil. Aquesta capa s'estructura per gravat humit. En el cas de la tecnologia CNM-MCM els tres materials que compleixen aquestes característiques són el titani, el níquel i l'or. Cadascun dels tres metalls aporta diferents característiques als *bump pads*. El titani millora l'adhesió amb l'alumini, el níquel actua com a barrera contra la difusió de la pasta de soldadura i l'or és una protecció contra la oxidació del níquel. L'última etapa de les oblies és una recuita a 125°C per tal d'extreure la humitat de la poliimida.

#### 4.2.2 Fabricació del substrat intel·ligent.

Aquest substrat conté una etapa de pre-amplificació del senyal del sensor el qual està fabricat amb tecnologia CMOS de doble metall del CNM. Una capa de metall MCM es va utilitzar com un nivell extra per les interconnexions flipchip-substrat. Una imatge del layout d'aquests substrats es pot veure a l'annex B. Com ja hem dit aquest procés MCM sobre tecnologia CMOS de doble de metall és una novetat en el CNM.

El procés CMOS de doble metall és estàndard de la tecnologia CNM25 i per tant no el descriurem en aquesta memòria. A continuació descriurem les etapes MCM, que comencen un cop dipositat el segon metall de la tecnologia CMOS. Sobre aquest metall es diposita directament la primera capa de poliimida, i sobre aquesta s'estructuren, mitjançant la màscara CNM156-MPMIDA1, les vies que donen accés a aquest metall (Veure Figura 4.6.a). Per tal de que els pads per la soldadura amb fil es recolzin sobre la capa d'òxid internivell també s'obren obertures al lloc on han d'anar aquests pads. Això és una norma de disseny de la tecnologia MCM, sorgida arran dels problemes observats durant la soldadura amb fil, on els pads d'alumini eren literalment arrencats durant el procés de soldadura [1]. La poliimida i la major part de dielèctrics orgànics tenen poca adherència als metalls. La seva adherència es sol tractar amb promotors de l'adhesió o amb gravats secs o humits. En la nostra tecnologia, aquests processos estàndard no són suficients per millorar l'adherència

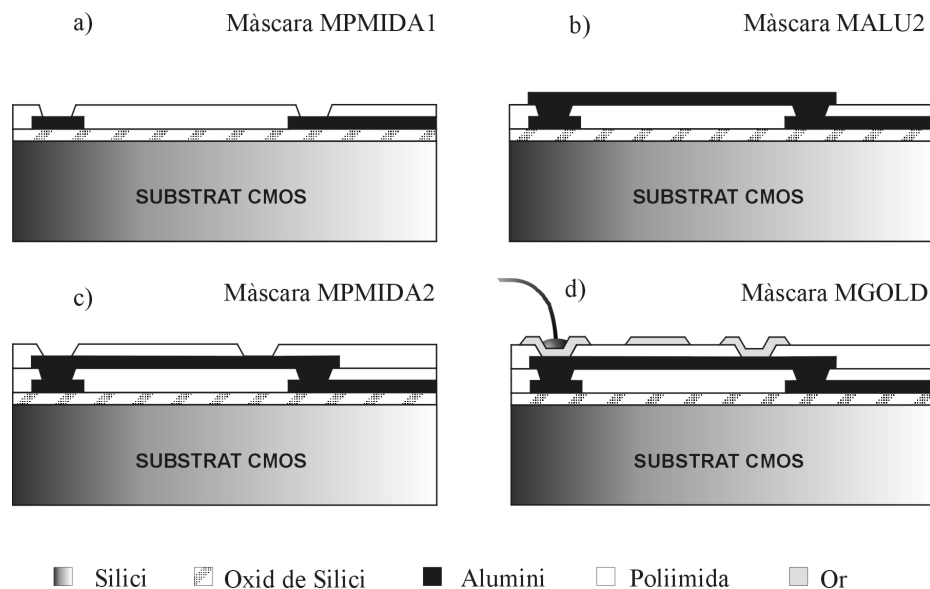


fins al punt d'aguantar l'alumini durant el procés de *wire-bonding*, raó per la qual es va adoptar aquesta tecnologia de pads.

A continuació es diposita el primer metall MCM per realitzar connexions cap a la etapa CMOS o per treure els senyals cap a l'exterior, i es grava amb la màscara CNM156-MALU2-BIS.

Una nova capa de poliimida servirà com a passivació de tot el conjunt i donarà un suport pla a les connexions *flip-chip*. La màscara emprada en aquesta etapa fotolitogràfica és la CNM156-MPMIDA2-BIS.

Per últim, es realitza el dipòsit i gravat de la tricapa soldable que dona lloc als *bump pads*, als *wire-bonding pads* i al marc de soldadura. La màscara emprada és la mateixa que pel disseny del substrat de test, la CNM156-MGOLD. Altre cop, una etapa de recuita de la poliimida per treure la humitat, disminueix els corrents de fuga a través d'aquest material.



**Figura 4.6: Etapes MCM del procés de fabricació d'un substrat multixip amb tecnologia CMOS25-MCM.**

### 4.3 Encapsulat i muntatge dels dispositius.

Un mòdul multixip a més de ser un sistema complex que inclou diferents xips per realitzar una funció superior és, essencialment, un mètode d'encapsulat d'elevades prestacions. En aquest treball, l'encapsulat dels dispositius transductors consta de dues parts principals. La primera part és la soldadura anòdica amb una oblia de vidre a la cara dors del acceleròmetres i en segon lloc, la soldadura mitjançant la tècnica *flip-chip* del sensor al substrat de silici. Aquest procés d'encapsulat deixa completament tancat el component i per tant protegit de contaminacions externes. A partir d'aquest punt, el mòdul multixip pot ésser tractat com un encapsulat estàndard en les etapes posteriors d'encapsulat (*underfilling*, muntatge sobre una base adequada i *wire-bonding*). La seqüència d'etapes dutes a terme pel l'encapsulat complet dels acceleròmetres en format MCM-D es mostren a continuació.

- ❑ Soldadura anòdica de l'oblia d'acceleròmetres amb una oblia de vidre Pyrex.
- ❑ Tallat de l'oblia d'acceleròmetres.
- ❑ Dipòsit de pasta de soldadura sobre la oblia de substrats MCM mitjançant la tècnica d'*screen printing*.
- ❑ Muntatge dels sensors sobre el substrat MCM (tècnica *flip-chip*).
- ❑ Recuita de tot el conjunt a la temperatura de fusió de la pasta de soldadura.
- ❑ Tallat de l'oblia de substrats i individualització dels mòduls multixip.

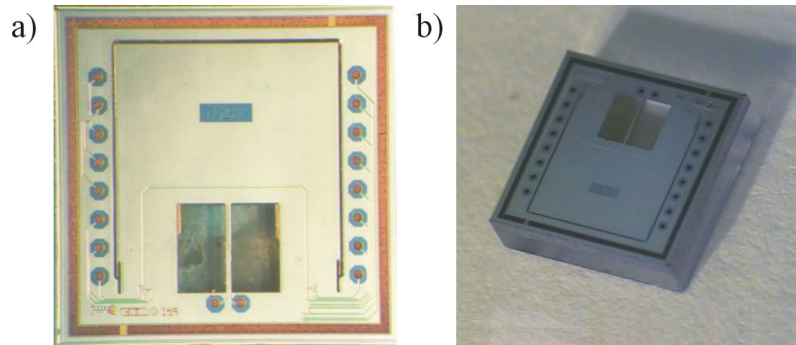
#### 4.3.1 Soldadura anòdica.

El primer pas cap a l'encapsulat dels acceleròmetres és la soldadura anòdica d'una oblia de vidre a la oblia dels sensors abans del serrat. Aquesta etapa es realitza a nivell d'oblia i, per tant, és un procés molt econòmic. La soldadura anòdica d'una oblia de vidre es venia realitzant de forma estàndard en el procés de fabricació d'acceleròmetres al CNM. La seva funció era la de facilitar el muntatge d'aquests dispositius en una base d'encapsulat a la vegada que absorbia els estressos provocats per l'encapsulat i evitava que aquests es transmetessin al dispositiu. El fet d'utilitzar vidre amb un coeficient d'expansió tèrmic semblant al del silici evita els problemes derivats de les diferències d'expansió tèrmica entre materials. En la nostra configuració d'encapsulat aquesta funció deixava de tenir aplicació. Cal recordar, però, que un cop alliberades les estructures mòbils dels sensors aquestes esdevenen molt fràgils. La cara dors dels components està foradada pel gravat anisòtrop i això impedeix la seva correcta manipulació amb la màquina de posicionament dels components, tal i com es fa en el muntatge MCM. Totes aquestes raons ens van dur a mantenir la soldadura anòdica com a part del procés d'encapsulat. En el nostre cas, la soldadura anòdica servirà per facilitar la manipulació dels sensors per la màquina de pick&place i per aportar més robustesa a tot l'encapsulat.

El material utilitzat en aquest procés és una oblia de Pyrex d'1mm de gruix, la qual prèviament ha estat rebaixada unes 80µm amb la màscara CNM149-DAMP, que deixa una obertura rectangular sota les masses, a fi i efecte, de que aquests no impactin amb el vidre en moure's. La profunditat d'aquest graó també serveix per a controlar el factor d'esmorçament de les estructures mòbils dels acceleròmetres.

Pel gravat de l'oblia de Pyrex, aquesta es solda a una oblia de silici prèviament foradada amb la màscara CNM149-DAMP i a continuació es grava el Pyrex amb HF. Després, s'agafa el conjunt i es submergeix en TMAH per eliminar completament la oblia de silici deixant només la de Pyrex.

Durant el procés de serrat del components amb la serra de diamant, es diposita resina sobre les oblies per tal de protegir-los de l'aigua i de la brutícia, així com de cops secs que podrien trencar-los. Inevitablement aquest és un procés molt agressiu per les estructures mòbils i és on es dona una més gran mortalitat de dispositius.



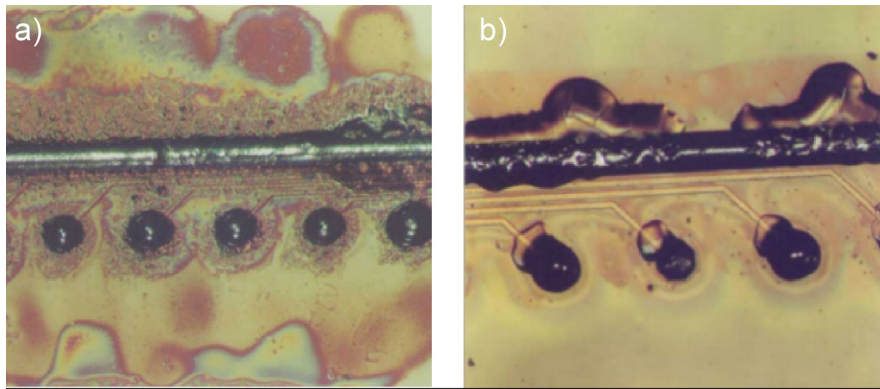
**Figura 4.7: Fotografies del xip uniaxial sense estructures de protecció. a) vista superior, b) vista tridimensional.**

A la Figura 4.7 es mostren dues fotografies del disseny uniaxial sense estructures de protecció, el D2U-10g. En la vista tridimensional es pot veure el gruix del vidre soldat a la cara posterior del xip.

#### 4.3.2 Dipòsit pasta de soldadura

La tècnica d'*screen printing* pel dipòsit de pasta de soldadura és molt coneguda dins la fabricació de mòduls multixip i la més utilitzada en la tecnologia MCM-D del CNM. Aquesta tècnica consisteix en fer passar pasta de soldadura a través de les obertures realitzades en una pantalla metàl·lica. És la tècnica de més baix cost per la formació de boles pels contactes *flip-chip*. La pasta de soldadura és una barreja de boles d'un aliatge metàl·lic, de diàmetre entre 25-45 $\mu\text{m}$ , amb un flux que afavoreix el dipòsit i la soldadura. La dimensió mínima d'aquest procés ve donat tant per la tolerància de les pantalles utilitzades, com per la reologia de la pasta emprada. Els valors típics de dimensions mínimes per *l'screen-printing* es troben al voltant de les 200-400 $\mu\text{m}$ .

Un dels problemes, però, que ens podia aportar l'ús d'aquesta tècnica pel dipòsit de les boles de soldadura era el contingut de flux de la pasta de soldadura. El flux és un producte orgànic, generalment a base de resines, que s'afegeix a la pasta per tal de facilitar la soldadura en el moment de la fusió eliminant els òxids de les superfícies a soldar i evitant la re-oxidació durant tot el cicle de refosa. Les seves propietats també afecten a paràmetres del dipòsit com són la velocitat de dipòsit o el temps que pot romandre a la màquina. Aquest flux queda com a residu després del procés de soldadura i, encara que no és un element corrosiu ni conductor elèctric, en la majoria de casos cal treure'l amb agents netejadors. En qualsevol cas, aquest element es dispersa per la superfície del xip i podria arribar a perjudicar el moviment dels acceleròmetres. Així doncs calia reduir aquest residu al mínim, fent servir pastes de soldadura de baix residu. Aquestes pastes, anomenades genèricament *No-Clean Pastes*, porten un flux amb un més baix contingut en sòlids, i per tant deixen menys residu. Aquest producte és va començar a desenvolupar degut als requeriments de la indústria per deixar de fer servir els CFC emprats en la neteja dels residus. A la Figura 4.8 es mostren dues fotografies del resultat de la formació de boles de soldadura per una pasta de soldar normal i una altre de les anomenades *No-Clean*.



**Figura 4.8: Detall del residu que deixa la pasta després de la refosa a) normal, b) No-Clean.**

Com es pot veure, l'àrea per on s'estén el residu s'ha reduït en aproximadament un 45% en el cas de la pasta *No-Clean*. La pasta que hem utilitzat nosaltres ha estat la ECOREL EASY 802M de Promosol®. Es tracta d'un aliatge de Sn/Pb/Ag amb temperatura de fusió de 179°C i un contingut en sòlids de la resina del 30%. Un altre fet observat després de desmuntar un mòdul multixip és que la major part dels residus queden al xip inferior, és a dir al substrat MCM i no al *flip-chip*. Això ens afavoreix doncs el que ens interessa es que quedi el mínim residu al *flip-chip*, en aquest cas al sensor.

Per que el procés *screen-printing* sigui satisfactori s'hi han de tenir en compte moltes variables. Entre aquestes variables s'inclouen l'equip disponible, el tipus de pasta, la velocitat i la pressió de l'impressió, etc. [2]. La màquina d'*screen printing* automàtica de la que disposa el CNM, és una DEK 248 (veure Figura 4.9). Es tracta d'una màquina automàtica amb un sistema de visió per a l'alineament. Una taula suport permet el moviment en els eixos x i y i en l'angle  $\Theta$ . El sistema de visió està controlat per un PC, que compara les marques per a l'alineament o *fiducials* que hi ha a la oblia amb les de la pantalla. Aquests *fiducials*, o marques, sobre els substrats MCM han de ser rodones de 1.25mm de diàmetre situades a ambdós costats de la oblia separades a una distància mínima de 85mm [3]. La part que efectua les impressions, està formada per dues ganivetes retràctils d'acer inoxidable. Tant la velocitat com la pressió del dipòsit són regulables. La pressió es regula manualment amb un cargol situat sobre les ganivetes, seguint la pressió normal de treball al voltant de 7 Kg/cm<sup>2</sup>.



**Figura 4.9: Equip pel dipòsit de pasta de soldadura amb la tècnica screen-printing.**

La velocitat d'impressió dependrà del tipus de pasta utilitzat, en el cas de pastes de soldadura *No-Clean* amb uns valors de viscositat de 900 Pa\*s (20°C) la velocitat típica és de 30mm/s.

L'oblia s'alineja amb la pantalla a través dels *fiducials* i llavors se les posa totes dues en contacte directe. En aquest procés tots els paràmetres són molt importants, però entre ells, el gruix de la pantalla metàl·lica o *stencil* i el diàmetre de les obertures és el que determina en major grau la quantitat de pasta dipositada en l'oblia. En el nostre cas aquest gruix és de 100µm i les obertures en un primer moment es van dissenyar de 200µm, encara que tal i com explicarem més endavant posteriorment es van modificar. Sobre el substrat MCM i els acceleròmetres les dimensions, tant dels pads com del marc de soldadura, són de 150µm. Normalment les obertures a la pantalla metàl·lica sempre es dissenyen superiors que en el substrat per assegurar un complet recobriment dels pads.

#### 4.3.3 Muntatge *flip-chip*.

Després del dipòsit de pasta cal situar els dispositius sobre el seu lloc a l'oblia de substrats. Això es duu a terme amb una màquina de Pick&Place i un sistema de visió pel correcte alineament del *flip-chip*. Concretament, l'equip del qual disposa el CNM es una SMD Rework Station T4907 de Dr. Tresky, el qual incorpora un succionador de buit i una taula x-y, que permet el posicionament i la col·locació de xips i components SMD de forma manual (veure Figura 4.10). El mòdul de *Flip-chip*, consta d'una càmera de vídeo amb un objectiu macro que juntament amb un mirall permet l'alineament del xip amb el substrat. Un cop col·locats els xips es mantenen en la seva posició fins que són duts al forn de refosa gràcies a l'efecte d'*sticking* amb la pasta de soldadura.

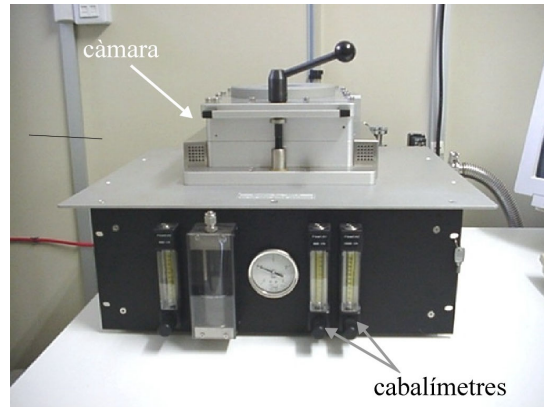


Figura 4.10: SMD Rework Station pel muntatge dels mòduls multixip.

#### 4.3.4 Refosa de la pasta de soldadura.

A continuació es realitza la refosa del conjunt, o *reflow*, a la temperatura de fusió de la pasta de soldadura. Aquest procés és força crític degut als efectes que té sobre la fiabilitat final del muntatge [4]. Els factors que influeixen en la refosa de la pasta de soldadura són: el temps de refosa, la presència d'oxigen i el pic de temperatura màxim, entre d'altres. S'ha

pogut comprovar, que una rampa de temperatura massa pronunciada impedeix que el dissolvent orgànic contingut a la resina s'evapori completament quedant atrapat a les boles i formant per tant *microvoids* que afecten a la fiabilitat, mentre que la presència d'oxigen en el procés accelera la formació d'òxids a l'aliatge i per tant degrada la connexió.



**Figura 4.11: Fotografia del forn per la refosa de la pasta de soldadura.**

L'equip del que disposa el CNM per a realitzar la refosa de les soldadures és un forn de làmpades infraroges, el SRO-702 de ATV Technology Inc (veure Figura 4.11). L'ús de llum infraroja permet rampes molt elevades de temperatura (de fins a 200°C/min) i la refrigeració es fa mitjançant un flux d'aigua. L'equip pot treballar en buit, o bé amb diferents gasos (ex. Nitrogen, gas fòrmic). L'entrada dels gasos és ajustable manualment.

Existeixen algunes dificultats associades al fet de treballar amb pastes *No-Clean*. Com ja hem dit, la resina o flux, s'incorpora a l'aliatge metàl·lic per tal d'afavorir la soldadura netejant les superfícies en contacte en el moment de la fusió. Les pastes anomenades genèricament *No-Clean*, tenen un contingut molt més baix d'aquesta resina. El problema amb fluxs amb nivells de contingut en sòlids inferiors al 30% es que la seva finestra de procés es més estreta i per activar correctament el flux s'ha de treballar amb una rampa de temperatura molt controlada i realitzar la refosa en ambient de nitrogen. L'ús de nitrogen evita l'oxidació a la vegada que ajuda a reduir encara més els residus [5]. La Figura 4.12 mostra el perfil de refosa típic que vam emprar amb la pasta de soldadura eutèctica, la qual té un punt de fusió a 179°C.

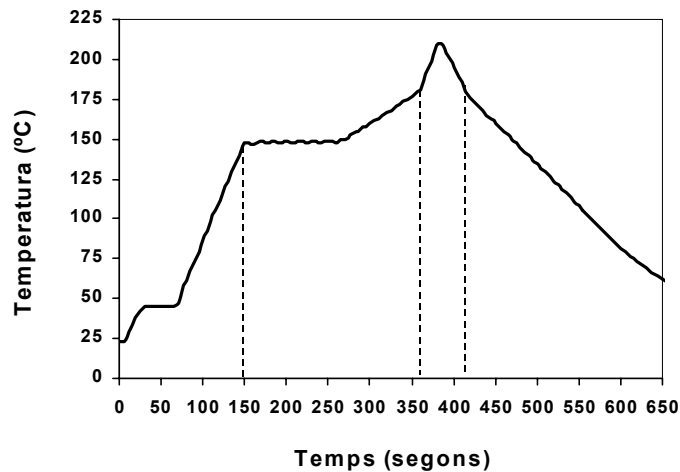


Figura 4.12: Perfil de refosa emprat amb una pasta de soldadura de temperatura de fusió de 179°C.

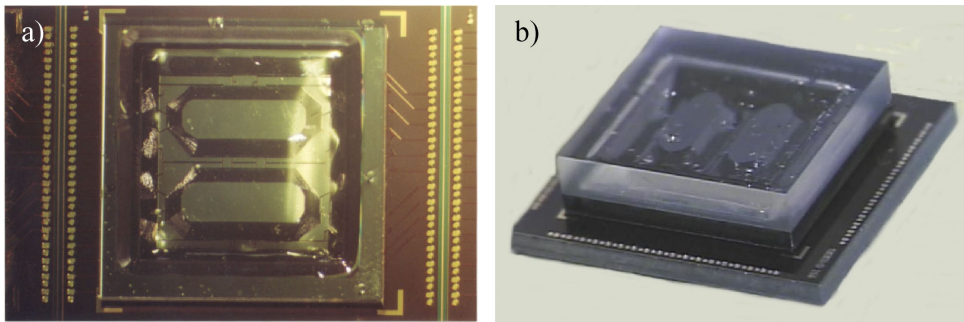
Un perfil típic de refosa ha de tenir tres etapes: el pre-escalfament, una etapa plana d'assecat i per últim la refosa.

En l'etapa de **pre-escalfament** s'intenta arribar ràpidament a una temperatura de entre 100-150°C però sense arribar a superar els 4°C/s. Això es fa per no sotmetre els components a rampes de temperatura molt grans. En aquesta primera etapa, al començament hi ha un petit *plateau* en el qual es fa el buit per a continuació deixar entrar el nitrogen. La entrada de nitrogen es realitza manualment.

En l'etapa **d'assecat o dry-out** es pretén que tot el dissolvent de la pasta s'evapori abans de la refosa de l'aliatge. Aquesta etapa es realitza a una temperatura de entre 150 i 160°C durant uns 60-120 s. També és el moment on el flux comença a activar-se i on s'uniformitza la temperatura sobre tota la oblia per entrar a la zona de refosa tots a la mateixa temperatura.

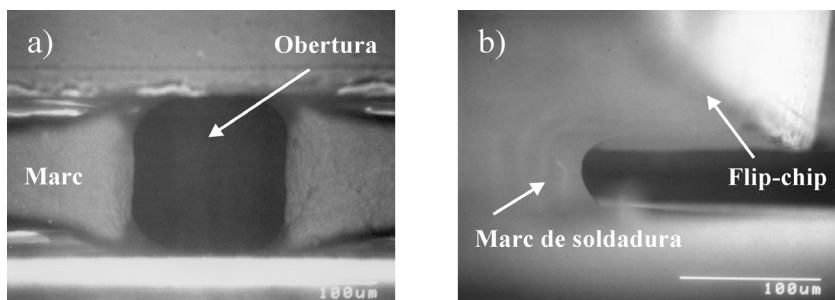
La temperatura de **reflow** s'ha de trobar entre 20 i 40°C per sobre la de fusió per assegurar-nos que tots els punts s'han fos. El temps de refosa ha d'estar entre 30-60s per evitar la formació d'intermetàl·lics. Després es recomana una rampa de refredament d'entre 1-2°C/s.

Com ja hem dit, nosaltres vam fer servir pastes del tipus *No Clean*, on la neteja dels residus de la soldadura no és requerida. En qualsevol cas, si es té interès per raons estètiques en treure aquests residus un simple neteja amb isopropanol redueix de manera important aquests residus. Un cop realitzat la refosa, es procedeix al serrat de la oblia de substrats i per tant a la individualització dels MCMs. La Figura 4.13 mostra un acceleròmetre triaxial un cop muntat sobre la oblia i després un cop tallat.



**Figura 4.13:** Fotografia d'un acceleròmetre triaxial muntat sobre un substrat de silici.

Les Figura 4.14a) i b) són fotografies SEM on es pot veure el resultat del tancament amb pasta de soldadura. La figura 1.3.a) mostra l'obertura que queda en el marc tancat, la qual permet la ventilació dels gasos que es produeixen durant el procés de refosa i per tant no queden atrapats a l'interior de la cavitat. Aquesta obertura és d'uns  $150\mu\text{m}$  d'ample. La figura 1.3b) és una imatge lateral del marc. S'observa la seva forma convexa. L'alçada dels bumps i del marc de soldadura, ve determinada per diferents factors: pel pes del xip, per la quantitat de pasta dipositada, per la superfície soldada i inclòs pel tipus de pasta. Mesures realitzades als nostres components han mostrat una alçada mitjana d'entre  $60$  i  $70\mu\text{m}$ .



**Figura 4.14:** Imatges SEM del tancament amb pasta de soldadura dels acceleròmetres. a) Detall del forat utilitzat com a via de gasos b) Detall d'una cantonada.

#### 4.3.5 Problemes derivats de l'encapsulat flip-chip.

Els resultats d'aquest procés de muntatge amb pasta de soldadura i tècnica *screen-printing* van resultar ser molt satisfactoris tal i com es pot extreure de les imatges SEM de la Figura 4.14. El rendiment combinat (acceleròmetres uniaxials i triaxials) d'aquest muntatge es va situar al voltant del 75%. Els resultats inicials però no va ser tant encoratjadors ja que es van observar dos problemes importants que afectaven de manera important al rendiment i sobre els quals es va haver de treballar posteriorment. Aquests dos problemes són els que es descriuen a continuació.



□ Aparició de curtcircuits localitzats.

El primer problema que es va observar, va ser l'aparició de curtcircuits localitzats principalment entre connexions situades a les cantonades del xip. Aquest problema es va observar tant en els dissenys uniaxials com en els triaxials, però sempre en una posició de cantonada. Els curtcircuits entre *solder bumps* no són habituals en el muntatge *flip-chip* i estan perfectament controlats gràcies a un espaïat adequat entre les boles o *pitch*, que en la nostra tecnologia és de  $400\mu\text{m}$ . Un cop desmuntats els xips afectats es va observar que això era degut a un excés de pasta al marc de soldadura que fluïa cap a als bumps provocant aquests curtcircuits. Un exemple extrem del succeït es pot veure a la Figura 4.15.

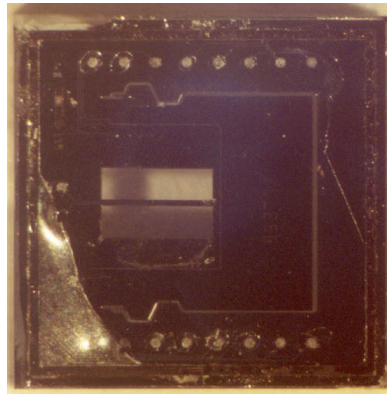


Figura 4.15: Fotografia del curtcircuit degut a l'excés de pasta de soldadura al marc.

Així doncs, el problema provenia d'un excés de pasta en els pads, principalment sobre el disseny del marc de soldadura. La solució proposada va ser reduir l'ample dels les obertures a la pantalla metàl·lica de l'*screen printing* i modificar el disseny tal i com es mostra a la Figura 4.16 per tal de reduir la quantitat de pasta dipositada al marc.

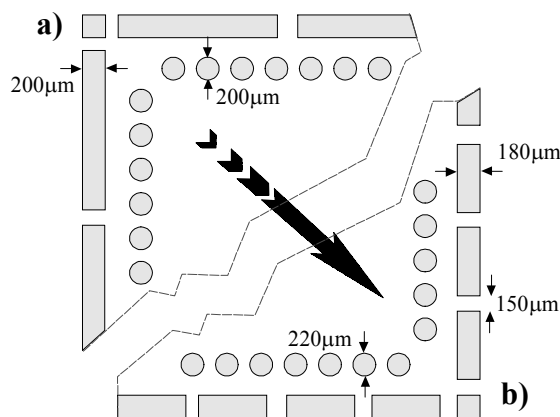


Figura 4.16: Disseny de la pantalla metàl·lica per l'*screen printing*  
 a) Dimensions inicials de la pantalla b) dimensions amb les modificacions requerides.

Les dimensions inicials de la pantalla d'*screen-printing* eren rectangles de  $200\mu\text{m}$  i amb dos únics rectangles per costat. Les modificacions efectuades van ser doncs reduir l'ample dels rectangles a  $180\mu\text{m}$  i dividir-los en rectangles més petits amb una separació mínima de  $150\mu\text{m}$  que es la que ens oferia el fabricant. A la mateixa vegada, s'eixamplaven una mica

més les obertures sobre els *bump pads* de 200 a 220  $\mu\text{m}$ , per compensar la pèrdua de pasta al marc. Amb aquestes modificacions el problema dels curccircuits va quedar àmpliament solucionat.

#### □ Aixecament dels xips.

L'altre problema amb el que ens vam trobar va ser de rendiment de muntatge. Quan la pasta de soldadura és fosa, el líquid presenta una tensió superficial que és el que dona forma a la bola del contacte i que permet l'efecte d'autoaliniament dels *flip-chip*. La distribució inhomogènia dels pads en els dissenys uniaxials i de test (veure Figura 4.5) té com a conseqüència que les tensions superficials entre el marc de soldadura i les boles no siguin iguals i això, en alguns casos, provoca que el xip s'aixequi degut a aquestes diferències de tensions. Aquest problema fa disminuir el rendiment del procés de muntatge en valor lleugerament inferior al 50% però únicament en aquest disseny. En els dissenys triaxials aquest fet només s'ha observat en aïllades ocasions. Aquest problema no es va poder solventar perquè requeria d'un redisseny dels xips, però es té en compte per futurs dissenys.

## 4.4 Conclusions.

S'ha posat en marxa la fabricació de mòduls *Smart Sensor*. Per una banda s'ha modificat la tecnologia de fabricació dels sensors per adaptar-los a la tecnologia de muntatge *flip-chip*, i a més s'ha dissenyat un substrat intel·ligent amb un circuit acondicionador del senyal del sensor, mitjançant la tecnologia CMOS25 de doble metall i la tecnologia MCM. Malauradament la fabricació del substrat intel·ligent no ha estat finalitzada en el termini de presentació d'aquest treball.

La fabricació d'un marc tancat de soldadura mitjançant el dipòsit per *screen-printing* s'ha demostrat viable, sempre i quan es faci ús de pastes *No-Clean* amb un baix nivell de residus. La cavitat que es forma té una alçada d'entre 60 i 70  $\mu\text{m}$  i s'ha pogut observar mitjançant fotografies SEM la obertura que es va dissenyar en aquest marc tancat per tal de permetre la correcta evacuació dels gasos durant la refosa de la pasta.

Durant la posada a punt d'aquesta nova tècnica de muntatge dels acceleròmetres, s'han hagut de modificar alguns dels paràmetres involucrats en el dipòsit de pasta de soldadura per *screen-printing*. La elecció de la pasta emprada i de la seva reologia ha estat un factor decisiu, així com el disseny de les pantalles, que s'han hagut de redissenyar per controlar el volum de pasta dipositada sobre els substrats.

En un primer moment el rendiment del procés de muntatge *flip-chip* havia estat inferior al 70%, degut principalment a dos motius, l'excés de pasta dipositada al substrat i un disseny inadequat dels pads de soldadura en el sensor tipus uniaxial. El problema de l'excés de pasta es va poder solucionar amb el redisseny de la pantalla, fet que va permetre pujar el rendiment fins al 76%. El disseny dels pads del sensor requeria d'una modificació de les màscares de la fabricació de sensor i per això no s'ha dut a terme, però es té en compte per futurs dissenys. S'ha demostrat la extrema importància d'un disseny simètric de les connexions *flip-chip*, degut a que les forces que es donen en el moment de la refosa, poden provocar l'aixecament del xip.

El mètode de dipòsit per *screen-printing* és el més barat, comparat amb mètodes com el del dipòsit per evaporació, però té l'inconvenient d'un pitch més gran. Per reduir totalment el nivell de residus i a més reduir el pitch de les connexions *flip-chip*, fet que permetria dissenyar uns xips més petits i per tant incrementar l'empaquetament del mòdul, seria necessari fer ús d'un altre tipus de dipòsit de pasta de soldadura, com per exemple l'electrodiposició de Sn. En l'actualitat, aquesta tècnica està essent desenvolupada al CNM amb l'objectiu de la reducció del pitch fins a les 50µm.

## 4.5 Referències.

- [1] E. Cabruja, (1999) *Tecnologia CNM-MCM: Descripció i característiques*. Nota tècnica n° 111/99, Centre Nacional de Microelectrònica.
- [2] J. Kloeser et al., (1998), *Fine Pitch Stencil Printing of Sn/Pb and Lead Free Solders for Flip-Chip Technology*, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part C, vol. 21, n° 1, pp. 41-50.
- [3] E. Cabruja, (2002) *Screen Printing: Utilització i Regles de Disseny*, Nota tècnica n°115/02. Centre Nacional de Microelectrònica.
- [4] Sharma R.; Subrahmanyam, R. (1996). *Solder-Bumped Flip Chip Interconnect Technologies: Materials, Processes, Performance, and Reliability*. A: J.H. Lau (ed.), Flip Chip Technologies. New York: McGraw-Hill.
- [5] Fremd, Eric T. (1993) *Quantitative Quality Comparison of Wave Soldering in Inert Nitrogen Versus Air*, IPC Technical Review, pp. 29-36.