



**INTI**

**50**  
ANIVERSARIO  
1957 - 2007

Instituto  
Nacional  
de Tecnología  
Industrial



Unión Europea

Proyecto Mejora de la Eficiencia y de la Competitividad de la Economía Argentina

# CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN EL DISEÑO DE MICROSISTEMAS

Diseño, Simulación,  
Encapsulado y Testing.

CUADERNO TECNOLÓGICO Nº 2  
MICROELECTRÓNICA

Autor  
JOSÉ A. PLAZA PLAZA

Mayo - Junio de 2007



Unión Europea

Delegación de la Comisión Europea en Argentina  
Ayacucho 1537  
Ciudad de Buenos Aires  
Teléfono (54-11) 4805-3759  
Fax (54-11) 4801-1594



INTI

Instituto  
Nacional  
de Tecnología  
Industrial

INTI  
Avenida General Paz 5445  
Casilla de Correo 157, B1650WAB San Martín, Buenos Aires, Argentina  
Teléfono (54-11) 4754-4070 / grobles@inti.gov.ar

[www.ue-inti.gov.ar](http://www.ue-inti.gov.ar)

#### CONTACTO

**INTI – ELECTRÓNICA E INFORMÁTICA**

4724-6369

[www.inti.gov.ar/electronicaeinformatica/](http://www.inti.gov.ar/electronicaeinformatica/)

[www.inti.gov.ar/electronicaeinformatica/utm/](http://www.inti.gov.ar/electronicaeinformatica/utm/)

[electronicaeinformatica@inti.gov.ar](mailto:electronicaeinformatica@inti.gov.ar)

**INFORMACIÓN Y VISIBILIDAD: GUILLERMINA ROBLES**

[grobles@inti.gov.ar](mailto:grobles@inti.gov.ar)

## CONSIDERACIONES TÉCNICAS EN EL DISEÑO DE MICROSISTEMAS

Diseño, Simulación,  
Encapsulado y Testing.

JOSE A. PLAZA PLAZA

## ABREVIATURAS UTILIZADAS

CE	Comisión Europea
SOI	Silicon On Insulator (Silicio sobre aislante)
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems (Sistemas Microelectromecánicos), sinónimo de Microsistema
NEMS	Nano Electro Mechanical Systems (Sistemas Microelectromecánicos), sinónimo de Nanosistema
SEM	Scanning Electron Microscopy (Microscopía de Escaneado por barrido de Electrones)
TEM	Transmisión Electron Microscopy (Microscopía por Transmisión de Electrones)
CNM	Centro Nacional de Microelectrónica
FEM	Finite Element Method (Método de los Elementos Finitos)
CD	Critical Dimension (Dimensión Crítica)
WR	Wrong Reading (Lectura Incorrecta)
RR	Right Reading (Lectura Correcta)
GDSII	Graphic Data System II
CIF	Common Intermediate Format
DXF	Drawing Exchange Format
KOH	Hidróxido de Potasio
TMAH	Hidróxido de Tetrametilamonio
SiO <sub>2</sub>	Óxido de Silicio
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Nitruro de Silicio
Na+	Ión de Sodio

## MEDIDAS Y PESOS

m	Metros	Å	Amstrong
mm	Milímetro	mim	Minutos
µm	Micrómetro	°C	Grados centígrados
V	Voltios		

## INDICE

<b>ABREVIACIONES UTILIZADAS</b>	<b>4</b>
<b>INDICE</b>	<b>5</b>
<b>LISTADO DE ANEXOS, CUADROS Y FIGURAS</b>	<b>6</b>
<b>ANTECEDENTES</b>	<b>8</b>
<b>1. CONSIDERACIONES EN DISEÑO DE MICROSISTEMAS</b>	<b>9</b>
1.1 Introducción	9
1.2 Realización de las máscaras	9
1.3 Diseños con ataques anisótropos	12
1.4 Simulación por FEM de MEMS	14
<b>2. TÉCNICAS DE ENCAPSULADO DE MICROSISTEMAS</b>	<b>16</b>
2.1 Introducción	16
2.2 Técnicas de soldadura	16
2.2.1 Soldadura directa o por fusión (Direct bonding or fusion bonding)	17
2.2.2 Soldadura a baja temperatura activada por plasma (Plasma activate bonding)	17
2.2.3 Soldadura Anódica	17
2.2.4 Soldaduras térmicas	18
2.3 Equipos de soldadura entre obleas	19
2.4 Tests de soldadura	20
<b>3. TÉCNICA DE SOLDADURA ANÓDICA</b>	<b>22</b>
3.1 Introducción	22
3.2 Método	22
3.2.1 Aplicaciones	25
3.3 Equipos y substratos	26
3.4 Tests de soldadura anódica	27
3.5 Parámetros de proceso	29
3.5.1 Electrodo	29
3.5.2 Efecto del voltaje	30
3.5.3 Efecto de la temperatura de proceso	31
3.5.4 Efecto del espesor de la oblea de vidrio.	32
3.5.5 Soldadura con capas intermedias sobre el silicio.	32
3.5.6 Protección de áreas contra soldadura	33
3.5.7 Multisoldadura	34
3.5.8 Protección de IC frente al proceso de soldadura anódica	34
<b>ANEXO</b>	<b>35</b>
<b>ANEXO 1: Referencias</b>	<b>35</b>

## LISTADO DE ANEXOS, CUADROS Y FIGURAS

### Anexos

<b>Anexo 1:</b>	35
Referencias	

### Cuadros

<b>Cuadro 1:</b>	13
Atacante anisótropo, temperatura de proceso, velocidad de ataque de los planos (100) de silicio, relación entre las velocidades de ataque en la dirección (100) y la dirección (111), velocidad de ataque del óxido de silicio, velocidad de ataque del nitruro de silicio y relación entre el ataque lateral y el ataque (100).	
<b>Cuadro 2:</b>	19
Ventajas y desventajas de las principales técnicas de soldadura entre obleas[9].	
<b>Cuadro 3:</b>	33
Posibilidades de soldar anódicamente vidrio a capas de otros materiales sobre silicio.	

### Figuras

<b>Figura 1:</b>	10
Máscara para metalización (Campo Claro) y máscara para apertura de contactos (Campo Oscuro). Máscaras diseñadas para resina positiva y fotolitografía estándar	
<b>Figura 2:</b>	11
Marco y ventanas de la oblea (izquierda). Estructuras de alineamiento (derecha).	
<b>Figura 3:</b>	12
Ataque anisótropo en obleas (100) y fotografía SEM de un acelerómetro fabricado con ataque anisótropo.	
<b>Figura 4:</b>	21
Esquema de algunos de los test mas utilizados para la caracterización de soldaduras entre obleas.	
<b>Figura 5:</b>	22
Configuración para la realización de un proceso de soldadura anódica y fotografía de una oblea de vidrio sobre una oblea de silicio para ser soldada anódicamente.	
<b>Figura 6:</b>	23
Esquema del proceso de soldadura anódica.	
<b>Figura 7:</b>	24
Curva de intensidad durante un proceso de soldadura anódica de una muestra de 1.5x1.5 cm <sup>2</sup> , soldada a 1000 V y 400°C.	

<b>Figura 8:</b>	25
Detalle fotográfico de vidrio soldado a silicio. Las zonas oscuras están soldadas, las zonas claras no están soldadas.	
<b>Figura 9:</b>	26
Aplicaciones en las cuales el vidrio es parte intrínseca del dispositivo: a) sensor de presión, b) acelerómetro (sistema de protección de choques) y c) acelerómetro (electrodos de una capacidad).	
<b>Figura 10:</b>	28
Sección transversal de una estructura de test fundamental; a) la presión electrostática es menor que la rigidez de la estructura para que sus superficies entren en contacto y b) la presión electrostática es mayor que la rigidez.	
<b>Figura 11:</b>	29
Sección de la matriz de cavidades y máscara del dado de test (izquierda) y fotografía de una estructura real tras ser soldada (derecha). El círculo menor soldado es de 120 μm.	
<b>Figura 12:</b>	30
Diferentes tipos de contactos sobre la oblea de vidrio. a) electrodo tipo plate b) electrodo puntual y c) electrodo en forma de estrella.	
<b>Figura 13:</b>	30
a) Formación de voids, b) propagación del frente de soldadura, c) sección del brazo del contacto en forma de estrella.	
<b>Figura 14:</b>	31
Curvas de intensidad para soldaduras a diferentes voltajes (400 V, 600 V, 800 V y 1000 V).	
<b>Figura 15:</b>	32
Curvas de intensidad para soldaduras a diferentes temperaturas (300°C y 400°C).	
<b>Figura 16:</b>	33
Sistemas de protección contra la soldadura.	
<b>Figura 17:</b>	34
Configuraciones de los electrodos para poder realizar soldaduras múltiples. a) Oblea de silicio entre dos de vidrio y b) oblea de vidrio entre dos de silicio.	
<b>Figura 18:</b>	34
a) Soldadura con circuitería en la cara opuesta a soldar de la oblea de silicio, b) soldadura con circuitería en la cara a soldar de la oblea de silicio.	

## ANTECEDENTES

Como una de las primeras actividades del Proyecto "Mejora de la Eficiencia y de la Competitividad de la Economía Argentina" para el sector Electrónica e Informática, se realizó, durante los meses de marzo y abril de 2003, una misión con la participación conjunta de un experto nacional y uno europeo para cumplir con distintas actividades: "Identificar líneas de productos"; "Analizar la situación de mercados exteriores" y "Analizar las debilidades de la cadena productiva". El objetivo general de dicha misión consistió en analizar el estado del sector de productos y aplicaciones de la microelectrónica dentro del área de las Tecnologías de la Información en la Argentina. Como resultado se identificaron líneas de productos con potencial para el mercado nacional, regional (MERCOSUR) e internacional (preferentemente Unión Europea) y se hicieron recomendaciones para su tratamiento en las posteriores etapas del Proyecto.

En base a las líneas de productos identificadas para el sector, se definió el equipamiento de base necesario para que los laboratorios del INTI-Electrónica e Informática estén en condiciones de controlar y certificar las características de los productos de dichas líneas para el sector Microelectrónica del Proyecto destinados al mercado internacional.

A través del Proyecto, y en base a las recomendaciones de los expertos europeos, se adquirió el equipamiento definido para operar en la Sala Limpia de INTI-Electrónica e Informática y se obtuvo formación técnica especializada en materia de tecnologías de procesos microelectrónicos y de fabricación de microsistemas.

Como parte de dicha formación y con el objetivo de capacitar a técnicos argentinos del INTI pertenecientes al Centro de INTI - Electrónica e Informática, así como a otros laboratorios particulares y de la industria local, en tecnologías microelectrónicas para el micromaquinado de microsistemas, nanosistemas y dispositivos microelectrónicos con orientación a las posibilidades del mercado local, se realizó en el mes de junio de 2007 la misión del experto de nacionalidad española Dr. José Antonio Plaza Plaza del Instituto de Microelectrónica de Barcelona perteneciente al CNM (Centro Nacional de Microelectrónica) de España. El Dr. Plaza Plaza es doctor en ingeniería electrónica por la Universidad Autónoma de Barcelona y especialista superior en teoría y aplicación del método de los elementos finitos. Se desempeña en el departamento de Tecnologías de Silicio y Microsistemas del CNM y es Científico Titular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de España. Su principal línea de investigación se basa en el desarrollo e integración de procesos de tecnologías de micro y nano fabricación basadas en Silicio.

## 1. CONSIDERACIONES EN DISEÑO DE MICROSISTEMAS

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El diseño de los dispositivos es uno de los aspectos más importantes en el fabricación de un microsistema. El diseño no es libre, sino que está limitado por la tecnología de fabricación. Las posibilidades de la tecnología serán las que definirán que es lo que se puede fabricar. Por un lado, las reglas de diseño marcarán las dimensiones y geometrías que podremos tener y por otro lado, las posibilidades tecnológicas marcarán incluso el principio de detección. Si se tiene desarrollada una tecnología superficial el diseño del dispositivo estará compuesto por capas finas, si se tiene desarrollada una tecnología en volumen se podrá utilizar todo el espesor de la oblea. Si se tienen las dos se tendrá más libertad en el diseño.

### 1.2 REALIZACIÓN DE LAS MÁSCARAS

El dibujo de los diseños se plasma sobre las máscaras; normalmente de vidrios especiales con motivos de cromo. En una misma oblea se pueden fabricar diferentes diseños a la vez. Los diseños se fabrican por capas donde la geometría se dibuja sobre una máscara. El conjunto de máscaras que se utilizan para fabricar uno o varios dispositivos se llama juego de máscaras.

Para la realización de las máscaras se necesita un programa que permita su dibujo con una precisión en muchos casos submicrónica. Existe una gran variedad de programas que pueden ser ejecutados en diferentes plataformas para poder dibujar las máscaras, Cadence [1], Tanner L-Edit [2], Coventor [3], etc. Normalmente las máscaras se dibujan de forma jerárquica. Por ejemplo, si se tiene un chip que se repite 100 veces en la oblea no hace falta dibujarlo 100 veces sino que se dibuja una vez en un fichero y luego este fichero se inserta 100 veces en otro que define toda la oblea. Este procedimiento se puede repetir tantas veces como sea necesario.

Una vez dibujadas las máscaras hay que mandarlas a fabricar sobre un sustrato con los motivos que luego serán los que se proyectará sobre la fotorresina. Para la fabricación de estas máscaras existen diferentes compañías que pueden realizarlas como por ejemplo Deltamask [4] o Photronics [5], etc.

Para la realización de las máscaras hay que tener en cuenta una serie de consideraciones. En primer lugar se pueden realizar las máscaras (retículos) para stepper o para una alineadora de máscaras. En el caso de retículos, éste puede ser más grande que el tamaño final que se proyectará en la oblea. Otro aspecto importante es indicarle al fabricante de la máscara que modelo de alineadora se tiene, para así asegurarse que la máscara será compatible con la alineadora. El tamaño de la máscara debe ser mayor que el tamaño de la oblea a realizar en el proceso fotolitográfico. A modo de ejemplo, para obleas de 4" se utilizan máscaras de 5". Otro aspecto importante es la planaridad de la máscara. Esta debe ser plana para evitar tener distancias entre la máscara y la oblea diferentes según la zona de la máscara. La calidad de la máscara también viene determinada por

la densidad de defectos por unidad de área y el tamaño de los mismos. En este sentido hay que intentar que sean los mínimos posibles. Algunas compañías fabricantes de máscaras permiten mandar el fichero con los dibujos de las geometrías en diferentes formatos. Los más comunes son: GDSII, CIF, DXF de Autocad, etc.

En cada capa, nivel de máscara, se debe definir la dimensión mínima que se quiere obtener, CD (critical dimensions). Esta dimensión indica los dos puntos más cercanos que se tienen entre todos los polígonos que forman el dibujo. Este parámetro es importante ya que los operarios que fabriquen físicamente la máscara buscarán estos puntos para comprobar que la máscara se ha fabricado correctamente.

Uno de los parámetros que puede dar lugar a más errores en la confección de máscaras es el campo de la misma. El campo es la zona de nuestros dibujos que no están rellenas. A la hora de hacer la máscara se puede indicar que:

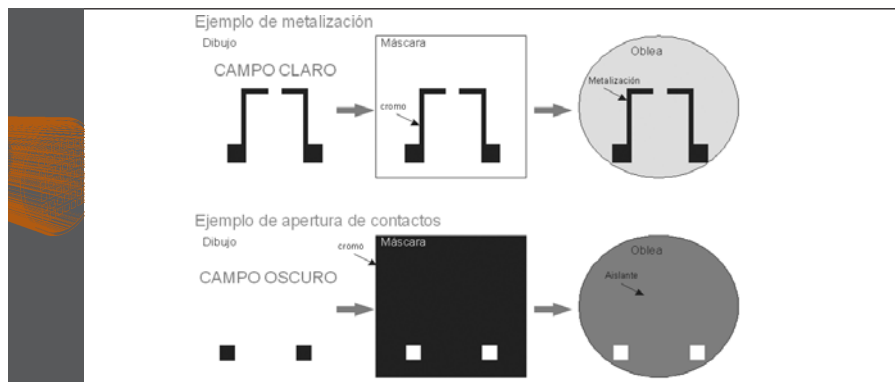
- CAMPO OSCURO (Dark field): las zonas no dibujadas estén cubiertas por cromo.
- CAMPO CLARO (Clear field): las zonas no dibujadas no estén cubiertas por cromo.

El campo de una máscara depende de si la tecnología se basa en fotorresina positiva o en fotorresina negativa y si se trata de un proceso normal o de lift-off. La regla nemotécnica para saber como actúa cada resina es:

Resina positiva > lo que se ilumina se elimina.

La utilidad de esta definición se puede ver con el siguiente ejemplo. Si se quieren dibujar pistas de metalización lo más fácil es dibujarlas directamente, si se utiliza fotorresina positiva sin lift-off. Dibujar el exterior de las pistas sería más complicado. En este caso el campo sería claro para poder atacar el metal en esas zonas (Figura 1). Por otro lado en una máscara de apertura de contactos es más fácil dibujar cuadrados en los contactos que posteriormente serán abiertos. En este caso, con fotorresina positiva, el campo sería oscuro para poder proteger el aislante de todos los lugares menos de los contactos.

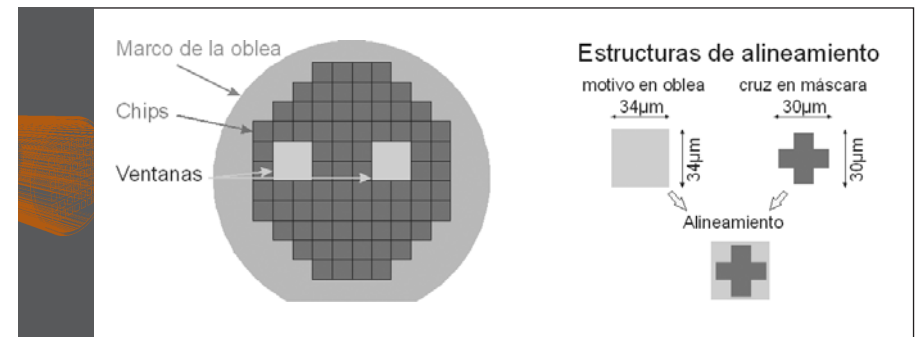
Figura 1: Máscara para metalización (Campo Claro) y máscara para apertura de contactos (Campo Oscuro). Máscaras diseñadas para resina positiva y fotolitografía estándar.



Otro aspecto que puede dar lugar a errores es como se lee la máscara. La máscara puede ser para la cara componentes o para la cara dorso. Esto puede motivar errores, ya que en la cara dorso las máscaras están reflejadas con respecto al eje vertical. Pero por facilidad puede que la máscara se dibuje sin reflejar y se le indique al fabricante de máscaras que él la refleje o puede que ya la dibujemos reflejada. Para ello hay que ver el convenio de definiciones del fabricante. Una máscara para cara componentes mirando el cromo sobre la máscara suele estar en lectura incorrecta (WR, Wrong Reading), ya que al ponerla sobre la oblea hay que ponerla boca abajo para que el cromo esté cerca de la oblea. Sin embargo, para una máscara para la cara dorso de la oblea que se haya dibujado no reflejada la orientación de la máscara debería de ser lectura correcta (RR, Right Reading).

También es posible que el fabricante nos pida si ponemos un nombre a la máscara y donde lo ponemos.

Figura 2: Marco y ventanas de la oblea (izquierda). Estructuras de alineamiento (derecha).



A la hora de dibujar un juego de máscaras hay que prestar especial atención al marco de la oblea. Podemos definir el marco de la oblea como aquella zona donde no vamos a fabricar dispositivos. En el borde de las obleas algunos procesos pueden tener dificultades o no dar los resultados esperados. Para cada nivel de un juego de máscaras hay que pensar si se tiene o no que dibujar el borde de la oblea. Para ello habrá que tener en cuenta el campo de cada máscara. Por ejemplo en el caso de ataques profundos se evitará que se realicen en el borde de la oblea porque está podría romperse o quedarse débil. Por otro lado, algunas capas gruesas pueden generar esfuerzos mecánicos en las obleas y puede ser interesante su eliminación del borde de la oblea. En otras ocasiones es necesario mantener algunas capas en estas zonas para evitar ataques posteriores. En resumen tener cromo o no en la zona de las máscaras para el borde de la oblea dependerá de muchos factores, pero siempre deberá de ser considerado en el diseño por el diseñador.

Algunas máscaras estarán prácticamente cubiertas por cromo. En estos casos puede ser difícil alinearlas con respecto a motivos que se tengan en la oblea puesto que estos motivos de alineamiento suelen ser muy pequeños. Por ello, en muchos casos se suele

dejar dos ventanas para facilitar un prealineamiento, ver figura 2. En estas ventanas se evita poner cromo y se ponen motivos de prealineamiento para que se pueda prelinear la oblea y después poder alinear con precisión. Por supuesto, el diseñador debe evaluar si es conveniente o no el dejar grandes zonas sin o con cromo en estas ventanas.

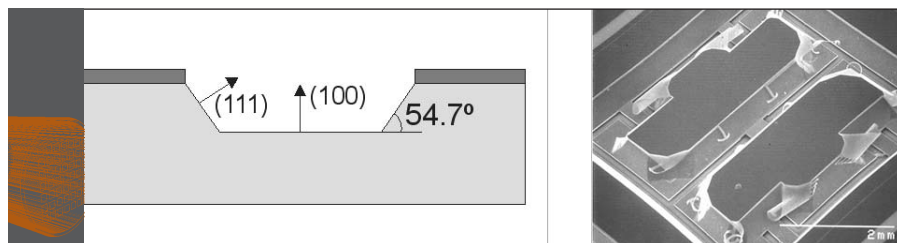
Los motivos de alineamiento en la misma cara son pequeñas estructuras que permiten realizar un alineamiento fino de una máscara contra la oblea. Existen multitud de geometrías para optimizar el alineamiento. Una estructura simple es que cada máscara deje un cuadrado y la siguiente máscara tenga una cruz que se alinee dentro de ese cuadrado (figura 2). En este caso la tolerancia entre la cruz y el cuadrado definiría la precisión del alineamiento. Hay que tener en cuenta el campo de las máscaras al dibujar estas estructuras, ya que es necesario tener zonas por donde ver lo que hay en la oblea para permitir alinear. Estas estructuras de alineamiento se suelen colocar en sitios determinados para permitir su fácil localización. En este aspecto hay que tener en cuenta que la alineadora puede que no permita ver motivos a lo largo de toda la oblea sino sólo en algunas zonas.

En algunas tecnologías es necesario alinear máscaras en una cara con motivos de la otra. Actualmente las alineadoras permiten excelentes alineamientos entre caras. Para ello hay que diseñar también estructuras de alineamientos entre las caras.

### 1.3 DISEÑOS CON ATAQUES ANISÓTROPOS

A continuación se comentarán algunos aspectos que se tiene que tener en cuenta a la hora de diseñar máscaras que servirán para realizar ataques anisótropos. Estas máscaras se suelen utilizar para obleas (100) con flats en las direcciones (110) ya que son direcciones que definen cavidades cuadradas y además los coeficientes piezorresistivos para piezorresistencias tipo p en las direcciones (110) son elevados. Este tipo de ataque se llama anisótropo porque las velocidades de ataque dependen de los planos cristalográficos. La dirección (100) se ataca mucho más rápido que la (111) y por lo tanto la estructura atacada suele quedar determinada por estos planos (figura 3). A la hora de diseñar la máscara habrá que considerar como quedará la estructura final para definir las geometrías a dibujar.

Figura 3: Ataque anisótropo en obleas (100) y fotografía SEM de un acelerómetro fabricado con ataque anisótropo.



Puesto que los ataques anisótropos se suelen utilizar para ataques profundos, e incluso para atacar toda la oblea, hay que evitar que se produzcan estos ataques en el borde de la oblea porque podrían hacer que ésta se rompiera. Por ello, se tiene que dejar un anillo en el exterior de la oblea que prevenga del ataque.

De igual manera, en el caso de los motivos de alineamiento y prealineamiento entre caras hay que prestar especial atención para que durante el ataque no se produzcan cavidades muy grandes que puedan debilitar la oblea. Así, si se dibujan marcos en la máscara de ataque anisótropo hay que evitar que el marco tenga continuidad entre un chip y otro para que no se hagan canales que crucen toda o casi toda la oblea y la debiliten.

Cuadro 1: Atacante anisótropo, temperatura de proceso, velocidad de ataque de los planos (100) de silicio, relación entre las velocidades de ataque en la dirección (100) y la dirección (111), velocidad de ataque del óxido de silicio, velocidad de ataque del nitruro de silicio y relación entre el ataque lateral y el ataque (100).

Atacante	Temp. [°]	V(100) [µm/min]	V(100)/V(111)	VSio <sub>2</sub> [Å/min]	VSi <sub>3</sub> N <sub>4</sub> [Å/min]	Ataque lateral
KOH	75	56	400:1	2300	40	2.9
TMAH	80	26	16:1	25	7	7

A la hora de diseñar la máscara será necesario tener en cuenta una serie de consideraciones. Estas consideraciones dependerán en gran medida de las características de los ataques en cada laboratorio. A modo de ejemplo, en el Cuadro 1, se ponen los valores que se utilizan en el CNM para los dos principales atacantes anisótropos del silicio, el TMAH y el KOH. De este cuadro se deduce que el KOH ataca más rápido el silicio y la relación de ataque entre los planos (100) y (111) es mejor. Esto quiere decir que se pierden menos dimensiones durante el ataque. Por otro lado, el TMAH tiene a su favor que la velocidad de ataque del óxido de silicio y del nitruro de silicio es menor. Esto quiere decir que es posible utilizar una capa más fina de óxido de silicio como máscara. Capas más finas normalmente implican menos problemas tecnológicos. Otro aspecto interesante a tener en cuenta es la compensación de esquinas convexas durante el ataque [6]. Las esquinas convexas se atacan a una velocidad mucho mayor que la dirección (100). Para evitar este problema en las esquinas se dibujan unas estructuras, llamadas de compensación, que lo que hacen es intentar retrasar el ataque en estas esquinas para que al final del proceso la esquina quede bien definida. En la referencia [6] se muestran varias estructuras y como calcularlas para una compensación correcta.

## 1.4 SIMULACIÓN POR FEM DE MEMS

Uno de los aspectos más interesantes en el campo del diseño de microsistemas es la posibilidad de simular los mismos antes de su fabricación. La fabricación de MEMS es un proceso costoso tanto en tiempo como en dinero. Concebir un dispositivo, dibujar las máscaras, fabricarlo y testarlo puede llevar meses de trabajo. Por ello es conveniente simular los dispositivos antes de su fabricación. La mayoría de los dispositivos MEMS son simulados mediante el método de los elementos finitos (FEM). En este método numérico de simulación lo que se hace es dividir la estructura en pequeñas porciones denominadas elementos. Estos elementos están constituidos por nodos en los cuales se calcularán los parámetros que se quieren determinar. Entre los nodos de un elemento se aplicarán las ecuaciones de campo necesarias para solucionar la física del problema. Todas las variables y ecuaciones se organizan en forma matricial, con todos los elementos en los cuales se ha dividido el modelo, y se resuelve numéricamente el problema.

Para la simulación de MEMS existe una variedad de programas comerciales que se pueden utilizar. Algunos de ellos son específicos para MEMS como el de la empresa Coventor [7], y otros son de uso más general como ANSYS [8]. Probablemente uno de los más utilizados sea el ANSYS. ANSYS es un programa de uso general aunque en los últimos años ha sacado módulos específicos para la simulación de MEMS. En este programa se puede realizar el modelado y simulación de la estructura mediante menús (directamente en el entorno del programa) o se pueden escribir una serie de comandos en un archivo de texto que luego puede ser introducido en el entorno de ANSYS y ejecutado como un programa que realiza el modelado y la simulación.

Para realizar una simulación en ANSYS se tendrán normalmente tres módulos. El primero se denomina preprocesador. En esta etapa se introducen las propiedades de los materiales que van a participar en el modelo. Hay que recordar que muchos materiales no son isotrópicos. En estos programas de simulación se puede introducir el valor de una propiedad para cada uno de los ejes. En este módulo también se define el tipo de elemento que se va a utilizar. El tipo de elemento depende del problema a resolver. Hay elementos para resolver problemas térmicos, mecánicos, eléctricos, magnéticos, fluidicos, etc. Para un determinado tipo de problema también existe una gran variedad de elementos que lo pueden solucionar. La elección de estos elementos dependerá de la precisión que se quiera obtener, de si el modelo es en 2 dimensiones o en 3 dimensiones, de la facilidad del mallado, etc. Posteriormente se define la geometría del modelo a simular. La experiencia de la persona que hace el modelo puede hacer que el modelo real se simule de una forma más sencilla. Por ejemplo puede haber partes del modelo que no vayan a afectar a la simulación pero puedan ser difíciles de modelar. En estos casos se puede valorar si son eliminadas del modelo. Existen multitud de posibilidades para hacer el modelo geométrico. Una vez realizado dicho modelo se debe proceder al mallado. Mallar el modelo significa dividirlo en elementos. Un modelo con muchos elementos es más preciso pero puede requerir de un tiempo de cálculo muy elevado. Por ello hay que intentar mallar con el mínimo número de elementos pero siempre comprobando que la solución que se obtiene es precisa. Una forma de comprobar si un modelo está bien mallado es solucionarlo y luego doblar el número de elementos y volver a simular. Si el resultado es

casi igual al de la primera simulación, el primer modelo estaba suficientemente bien mallado. Si por el contrario, el resultado cambia, se tiene que seguir realizando este proceso hasta que sea constante. También puede ser recomendable mallar con pocos elementos las zonas donde no existirán gradientes importantes de las magnitudes a determinar y mallar más fino en las partes en que se considere que si los habrá.

El siguiente módulo es el módulo de la solución. En este módulo se define el tipo de análisis que se quiere realizar, por ejemplo si es un análisis estático, dinámico, transitorio, etc. Cada uno de esos análisis tiene una multitud de parámetros para solucionar el problema de la forma más apropiada. Una vez definidos los parámetros se tienen que definir las condiciones de contorno del problema. Por ejemplo si se trata de un problema mecánico se tiene que fijar la estructura en algún punto. Posteriormente se definen las cargas del problema. Dependiendo del problema a resolver estas pueden ser fuerzas, presiones, flujos, etc. Finalmente se soluciona el problema.

En el tercer módulo se procesan los resultados. Se pueden ver en gráficos o mostrar los datos numéricos. Ansys ofrece una gran variedad de comandos para procesar los resultados obtenidos.

Una de las grandes dificultades de los MEMS es que suelen presentar varios campos de la física a la vez. Este tipo de problemas se denominan acoplados. Un ejemplo típico sería un puente que se calienta (problema térmico) y luego se elonga por el calor (problema mecánico). ANSYS también ofrece la posibilidad de solucionar problemas acoplados.

A modo de resumen decir que las herramientas de simulación por FEM son fundamentales en el campo del diseño y optimización de MEMS ya que permiten aproximarse a la solución a través de un modelo antes de experimentar con la fabricación de un prototipo, ahorrando así costos y tiempos de desarrollo.



## 2. TÉCNICAS DE ENCAPSULADO DE MICROSISTEMAS

### 2.1 INTRODUCCIÓN

El encapsulado es uno de los aspectos más cruciales para continuar la miniaturización y la reducción de costes de producción de los MEMS. Una de las grandes dificultades del encapsulado viene de la gran cantidad de aplicaciones y por lo tanto, diferentes requerimientos del encapsulado en función del tipo de MEMS o circuito integrado que se trate. El encapsulado debe proteger al dispositivo del medio exterior pero permitiendo que pueda operar correctamente. Si el MEMS es un sensor, el encapsulado debe de evitar o reducir las sensibilidades cruzadas del dispositivo sin afectar a la variable a medir. La protección contra el medio exterior se debe realizar sin perder de vista que en el caso de dispositivos eléctricos será necesario poder extraer las conexiones eléctricas [9]. En otros tipos de MEMS como los fluidicos será necesario que el encapsulado permita realizar las conexiones fluidicas. Otro de los requisitos es evitar introducir esfuerzos mecánicos debidos al encapsulado ya que muchos MEMS son sensibles a los esfuerzos mecánicos. En muchos casos también será necesario que las uniones sean herméticas. Finalmente con el fin de reducir costos el encapsulado debe permitir el test y calibración de los dispositivos una vez finalizados. Todos estos requisitos hacen que el encapsulado pueda significar entre un 30% y un 80% del total del costo de un dispositivo MEMS o circuito integrado.

Por ello, con el objeto de reducir costos el encapsulado de chips en forma individual, es decir chip a chip, puede sustituirse por un encapsulado a nivel de oblea en el que la oblea con los dispositivos se suelda a otra oblea que cumple la función de encapsulado, lográndose así el encapsulado de todos los dispositivos de la oblea en un solo paso. En este caso, el proceso se puede dividir en dos etapas. La primera es el alineamiento de las obleas, que se puede realizar por diferentes métodos: alineamiento transparente o por infrarrojos, cara a cara o por la cara dorso). Actualmente alineamientos en el orden de o por debajo de la micra son posibles. La segunda es la técnica utilizada para realizar la soldadura de las obleas.

### 2.2 TÉCNICAS DE SOLDADURA

Existe una multitud de técnicas de soldadura de obleas, cada una de ellas con una serie de ventajas e inconvenientes que las harán más propicias para un determinado tipo de MEMS u otro. Entre ellas se pueden destacar la soldadura por termocompresión, soldadura eutéctica, soldadura por capa intermedia, soldadura directa, o soldadura anódica entre otras. Las técnicas a baja temperatura suelen presentar la ventaja de poder ser utilizadas en dispositivos con electrónica (por ejemplo que tengan metalización de aluminio, o implantaciones cuyos perfiles se pueden ver afectados por un proceso a temperatura elevada).

A continuación se comentan las principales técnicas de soldadura utilizadas para el encapsulado a nivel de oblea. En microelectrónica las soldaduras entre obleas no se dan

solamente entre silicio, es posible tener otros materiales sobre el silicio o incluso obleas de otros materiales como en el caso de la soldadura anódica.

#### 2.2.1 SOLDADURA DIRECTA O POR FUSIÓN (DIRECT BONDING OR FUSION BONDING)

Una de las técnicas de soldadura entre obleas con un gran interés comercial es la soldadura directa de silicio o a veces llamada soldadura por fusión (nombre no muy apropiado porque las obleas se unen sin llegar al punto de fusión). Esta soldadura es ampliamente utilizada para la producción de obleas tipo SOI (Silicon On Insulator). La soldadura directa se basa en el hecho de que muchos materiales se adhieren entre si, si las superficies están debidamente pulidas. En este tipo de soldadura las obleas se ponen en íntimo contacto realizando una presión entre ellas y en este momento se produce una pre-soldadura. Se puede distinguir entre dos tipos dependiendo de si la superficie a soldar es hidrofílica o hidrofóbica. En la soldadura hidrofílica se realiza una limpieza con solución piranha y una limpieza RCA para limpiar las superficies y hacerlas hidrofílicas. Al poner las superficies en contacto se crea una unión por fuerzas de Van der Waals. Posteriormente se realiza un proceso de recocido a alta temperatura, a aproximadamente 1000°C, para que los enlaces se conviertan en covalentes (Si-O-Si). En el caso hidrofóbico la limpieza que se realiza es con HF, justo antes de poner las obleas en contacto. La fuerza de la soldadura es comparable a la del silicio en volumen. Cabe destacar que a pesar de ser una técnica que requiere de una planaridad y limpieza extrema de las obleas, es posible, aunque difícil, soldar obleas previamente estructuradas o que tengan capas de otros materiales.

#### 2.2.2 SOLDADURA A BAJA TEMPERATURA ACTIVADA POR PLASMA (PLASMA ACTIVATED BONDING)

Uno de los principales inconvenientes de la soldadura directa es que se requiere de un recocido a elevada temperatura lo cual hace que no sea posible su utilización en dispositivos que no puedan sufrir este tipo de recocidos. Por ello en los últimos años se ha trabajado en conseguir realizar soldaduras a más baja temperatura. Así, en la técnica de activación en seco lo que se pretende es la activación de la superficie a soldar mediante un tratamiento de la misma en plasma. De esta manera se consiguen fuerzas de soldadura del orden de 1J/m<sup>2</sup> a temperaturas en el orden de 200-400°C.

#### 2.2.3 SOLDADURA ANÓDICA

Es la soldadura entre obleas más utilizada para el encapsulado de MEMS. La soldadura anódica se realiza normalmente entre obleas o chips de silicio y vidrios especiales. Para realizar la soldadura se ponen las dos superficies en contacto y se calientan a una temperatura del orden de 250-400°C aproximadamente. Seguidamente se aplica un voltaje, típicamente de entre 600-1000 V, manteniendo el silicio positivo respecto al vidrio. A esa temperatura el vidrio es conductor iónico y por lo tanto se crea una capa de vaciado de iones en la zona del vidrio adyacente al silicio. Esta capa de vaciado crea una fuerza electrostática muy grande entre las dos obleas que las pone en íntimo contacto y en ese

momento se realiza una unión química. La soldadura anódica crea uniones herméticas. Otra de las grandes ventajas es que los vidrios utilizados tienen un coeficiente de expansión térmica muy parecido al silicio y por lo tanto no se producen esfuerzos mecánicos importantes durante el proceso.

#### 2.2.4 SOLDADURAS TÉRMICAS

Las soldaduras térmicas también tienen el objeto de realizar uniones a temperaturas bajas y evitando el campo eléctrico que se necesita en la soldadura anódica. Entre estas técnicas se destacan la soldadura eutéctica (eutectic bonding), la de soldaduras de vidrios fundidos (Glass frit bonding) y la soldadura por difusión (diffusion bonding).

En la soldadura eutéctica se utiliza la propiedad de que algunas mezclas de materiales tienen un punto de fusión más bajo que cada una de las sustancias por separado. Las capas que se utilizan típicamente son Au-Si, Au-Sn o Pd-Si. En el caso de Au-Si el punto de fusión, para 3% de Si y 97% de Au, es de 363°C. Una de las principales ventajas es que permite soldar superficies con cierta rugosidad. Y como principal desventaja que la presencia de Au hace que no sea un proceso compatible.

Otro tipo de soldadura térmica es la de soldaduras de vidrios (Glass frit bonding). En este caso un polvo de materiales tipo vidrio se mezcla con un solvente para crear una pasta que se pone entre las obleas a soldar a una temperatura entre 400-600 °C.

En este tipo de soldaduras también se tiene la soldadura por difusión (Diffusion bonding), en donde se utilizan materiales que tengan una baja temperatura de cambio de fase y una elevada difusión. Es posible crear soldaduras Au-Au, Cu-Cu o Cu-Au.

Por último, se tienen las soldaduras adhesivas (Adhesive bonding). Esta soldadura utiliza capas intermedias tipo polímeros, vidrios especiales o resinas. La gran ventaja de esta técnica es su baja temperatura de proceso.

Como se ha visto, uno de los parámetros de proceso más importante de las diferentes técnicas de soldadura es la temperatura a la cual se realiza. En el Cuadro 2 se muestran algunas de las ventajas y desventajas para algunas de las técnicas de soldadura más importantes.

Cuadro 2: Ventajas y desventajas de las principales técnicas de soldadura entre obleas [9].

Técnica de soldadura	Ventajas	Desventajas
Soldadura Directa SiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub>	Fuerte soldadura Hermética	Elevada temperatura ~1000 °C Requiere superficies no rugosas
Activada en seco mediante Plasma	Baja temperatura	Requiere superficies no rugosas
Soldadura Anódica	Fuerte Soldadura Hermética	Elevado voltaje
Soldadura Eutéctica Au-Si	Fuerte Soldadura Hermética	Requiere materiales específicos Requiere superficies no rugosas
Vidrios (Glass Frit Bonding)	Superficies rugosas Hermética	Requiere grandes áreas soldadas

#### 2.3 EQUIPOS DE SOLDADURA ENTRE OBLEAS

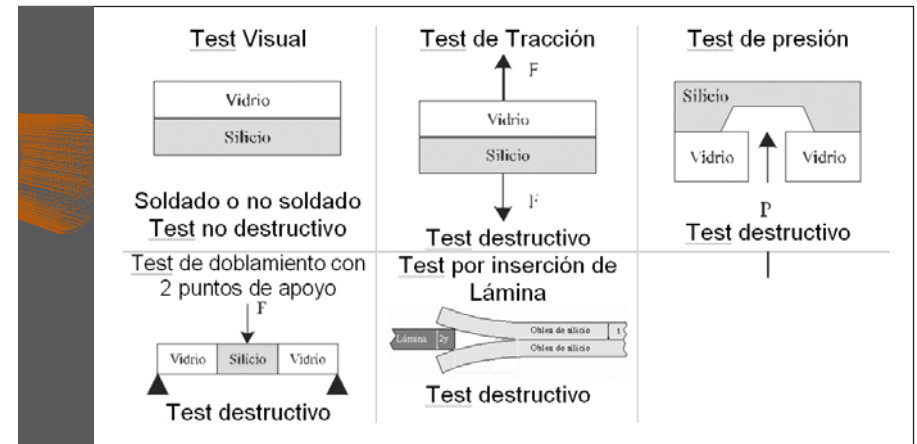
En la actualidad existen multitud de equipos para la soldadura entre obleas. Originariamente los equipos estaban optimizados para realizar un solo tipo de soldadura. Pero en la actualidad la tendencia es que en un mismo equipo se puedan realizar soldaduras entre obleas mediante diferentes técnicas. A la hora de seleccionar un equipo hay que pensar en las necesidades reales del grupo que lo va a utilizar. La posibilidad de realizar diferentes técnicas de soldadura en el mismo equipo puede ser una ventaja. Algunos equipos son muy automatizados con el objeto de permitir la producción de dispositivos en masa. Sin embargo, en el caso de grupos de investigación muchas veces no se soldará una oblea entera sino un chip o un trozo de la oblea. Algunos equipos puede que no estén adaptados para soldar trozos o chips y esto puede ser un inconveniente. También es necesario considerar el diámetro de las obleas con las cuales vayamos a trabajar, típicamente entre 4" y 6". En muchos casos será necesaria la soldadura en vacío o en ambientes de atmósferas determinadas. Entre las compañías más conocidas que tienen equipos de soldadura se encuentran: EVG[10], Süss MicroTec[11], AML[12], etc. Las características más importantes, a modo de resumen, son: facilidad de realizar soldaduras entre obleas pero también entre chips, posibilidad de realizar diferentes tipos de sol-

daduras (anódica, soldadura directa, soldadura por plasma), posibilidad de realizar soldaduras en vacío o en atmósferas determinadas. Actualmente se tiende a ofrecer equipos complementarios, por ejemplo, equipos de soldadura de una determinada empresa suelen ofrecerse como sistemas complementarios y compatibles con alineadoras de máscaras de la misma empresa.

## 2.4 TESTS DE SOLDADURA

Una vez realizada la soldadura es necesario realizar una caracterización del proceso de unión, es decir determinar la fuerza de soldadura. Para ello existen diferentes tipos de test. Una posible clasificación de los mismos es en tests no-destructivos y tests destructivos. En los primeros no es necesario destruir el dispositivo o la oblea para valorar si la unión es correcta o no. Entre ellos tenemos el test visual que se utiliza cuando uno de los materiales es transparente, como en el caso del vidrio, utilizado en la soldadura anódica [13]. Para materiales no transparentes al visible se pueden utilizar otras técnicas de inspección como pueden ser, transmisión por infrarrojo, ultrasonidos o topografía por rayos X. Este tipo de tests suelen ser fiables pero no dan mucha información de la calidad de la unión. Para esto se utilizan los test destructivos, en los cuales tras realizar el test el dispositivo queda inservible. Entre ellos se tienen secciones inspeccionadas con SEM o TEM, para atacar defectos en estas secciones, y tests cuantitativos como: el test de presión, en el cual se aplica una presión hasta separar las muestras soldadas [14], test de tensión, en el cual se estira una de las muestras soldadas hasta que se separan [15,16], test de flexión, con 2 puntos de apoyo para controlar las tensiones de cizalladura [17] o el test tipo cuchilla, en el cual se introduce una lámina de espesor controlado entre las superficies soldadas y se mide cuanto se propaga la fractura (separación entre las superficies soldadas). Hay que decir que no todos los tipos de soldadura pueden ser caracterizados con todos los tipos de test. Dependiendo del tipo de soldadura se seleccionará el test más apropiado (Figura 4), y será la aplicación final la que determinará el límite de la calidad de la unión.

Figura 4: Esquema de algunos de los test mas utilizados para la caracterización de soldaduras entre obleas



### 3. TÉCNICA DE SOLDADURA ANÓDICA

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

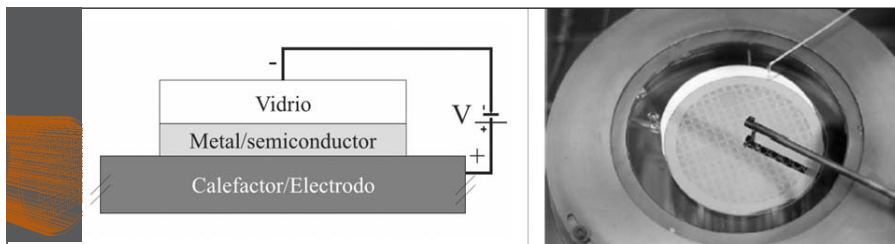
En 1.968 D.I. Pomerantz patentó en EEUU lo que él mismo vino a definir como un nuevo método de producir soldaduras entre metales y vidrios u otros aislantes [18]. El experimento que realizaban era sencillo, el vidrio y el metal se calentaban a una temperatura bastante inferior al punto de fusión del vidrio. Tras haber sido convenientemente pulidas las superficies a soldar se ponían las partes en contacto. Por último se aplicaba una diferencia de potencial entre las partes de tal manera que el metal se mantuviera positivo respecto al vidrio. Probaron una amplia gama de aislantes unidos a diferentes clases de metales y semiconductores [13].

En microelectrónica esta soldadura se realiza entre Silicio y vidrio Pyrex #7740 o equivalentes, aunque también se puede realizar entre otros semiconductores como GaAs y Ge o metales como el Al y con otros tipos de vidrios borosilicatos. En la actualidad la soldadura anódica es una de las técnicas más importantes de soldadura entre obleas. Permite hacer soldaduras herméticas entre silicio y vidrio o entre silicio y silicio, mediante la deposición de finas capas de vidrio [19, 20], permitiendo la obtención de estructuras tridimensionales mediante la soldadura de varias obleas.

#### 3.2 MÉTODO

La soldadura anódica se lleva a cabo en una placa calefactora, tanto en vacío [21] como a presión atmosférica. Las temperaturas para realizar la soldadura anódica suelen estar entre 250°C y 400°C. Es importante citar que esta temperatura está por debajo del punto de fusión de los vidrios utilizados. Un requisito necesario para este tipo de soldaduras es que las superficies deben estar perfectamente pulidas (rugosidad menor de nanómetros). Las obleas o chips se ponen en contacto de tal manera que la oblea de silicio esté en contacto con el contacto anódico. El cátodo se coloca en contacto con la oblea de vidrio. En la figura 5 se muestra un esquema simplificado del montaje para la realización de soldaduras anódicas.

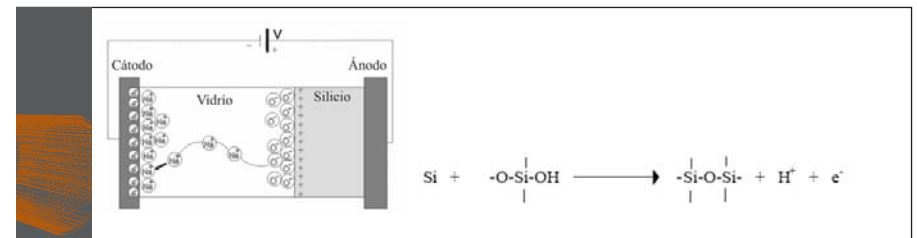
Figura 5: Configuración para la realización de un proceso de soldadura anódica y fotografía de una oblea de vidrio sobre una oblea de silicio para ser soldada anódicamente.



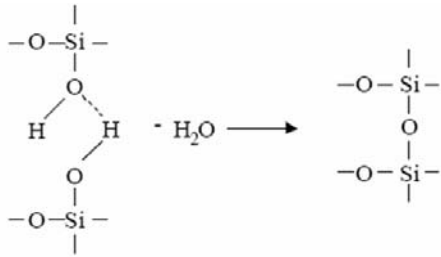
Una vez colocadas las obleas se calienta el conjunto hasta alcanzar una temperatura que normalmente está sobre los 400°C. A esta temperatura se aplica un voltaje entre los electrodos. El valor del voltaje depende del tamaño de la oblea de vidrio y si hay alguna capa de algún material aislante, SiO<sub>2</sub> o Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, sobre la oblea de silicio, ya que éstos, junto con la rugosidad de las muestras a soldar, son los principales elementos resistivos del conjunto. Para obleas de vidrio Pyrex de 1 mm de grosor se utilizan voltajes entre 400V y 1000V. Para asegurar una buena calidad de soldadura se recomienda unos parámetros de proceso de 400°C y 1000V.

A las elevadas temperaturas en las que se realiza la soldadura algunos iones, principalmente iones de sodio (Na<sup>+</sup>), dentro del vidrio se hacen móviles y se desplazan al electrodo negativo. Estos iones reaccionan con el agua del ambiente y forman una sustancia blanquecina, hidróxido de sodio, cerca el electrodo. Esta sustancia no significa ningún problema y se puede limpiar fácilmente con agua. Por el contrario, los iones negativos mayoritariamente iones de oxígeno, se quedan en el ánodo y forman una zona de carga espacial [22, 23], ver Figura 6.

Figura 6: Esquema del proceso de soldadura anódica.

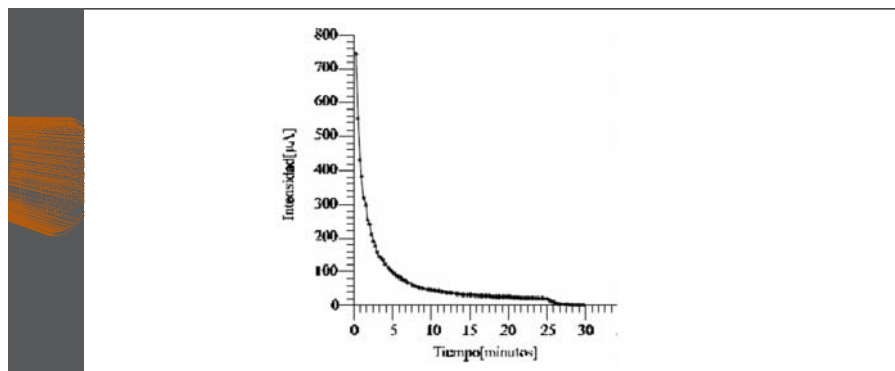


Como resultado de este movimiento de iones se forma una capa de vaciado de cargas positivas, iones Na<sup>+</sup>, en la zona del vidrio en contacto con silicio. En un principio el potencial aplicado se distribuye uniformemente sobre el vidrio pero al formarse esta zona de carga espacial parte del potencial aplicado cae en esta zona. De esta manera, las dos superficies de las obleas de silicio y vidrio actúan como las placas de un condensador. Debido a que la separación entre las superficies es muy pequeña, del orden de 10<sup>-1</sup>-10<sup>-2</sup> μm, el campo eléctrico en esta interficie es muy elevado, ~10<sup>6</sup> V/m. Este campo eléctrico tan elevado hace que las superficies se atraigan fuertemente colocándose en íntimo contacto. En este momento se realiza un enlace químico que algunos autores indican que puede ser del tipo Si-O-Si. Para las soldaduras con capas de óxido de silicio nativo se podría pensar un modelo parecido al anterior en el cual la deshidratación del sistema permite la formación de enlaces Si-O-Si. Este modelo se puede representar de la siguiente manera:



Normalmente, la soldadura se realiza fijando el voltaje a un valor determinado aunque también se puede realizar fijando la intensidad a un valor determinado y dejando libre el voltaje. En algunos casos esta configuración puede ocasionar problemas de ruptura dieléctrica cuando se aplica durante tiempos muy prolongados [24]. Las soldaduras anódicas que se realizan en el CNM se realizan aplicando un voltaje constante, normalmente 1000V. Uno de los parámetros del que mayor información se obtiene sobre el proceso de soldadura anódica es la intensidad durante la soldadura. En la Figura 7 se observa la curva de intensidad para una muestra de 1.5x1.5 cm<sup>2</sup>, soldada a 1000V y 400°C.

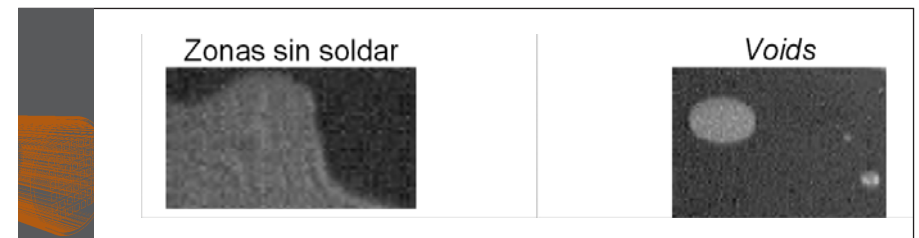
Figura 7: Curva de intensidad durante un proceso de soldadura anódica de una muestra de 1.5x1.5 cm<sup>2</sup>, soldada a 1000V y 400°C.



Seguidamente se explica el proceso a partir de la curva de intensidad. Tras haber colocado las obleas en contacto, se incrementa la temperatura. Cuando la temperatura alcanza los 400 C se deja unos 5 minutos a esa temperatura para permitir una buena uniformidad de temperatura en toda la muestra/oblea. Tras este período se aplica un potencial de 1000V. En este momento se aprecia un pico brusco en la intensidad. Algunos autores más que de intensidad hablan de la densidad de corriente, ya que el nivel de intensidad depende del área que se suelde. Esta dependencia no es lineal ya que influyen otros

parámetros como la forma de los electrodos, donde empieza la soldadura, existencia de partículas, etc. Cuando las soldaduras son buenas la soldadura es rápida y el pico de intensidad se da en el instante inicial de aplicar voltaje y decae rápidamente. Las zonas que se van soldando se reconocen porque a simple vista adquieren un color grisáceo oscuro (Figura 8). En la zona donde se pasa de soldado a no soldado aparecen anillos de interferencia que son debidos a la proximidad (menor de 1 µm) de los dos substratos. En algunos casos en una zona soldada aparecen zonas aproximadamente circulares sin soldar. Estas zonas se denominan en inglés "voids". Los voids pueden ser debidos principalmente a dos motivos. El primero es la existencia de partículas entre las superficies a soldar, de aquí la necesidad de realizar las soldaduras dentro de salas blancas y con unas condiciones de limpieza considerables. Su aparición puede ser un síntoma de que las muestras deben limpiarse mejor para ser soldadas. El segundo, más difícil de solucionar, es debido a que la soldadura empieza en varios puntos de la oblea a la vez y los frentes de soldadura se van propagando por toda la oblea. Si varios de estos frentes convergen en un punto pueden atrapar aire y formar estas áreas circulares sin soldar debido al atrapamiento de aire y los esfuerzos mecánicos que se generan.

Figura 8: Detalle fotográfico de vidrio soldado a silicio. Las zonas oscuras están soldadas, las zonas claras no están soldadas.



En teoría la soldadura ha terminado cuando la gráfica de la intensidad pasa de decaer rápidamente a decaer lentamente. Normalmente, una muestra del orden de centímetros en unos 10 minutos puede estar perfectamente soldada. En el caso de una oblea puede necesitarse un poco más de tiempo, 30 minutos sería un tiempo típico. Pero estos valores del tiempo del proceso dependen de muchos factores.

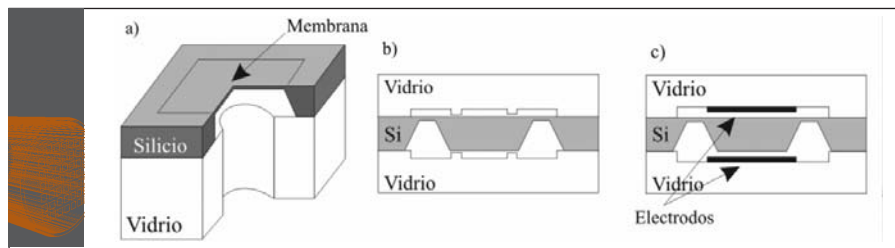
### 3.2.1 APLICACIONES

La soldadura anódica es una de las técnicas más versátiles para la fabricación de MEMS y en particular sensores. La importancia de la soldadura anódica es debida principalmente a su capacidad de reducir esfuerzos mecánicos en los dispositivos. Cuando se encapsula un dispositivo se producen esfuerzos mecánicos debido al propio sistema de

encapsulado, pegado, soldado, etc. Por ejemplo en los sensores mecánicos, como por ejemplo los sensores de aceleración que miden la aceleración a partir de una deformación o un esfuerzo mecánico, si de entrada el encapsulado induce deformaciones o esfuerzos mecánicos la sensibilidad y el nivel de salida cuando no se aplica aceleración (offset) puede variar negativamente. También, debido a la diferencia en los coeficientes de expansión térmica entre el silicio y los materiales sobre los cuales se encapsula el sensor, se pueden producir esfuerzos mecánicos cuando varía la temperatura y los diferentes materiales se dilatan de forma diferente. El vidrio que normalmente se utiliza para soldar anódicamente en microelectrónica tiene la propiedad de tener un coeficiente de expansión térmica muy parecido al silicio en el rango de temperaturas de funcionamiento del sensor y en el que se realiza la soldadura anódica. En estos casos es el vidrio el que se une al encapsulado y no el silicio. De esta manera el vidrio, normalmente más grueso que la oblea de silicio, absorbe los esfuerzos mecánicos del encapsulado y además al calentarse el dispositivo no se producen esfuerzos mecánicos en el sensor debido a que el vidrio y el silicio tienen coeficientes de expansión térmica muy parecidos.

Otra característica que explica la potencialidad de esta técnica es la posibilidad de que el vidrio forme parte íntegra del sensor. Hay muchos ejemplos: conectar los sensores de presión al mundo exterior, definir capacidades para sensores capacitivos, sistemas de protección de choques en acelerómetros, canales y cavidades en microfluidica, etc. (Figura 9).

Figura 9: Aplicaciones en las cuales el vidrio es parte intrínseca del dispositivo: a) sensor de presión, b) acelerómetro (sistema de protección de choques) y c) acelerómetro (electrodos de una capacidad).



### 3.3 EQUIPOS Y SUBSTRATOS

En la actualidad existen numerosos equipos para realizar soldaduras anódicas. Algunos de ellos son específicos para soldadura anódica y otros permiten realizar varias técnicas de soldadura entre obleas con el mismo equipo. Las características esenciales que debe tener un equipo para soldadura anódica son: un sistema para calentar las obleas a temperaturas de alrededor de unos 400 °C en forma controlada, una fuente de voltaje/intensidad para poder fijar el voltaje o la corriente, un sistema de alineamiento, una cámara para soldar las obleas donde se pueda realizar vacío o poner gases en su interior y un sistema para registrar la corriente/voltaje del proceso de soldadura.

En cuanto a substratos de vidrio para soldar también existen una gran variedad de compañías que los producen. Los substratos deben cumplir una serie de características para poder ser soldados anódicamente a substratos de silicio. Por un lado deben ser perfectamente planos y con una rugosidad muy pequeña, del orden de los nanómetros. Por otro lado deben de presentar un coeficiente de expansión térmica parecido al del silicio en el rango de temperaturas desde temperatura ambiente hasta la del proceso de soldadura. Y también debe tener un punto de transición a una temperatura mayor que la temperatura de soldadura para evitar que se deforme durante el mismo. Vidrios comúnmente utilizados para soldadura anódica en microsistemas son Pyrex #7740 de Corning, SD-1 y SD-2 de Hoya, IWAKI, Borofloat de Schott, entre otros.

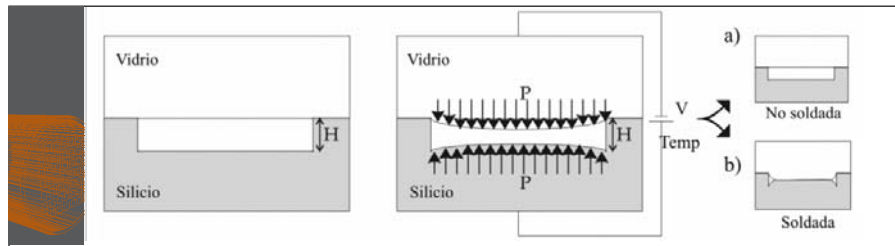
### 3.4 TESTS DE SOLDADURA ANÓDICA

Para la caracterización de las soldaduras anódicas se han utilizado tests como los presentados en el apartado de técnicas de soldaduras entre obleas. Sin embargo la soldadura anódica tiene una serie de particularidades que hace que los tests anteriores no den una información real de la calidad de la soldadura. El test por inspección visual se puede utilizar con facilidad porque el vidrio es transparente. Sin embargo, este test solo nos indica si la muestra esta soldada o no pero no su calidad y a veces una muestra que parece soldada se separa al cabo de un tiempo. Por otro lado, los tests destructivos mencionados en el apartado 2.4 Tests de soldadura, tienen la problemática de que la ruptura se presenta en el vidrio y por lo tanto no nos dan información de la calidad de la soldadura. Sin embargo, existe un test no destructivo que nos da la información de calidad en este tipo de soldadura.

La peculiaridad de la soldadura anódica se debe a que se producen unas presiones electrostáticas tan grandes entre el vidrio y el silicio que las superficies de los mismos se deforman poniéndose en íntimo contacto y soldándose. Por lo tanto, cuanto mayor sea la presión electrostática mejor se adaptarán las superficies y mejor será la soldadura. Así, el principio de funcionamiento del nuevo test propuesto se basa en la observación de la presión electrostática para determinar la calidad de la soldadura anódica. Aunque el test electrostático [25] presenta un salto cualitativo con respecto a sus predecesores hay que dejar claro sus limitaciones desde el principio. Como vimos en el apartado dedicado al proceso de la soldadura anódica, hay dos fenómenos importantes para su realización. El primero es la atracción electrostática, ya que sin ésta no es posible que las superficies entren en íntimo contacto, y el segundo es el enlace que permite la unión de las superficies. Con el test electrostático se podrá determinar si la presión electrostática ha sido mayor en un caso o en otro, pero no se podrá determinar si los enlaces son mejores o peores. Lo cierto es que mientras mayor sea la presión electrostática, mayor será el área que entrará en contacto, con lo cual la posibilidad de que se produzcan enlaces será mayor y por otro lado una mayor presión electrostática puede motivar una mayor oxidación de las superficies. Desde este punto de vista podemos pensar que servirá para determinar la calidad de la soldadura, y por supuesto su principal utilidad se centra en la determinación del efecto de los diferentes parámetros de soldadura, voltaje, temperatura, etc., en la presión electrostática. En este test, para la determinación de la presión electrostática

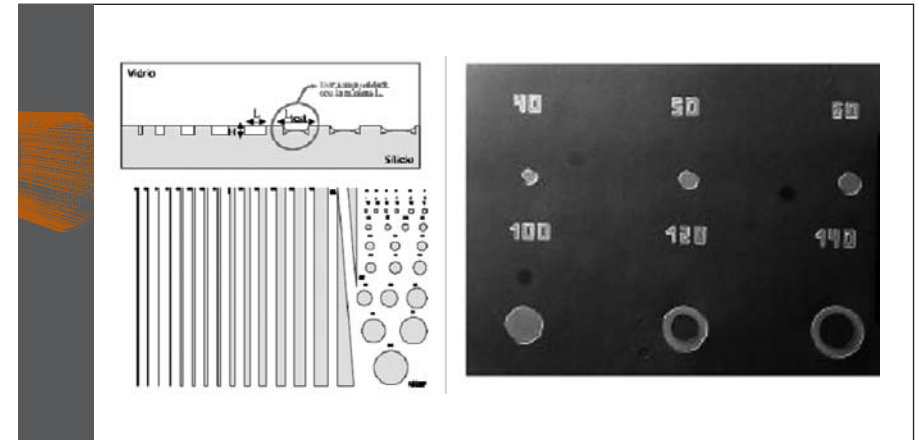
durante la soldadura se observa si se sueldan o no pequeñas cavidades en la oblea de silicio. En la Figura 10 se muestra la estructura de test fundamental que no es más que una pequeña cavidad en la oblea de silicio. Al polarizar las obleas, una vez que se ha llegado a la temperatura de soldadura, la capa de vaciado en el vidrio induce una enorme presión electrostática que intenta poner en contacto la superficie de la cavidad de silicio y la del vidrio. Es obvio que cuanto mayor sea la presión electrostática más se deforman las superficies. La rigidez de estas cavidades viene dada, en gran medida, por la distancia entre sus paredes. De tal manera que si la presión electrostática es menor que la rigidez de la estructura las dos superficies de la cavidad no entrarán en contacto y no se soldarán (Figura 10.a). Por otro lado, si la presión electrostática es mayor que la rigidez de la estructura ésta se deformará, entrando así en contacto las superficies del vidrio y del silicio dando lugar a la soldadura (Figura 10.b).

Figura 10: Sección transversal de una estructura de test fundamental; a) la presión electrostática es menor que la rigidez de la estructura para que sus superficies entren en contacto y b) la presión electrostática es mayor que la rigidez.



Para poder determinar la presión electrostática se define una matriz de estructuras fundamentales de test con diferentes dimensiones por tanto diferentes valores de rigidez. Las estructuras más pequeñas tienen una mayor rigidez mientras que las estructuras más grandes tienen una rigidez menor. De esta manera, si el rango de variación de la presión electrostática está incluido en el rango de variación de la rigidez de las estructuras de la matriz, habrá estructuras que se suelden y otras más pequeñas que no lo hagan. La estructura que resulte soldada con la mínima anchura o diámetro,  $L_{test}$ , es decir con la máxima rigidez de entre las estructuras soldadas, nos informará de la máxima presión electrostática que ha sufrido el dado (die) de test (Figura 11). Definimos  $L$  como la anchura o diámetro de cualquiera de las estructuras y  $L_{test}$  como la anchura o diámetro de la mínima estructura de la matriz de test que resultó soldada. En la máscara hay rectángulos con anchuras  $L$  desde 20 a 770  $\mu\text{m}$  y longitudes de 1 cm, y círculos con diámetros desde 20 a 2000  $\mu\text{m}$ . Todos estos valores han sido pensados para trabajar con profundidades de las cavidades  $H$  del orden de 1000Å a 4000Å.

Figura 11: Sección de la matriz de cavidades y máscara del dado (die) de test (izquierda) y fotografía de una estructura real tras ser soldada (derecha). El círculo menor soldado es de 120  $\mu\text{m}$ .



### 3.5 PARÁMETROS DE PROCESO

#### 3.5.1 ELECTRODOS

El tipo de electrodos a utilizar sobre las obleas a soldar es de gran importancia. En el caso del contacto con el silicio, el electrodo no es tan importante porque el silicio es un buen conductor a las temperaturas a las cuales se realizan los procesos de soldadura. Sin embargo, en el caso de la oblea de vidrio es diferente. El vidrio, a pesar de ser conductor iónico a las temperaturas de proceso, es bastante resistivo con lo cual zonas alejadas del electrodo pueden tener un potencial bajo y tardar en soldar o no soldar. Para evitar esto se puede tener un electrodo que cubra toda la oblea de vidrio y por lo tanto todos los puntos estén al mismo potencial (Figura 12.a). Con este electrodo toda la oblea suelda al mismo tiempo. Sin embargo tiene un problema, debido a que la soldadura comienza en muchos lugares a la vez, puede converger en algunos puntos creando defectos (voids). Para evitar estos defectos se puede utilizar un electrodo puntual (Figura 12.b). Sin embargo este tipo de electrodo tiene el inconveniente de que es posible que el potencial no llegue a todos los lugares de la oblea. Con el fin de solucionar ambos problemas, presentados por los dos electrodos anteriores, se puede utilizar un electrodo en forma de estrella como el de la Figura 12.c. Con este tipo de electrodo se pueden evitar los voids (Figura 13.a) debido a que el frente de soldadura se propaga desde la estrella hasta el exterior en forma radial (Figura 12).

Figura 12: Diferentes tipos de contactos sobre la oblea de vidrio: a) electrodo tipo plate b) electrodo puntual y c) electrodo en forma de estrella.

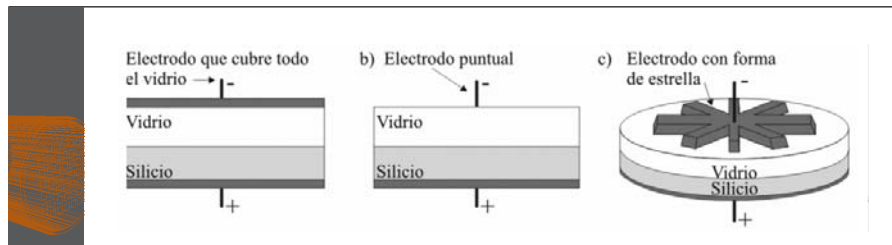
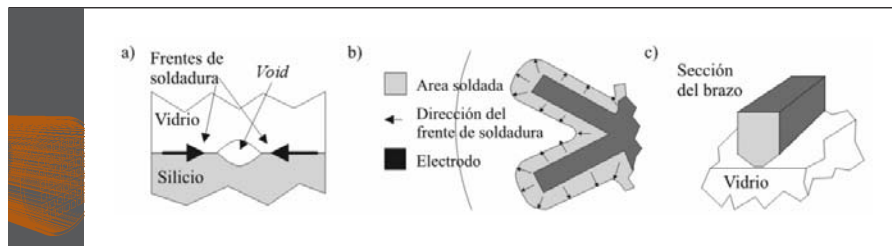


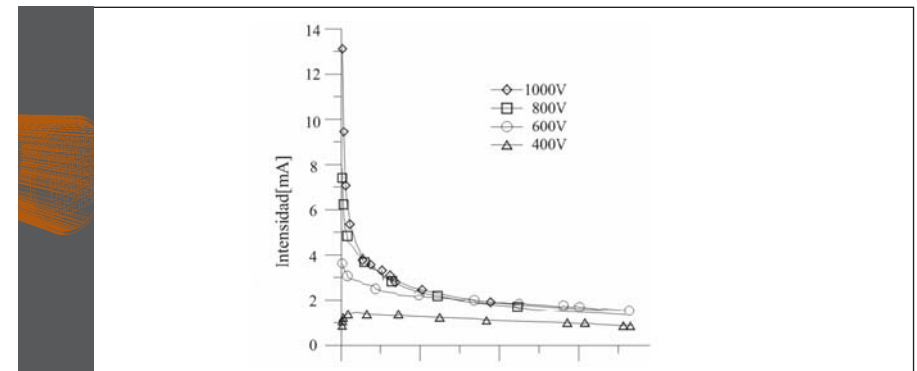
Figura 13: a) Formación de voids, b) propagación del frente de soldadura, c) sección del brazo del contacto en forma de estrella.



### 3.5.2 EFECTO DEL VOLTAJE

Uno de los principales parámetros de soldadura es el voltaje exterior aplicado. En la Figura 14 se muestran las curvas de intensidad en función del voltaje aplicado. El pico de intensidad disminuye al decrecer el voltaje aplicado. Como es lógico, cuanto mayor es el voltaje mayor es el número de iones que se mueven, por lo tanto es de esperar que se cree una capa de vaciado mayor y la presión electrostática sea mayor.

Figura 14: Curvas de intensidad para soldaduras a diferentes voltajes (400 V, 600 V, 800 V y 1000 V).



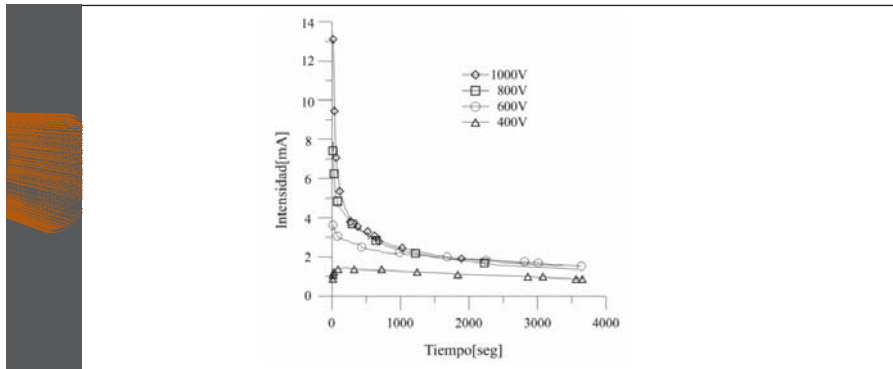
Utilizando el test electrostático se puede concluir que el efecto del voltaje aplicado es que la distribución de la presión electrostática sobre la oblea empeora. Las zonas cercanas al electrodo sobre el vidrio presentan una mayor disminución de la presión electrostática que en las zonas alejadas. Este hecho es muy importante ya que la elección de un electrodo apropiado puede hacer que el voltaje necesario para soldar una oblea pueda ser reducido considerablemente. De hecho la utilización del electrodo estrella minimiza la dispersión de la presión electrostática que quedaría más acentuada con el electrodo puntual.

### 3.5.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA DE PROCESO

La temperatura es otro de los parámetros importantes para el proceso de soldadura. Al incrementar la temperatura la movilidad de los iones aumenta con lo cual hay un mayor desplazamiento de iones, creando una capa de vaciado más grande y por lo tanto una mayor presión electrostática como demuestra el test electrostático. En la Figura 15 se muestra como la curva de corriente disminuye substancialmente al disminuir la temperatura.



Figura 15: Curvas de intensidad para soldaduras a diferentes temperaturas (300°C y 400°C).



### 3.5.4 EFECTO DEL ESPESOR DE LA OBLEA DE VIDRIO.

El vidrio amortigua tanto los esfuerzos mecánicos inducidos por el proceso de encapsulado como los inducidos por las variaciones térmicas. Por lo tanto, el vidrio debe tener un cierto espesor para poder amortiguar estos esfuerzos mecánicos. Los espesores estándares suelen ser de 1 mm y 0.5 mm. El test electrostático muestra que una disminución del espesor de la oblea de vidrio no afecta considerablemente a la presión electrostática durante la soldadura. Ello es debido a dos fenómenos. Por un lado, una vez creada la capa de vaciado casi todo el potencial cae en esta capa con lo cual en el espesor de vidrio no cae casi potencial. Por otro lado, mecánicamente el fenómeno de la soldadura anódica es un fenómeno local, es decir las deformaciones se producen cerca de la interficie silicio-vidrio.

### 3.5.5 SOLDADURA CON CAPAS INTERMEDIAS SOBRE EL SILICIO.

No siempre en los MEMS se tendrá una superficie de silicio a soldar directamente sobre vidrio. Siempre que se pueda habrá que intentar tener esta condición, pero en muchos casos se tendrán capas sobre el silicio como óxido de silicio, nitruro de silicio o polisilicio [26]. En el Cuadro 3 se muestra la posibilidad de soldar anódicamente estas capas contra vidrio.

Cuadro 3: Posibilidades de soldar anódicamente vidrio a capas de otros materiales sobre silicio.

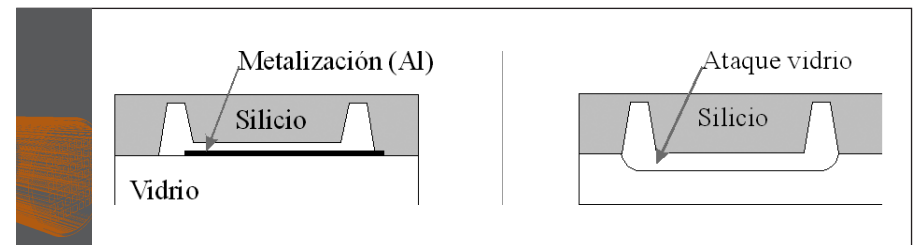
Material	Comentario
Silicio	Soldadura estándar
Óxido de silicio (Depositado o térmico)	Posible hasta unos 4000Å de espesor, recomendable menos de 2500Å
Nitruro de silicio	No recomendado, aunque suelda quedan muchos voids
Polisilicio	Suelda sin problemas si no es muy rugoso.

Del cuadro se puede apreciar que en el caso del óxido y del polisilicio es posible soldar. Capas gruesas de óxido o capas de nitruro no sueldan bien. Pero para corregir este problema se les puede depositar una capa de polisilicio encima y entonces soldar polisilicio a vidrio.

### 3.5.6 PROTECCIÓN DE ÁREAS CONTRA SOLDADURA

En algunos dispositivos que presenten partes móviles puede ser necesario evitar que estas partes móviles se suelden. Para evitar este problema se puede utilizar alguno de los dos métodos mostrados en la Figura 16. En el primero se puede metalizar el vidrio con aluminio ya que la soldadura anódica entre metal y semiconductor no es posible. También se puede realizar una cavidad en el vidrio o en el silicio para que las superficies estén suficientemente alejadas para no tocarse.

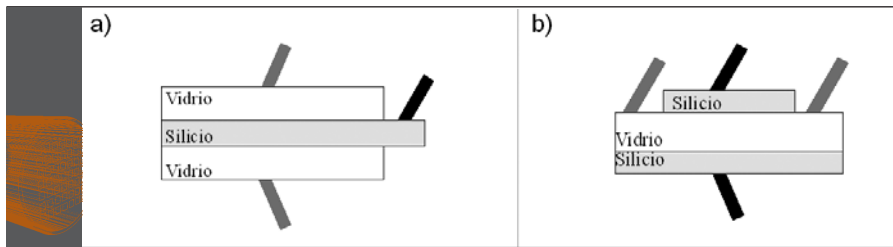
Figura 16: Sistemas de protección contra la soldadura.



### 3.5.7 MULTISOLDADURA (SOLDADURA VIDRIO-SILICIO-VIDRIO Y SILICIO-VIDRIO-SILICIO)

Algunos dispositivos requerirán de más de dos obleas para su fabricación. En estos casos, cómo conectar el contacto a las obleas es un aspecto importante a considerar. En la (Figura 17.a) se muestra la configuración para una oblea de silicio entre dos de vidrio. En este caso la oblea de silicio es conductora y se puede contactar bien. El caso de que la oblea de vidrio esté en medio es más difícil como se muestra en la (Figura 17.b). Lo que siempre hay que evitar es poner la configuración de potenciales al revés entre el silicio y el vidrio porque si esto ocurre las soldaduras se dañan, e incluso pueden llegar a despegarse [27].

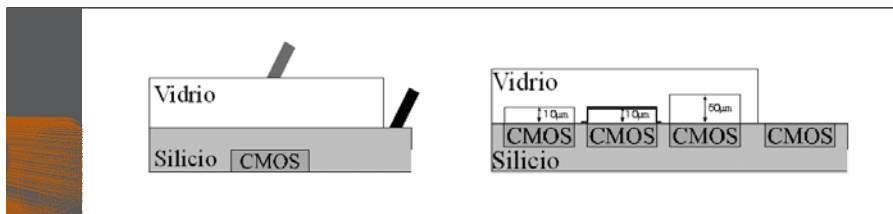
Figura 17. Configuraciones de los electrodos para poder realizar soldaduras múltiples. a) Oblea de silicio entre dos de vidrio y b) oblea de vidrio entre dos de silicio.



### 3.5.8 PROTECCIÓN DE IC FRENTE AL PROCESO DE SOLDADURA ANÓDICA

Durante el proceso de soldadura anódica se producen campos electrostáticos muy importantes que pueden afectar a circuitos integrados que se tengan en las obleas. En este sentido se puede diferenciar entre tener los circuitos en la cara opuesta a soldar o tenerlos en la cara a soldar. En la cara opuesta la solución es sencilla, simplemente hay que conectar la oblea de silicio de tal manera que la corriente no pase por el circuito integrado. En el caso de tener el circuito integrado en la cara a soldar, aunque es posible apantallarlos mediante una cavidad en el vidrio metalizada, lo mejor es quitar el vidrio de encima de los circuitos integrados [28].

Figura 18: a) Soldadura con circuitería en la cara opuesta a soldar de la oblea de silicio, b) soldadura con circuitería en la cara a soldar de la oblea de silicio.



## ANEXOS

### ANEXO 1: REFERENCIAS

- [1] Página web <http://www.cadence.com/>
- [2] Página web <http://www.tanner.com/>
- [3] Página web <http://www.coventor.com/>
- [4] Página web <http://www.deltamask.nl/>
- [5] Página web <http://www.photronics.com/>
- [6] M. Bao, Chr Burrer, J Esteve, J Bausells and S Marco, 1993, "Etching front control of (110) strips for corner compensation", *Sensors and Actuators A*, 37-38, 727-732
- [7] Página web <http://www.coventor.com>
- [8] Página web: <http://www.ansys.com>
- [9] T. Srinivasan, "Wafer to wafer bonding and packaging", <http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/projects/ee245/Lectures>
- [10] Página Web: [http://www.evgroup.com/market\\_to\\_product.asp?MTP\\_id=22](http://www.evgroup.com/market_to_product.asp?MTP_id=22)
- [11] Página Web: [http://www.suss.com/products/wafer\\_bonder/manual\\_wafer\\_bonders/elan\\_cb6l](http://www.suss.com/products/wafer_bonder/manual_wafer_bonders/elan_cb6l)
- [12] Página Web: <http://www.aml.co.uk>
- [13] G.Wallis and D.I. Pomerantz, 1969, "Field assisted glass-metal sealing", *Journal Applied Physics*, Vol. 40, No10, pp. 3946-3949.
- [14] T.G. Stratton, D.W. Buns and B.D. Speldrich, 1992, "Effective bond strength of the glass thin film TE bonds for microstructure applications", *IEEE Solid-state Sensor and Actuator Workshop*, Hilton, Head Island, South Carolina, pp. 82-85, June.
- [15] M. Nese and H. Hanneborg, 1993, Anodic bonding of silicon to silicon wafers coated with aluminium, silicon oxide, polysilicon or silicon nitride, *Sensors and Actuators A37-38*, pp.61-67.
- [16] A. Cozma and B. Puers, 1995, "Characterization of the electrostatic bonding of silicon and Pyrex glass", *J. Micromech. Microeng.*, 5, pp. 98-102.
- [17] S. Johansson, K. Gustafsson and J. Schweitz, 1988, "Strenght evaluation of field assisted bond sealsbetween silicon and Pyrex Glass", *Sensors and Materials* 3, pp 143-151.

- [18] D. I. Pomerantz, , U.S. Patent No. 3 397 278, U.S. Patent No. 2 417 459, 1968.
- [19] A. Hanneborg, M. Nese, H. Jakobsen and R. Holm, 1992,"Silicon-to-thin film anodic bonding", J.Micromechanical Microeng. 2, pp.1177-121.
- [20] M. Nese and H. Hanneborg, 1993, "Anodic bonding of silicon to silicon wafers coated with aluminium, silicon oxide, polysilicon or silicon nitride", Sensors and Actuators A37-38, pp.61-67.
- [21] H. Henmi, S. Shoji, Y. Shoji, K. Yosimi and M. Esashi, 1993, "Vacuum packaging for microsensors by glass-silicon anodic bonding", The 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers'93, June 7-10,Pacifico, Yokohama, Japan, pp.584-587.
- [22] M. Hartz, , 1992, "Anodic bonding for the third dimension", J. Micromech. Microeng. 2, pp. 161-163.
- [23] M.Despont, H. Gross, F.Arrouy, C. Stelbler, U.Stauber, 1996, "Fabrication of a Silicon-Pyrex-Silicon stack by AC anodic bonding", Sensors and Actuators A 55, pp. 219-224.
- [24] K.B. Abaugh, P.E. Chade and D. Rasmussen, 1988,"Mechanics of anodic bonding of silicon to Pyrex glass", Technical Digest of the IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina, USA, pp. 939-943.
- [25] J.A. Plaza, J. Esteve and E. Lora-Tamayo, 1997, "Non-destructive in-situ test for anodic bonding", Sensors and Actuators A 60, pp. 176-180.
- [26] J.A. Plaza, J. Esteve and E. Lora-Tamayo, 1998, "Effect of the silicon oxide, silicon nitride and polysilicon layers on the electrostatic pressure during the anodic bonding", Sensor and Actuators A 67, pp. 181-184.
- [27] J.A. Plaza, E. González, J. Esteve, M.M. Visser, D.T. Wang, A. Hanneborg, 2000, "Cathodic debond of anodically bonded silicon to glass wafers", Electrochemical and Solid-State Letters, 3 (8), pp. 392-394.
- [28] K. Schjolberg-Henriksen, J.A. Plaza, J.M. Rafi, J. Esteve, F. Campabadal, J. Santander, G.U. Jensen, A. Hanneborg, 2002, "Protection of MOS capacitors during anodic bonding", Journal of Micromechanics and Microengineering 12, pp. 361-367.

**NOTAS:**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



**CONSIDERACIONES  
TÉCNICAS EN EL DISEÑO  
DE MICROSISTEMAS**

Diseño, Simulación,  
Encapsulado y Testing.



**INTI**



Instituto  
Nacional  
de Tecnología  
Industrial



**Unión Europea**