

**Seminario De Nano Compuestos de Matriz Polimérica, Micro Y Nano  
Fabricación**

**Estudio De Sistemas De Micro Y Nano fabricación**

**Procesos De micro mecanizado Mecánico**

**David Ricardo Espinosa Díaz**

**Código: 19425**

**Diego Alexander Riveros Cruz**

**Código: 19500**

**Escuela Colombiana De Carreras Industriales**

**Facultad Ingeniería Mecánica**

**Programa Tecnología En Mecánica Industrial Propedéutica**

**Bogotá D.C.**

**2014**

# INTRODUCCIÓN

## 1. PRELIMINARES

### 1.1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

- 1.1.1. Descripción del problema
- 1.1.2. Formulación del problema

### 1.2. OBJETIVOS

- 1.2.1. Objetivo general
- 1.2.2. Objetivos específicos

### 1.3. JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

- 1.3.1. Justificación
- 1.3.2. Delimitación

### 1.4 diseño metodologico

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1. Marco histórico

- 2.1.1. Origenes conceptuales
- 2.1.2. E. Erik Drexler
- 2.1.3. Norio Taniguchi
- 2.1.4. Avances experimentales
- 2.1.5. Invencion del microscopio del efecto tunel
- 2.1.6. Avances en ciencias interfaciales y de coloides

### 2.2. Marco teórico

- 2.2.1. Mecanizado sin arranque de viruta
- 2.2.2. Mecanizado por abrasión
- 2.2.3. Mecanizado por arranque de viruta
- 2.2.4. Movimientos de corte
- 2.2.5. Mecanizado manual
- 2.2.6. Mecanizado con máquina-herramienta

### 2.3. MICROMECHANIZADO EN LATINOAMERICA Y COLOMBIA

- 2.3.1. Contribuciones regionales al desarrollo de la Nanotecnología
- 2.3.2. Investigadores Destacados
- 2.3.3. Por qué el futuro no nos necesita
- 2.3.4. Reporte de la Royal Society sobre las implicaciones de la nanotecnología
- 2.3.5. Aplicaciones comerciales iniciales

## 3. RESULTADOS

### 3.1. MICROMAQUINADO SUPERFICIE (SURFACE MICROMACHINING) AUTORES: C LINDER, L PARATTE, M-A GRETILLAT, V P JAECKLIN AND N F DE ROOIJ

#### 3.1.1. INTRODUCCIÓN

**3.1.2. Las técnicas para microestructuras superficiales**

**3.1.3. Tecnología de capa de sacrificio**

**3.1.4. Micromecanizado en superficie**

**3.1.5. Grabado por plasma isotrópico**

**3.1.6. Aplicaciones**

**3.1.7. Motores paso a paso electrostáticos integrados**

**3.1.8. Interruptores electromecánicos**

**3.1.9. Resonadores con excitación y detección integrada**

## **3.2 MICROMAQUINADO SUPERFICIE (SURFACE MICROMACHINING).AUTOR: ROBERT BOSCH GMBH**

**3.2.1. Micromaquinado base de silicio policristalino**

**3.2.2. Capa de sacrificio**

**3.2.3. Superficie micromaquinado aplicación-acelerómetro**

**3.2.4. Conceptos de integración**

**3.2.5. Giroscopios**

**3.2.6. Propiedades importantes de metales en aplicaciones mems**

**3.2.7. Coeficiente de expansión térmica**

**3.2.8. Tecnología**

**3.2.9. Campos de aplicación**

## **3.3. MICROFRESADO DE POLIMEROS BIOCOMPATIBLES (POLYMER MICRO-MILLING BIOCOMPATIBLES).autor: CHRISTINA LEINENBACH HANNU KATTELUS ROY KNECHTEL**

**3.3.1. Resumen**

**3.3.2. Introducción**

**3.3.3. Clasificación general de las técnicas de microfabricación**

**3.3.4. Micromecanizado (microfresado)**

**3.3.5. Metodología**

**3.3.6. Proceso de microfresado**

**3.3.7. Ajuste de parámetros de corte**

**3.3.8. Resultados**

**3.3.9. Microherramientas**

**4. ANALISIS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

**REFERENCIAS**

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pag</b>
Figura 1: Mandrinado con diamante.....	32
Figura 2: Microinyeccion.....	22
Figura 3: Micromecanizado.....	23
Figura 4: Matrix.....	24
Figura 5: Proyecto microfactoria.....	25
Figura 6: Productos microfabricados.....	27
Figura 7: Haz de polisilicio de sujeción .....	36
Figura 8: Pasos de procesamiento clave de sacrificio .....	36
Figura 9: Un extremo de un haz de polisilicio .....	37
Figura 10: Vista superior microestructura .....	39
Figura 11: LPCVD resistencias de polisilicio para la unidad y la detección.....	39
Figura 12: SEM de las microestructuras de aluminio exentas realizadas.....	40.
Figura 13: SEM de un accionador de peine.....	42
Figura 14: Desplazamiento frente diagrama de voltaje.....	42
Figura 15: EM muestra una vista general de un micromanipulador xy. ....	43
Figura 16: Motores paso a paso electrostáticas integrados .....	44
Figura 17: Peine del motor: (a) la sección transversal, (b) vista desde arriba)..	45
Figura 18: Sección transversal de un micropuente polisilicio capacitiva.....	47
Figura 19: SEMS de los dos estados de conmutación.....	47
Figura 20: Un resonador polisilicio.....	49
Figura 21: Sección transversal esquemática de la secuencia de capas,.....	51
Figura 22: Cuadro SEM de la estructura de silicio fabricado por DRIE.....	52

Figura 23: Cuadro SEM de silicio policristalino.....	53
Figura 24: Sección transversal SEM de vigas Autosoportados.....	55
Figura 25: Acelerómetro de Robert Bosch GmbH:.....	55
Figura 26: Properties of polycrystalline films.....	58
Figura 27: Gradiente de tensión vertical provoca haz deslaminada doblar.....	59
Figura 28: Películas de molibdeno policristalino muestran 300-400 MPa .....	60
Figura 29: Relación de configuración oblea SOI a la superficie estructura .....	61
Figura 30: Micromecanizado en superficie usando obleas SOI.....	64
Figura 31: Segmento circular.....	69
Figura 32: a.Perforacion del cabello humano b. Comparacion con regla.....	69
Figura 33: Ranuras generadas con diferentes avances.....	70
Figura 34: fractura subita en fresa.....	71
Figura 35: Adhesion de pmma en fresa de tugsteno.....	71

## **1. PRELIMINARES**

### **1. 1 TÍTULO**

PROCESOS DE MICROMECHANIZADO MECANICOS

#### **1.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

A nivel mundial a mediados de la década de los 50 se han realizado investigaciones y avances en micro tecnología de las tres mayores economías del mundo (U.S.A., Europa y Japón) las cuales reconocieron la importancia de desarrollar e investigar en tecnologías de micro fabricación para el crecimiento de un futuro sistema industrial.

En Colombia hay esfuerzos incipientes liderados por la U del Norte en investigación de micro mecanizado de polímeros biocompatibles de grado médico para el desarrollo de microcomponentes oftalmológicos y un proyecto de investigación realizado por la doctora Silvia Patricia Ceballos sobre parámetros de proceso de micro mecanizado.

#### **1.1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cuáles son los desarrollos más recientes en el campo de la micro manufactura en procesos mecánicos y cuáles pueden ser aplicados en la industria colombiana?

### **1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar el proceso de micro fresado mecánico.

#### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Establecer de forma general los fundamentos de todos los procesos de micro mecanizado mecánicos
- b) Profundizar en el estudio del proceso de micro fresado.
- c) Establecer la aplicabilidad del proceso en la industria colombiana
- d) Permitir conocer que avances e investigaciones se han tenido en Colombia y quienes las están llevando a cabo.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1 JUSTIFICACIÓN**

La investigación se escogió, ya que es conveniente indagar sobre las nuevas tendencias de fabricación que están comenzando a liderar los mercados de Estados Unidos, Japón y Europa quienes presentan un avance bastante significativo en el desarrollo de micro fabricación de componentes, puesto que la sociedad actual exige dicha demanda para la extensión de la manufactura, la cual conlleva a mejoras como:

- Reducción de consumo de energía y materiales de fabricación.
- Ligereza y facilidad en su transporte.
- Dispositivos de mayor sensibilidad y portabilidad.
- Aplicaciones menos invasivas.
- Mejor relación costo / funcionalidad.

Se puede llegar a involucrar a la ECCI como uno de los pioneros en formación investigativa de micro fabricación en Colombia, inicialmente en el área de Ingeniería Mecánica, debido al constante cambio y a las nuevas iniciativas industriales que han surgido a nivel mundial.

### **1.3.2 DELIMITACIÓN**

No solo los objetos se están haciendo más pequeños, hay a su alrededor muchos útiles necesarios para poderles añadir más potencia y funcionalidad. Componentes en miniatura con una amplia variedad de aplicaciones en sectores como el aeroespacial, automoción, biomedicina, electrónica, tecnología de información, óptica, telecomunicaciones...

El desarrollo de todos estos productos está incrementando la demanda para fabricar componentes y productos a microescala. Para mantener un bajo costo, la gran mayoría de estos microcomponentes se fabrican usando moldes. Esta tendencia sitúa a los moldistas ante un nuevo desafío, moverse hacia el uso de materiales de nueva generación, tratamientos especiales, fresados con herramientas de un diámetro inferior a 1mm y garantizando una precisión por debajo de una micra.

## **1.4. DISEÑO METODOLOGICO**

1. Estudio teórico sobre MEMS en el seminario Micro y nano fabricación
2. Selección tema específico
3. Investigación de artículos sugeridos por el tutor.
4. búsqueda bases de datos
5. selección de artículos a traducir
6. organización del trabajo
7. conclusiones
8. entrega

## **2. MARCO REFERENCIAL**

### **2.1. MARCO HISTORICO**

A mediados del siglo pasado, se realizaron importantes avances en micro tecnologías. El más significativo fue sin duda la invención del transistor, reconocido con el Premio Nobel de Física a Bardeen, Brattain y Shockley. El transistor ocasiono un impacto en el diseño de los circuitos electrónicos, reemplazando las costosas, poco fiables y energéticamente ineficientes válvulas de vacío. Los dispositivos de memoria y de lógica en venta en 1985 tenían estructuras con componentes de aproximadamente un micrón de ancho. Para 1995, momento de la aparición del Pentium, se habían alcanzado tamaños de más o menos un tercio de micrón, 350 nanómetros. Se trabaja ya en estructuras de 100 nanómetros, es decir, de un décimo de lo que se había logrado en 1985.

El mecanizado es un proceso de fabricación que comprende un conjunto de operaciones de conformación de piezas mediante la eliminación de material, ya sea por arranque de viruta o por abrasión. También en algunas zonas de América del Sur es utilizado el término maquinado aunque debido al doble sentido que puede tener este término (urdir o tramar algo) convendría usar el primero.

Se realiza a partir de productos semielaborados como lingotes, tochos u otras piezas previamente conformadas por otros procesos como moldeo o forja. Los productos obtenidos pueden ser finales o semielaborados que requieran operaciones posteriores.

*(Mecanizado por electroerosión Revista Metal-univers 6-4-2002 María del Mar Espinosa. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales UNED Madrid. 14-11-2007.)*

La historia de la nanotecnología trata del desarrollo y avances a lo largo del tiempo de los conceptos y trabajos experimentales que caen en la amplia categoría de

nanotecnología. A su vez incluye la discusión de su impacto en distintos ámbitos (sociales, económicos, educativos y tecnológicos) derivados de su desarrollo. Aunque la nanotecnología es relativamente reciente como tema de investigación científica, el desarrollo de varios conceptos centrales ha ocurrido a través de un periodo de tiempo largo. El surgimiento de la nanotecnología en la década de 1980 fue causado por la convergencia de varios avances e invenciones experimentales tales como el microscopio de efecto túnel en 1981 y el descubrimiento del fullereno en 1985, así como la formulación y popularización del marco conceptual sobre las metas de la nanotecnología que iniciaron con la publicación en 1986 del libro Motores de la Creación: La era de la Nanotecnología. El campo de la nanotecnología es de creciente interés público y ha sido controversial, en particular a inicios del siglo XXI, cuando debates entre prominentes personajes del área tuvieron lugar, en particular sobre sus implicaciones potenciales, así como la factibilidad de las predicciones hechas por los partidarios de la nanotecnología molecular. En la primera década del siglo XXI, hemos presenciado los inicios de la comercialización de la nanotecnología, aunque en la mayoría de los casos limitada a aplicaciones de gran volumen más que en las aplicaciones disruptivas y revolucionarias que se han propuesto para el campo. (Millán Gómez, S. (2007). <http://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>)

### **2.1.1. Orígenes Conceptuales**

El físico estadounidense Richard Feynman impartió el 29 de diciembre de 1959 la conferencia titulada, Hay mucho espacio en el fondo en un congreso de la Sociedad Americana de Física en el Instituto de Tecnología de California (Caltech); este discurso es con frecuencia señalado como fuente de inspiración para el campo de la nanotecnología. Feynman describió un proceso por medio del cual podríamos desarrollar la habilidad para manipular átomos y moléculas individuales, empleando herramientas de precisión para construir y operar a su vez otro conjunto de herramientas de menores proporciones, y así sucesivamente hasta alcanzar la nanoescala. En el proceso de hacerlo, Feynman observó que surgirían problemas asociados con el escalamiento de fuerzas físicas: la gravedad se haría menos importante y significativa, mientras que fuerzas de tensión superficial o fuerzas de Van der Waals adquirirían gran importancia. Richard Feynman dio una conferencia en 1959 que muchos años después inspiraría el desarrollo de la nanotecnología.

Después de la muerte de Feynman, académicos estudiando el desarrollo histórico de la nanotecnología concluyeron que su papel catalizador en la investigación en nanotecnología fue más bien limitado, basado en comentarios de muchas de las personas activas en el naciente campo entre 1980 y 1990. Chris Toumey, un antropólogo cultural de la Universidad de Carolina del Sur, encontró que la versión impresa de la conferencia de Feynman tuvo poca influencia en los siguientes veinte años después de su publicación, medido a través del número de citas en la literatura científica y que no tuvo influencia mayor en las décadas posteriores a la invención del microscopio de efecto túnel, en 1981. Por consecuencia, el interés en la conferencia Hay mucho espacio en el fondo en la literatura científica se han

incrementado significativamente a partir de inicios de la década de 1990. Esto puede ser una consecuencia de que el término “nanotecnología” se fue popularizando poco antes de esta fecha debido al uso del mismo en el libro de 1986 de K. Eric Drexler, *Motores de la Creación*, el cual incorporó el concepto de Feynman de mil millones de pequeñas fábricas e incorporó la idea que podrían construir más copias de sí mismas vía un control automatizado, sin la participación de un operador humano; en la portada de un artículo titulado “Nanotecnología”, publicado poco después ese año en la revista de orientación científica de amplia circulación, OMNI. El análisis de Toumey incluyó comentarios de distinguidos miembros de la comunidad científica en nanotecnología que dijeron que Hay mucho espacio en el fondo no influenció sus trabajos iniciales, y que de hecho la mayoría de ellos ni siquiera lo habían leído a la fecha.

Estos y otros desarrollos dieron origen al redescubrimiento histórico del discurso de Feynman “Mucho espacio en el fondo”, que dio en diciembre de 1959, a lo que además se sumó el carisma y genialidad de Richard Feynman. La importancia de Feynman como un ganador del Premio Nobel y como una figura icónica de la ciencia del siglo XX seguramente ayudó a los defensores de la nanotecnología y proveyó de un invaluable vínculo intelectual con el pasado.

(Millán Gómez, S. (2007). <http://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>.)

### **2.1.2.K. Eric Drexler**

K. Eric Drexler desarrolló y popularizó el concepto de nanotecnología e inició el campo de la nanotecnología molecular.

En 1980, Drexler descubrió el provocador discurso de Feynman de 1959 Hay mucho espacio en el fondo mientras preparaba su primer artículo científico en el tema “Molecular Engineering: An approach to the development of general capabilities for molecular manipulation”, publicado en la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences* in 1981. El término "nanotecnología" (el cuál es idéntico al nano-tecnología) de Taniguchi, fue aplicado de manera independiente por Drexler en su libro de 1986 *Motores de la Creación: la próxima Era de la Nanotecnología*, en el que proponía la idea de un “ensamblador” en nanoescala que sería capaz de construir una copia de sí mismo, así como otros objetos de complejidad diversa. También propuso por vez primera el término “plaga gris” para describir lo que podría ocurrir si una máquina hipotética auto-replicante, capaz de operar independientemente, fuera construida y liberada en el ambiente. La visión particular sobre la nanotecnología de Drexler se conoce como Nanotecnología Molecular o manufactura molecular. En la década de 1980 la idea de que la nanotecnología era un área dominada por el determinismo, más que por la estocástica, basada en el manejo de átomos y moléculas individuales, fue conceptualmente explorada a profundidad por K. Eric Drexler, quien promovió la importancia tecnológica que los fenómenos y dispositivos en la nano-escala podrían tener a través de conferencias y un par de libros muy populares. En su disertación doctoral realizada en 1991 en el MIT Media Lab, donde obtuvo el

primer grado doctoral en el área de Nanotecnología Molecular, Molecular Machinery and Manufacturing with Applications to Computation,<sup>7</sup> y que se publicó con el título Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation, que recibió el premio de la Association of American Publishers al Mejor Libro de Ciencias Computacionales de 1992. Drexler fundó el Foresight Institute en 1986 con la misión de Prepararnos para la nanotecnología. Drexler ya no es más un miembro del Instituto Foresight

(Gribbin, J., & Gribbin, M. (1997).

### **2.1.3. Norio Taniguchi**

El científico japonés Norio Taniguchi de la Universidad de Ciencia de Tokio empleó por vez primera el término “nano-tecnología” en una conferencia en 1974, para describir los procesos de producción de depósitos de capa delgada y de devastado por rayo iónico en semiconductores, con un control dimensional en el orden de nanómetros. Su definición era, “La nano-tecnología consiste principalmente en el procesado, separación, consolidación y deformación de materiales átomo por átomo, molécula por molécula.

(Hapgood, Fred (November de 1986). «"Nanotechnology" / Tinytech)

### **2.1.4. Avances experimentales**

La nanotecnología y la nanociencia tuvieron un notable empuje a inicios de la década de 1980 con dos importantes desarrollos: el inicio de la ciencia de cúmulos (clusters) y la invención del microscopio de efecto túnel (STM, por sus siglas en inglés). Estos desarrollos fueron seguidos por el descubrimiento de los fullerenos en 1985 y la caracterización e identificación estructural de los nanotubos de carbono unos cuantos años después (1991).

(Hapgood, Fred (November de 1986). «"Nanotechnology" / Tinytech)

### **2.1.5. Invención del Microscopio de Efecto Túnel**

El microscopio de efecto túnel, un instrumento para “visualizar” superficies a nivel atómico, fue desarrollado en 1981 por Gerd Binnig y Heinrich Rohrer en el Laboratorio de Investigación de IBM Zurich, razón por la cual fueron reconocidos con el Premio Nobel de Física en 1986. Binnig, Calvin Quate y Christoph Gerber inventaron el primer microscopio de fuerza atómica en 1986. El primer microscopio de fuerza atómica disponible comercialmente fue introducido al mercado en 1989.

(.org/wiki/Microscopio\_de\_fuerza\_at%C3%B3mica. (s.f.).

### **2.1.6 Avances en ciencias interfaciales y de coloides**

Las ciencias interfaciales y de coloides han existido por casi un siglo antes de que empezaran a asociarlas a la nanotecnología. Las primeras observaciones y mediciones de tamaño de nanopartículas se realizaron durante la primera década del siglo XX por Richard Adolf Zsigmondy, quien recibió en 1925 el Premio Nobel en Química; él hizo un estudio detallado de soles de oro y de otros nanomateriales con tamaños de hasta 10 nm usando un ultramicroscopio con el que fue capaz de visualizar partículas mucho menores que la longitud de onda de la luz. Zsigmondy fue también el primero en emplear el término “nanómetro” de forma explícita para caracterizar el tamaño de partícula. En la década de 1920, Irving Langmuir, ganador del Premio Nobel de Física de 1932 y Katharine B. Blodgett introdujeron el concepto de monocapa, una capa de un material de apenas una molécula de grosor. A inicios de la década de 1950, Derjaguin y Abrikosova llevaron a cabo las primeras mediciones de fuerzas superficiales. En 1974 el proceso para realizar depósitos de capa delgada superficiales a nivel atómico fue desarrollado y patentado por Tuomo Suntola y colegas en Finlandia.

En otro desarrollo, la síntesis y propiedades de nanocristales semiconductores fue estudiada. Esto ha llevado a un gran número, que se sigue incrementando, de nanopartículas de puntos cuánticos de semiconductores. Royal Society and (Royal Academy of Engineering. July 2004. (s.f.).

Los fullerenos fueron descubiertos en 1985 por Harry Kroto, Richard Smalley, y Robert Curl, quienes compartieron el Premio Nobel de Química en 1996. Las investigaciones de Smalley en fisicoquímica, se centraban en el estudio del proceso de formación de cúmulos de elementos inorgánicos y semiconductores, empleando haces pulsados moleculares y espectroscopía de masas de tiempo de vuelo. Debido a que su amplia experiencia en el campo, Robert Curl le presentó a Harold (a.k.a. Harry) Kroto, para iniciar un proyecto de colaboración sobre el estudio de los constituyentes químicos de las nubes de polvo en el espacio sideral. Estas nubes moleculares están enriquecidas con carbono, producto de la explosión de estrellas viejas, como es el caso de R Coronae Borealis. Como resultado de esta colaboración, descubrieron la molécula de C<sub>60</sub> y a la familia de moléculas llamada fullerenos, la tercera forma alotrópica del carbono. Descubrimientos posteriores incluyeron los fullerenos endoédricos, y la extensa familia de fullerenos de alto orden.

El descubrimiento de los nanotubos de carbono se atribuye tradicionalmente a Sumio Iijima quien trabajaba en la compañía japonesa NEC en 1991, aunque los nanotubos de carbono ya habían sido producidos y su observación reportada bajo distintas condiciones antes de 1991. El descubrimiento de Iijima de los nanotubos de carbono multicapa en el material insoluble producido por el proceso de descarga de arco de electrodos de grafito en 1991 y la predicción independiente por Mintmire, Dunlap, y White acerca de que si los nanotubos de carbono de capa simple pudieran ser hechos, exhibirían interesantes propiedades electrónicas y conductivas fue la fuerza de empuje inicial que hoy se asocia a la investigación en nanotubos de carbono. La investigación sobre nanotubos se aceleró de manera notable inmediatamente después del descubrimiento

independiente accelerated greatly following the independent discoveries por Bethune en IBM y de lijima en NEC de los nanotubos de carbono de capa simple y el desarrollo de métodos específicos para producirlos añadiendo catalizadores de metales de transición a la fuente de carbono en el método de descarga de arco.

A inicios de la década de 1990 Huffman y Kraetschmer, de la Universidad de Arizona, descubrieron como sintetizar y purificar grandes cantidades de fullerenos. Esto dio paso a la oportunidad para caracterizarlos y funcionalizarlos a cientos de investigadores en laboratorios alrededor del mundo. Poco después, fue descubierto que moléculas de C60 dopadas con rubidio (Rb) eran superconductores a temperaturas medianas ( $T_c = 32 \text{ K}$ ). Durante un congreso de la Materials Research Society en 1992, el Dr. T. Ebbesen (NEC) describió a una audiencia incrédula el descubrimiento y caracterización de nanotubos de carbono. Esta charla motivó a los asistentes a regresar a sus laboratorios para reproducir y avanzar en esos descubrimientos nuevos. Usando sistemas similares a aquellos empleados por Huffman y Kratschmere, cientos de investigadores han hecho notables contribuciones y avances en el campo de la nanotecnología basada en nanotubos de carbono.

(Finnish Micro & Nano Technology Network. 18 September 2007)

## **2.2. MARCO TEORICO**

### **2.2.1. Mecanizado sin arranque de viruta**

Todas las piezas metálicas, excepto las fundidas, en algún momento de su fabricación han estado sometidas a una operación al menos de conformado de metales, y con frecuencia se necesitan varias operaciones diferentes. Así, el acero que se utiliza en la fabricación de tubos para la construcción de sillas se forja, se lamina en caliente varias veces, se lamina en frío hasta transformarlo en chapa, se corta en tiras, se le da en frío la forma tubular, se suelda, se maquina en soldadura y, a veces, también se estira en frío. Esto, aparte de todos los tratamientos subsidiarios. La teoría del conformado de metales puede ayudar a determinar la forma de utilizar las máquinas de la manera más eficiente posible,

(Conformado-materiales.shtml. (24 de 06 de 2010))

### **2.2.2 Mecanizado por abrasión**

La abrasión es la eliminación de material desgastando la pieza en pequeñas cantidades, desprendiendo partículas de material, en muchos casos, incandescente. Este proceso se realiza por la acción de una herramienta característica, la muela abrasiva. En este caso, la herramienta (muela) está formada por partículas de material abrasivo muy duro unidas por un aglutinante. Esta forma de eliminar material rayando la superficie de la pieza, necesita menos fuerza para eliminar material apretando la herramienta contra la pieza, por lo que permite que se puedan dar pasadas de mucho menor espesor. La precisión que

se puede obtener por abrasión y el acabado superficial puede ser muy buenos pero los tiempos productivos son muy prolongados. (mecmarin.com/proceso\_mecanizacion.html. (2010).

### **2.2.3 Mecanizado por arranque de viruta**

El material es arrancado o cortado con una herramienta dando lugar a un desperdicio o viruta. La herramienta consta, generalmente, de uno o varios filos o cuchillas que separan la viruta de la pieza en cada pasada. En el mecanizado por arranque de viruta se dan procesos de desbaste (eliminación de mucho material con poca precisión; proceso intermedio) y de acabado (eliminación de poco material con mucha precisión; proceso final cuyo objetivo es el de dar el acabado superficial que se requiera a las distintas superficies de la pieza). Sin embargo, tiene una limitación física: no se puede eliminar todo el material que se quiera porque llega un momento en que el esfuerzo para apretar la herramienta contra la pieza es tan liviano que la herramienta no penetra y no se llega a extraer viruta.

(trabajos82/conformado-materiales/conformado-materiales.shtml. (24 de 06 de 2010).

### **2.2.4. Movimientos de corte**

En el proceso de mecanizado por arranque de material intervienen dos movimientos:

Movimiento principal: es el responsable de la eliminación del material.

Movimiento de avance: es el responsable del arranque continuo del material, marcando la trayectoria que debe seguir la herramienta en tal fin.

Cada uno de estos dos movimientos lo puede tener la pieza o la herramienta según el tipo de mecanizado. (trabajos82/conformado-materiales/conformado-materiales.shtml. (24 de 06 de 2010).

### **2.2.5. Mecanizado manual**

Es el realizado por una persona con herramientas exclusivamente manuales: sierra, lima, cincel, buril; en estos casos el operario maquina la pieza utilizando alguna de estas herramientas, empleando para ello su destreza y fuerza. (trabajos82/conformado-materiales/conformado-materiales.shtml. (24 de 06 de 2010).

### **2.2.6. Mecanizado con máquina-herramienta**

El mecanizado se hace mediante una máquina herramienta, manual, semiautomática o automática, pero el esfuerzo de mecanizado es realizado por un equipo mecánico, con los motores y mecanismos necesarios. Las máquinas herramientas de mecanizado clásicas son:

Taladro: La pieza es fijada sobre la mesa del taladro, la herramienta, llamada broca, realiza el movimiento de corte giratorio y de avance lineal, realizando el

mecanizado de un agujero o taladro teóricamente del mismo diámetro que la broca y de la profundidad deseada.

Limadora: esta máquina herramienta realiza el mecanizado con una cuchilla montada sobre el porta herramientas del carnero, que realiza un movimiento lineal de corte, sobre una pieza fijada la mesa, que tiene el movimiento de avance perpendicular al movimiento de corte.

Mortajadora : máquina que arranca material linealmente del interior de un agujero. El movimiento de corte lo efectúa la herramienta y el de avance la mesa donde se monta la pieza a mecanizar.

Cepilladora: de mayor tamaño que la limadora, tiene una mesa deslizante sobre la que se fija la pieza y que realiza el movimiento de corte deslizándose longitudinalmente, la cuchilla montada sobre un puente sobre la mesa se desplaza transversalmente en el movimiento de avance.

Brochadora : Máquina en la que el movimiento de corte lo realiza una herramienta brocha de múltiples filos progresivos que van arrancando material de la pieza con un movimiento lineal.

Torno: el torno es la máquina herramienta de mecanizado más difundida, éstas son en la industria las de uso más general, la pieza se fija en el plato del torno, que realiza el movimiento de corte girando sobre su eje, la cuchilla realiza el movimiento de avance eliminando el material en los sitios precisos.

Fresadora: en la fresadora el movimiento de corte lo tiene la herramienta; que se denomina fresa, girando sobre su eje, el movimiento de avance lo tiene la pieza, fijada sobre la mesa de la fresadora que realiza este movimiento. Es junto al torno la máquina herramienta más universal y versátil.

(Oscar Gonzalo, I. Q. (15 de 09 de 2010). <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/43234-Nuevas-tendencias-para-el-mecanizado.html>.)

### **2.2.7. Procesos de corte**

Los procesos de microcorte se caracterizan por la interacción mecánica de la herramienta con la pieza. Esto origina la separación del material en las zonas de interacción y el material se elimina en forma de viruta. Las tecnologías de microcorte deben cumplir que la herramienta sea de mayor dureza que la pieza y que además no sufra difusión activada térmicamente entre la herramienta y la pieza.

Las tecnologías de microcorte más habituales son el torneado con diamante, fresado con diamante, microfresado, taladrado con diamante y pulido con diamante de estructuras. El microcorte presenta la gran ventaja de que las

herramientas en estos procesos contactan con la pieza y existe una gran correlación geométrica entre las trayectorias de la herramienta y la superficie generada. El mayor inconveniente de estos procesos es el efecto de las fuerzas de mecanizado en la precisión y el límite del tamaño de mecanizado debido a las deformaciones elásticas existentes tanto en la microherramienta como en la pieza

(Oscar Gonzalo, I. Q. (15 de 09 de 2010).

<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/43234-Nuevas-tendencias-para-el-mecanizado.html>.)

### **2.2.8. Mandrinado con diamante**

En algunas aplicaciones especiales, el torneado y el fresado empleando herramientas de diamante monocristalino pueden no ser muy útiles debido a sus limitaciones geométricas y cinemáticas. Por ello, se ha desarrollado el mandrinado de contornos con diamante para la fabricación de micromoldes para óptica. Como se muestra en la figura 1

**Figura 1 mandrinado con diamante**



Fuente:Hapgood, Fred (November de 1986). «"Nanotechnology" / "Tinytech"». (s.f.).

Pulido Si la calidad superficial de moldes de alta precisión para la fabricación de elementos ópticos no es suficiente para satisfacer las crecientes demandas en lo referente a rugosidad superficial y forma, una operación posterior de pulido puede ser necesaria.

El microrectificado se aplica en la fabricación de piezas de precisión de materiales de elevada dureza; lentes para gafas, silicio, cerámicos, etc. Sus aplicaciones principales son la fabricación de vástagos, ranuras y microcavidades de dimensiones del orden de la micra.

El microrectificado tiene ciertas restricciones en cuanto a tamaño y forma de muela, limitando la calidad, geometría de micropiezas y superficies mecanizadas obtenibles. Además, la dificultad de fabricación de muelas y su preparación

(incluyendo el diamantado) también reduce de manera significativa la aplicación del microrectificado en la microfabricación a gran escala

(Hapgood, Fred (November de 1986). «"Nanotechnology" / "Tinytech"». (s.f.)

## **2.3 MICROMECHANIZADO EN LATINOAMERICA Y COLOMBIA**

### **2.3.1 Contribuciones regionales al desarrollo de la Nanotecnología**

Los Estados Unidos de América cuentan con una de las infraestructuras educativas, públicas y privadas, más importantes para el desarrollo de proyectos de formación académica de recursos humanos y realización de proyectos de investigación básica y aplicada en nanociencias y nanotecnología a nivel global. Numerosos investigadores estadounidenses destacan por sus contribuciones al d Instituciones Educativas y Centros de Investigación

Centro Internacional de Nanotecnología y Materiales Avanzados de la Universidad de Texas en San Antonio

Centro para la Ciencia y Tecnología en Nanoescala y Centro de Nanotecnología Biológica y Ambiental de la Universidad de Rice

College of Nanoscale Science and Engineering de la Universidad Estatal de Nueva York

Instituto de Nanotecnología "Alan MacMardid" de la Universidad de Texas en Dallas

Instituto Internacional de Nanotecnología y Centro de Nanofabricación y Autoensamblaje Molecular de la Universidad de Northwestern

(Desarrollo del área. National Science Foundation. Consultado el 8 November 2009.)

### **2.3.2 DESARROLLO DEL MICROMECHANIZADO EN COLOMBIA**

En barranquilla se implementara una planta piloto unica en colombia para la fabricacion de implantes oftamologicos con alta presicion y en tamaños micrometricos con este desarrollo se apunta a consolidar un centro de microfabricacion de alta tecnologia

El centro oftamologico ha realizado importantes contribuciones con esta especialidad

Gracias a la cofinanciacion de colciencias esta organización y uninorte, mediante el grupo de investigacion en materiales, procesos y diseño realizan un proyecto de I + d + i que apunta al desarrollo de una planta piloto para la fabricacion de implantes y dispositivos oftamologicos utilizando la mas alta tecnologia y cumpliendo estrictos controles de calidad

**2.3.2.1 Resultados e impacto.** Se ha adqurido un equipo de micromecanizado para fabricar piezas en cualquier tipo de material con una presicion de hasta 0,5 micras

y con tamaños micrométricos, el equipo permite la microfabricación de piezas en cualquier tipo de material desde aceros hasta los cerámicos

Se apunta a consolidar un centro de microfabricación de alta tecnología al servicio no solo de la industria biomédica si no también de otros sectores: la tecnología desarrollada tiene aplicaciones en la industria electrónica automotriz aeroespacial entre otros

Este equipo y la planta estarán al servicio de empresas que la requieran para el desarrollo y validación de nuevos proyectos

Existen muchas formas de definir un micro-componente, pero parece que se está estableciendo cierta generalización a definirlo como un producto perteneciente al ámbito de micro-fabricación cuando al menos una de sus características funcionales en una dimensión es del orden de las micras. Se indica a continuación la definición que recoge el Atlas/IVAM de Europa de qué se entiende por micro-tecnología.

**Micro-tecnología:** Tecnología para el desarrollo o fabricación de productos en el rango de las micras y cuya funcionalidad se debe precisamente a su tamaño. Estos productos combinan varios microcomponentes para facilitar su aplicación en una función específica, en la mayoría de casos estos dispositivos incluyen componentes micro-electrónicos.

Se hace importante remarcar la ubicación dimensional que ocupan estas tecnologías o estos productos, posicionándose entre el entorno macro actual ya conocido y las nano-tecnologías.

**2.3.2.2 Dimensiones típicas de la micro-tecnología.** Dentro de la categoría de microproductos se pueden incluir aquellos que incluyen tanto componentes con dimensiones globales y funcionalidades en el rango micrométrico como componentes micro-estructurados (dentro del rango de los cientos de micrómetros hasta cientos de nanómetros).

Las micro-tecnologías se definen como aquellas tecnologías que permiten obtener este tipo de productos a partir de una diversidad de materiales y procesos.

**2.3.2.3 Tecnologías de la microfabricación.** Se describen a continuación brevemente los principios básicos de cada una de estas micro-tecnologías.

**2.3.2.4 Procesos Mems** Los MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) son el resultado de la combinación de elementos mecánicos, sensores, actuadores y electrónicos en un mismo circuito integrado. La escala de todos los elementos es, por lo tanto, microscópica.

Los MEMS se pueden definir como una mejora en los procesos de fabricación que convergen en ventajas de miniaturización, uso de mínima potencia y máximo rendimiento, portabilidad, mínimo mantenimiento y fácil interconexión con sistemas múltiples.

(Universidad del norte. (s.f.). <http://www.uninorte.edu.co/documents/273106/ee3c5520-fda3-4186-8b9d-de6556418343>.)

Los procesos de micromecanizado de silicio se dividen principalmente en dos tipos:

**2.3.2.5 Micro-grabado o Micro-mecanizado en volumen (Bulk micromachining)** En este proceso se elimina material de un substrato ( oblea) de silicio, a la cual se ha transferido cierto patrón utilizando fotolitografía. En esta técnica se suele utilizar un ataque húmedo aprovechando las propiedades anisotrópicas del silicio.

**2.3.2.6 Micro-mecanizado superficial (Surface micromachining)** Esta técnica consiste en fabricar estructuras con partes móviles, a partir de una serie repetida de pasos que consisten en depositar en la superficie de una oblea diferentes capas finas, a continuación transmitir la máscara sobre las capas depositadas (fotolitografía) y un ataque químico selectivo para eliminar las capas no estructurales o de sacrífico.

Encontramos también un proceso de fabricación de micro estructuras, que permite la utilización de otros materiales (metales, polímeros...). Este es conocido con las siglas LIGA acrónimo de su nomenclatura alemana (Lithographie Galvanoformung Abformung). En este proceso se obtienen las micro-estructuras a partir de moldes creados mediante fotolitografía de rayos X seguida de metalizado, se parte de un capa de material resistente a la luz (resina), colocada encima de un substrato metálico.

**2.3.2.7 Procesos Asistidos Energéticamente** Dentro de los procesos asistidos energéticamente destacan los siguientes:

- Mecanizado por haz láser: consiste en la utilización de láseres pulsados, con gran densidad de energía que posibilitan el mecanizado de las piezas (ablación, corte, soldadura, taladrado, marcado).
- Micro-electroerosión: proceso similar al realizado industrialmente a escala macro. Las piezas se obtienen mediante fusión local del material por salto de chispas eléctricas mediante hilo o penetración.

Los procesos mecánicos de micro-fabricación corresponden a los existentes a «escala macro», aunque debido a la escala en la que se trabaja, la forma de trabajo y la problemática que se encuentra es bien distinta, por lo que se están realizando extensas labores de investigación en este campo orientadas a entender qué es lo que ocurre durante la fabricación en estos procesos a escala micrométrica. Destacan el micro-fresado, micro-taladrado y micro-torneado.

Micro mecanizado por arranque de viruta: En este tipo de procesos las herramientas están en contacto directo con la pieza y por ésta razón es posible obtener una buena correlación entre la trayectoria de mecanizado y la superficie mecanizada. Por otro lado si lo comparamos con otros métodos de fabricación empleados en microelectrónica podemos observar otras ventajas como una mayor velocidad (eliminación de procesos multi-etapa, gran variedad de materiales,...) A todo esto se le debe sumar la habilidad de fabricar formas y geometrías complejas en 2 y 3 dimensiones.

La Fabricación directa (Rapid Manufacturing) es una técnica que se fundamenta por ser capaz de fabricar piezas a partir de un fichero CAD 3D. Hoy en día ya es posible fabricar micro-piezas en polímeros y MEM por fabricación directa. Esta tecnología patentada es utilizada ya desde el año 1996 por la empresa alemana Micro TEC y se denomina RMPD® (Rapid Micro Product Development).

**2.3.2.8** Dentro de las técnicas de replicado caben destacar las siguientes: Aplicación del micromecanizado y la microinyección al sector biomédico

Estampado de precisión en caliente (hot embossing): estampado de piezas micrométricas a temperatura y presión controladas.

- Micro-conformado: consiste en la obtención de micro piezas generalmente metálicas para grandes series. Procesos similares a los existentes en «escala macro» (micro-embutición, micro-extrusión,...).
- Micro-inyección de plástico: fabricación de piezas micrométricas mediante la inyección de un material polimérico.

MIM (Metal Injection Moulding): proceso que conjuga las ventajas en relación a la libertad en el diseño de la inyección y la obtención de características mecánicas del sinterizado. Se parte de material en polvo metálico y termoplástico, el cual se inyecta, para posteriormente realizar un desbanderizado y un sinterizado para la obtención de la pieza final. Se consiguen geometrías complejas.

Como se muestra en la figura 2

microinyeccion. (s.f.). *Juan Carlos Lacal; Rosario Perona; James Feramisco (11 June 1999).*

## **Figura 2. Microinyeccion**



Fuente: microinyeccion. (s.f.). *Juan Carlos Lacal; Rosario Perona; James Feramisco (11 June 1999).*

En los últimos años el sector biomédico ha experimentado un crecimiento en cuanto al número de nuevas tecnologías que se han ido incorporando en todos sus sectores para aplicar nuevos desarrollos en el tratamiento y cura de multitud de enfermedades y patologías.

Uno de los sectores que más se ha nutrido de estas nuevas tecnologías es el sector de bio-analítica ya que está aplicando importantes desarrollos en microfluídica y ha generado la aparición de nuevos nichos de mercado.

Entre todas las nuevas tecnologías que están aportando conocimiento y nuevas aplicaciones se encuentran el micromecanizado por arranque de viruta y la microinyección de polímeros termoplásticos. El primero permite el mecanizado de geometrías complejas en el entorno de la micra sobre la gran mayoría de materiales y sustratos mientras que el segundo permite la fabricación en masa de micropiezas de alta precisión con una repetitividad y calidad inmejorables.

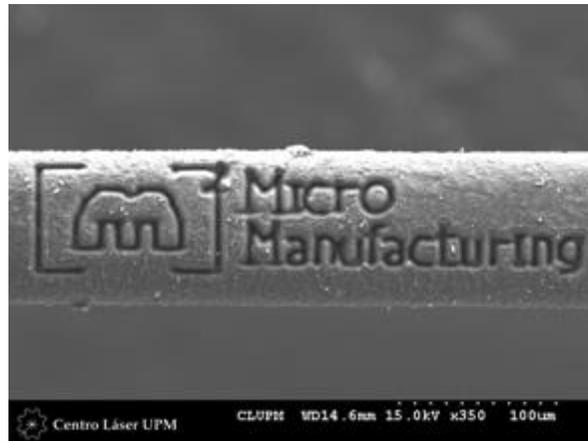
Si unificamos estas microtecnologías para aplicaciones en microfluídica se generan sinergias que permiten incrementar las aplicaciones y desarrollos en este importante campo.

En el presente artículo Prodintec pone de manifiesto las sinergias de estas dos microtecnologías cuando se combinan para la producción de microchips de electroforesis capilar (MEC) para el análisis de muestras

A modo de ejemplo (figura 3) de las capacidades de este consorcio, la imagen inferior muestra el taladrado del logotipo del proyecto Micromanufacturing en un cabello humano mediante micromecanizado laser.

(microinyeccion. (s.f.). *Juan Carlos Lacal; Rosario Perona; James Feramisco (11 June 1999).*)

**Figura 3. Micromecanizado**



*Fuente. L. N. López de Lacalle Marcaide, J. A. Sánchez Galíndez, and A. Lamikiz Menchaca, Mecanizado de alto rendimiento, Vis: Ediciones Técnicas Izaro, 2004. (s.f.).*

### **Clasificación general de las técnicas de microfabricación**

La creciente necesidad de fabricar piezas cada vez más pequeñas y con altos requerimientos de precisión ha impulsado la manufactura de partes a lo que actualmente se conoce como miniaturización. Esta tendencia se plantea en la Ley de Moore, la cual se ha extendido a procesos de remoción de material, determinando escalas de precisión cada vez más pequeñas y dimensionamiento en niveles micrométricos; además de métodos y equipos de fabricación ajustados a estas necesidades.

Aunque las técnicas de microfabricación hacen referencia a un tema de producción e ingeniería relativamente nuevo, se encuentra diversa literatura donde los expositores abordan el tema desde su perspectiva experimental y de acuerdo con su especialidad.

Es necesario el modelo CAD o un microscopio para ver las características de los moldes de inyección de Matrix Tooling, especialista en moldes miniatura.

Matrix fabrica herramental de moldes para partes usadas en la industria de dispositivos médicos. Las partes moldeadas varían desde tamaños convencionales, hasta muy pequeñas, tanto que las características no pueden ser fácilmente vistas sin asistencia. Ejemplo figura 4

*(L. N. López de Lacalle Marcaide, J. A. Sánchez Galíndez, and A. Lamikiz Menchaca, Mecanizado de alto rendimiento, Vis: Ediciones Técnicas Izaro, 2004. (s.f.).)*

**Figura 4. Matrix**



Fuente. microfabricacion. (s.f.).  
[http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies\\_es/1-4-investigacion](http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies_es/1-4-investigacion).

En términos generales, la conjunción de la iniciativa privada y el apoyo gubernamental a la investigación es un factor clave para promocionar la competitividad industrial y tecnológica de un país. En el caso de las microtecnologías, este hecho es incluso más cierto debido al riesgo profundamente arraigado en este sector y la necesidad de investigación básica.

La comparativa en relación a las microtecnologías entre las tres mayores economías del mundo, Europa, Estados Unidos y Japón, muestra considerables diferencias respecto a políticas de investigación, nivel de aplicación y penetración en el mercado.

Estados Unidos y Japón reconocieron antes que Europa la importancia de las tecnologías micro y nano como el motor para el crecimiento futuro de su sistema industrial. En el caso de las nanotecnologías en particular, los esfuerzos de los americanos y japoneses han sido significativamente más intensos, especialmente en Estados Unidos, que se encuentra liderando varios campos nuevos de aplicación.

No obstante, el énfasis actual de investigación en microfabricación en Estados Unidos está por debajo del resto del mundo, a pesar de todos los esfuerzos e inversiones anteriores. Este hecho tendrá indudablemente serias implicaciones a largo plazo, puesto que está bien reconocido por científicos e industriales que la microfabricación será una tecnología crítica para aunar el hueco entre las ciencias a nivel nanométrico con el desarrollo de productos reales. Estado actual de las políticas en microtecnología de diferentes regiones mundiales

([http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies\\_es/1-4-investigacion.](http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies_es/1-4-investigacion.))

### Figura 5. Proyecto microfactoria

#### Pre-drawn image of the microfactory



Fuente. microfactoria. (s.f.).

[http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies\\_es/1-4-investigacion/1-4-1-research-policy-in-asia.](http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies_es/1-4-investigacion/1-4-1-research-policy-in-asia)

En Japón, el Instituto para la Investigación en Física y Química (RIKEN) y el Instituto Nacional para la Ciencia y Tecnología Industrial Avanzada tienen misiones fuertemente orientadas hacia la I+D con aplicación industrial y ambos hacen un gran esfuerzo en microfabricación, con resultados de calidad. En ambos laboratorios, (vease figura 5) los programas están produciendo métodos de procesamiento complejos y altamente innovadores. Es interesante hacer notar que buena parte del equipamiento ha sido desarrollado para la obtención de dispositivos sofisticados de gran precisión y bajo volumen de producción, que requieren de inversiones importantes, entre cien mil y un millón de euros.

Las compañías con fuerza en sectores tradicionales de fabricación, como por ejemplo FANUC (controles numéricos), Matsushita Electric (productos de consumo), Mitsubishi Electric (productos electrónicos, dispositivos) y Olympus (óptica) han realizado fuertes inversiones en tecnologías de microfabricación de forma continuada en los últimos quince años.

Respecto a las relaciones entre universidades y empresas en Japón, las empresas esperan de las universidades la enseñanza de los principios fundamentales y que ofrezcan una educación científica amplia, mientras ellas proporcionan formación específica específicamente orientada a las aplicaciones en los primeros años de empleo. La política del gobierno en relación a la propiedad intelectual proporciona una favorable situación para la industria respecto a las innovaciones lideradas por la universidad en proyectos realizados bajo financiación del gobierno. Las

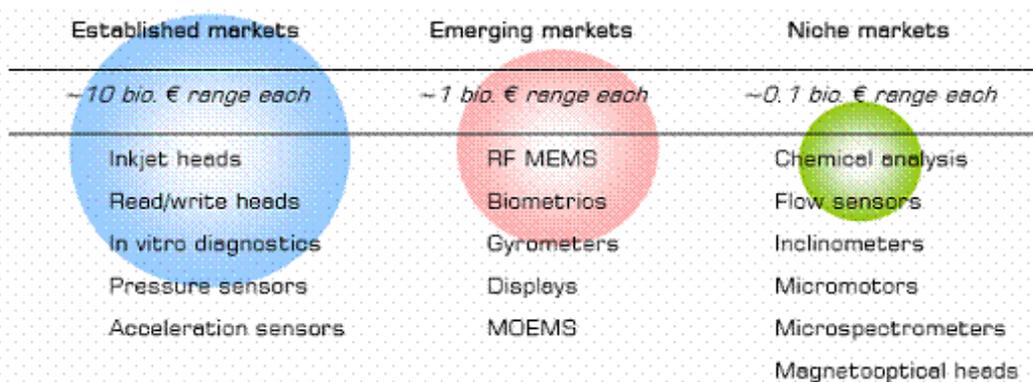
empresas pueden adquirir licencias del gobierno, que es el propietario de la propiedad intelectual en proyectos financiados, para comercializar estas innovaciones.

En Taiwán, hay también inversión institucional por parte del gobierno, pero es generalmente a través de grandes corporación y enfocado hacia productos concretos. El Instituto de Investigación en Tecnología Industrial es el mayor laboratorio financiado por el gobierno y da soporte a las compañías taiwanesas de alta tecnologías, con un gran segmento dedicado a la investigación y desarrollo en microfabricación. Otra instalación del gobierno, el Instituto para la Investigación en la Industria del Metal está iniciando un programa en métodos de fabricación multiescalar micro/meso

([http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies\\_es/1-4-investigacion/1-4-1-research-policy-in-asia](http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies_es/1-4-investigacion/1-4-1-research-policy-in-asia).)

En la figura 6 se muestra el crecimiento del mercado de productos con componentes microfabricados

**Figura 6 productos microfabricados**



Fuentes. [http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies\\_es/1-4](http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies_es/1-4)

### 2.3.2 Investigadores Destacados

Richard Feynman, Instituto Tecnológico de California (fallecido)

Richard Smalley, Universidad Rice (fallecido)

Robert F. Curl, Universidad Rice

Charles Lieber, Universidad de Harvard

Paul Alivisatos, Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley

Vicky Colvin , Universidad Rice

Chad Mirkin, Universidad de Northwestern

George M. Whitesides, Universidad de Harvard

(Fraser Stoddart, Universidad de Northwestern investigadores. (s.f.). *Gribbin, John; Gribbin, Mary (1997). Richard Feynman: A Life in Science. Dutton.*

Mihail Roco de la Fundación Nacional para la Ciencia estadounidense proponiendo de manera oficial la Iniciativa Nacional en Nanotecnología a la Oficina Ejecutiva del Presidente de los Estados Unidos de América en la Casa Blanca, personaje clave en su desarrollo inicial.

La Iniciativa Nacional en Nanotecnología (INN) es un programa federal de investigación y desarrollo del gobierno de los Estados Unidos de América. “La INN es el punto central de comunicación, cooperación y colaboración para todas las agencias federales involucradas en investigación en nanotecnología, poniendo juntas la experiencia necesaria para avanzar en este campo amplio y complejo. Sus metas son desarrollar un programa de investigación y desarrollo en nanotecnología de clase mundial, fomentar la transferencia de nuevas tecnologías en productos comerciales de beneficio público, desarrollar y mantener recursos educativos, una fuerza de trabajo especializada y crear una infraestructura y herramientas de apoyo para avanzar en el área, así como soportar el desarrollo responsable de la misma. La iniciativa fue presentada por Mihail Roco, quien propuso la Iniciativa Nacional en Nanotecnología a la Oficina de Políticas de Ciencia y Tecnología de Estados Unidos de América durante la administración de Bill Clinton en 1999, y fue el arquitecto clave en su desarrollo y creación. Actualmente es asesor principal de Nanotecnología en la Fundación Nacional para la Ciencia estadounidense, así como consejero fundador del Subcomité de Ciencia, Ingeniería y Tecnología en Nanoescala del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

El presidente estadounidense Bill Clinton impulsó el desarrollo de la nanotecnología. En un discurso impartido el 21 de enero del 2000 en el Instituto de

Tecnología de California, Clinton dijo, "Algunas de nuestras metas pueden llegar a alcanzarse en veinte o más años, pero es precisamente por ello que es importante que el gobierno federal participe." El prestigio de Feynman y sus conceptos de fabricación precisa a nivel atómico, jugaron un papel central en asegurar el financiamiento para la investigación en nanotecnología, como lo mencionó el propio presidente Bill Clinton en su discurso:

Mi presupuesto apoyará una nueva Iniciativa Nacional en Nanotecnología, con más de 500 millones de dólares. El Instituto de Tecnología de California no es ajeno a la idea de la nanotecnología la habilidad para manipular la materia a una escala atómica y molecular. Hace más de 40 años, Richard Feynman se preguntó, "¿Qué ocurriría si pudiéramos acomodar los átomos uno por uno, de la forma en que nosotros decidamos?"

El presidente estadounidense George W. Bush incrementó aún más el financiamiento para nanotecnología. El 3 de diciembre de 2003, Bush aprobó el Acta de Investigación y Desarrollo en Nanotecnología del Siglo XXI la cual autorizó inversiones para las cinco agencias que participan en ésta por más de 3,630 millones de dólares durante los cuatro años siguientes.

Aunque el inicio de la nanotecnología y la nanociencia en México puede relacionarse con los trabajos pioneros en microscopía electrónica de transmisión realizados en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM en la década de 1960, podemos afirmar que el primer esfuerzo estructurado e importante en esta área inició a finales de la década de 1990 con la instalación del primer Laboratorio de Nanotecnología de Carbono en 1999 en el Departamento de Física Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto de Física de la UNAM en Juriquilla, Querétaro, encabezado por el destacado nanotecnólogo mexicano, el físico Dr. Humberto Terrones Maldonado. Posteriormente, junto con el físico José Luis Morán, participan en la creación del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica en la ciudad de San Luis Potosí, sitio en donde crearon el primer programa de posgrado especializado en Nanociencia y Nanotecnología en América Latina (Maestría y Doctorado en Nanociencia y Nanotecnología). Humberto Terrones Maldonado junto con su hermano el Dr. Mauricio Terrones Maldonado atraen al IPICYT a un grupo importante de investigadores en el área de Nanociencia y Nanotecnología entre los años de 2001 y 2009, integrando el entonces llamado "Grupo de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología" que en su momento fue considerado uno de los 10 grupos de investigación en el área más productivos e influyentes en el mundo. Como parte de las aportaciones de este grupo de investigación se creó el Laboratorio Nacional de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología (LINAN) en el IPICYT. Este grupo se desintegró en diciembre de 2009 con la salida del IPICYT de los doctores Mauricio y Humberto Terrones. Paralelo a este esfuerzo, otros grupos fueron formándose y consolidándose en el país. En la UNAM y en el Instituto de Investigaciones Nucleares, el grupo del Dr. Miguel José Yacamán fortaleció sus capacidades para caracterización de materiales nanoestructurados mediante microscopía electrónica de transmisión de alta resolución y desarrolló métodos químicos para la

preparación de nanopartículas metálicas y bimetálicas. En octubre de 1994, luego de los esfuerzos de varios investigadores de la UNAM y con apoyo del CONACYT se funda el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) en la ciudad de Chihuahua, México. En 2006 se creó el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (NanoteCh) en el CIMAV. En abril de 2008 se creó la Unidad del CIMAV en el Parque de Investigación e Innovación Tecnológica en Monterrey, en donde también se realizan trabajos de investigación en nanociencias y nanotecnología. artículo. (s.f.). *Artículos de S. Herrera (p. 16) y M. Modzelewski (p. 8), en Small.*

### **2.3.3. "Por qué el futuro no nos necesita"**

"Por qué el futuro no nos necesita" es un artículo escrito por Bill Joy, en ese entonces científico en jefe en Sun Microsystems, en el número de abril de 2000 de la revista Wired. En el artículo, él argumenta que "Nuestras tecnologías más poderosas del siglo XXI: robótica, ingeniería genética, y nanotecnología, amenazaban con poner a la raza humana en calidad de especie amenazada." Joy argumenta que el desarrollo de estas tecnologías genera un riesgo para la humanidad mucho mayor que el de cualquier otra tecnología en el pasado. En específico, él se enfoca en la genética, la nanotecnología y la robótica. Él dice que las tecnologías de destrucción del siglo XX, tales como la bomba nuclear, estaban limitadas a gobiernos con enorme capacidad política y económica, debido a su complejidad y costo, así como por la dificultad para adquirir los materiales necesarios. Él expresa también su preocupación por el incremento en el poder de cómputo. Su preocupación es que las computadoras, en algún momento, se harán más inteligentes que nosotros, llevando a una distopía en donde una pudiera ocurrir una rebelión cibernética. Él cita al Unabomber al respecto. Después de la publicación del artículo, Bill Joy sugirió que era necesario asesorar a los desarrolladores de las tecnologías para minimizar los peligros implícitos, así como que los científicos deberían negarse a trabajar en tecnologías que pudieran tener potencial impacto dañino. En un artículo del Anuario 2001 de Ciencia y Tecnología de la Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia (AAAS por sus siglas en inglés), titulado A Response to Bill Joy and the Doom-and-Gloom Technofuturists, Bill Joy fue criticado por su visión pesimista y por no considerar los factores sociales en su predicción. Ray Kurzweil, en su libro *The Singularity Is Near*, cuestionó la regulación de tecnologías potencialmente peligrosas, pidiendo que "¿Acaso deberíamos decirle a millones de personas afectadas por el cáncer y otras enfermedades devastadoras que vamos a cancelar el desarrollo de todos los tratamientos de bioingeniería debido al riesgo potencial de que estas mismas tecnologías puedan, algún día, ser usadas para propósitos malignos?".

Richard Smalley, co-descubridor de los fullerenos, se vio involucrado en un debate público con Eric Drexler acerca de la viabilidad del ensamblador molecular.

Richard Smalley, mejor conocido como el co-descubridor de las moléculas con forma de balón de fútbol, los "fullerenos" y un ferviente defensor de la nanotecnología y sus muchas aplicaciones, era un crítico severo de la idea del ensamblador molecular, que defendía Eric Drexler. En 2001 él explicó una serie de

problemas científicos de éstos atacando la idea de los ensambladores universales en un artículo publicado en 2001 en la revista Scientific American, lo que generó una respuesta poco más tarde ese mismo año de parte de Drexler y sus colegas, y eventualmente a un intercambio de cartas abiertas en 2003.

Smalley criticó el trabajo de Drexler en nanotecnología como demasiado ingenuo, argumentando que la química es demasiado complicada, las reacciones difíciles de controlar y que por tanto un ensamblador universal era un objeto ficticio. Smalley creía que tales ensambladores no podían existir físicamente y por tanto señaló una serie de impedimentos científicos a éstos. Sus dos principales objeciones las nombró como “el problema de los dedos gruesos” y “el problema de los dedos pegajosos”, argumentaban contra la capacidad de los ensambladores moleculares para ser capaces de seleccionar con precisión y ubicar átomos individuales. El también creía que las especulaciones de Drexler sobre los peligros apocalípticos de los ensambladores moleculares (la plaga gris) amenazaban el apoyo público al desarrollo de la nanotecnología.

Smalley primero criticó que los "dedos gruesos" hacían la manufactura molecular imposible. Luego argumentó que las nanomáquinas tendrían que parecerse a las enzimas más que a los ensambladores de Drexler y sólo podrían funcionar apropiadamente en agua. El creía que esto excluiría la posibilidad de los “ensambladores moleculares” pudieran trabajar con precisión, tomando y moviendo átomos individuales. También, Smalley comentó que prácticamente toda la química moderna involucra reacciones que ocurren en disolventes (usualmente, agua), debido a que las moléculas pequeñas del disolvente contribuyen en muchos aspectos de la reacción, tales como en la disminución de las energías de enlace en los estados de transición. Ya que prácticamente toda la química conocida requiere de disolventes, Smalley sentía que la propuesta de Drexler de usar ambientes al alto vacío no era práctica. Smalley también creía que las especulaciones de Drexler sobre los peligros apocalípticos de máquinas auto-replicas que eran similares a los "ensambladores moleculares" podían poner en riesgo la opinión y apoyo público al desarrollo de la nanotecnología. Para mediar en el debate entre Drexler y Smalley sobre los ensambladores moleculares, la revista Chemical & Engineering News publicó una serie de columnas de opinión y contraopinión consistentes en un intercambio de cartas sobre éste tema.

Drexler y sus colaboradores respondieron a estos dos señalamientos en una publicación en 2001. Drexler y sus colegas indicaron que Drexler nunca propuso un ensamblador universal capaz de hacer absolutamente de todo, sino que en vez de ello propuso un ensamblador más bien limitado a hacer una amplia variedad de cosas. Ellos desafiaron la validez de los argumentos de Smalley a las propuestas avanzadas y más específicas que realizó en Nanosystems. Drexler sostuvo que los argumentos de Smalley eran huecos y que, en el caso de las enzimas, el Prof. Klibanov había escrito en 1994, "...el uso de una enzima en un disolvente orgánico elimina varios obstáculos... Drexler también se refirió a ello en Nanosystems mostrando matemáticamente que un catalizador bien diseñado puede contemplar compensar los efectos de un solvente y que puede, fundamentalmente, hacerse

más eficiente que lo que podría ser una reacción que requiriera solventes. Drexler tuvo dificultad en conseguir una respuesta de Smalley, pero en diciembre de 2003, Chemical & Engineering News publicó la cuarta parte del debate.

Ray Kurzweil ocupó cuatro páginas en su libro 'The Singularity Is Near' para demostrar que los argumentos de Richard Smalley no eran válidos, y para discutirlos punto por punto. Kurzweil terminó diciendo que la visión de Drexler era muy práctica.

(artículo1. (s.f.). [http://www.oocities.org/es/loitaluddita/mencer/bill\\_joy.htm](http://www.oocities.org/es/loitaluddita/mencer/bill_joy.htm).)

#### **2.3.4 Reporte de la Royal Society sobre las implicaciones de la nanotecnología**

La Royal Society y la Royal Academy of Engineering de Inglaterra, publicó en 2004 un reporte sobre las implicaciones de la nanociencia y la nanotecnología inspirado por la preocupación del Príncipe Carlos sobre la nanotecnología, incluyendo la manufactura molecular. Sin embargo, el reporte no dedicó mucho espacio a la manufactura molecular. De hecho, el nombre de "Drexler" aparece solo una vez en el texto del reporte (pasajeramente) y las palabras "manufactura molecular" o "nanotecnología molecular" no aparecen en ninguna parte. El reporte trata sobre los riesgos variados de las tecnologías en la nanoescala, tales como la toxicología de nanopartículas. También provee de una visión general sobre varios campos de la nanoescala. El reporte contiene un anexo (apéndice) sobre la plaga gris, la cual cita una variación debilitada de los argumentos de Richard Smalley en contra de la manufactura molecular. El reporte concluye que no hay evidencia de que nanomáquinas autónomas, auto replicantes puedan ser desarrolladas en el futuro próximo, y sugiere que las regulaciones deban estar más enfocadas con temas relacionados a la nano toxicología.

(nanotecnología . (s.f.). *Center for Responsible Nanotechnology*. 31 July 2004.)

#### **2.3.5. Aplicaciones comerciales iniciales**

El inicio de la década del 2000 fue testigo del comienzo del uso de la nanotecnología en productos comerciales, aunque la mayoría de las aplicaciones han estado limitadas al uso en grande escala de nanomateriales pasivos. Ejemplos incluyen el uso de nanopartículas de dióxido de titanio y óxido de zinc en bloqueadores solares, cosméticos y en algunos productos alimenticios; nanopartículas de plata en empaques de alimentos, ropa, desinfectantes y en productos de uso casero tales como la Nano-plata; nanotubos de carbono para textiles anti-manchas; y óxido de cerio en catalizadores de combustible. Alrededor de marzo del 2011, el Proyecto de Nanotecnologías Emergentes estimó que más de 1300 productos manufacturados e identificados estaban disponibles

públicamente, con los más nuevos impactando el mercado a una velocidad de 3 o 4 por semana.

La Fundación Nacional para la Ciencia estadounidense apoyó al investigador David Berube para estudiar el campo de la nanotecnología. Sus hallazgos se publicaron en la monografía "Nano-Hype: The Truth Behind the Nanotechnology Buzz". Este estudio concluyó que mucho de lo que se vende como "nanotecnología" es en realidad un producto común proveniente de la ciencia de materiales, lo que nos está llevando a una "industria de nanotecnología soportada en la venta de nanotubos, nanoalambres y sus similares", con lo que "terminará con unos cuantos proveedores vendiendo productos con un bajo margen de ganancia en gran volumen". Las aplicaciones futuras requerirán manipulaciones reales sobre el arreglo de los componentes en la nanoescala y ésto requerirá de nuevas investigaciones. Aunque algunas tecnologías se comercializan con el término 'nano', muy pocas veces están realmente relacionadas a este campo y se alejan de las metas transformadoras y ambiciosas de las propuestas de la manufactura molecular, al menos como se pensaría que fueran. De acuerdo a Berube, hay un riesgo de que una "nano burbuja" se forme, o se esté formando actualmente, por el uso común del término entre científicos y emprendedores para allegarse de fondos, sin interesarles las posibilidades transformativas de trabajos más ambiciosos y de largo alcance.

(nanotecnologia . (s.f.). *Center for Responsible Nanotechnology*. 31 July 2004.)

### **3. RESULTADOS**

Durante el Seminario de Micro, nanofabricación y Nanocomposites se seleccionó el tema de profundización y los tres artículos específicos seleccionadps para traducción y análisis, los cuales se presentan a continuación.

#### **3.1.1. Micromecanizado en superficie**

**(Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)**

#### **Resumen.**

Una visión general de las técnicas de micromecanizado de superficie donde se describen las principales aplicaciones. La tecnología de capa de sacrificio para la fabricación de estructuras de película delgada (por ejemplo, de polisilicio) bajo el grabado lateral de una capa independiente de sacrificio subyacente (por ejemplo, dióxido de silicio) se discute en detalle. Otro enfoque tecnológico utiliza la combinación de medidas estándar de procesamiento de IC con grabado de cristal de orientación dependiente de la superficie del sustrato de silicio para la construcción de microestructuras multicapa exentas. Una tercera superficie de micromecanizado se basa en la técnica de grabado de plasma isotrópico del silicio sustrato para la realización de estructuras micromecánicas en la superficie

de la oblea. La particularidad común de las estructuras micromecánicas fabricadas por ellos, tres técnicas es la viabilidad de su integración con componentes de CI en la mismo chip

El estado de la técnica de microestructuras realizadas por la tecnología de capa de sacrificio se ilustra mediante varios ejemplos, tales como actuadores de peine, micromotores, interruptores, resonadores y microcavidades.

### **3.1.1. Introducción**

Micromecanizado del silicio se ha convertido en una herramienta fundamental para la fabricación de dispositivos micromecánicos y en sensores en miniatura y actuadores generales. Micromaquinado, técnicas que incluyen en primer lugar los pasos básicos de procesamiento de la Tecnología IC, es decir la formación de película, el dopaje, la litografía y el grabado. Además, incorporan procesos especiales de grabado y de unión que permiten la escultura de microestructuras tridimensionales.

Básicamente, el micromecanizado de silicio puede subdividirse en dos categorías: a granel y micromecanizado de superficie, La primera expresión significa la realización de la micromecánica, estructuras fuera del cristal Único de silicio Por ejemplo, las membranas se pueden formar por la parte trasera del grabado de sustrato de silicio usando una orientación de cristales dependiendo de los reactivos de ataque (por ejemplo 111), tales como KOH o EDP junto con técnicas de grabado a escalas (por ejemplo,). Vinculación las estructuras de membrana de silicio sobre una placa de vidrio Pyrex (Por ejemplo,) produce micro cámaras de referencia que pueden ser aplicadas para la medición de la presión absoluta. La Masa del micromecanizado ha estado en desarrollo durante más de veinte años y se ha convertido en un bien establecido tecnológicamente. Hoy en día, una serie de empresas con éxito fabrican transductores basados el procesamiento a granel.

En la última década mucho interés se ha centrado en estructuras realizadas por micromecanizado de superficie.

Situado en la superficie de la pastilla y consisten más a menudo de películas delgadas. Sus dimensiones son generalmente uno o dos órdenes de magnitud menores que los del micromecanizado mayor en dispositivos. Por lo tanto, la miniaturización se puede aumentar considerablemente; en el. Por otra parte, las pequeñas masas puede ser insuficiente para detección o transmisión mecánica. Una ventaja particular de los dispositivos micromecanizados en superficie es su fácil integración con componentes del IC, ya que la superficie de la oblea es también el área de trabajo de elementos de IC. En la actualidad, la superficie del micromecanizado es intensamente e investigado por un gran número de

laboratorios de I + D. La mayoría de los dispositivos, sin embargo, son todavía una fase de prototipo.

Una amplia variedad de métodos para la fabricación de estructuras micromecánicas en la superficie de la pastilla. Algunas técnicas representativas serán discutidas en la siguiente sección. Posteriormente, varias aplicaciones de polisilicio, microestructuras se describirán en base de la tecnología de capa de sacrificio. Por último, algunas declaraciones concluyen la importancia del micromecanizado para la realización de complejas, estructuras mecánicas altamente fiables.

### **3.1.2. Las técnicas para microestructuras superficiales**

En esta sección de herramientas tecnológicas para la construcción de dispositivos micromecánicos se describe lo importante de las aplicaciones citadas. En primer lugar, la tecnología de capa de sacrificio para la realización de microestructuras de polisilicio exentas se discute.

El segundo enfoque de la tecnológica trata de la combinación de la tecnología IC y grabado anisotrópico de la superficie de silicio en KNH o EI) P a fin de obtener de bajo costo transductores micro. El tercer grabado de plasma se utiliza para fabricar estructuras independiente en la superficie del sustrato de silicio.

### **3.1.3. Tecnología de capa de sacrificio**

De baja presión de deposición de vapor químico (LPCVD) policristalino silicio (polisilicio) es un material bien conocido en tecnologías estándar de IC y también tiene una excelente propiedad mecánica que son similares a los de un solo cristal de silicio. Por esta razón, es ventajoso para el polisilicio la realización de estructuras de micromecanizado en un incompatible proceso de fabricación. Micromecanizado en superficie para la construcción de microestructuras tridimensionales de películas de polisilicio se ha convertido en una importante alternativa al micromecanizado establecida por obleas de silicio de un solo cristal. En particular, independiente vigas de polisilicio se pueden realizar por la tecnología de capa de sacrificio cuya clave de procesamiento es de etapas (**figura 7**): la deposición y el patrón de un sacrificio capa de dióxido de silicio sobre el sustrato; deposición y definición de una película de polisilicio; eliminación de la sacrificial óxido por ataque lateral en ácido fluorhídrico, es decir, socavando completamente el patrón de polisilicio donde cubre el óxido.

Se aplicaron dos métodos diferentes para la fabricación de tales vigas de polisilicio. Un enfoque utiliza CVD de silicio y dióxido como una capa de sacrificio. El polisilicio entonces cubre el óxido de modelado de modo que las vigas bajo grabados finales son planteadas por los pasos por encima del sustrato (figuras 7 y 8). El sustrato es normalmente protegida por un silicio PECVD capa de nitruro.

El segundo procedimiento para la fabricación de la viga se basa sobre el proceso de la oxidación localizada de silicio (Locos) donde las ventanas se abren en nitruro de silicio sobre la del sustrato de silicio y, posteriormente, silicio térmico. dióxido se cultiva en las aberturas. El uso de este modelado óxido térmico como una capa de sacrificio permite la construcción de vigas de polisilicio plana, es decir, las vigas están en el mismo nivel que el sustrato circundante.

Sin embargo, el crecimiento de óxido también se produce debajo de la nitruro en los bordes de las ventanas y de este modo empuja a máscara de nitruro (efecto pico de pájaro).

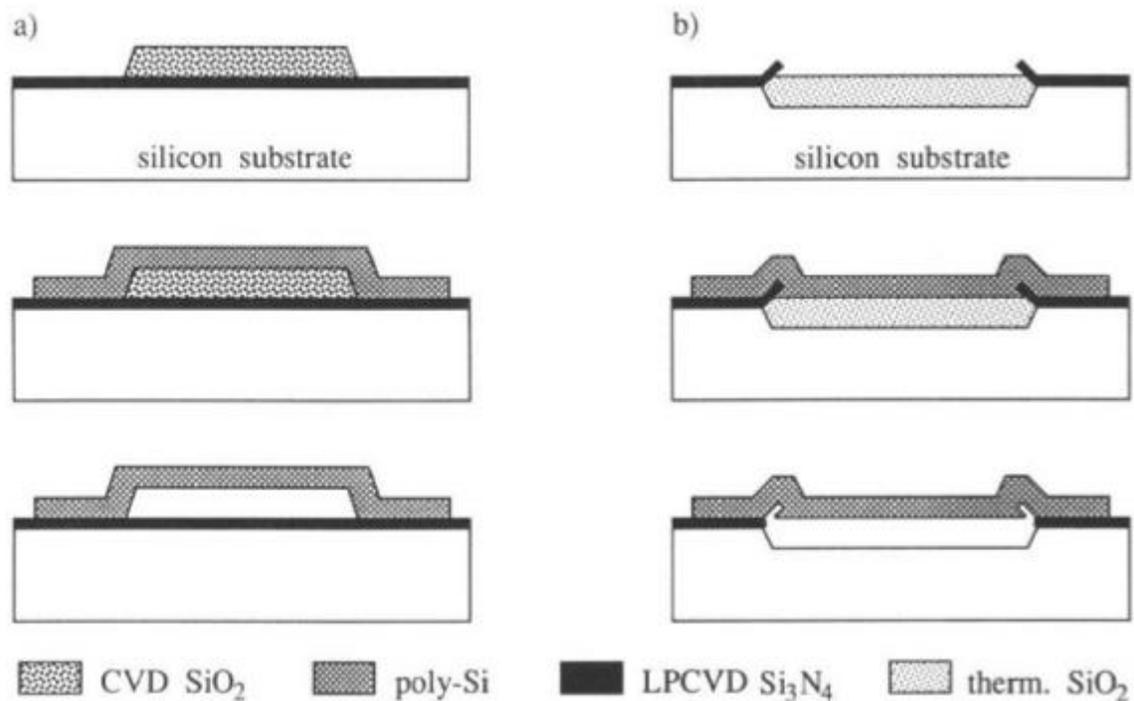
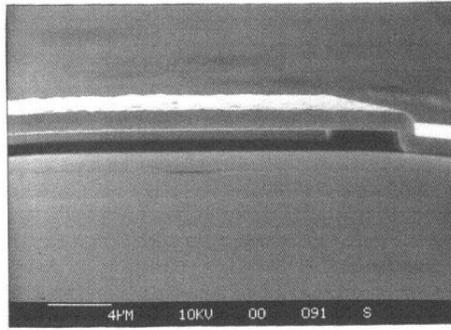


Figura 7. pasos de proceso clave de la tecnología de capa de sacrificio para la fabricación de de independiente vigas de polisilicio: (a) usando CVD dióxido de silicio, (h) el uso de dióxido de silicio térmico como capa de sacrificio.

Figura 8. Haz de polisilicio de sujecion



Fuente.(Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

Como consecuencia, la forma de los picos se crean en los bordes de la Vigas de polisilicio LOCOS (figuras 7 y 9). Procesos como lado de la pared de aislamiento enmascarado (SWAMI) puede que se aplica para evitar o reducir los efectos pico de pájaro.

Un requisito importante para obtener microestructuras liberados sin ninguna falla mecánica, es la deposición de las películas con baja deformación residual. En particular, las estructuras de polisilicio exentas tienden a doblarse debido a su compresión residual, cepa. Al elegir las condiciones de LPCVD apropiadas (por ejemplo 600 °C, 200 mTorr) y, en particular, mediante la optimización de la etapa de recocido (por ejemplo, 1050 °C, 30 min), libre de fatiga Se han obtenido las vigas de polisilicio . La longitud máxima de vigas exentas es considerablemente más grande para el fósforo dopado que para dopar polisilicio. Dopaje se ha realizado por difusión

a partir de un óxido de fósforo dopado en la parte superior del polisilicio. En la mayoría de los casos, la longitud de la viga máxima es limitado por pegar al sustrato. es decir, no da flexión hacia arriba y hacia abajo como consecuencia de la fatiga mecánica que se ha observado. Este accesorio de las vigas es debido a la probabilidad estática, fuerzas que podrían resultar de la fabricación del procedimiento se produjo por la superficie o incorporado cargos de las capas 161.

Una posibilidad para reducir el fracaso de haz tal como se pegue al sustrato y / o fragilidad mecánica, consiste en el aumento del espesor de el polisilicio a más de una micra. Para tales capas relativamente gruesas, el grabado se convierte en una etapa de procesamiento delicado, especialmente si la anchura menor que necesita una micra. Una norma fotorresistente se ha utilizado para el patrón del polisilicio mediante grabado por iones reactivos en un C, CIF, / SF, plasma. Alta selectividad, controlado por pequeñas muescas y 'paredes laterales casi verticales que se han logrado.

Dado que tanto polisilicio y dióxido de silicio son materiales estándar para los dispositivos IC, una gran variedad de estructuras micromecánicas basadas en el sacrificio de tecnología de capa utilizada esta combinación de materiales. Muller y Howe han dado cuenta de varios tipos de sensores y actuadores utilizando microestructuras polisilicio ; Guckel et al han fabricado microcavidades sellados al vacío en la superficie del sustrato para su aplicación como presión.

Pasos de procesamiento clave de la tecnología de capa de sacrificio para la fabricación de vigas de polisilicio: (a) el uso de dióxido de silicio CVD, (h) el uso de dióxido de silicio térmica como capa de sacrificio.

La máscara de nitruro (efecto pico de pájaro). Como consecuencia de ello, la forma de los picos se crean en los bordes de la Vigas de polisilicio LOCOS (figura 8) Procesos como la pared lateral de aislamiento enmascarado (SWAMI) puede que se aplica para evitar o reducir los efectos pico de pájaro.

Un requisito importante para obtener microestructuras liberados sin ninguna falla mecánica, es la deposición de las películas con baja deformación residual. En particular el doblemente respaldado de las estructuras de polisilicio exentas tienden a doblarse debido a su compresión residual. Al elegir las condiciones LPCVD apropiadas (por ejemplo 600 °C, 200mTorr) en particular mediante la optimización de la etapa de recocido (por ejemplo, 1050 °C, 30 min) Se han obtenido las vigas de polisilicio.

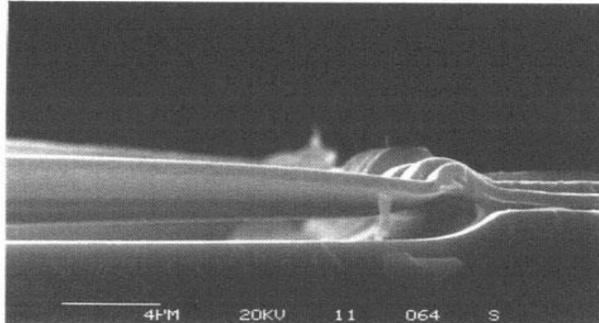
La longitud máxima de vigas exentas es considerablemente más grande para el fósforo dopado que el polisilicio. El dopaje se ha realizado por difusión a partir de un óxido de fósforo dopado en la parte superior de la polisilicio. En la mayoría de los casos la flexión hacia arriba y hacia abajo como consecuencia de tensión mecánica se ha observado. Este accesorio de las vigas al sustrato se debe probablemente a electrostática o de la fabricación de un procedimiento 17.81 o incorporando cargas de las capas 161.

Una posibilidad para reducir el fracaso de haz tal como se pegue al sustrato y la fragilidad mecánica, consiste en el aumento del espesor de El polisilicio a más de una micra. Para tales capas relativamente gruesas, el grabado se convierte en una etapa de procesamiento delicado, especialmente si un haz de anchura menor que se necesita una micra. Una norma fotorresistente se ha utilizado para el modelado de la polisilicio por grabado iónico reactivo en un C, CIF, SF, plasma. Alta selectividad, controlado pequeño corte sesgado y paredes laterales casi verticales se han logrado obtener.

Dado que tanto polisilicio y dióxido de silicio son materiales estándar para los dispositivos IC, una gran variedad de estructuras micromecánicas basadas en el sacrificio la tecnología de capa utiliza esta combinación material. Muller y Howe han dado cuenta de varios tipos de sensores y actuadores utilizando microestructuras polisilicio como se muestra en la figura 9 ; Guckel el a fabricado microcavidades sellados al vacío en la superficie del sustrato para la aplicación

como la se utilizaron transductores; las estructuras de micromecánicos Mehregdny, Gabriel y Trimmer utilizan relativamente gruesa películas de polisilicio y Mokwa et a / construir CMOScompatible membranas de polisilicio para la medición de la presión.

Figura 9. Un extremo de un haz de polisilicio



Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

transductores ; las estructuras de micromecanizados. Mehregany, Gabriel y Trimmer utilizan relativamente películas gruesas de polisilicio ; y Mokwa etc / construir CMOS compatible con membranas de polisilicio para la medición de la presión.

Diferentes combinaciones de materiales / sacrificial capas también han sido adoptados: una metal para la combinación de Nathanson ; un silicio/ dióxido de polisilicio por Hälg ; un silicio nitruro / combinación de polisilicio por Sugiyama ; el nitruro de silicio combinación de aluminio por Scheeper.

En la sección 3 algún prototipo típico de polisilicio estructuras realizadas en la Universidad de Neuchitel se describe en detalle.

#### **3.1.4. Tecnología IC combina con ataque químico anisotrópico**

Microestructuras superficiales que consisten en multicapas exentas que se han fabricado y caracterizado por Baltes, grupo. En particular, la combinación de la tecnología IC es sencillo, sin máscara de grabado anisotrópico de silicio este paso hace que sea posible la producción mas barata de , micro transductores compatibles.

En la primera fase de las multicapas se crean utilizando procesamiento IC estándar. En general, una multicapa se compone de aislante y pasivación de capas dieléctricas (por ejemplo, óxido térmico, óxido de CVD o CVD mejorada

con plasma nitruro) ese sándwich de la capa activa (por ejemplo, LPCVD polisilicio o el aluminio). Por su diseño especial, las ventanas son alrededor de las estructuras multicapa para la eliminación de toda capa dieléctrica que salen directamente a la superficie de silicio expuesta.

En el segundo procedimiento, publicar, eliminar las laminas que se sumergen en los reactivos de ataque de silicio anisótropas.

Por lo tanto, la superficie de silicio expuesta alrededor de la multicapa se retira de la estructura, por debajo del grabado de las microestructuras finalmente se convierte en independiente. Dado que el activo de las capas están completamente incrustados en las capas dieléctricas que están protegidos contra el grabado de silicio.

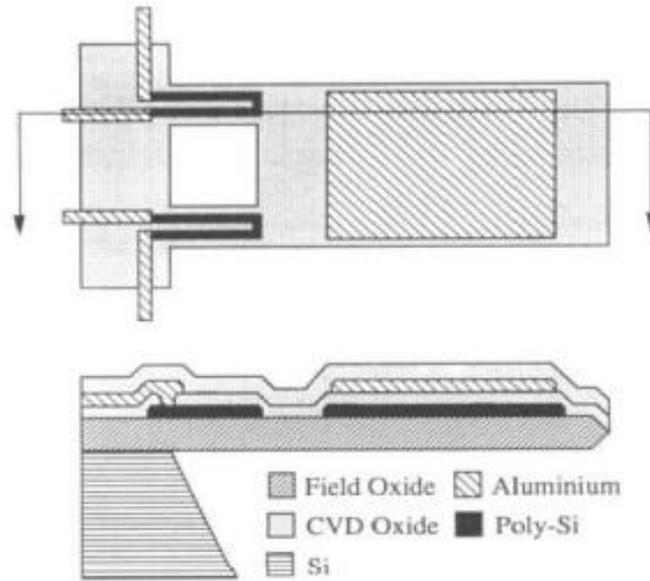
**Figura 10** ilustra una vista esquemática y una micrografía de un resonador, viga en voladizo fabricado por Moser.

Envuelto en capas de óxido, se utilizan resistencias de polisilicio para la excitación térmica y una película de aluminio sirve como un espejo para la detección óptica. Otros ejemplos tales como sensores de flujo resistivos y gas termopila, termoeléctrica

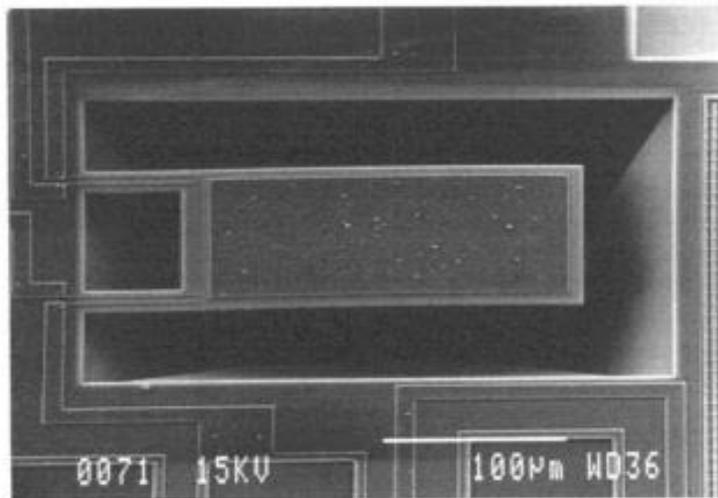
sensores de potencia y estructuras resonantes de humedad y detección de proximidad también han sido reportados por Baltes y compañeros de trabajo.

Un enfoque similar de la construcción de sujeción independiente de microestructuras de película delgada de grabado anisotrópico del sustrato de silicio se ha realizado por la era Bouwstra /1281, que utilizan un micropuente resonante por partida doble fijada con unidad térmica y detección piezoresistivo para la medición de flujo de masa. La misma consiste en de micropuente de tres películas, todas ellas con expansión térmica con el LPCVD resistencias de polisilicio para la unidad y la detección y la capa superior de pasivación de nitruro de LPCVD.

**Figura 10.** (a) Diseñar vista superior y la sección transversal y (b)SEM del resonador de haz (cortesía de Moser y otros ).



(a)



(b)

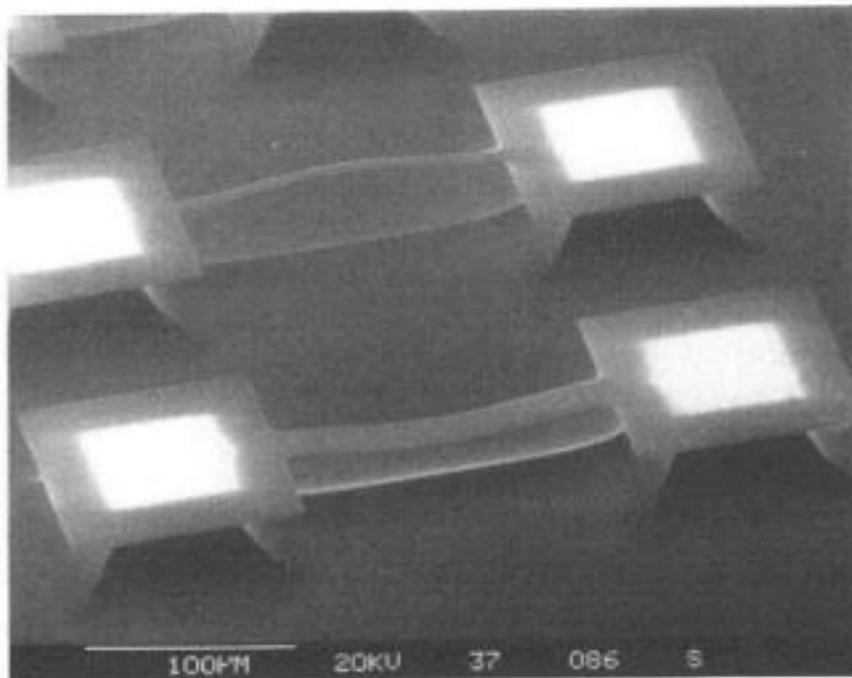
Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretilat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

### 3.1.5. Grabado por plasma isotrópico

Grabado por plasma del sustrato de silicio con SF<sub>6</sub>, E / S, gas La mezcla es ventajosa ya que las altas selectividades de 20, 85 y más de 300 para fotorresistente, dióxido de silicio y máscaras de aluminio, respectivamente, se consiguen. Sin embargo, una gran muesca de la máscara se observa. Esto es debido al isotrópico grabado del átomo de flúor de silicio que se conoce al ser alta en comparación con la vertical de etc inducida por iones. En contraste, el grabado iónico reactivo con C, ClF<sub>3</sub>, / SF<sub>6</sub>, los gases no producen ningún corte sesgado y los perfiles de grabado casi verticales cuando se utiliza como un fotoprotector el material de enmascaramiento. Así, los patrones de silicio rectangulares que son hasta 30µm de profundidad pueden estar formados por

plasmas cloro / flúor fuera de la superficie de la pastilla. Los siguientes ejemplos demuestran el ataque en seco por plasma en una herramienta versátil, compatible-IC para el silicio de micromecanizado.

Figura 11. SEM de ~ puentes libres de dióxido de silicio de pie realizada por ataque químico selectivo en virtud del sustrato de silicio en un SF<sub>6</sub>, E / S, plasma.

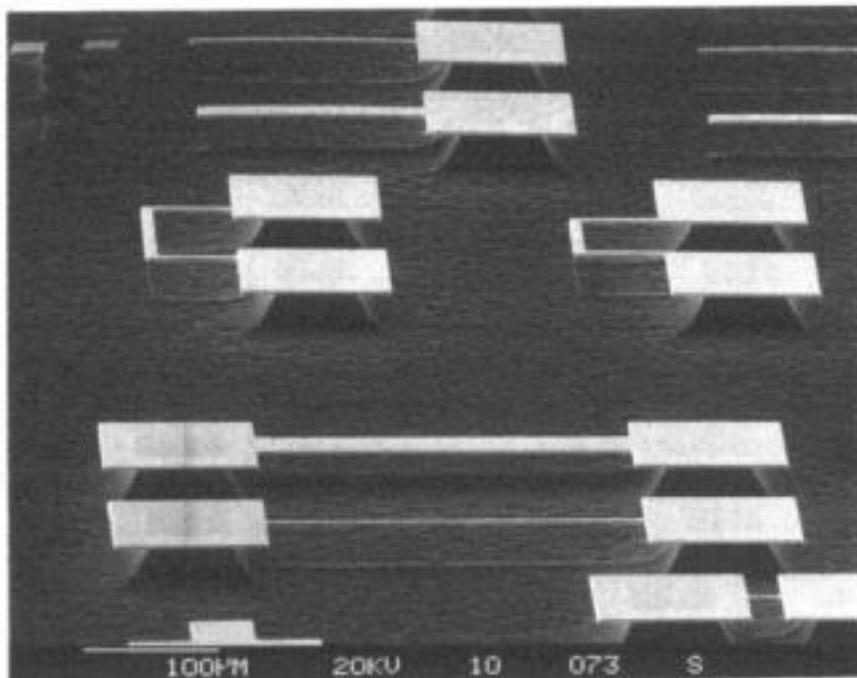


Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

Aprovechando el comportamiento de ataque isotrópico silicio en San Francisco, E / S, plasmas, estructuras micromecánicas se puede construir en la superficie del sustrato. Por ejemplo, el silicio, dióxido y de microestructuras de aluminio pueden complementarse bajo el grabado y con ello llegar a serlo. **La Figura 11** muestra las vigas de óxido por partida doble fijada y realizada con esta tecnología. El pandeo de las vigas indica claramente la tensión mecánica térmica del dióxido. **Figura 12** ilustra ejemplos de aluminio libre de fatiga en las vigas. Las aplicaciones potenciales de la sujeción independiente a las vigas son resonadores e interruptores mecánicos. una particular ventaja de estas microestructuras superficiales es que su fabricación necesita pocos pasos de procesamiento. La combinación de plasma vertical e isotrópico en grabado también se ha aplicado con éxito por Zhane y MacDonald para la fabricación independiente de vigas en voladizo de silicio. Ellos protegen la parte superior y la pared lateral de las superficies de la viga de silicio rectangular en grabado seco

estructuras en la superficie de la pastilla con una película de dióxido de silicio y, posteriormente, en virtud de las estructuras del grabado por plasma y del procesamiento hasta que fueron puestos en libertad por completo.

Figura 12. SEM de las microestructuras de aluminio exentas realizado por underetching selectiva del sustrato de silicio en un SF, E / S, plasma.



Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

### 3.1.6. Aplicaciones

Se presentan varios prototipos de actuadores y sensores en esta sección. Todos ellos no utilizan polisilicio en estructuras como elementos funcionales. Como último ejemplo, una aplicación particular de la tecnología de capa de sacrificio se describe: una microcavidad que sirve como encapsulación para microestructuras de superficie.

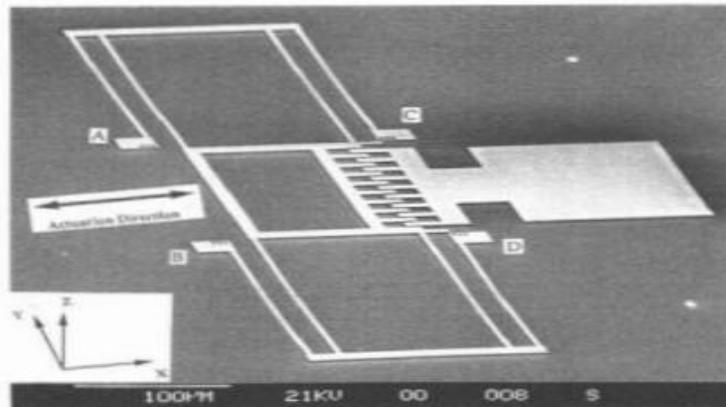
### 3.1.7. Actuadores peine para microestadio xy

Micromecanizado de superficie es una tecnología ideal para la realización de estructuras móviles laterales, especialmente cuando se combinan con un mecanismo de accionamiento electrostático, como resultado de los dispositivos que han sido fabricados. En particular, la unidad de peine demostró ser exitosa en la construcción de resonadores lateralmente móviles y actuadores.

Nosotros fabricamos actuadores de peine en colaboración con Centro Suisse d'Electronique et de Microtécnica SA (CSEM) en Neuchatel, Suiza; un ejemplo es

se muestra en **la figura 13**. Como puede verse a partir de la SEM, el actuador consta de un electrodo de peine fijo y un electrodo de peine móvil. Los componentes funcionales de el actuador son: la suspensión que da un mecánico en la orientación del movimiento del actuador y la interdigitada de peines donde la fuerza es el accionamiento creado. El actuador mostrado de peine tiene vigas de suspensión 200 pM largo, ancho y 14:08 14:00 alta; la brecha entre los dedos es 15:02.

Figura 13. SEM de un accionador de peine. Se compone de dos partes: el electrodo fijo y el electrodo móvil que está suspendida por encima del sustrato y se fija a ella en el Los puntos A, B, C y D. La fuerza motriz se crea en el peine.



Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

Con una aguja microsonda tales estructuras de peine podrían ser movidas por hasta 15 horas mecánicamente. incluso después de la operación intensiva por parte del móvil del actuador vuelto a su posición inicial. Por lo tanto, el polisilicio de suspensión cumple con los requisitos de elasticidad para el posicionamiento preciso. Para aplicaciones de baja tensión redujimos el ancho de

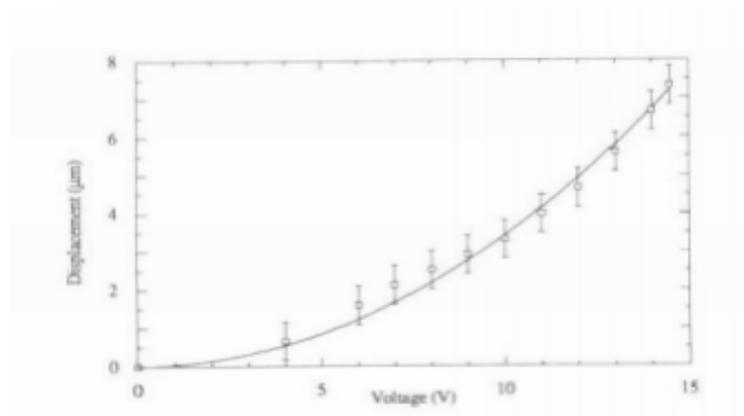
la suspensión de vigas a 24:08. Un desplazamiento típico frente a la curva de tensión se muestra en la **figura 14**. Mientras que los puntos son los desplazamientos medidos, en la curva y dibujados por una ecuación discutido en la referencia. Como indica en la

**figura 14** , la teoría y las mediciones son consistentes.

En particular, un desplazamiento 19:03 ha observado a 14,5 V. Este voltaje de excitación es más de una orden de magnitud inferior a los valores que reportamos anteriormente .

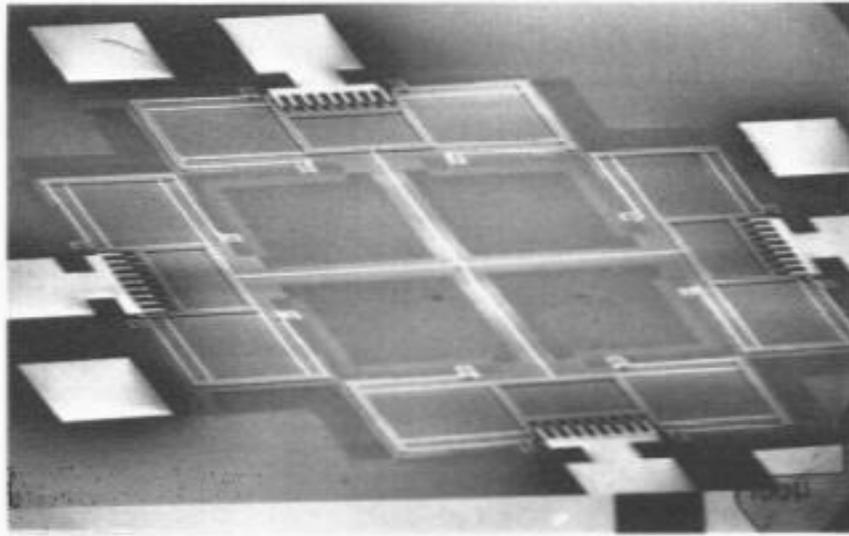
Un microestadio xy se ha realizado impulsado por el actuadores de peine.como se muestra en La figura 15. una vista completa de la etapa fabricada. La mesa cuadrada (8 x 20:00 \*) se suspende por vigas de 500 pM de largo, ancho y alto 14:00 24:08.

Figura 14. Desplazamiento frente diagrama de tensión de un 16- actuador dado con haces anchos submicrométricas que tiene una constante de elasticidad de 9,1 mN m<sup>-1</sup>. La línea llano es el resultado de cálculos teóricos mientras que los puntos son la valores medidos



Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

Figura 15. SEM muestra una visión general de un gráfico XY



Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

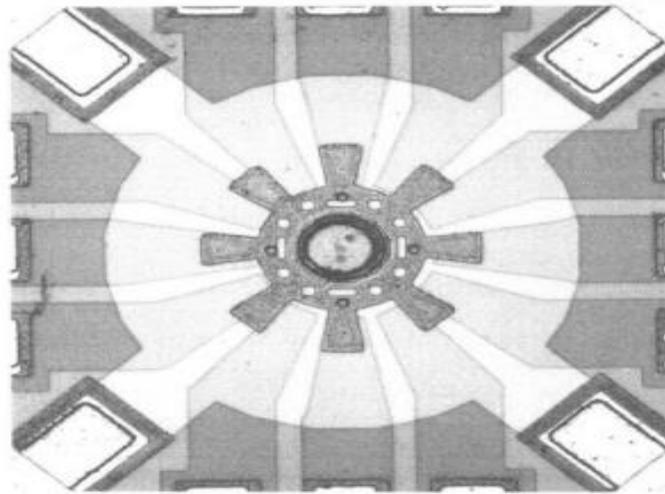
Con este prototipo era posible desplazar la mesa en cualquier dirección en el "plano y. Mecánicamente en un máximo de superficie de 30 x 30 / im 'podría bc cubierto. Por voltajes alrededor de 20V la tabla podrían trasladarse hasta 5, um en la dirección de cada uno de los actuadores. Finito-elemento de modelado de esta estructura particular mostró que el posicionamiento preciso se puede realizar porque el acoplamiento entre los desplazamientos en el eje .Y y Y es insignificante. Para la estructura se muestra en la **figura 15**, la simulación demuestra que un desplazamiento en los resultados de la dirección es un cambio relativo en la ordenada posición de menos de 10 '. Por lo tanto, este dispositivo puede ser utilizado para el posicionamiento en el plano .xy con una superficie de IO x 10 / img con una precisión mejor que 50 nm.

### 3.1.8. Motores paso a paso electrostáticas integrados

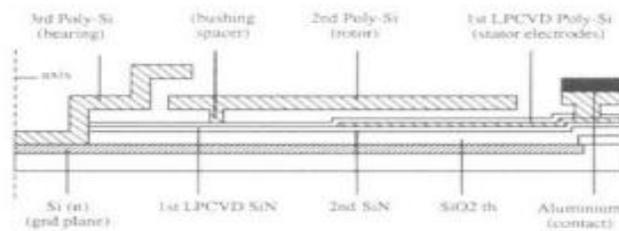
Motores electrostáticos representan una solución interesante para el accionamiento giratorio microescala integrada: la eficiencia se vuelve comparable a su puño de tamaño electromagnético equivalentes . Deposición de polisilicio sobre sacrificial capas de dióxido de silicio ha demostrado ser exitoso para

su fabricación. según lo informado por el ejemplo.

Figura 16. (a) del motor de accionamiento directo superior fabricada (rotor Q5200pm) y (b) sección transversal media-motor (sacrificial capas ya retirados).



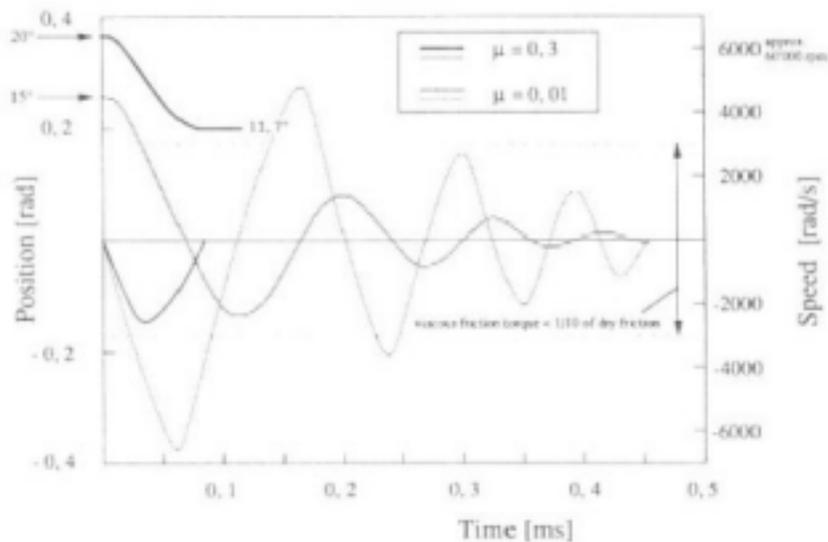
(a)



(b)

Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

Figura 17. Respuesta gradual directa para conducir a 50V



Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

Técnicas similares se utilizan aquí para la fabricación de capacitancia variable (vc) motores con rotores de cientos de micrómetros de diámetro por un micrómetro de espesor. Este trabajo se lleva a cabo en estrecha colaboración con Asulab SA y CSEM SA, Suiza.. Las capas de polisilicio son-fósforo dopados, de polisilicio y las capas de nitruro de silicio se definen con grabado de plasma.

Dióxido de silicio térmica se usa como un aislamiento eléctrico. Capas de sacrificio que consiste en cvn fósforo-dopcd dióxido de silicio están grabados de distancia en el último paso para liberar las estructuras del rotor.

Nuestro primer tipo de motor es una unidad superior directo (**figura 16**) la ventaja de que es grande debido a la vc. grandes áreas superpuestas. La ausencia de periférico estatores en este diseño permitirían una adyacente de fácil acoplamiento a un mecanismo accionado.

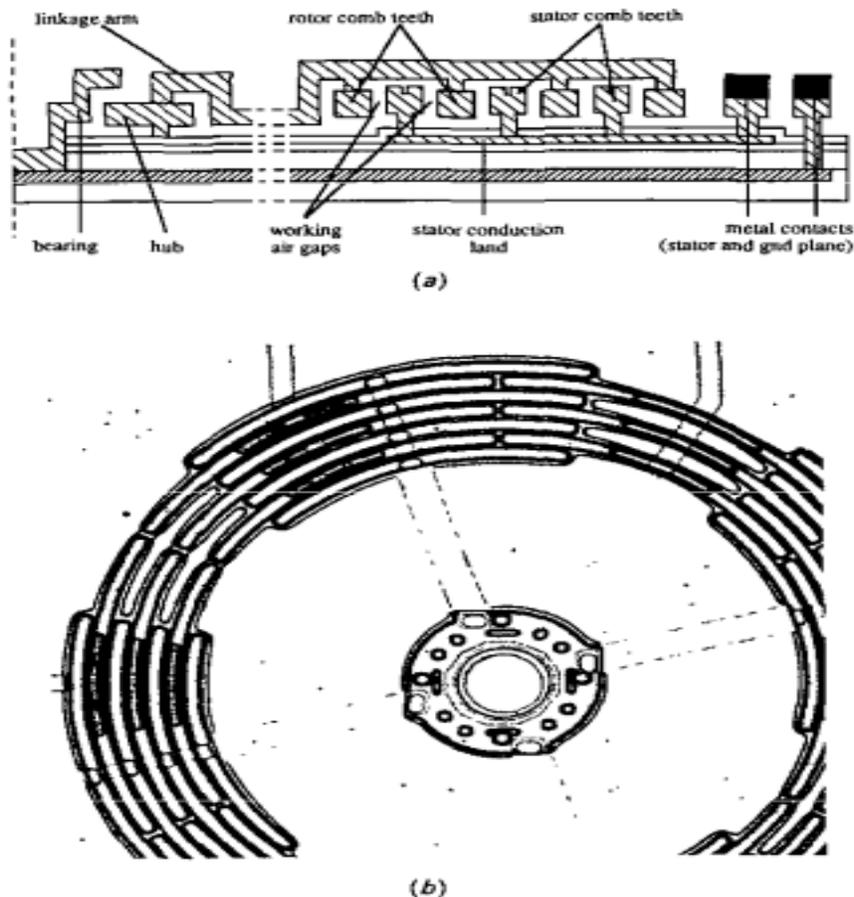
**Figura 17** muestra la respuesta dinámica calculada para

una tensión de paso de 50V aplicado a dos estator de postes opuestos, para dos ángulos de partida y dos de fricción en seco de coeficientes. Nos pareció que este último parámetro más determinante para un funcionamiento continuo de tales top-drives, Nuestro segundo tipo se ilustra el lado de tracción peine directo en la **figura 18** era aumentar el número de huecos de conducción por sector de la introducción de los brazos de articulación formados en la tercera polisilicio.

Estos brazos también pueden ser apoyados por un engranaje exterior, permitiendo el acoplamiento del mecanismo adyacente.

Nuestro tercer tipo es el motor armónico oscilante (**figura 19,**) que se aprovecha de la fricción en seco, considerado como un obstáculo para la unidad superior directa o transmisión lateral. El rotor es un bamboleo verticalmente, anillo rígido que está secuencialmente atraído contra aislado del estator de electrodos. Una rotación lenta del bamboleo el anillo es causada por su rodadura a lo largo de un camino más corto que su propia circunferencia. Las barras de torsión permiten la conexión desde el anillo a un bamboleo, anillo interior puramente rotativa. Con una distancia de separación de aire de la  $1.05 \mu\text{m}$ , muy alto armónica en relación con la reducción (por lo tanto un alto par de motor) de 1: 20 000 es calculado para este diseño.

Figura motor 18. Peine: (a) la sección transversal, (b) vista desde arriba



Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

### 3.1.9. Interruptores electromecánicos

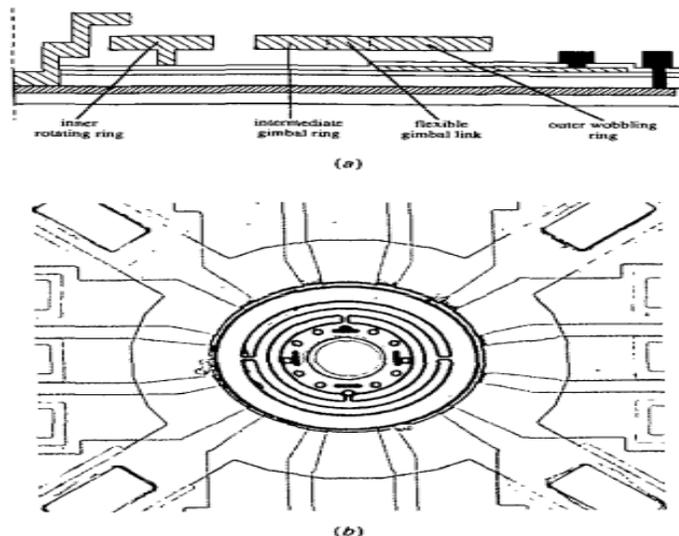
Los interruptores electromecánicos producidos por micromecanizado Dican son de gran interés, ya que parecen ser capaz de llenar la brecha entre lo establecido de los conmutadores basados en transistores y el electromagnético tradicional

relés . Un polisilicio capacitiva actuador de conexión se ha realizado mediante la adición de Ic-procesamiento de pasos, tales como el dopaje de las regiones de sustrato y metalización, a la tecnología de capa de sacrificio. Una cruz de sección del microinterruptor se muestra en la **figura 20**. Los dos electrodos de este actuador-condensado, una región de sustrato dopado con fósforo subyacente.

El microinterruptor es accionado electrostáticamente mediante la aplicación de una tensión entre el haz de polisilicio y el electrodo de sustrato, es decir, la electrostática atractiva resultante de la fuerza tirará el haz de polisilicio hacia abajo.

Aplicar la tensión de interruptor, el haz es desviado hasta en contacto el sustrato. Debido a la doble capa de pasivación sobre el sustrato de la superficie del polisilicio y el electrodo de sustrato. La extracción de la tensión aplicada, la restauración, la fuerza del muelle devuelve el rayo a su libre posición. Una primera generación de interruptores.

Figura 19. motor Wobble: (a) la sección transversal, (b) vista desde arriba(foto: rotor @ 200 / rm)



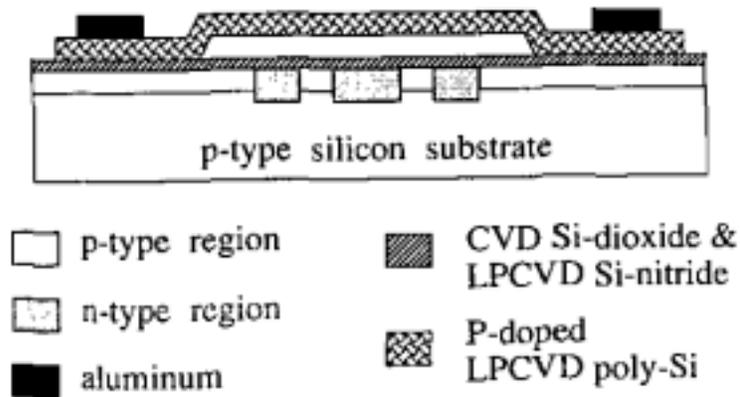
Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

se realizaron pruebas. Los ensayos en un escaneo microscopio electrónico (véase la **figura 21**). el polisilicio vigas (dimensiones típicas: 300 pm de largo, 25 pm de ancho,

1 pm de espesor y una distancia de 13:02 entre viga y sustrato) podría ser desviado varias veces para el sustrato mediante la aplicación de un voltaje interruptor de alrededor de 14 V. Esto concuerda bien con el valor calculado de 13,5 V. Mediante la optimización del diseño del electrodo sustrato y / o mediante el aumento de la longitud de la viga, es posible reducir la tensión de interruptor para menos de IOV. Estas tensiones se encuentran dentro de la gama de norma IC tensiones.

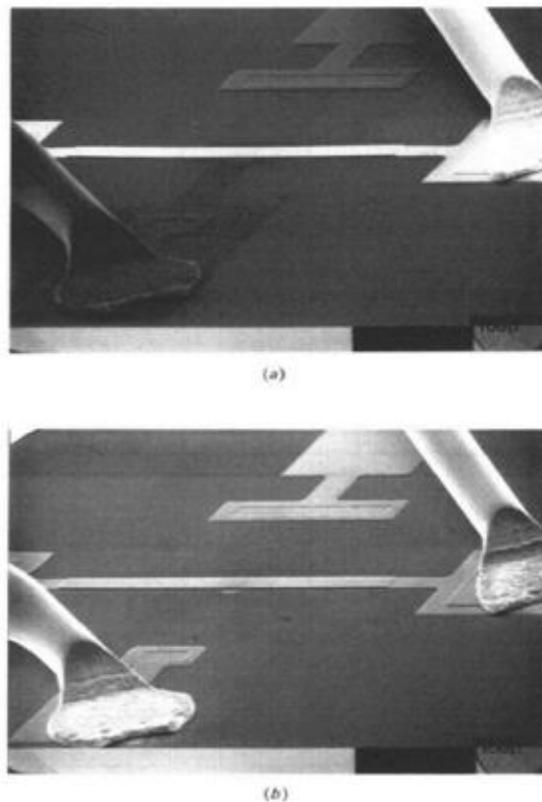
Las aplicaciones posibles son micro interruptores electromecánicos y piezas mecánicas móviles de microbombas o microválvulas. Un interruptor eléctrico, por ejemplo, puede ser realizado por la simple adición de un carril de polisilicio delgada sobre la del sustrato que lleva debajo de la libre-de pie-haz

Figura 20. Sección transversal de un polisilicio capacitiva de micropunte



Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

Figura 21. SEMS de los dos estados de conmutación de un alambre unidos prototipo de polisilicio microinterruptor: (a) independiente haz - el electrodo sustrato y la polisilicio están en el mismo potencial eléctrico; (b) haz hacia abajo desviada ~ 14V se aplican entre el sustrato y el polisilicio.



Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

**3.1.10. Resonadores con excitación y detección integrado** Dispositivos resonantes constituyen una clase de sensor importante por que las medidas pueden ser exactas . por ejemplo, la frecuencia mecánica de resonadores es altamente sensibles a una variedad de parámetros incluyendo la temperatura, presión, fuerza, densidad del gas, viscosidad, etc. Por otra parte, la salida de frecuencia de sensores resonantes puede ser transmitida directamente a los sistemas digitales y decodificada por contador de pulsos, lo siguiente, dos tipos de micro resonadores con diferente excitación y detección de integrado se describen por partes. Los elementos oscilantes consisten en vigas de polisilicio independientes e incompatibles.

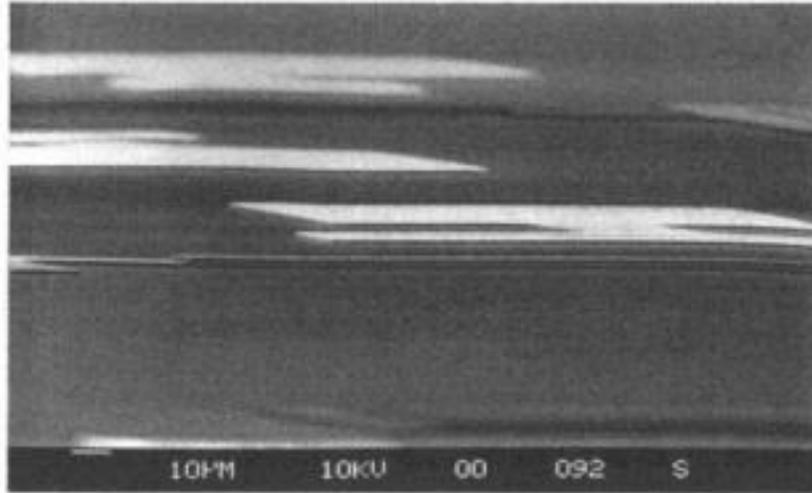
El primer tipo de resonador es impulsado capacitivamente Por la aplicación de un voltaje de CA entre el fósforo-dopado haz de polisilicio y un subyacente, también fósforo dopados, región de difusión en el sustrato. La oscilación es capacitiva percibida así.

cambios de capacitancia de la viga oscilante / entrehierro / sustrato condensador se miden. Para la detección de estos pequeños cambios de capacitancia, el condensador resonante está integrado con un condensador de polisilicio fijo en un divisor de tensión capacitivo cuya señal de salida acciona con NMOS simples inversor . Una vista esquemática del haz resonante se da en la **figura 20** . Como también indica en la **figura 20** de excitación y de detección puede ser realizado por electrodos del sustrato separadas. **Figura 22** muestra un resonador de polisilicio fabricado.

El segundo tipo de resonador es accionado térmicamente por la aplicación de un voltaje en un polisilicio dopado con boro, el resistor que se coloca en la parte superior de la viga. Para la detección, de otras dos resistencias dopado con boro sobre la viga son utilizados como piezoresistores . Están conectados en un Puente de piedra de trigo junto con dos resistencias fijas al lado de la estructura de la viga. Todo el haz es compuesta de una película de polisilicio dopado con fósforo que es cubierto por una capa de nitruro de silicio aislante delgada en la parte superior que se colocan las resistencias. Tecnología de capa de sacrificio es basada en el procesos LOCOS se utiliza para la construcción de este segundo tipo de resonador con el fin de obtener planarización óptima para el haz de múltiples capas. El resonador fabricado de polisilicio con resistencias integradas en la parte superior se ilustra en la **figura 23**.

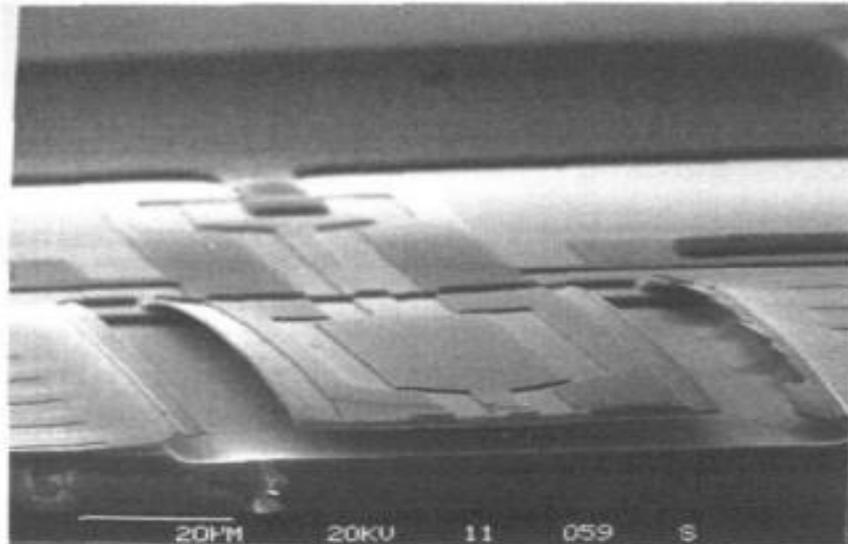
Tanto la unidad capacitiva y excitación térmica han aplicado con éxito para llevar las vigas de polisilicio en oscilación. Usar la detección piezorresistivo y aplicar 5 V sobre el puente de piedra de trigo , una señal de salida de alrededor de 10mV se calcula para una amplitud máxima de oscilación del haz resonante en la **figura 23**. Sin embargo, la temperatura cambia en las piezoresistores detección debido a la excitación térmica y eléctricos diafonía entre la unidad y las resistencias de detección producen ruido que se estima para que en el mV varié también.

Figura 22. SEM que muestra la vista lateral de una mitad de un independiente de micropuente de polisilicio capacitiva (300 pm de largo, 25,, M (aluminio blanco de ancho y 1 cm de espesor) y patrones.



Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

Figura 22. SEM que muestra la sección transversal de un LOCOS haz de polisilicio (230 pn de largo, 56 de ancho y JRM 13:02 de espesor) con resistencias de boro dopados en la parte superior.



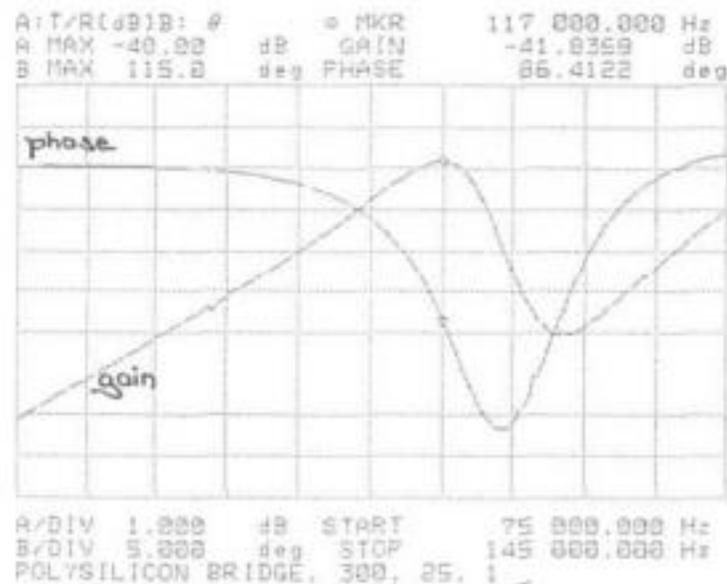
Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

Mediciones de ganancia / fase se llevaron a cabo con un Analizador de HP 4194A. La **Figura 24** muestra la medida en función de transferencia del tipo capacitivo resonador de la **figura 22**. Un pico de resonancia de la ganancia, junto con una fase de cambio ha sido obtenida a aproximadamente 120 kHz.

### 3.1.11. Microcavidades de superficies para la encapsulación

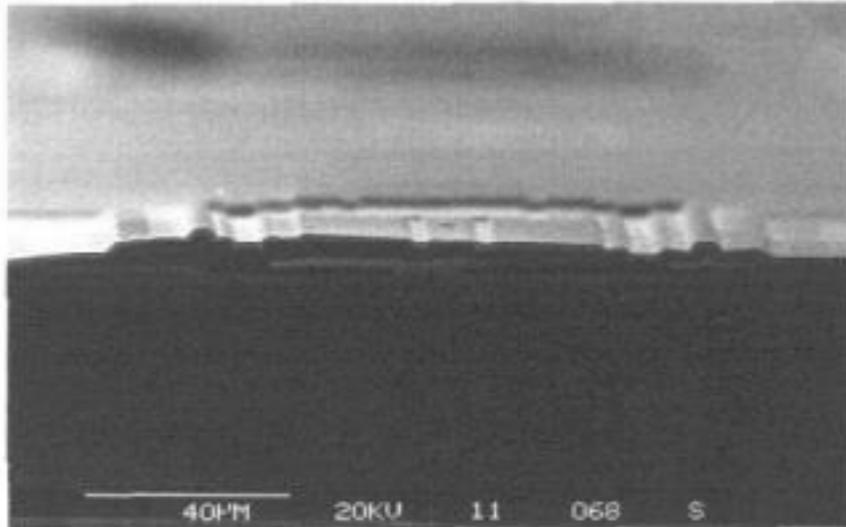
Al extender la tecnología de capa de sacrificio, es posible encapsular la micromecánica descrita anteriormente en dispositivos de nivel de la superficie. Por ejemplo, un segundo silicio en combinación de dióxido de capa / polisilicio puede ser depositado después de la definición de un haz de polisilicio en un primer óxido de sacrificio. La estructura de la viga tiene que ser completamente cubierta por el segundo óxido y de manera similar el conjunto patrón del segundo óxido debe ser él recubierto por la segunda estructura de polisilicio. Carriles delgada de óxido debajo del segundo polisilicio debe servir como canales de entrada para el ácido hidrófluórico. Los óxidos de sacrificio son entonces grabados

Figura 24. Medido respuesta de frecuencia del resonador haz de polisilicio capacitivo de la figura 16 (en el rango de 75 a 145 kHz)



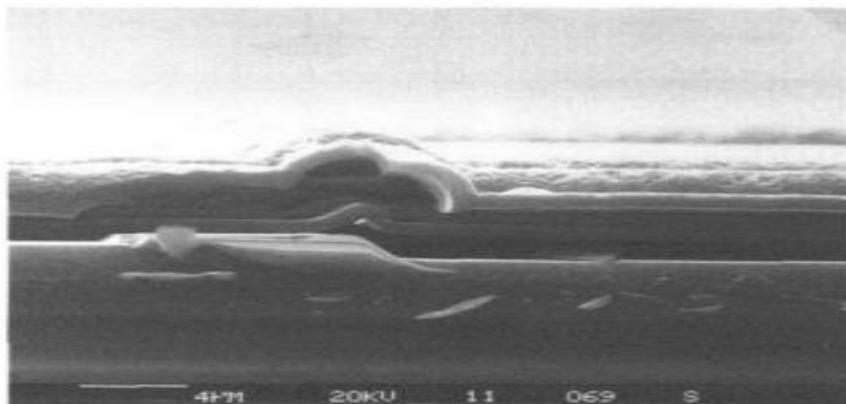
Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

Figura 25. SEM de un haz de polisilicio encapsulado por una segunda cubierta polisilicio: las distancias entre la cubierta, haz y el sustrato son 14:02 y 13:08. respectivamente.



Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

Figura 26. SEM vista lateral muestra de LOCOS encapsulados haz de polisilicio.



Fuente. (Surface micromachining por C. Linder, L Paratte, M.A. Gretillat, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij)

en una etapa de procesamiento. Después de la eliminación de óxido sacrificial los canales de grabado están cerrados, por ejemplo, por la re-oxidación. Por lo tanto, una micro superficie de la cavidad está formada por un segundo polisilicio. El haz de independiente se encuentra dentro de la microcavidad y por lo tanto protegido contra la corrosión o la contaminación.

Los SEMS de **figuras 25 y 26** muestran ejemplos de vigas resonantes encapsulados . En contraste con el chip por chip embalaje, encapsulación superficie puede ser por lotes fabricados, reduciendo así los costos y el aumento de la reproducibilidad. Sin embargo, las tapas de película delgada son muy frágiles y no garantiza la protección mecánica. Su aplicación principal será la creación de una atmosfera controlada bajo presión para el encapsulado de la microestructura.

### **3.1.12. Conclusiones y perspectivas**

Micromecanizado de superficie ha sido demostrado ser alternativa atractiva para el micromecanizado mayor establecido de silicio. Sin embargo, el volumen y la superficie técnicas de micromecanizado no sólo son divergentes o compiten entre sí, sino que también ayudará a aumentar la amplia variedad de lotes fabricados de alta fiabilidad microsensores y microactuadores en silicio y la la integración de este último con la microelectrónica. Masa micromecanizado, por ejemplo, se utilizará preferiblemente en aplicaciones en las que la fragilidad mecánica o la pequeña masas de estructuras micromecanizada-superficie son los principales inconvenientes. Si un proceso de fabricación compatible con Ic es necesario para una aplicación especial, superficie-micromecanizado dispositivos que consisten de polisilicio, dióxido de silicio y / o aluminio son ventajosas. En particular, la combinación de volumen y superficie micromecanizado será un campo en sentido contrario de BIO.

## 3.2 MICROMAQUINADO SUPERFICIAL

Christina Leinenbach <sup>1</sup>, Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup>*Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany* <sup>2</sup>*VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland* <sup>3</sup>*X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany*

A principios de 1980 un nuevo tipo de tecnología para la fabricación de los sistemas electro-mecánicos entró en contraste con la clásica granel y el micro mecanizado, que utiliza el sustrato de silicio de cristal como único material funcional para formar los dispositivos deseados por las tecnologías y de humedales anisotrópicos avanzados o seco-aguaafuerte, esta nueva tecnología utiliza capas delgadas película depositadas sobre la superficie del sustrato como material funcional. Por esta razón se denomina micromecanizado de superficie. Mientras el micromecanizado requiere procesamiento de la parte trasera de la oblea, incluyendo adelante hacia la parte trasera la alineación en la litografía, todos los pasos de procesamiento en la superficie del micromecanizado se realizan desde el lado frontal del sustrato, haciendo así que sea más compatible con tecnologías microelectrónicas estándar y también aumentando el tamaño de la oblea. Algunas de las empresas pioneras que han adoptado un proceso de micromecanizado de superficie como la base de su fabricación son analógicas para la fabricación de dispositivos como microsensores y Motorola, tanto de EE.UU., así como Bosch de Alemania, entre otros. Los dispositivos típicos son sensores de presión y sensores inerciales para la aceleración y la medición de velocidad angular, utilizado principalmente en la industria automotriz por esto las aplicaciones tales como bolsas de aire, la gestión del motor o el programa electrónico de estabilidad (ESP). Más Recientemente, nuevas aplicaciones en los teléfonos móviles, el ordenador periférico y los juegos se han convertido en numerosos componentes creados por esta tecnología.

En lo que sigue, una visión general de los diferentes tipos de procesos en superficie de micromecanizado. Convencionalmente, los dispositivos MEMS de superficie micromecanizada utilizan policristalino silicio (poli silicio) capa como dispositivo funcional, combinado con dióxido de silicio como material esencial. Para algunas aplicaciones, como micro espejos y conmutadores RF-MEMS, el metal se utiliza como una capa funcional. Otra alternativa es el uso de (SOI) obleas de silicio sobre aislante de alta calidad para producir la superficie de dispositivos micromecanizados en un solo cristal con capa de silicio. La principal desventaja de este último enfoque es el alto precio de la materia de la oblea.

### 3.2.1. MICROMAQUINADO A BASE DE SILICIO POLICRISTALINO

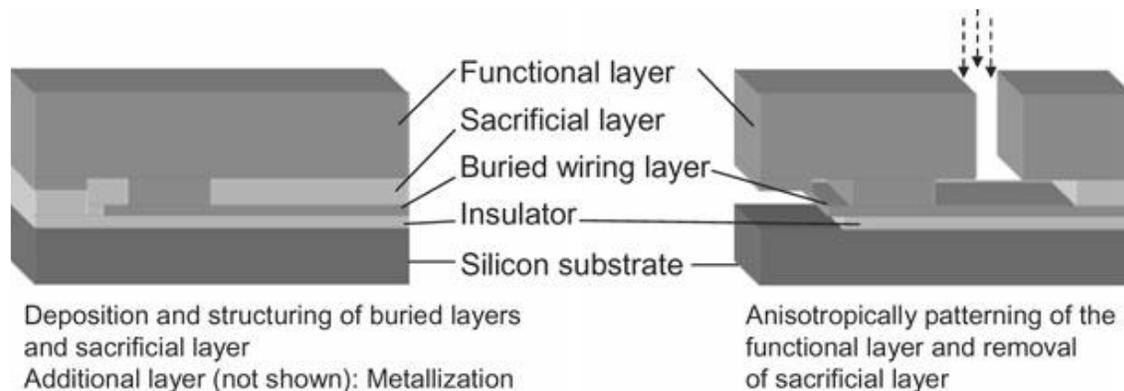
### 3.2.2. INFORMACIÓN GENERAL

Para la fabricación de un dispositivo de superficie micromecanizada, con una secuencia de capas delgadas debe ser depositado posteriormente y estructurado sobre la superficie frontal de una oblea de silicio. Esquemáticamente sobre la

sección transversal en la figura 27 ilustra el proceso de flujo y la secuencia de capas. En primer lugar, un silicio con capa de dióxido sirve para aislar eléctricamente un conductor altamente lleno de polisilicio que se utiliza como capa de cableado enterrado para la interconexión de las piezas de capa funcional. Alternativamente o además de esto, el polisilicio enterrado el material puede ser aplicado como un electrodo contador en algunos tipos de sensores. La deposición de una dióxido- de silicio subsiguiente suministra el aislamiento de la capa de cableado enterrada desde la capa funcional y al mismo tiempo sirve como la material de la capa sacrificial, para ser eliminado posteriormente en el proceso. En la parte superior de la pila, la capa funcional a base de silicio y un metal se depositan de forma individual.

### Tecnologías MEMS en el micromecanizado

La Fig. 27. ? Sección transversal esquemática de la secuencia de capas, tal como se utiliza para la fabricación de sensores inerciales: sustrato de silicio, aislantes, y capas aislantes, capa de polisilicio cableado enterrado funcional gruesa.



fuente: Christina Leinenbach <sup>1</sup>, Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup>Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany <sup>2</sup>VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland <sup>3</sup>X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany

El metal en la zona exterior contacta con el nivel de cableado enterrado en el sensor. Los Métodos de depósito son de baja presión, LPCVD, y plasma mejorada, PEVCD, deposición de vapor químico. La metalización para el contacto eléctrico es típicamente generada por un proceso de deposición por pulverización catódica. Especialmente la tecnología que se aplica para darse cuenta el policristalino de espesor y el silicio es un proceso de deposición epitaxial a temperaturas por encima de 1000 ° C, la llamada Litografía se utiliza para definir las geometrías laterales de las estructuras sobre la superficie de la oblea. El silicio metálico con elementos independientemente voladizos o resonantes las estructuras se modelan anisotrópicamente en seco con un ataque químico en el silicio funcional. Típicamente, un profundo grabado iónico, DRIE, se aplica; véase la Figura 28. Uno de los procesos más comunes es el llamado Bosch DRIE

Las estructuras móviles son finalmente liberadas del sustrato mediante un proceso de grabado superficial, donde el material debajo de la capa funcional es parcialmente eliminado selectivamente por uso isotrópico húmedo o semiseco o seco aguafuerte. El Ataque de la capa funcional se debe evitar durante esta etapa de liberación para asegurar las características mecánicas de las estructuras de detección independientemente y finalmente se obtiene una oblea granel micromecanizada, la figura 29a, o una capa de membrana fina, la figura 29b, se utiliza para la encapsulación de los elementos en los sensores al nivel de la oblea.

### 3.2.3. capa funcional

Desarrollo de tecnologías básicas y pionera con una introducción de productos MEMS en poli-silicio con capas de silicio cristalino fueron hechas por Robert Bosch GmbH, un importante proveedor de equipos de automatización. El Silicio policristalino ofrece un alto potencial como primer material funcional de la capa y se utiliza para realizar aplicaciones, tales como acelerómetros y giroscopios. Los valores bajos del estrés y el estrés gradiente de la capa estructural y esencial para el alto rendimiento del micromecanizado de dispositivos nuevos.

La estructura frecuentemente en sus aplicaciones de MEMS logra las deseadas propiedades relacionadas con el estrés.

La Fig. 28 Cuadro SEM con estructura de silicio fabricado por DRIE.



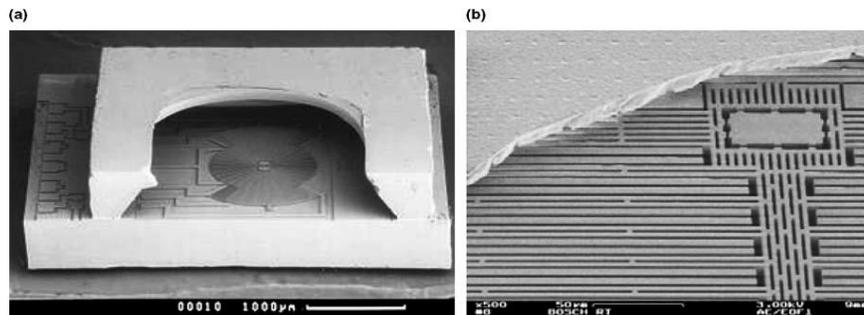
fuente: Christina Leinenbach <sup>1</sup>, Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup>Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany <sup>2</sup>VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland <sup>3</sup>X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany

Las temperaturas de fabricación son superiores a 900 ° C para asegurar el material necesario con muy buena calidad. Las capas de MEMS de policilicio son sólo unos pocos micrómetros de espesor. La deposición de estas capas es generalmente realizada por ECV-procesos. El proceso de deposición epitaxial cuenta con un policristalino con capa de silicio con un espesor de más de 10 mm. Para la deposición se utiliza un reactor epitaxial grueso polisilicio con parte de un policristalino con una delgada capa de silicio como una semilla para el proceso

micromaquinado. La combinación de dopaje y los ciclos de recocido posteriores rendimientos son optimizados con propiedades eléctricas y mecánicas para obtener múltiples capas funcionales. El estrés gradientes puede compensar entre sí para dar lugar a una muy pequeña deformación de los elementos en sensores Auto soportados después de la liberación. La disponibilidad de un material con gradientes de tensión mecánica muy bajas permite la fabricación de la superficie micromecanizada elementos funcionales Para los acelerómetros y giroscopios. Una alternativa al silicio policristalino como MEMS un material funcional de la capa de silicio policristalino es de germanio (poli-SiGe), la Figura 30a. Una ventaja clave de esta aleación es la oportunidad de reducir el alto caso de temperaturas de deposición considerablemente. Esto permite que la integración económica de los componentes MEMS en obleas que contienen electrónicamente integrada. Electrónica circuitos. La presencia de los resultados de germanio en una reducción sustancial de las temperaturas de deposición requeridas para la aleación de SiGe para crecer en la morfología de policristalino. Dependiendo de la transición de temperatura de amorfo a policristalino con textura blanda se puede bajar hasta 450 ° C en comparación con los 580 ° C para el poli-Silicio. Las propiedades mecánicas de las policristalinas como gradiente de estrés son causadas por la microestructura variable sobre la película en el espesor, como se muestra en la figura 30b. Una optimización de la estructura cristalina SiGe podría ser alcanzable por la aleación con otros elementos (reducción de la tensión en la red cristalina) o eligiendo CVD apropiada parámetros de deposición. La reducción de los gradientes de estrés permite la producción de SiGe MEMS con altas exigencias de elementos como giroscopios. Técnicas de deposición Poli -SiGe como procesos LPCVD sufren de tasas de deposición bajas (2-30 nm / min).

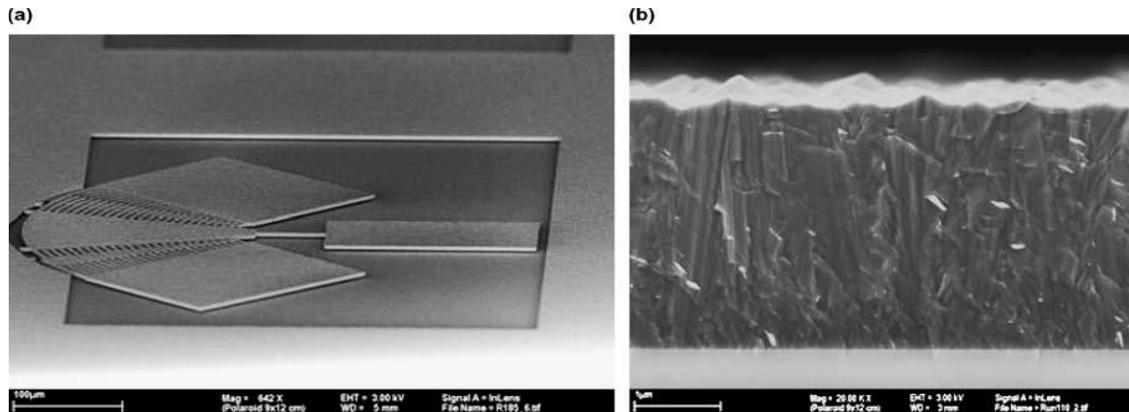
A mayor velocidad de deposición de hasta varios 100 nm / min puede obtenerse utilizando procesos CVD de plasma mejorada permitiendo una capa gruesa de deposición en la película en un plazo razonablemente corto con periodo de tiempo. En comparación con el conocido material de epi-polisilicio, la mecánica gradiente de estrés de baja temperatura fabricado poli-SiGe necesita debe ser optimizado.

Fig. 29 Cuadro SEM (a) la oblea empaquetado (mayor-micromecanizado) para la encapsulación de un sensor de giroscopio, y (b) Sensor de película delgada en encapsulación: detalle de una capa de membrana en la parte superior de las estructuras de sensores epi-polisilicio.



fuelle: Christina Leinenbach <sup>1</sup>, Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup>Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany <sup>2</sup>VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland <sup>3</sup>X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany

Fig. 30 (a) imagen SEM de estructuras de prueba policristalino de germanio de silicio para la vibración de rotación en el plano, y (b) Micrografía SEM de LPCVD-SiGe con microestructura policristalina



. fuente: Christina Leinenbach <sup>1</sup>, Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup>Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany <sup>2</sup>VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland <sup>3</sup>X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany

### 3.2.4. Capa sacrificial

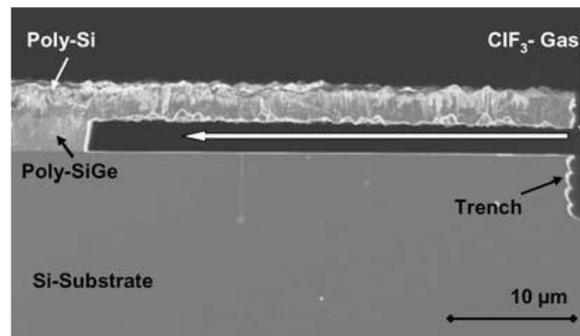
El uso de dióxido de silicio convencional como capa superficial de material con la liberación de las estructuras de silicio funcionales se logra mediante la eliminación del dióxido de silicio en un hidrógeno fluoruro (HF) grabador Base (ya sea húmedo o vapor fase). Gran cuidado se debe tomar para evitar que se pegue de elementos sensores mecánicos durante o inmediatamente después del grabado de liberación, y durante la operación del sensor: Desde fuerzas mecánicas (fuerzas Pullback de la mecánica resortes), fuerzas electrostáticas, Van-der-Waals adherencia de fuerzas y fuerzas de enlace químico aparecen en la misma escala de tamaños, extendido a partes que entran en contacto entre sí son difíciles de liberar de nuevo. Tenga en cuenta que el secado de líquidos, a través de su tensión superficial, tiende a tirar estructuras juntas y ponerlos en contacto no deseado. Para evitar la fricción estática durante o inmediatamente después de la operación de grabado cuando las técnicas dedicadas tuvieron que ser desarrolladas: Grabado fase de vapor en vapor de ácido como alternativa al ataque químico en fase líquida impide la formación de gotas debajo de las estructuras liberadas y evita por completo cualquier necesidad de secado posterior. Grabado húmedo en un líquido ácido fluoruro requiere ya sea fijaciones mecánicas de las estructuras de sensores en forma de espaciadores

fotorresistentes, etc., que pueden ser plasma incinera en un separador de plasma de oxígeno después del procedimiento de grabado y seco, el uso de secado supercrítico como el CO<sub>2</sub> evitando así ir a través de una fase líquida durante el procedimiento de secado final. Una nueva capa sacrificial y la tecnología de grabado para el micromecanizado de superficie-MEMS es poli-SiGe en combinación con polisilicio como capa funcional activo. Aplicando una técnica de grabado en seco nueva plasma basado en Cf. 3 SiGe puede ser grabado con una selectividad muy alta de hasta 5000: 1 con respecto al silicio; véase la Figura 31. Esta seca con un proceso de liberación abre nuevas oportunidades para una mayor libertad de diseño, y el aumento de un modo de rangos y la velocidad, y ofrece compatibilidad total a la mayoría de los materiales dieléctricos y de metal, y para integración con circuitos electrónicos en el mismo chip. El uso de SiGe como material sacrificial basada en silicio vs. Polisilicio no exige protección explícita de silicio estructuras funcionales por capas delgadas. Gracias a la alta selectividad entre ambos materiales. Esto, junto con la extremadamente alta en virtud de grabado velocidad y alcance de grabado, amplía considerablemente la cartera de proceso para la fabricación de la novela surgido sistemas micromaquinados.

### 3.2.5. Micromaquinado Superficial

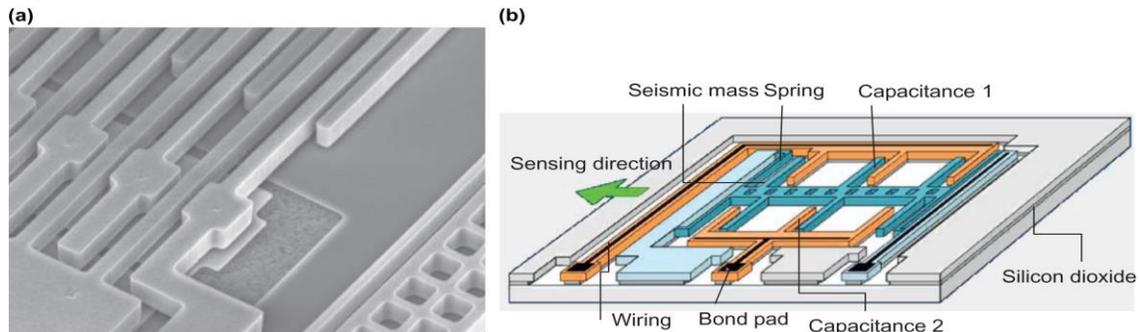
Hoy en día una tecnología preferida para superficie micromecanizado sensores utiliza alrededor de 10 a 20 poli-micras de espesor o monocristalino silicio para las estructuras activas. Los componentes de disposición de la masa y estructura de peine que fabrica Bosch DRIE, que ha alcanzado un alto nivel de precisión y madurez en los últimos años, impulsado principalmente por aplicaciones como el acelerómetro y el giroscopio. Como ejemplo, la Figura 32a muestra una imagen SEM de

La Fig. 31 sección transversal SEM de vigas autoportantes hechas de capa funcional de polisilicio en la parte superior de poli-SiGe sacrificial capa después de estructuración por DRIE y bajo grabado la capa de SiGe en CIF<sub>3</sub> gas para la liberación estructural.



fuelle: Christina Leinenbach <sup>1</sup>, Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup>Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany <sup>2</sup>VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland <sup>3</sup>X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany

Fig. 32 Acelerómetro de Robert Bosch GmbH: (a) los detalles de la estructura, (b) la estructura esquemática.



fuelle: Christina Leinenbach <sup>1</sup>, Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup>Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany <sup>2</sup>VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland <sup>3</sup>X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany

Un acelerómetro airbag frontal de Robert Bosch GmbH fabricado en una tecnología de polisilicio 10-micras de espesor. Los espacios entre los dedos entrelazados sólo 2,5  $\mu\text{m}$  de ancho, lo que resulta en una capacitancia base de la disposición de condensador diferencial en el orden de 0,5 a 1 pF. Los Cambios de capacitancia para la aceleración de rango completo son típicamente un orden de magnitud más pequeño.

Figura 32b ilustra el principio de funcionamiento de esta tipo de acelerómetro: la sísmica Aceleración mueve la masa fuera de posición y cambia los vacíos de la disposición de condensador diferencial peine interdigitados. Los cambios de capacitancia resultantes se convierten en una señal eléctrica. Durante el funcionamiento, la adherencia se puede prevenir topes mecánicos que limitan las zonas de superficie que posiblemente podría ponerse en contacto entre sí, por ejemplo, en una situación de sobrecarga. Además, apropiados revestimientos son ampliamente en uso como deposita plasma TEFL como capas o monocapas autoensambladas (SAMs) exhibiendo la energía superficial muy baja, al perfil t de su reducción de las fuerzas de adhesión en varios órdenes de magnitud. En caso deponerse en contacto el restante fuerzas de adhesión son fácilmente superados por la retirada las fuerzas de los resortes mecánicos.

### 3.2.6. Conceptos de integración

Integración monolítica parece ser una buena opción para evaluación de sensores capacitivos en el micromaquinado de superficie, dados sus valores de capacidad baja de base (en el orden de 0,5 pF), si se necesita una alta sensibilidad y resolución. Las pequeñas capacitancias son una consecuencia inmediata del enfoque superficial micromecanizado, con tamaño y espesor de la capa. La decisión de ir a la integración es aún más el apoyo de reducir las tendencias nuevas agresivamente la orientación del tamaño del núcleo de sensor, por

ejemplo, hacia los 50 \* 50 m<sup>2</sup>. En un proceso de IC, superficie es conseguir una acumulación de costos a través de hasta 30 niveles de enmascaramiento. Rendimiento Chip, es decir, el número total de fichas funcionales por oblea, directamente determina el precio de chips final. La integración de un sensor proceso en un proceso de IC añade necesariamente al chip tamaño, reduce el rendimiento total (más de gran tamaño, el fracaso de chips más alta en riesgos), y aumenta la complejidad y los costos de proceso total. Los mayores costos resultantes tienen que competir con los esfuerzos adicionales para los esfuerzos de unión de montaje y cables en una solución de dos chips - siempre que la solución de dos chips puede cumplir con los requisitos de rendimiento. Hay algunas ventajas en los conceptos de integración híbridos: Integración de un enfoque modular; ambos sensor y la electrónica pueden ser desarrolladas y procesadas por separado, lo que reduce el tiempo y los costes de desarrollo, riesgo y tiempo de salida al mercado. Esto incluye la flexibilidad de fácil cambiar a una nueva generación de sensores elementos o una nueva generación proceso de IC, que tiene tantos procesos completamente disociados. Además, la flexibilidad con respecto a los envases del sensor es alta en una serie de oportunidades de ambos para el envasado de sensor interior y exterior. La elección es mucho más restringido si la compatibilidad con un delicado rodea área de circuito debe ser mantenida en forma hermético los envases de los núcleos de los sensores como parte de un primer MEMS concepto de integración apunta a una dirección completamente nueva de la tecnología que se encuentra en su camino a entrar en el mercado para los dispositivos de sincronización como una aplicación. Esta tecnología de punta, probablemente, pueden cambiar los pros los contras de la integración monolítica en el futuro para una más amplia gama de aplicaciones, incluyendo sensores inerciales.

### **3.2.7. interacción monolítica**

Los giroscopios son en la mayoría de los casos construidos como soluciones híbridas hoy en día, con el sensor y la electrónica como dos chips separados. Con fuerzas de Coriolis es muy pequeña, la electrónica circuito de evaluación tiene que resolver cambios de capacitancia del orden de unas pocas decenas de atto faradios (AF). Estas son extremadamente pequeños cambios de capacitancia están ocultos por parasitaria capacidades del orden de 10 pF, principalmente de la realización de líneas, grandes bolandista, alambres de bonos, y la EMI diodos de protección para las entradas ir amplificando. Obviamente, estos grandes parásitos representan una limitación significativa al rendimiento alcanzable del giroscopio. Monolítico integración ofrece oportunidades para la reducción de parásitos en más de un orden de magnitud, hasta por debajo de 1 pF, con un aumento correspondiente en el rendimiento del sensor (omisión de zonas de soldadura, cables y la red de protección de entrada, junto con los nuevos conceptos de circuitos de banda base como evaluación), principalmente con respecto relación señal-ruido a. Para giroscopios puramente superficiales-micromecanizada, dado sus pequeñas dimensiones y capacidades, la integración monolítica es una opción potencial de ser no se considera principalmente por el costo pero para los argumentos de rendimiento que se especifican.

### 3.2.8. MEMS metálicos

### 3.2.9. Funciones de los metálicos en MEMS

Hay diferentes papeles para películas delgadas metálicas en MEMS.

Quizás los más importantes se pueden enumerar como de la siguiente manera:

Microespejos para pantallas de proyección RF-interruptores y condensadores variables Insertos de molde

El dispositivo que hace Texas Instruments un líder para empresa en el mercado de MEMS es la Micromirror Digital. Dispositivo (DMD), un componente clave en DLP ® proyectores. Se basa totalmente en MEMS metálicos, y la miniatura espejos y sus materiales de apoyo están hechos de aleación metálica en lugar de silicio. La razón principal del uso de metales en esta solicitud es que la alta variedad de temperaturas (400 ° C) no son toleradas cuando los dispositivos están integrados monolíticamente sobre CMOS totalmente elaborados obleas de memoria. Por supuesto, los espejos también necesitan estar mejores reflectores de óptica que el silicio es. Otro campo donde se necesitan materiales metálicos es RF-MEMS, pero por razones diferentes de las indicadas arriba. La conductividad eléctrica debe ser mayor en Aplicaciones de RF que los semiconductores pueden ofrecer. Por lo general, se necesita como alta conductividad posible en partes donde se lleve corriente de RF. Las capas también tienen que ser relativamente gruesa, a menudo varias micras, dependiendo de la frecuencia de operación y aplicación. Alta -Precisión, alta relación de aspecto - normalmente, inamovible - Las partes pueden estar hechas de diversos materiales utilizando una método llamado LIGA. Se basa en la fi llenado un 3D estructura por el metal galvanizado. Técnicas como la LIGA son, sin embargo, están más allá del alcance de este libro.

### 3.2.10. Propiedades importantes de Metales en

Aplicaciones MEMS

### 3.2.11. Conductividad Eléctrica

Está claro que la conductividad eléctrica de los semiconductores no es satisfactorio para todas las necesidades de los MEMS. La mayor parte conductor prominente para MEMS basado en buenos conductores es RF-MEMS. La pérdida de inserción se encuentra en un aceptable nivel en varios casos sólo si los metales nobles o de aluminio son usados. El aluminio es favorecido si el procesamiento tiene que ser completado en un aferrante compatible con dispositivo activo (CMOS) la integración; de lo contrario, el oro o cobre son buenos candidatos. Resistividades eléctricas para algunos metales relevantes en MEMS.

### 3.2.12. Procesamiento a baja temperatura

A veces las estructuras MEMS tienen que ser completado para más materiales delicados o discos de dispositivos que no toleran altas temperaturas de procesamiento. Metales, en contraste con semiconductores dopados y activados, pueden ser depositados en o cerca de la temperatura ambiente, por ejemplo, por pulverización catódica deposición o galvanoplastia. La Baja temperatura trae a lo largo de la posibilidad de utilizar capas de polimérico en lugar de óxido de silicio, y plasma de oxígeno para su remoción. Esta propiedad se utiliza con éxito en la industria manufacturera la DMD lo que simplifica el embalaje dispositivo y mejorar el rendimiento las capas de poliméricas se pueden dejar en colocar durante el cortado en dados de oblea y eliminado en una etapa tardía del proceso de flujo, a veces incluso después de montar en el paquete de capas.

Fig. 33 Propiedades de películas policristalinas varían con película y el espesor debido al crecimiento del grano gradual.

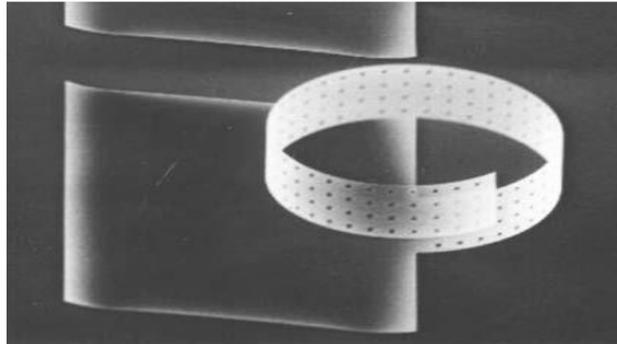


fuelle: Christina Leinenbach <sup>1</sup>, Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup>Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany <sup>2</sup>VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland <sup>3</sup>X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany

### 3.2.13. la importancia de controlar La microestructura

Todos los metales elementales son policristalinos a temperatura ambiente. Durante la deposición de nucleación inicial toma colocar en los centros localizados y los cristalitos gradualmente creciendo mientras que los ingresos de deposición. Estructura de la película es casi amorfa en las primeras etapas, mientras que bien ordenado hacia la parte superior de la película; véase la Figura 33. Tal evolución de la final de la estructura película resultados en mecánica propiedades que dependen del espesor de película. Además, las propiedades de las películas policristalino fi menudo varían en diferentes partes de la cámara de procesamiento debido a las variaciones en el ángulo efectivo de incidencia de la deposición y el bombardeo de átomos e iones. Microestructural variación es reflejar muchas propiedades importantes, desde el punto de vista de MEMS, como el estrés.

Fig. 34 gradiente de tensión vertical provoca una deslaminada a cada curva.



fuelle: Christina Leinenbach <sup>1</sup>, Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup>Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany <sup>2</sup>VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland <sup>3</sup>X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany

#### 3.2.14. fatiga

Una propiedad muy importante para metálica autoportante a estructuras o membranas es el estrés. La membrana debe tener una tensión residual biaxial bajo y un gradiente de baja tensión en la dirección vertical. De lo contrario, la membrana se doblará hacia arriba o abajo, lo que resulta en un gran cambio en la tensión de accionamiento. A veces, las vigas desaminadas del sustrato enrollar severamente (Figura 34). En películas de pulverización depositada, la película neta el estrés es una función de una multitud de parámetros de proceso, de los cuales probablemente el más importante es la masa atómica del metal objetivo en relación a la de la gas de pulverización catódica ( $m_{\text{target}} / m_{\text{gas}}$ ), generalmente argón. Metales ligeros películas tienden a estar bajo tensión de tracción; metales pesados, compresión subrayó. El mejor parámetro de ajuste para el estrés controlado es la presión de argón. El aumento de la presión impulsa la película hacia el estado de tensión, aunque por lo general de una manera muy no lineal. Empíricamente, una transición Se ha observado la presión, dependiente  $m_{\text{target}} / m_{\text{gas}}$  y la configuración del sistema de pulverización catódica, donde el cambio estructural relativamente abrupta tiene lugar (Figura 35). Cuando pulverización catódica se lleva a cabo por debajo de la transición la presión, el bombardeo de argón intensivo del cultivo resultados  $f_{\text{Im}}$  de compresión; encima de eso, las colisiones en fase gaseosa inhibir tales "peeling atómica". Dado que el promedio ángulo de incidencia de los átomos de bombardeo también es influyente, rara vez es posible obtener una buena uniformidad de la tensión sobre todo el lote en grandes reactores discontinuos. Sola oblea pulverización catódica herramientas con un objetivo mucho mayor que la oblea ofrece un mejor control del estrés para MEMS. En galvanoplastia el estrés película puede ser un problema grave también. Como en el caso de pulverización catódica, las tensiones han sido no observado a

ser de origen térmico, pero solamente un intrínseco. Los metales de transición parecen estar en tensión más elevada. Consejos prácticos en el control de las tensiones en películas de parte en galvánico.

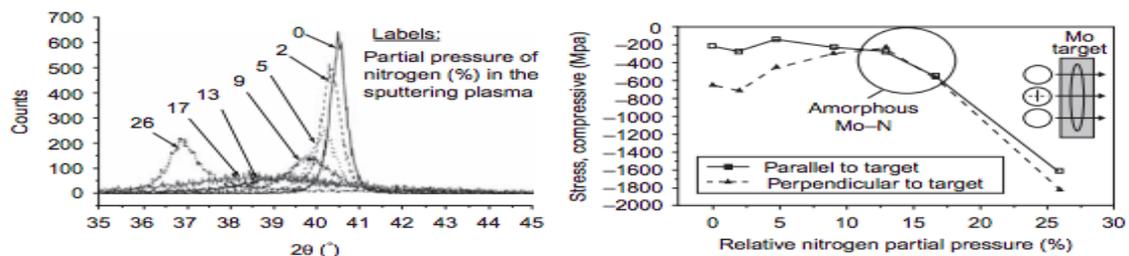
### 3.2.15. coeficientes de expansión térmica

El ciclo térmico de las películas de metal fi es prácticamente inevitable. Deposición de película, pasivación, y el embalaje llevará a cabo a temperaturas elevadas. Después de enfriar abajo se acumulan tensiones térmicas, más el más grande es la diferencia entre el coeficiente de térmica de expansión (CTE) de la película respecto a la de la sustrato. Desafortunadamente, los mejores conductores eléctricos difieren más en ese sentido a partir de silicio. A Veces, específicamente en el caso de aluminio que tiene un bajo punto de fusión punto, los esfuerzos térmicos relajarse mediante la generación de salientes (montículos, barbas). Puede cortar un aire vacío en un dispositivo MEMS.

### 3.2.16. amorfos metálicos Aleaciones

Como se discutió anteriormente, es muy culto difícil para controlar en, la microestructura, y por lo tanto propiedades, de policristalino fi metálico LMS reproducible, especialmente en grandes reactores discontinuos. El estrés no sólo varía en las diferentes partes del reactor, pero también puede ser de varios cientos de MPa diferente en una sola oblea cuando se mide a lo largo de direcciones perpendiculares. Una posibilidad de eludir el problema es el uso de aleaciones metálicas amorfas. Dado que todos los metales elementales sólidos son policristalino a temperatura ambiente, los más simples metálicos amorfos materiales son aleaciones binarias. Cuando dos disímiles elementos están entremezclados en proporciones que no puede ajustarse a un compuesto, pueden constituir un

Fig.36. Cuando Mo - N películas se depositan entre 13% y 17% de nitrógeno en el gas de pulverización catódica, espectáculos de difracción de rayos X estructura amorfa; (B) las mismas, composiciones amorfas (13 a 17% de nitrógeno en el gas de pulverización catódica) muestran la distribución de tensiones uniforme sobre la oblea, no depende de la dirección de medición del arco.



fuelle: Christina Leinenbach <sup>1</sup>, Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup> Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany <sup>2</sup> VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland <sup>3</sup> X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany

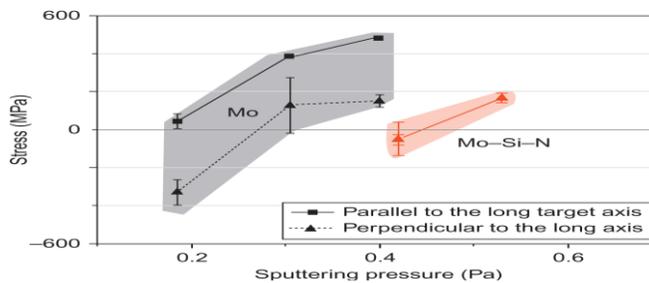
Aleación amorfa. Hay reglas reportados en la literatura según el cual la formación de la amorfo la estructura se puede predecir Un ejemplo de aleaciones amorfas binarias es la película formada por pulverización catódica de molibdeno en una que contiene nitrógeno ambiente con la concentración de nitrógeno entre Mo y. Mo 2 N, 0 n 33% en N; véase la figura 36. Ternarios y más aleaciones complejas pueden tener más estabilidad mejorada con temperaturas de cristalización acercarse o superior a 1000 ° C. De éstos, por ejemplo, Ta - Si - N y Mo - Si - N han sido probados en las estructuras micromecánicos y dispositivos.

### 3.2.17. Micromaquinado de Superficie base-SOI-Wafer

### 3.2.18. beneficios de SOI Obleas de Superficie

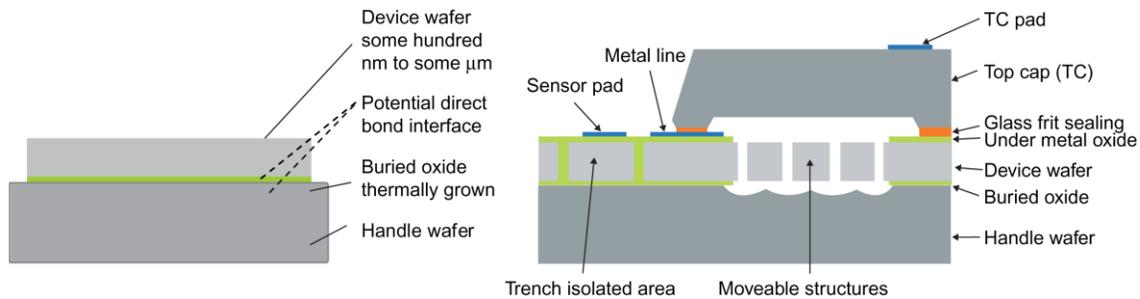
Además de la superficie basado en capas superficial tecnologías de micromecanizado introducidas hasta el momento, que utilizar silicio policristalino, silicio-germanio, o metales como capas activas mecánicos, superficie basado SOI-oblea.

Fig. 37. películas de molibdeno policristalino fi muestran 300-400 MPa diferencia en el estrés valores medidos en dos perpendiculares instrucciones de la oblea, mientras amorfa Mo - Si - N películas no muestran diferencia. Es imposible para sintonizar la antigua en un cero estrés estado, pero para este último es sencillo.



fuelle: Christina Leinenbach <sup>1</sup>, Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup> Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany <sup>2</sup> VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland <sup>3</sup> X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany

Figura 38 Relación de SOI configuración de la oblea a la superficie estructura micromecanizado.



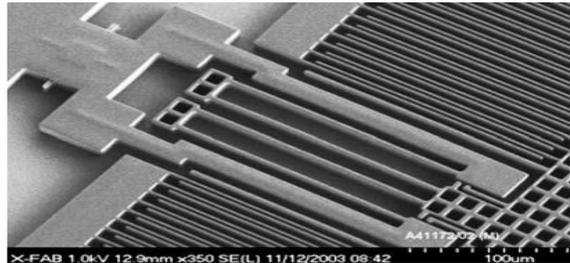
fuente: Christina Leinenbach <sup>1</sup>, Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup> Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany <sup>2</sup> VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland <sup>3</sup> X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany

### 3.2.19. Tecnología

La tecnología de micromecanizado de superficie basado SOI-oblea- ha sido desarrollado para sensores inerciales capacitivos. Ello proporciona una lectura capacitiva del movimiento de masas sísmica como la señal del sensor, sino también la actuación electrostática, de manera que es adecuado para sensores de aceleración y vibración así como para microsistemas complejos tales como giroscopios. Para la realización de las estructuras mecánicas complejas (masa sísmica, las unidades de peine, condensadores de lectura), trincheras y los agujeros están grabados anisotrópicamente en el 15-micras de espesor capa de dispositivo de la oblea SOI, hasta el óxido enterrado, conservando la forma de la mecánica. Por esta isotrópica estructuración de silicio, el proceso avanzado de Silicón Etch se utiliza perpendicular a darse cuenta paredes laterales lisas que posteriormente actúan como condensador placas en la aplicación. Para el control de la forma avanzada de todas las estructuras, un submicron profunda exposición de pasos precisos se utiliza. Esto proporciona una alta precisión en general, y en particular, el buen juego en la mecánica diferenciales como usado a menudo en los giroscopios. La distancia mínima entre las placas del condensador es definida en las reglas de diseño como 2  $\mu\text{m}$  permitirá grabado reproducible, bien controlado. Así que finalmente, una relación de aspecto de las trincheras y de la placa de condensador se alcanza 1, que es una muy buena: altura a una distancia de 7,5 valores para la fabricación capacitiva de alto rendimiento sensores. Con el fin de liberar las estructuras mecánicas, las paredes laterales de las estructuras de silicio grabadas al agua fuerte se pasaban con óxido de CVD, y el óxido enterrado se abre en la parte inferior de las trincheras. Mediante el uso de ataque isotrópico en el silicio mango oblea, las estructuras son entonces bajo-grabadas y sus extremos en libertad. Durante este grabado paso, las estructuras mecánicas esenciales se embalan en un óxido protector todo alrededor, por lo que no son atacadas de ninguna manera. En este proceso, la estructura define el ancho a una estructura

se convierte en móvil si es menor que 4m o permanece fija mayor de 30 m en todas las direcciones.

Figura 39 micromecanizado superficial basada en el Ejemplo de la estructura de MEMS realizado por SOI-gofres.



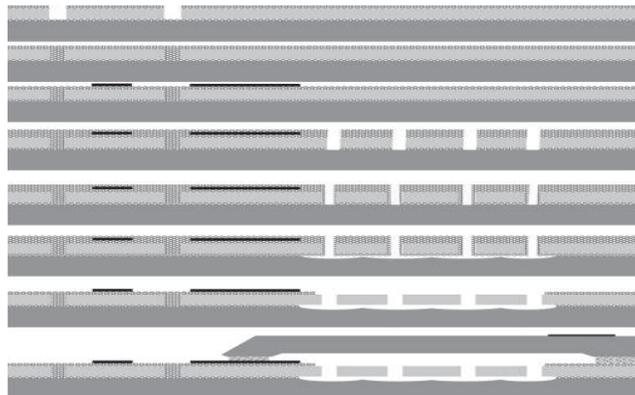
fuelle: Christina Leinenbach <sup>1</sup> , Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup> *Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany* <sup>2</sup> *VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland* <sup>3</sup> *X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany*

### 3.2.20. Características Diseño y Apoyo Especial

El micromecanizado superficial basada SOI-oblea introducido proceso es una fundición en MEMS listas para usar Tecnología ofrecido por Fundiciones X-FAB Semiconductor AG., Descrito por el proceso y la regla de diseño especificaciones. El proceso de especificaciones contiene toda información relacionada con la oblea-proceso requerido en el proceso de diseño y para el montaje. El proceso principal de flujo, incluyendo sensores y tapado oblea así como su vinculación, se describe, y además, el adaptador de conexión de alambre configuración. Esas especiales proporcionan datos sobre la partida SOI oblea, espesores de capa, las condiciones de operación (voltajes, densidades de corriente), los parámetros de control de procesos, y estructural / geométrica, eléctricos y parasitarias parámetros. Las definitivamente manuales regla de diseño define todo el proceso capas y describe las reglas para estas capas, utilizando anchos mínimos tales como para las estructuras mecánicas, o fi anchos como para las trincheras de aislamiento, y separaciones mínimas como en el liderato de metal a través de conductos bajo la fritada de vidrio. Además, las relaciones de las capas de procesos entre sí se definida por recinto, la superposición de extensión, y las reglas de separación. Incluso si el proceso de micromecanizado de la superficie es, en principio, la capa de relacionada y el carácter 3D de los MEMS resultantes estructura está mayormente define por el espesor de la capa de dispositivo y menores de grabado, geometrías muy complejas isotrópicos son típicos que no puede ser completamente controlado en un proceso de diseño basado en capas.

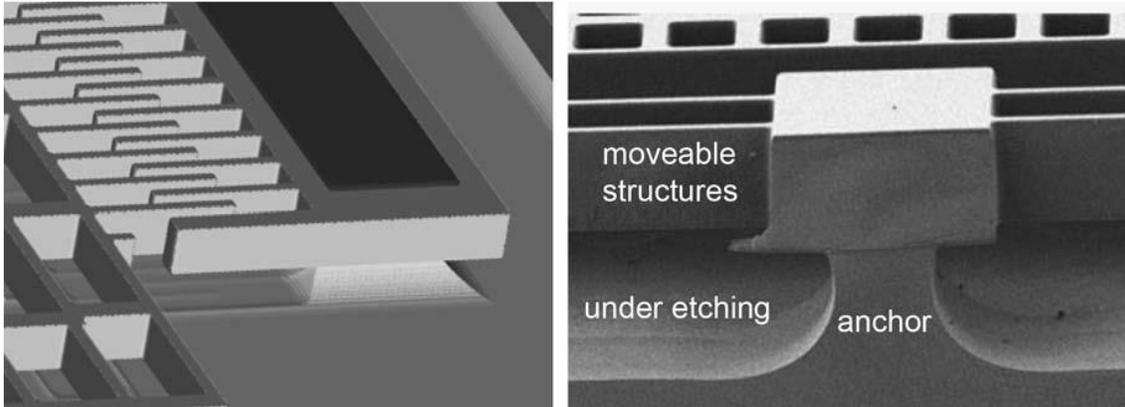
Por lo tanto, la superficie proceso de micromecanizado fue modelado usando un proceso herramienta de simulación (Cobertor, Inc., MEMulator™), que permite la transición de un diseño GDSII fi I en un modelo 3D para ver los elementos de diseño críticos y a optimizar éstos para la fabricación. Figura 41 muestra un ejemplo y una comparación con una estructura real. Con el fin de construir un diseño de sensor inercial capacitiva, por ejemplo, para la fabricación de giroscopios, especial elementos de diseño, como las unidades de peine, anclas, líneas de contacto de silicio anclados o fijaste-movido elementos de transición son necesarios en cada caso. Estos elementos son parte de la regla de diseño pliego de condiciones. Ellos son descritos como reglas dispositivos bajo consideración para los aspectos tecnológicos de este tipo de configuraciones especiales configeométricas. Como un ejemplo, el elemento de accionamiento peine ser introducido aquí. La figura 42 muestra el principio elaboración de este tipo de unidad peine junto con las reglas principales. MEC es una abreviatura de la mecánica capa de estructura. W1MC es el ancho del peine conducir dedo y tiene que estar en el rango de 2 m (fotolitografía y la resolución de grabado) a 6 m (para seguros lanzamiento bajo-grabado). La distancia mínima entre dos estructuras de silicio mecánicas es S1MC, define como 2 m. Para evitar la flexión y pegue de los dedos de accionamiento peine durante el proceso de obleas y operación, el dedo longitud está limitada a 75 veces el ancho del dedo, es decir, a 150 m en el caso de uso más frecuente de 2 m de ancho dedos (descartar W4MC), pero puede ser de hasta 450 m de 6 m dedos en todo el. La línea anclada de la parte fija de la unidad de peine debe ser de 35 m de ancho para evitar completa bajo-agua fuerte. Mediante el uso de estos tipos de dispositivo regla, estructuras complejas se dan a los diseñadores de MEMS para lograr un proceso de diseño rápido, pero proporcionando rangos de medidas de diseño (por ejemplo, 2 - Ancho de 6 m dedo) y normas complementarias vinculadas a éstos por las fórmulas de cálculo, flexibilidad de diseño está garantizada. Vease figura 40, 41

Figura 40 micromecanizado superficial Proceso general flujo de la tecnología de fundición para giroscopios y otros sensores inerciales.



fuelle: Christina Leinenbach <sup>1</sup> , Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup> Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany <sup>2</sup> VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland <sup>3</sup> X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany

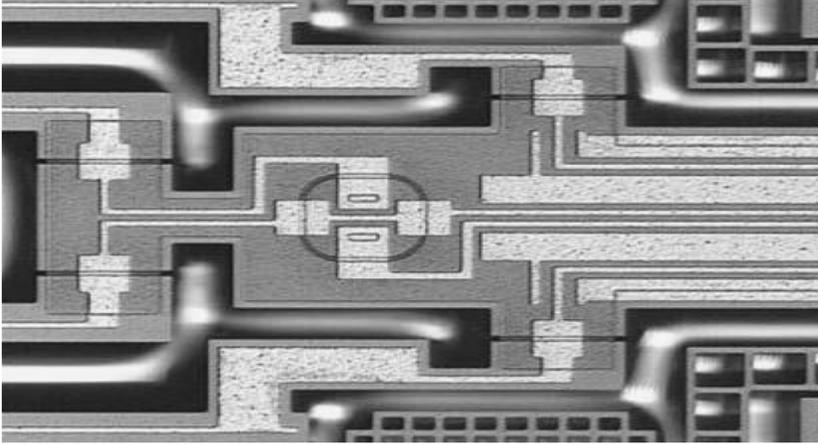
La Fig. 41 Modelo 3D de un giroscopio de estructura y la comparación con la realización.



fuelle: Christina Leinenbach <sup>1</sup>, Hannu Kattelus <sup>2</sup> and Roy Knechtel <sup>3</sup> <sup>1</sup> Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany <sup>2</sup> VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland <sup>3</sup> X-FAB Semiconductor Foundries AG, Erfurt, Germany

### 3.2.21. calificación

La tecnología Micromaquinado superficie es calificado para aplicaciones de automoción. Mediante el uso de pruebas basado en JEDEC JP001 [36] norma pruebas de envejecimiento acelerado, tales como los ciclos de temperatura (65 ° C / 150 ° C), autoclave (121 ° C / 100% HR), y hornear a alta temperatura (175 ° C), una alta fiabilidad con respecto tanto eléctrica y propiedades micromecánicas ha sido comprobado. Adicional Sobrecarga de choque y prueba de vibraciones mecánicas confirmó robustez de las estructuras mecánicas, que se llega por las estructuras de tope en el trabajo activo direcciones y parachoques en obleas de tapado, los cuales se describen en la norma de diseño pliego de condiciones. Finalmente, la interfaz de unión de obleas de los chips giroscopio se puso a prueba en cuanto a fuerza de unión (prueba de tracción espárrago) y hermeticidad (comportamiento de resonancia). En ambos casos, la alta fuerza de adherencia y hermeticidad encontrado después procesamiento no se influencia de las tres fiabilidades ensayos mencionados anteriormente. En consecuencia, la tecnología puede ser utilizada para aplicaciones de alta calidad exigentes tales como giroscopios de automoción, incluso si un final Todavía se requiere calificación dispositivo. Figura 42



La Fig. 42 Complejo oportunidades de cableado de metal en la superficie la tecnología de fundición micromecanizado: (a) el cruce de alambre a través de LLED la capa de dispositivo de aislamiento de trincheras aísla, b) el cableado metálico complejo cerca de la estructura mecánica.

#### 28.4.5 Campos de aplicación

El proceso de fundición MEMS descrito basado en SOI obleas se está ejecutando en una línea de MEMS, el uso de equipos modernos (por ejemplo, paso a paso para la exposición del tamaño 2 micro estructuras). Se puede utilizar no sólo de alta calidad y aplicaciones muy precisas, sino también para giroscopios dirigidos al mercado de consumo de bajo costo. Además de los giroscopios, la tecnología es muy adecuada a otros sensores inerciales tales como la aceleración o vibración manómetros, mientras que puede también ser utilizado para los sensores térmicos o Resonadores MEMS. Los campos de aplicación FI de la final MEMS elementos son también muy amplia. Debido a un alto rendimiento y el nivel de confiabilidad y un alto grado de libertad en el diseño, pueden ser utilizados para la automoción, médica, consumidor, industrial, y otras aplicaciones. El single capa de silicio cristalino activa de 15 m de espesor ofrece excelentes propiedades mecánicas y fiabilidad para todas las aplicaciones de MEMS. Proporcionar un movimiento descrito calificado en tecnología MEMS de fundición es una contribución muy exitosa para le realidad al comienzo de la normalización en MEMS procesamiento.

#### 28.4.6 Alternativa SOI-Wafer-Based Micromaquinado de tecnologías

Además del proceso descrito, también hay otra Tecnologías basadas SOI-oblea. El óxido de enterrado de la oblea SOI se puede utilizar como una capa superficial. Después de la creación de estructuras mecánicas estos pueden ser liberados por isotrópico (humos) grabado del óxido enterrado. Esto es un clásica bajo el grabado de nuevo dependiendo de la anchura se movieron, y estructuras fijas se pueden realizar (Figura 43). Sin embargo, el enfoque adolece de dos graves desventajas: La brecha proporcionada por el eliminado enterrado óxido de unos pocos 100 nm

de espesor es muy pequeño, de modo que fina efectos de amortiguación estos son realmente críticos. Además, pegándose de las estructuras hacia abajo sobre el mango oblea puede fácilmente producirse en relación con la tensión residual, humedad, o cargos. Vease figura 44

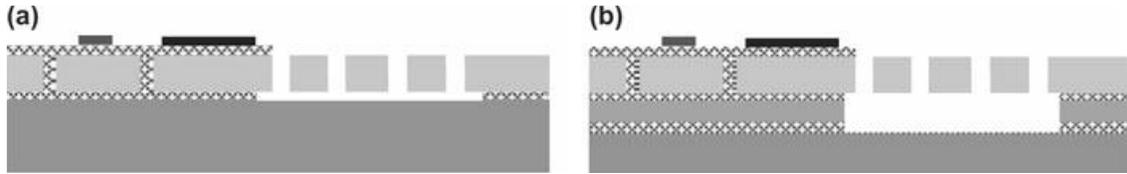
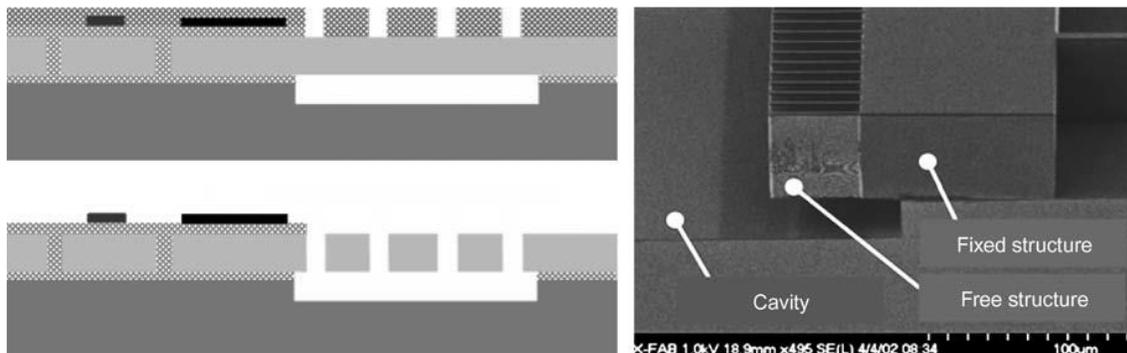


Figura 43 tecnologías de micromecanizado superficial a base de oblea SOI-alternativos, (a) el uso de óxido enterrado como capa sacrificial, (b) doble SOI estructura, bajo-grabado en primera capa fina de silicio. Micromaquinado Superficie.



La Fig. 44 micromecanizado en superficie usando obleas SOI pre estructurado.

En definitiva conclusión, ninguna de las variantes tecnología introducida puede ser recomendada como la mejor. Más bien se debe verificar que el proceso de micromecanizado superficial esta mejor con la aplicación, su rendimiento exigido, el dispositivo de destino tamaño y precio. Sin embargo, la fundición a base de SOI-oblea La tecnología proporciona el más alto grado de libertad y flexibilidad en el diseño y la tecnología.

### **3.3. MICROFRESADO DE POLIMEROS BIOCOMPATIBLES**

**(POLYMER MICRO-MILLING BIOCOMPATIBLES POR Christina Leinenbach, Hannu Kattelus Roy Knechtel)**

#### **3.3.1. Resumen**

En este artículo se presentan resultados de una investigación llevada a cabo en micromecanizado de polímeros biocompatibles. Se describen los procesos de fabricación de micropartes con el fin de mostrar los niveles de precisión y escalas dimensionales alcanzables con un centro de micromecanizado Kern Evo. Adicionalmente, se muestran los resultados de una serie de pruebas de microcorte realizadas con fresas de tungsteno de 100  $\mu\text{m}$  de diámetro sobre probetas de PMMA (Polimetilmetacrilato), grado médico para determinar los parámetros que minimizan el tamaño de las rebabas generadas. Para caracterizar tanto superficies generadas, como condiciones iniciales y finales de las herramientas se emplearon técnicas de microscopía óptica y electrónica. Los resultados referentes a las primeras pruebas de mecanizado indican que en el control de las características dimensionales se deben vigilar aspectos como la profundidad de corte establecida, el método de sujeción seleccionado y la tolerancia de alineación de la pieza; incluso deben controlarse las condiciones ambientales del recinto donde opera el equipo.

Palabras clave: micromecanizado, microcorte, micropartes, polímeros biocompatibles.

#### **3.3.2. INTRODUCCIÓN**

En este artículo se describen el proceso y los parámetros de fabricación utilizados para la generación de micropartes, con el fin de establecer escalas dimensionales y de precisión alcanzables en microfresado utilizando un centro de mecanizado de ultra-precisión Kern Evo. Se describen la metodología y resultados experimentales de una serie de pruebas de microcorte, realizadas en un polímero biocompatible para determinar velocidades y avances que reduzcan el tamaño de la rebaba producida en la pieza mecanizada.

Con la adecuada selección de parámetros de corte se busca minimizar la rebaba en la superficie generada y además reducir la probabilidad de fractura súbita de la herramienta. Uno de los aspectos críticos en el micro-mecanizado es el control de falla de las herramientas, pues debido a su reducido tamaño, la inspección visual

resulta compleja y requiere dispositivos adicionales, tales como: medición por láser y microscopios de gran capacidad. Asociado a los pequeños tamaños de las herramientas de corte, están las altas velocidades de rotación del husillo que establecen una supervisión acústica igualmente compleja. Adicionalmente, se requiere un control estricto de las condiciones ambientales durante el proceso, tales como temperatura y humedad relativa; factores importantes en el mecanizado ya que se requiere minimizar contracciones y dilataciones de la pieza, equipo y herramienta. Para los procesos mostrados en este documento la temperatura se mantuvo en  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la humedad relativa en  $35\% \pm 5\%$ .

### **3.3.3. Clasificación general de las técnicas de microfabricación**

La creciente necesidad de fabricar piezas cada vez más pequeñas y con altos requerimientos de precisión ha impulsado la manufactura de partes a lo que actualmente se conoce como miniaturización. Esta tendencia se plantea en la Ley de Moore la cual se ha extendido a procesos de remoción de material, determinando escalas de precisión cada vez más pequeñas y dimensionamiento en niveles micrométricos; además de métodos y equipos de fabricación ajustados a estas necesidades.

Aunque las técnicas de microfabricación hacen referencia a un tema de producción e ingeniería relativamente nuevo, se encuentra diversa literatura donde los expositores abordan el tema desde su perspectiva experimental y de acuerdo con su especialidad. Se hace una recopilación de las clasificaciones realizadas por algunos autores reconocidos

Es importante resaltar que todos los autores coinciden en que es necesario establecer una subdivisión para cada clasificación que se enfoque en la manipulación y empaque de las micropartes fabricadas con las técnicas mencionadas en el cuadro anterior. Asociados a estas técnicas de fabricación surgen nuevos vocablos, tales como microfabricación que hace referencia a la creación física de un producto, cuando al menos una de sus dimensiones esté en el orden de micras ( $1\text{ }\mu\text{m} \sim 0,001\text{ mm}$ ). También se introduce el concepto de microingeniería refiriéndose a la fase de conceptualización y diseño de estos productos otras definiciones que han surgido son microtecnología, microproceso y micromecanizado.

Una de las técnicas de microfabricación más difundida es el microfresado debido a su universalidad en cuanto a formas y materiales, lo que permite la generación de geometrías 3D. Volumen de producción considerable, con altas precisiones finales del orden de pocas micras. Adicionalmente posee una gran similitud con el fresado convencional (operatividad) lo que hace de su utilización menos traumática que en los casos de otras microtecnologías emergentes. En la se presenta un esquema comparativo entre las características más relevantes en el mecanizado convencional y su comportamiento al trabajar a microescala.

### **3.3.4. Micromecanizado (microfresado)**

El micromecanizado puede entenderse como el proceso de remoción de material, caracterizado por la UR "small unit removal", siendo esta el volumen o el tamaño de la parte removida de la pieza generada debido a la descarga de un pulso

Las etapas que influyen el desarrollo y éxito de la utilización de las técnicas de micromecanizado radican en el desempeño de las microherramientas, una excelente sujeción y correcta alineación de la pieza de trabajo. La sujeción debe seleccionarse de acuerdo con la dimensión y geometría de la pieza; los elementos más utilizados son bases congelantes, plastilina y cera de bloqueo, entre otros. Sin importar el método empleado debe asegurarse que la capa adicionada sea homogénea y lo más delgada posible, este espesor deberá tomarse en cuenta para el establecimiento de ceros de la pieza. La alineación se relaciona directamente con el elemento de sujeción, ya que debe determinarse una desviación máxima permitida respecto a la horizontal para establecer el origen de pieza en el eje z. En algunas ocasiones se hace necesario realizar un planeado antes de la fabricación para cumplir con el estándar de desviación.

Otros aspectos relevantes son la correcta elección de la herramienta y el proceso de mecanizado; por lo tanto, se hace necesario hacer pruebas detalladas de corte y producción para determinar las variables de corte óptimas para la pieza que se va a generar [9]. El incremento de la productividad en el aspecto de la remoción de material está restringido por los parámetros del proceso y la falla repentina de la herramienta, puesto que a medida que el tamaño de la herramienta disminuye, la rigidez también decrece, presentando grandes deflexiones al aplicar altas cargas de viruta

Los aspectos anteriormente mencionados han impulsado estudios referentes al desarrollo de modelos mecánicos (semi-empíricos) que describen el proceso de microcorte y sirven de herramienta para la determinación de fuerzas de corte, y por lo tanto, deflexiones en la herramienta; la mayoría están enfocados en el mecanizado de metales duros, como el caso de los moldes.

### **3.3.5. METODOLOGÍA**

Para las fabricaciones realizadas en el centro de mecanizado Kern Evo se utilizó como material de trabajo PMMA en lámina grado médico de 700  $\mu\text{m}$  de espesor y discos del mismo material. Para la generación de las geometrías se utilizaron fresas y brocas de tungsteno con diámetros entre 100  $\mu\text{m}$  y 2 mm. Debido a que la materia prima es en forma de láminas, se fabricaron bloques de acrílico para fijar las hojas de PMMA y de esta forma facilitar la sujeción en la prensa de precisión, además de proporcionar altura suficiente para las operaciones de corte y medición. La velocidad máxima de giro establecida para el corte fue de 20 000 r/min y un avance máximo de 750 mm/min.

Para la creación de las geometrías CAD (dibujo asistido por computador) se utilizó SolidWorks® 2007 y para la generación de las rutas de mecanizado se desarrolló un post-procesador asociado a SolidCam® 2008, lo que permite generar el código en lenguaje Heidenhain o código

### **3.3.6. Proceso de microfresado**

Aunque las geometrías fabricadas mostradas en el apartado de resultados son planares debe establecerse un proceso de fabricación adecuado para cada pieza proyectada según geometrías que la componen, dimensiones, operaciones y herramientas a emplear; un esquema generalizado del proceso.

- Descripción del equipo

El equipo empleado para las pruebas de corte es un centro de micromecanizado Kern Evo con características de ultra-precisión; su base de concreto polimérico absorbe vibraciones generadas por las altas aceleraciones y velocidades de avance que ofrece. Otras de las características más importantes de este equipo son su versatilidad para la producción de formas y geometrías, y para la fabricación de lotes en medias y altas producciones, además de la posibilidad de mecanizar un amplio rango de materiales.

### **3.3.7. Ajuste de parámetros de corte**

Para la puesta a punto del equipo se utilizó PMMA laminado; no obstante, para la fabricación de geometrías con fines biomédicos se utilizó PMMA grado médico con geometría primaria de disco y comportamiento de polímero hidrofóbico. Como ya se mencionó, el cambio de material implica la realización de pruebas de corte para determinar los parámetros óptimos, incluyendo el sentido de corte en la relación pieza - herramienta

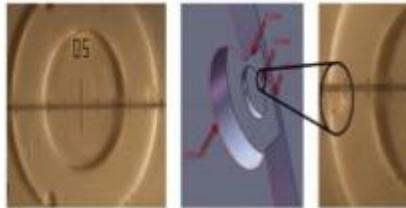
En la tabla 4 se presentan los valores de avance ensayados para mecanizar el nuevo material, usando una fresa de tungsteno punta plana (PP) de diámetro 100  $\mu\text{m}$ , con dos filos ( $z$ ) y manteniendo una velocidad de husillo constante ( $S$ ). Para el desarrollo de la prueba se realizaron una serie de ranuras a diferentes avances ( $f$ ,  $f_z$ ) y con profundidad axial constante de 50  $\mu\text{m}$ . La geometría del material es un disco con diámetro 15 mm y 2,5 mm de espesor tal como se muestra en la figura 7a.

### **3.3.8. RESULTADOS**

Se presentan características referentes a la fabricación de un logo y en la **(imagen 45)** se compara la geometría obtenida con una hormiga común (*Lasius sp.*) de tamaño habitual entre 3 mm y 5 mm, con el propósito de establecer referencia para la escala dimensional.

Para mecanizar el segmento circular se generó inicialmente un cuadrado de 16 mm de lado con operaciones de planeado, con el propósito de dar planitud a la zona donde se generará la geometría; también se especifican parámetros relevantes para el proceso y en la imagen del centro se presenta una vista de detalle de la perforación, que es enmarcada en el círculo negro. Para establecer una idea de las dimensiones de la pieza se presenta en la imagen una regla cuya separación entre líneas es de 100  $\mu\text{m}$ .

Figura 45. Segmento circular

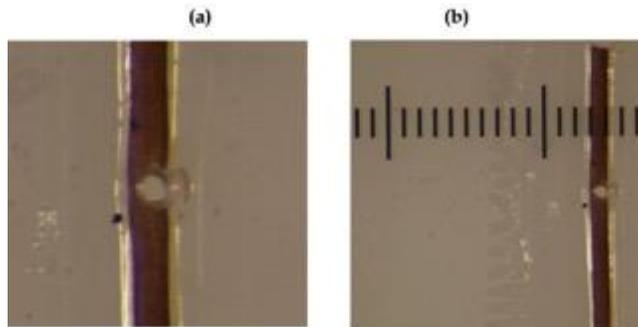


Fuente: (POLYMER MICRO-MILLING BIOCOMPATIBLES POR Christina Leinenbach, Hannu Kattelus Roy Knechtel)

El patrón de perforaciones, se desarrolló a partir de un cuadrado de 16 mm de lado fabricado mediante una operación de planeado. La separación entre líneas de la regla (100  $\mu\text{m}$ ) da una idea de la distancia entre centros y el diámetro de cada perforación.

Adicionalmente, y como una operación de prueba estándar para demostrar las capacidades del equipo, se perforó un cabello humano (diámetro  $\approx 110 \mu\text{m}$ ) con una broca de tungsteno de 100  $\mu\text{m}$  de diámetro. El resultado se muestra en la (figura 46) igualmente, se emplea una regla con separación entre líneas de 100  $\mu\text{m}$ .

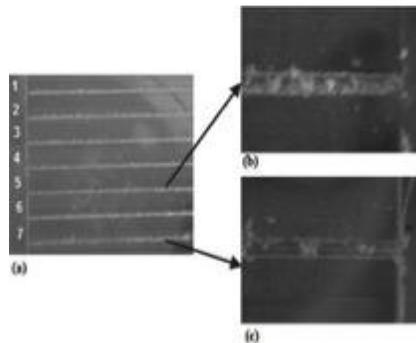
Figura 46. a. Perforacion del cabello humano b. Comparacion con regla graduada



Fuente: (POLYMER MICRO-MILLING BIOCOMPATIBLES POR Christina Leinenbach, Hannu Kattelus Roy Knechtel)

Mediante microscopía óptica se evaluó el acabado superficial en los bordes de las ranuras mecanizadas con los valores de avances presentados, con el fin de establecer las condiciones que produjeron menores tamaños de rebaba y en cuál lado de la ranura quedaron adheridas. Algunos de los resultados se muestran en la (figura 47).

Figura 47. Ranuras generadas con diferentes avances



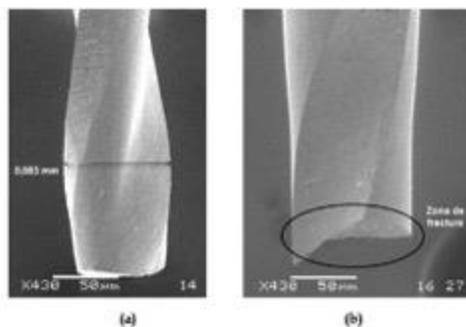
Fuente: (POLYMER MICRO-MILLING BIOCOMPATIBLES POR Christina Leinenbach, Hannu Kattelus Roy Knechtel)

Como resultado de la inspección visual se establece que las condiciones de corte empleadas para las ranuras 1 a 5 muestran una gran cantidad de rebaba en ambos sentidos de corte (concordancia - oposición); en contraste, las ranuras presentan superficies finales más limpias con una considerable minimización de rebabas cuando se generó la ranura con la herramienta trabajando en oposición.

### 3.3.9. Microherramientas

Se muestran los efectos de la reducción de escala en una fresa de tungsteno con diámetro 100  $\mu\text{m}$ . En la figura 48 se observa la geometría de la herramienta antes de las operaciones de ranurado (pruebas de corte) y en la derecha se presenta una fractura súbita sufrida durante el proceso de mecanizado de una microparte en PMMA grado médico, empleando condiciones de corte promedio establecidas en las pruebas anteriormente descritas; la falla se detectó al observar al microscopio los acabados y superficies generadas en el material de trabajo y con la posterior inspección de la herramienta.

Figura 48. fractura subita en fresa

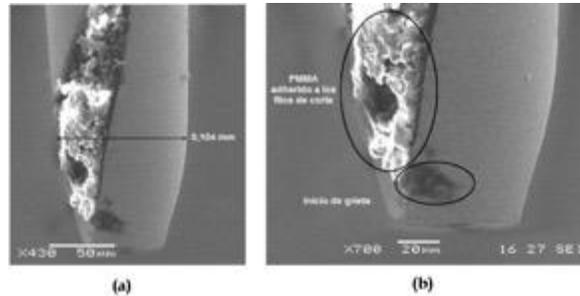


Fuente: (POLYMER MICRO-MILLING BIOCOMPATIBLES POR Christina Leinenbach, Hannu Kattelus Roy Knechtel)

Aunque el equipo Kern Evo cuenta con un medidor láser para controlar longitud y diámetro, los ciclos de medición se realizan antes de cada proceso de corte y por lo tanto no es posible detectar la falla durante el mecanizado. El monitoreo del estado de la herramienta durante el micro-mecanizado es un tema de investigación actual en el cual el Grupo de Investigación Materiales, Procesos y Diseño (GIMYP) adelanta estudios para el desarrollo de técnicas y modelos que permitan predecir el tiempo de vida de las microherramientas en función de las condiciones de corte establecidas para el microfresado de materiales biocompatibles.

Se presentan imágenes del desgaste la fresa de tungsteno de 100  $\mu\text{m}$  durante el proceso de fabricación de micropartes; la zona blanca que se observa es material de la pieza de corte (PMMA) que se ha adherido a la herramienta como producto de los parámetros de corte y a la supresión de la refrigeración durante el mecanizado, condición necesaria para lograr la geometría final y parámetros de limpieza exigidos. Un aspecto relevante de esta (**figura 49**) se muestra la pérdida total del perfil del filo lo que hace que la herramienta adquiera una forma cónica en la zona de corte, donde posiblemente se iniciará la fractura

Figura 49. Adhesion de pmma en fresa de tugsteno



Fuente: (POLYMER MICRO-MILLING BIOCOMPATIBLES POR Christina Leinenbach, Hannu Kattelus Roy Knechtel)

Al monitorear el desgaste de la herramienta y determinar el momento oportuno de cambio, se puede asegurar una geometría final constante en las piezas fabricadas, puesto que la modificación del perfil del filo de corte afecta directamente la precisión y rugosidad, incrementa vibraciones y fuerzas de corte, induciendo la generación de rebabas y por último la fractura

### 3.3.10. Microfresado de polímeros biocompatibles

En este artículo se presentan resultados de una investigación llevada a cabo en micromecanizado de polímeros biocompatibles. Se describen los procesos de fabricación de micropartes con el fin de mostrar los niveles de precisión y escalas dimensionales alcanzables con un centro de micromecanizado Kern Evo. Adicionalmente, se muestran los resultados de una serie de pruebas de microcorte realizadas con fresas de tungsteno de 100  $\mu\text{m}$  de diámetro sobre probetas de PMMA (Polimetilmetacrilato), grado médico para determinar los parámetros que minimizan el tamaño de las rebabas generadas. Para caracterizar tanto superficies generadas, como condiciones iniciales y finales de las herramientas se emplearon técnicas de microscopía óptica y electrónica. Los resultados referentes a las primeras pruebas de mecanizado indican que en el control de las características dimensionales se deben vigilar aspectos como la profundidad de corte establecida, el método de sujeción seleccionado y la tolerancia de alineación de la pieza; incluso deben controlarse las condiciones ambientales del recinto donde opera el equipo.

Las soluciones de mecanizado, dependientes de la aplicación, pueden hacer uso de alguna de las nuevas geometrías CoroDrill® de Sandvik Coromant. CoroDrill 854 y 856 han sido desarrolladas para satisfacer los estrictos requisitos de los materiales de CFRP y paquetes de aluminio más modernos, y ofrecen una duración de la herramienta larga y homogénea para satisfacer estrechas tolerancias en todo momento. El perfil geométrico de CoroDrill 854 está pensado para mejorar la calidad de la entrada y de la salida en los agujeros de los materiales con alta proporción de fibra. Una selección idónea de la broca es

fundamental para conseguir una calidad, una seguridad del proceso y un coste por agujero óptimos. Con esto en mente, la geometría en punta de CoroDrill 854 es la recomendada cuando hay problemas de astillado o desflecado, mientras que los clientes encontrarán más ventajas con el uso de CoroDrill 856 si tienen problemas de exfoliación en materiales con alta proporción de resina; esto se debe fundamentalmente a su geometría de ángulo doble.

En un principio, y para evaluar la facilidad de mecanizado, se recomienda una velocidad media del husillo de alrededor de 2.000rpm y una baja velocidad de avance. De esta manera se pueden estudiar las propiedades del mecanizado para ajustar los datos de corte o reevaluar la selección de la geometría o la calidad de la herramienta. Las exigencias de calidad superficial son crecientes y rondan el valor de 1,6 Ra; este factor junto con el índice de capacidad, CPK, afecta también a la selección de la geometría

#### **4. ANALISIS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La investigación que se realizó ha contribuido de manera muy importante para identificar y resaltar los puntos que hay que cubrir y considerar para llevar a cabo una descripción detallada de los procesos de Micro Y Nano Fabricación. De igual manera dichas tecnologías se desempeñan en el campo del micromecanizado que se encuentran en un proceso de madurez muy superior respecto a otras técnicas modernas de la tecnología de nano fabricación.

Se adquirió un conocimiento de las dos tecnologías de construcción del micromecanizado y el micromaquinado. El micromecanizado produce circuitos electrónicos en chips de silicio, y es una tecnología muy bien desarrollada. El Micromaquinado es el nombre de las técnicas usadas para producir las estructuras y partes móviles de los dispositivos microconstruidos en la actualidad.

Se determina también que las herramientas con bordes de corte redondeados generan un mejor acabado de la superficie. El estudio ha demostrado que, basándose en el estado actual de la tecnología de fabricación con respecto a través de la fabricación de micro herramientas es esencial para inspeccionar la geometría vanguardia de herramientas de fresado antes de su uso.

La industria debería desempeñar una atención especial a la calidad de micro herramientas. Un umbral más alto de la conformidad para cortar la geometría de diseño de borde debe ser establecido para proveedores de herramientas.

El uso de herramientas de mala calidad puede limitar la capacidad de la calidad de micro mecanizado y también aumentar los costos de producción.

## RECOMENDACIONES

El micromecanizado de superficie ha sido demostrado ser una alternativa atractiva a la micromecanizado mayor bien establecido de silicio. Sin embargo, el volumen y la superficietécnicas de mecanizado no sólo son divergentes o competir entre sí, sino que también ayudarán a aumentar la amplia variedad de microsensores de alta fiabilidad lotes fabricados y microactuadores en silicio y la integración de este último con la microelectrónica. Micromecanizado a granel, por ejemplo, se usa preferiblemente en aplicaciones en las que la fragilidad mecánica o las pequeñas masas de las estructuras micromecanizada de superficie son los principales inconvenientes.

Se puede llegar a involucrar a la ECCI como uno de los pioneros en formación investigativa de micro fabricación en Colombia, inicialmente en el área de Ingeniería Mecánica, debido al constante cambio y a las nuevas iniciativas industriales que han surgido a nivel mundial.

Queda en nuestras mentes la necesidad de llegar a pensar que en un futuro no muy lejano que en la universidad ECCI adquiera para la formación tecnológica del alumnado, un centro de micro mecanizado para preparar y formar a los futuros Ingenieros en una plataforma de competitividad en las tecnologías de punta actuales

## Bibliografía

(s.f.).

*Hapgood, Fred (November de 1986). «"Nanotechnology" / "Tinytech"». (s.f.).*

*Royal Society and Royal Academy of Engineering. July 2004. (s.f.).*

14-11-2007, M. p.-u.-4.-2. (s.f.). *Mecanizado por electroerosión Revista Metal-univers 6-4-2002 María del Mar Espinosa. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales UNED Madrid. Última visita 14-11-2007.*

Álvarez, O. (2007). *<http://www.monografias.com/trabajos91/el-microscopio/el-microscopio.shtml>.*

articulo. (s.f.). *Artículos de S. Herrera (p. 16) y M. Modzelewski (p. 8), en Small.*

articulo1. (s.f.). *[http://www.oocities.org/es/loitaluddita/mencer/bill\\_joy.htm](http://www.oocities.org/es/loitaluddita/mencer/bill_joy.htm).*

Coromant, S. (2006). *Guía Técnica de Mecanizado*.

*Finnish Micro & Nano Technology Network*. Archivado desde el original el 18 September 2007. (s.f.).

Foundation., N. S. (8 de 11 de 2009).

Gribbin, J., & Gribbin, M. (1997). [http://es.wikipedia.org/wiki/Historia\\_de\\_la\\_nanotecnolog%C3%ADa](http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_nanotecnolog%C3%ADa).

<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Mecanizado&oldid=79500354>. (12 de 06 de 2012).

[http://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio\\_de\\_fuerza\\_at%C3%B3mica](http://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_de_fuerza_at%C3%B3mica). (s.f.).

[http://www.mecmarin.com/proceso\\_mecanizacion.html](http://www.mecmarin.com/proceso_mecanizacion.html). (2010).

<http://www.monografias.com/trabajos82/conformado-materiales/conformado-materiales.shtml>. (24 de 06 de 2010).

investigadores. (s.f.). Gribbin, John; Gribbin, Mary (1997). *Richard Feynman: A Life in Science*. Dutton.

L. N. López de Lacalle Marcaide, J. A. Sánchez Galíndez, and A. Lamikiz Menchaca, *Mecanizado de alto rendimiento, Vis: Ediciones Técnicas Izaro*, 2004. (s.f.).

micro. (s.f.). [http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies\\_es/1-7-clasificacion/1-7-3-mechanical-processes/1-7-3-1-micro-cutting-processes](http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies_es/1-7-clasificacion/1-7-3-mechanical-processes/1-7-3-1-micro-cutting-processes).

microfabricacion. (s.f.). [http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies\\_es/1-4-investigacion](http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies_es/1-4-investigacion).

microfactoria. (s.f.). [http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies\\_es/1-4-investigacion/1-4-1-research-policy-in-asia](http://www.micromanufacturing.net/didactico/Desarrollo/microtechnologies_es/1-4-investigacion/1-4-1-research-policy-in-asia).

microinyeccion. (s.f.). Juan Carlos Lacal; Rosario Perona; James Feramisco (11 June 1999).

Millán Gómez, S. (2007). <http://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>.

nanotecnologia . (s.f.). *Center for Responsible Nanotechnology*. 31 July 2004.

Oscar Gonzalo, I. Q. (15 de 09 de 2010).  
*<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/43234-Nuevas-tendencias-para-el-mecanizado.html>*.

universidad del norte. (s.f.).  
*<http://www.uninorte.edu.co/documents/273106/ee3c5520-fda3-4186-8b9d-de6556418343>*.