

PRACTICA EMPRESARIAL EN LA EMPRESA ROBERT BOSCH GMBH

WILBER GERARDO MEJIA SUAREZ



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ADMINISTRACION
FACULTAD INGENIERIA ELECTRONICA
BUCARAMANGA**

2008

PRACTICA EMPRESARIAL EN LA EMPRESA ROBERT BOSCH GMBH

WILBER GERARDO MEJIA SUAREZ

Trabajo de grado para optar el titulo de Ingeniero Electrónico

Supervisor

**Juan Carlos Mantilla
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ADMINISTRACION
FACULTAD INGENIERIA ELECTRONICA
BUCARAMANGA**

2008

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga 28 Mayo de 2008

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	13
1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.....	15
1.1 NOMBRE DE LA EMPRESA.....	15
1.2 ACTIVIDAD ECONOMICA.....	15
1.2.1 Productos y Servicios.....	15
1.3 RESEÑA HISTORICA.....	16
2. OBJETIVOS.....	20
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	20
3. PLAN DE TRABAJO.....	22
4. MARCO TEÓRICO.....	23
4.1. ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE SEMICONDUCTORES.....	23
4.2. SALAS BLANCAS.....	25

4.3. PROCESO DE LIMPIEZA RCA.....	27
4.4. PROCESO DE LITOGRAFIA.....	28
4.5. TECNOLOGÍAS DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MEMS.....	33
4.6. PROCESO DE DEPOSICIÓN DE CAPAS FINAS EN MEMS.....	34
4.6.1. Depositiones debido a una reacción química.....	35
4.6.2. Depositiones debido a una reacción física.....	38
4.7. PROCESO DE GRABADO SOBRE CAPAS (ETCHING PROCESS).....	41
4.7.1. Grabado húmedo (wet etching).....	41
4.7.2. Grabado seco (dry etching)	42
4.8. TECNOLOGÍA SOI.....	45
5. DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LOS PROCESOS DESARROLLADOS Y/O LABORATORIOS.....	47
6. DESARROLLO DEL PLAN DE TRABAJO.....	54
7. GLOSARIO DE TÉRMINOS UTILIZADOS.....	56
8. RECOMENDACIONES A LA EMPRESA.....	58
9. APORTES AL CONOCIMIENTO.....	59
10. CONCLUSIONES.....	67

BIBLIOGRAFÍA.....69

ANEXOS.....71

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Organigrama generalizado del sector de investigación.....	19
Figura 2. Esquema general fabricación de Semiconductores.....	23
Figura 3. Salas Blancas.....	25
Figura 4. Ingreso a las salas blancas.....	26
Figura 5. Modulo utilizado para el proceso de limpieza RCA.....	27
Figura 6. Deposición de fotoresina.....	28
Figura 7. Transferencia de un molde o modelo a un material foto-sensitivo.....	29
Figura 8. : a) Definición del modelo en material resistivo positivo. b) Definición del modelo en material resistivo negativo.....	30
Figura 9. Horno para el proceso HDMS.....	31
Figura 10. Transportador de sustratos.....	33
Figura 11. Reactor LPCVD.....	35
Figura 12. Configuración típica para Electro-deposición.....	36
Figura 13. Diagrama esquemático de un horno de oxidación común.....	37
Figura 14. Típico sistema para el método de Evaporación.....	39
Figura 15. Proceso de casting giratorio.....	40
Figura 16. Perfil anisotropico e isotropito.....	42
Figura 17. Combinación de proceso isotropico con anisotropico.....	43
Figura 18. Perfil de una estructura después del Bosch Process.....	44
Figura 19. Elipsometro.....	47
Figura 20. Perfil físico del instrumento Tencor P-10.....	48
Figura 21. Revelador EV6200.....	50
Figura 22. Modulo de deposición PECVD y grabado RIE.....	51
Figura 23. Instrumento de medición de 4 puntos.....	52
Figura 24. Interferómetro de luz blanca.....	53
Figura 25. Estructuras a base de material fotosensitivo sobre sustrato	

de silicio.....	60
Figura 26. Vista transversal después del proceso Bosch.....	61
Figura 27. Vista superior de estructura a través del instrumento Zygo.....	62
Figura 28. Vista 3D de la estructura con instrumento Zygo.....	62
Figura 29. Comparación de calidad de estructuras.....	65
Figura 30. Estructuras después de un proceso de electrodeposición.....	68

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Gases utilizados en el proceso RIE.....	43
Tabla 2. Resultados De La Medición De Tensión En Estructuras Sobre Sustratos SOI.....	64

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Hoja de datos elipsometro SE-800.....	72
Anexo B. Hoja de datos microscopio olympus MX-50.....	74
Anexo C. Hoja de datos instrumento revelador EVG 6200.....	75
Anexo D. Hoja de datos instrumento Zygo 600s.....	76

RESUMEN

Este documento contiene información generalizada del proceso de fabricación de micro-estructuras electrónicas. Describe el concepto de MEMS (Micro Electronic Mechanical Systems), sus principales aplicaciones. Detalla el proceso de limpieza RCA que se desarrolla en los sustratos de silicio; seguido con el proceso de litografía y las diferentes técnicas de deposición (layer deposition) y/o grabado (etch process) que se ejecutan sobre estos sustratos u obleas. Además de los diferentes instrumentos que se utilizan tal como el interferómetro de luz blanca, microscopios y equipos de luz ultravioleta utilizados en fotolitografía. Conjuntamente se puede tener información de las salas blancas que son los lugares donde se desarrollan estas estructuras microelectrónicas; el traje que se debe usar al ingresar allí y las respectivas normas de seguridad

ABSTRACT

This document gives an overview about the microelectronics structures fabrication process. It also mentions the concept of MEMS (Micro Electronic Mechanical Systems) and its applications. Describes the different process involved with microelectronic structures fabrication as the clean process call RCA process, the different techniques used to make a layer deposition and etch process. There is also information about the main instruments involved with those processes. Besides there is information about the clean room that is the place where all microelectronic structures are make, also the mains rules to follow and security policy.

INTRODUCCION

Robert Bosch es una empresa líder a nivel mundial en el desarrollo de tecnología. Cuenta con diferentes sectores de investigación y producción en el campo automotriz, herramientas y/o aplicaciones para el hogar e industria y comercio.

El desarrollo de la práctica se llevo a cabo en el departamento de Microsistemas y el principal objetivo en el desarrollo de los dispositivos MEMS es lograr establecer una nueva tecnología de fabricación que permita un mejor funcionamiento y la reducción de costos de fabricación para de este modo lograr una mayor acogida en los diferentes mercados.

Para poder participar de esto fue necesario comenzar a conocer los principios básicos de fabricación de estructuras microelectrónicas. Lo anterior se llevo a cabo con el apoyo de lecturas, explicaciones verbales por el tutor y el desarrollo de varios procesos bajo la supervisión de El.

Este escrito contiene información generalizada acerca de los procesos de fabricación de dispositivos MEMS, así como de las salas blancas (laboratorios), y de los diferentes instrumentos que se manipularon en varios de los procesos de fabricación de micro-estructuras.

La fuerte incursión que esta presentando la tecnología SOI en la fabricación de dispositivos MEMS, ha permitido dar inicio a una serie de experimentos para analizar ciertas características relacionadas con la tensión de estructuras elaboradas con sustratos SOI y la tensión de estructuras elaboradas con sustratos normales de silicio. El desarrollo de estas estructuras es un proceso muy similar al que se ha estado desarrollando con los sustratos de silicio pero con ciertas diferencias como el tipo de sustrato manejado, además de la variación de

parámetros en las deposiciones de capas y/o grabados entre otros subprocesos que se necesitan en estas estructuras.

1. DESCRIPCION DE LA EMPRESA

1.1 NOMBRE DE LA EMPRESA

ROBERT BOSCH GMBH

1.2 ACTIVIDAD ECONOMICA

El Grupo Bosch es una de las corporaciones industriales privadas más grande del mundo, con 242.500 empleados y una venta anual por encima de los € 40 billones. Todo comenzó con el taller para ingeniería eléctrica y alta precisión, fundado por Robert Bosch en Stuttgart, Alemania, en 1886.

Robert Bosch company es una empresa líder en productos y servicios para el sector automotriz, sector hogar, la industria y el comercio. Cuenta con áreas destinadas a investigación y desarrollo para innovación y mejoramiento de sus productos.

El Grupo Bosch invierte cada año el 7% de volumen de sus ventas en investigación y desarrollo convirtiendo la marca Bosch en sinónimo de servicio, calidad, tecnología de avanzada y protección del medio ambiente. [1]

1.2.1 Productos y servicios

Sector automotriz

- Talleres de mantenimiento automotriz BOSCH.
- Repuestos y accesorios para vehículos.

- Tecnología automotriz.
- Equipamiento para talleres.

Sector hogar

- Herramientas de jardín
- Herramientas eléctricas.
- Aplicaciones para el hogar (lavadoras, secadoras, calentadores etc.).

Industria y comercio

- Servicio de comunicaciones.
- Herramientas profesionales de alta exigencia.
- Sensorica – Micro electromecánica (MEMS).
- Sistemas de seguridad.
- Tecnología de empaquetamiento.[1]

1.3 RESEÑA HISTÓRICA.

En 1886 Robert Bosch fundó un taller de Mecánica de precisión e Ingeniería Eléctrica en Stuttgart (Alemania). Este fue el nacimiento de lo que hoy activamente se conoce a modo global como Robert Bosch GmbH.

En los primeros años de existencia la compañía creció realizando trabajos de instalaciones eléctricas domiciliarias.

[1] <http://www.bosch.com/content/language2/html/3283.htm>

En 1901 Robert Bosh fundo su primera compañía en la ciudad de Stuttgart con 45 empleados desde el comienzo.

Con el objetivo de ahorrar en transporte y costos de envío desde Alemania; en 1910 se fundo la primera sucursal en Springfield (USA).

En 1936 la compañía Bosch sorprendió a la industria y a los consumidores con el refrigerador lo cual constituyo como el inicio de las aplicaciones de hogar.

En 1952 la compañía Gutbrod introduce al mercado un carro pequeño el cual fue el primero en Europa equipado con los estándares de inyección de combustible (fuel injection) fabricados por BOSH Company.

En 1967 Bosch introdujo el primer sistema de inyección electrónica de combustible.

En 1958 Bosch complementa su línea de hogar con la presentación de lavadora. En 1967 presento una aplicación llamada todo en uno que se constituía de lavadora y secadora.

En 1972 se fundo la Robert Bosch parking machines company. La división de tecnología de empaquetamiento planea, diseña, fabrica e instala una completa línea de empaquetamiento para los fabricantes de confitería, alimentos y productos similares.

En 1978 se introduce el primer sistema ABS en el mundo. Este sistema previene el bloqueo de las ruedas durante una parada de emergencia o una maniobra de frenado sobre superficies lisas.

1995. Programa de estabilidad electrónica (ESP).

El programa de estabilidad electrónica es otro desarrollo en la gama de productos Bosch contribuyendo en la seguridad del conductor. En situaciones críticas esto actúa como un agente de apoyo para el sistema ABS y ARS. Este controla el frenado o aceleración las ruedas a modo individual manteniendo la controlabilidad del vehículo.

Freno electro hidráulico (EHB) 2001.

El Control sensorizado de frenado (SBC) freno electro-hidráulico es equipado con sensores que evalúan que tan fuere el conductor presiona el pedal del freno.

En el 2004 Bosch abre el nuevo centro de tecnología en Abstatt (Alemania). [2]

El Grupo Bosch cuenta actualmente con una red de producción, distribución y servicio al cliente compuesta por más de 280 filiales y más de 12.000 puntos de servicio Bosch en más de 140 países.

Desde el comienzo la historia de la compañía ha sido caracterizada por el manejo de innovación y el compromiso social. Durante más de 120 años el grupo BOSCH ha logrado mantener su éxito gracias a los beneficios que aportan sus innovaciones.

A continuación se encuentra el organigrama general del sector de investigación dentro de la empresa. Las siglas de los departamentos son los siguientes:

CR: Corporate Research

CR / ARE: Corporate Research / Advance Research Electronics.

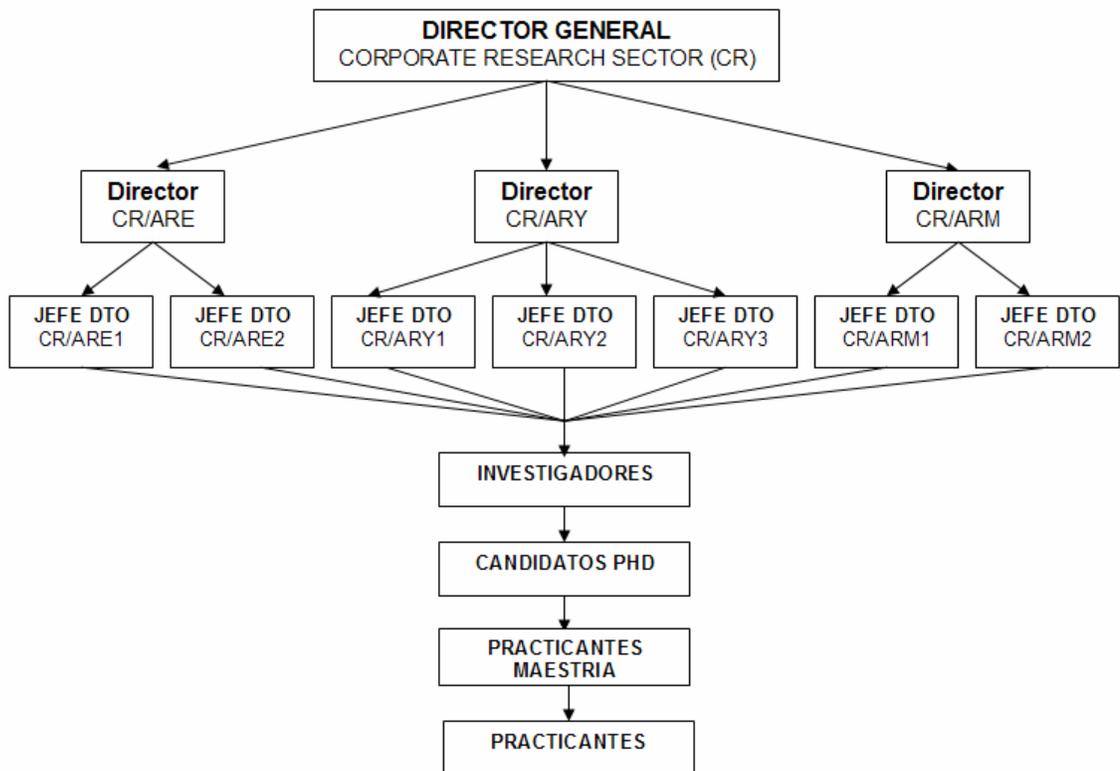
CR / ARY: Corporate Research / Advance Research Microsystems.

[2] <http://www.bosch.com/content/language2/html/2919.htm>

CR / ARM: Corporate Research / Advance Research Materials.
CR / ARC: Corporate Research / Advance Research Ceramics.
CR / ARQ: Corporate Research / Advance Research Chemistry.
CR / ART: Corporate Research / Advance Research Technology.

Todos los departamentos tienen la misma estructura. A manera de complemento se muestra el siguiente organigrama para unos departamentos.

Figura 1: Organigrama generalizado del sector de investigación.



Fuente: Personal Abteilung Robert Bosch

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL.

Establecer una nueva tecnología de fabricación de dispositivos y/o estructuras microelectrónicas que permita un mejor funcionamiento y reducción de costos de fabricación para de este modo lograr una mayor acogida en los diferentes mercados basados en la optimización.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Aprender los principales conceptos referentes a los procesos utilizados en la fabricación de estructuras microelectrónicas tales como proceso de limpieza de sustratos de silicio (RCA), deposición de materiales utilizando técnicas químicas y físicas, grabado en seco y grabado en húmedo; entre otros subprocesos.
- Instruirse en el respectivo funcionamiento de los diferentes sistemas, software's y/o maquinas influyentes en los procesos de elaboración de estas estructuras.
- Desarrollar estructuras microelectrónicas aplicando los diferentes procesos de fabricación estudiados con anterioridad.
- Introducción a la fabricación de estructuras sobre sustratos SOI (Silicon On Insulator), principales ventajas, influencia en los dispositivos microelectronicos hoy en día, principales aplicaciones desarrolladas.

- Fabricación de micro-estructuras sobre sustratos SOI para realizar pruebas de tensión entre estructuras de silicio y estructuras de poli-carbonato de silicio más silicio.

3. PLAN DE TRABAJO PROPUESTO

Para el cumplimiento de los objetivos planteados se desarrollaron diferentes actividades divididas en etapas. Como una primera etapa se estableció una serie de lecturas de involucramiento y/o conocimiento en lo que concierne a los diferentes procesos de fabricación de estructuras microelectrónicas. Una segunda etapa consistió en la capacitación de los instrumentos más utilizados como son microscopios y cámaras de vacío para procesos de grabado y/o deposición de material. Y en una tercera etapa se dio inicio a la elaboración de un proceso de estructuras microelectrónicas. Como una etapa adicional se estableció la capacitación de otras maquinas o instrumentos de trabajo necesarios a medida que se avanzo en la practica.

El cronograma de estas etapas esta dividió en semanas de trabajo que estuvieron sujetas a cambios, dependiendo de factores como por ejemplo el estado de funcionamiento de los diferentes instrumentos o maquinas a utilizar.

Dentro de la organización de los diferentes procesos se establecieron las siguientes pautas para su respectiva ejecución.

Diseño de experimentos

Simulaciones

Desarrollo del experimento

Toma de datos

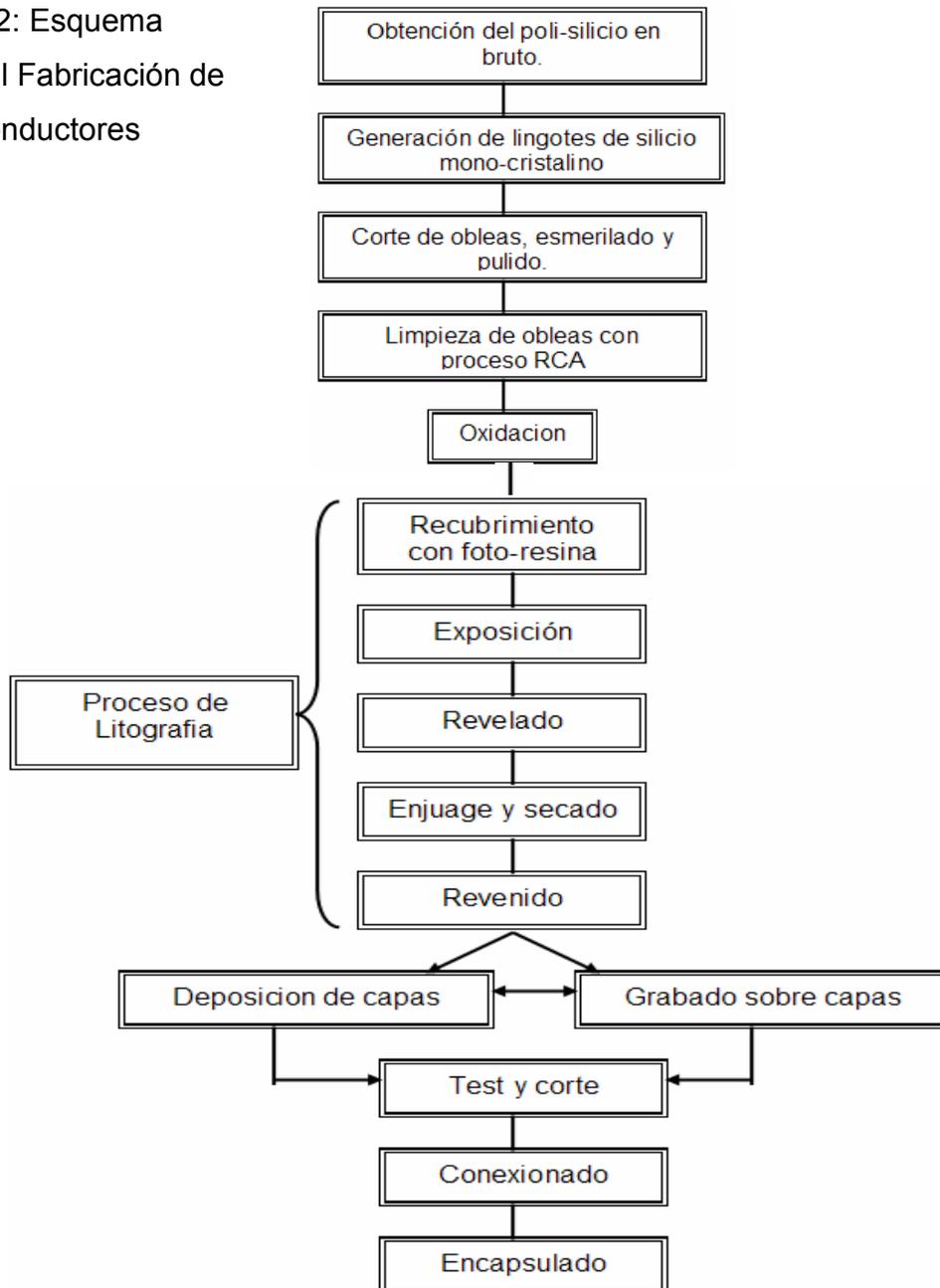
Comparación de los resultados con los obtenidos con las simulaciones

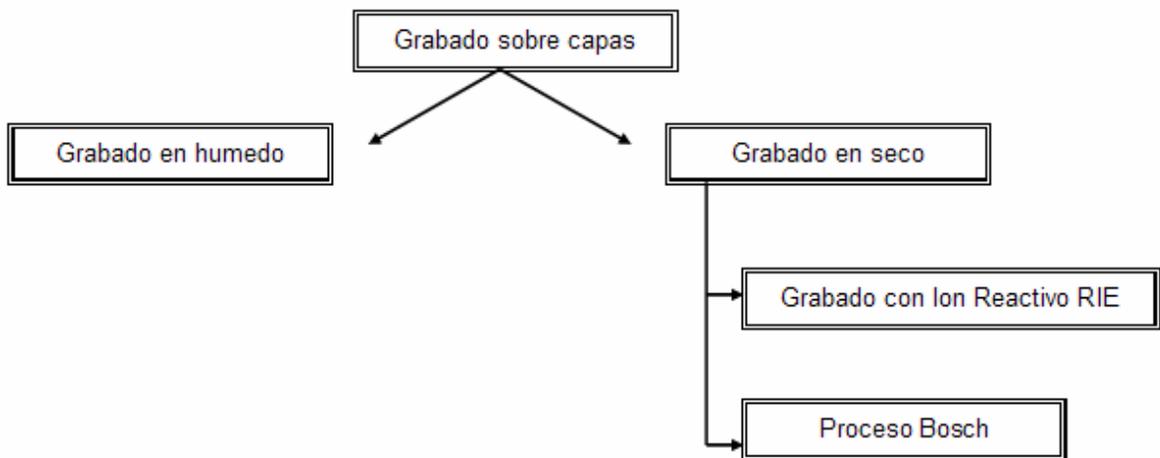
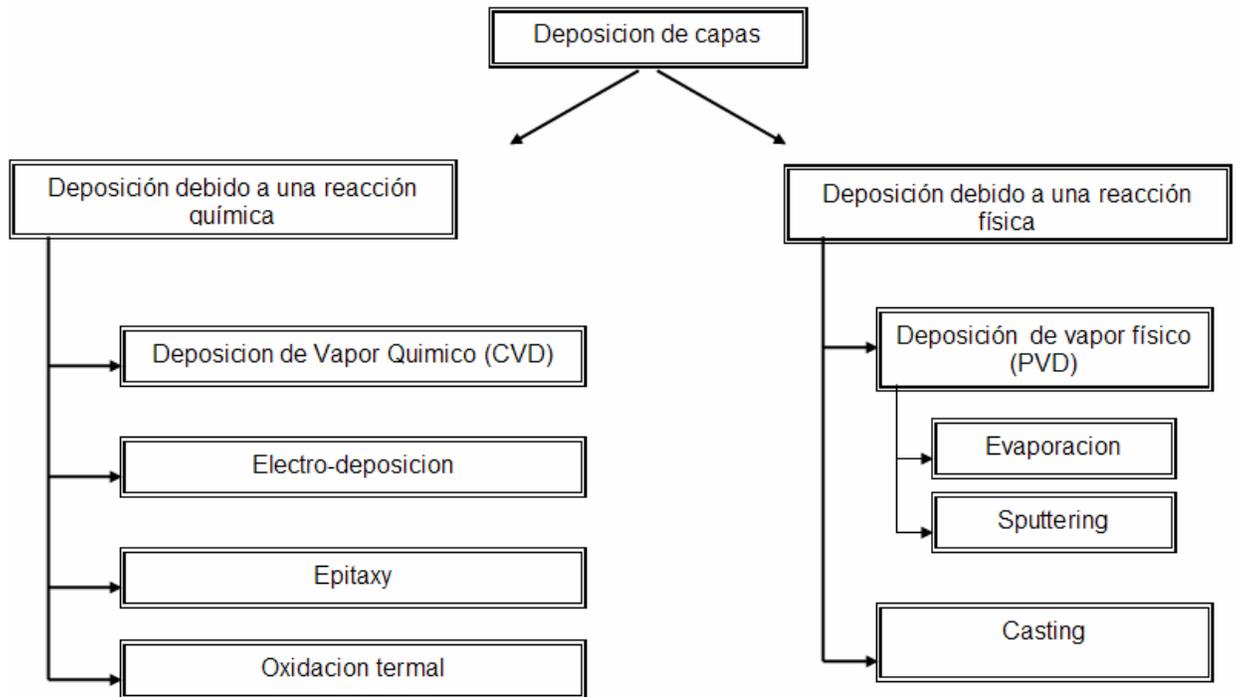
Análisis de resultados

4. MARCO TEORICO

4.1 ESQUEMA GENERAL DEL PROCESO DE FABRICACION DE SEMICONDUCTORES.

Figura 2: Esquema General Fabricación de Semiconductores



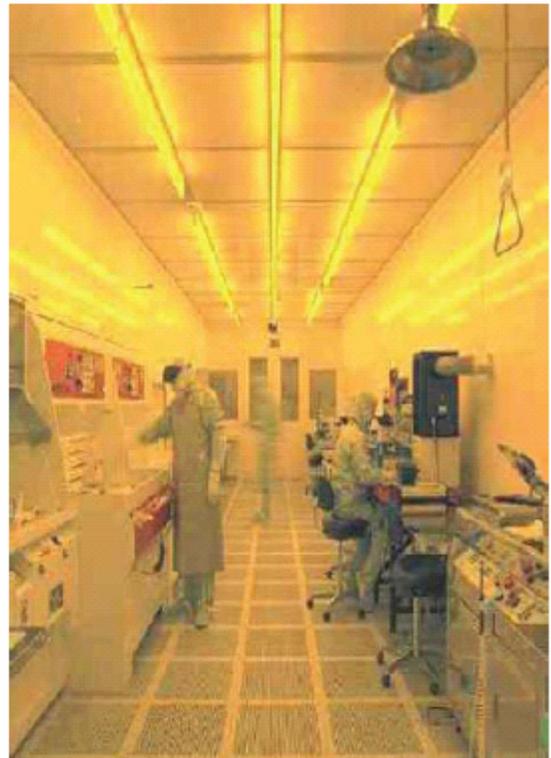


Fuente: Mapa conceptual modificado de http://Rober_man.tripod.com/archivos/solidos/Fabricaci_n_TC.pdf

4.2 SALAS BLANCAS.

Las salas blancas son los lugares donde se llevan a cabo todos los procesos de fabricación de los microdispositivos. Son salones con un grado de limpieza muy alto. El aire en una sala blanca entra por las rejillas blancas, se filtra y sale por el techo; es decir son salas ultra-pasteurizadas (aire de adentro hacia afuera). Posee cuartos de entrada con semáforo; en estos cuartos semáforos es donde se descontaminan las personas que ingresan a la sala, posee duchas y salidas de emergencias. En el caso que sea necesario tomar nota se debe hacer en libretas especiales para este tipo de salas. Se debe ingresar con bata, cubre zapatos, guantes y gorro. Se debe hacer el seguimiento de las normas de trabajo y las normas de seguridad.

Figura 3: Salas blancas



Fuente: Documentación CR/ARY2

Figura 4. Ingreso a la Sala Blanca



Fuente: Archivo Personal Wilber Mejia

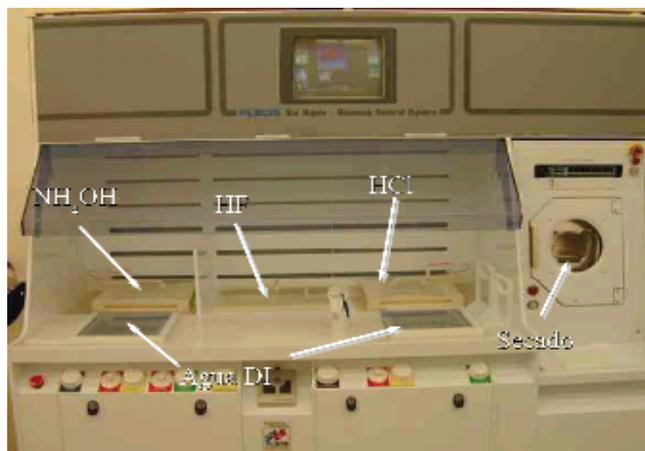
4.3 PROCESO DE LIMPIEZA DE LAS OBLEAS DE SILICIO RCA

El proceso RCA es un procedimiento estándar de limpieza cuyo objetivo es remover los diferentes contaminantes existentes en las obleas de silicio. Se realiza antes y siempre de dar inicio al proceso de fabricación de micro-dispositivos. Consta de 3 pasos:

- 1, Limpieza de residuos orgánicos como grasa, partículas de polvo, entre otros contaminantes. Se utiliza una solución química (NH_4OH)
- 2, Remoción de capa de óxido producida por el procedimiento anterior. En este paso se utiliza una solución de OF.
- 3, Limpieza de residuos iónicos y partículas metálicas existentes sobre la oblea de silicio. Se utiliza una solución HCl .

La técnica RCA no ataca el silicio presente sobre la oblea y solamente una pequeña capa de dióxido de silicio es removida en el paso 2. Por último la etapa de secado en la oblea a través de una máquina de vacío, donde se selecciona las RPM y el tiempo deseado de giro. [3]

Figura 5: Modulo utilizado para el proceso de limpieza RCA



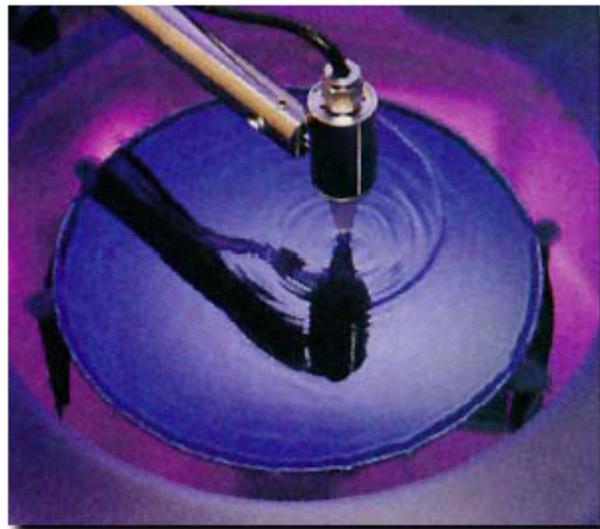
Fuente: Documentación CR/ARY2

[3] www.ece.gatech.edu/research/labs/vc/processes/rcaClean.html

4.4 PROCESO DE LITOGRAFIA (Recubrimiento con fotoresina)

Litografía en el contexto de MEMS es típicamente la transferencia de un modelo a un material foto-sensitivo (foto-resina) exponiendo el material a una fuente de radiación como la luz. Un material foto-sensitivo es aquel que experimenta un cambio en sus propiedades físicas cuando es expuesto a una fuente de radiación. La foto-resina es un material fotosensible que se aplica sobre la oblea en estado líquido en pequeñas cantidades.

Figura 6: Deposición de fotoresina



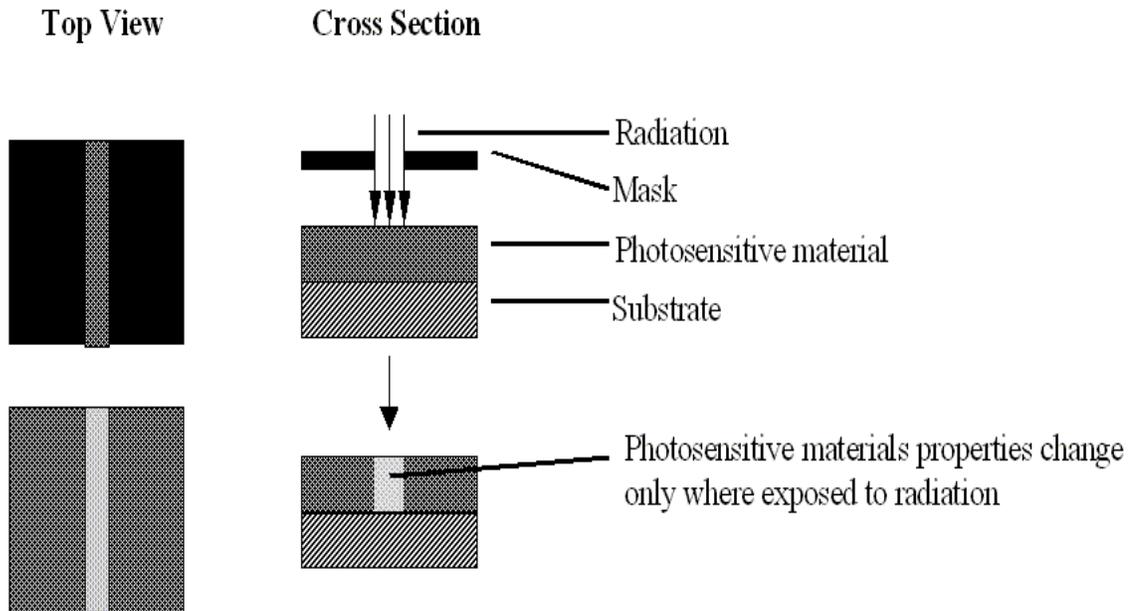
Photoresist Application

Fuente: http://Rober_man.tripod.com/archivos/solidos/Fabricaci_n_TC.pdf

La oblea se hace girar en una maquina centrifuga a determinadas revoluciones; dependiendo el ancho de capa que se desee.

En la figura 7 podemos ver como se efectúa la transferencia de un modelo (implantado en una mascara) a un material foto-sensitivo.

Figura 7: Transferencia de un molde o modelo a un material foto-sensitivo

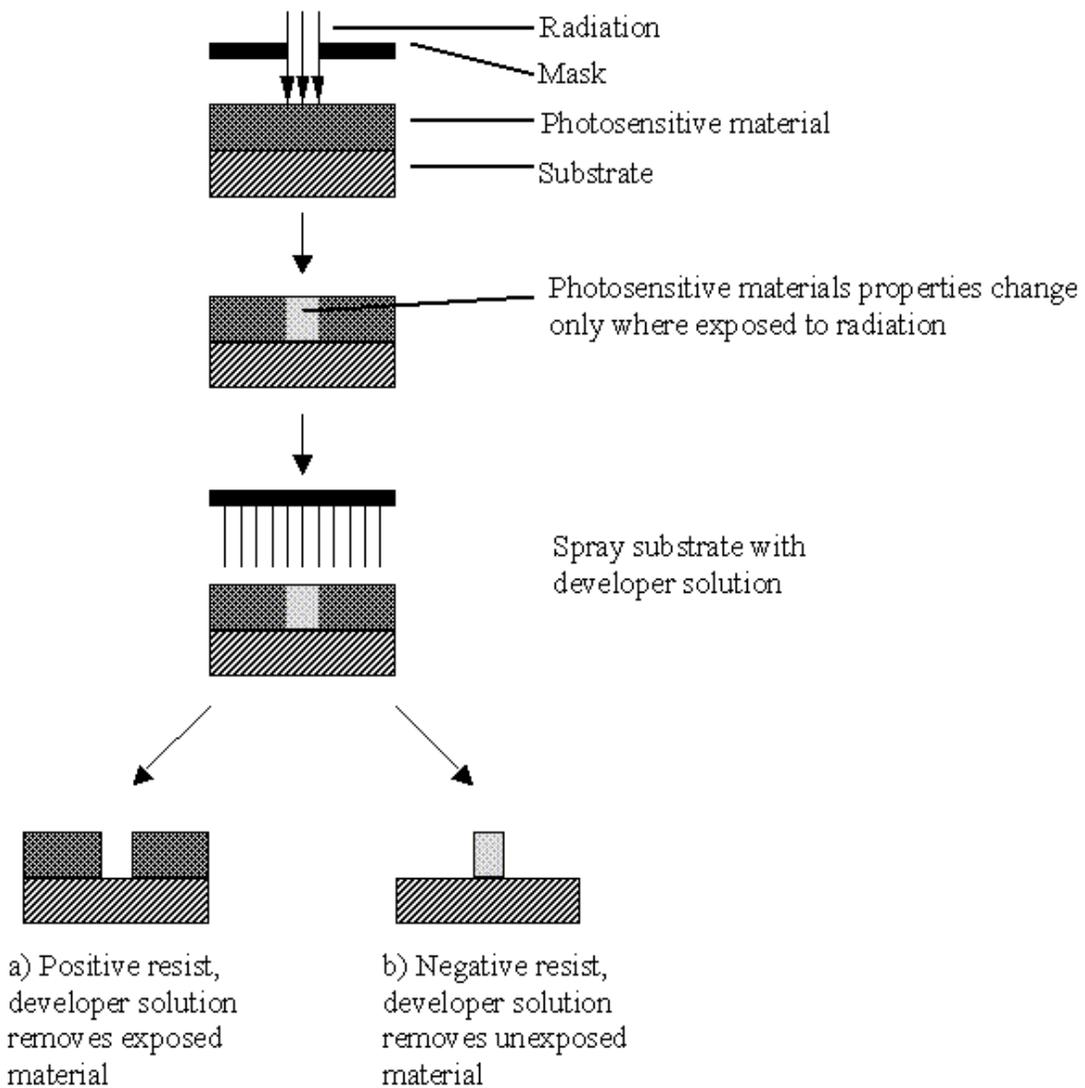


Fuente: <http://www.memsnet.org/mems/processes/lithography.html>

Existen dos tipos de materiales foto-sensitivos: si el material expuesto a la radiación es removido y el material protegido por la mascara es sobresaliente entonces el material foto-sensitivo es considerado positivo.

Si el material expuesto a la radiación es sobresaliente y el material protegido por la mascara es removido entonces el material foto-sensitivo es considerado negativo.

Figura 8: a) Definición del modelo en material resistivo positivo. b) Definición del modelo en material resistivo negativo



Fuente: <http://www.memsnet.org/mems/processes/lithography.html>

En el desarrollo de un proceso de litografía se desarrolla en los siguientes pasos:

➤ **Pre calentamiento (HMDS process).**

El objetivo de este procedimiento es asegurarnos de que la foto-resina a depositar tenga una mejor adhesión. Este proceso se desarrolla a temperaturas de 120°C – 140°C durante 50 min. aproximadamente.

Figura 9: Horno para el proceso HDMS



Fuente: http://Rober_man.tripod.com/archivos/solidos/Fabricaci_n_TC.pdf

➤ **Deposición de foto-resina**

La deposición de foto-resina se efectúa en forma líquida. La oblea es introducida en una máquina de vacío y luego gira a alta velocidad (1000 a 4000 RPM) de 30 a 60 seg. produciendo una capa (foto-resina) del material depositado con ancho en el rango de 2,5 a 0,5 μm dependiendo de la velocidad de giro.

➤ **Recalentamiento.**

El objetivo de este paso es endurecer la foto-resina en una superficie de calefacción. Se efectúa a una temperatura de 90°C durante 2 min. (Dependiendo del material de la fotoresina).

➤ **Proceso de alineación, exposición y revelado.**

Este proceso se efectúa en una maquina generadora de rayos U.V conocida como escalonador litográfico. Se coloca la mascara con el molde que se desea realizar en la oblea. Se introduce la oblea, se alinea con la mascara y se expone a una fuente de rayos (ej. U.V). Las regiones de la capa de foto-resina donde no existió protección de la mascara cambian su composición y luego en un proceso de revelado se elimina la foto-resina atacada por los rayos o se elimina la superficie protegida por la mascara; dependiendo del tipo de proceso a desarrollar.

Una vez eliminada la parte expuesta, la oblea es introducida en un dispositivo especial denominado SRD (centrifugador, enjuagador y secador). El SRD limpia la oblea con agua fuerte o ácido nítrico y lo seca con un proceso giratorio de alta velocidad.

Luego se realiza un proceso suave a baja temperatura para endurecer la foto-resina remanente.

Siempre que sea posible se utiliza la manipulación automática o con robots, pero cuando esto no es posible, se transportan manualmente en contenedores especiales.

Figura 10: Transportador de sustratos



Fuente: http://Rober_man.tripod.com/archivos/solidos/Fabricaci_n_TC.pdf

4.5 TECNOLOGÍAS DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MEMS

Tecnología de materiales

El silicio es el principal material utilizado para la creación de microsistemas. El silicio ha resultado ser un material muy adecuado también para muchas otras aplicaciones fuera de la tecnología electrónica, por sus óptimas cualidades:

- *Semiconductor*. Propiedad ampliamente usada en microelectrónica.
- *Fotoconductividad*. Usada en fotodiodos, filtros ópticos, células solares...
- *Piezorresistividad* (resistencia dependiente de la deformación física). Se utiliza en sensores de presión, desplazamiento, etc.
- *Elasticidad*. Aunque aparentemente frágil, el silicio configurado en láminas de pocas micras de espesor es muy elástico.

Sin embargo, también se utilizan muchos otros materiales cuyas propiedades, formas de fabricación y aplicaciones resultan especialmente útiles en el contexto de los microsistemas.

Los metales son también ampliamente utilizados en micro-tecnologías. Su principal función en los sistemas microelectrónicos originales era como conductor, siendo el aluminio y el cobre los más habituales.

Otros ejemplos de materiales con un alto potencial de aplicación en micro-tecnologías son, por ejemplo, los materiales nanocristalinos, nuevos materiales adhesivos, el diamante u otros compuestos basados en carbono, y muchos otros.

4.6 PROCESO DE DEPOSICIÓN DE CAPAS FINAS EN MEMS

Uno de los pasos básicos en los procesos MEMS es la habilidad de depositar delgadas capas de un material sobre el sustrato (silicio generalmente).

La tecnología MEMS de deposición puede ser clasificada en 2 grupos:

Deposiciones debido a una reacción química.

- Deposición de Vapor Químico (CVD)
- Electro-deposición
- Epitaxy
- Oxidación termal.

Deposiciones debido a una reacción física.

- Deposición de vapor físico (PVD)
- Casting

A continuación se explicara en que consiste cada uno de los anteriores procesos.

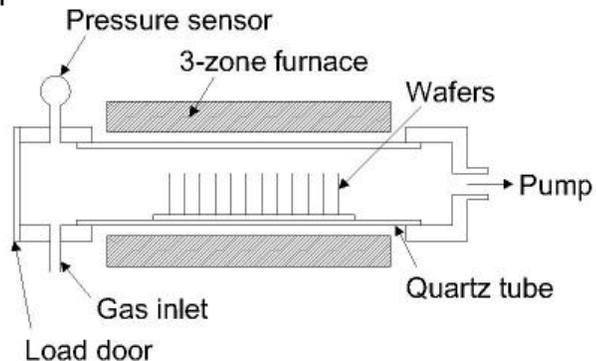
4.6.1 Depositiones debido a una reacción química.

➤ Deposición de Vapor Químico (CVD)

En este proceso el sustrato (oblea) es colocado dentro de un reactor al cual se le suministra cierto número de gases. El principio fundamental de este proceso es que los gases se condensan en todas las superficies dentro del reactor y formen una nueva capa sólida sobre el sustrato producto de la reacción química de los gases.

Las tecnologías CVD más importantes en MEMS son Baja Presión CVD (LPCVD) y Plasma Enhanced CVD (PECVD). El proceso LPCVD produce capas con excelente uniformidad de grosor y características de material. El principal problema radica en las altas temperaturas que se necesitan para este proceso (600°C) y la lenta tasa de deposición. El PECVD puede trabajar por debajo de estas temperaturas gracias a la energía extra que suministra el plasma en el reactor a las moléculas de gas. La película o capa depositada es producto de una reacción química entre los gases suministrados al reactor sin embargo la calidad de la capa puede ser inferior al proceso ejecutado a altas temperaturas. Además el sistema PECVD puede depositar el material en un solo lado de la oblea mientras que el LPCVD deposita capas en ambos lados de la oblea en por lo menos 25 obleas al mismo tiempo.

Figura 11: Reactor LPCVD



Fuente: <http://www.memsnet.org/mems/processes/deposition.html>

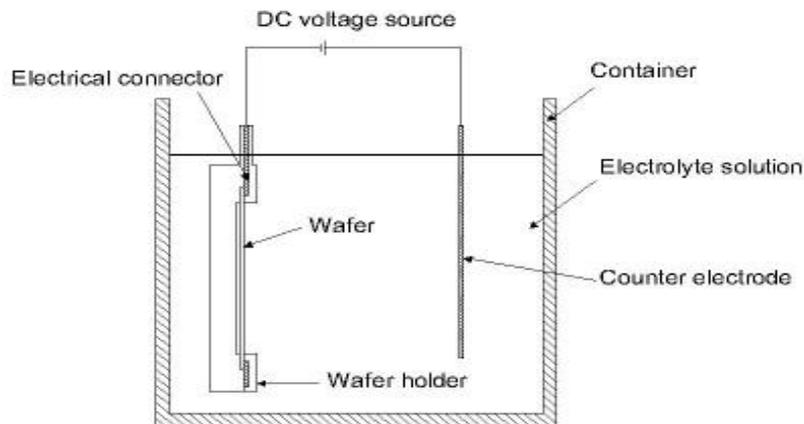
➤ Electro-deposición.

Este proceso es también conocido como Electroplating (galvanización) y se limita a materiales eléctricamente conductores.

Es el proceso de usar una corriente eléctrica para cubrir un conductor eléctrico (sustrato) con una capa delgada de un metal. La principal aplicación de este método es la deposición a través de la capa delgada, de propiedades como resistencia al uso, lubricidad, protección de corrosión, sobre la superficie carente de estas. El proceso ocurre al formar un circuito con una fuente DC donde el material (metálico) es el ánodo y el cátodo lo forma el sustrato. Ambos componentes son sumergidos en una solución electrolítica. Cuando la fuente es encendida, el metal en el ánodo es oxidado formando cationes con carga positiva. Estos cationes se asocian con los aniones de la solución electrolítica y luego se dirigen al cátodo donde se depositan en el sustrato.

El proceso de Electro-deposición es satisfactorio para la deposición de capas metálicas como cobre, oro, níquel entre otros.

Figura 12: Configuración típica para Electro-deposición.



Fuente: <http://www.memsnet.org/mems/processes/deposition.html>

➤ Epitaxia.

Esta tecnología es muy similar a lo que ocurre en el proceso CVD. Se utiliza para depositar silicio sobre una superficie de silicio bajo apropiadas condiciones. Si el sustrato es un cristal semiconductor ordenado (silicio) es posible crear una nueva capa con las mismas características del sustrato base es decir el sustrato actúa como una semilla produciendo una delgada capa de este mismo. El crecimiento de la delgada capa cristalina desde la fase de vapor es llamada *fase de vapor epitaxia* (VPE), y es la forma más común de epitaxia mas usada en el procesamiento de silicio.

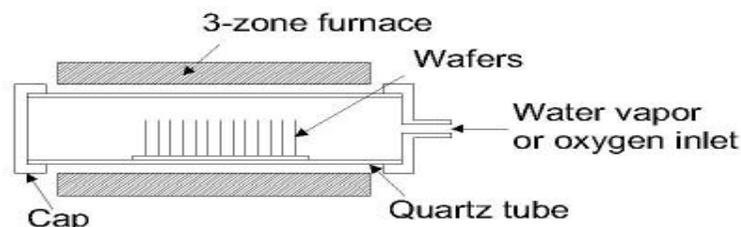
➤ Oxidación Termal.

Es una de las tecnologías básicas de deposición. Es simplemente oxidación de la superficie del sustrato en presencia de oxígeno. La temperatura es elevada a 800°C y 1100°C. Es la única tecnología que utiliza parte del sustrato en su procedimiento.

El crecimiento de la película es debido a la presencia de oxígeno sobre el sustrato. Obviamente este proceso es utilizado solo en materiales que se puedan oxidar y únicamente se pueden formar capas o películas que sean oxidadas de ese material.

Este es el clásico proceso que se utiliza para formar el dióxido de silicio en un sustrato de silicio.

Figura 13: Diagrama esquemático de un horno de oxidación común



Fuente: <http://www.memsnet.org/mems/processes/deposition.html>

4.6.2 Depositiones debido a una reacción física.

➤ Deposición de vapor físico (PVD)

El proceso PVD tiene como principal característica que el material es liberado desde una fuente y transferido al sustrato. Las dos tecnologías más importantes son: Evaporación y sputtering.

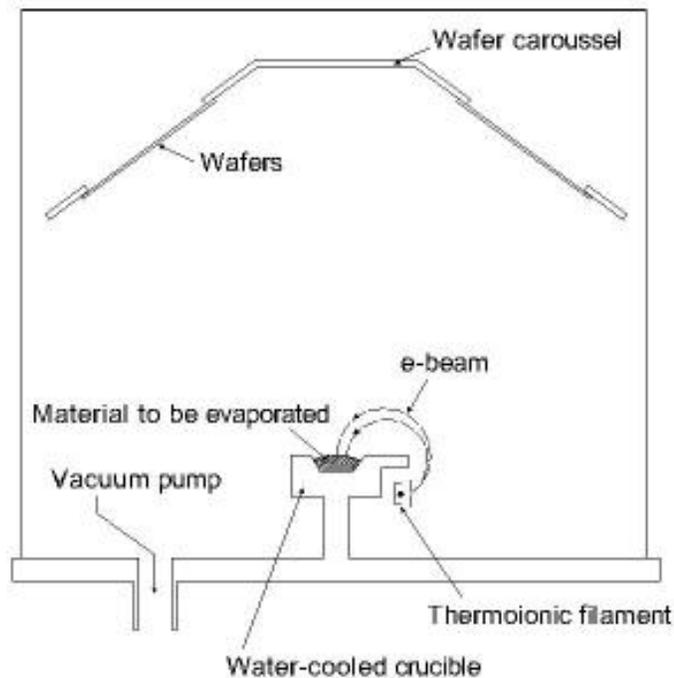
La escogencia del método de deposición (evaporación y sputtering) en muchos casos es arbitraria y quizás dependa más de que tecnología esta disponible para cierto material específico en ese momento.

Evaporación

El sustrato es colocado dentro de una cámara al vacío, y en esta misma también es puesto un bloque del material a depositar. El material fuente es luego calentado al punto de ebullición y evaporación.

El vacío es necesario para permitir a las moléculas evaporarse libremente en la cámara y después ellas se condensan sobre todas las superficies. Este principio es el mismo para todas las tecnologías de evaporación solamente cambia el método usado para calentar el material fuente. Existen dos tecnologías de evaporación las cuales son e-beam y evaporación resistiva. En el método de evaporación e-beam; un rayo de electrones es disparado al material fuente causando un calentamiento local y la posterior evaporación. En la evaporación resistiva, un recipiente de tungsteno contiene el material fuente y es calentado eléctricamente para hacer que el material se evapore.

Figura 14: Típico sistema para el método de Evaporación



Fuente: <http://www.memsnets.org/mems/processes/deposition.html>

Proceso de deposición sputter (sputter deposition)

Es un método de deposición de delgadas películas (capas) basado en la técnica PVD (physical vapor deposition). El proceso ocurre en una cámara de vacío donde se encuentra el sustrato, el gas (generalmente Argón) es introducido a baja presión y una fuente de RF causa que el gas comience a ser ionizado (Ar^+); los iones son acelerados hacia el objetivo donde los átomos en la superficie del material son aflojados y transportados en forma de vapor y se condensan en todas las superficies incluyendo el sustrato (oblea).

Materiales eléctricamente conductores (Al, Cu, W, Ti) pueden usar una fuente dc; en la cual el material fuente actúa como cátodo de un diodo. El proceso sputter en

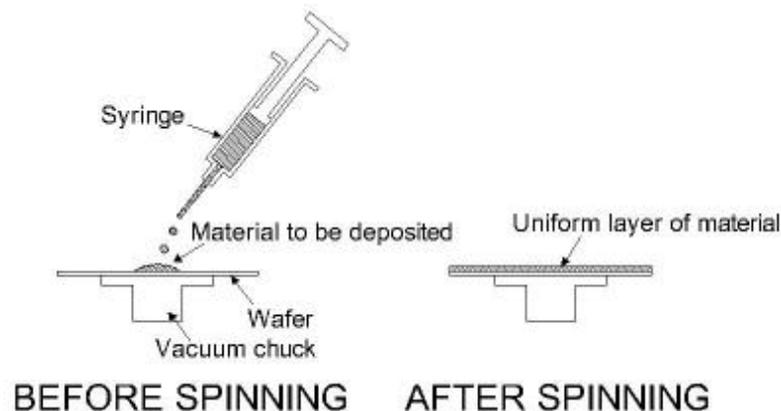
dieléctricos como el dióxido de silicio o el oxido de aluminio requieren una fuente de RF para dar energía a los átomos de argón.

Una de las principales ventajas del método sputtering como técnica de deposición es que la película depositada, tiene la misma composición del material fuente; a diferencia de la técnica de evaporación donde uno de los componentes del material fuente puede tener un punto de evaporación mayor; originando una capa sobre el sustrato de características diferentes a la del material fuente.

➤ Casting

En este proceso el material a depositar es disuelto en forma líquida en un solvente. El material puede ser aplicado sobre el sustrato en forma de rocío (spraying) o en forma giratoria (spinning) utilizando una cámara centrífuga; una vez el solvente es evaporado, una delgada capa del material permanece sobre el sustrato. El proceso de casting giratorio es mostrado en la siguiente figura. Su principal uso es cuando se desea depositar materiales polímeros.

Figura 15: Proceso de casting giratorio.



Fuente: <http://www.memsnets.org/mems/processes/deposition.html>

4.7 PROCESO DE GRABADO SOBRE CAPAS (ETCHING PROCESS)

Para formar una estructura funcional MEMS sobre un sustrato, es necesario remover o sustraer partes de las delgadas capas depositadas previamente y/o parte del sustrato.

En general existen dos procesos de sustracción:

- 1, **Grabado en húmedo** (wet etching): el material es disuelto cuando es sumergido en una solución química.
- 2, **Grabado en seco** (dry etching): el material es removido o disuelto usando iones reactivos o un removedor en forma de vapor.

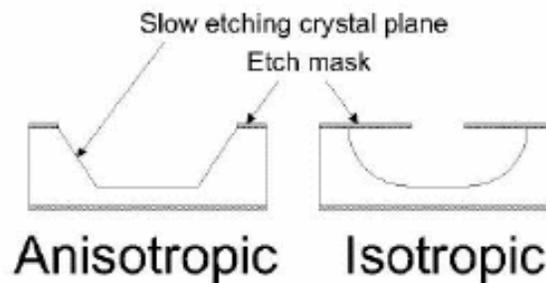
4.7.1 Grabado en húmedo (wet etching)

Es una técnica sencilla donde lo único que se requiere es un contenedor con una solución líquida que disolverá el material en cuestión que no este protegido por una foto-resistencia. La escogencia de los químicos depende de la superficie a remover.

Esta técnica dará buenos resultados si se encuentra la combinación adecuada entre el 'removedor' y el material de la mascara a utilizar. El proceso de remoción trabaja muy bien en la eliminación de delgadas capas sobre un sustrato y también puede ser usado para eliminar parte del sustrato. El proceso de sustracción en húmedo puede tender a ser un proceso isotropico removiendo simultáneamente en todas las direcciones y causar un desgaste de material debajo de la mascara. También puede presentarse un proceso anisotropico dependiendo de los materiales que se utilicen para la sustracción del material y dependiendo también del material a remover. El contraste entre un proceso isotrópico y uno anisotrópico

esta en las diferentes tasas o velocidades de grabado (o sustracción de material) en diferentes direcciones en el material. En la figura 13 se observa la diferencia entre un proceso isotrópico y un proceso anisotrópico.

Figura 16: Perfil anisotrópico e isotrópico



Fuente: <http://www.memsnets.org/mems/processes/etch.html>

4.7.2 Grabado en seco (dry etching)

Un alto perfil anisotrópico puede ser obtenido con este proceso, evitando el desgaste de material debajo de la máscara lo cual es característico del proceso húmedo (wet etching). El proceso de grabado en seco requiere solamente de una pequeña cantidad de gases reactantes mientras que el proceso húmedo requiere de relativamente grandes cantidades de líquidos químicos.

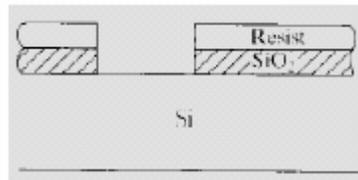
El proceso de grabado en seco se puede dividir: grabado con Ion reactivo (Reactive Ion Etching, RIE), sputter y fase de grabado a vapor.

Grabado con Ion reactivo (RIE).

El sustrato es colocado dentro del reactor en el cual varios gases son introducidos dependiendo del material a remover (ver tabla 1). Un gas plasma es excitado con una fuente RF originando que las moléculas se dividan en iones. Los iones son

acelerados hacia la superficie del material y reaccionan iniciando el proceso de grabado. Esta es la parte química del proceso de grabado de ion reactivo. También existe una parte física que es similar al proceso de deposición sputtering; si los iones tienen una energía suficientemente alta, ellos pueden sacar los átomos fuera del material a ser grabado sin una reacción química (proceso físico). Debido a que el proceso con la reacción química es isotrópico y el proceso físico es altamente anisotrópico; se pueden combinar estos dos procesos y se puede obtener un grabado con alto grado vertical como se muestra en la figura.

Figura 17: Combinación de proceso isotrópico con anisotrópico



Fuente: Introduction to microelectronic fabrication

Tabla 1: Gases utilizados en el proceso RIE

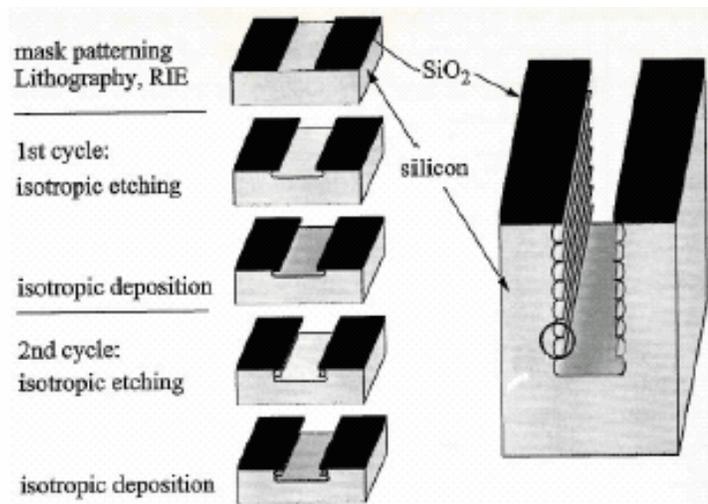
Plasma-Etching Sources	
Material	Source Gases
Organic Materials	O ₂ , SF ₆ , CF ₄
Polysilicon	CCl ₄ , CF ₄ , NF ₃ , SF ₆
Silicon Dioxide	CF ₄ , C ₂ F ₆ , C ₂ F ₈ , CHF ₃
Silicon Nitride	CF ₄ , C ₂ F ₆ , CHF ₃ , SF ₆
Aluminum	CCl ₄ , Cl ₂ , BCl ₃
Titanium	C ₂ Cl ₂ F ₄ , CF ₄
Tungsten	Cl ₂

Fuente: Introduction to microelectronic fabrication.

Deep RIE (DRIE – BOSCH PROCESS)

Es una clase especial del proceso RIE, en el cual su uso continúa creciendo popularmente. En este proceso el grabado de cientos de micrómetros se pueden alcanzar paredes casi verticales. Este proceso es basado en el llamado Bosch Process el cual consiste en 2 gases diferentes que son alternados en el reactor. La composición del primer gas crea un polímero sobre la superficie del sustrato y el segundo gas graba sobre el sustrato. El polímero es inmediatamente retirado mediante la técnica sputter en un proceso físico pero solamente en las superficies horizontales debido a la dirección en que son bombardeados los iones (verticalmente) y no en las superficies laterales. Desde entonces el polímero se disuelve muy lentamente (parte química) y protege las paredes del proceso de grabado (gas 2).

Figura 18: Perfil de una estructura después del Bosch Process



Fuente: Advance Microneedle and microelectrode arrays

La técnica de grabado sputter es esencialmente el mismo proceso RIE sin los iones reactivos. Los sistemas usados son muy similares al proceso de deposición sputtering. La gran diferencia es que el bombardeo de iones es directamente

sobre el sustrato en vez del material objetivo (material del cual se deseaba crear la capa) usado en el proceso de deposición sputtering.

La fase de grabado de vapor es otro método de grabado en seco, el cual puede realizarse con un equipo más simple que el utilizado en el proceso RIE; en este proceso la oblea o sustrato es colocado en el interior de una cámara en la cual uno o más gases son introducidos, y el material a remover es disuelto en una reacción química con las moléculas del gas.

Proceso Plasma-flash

El proceso de plasma-flash es realizado con la intención de preparar las propiedades de adhesión de las superficies del sustrato antes de someterlas a procesos de deposición (ej. sputtering), recubrimientos etc. En la mayoría de los casos se utiliza el gas oxígeno en forma de plasma. Este proceso principalmente remueve la capa de más bajo peso molecular y de este modo incrementa las propiedades de adhesión en la superficie.

4.8 TECNOLOGÍA SOI

La industria de dispositivos MEMS sigue experimentando un gran crecimiento y ampliando sus horizontes de aplicación; de la misma manera las exigencias del mercado se incrementan solicitando dispositivos de mayor confiabilidad y a su vez rendimiento. La utilización de sustratos SOI (Silicon On Insulator) en la fabricación de dispositivos MEMS ha demostrado ser extremadamente versátil [7]. Este material tiene ciertas ventajas respecto al silicio policristalino; unas de sus principales características son es la posibilidad de combinar circuitos eléctricos con elementos electromecánicos y también se caracteriza por su gran resistencia a la deformación en ambientes extremos.

Desde el punto de vista del diseño y la producción de MEMS, tiene además la ventaja de requerir un menor número de máscaras para el proceso de fabricación.

Así, la utilización de SOI para el desarrollo de MEMS se convierte en una opción viable e interesante.

La tecnología SOI (Silicon On Insulator) se refiere al uso de un sustrato formado por capa de silicio, aislante, silicio en lugar del convencional sustrato de silicio que se utiliza en la industria semiconductora especialmente en la fabricación de estructuras microelectrónicas. Los dispositivos basados en SOI se diferencian de los convencionales dispositivos construidos sobre silicio en que la junta de silicio es un aislante eléctrico generalmente dióxido de silicio.

La implementación de la tecnología SOI es una de las muchas estrategias de fabricación empleadas que permiten continuar con la miniaturización de los dispositivos micro-electrónicos.

El principal promotor de esta tecnología es IBM y sus beneficios son más o menos de un 15-25%, es decir, que un procesador implementado con transistores SOI funcionará a unos 15-25% más de Mhz que si se utilizarán transistores convencionales del mismo tamaño. La adopción de esta tecnología está siendo bastante rápida y por ahora IBM, Motorola, AMD y muchas otras empresas de nombre la van a implementar o ya lo han hecho. Por ejemplo, IBM ya la utiliza ampliamente, mientras que la familia Hammer de AMD será la primera de este fabricante a implementarla. Intel está evaluándola pero se cree que en un par de años como mucho veremos productos de esta empresa utilizando dicha tecnología.

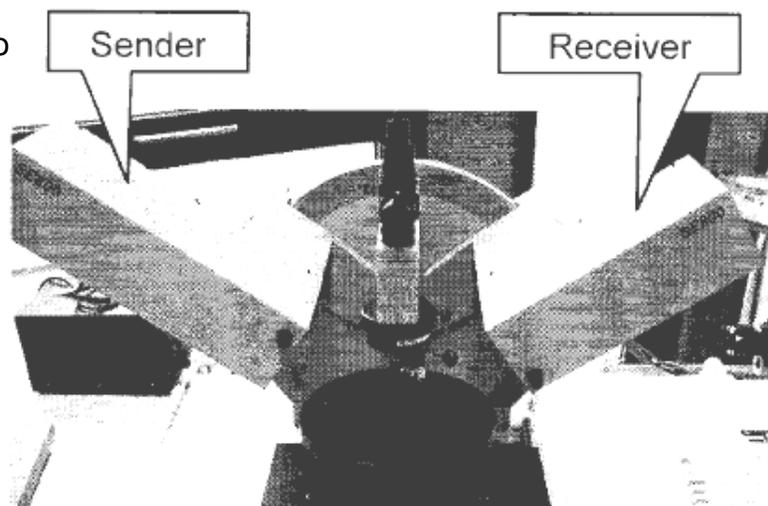
En cuanto lo concerniente a los equipos y herramientas de fabricación; los sustratos SOI son compatibles con los procesos convencionales utilizados por los sustratos de silicio.

5. DESCRIPCION DE LOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LAS PROCESOS DESARROLLADOS Y/O LABORATORIOS.

SE-800

El SE 800 consiste en un instrumento compuesto por un elipsómetro, un control de unidad, una fuente de luz y un receptor de luz que en conjunto con una computadora y el software SprectraRay determinan el ancho de una capa (cualquier material) sobre una película de silicio. Para obtener el valor del ancho de la capa, es necesario saber que tipo de capas están sobre la película de silicio. El análisis de la medición se basa en la comparación de la grafica experimental obtenida con la grafica de un modelo teórico programado. El resultado del ancho de la capa será el valor programado para la grafica teórica que más se aproxime a la grafica obtenida de la medición real. El principio de funcionamiento de este instrumento consiste en la generación de un rayo de luz que rebota en la superficie (oblea de silicio) y luego se introduce en el objeto receptor; produciendo una grafica según el tipo de capas existentes en la oblea. Se recomienda tener un conocimiento aproximado del ancho de la capa con el objetivo de obtener el grosor de la película en el menor tiempo.

Figura 19: Elipsometro

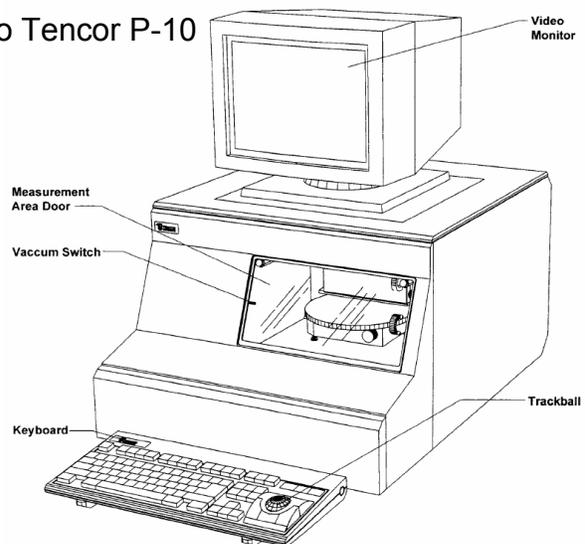


Fuente: Manual del instrumento SE-800

Tencor P-10

El Instrumento TENCOR P10 cuya función principal es medir el ancho de capa pero en superficies no uniformes, es decir en obleas que ya tienen algún tipo de grabado producto de los diferentes procesos. Consta básicamente de una computadora con su respectivo software y monitor y una parte mecánica que esta compuesta por un 'carro' que transporta la aguja. El funcionamiento de este es basa en el rodamiento de la aguja sobre la superficie de la oblea y en el monitor muestra una grafica con valores referentes al eje X y Y y a los movimientos que la aguja ha realizado. Con una configuración previa se limita el recorrido que la aguja realiza. La grafica del movimiento realizado permite determinar por medio de la ubicación de dos puntos y la respectiva sustracción de ellos el grosor de la capa que se quiere medir. Este instrumento es de gran exactitud siempre y cuando las estructuras presentes en la oblea de silicio permitan que la aguja pase hasta el fondo de la siguiente superficie. De modo contrario (si las estructuras están muy juntas) la aguja no podrá tocar el fondo de la otra superficie. También puede utilizarse para medir el ancho de estructuras usando el mismo principio de funcionamiento.

Figura 20: Perfil físico del instrumento Tencor P-10



Fuente: Manual del instrumento Tencor P-10

Figure 1 Tencor P-10 Surface Profiler

Microscopio Olympus MX-50

El microscopio Olympus MX-50 con su software analiSYS que permite realizar diferentes tipos de mediciones (ancho, largo, marcar puntos, hacer anotaciones etc) sobre fotografías de las estructuras que se encuentran sobre las obleas de silicio. Su funcionamiento básicamente consiste en una serie de lentes con diferentes aumentos que permiten tener una visión muy clara de las estructuras presentes sobre la oblea y una cámara ensamblada que exporta la imagen al monitor y luego de la toma de la fotografía se puede tomar las distintas mediciones referentes a esta utilizando dicho software.

Kart Suss

En litografía existe el equipo Kart Suss diseñado para la exposición la oblea (con algún tipo de material foto-sensitivo sobre esta) a los rayos U.V. (proceso de exposición). Su funcionamiento consiste principalmente en ubicar la máscara con el modelo correspondiente a transferir al sustrato, colocar el sustrato, alinear el sustrato con la máscara, dar inicio al proceso de rayos U.V. durante un tiempo específico (dependiendo del material de la foto-resina), quitar el sustrato, retirar la máscara. Cabe aclarar que existen una serie de pasos previos a estos relacionados con el encendido del equipo pero que se consideran de poca importancia.

EVG 6200.

Es una máquina que se utiliza en el proceso de litografía para realizar el subproceso de exposición del sustrato a los rayos U.V. Su funcionamiento es muy sencillo pues cuenta con un software encargado de manipular su funcionamiento, dependiendo los parámetros que el usuario ingrese. Entre los principales parámetros se encuentran el tiempo de exposición del sustrato a los rayos U.V, la

distancia entre la mascara a utilizar y el sustrato al cual se ha de transferir el modelo y como parámetros secundarios se puede nombrar el tamaño de la mascara a utilizar así como el tamaño de la oblea entre otros aspectos.

Figura 21: Revelador EVG 6200



Fuente: <https://www.evgtshop.com/epages/EVGroup.sf>

Modulo para deposiciones de capa PECVD y grabado RIE

Es un equipo de la empresa Surface Technology System, que consta de tres recintos diferentes. Uno de ellos es para cargar las obleas y posteriormente trasladarla al cuarto deseado (grabado o deposición). Los otros dos recintos son para realizar proceso de grabado utilizando el proceso RIE y el proceso de deposición utilizando la técnica PECVD respectivamente.

El control y funcionamiento de estos cuartos esta supervisado por un software que permite al usuario configurar los diferentes parámetros de la receta tales como gases a usar, presión de los gases al ingresar al cuarto, la frecuencia de la fuente de RF, la temperatura de las bandejas y el tiempo del proceso en general.

Figura 22: Modulo de deposición PECVD y grabado RIE

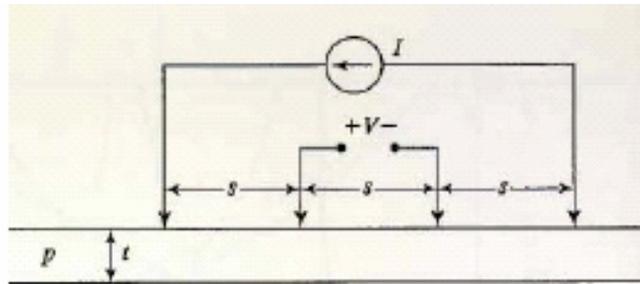


Fuente: <http://www.ipht-jena.de/index.php?id=156>

Veeco Four Point Probe

Un instrumento llamado *four point probe* es utilizado para medir la resistividad de las capas. Su funcionamiento se basa en la aplicación de una corriente fija a la oblea a través de dos de las sondas (de los extremos). El voltaje resultante es medido por las dos sondas interiores tal como se muestra en la figura 23.

Figura 23: Instrumento de medición de 4 puntos.



Fuente: Manual del instrumento

Si las sondas tienen uniformidad de espaciado entre ellas (s), la resistividad esta dada por la siguiente ecuación:

$$\rho = \left(2\pi s V / I\right) \text{ ohm - meters for } t \gg s$$

$$\rho = \left(\pi / \ln 2\right) \frac{V}{I} \text{ ohm - meters for } s \gg t$$

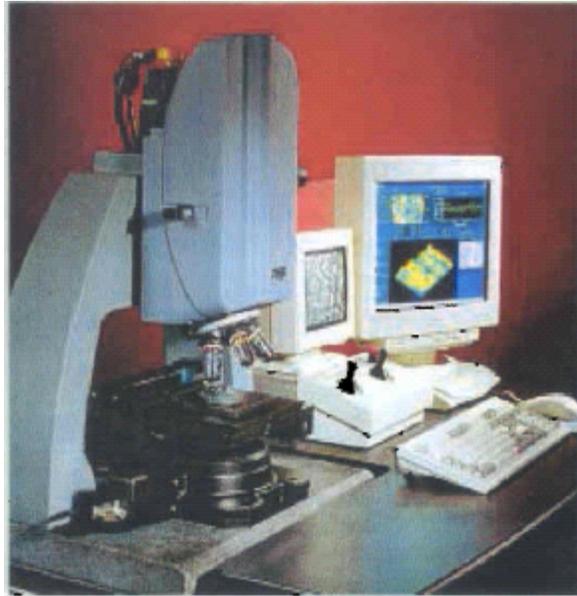
donde t es la medida del grosor de la capa. En el dispositivo tan solo es necesario ingresar ciertos parámetros de la oblea como el grosor de la capa, el diámetro de la oblea y el instrumento muestra los valores correspondientes a la resistividad y resistencia.

Zygo 600s.

Es un analizador de superficies de estructuras tridimensional. Provee imágenes graficas y un análisis de alta resolución numérica para caracterizar con exactitud la superficies que se esta midiendo sobre la estructura.

El instrumento usa un interferómetro de luz blanca para dibujar y medir las estructuras y hacer un análisis topográfico de las superficies en tres dimensiones sin hacer algún contacto con la superficie. Utiliza el análisis del dominio de la frecuencia para analizar la estructura.

Figura 24: Interferómetro de luz blanca



Fuente: Manual del instrumento Zygo 600s

6. DESARROLLO DEL PLAN DE TRABAJO

Unas de las etapas previas al plan de trabajo, consistió en el conocimiento del reglamento interno de la empresa, presentación de los compañeros de trabajo y su respectiva función dentro del departamento.

Se realizaron diferentes tipos de lecturas de introducción a MEMS en general, se conoció los principales áreas de aplicación y el impacto tecnológico que ha tenido sobre la micro-electrónica en general. También se logro comprender los principales procesos para la elaboración de dispositivos micro-electrónicos; entre los cuales podemos nombrar en orden de ejecución: el proceso de limpieza RCA, proceso de litografía, proceso de deposición de finas capas, proceso de grabado sobre la superficie de la oblea. Los anteriores procesos están descritos en el marco teórico de este informe.

Se llevo a cabo la respectiva capacitación respecto al manejo de los cuartos y/o maquinas donde se realizaban las deposiciones de material o de grabado sobre el sustrato; así como también en los principales microscopios e instrumentos de medición (descritos anteriormente) que se utilizan en el desarrollo de los procesos de los dispositivos micro-electrónicos.

Se realizo un proceso de fabricación de micro-estructuras sobre sustratos de silicio; donde se pudo entender con claridad y desarrollar la parte teórica.

En los procedimientos desarrollados se nombran:

1. Limpieza de los sustratos de silicio a través del proceso RCA.
2. Observaron los moldes existentes en las mascararas de vidrio.
3. Proceso HMDS. Con el objetivo de obtener una buena adherencia de la foto-resina.

4. Deposición de la foto-resina.
5. Endurecimiento de la foto-resina.
6. Proceso de alineación. (Alinear máscara con oblea)
7. Exposición de foto-resina. (Rayos U.V.)
8. Revelado del molde. En esta parte se obtienen los moldes de la máscara sobre el sustrato.
9. Liberación de las estructuras para diferentes tipos de análisis (Ej. Tensión).

Se realizó el proceso de deposición de una capa de poli-carbonato de silicio sobre una oblea de silicio a través del proceso PECVD. Los resultados que se obtuvieron estuvieron en el rango de aceptación y se observó que la uniformidad de la capa está ligada al manejo de los valores de las variables que se manejan en este proceso.

También se ejecutó el método de grabado RIE sobre un sustrato con un molde en foto-resina. Se vio que la variación de la frecuencia de la fuente de RF generaba una variación en la aceleración de los iones hacia el material y por consiguiente en el modo de grabado.

En cuanto al desarrollo de estructuras basadas en tecnología SOI, se inició con una serie de lecturas de introducción en este tema y se procedió a realizar los diferentes procesos necesarios; algunos de estos procesos son muy similares a los realizados sobre sustratos de silicio, luego es posible realizarlos sin recibir capacitación; tan solo basta con realizar cambios de temperatura, presiones etc., dependiendo del proceso.

Una vez las estructuras estuvieron listas se realizaron pruebas de tensión, en el instrumento Zygo para las estructuras hechas sobre diferentes tipos de sustrato (SOI, Si).

7. GLOSARIO DE TERMINOS UTILIZADOS.

➤ **Oxidación**

Consiste en la cesión de electrones.

Cuando un material se combina con el oxígeno, transformándose en óxidos más o menos complejos, se dice que experimenta una reacción de oxidación. De esta forma esquemática se puede representar el proceso de oxidación de la siguiente manera: cuando un material se encuentra situado en una atmósfera oxidante, su superficie se oxida más o menos rápidamente; el óxido que se transforma se deposita en la parte exterior del material recubriéndolo por completo. Para que el proceso de oxidación continúe en esa situación, el material o el oxígeno deben atravesar, por difusión, la capa de óxido, que se comporta oponiéndose tanto al movimiento de los átomos de oxígeno como a los del material. Existen capas de óxidos que presentan mayor oposición a este movimiento que otras.

➤ **Ionización.**

Es el proceso físico o químico mediante el cual se producen iones, estos son átomos o moléculas cargados eléctricamente debido al exceso o falta de electrones, respecto a un átomo o molécula neutra. A la especie química con mas electrones que el átomo o molécula se le llama anión, y posee una carga negativa, y a la que tiene menos electrones se le llama catión, teniendo una carga neta positiva. Hay varias maneras por las que se pueden formar iones de átomos o moléculas.

➤ **Fotoresina.**

Es un material foto-sensitivo es decir que cambia sus características químicas con exposición a la luz (generalmente radiación ultravioleta).

➤ **Plasma.**

Un plasma es típicamente un gas ionizado. El estado plasma es considerado un de los estados de la materia aparte de los gases porque este contiene propiedades únicas que lo diferencian de un gas. Ionizado hace referencia a electrones libres, los cuales no están dirigidos a formar átomos o moléculas. Las cargas eléctricas libres hacen que el plasma sea un conductor eléctrico, de modo que este tenga un buen comportamiento frente a campos electromagnéticos.

8. RECOMENDACION A LA EMPRESA

A modo personal recomiendo a la empresa hacer unos contactos mas ágiles y directos con los proveedores de mantenimiento de los instrumentos y maquinas de la empresa; ya que en algunas ocasiones el funcionamiento del departamento era en forma lenta debido a alguna avería en alguno de los aparatos que de uso común.

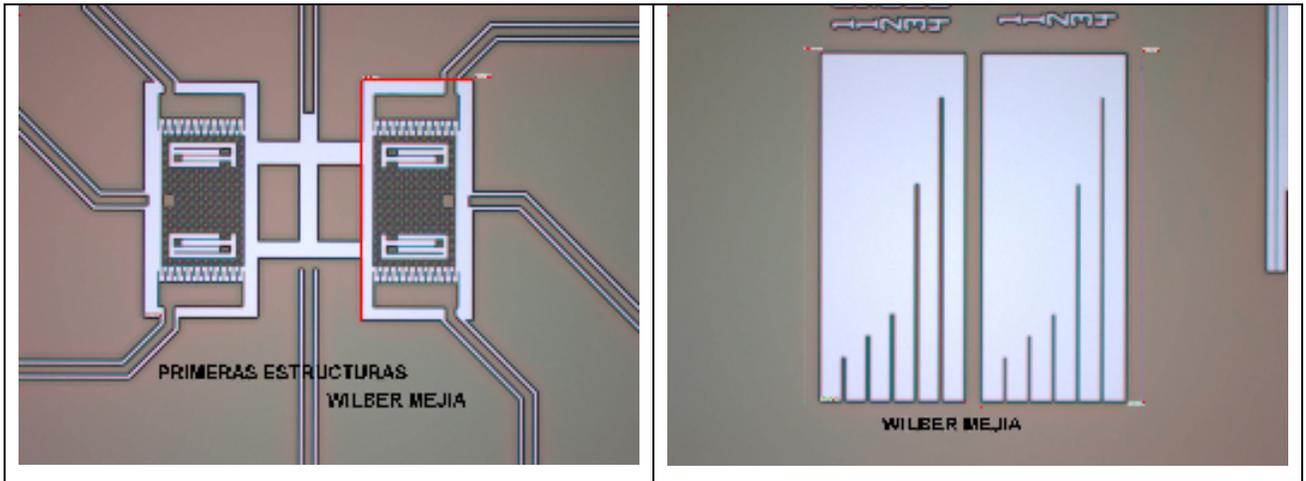
9. APORTES AL CONOCIMIENTO

Un primer ciclo se ha llevado a cabo por partes. La primera de estas se basó en la teoría de introducción a la fabricación microelectrónica y MEMS. En esta parte se conocieron los procesos básicos de fabricación de estructuras microelectrónicas iniciando por el proceso necesario de limpieza RCA, después de la introducción teórica se colaboró con el desarrollo de ciertos procesos como litografía, deposiciones con medios químicos y físicos; y grabados en seco y húmedo. A la vez que se realizaron y/o analizaron diferentes tipos de mediciones concernientes a grosor de capas depositadas, dimensiones de estructuras (ancho, largo), velocidad de deposición, uniformidad del proceso, profundidades de grabado, velocidades de grabado, análisis del perfil sobre el material grabado. De este modo se complementó la parte teórica y a la vez se adquirió la capacitación en los diferentes módulos e instrumentos en los que se realizan estos procesos.

Un segundo ciclo consistió en el desarrollo de estructuras microelectrónicas a base de material foto-sensitivo sobre sustratos de silicio. Ya con la experiencia necesaria para manejar los diferentes módulos e instrumentos, se inició el desarrollo de estas estructuras con el proceso básico de limpieza RCA. Seguido se realizó el proceso de litografía el cual comprende desde el proceso HMDS (preparar el sustrato para una buena adhesión de la fotoresina) hasta el proceso de revenido que consiste en darle fijación al material restante.

Las siguientes son fotografías correspondientes a las estructuras obtenidas. Con el microscopio Olympus MX – 50 se tomaron las fotografías de estas estructuras y se realizaron mediciones sobre estas.

Figura 25: Estructuras a base de material fotosensitivo sobre sustrato de silicio

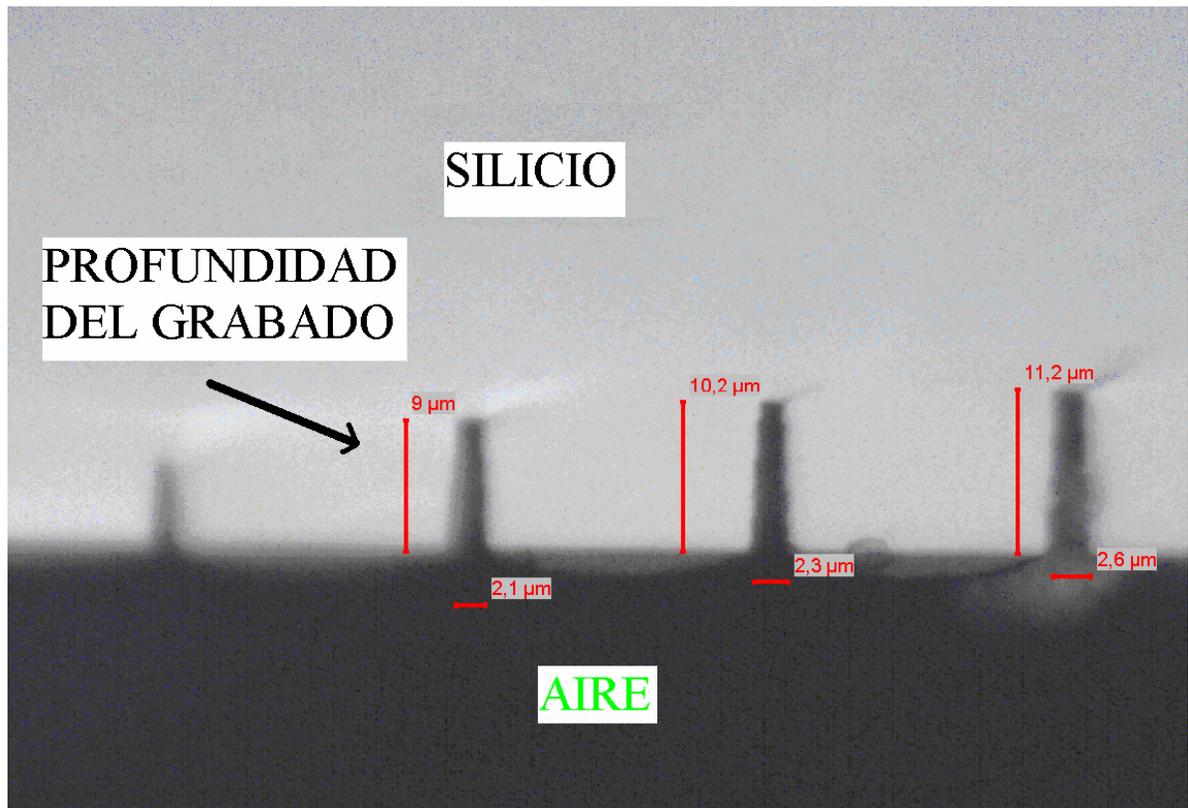


Fuente: Tomada con el microscopio Olympus MX-50

Estas estructuras fueron utilizadas para determinar la velocidad de grabado y perfil de paredes verticales cuando se grabo sobre el silicio utilizando el proceso Bosch.

La figura 26 ilustra los diferentes perfiles de las paredes verticales y la profundidad del grabado de acuerdo a la estructura; utilizando el proceso Bosch. Tal como se puede observar el grabado no es uniforme en profundidad debido a que las estructuras tienen diferente ancho. Lo anterior sirvió como referencia para determinar la velocidad de grabado en estructuras de ancho específico; y de esta manera determinar el tiempo del proceso para futuros grabados. También en los laterales donde se produjo el proceso; se pueden identificar los ciclos de pasivación y de grabado.

Figura 26: Vista transversal después del proceso Bosch



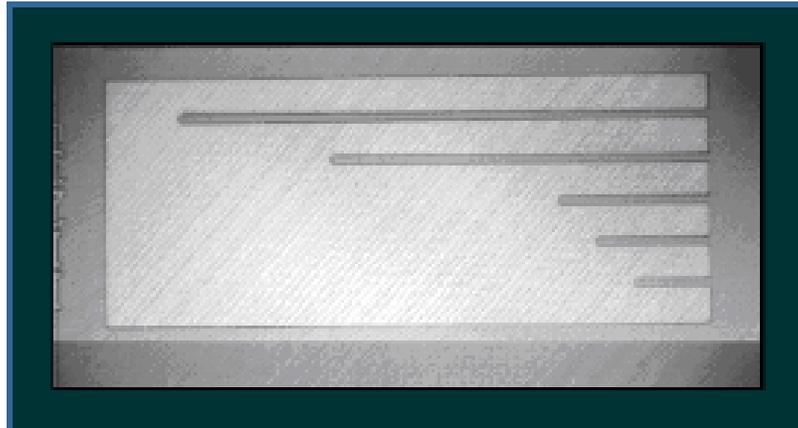
Fuente: tomada con el microscopio Olympus MX-50

Un tercer ciclo consistió en la elaboración de estructuras en sustrato tipo SOI. En esta etapa se comparó el esfuerzo (stress) existente en una capa de policarbonato de silicio sin un proceso de temperatura con otra capa del mismo material pero con un proceso de temperatura adicional.

Las estructuras formadas sobre los sustratos presentan una resistencia interna a la deformación. En el momento en que las estructuras son liberadas, la fuerza ejercidas por las capas dejan de actuar sobre la estructura y esta vuelve a su estado normal. Con el instrumento Zygo se puede observar y calcular el valor del

radio que se forma con la curva que se presenta en la estructura. En figura 27 se puede ver desde una vista superior la estructura que se esta analizando.

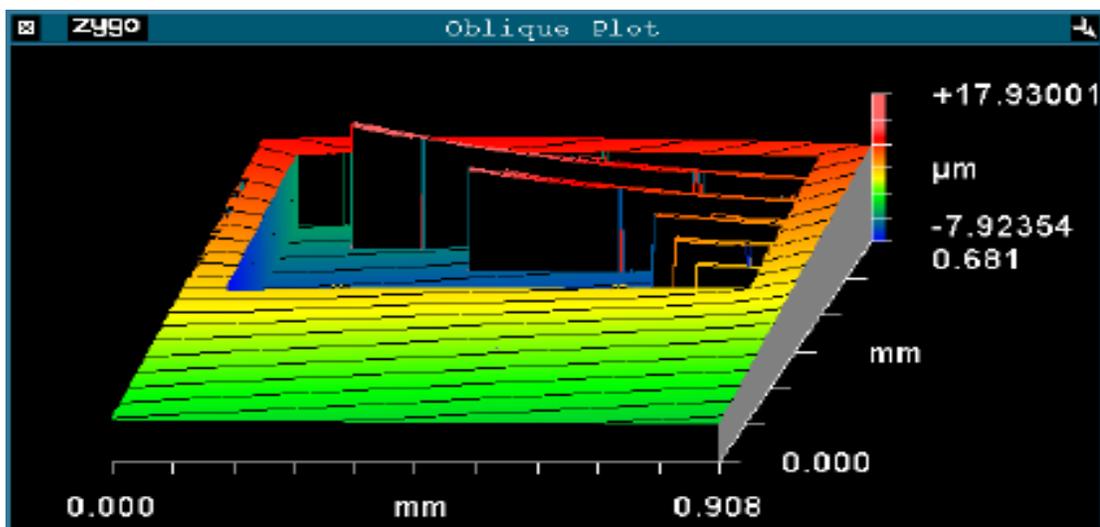
Figura 27: Vista superior de estructura a través del instrumento Zygo



Fuente: Tomada con el instrumento Zygo

Luego con el instrumento Zygo se escanea la estructura y con la imagen 3D podemos tener una idea de la forma de las estructuras después de que están libres. (En estado normal)

Figura 28: Vista 3D de la estructura con instrumento Zygo



Fuente: tomada con el instrumento Zygo

A través de este instrumento se obtienen una serie de valores como el radio que forman las estructuras y con otros valores como el ancho del sustrato, el ancho de la capa donde reposa la estructura se introducen al software del instrumento y este hace un análisis a través de la ecuación de Stoney; de esta manera se obtiene la tensión de la presente en la estructura.

Ecuación de Stoney:

$$\sigma_f = \frac{1}{6} * \frac{E_{Si} T^2}{R.t}$$

Donde: E_{Si} es el modulo de elasticidad del silicio

T es ancho del sustrato

t es el ancho de capa de donde reposa la estructura.

R es radio que forma la estructura.

Σ_f tensión de la estructura. [Pa]

En los resultados obtenidos existen ciertas diferencias en estructuras del mismo tipo. Lo anterior obedece a fallas presentadas en procesos anteriores que muy probablemente pueden estar ligadas a factores como polvo o alteración de las propiedades de los materiales frente a factores desconocidos.

La siguiente fue la tabla de resultados.

Tabla 2: Resultados De La Medición De Tensión En Estructuras Sobre Sustratos SOI

BEAM TYPE	ONLY SOI ZONE1	
700	WAFER1 3,55Mpa	WAFER2 3,56Mpa
500	3,56Mpa	3,56Mpa
200	533,3Kpa	3.55Mpa

BEAM TYPE	Poly-Si_Ca WITH_OUT_TEMP. ZONE1	
700	WAFER1 178Mpa	WAFER2 178Mpa
500	178Mpa	178Mpa
200	178Mpa	178Mpa

BEAM TYPE	ONLY SOI ZONE2	
700	WAFER1 5,33Mpa	WAFER2 3,56Mpa
500	1,6Mpa	1,78Mpa
200	8,89Mpa	533,3Kpa

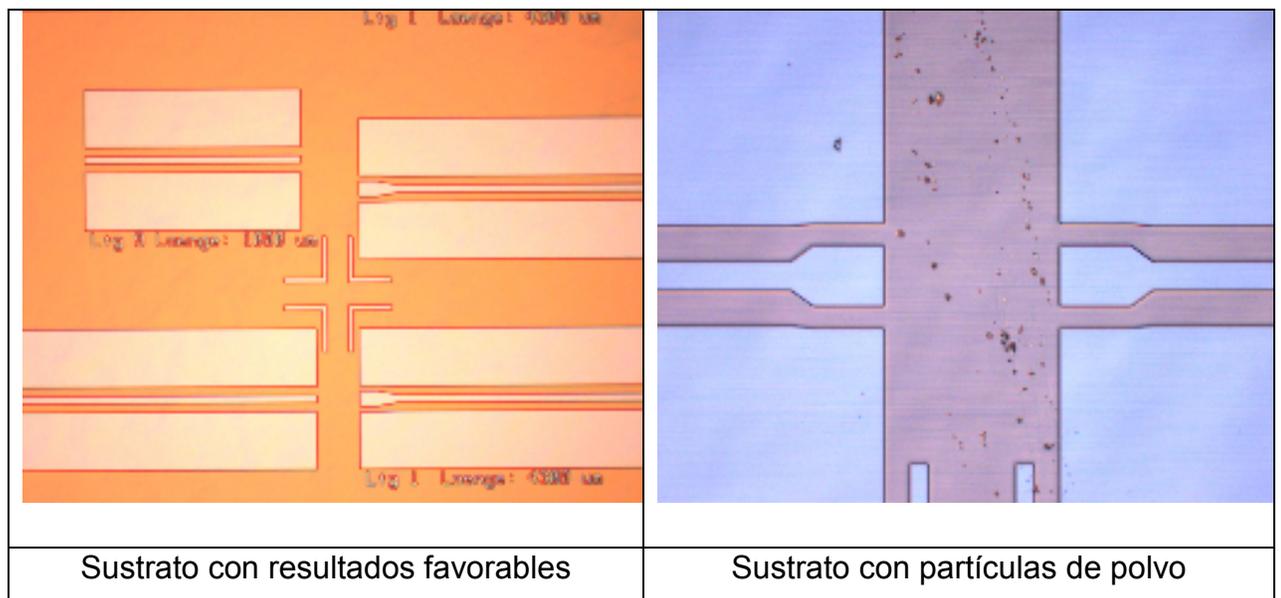
BEAM TYPE	Poly-Si_Ca WITH_OUT_TEMP. ZONE2	
700	WAFER1 178Mpa	WAFER2 178Mpa
500	178Mpa	178Mpa
200	178Mpa	178Mpa

BEAM TYPE	Poly-Si_Ca WITH_TEMPERATURE ZONE1	
700	WAFER1 35,6Mpa	WAFER2 35.6Mpa
500	35,6Mpa	35.6Mpa
200	53,6Mpa	35.6Mpa

BEAM TYPE	Poli-Si_Ca WITH_TEMPERATURE ZONE2	
700	WAFER1 35,6Mpa	WAFER2 53.6Mpa
500	35.6Mpa	53.6Mpa
200	35.6Mpa	53.3Mpa

También se realizaron varios procesos para diferentes proyectos, entre los que se pueden nombrar el proceso plasma-flash que se desarrolla con la intención de que la nueva superficie o capa a depositar tenga una buena adhesión con la capa actual, este proceso libera o remueve las moléculas con poco peso mejorando de esta manera las propiedades para un buen contacto, enseguida se realizó una deposición de cobre y los resultados obtenidos fueron satisfactorios; es decir la capa depositada presentó buena uniformidad; seguido por medio de litografía se transfirió un modelo de estructuras, donde se observó algunas imperfecciones en ciertos lugares de la oblea debido a posibles partículas de polvo que impidieron que el material foto-sensitivo fuera removido o causando imperfecciones en el grabado. A continuación se observa un sustrato con residuos de fotorresistencia.

Figura 29: Comparación de calidad de estructuras.



Fuente: Tomada con el microscopio Olympus MX-50

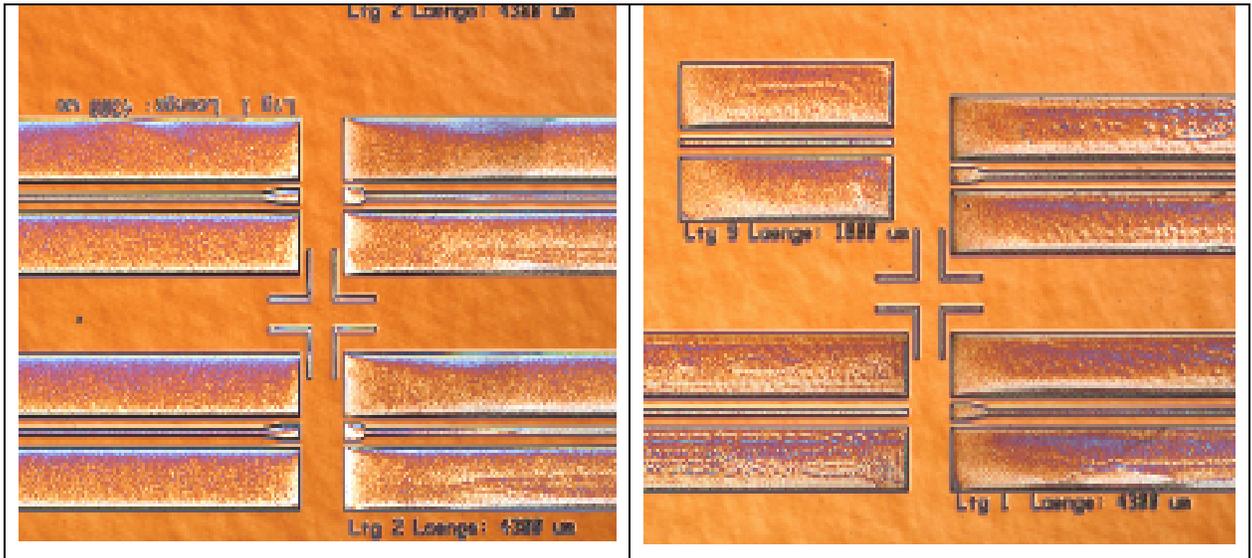
APORTE PERSONAL

El trabajo en equipo me permitió estar disponible a escuchar las opiniones y a recibir críticas constructivas y viceversa. Aprendí a tener confianza en mí y adquirí las bases de la lengua Alemana.

10. CONCLUSIONES

- El proceso Bosch cuyo objetivo primordial es conseguir en los perfiles laterales el mayor grado vertical posible; puede verse afectado si los tiempos del proceso de pasivación (deposición de polímero) y de grabado no son correctos produciéndose errores tales como poca verticalidad en las superficies laterales o área de grabado mucho mayor a la esperada. Lo anterior es debido a que este proceso no funciona de manera uniforme en toda la superficie ya que en una cavidad o zanja con mayor ancho; ingresarán más iones reactivos produciendo una profundidad mayor que en una zanja de ancho menor. (Ver figura 26).
- Se ejecutó el método de grabado RIE sobre un sustrato con un molde en foto-resina, donde se observó que la variación de la frecuencia de la fuente de RF generaba una variación en la aceleración de los iones hacia el material y por consiguiente en la tasa de grabado sobre el sustrato.
- Las deposiciones de cobre hechas con el proceso de electro-deposición producen en el sustrato partes con diferentes texturas pero existe uniformidad en la deposición. Esto es porque las reacciones químicas no se ejecutan de manera semejante en todo el material a depositar, lo importante es asegurar que el material se encuentre limpio al momento del proceso para que las propiedades del material se transmitan sin problemas y realizar el proceso por el tiempo suficiente para asegurar la deposición del material en todo el sustrato.

Figura 30: Estructuras después de un proceso de electro-deposición



Fuente: Tomada con el microscopio Olympus MX-50

- A través de las diferentes lecturas referentes a MEMS se conoció varios campos de aplicación que estos dispositivos tienen en el mercado hasta el momento.
- Algunos procesos de deposición y/o grabado de capas (entre otros) sobre el sustrato, tienen pequeñas diferencias respecto al procedimiento teórico. Esto es debido a que en el desarrollo varios procesos se han encontrado diferentes maneras de ejecutar estos procedimientos con mejores o más rápidos resultados que lo que la teoría explica.
- En el desarrollo el proceso RIE se obtienen mejores resultados de uniformidad de grabado cuando los iones encargados del grabado actúan químicamente (hacen una reacción química). Cuando estos iones tienen demasiada energía actúan físicamente desprendiendo las moléculas del sustrato y la uniformidad no es igual (no existe reacción química).

BIBLIOGRAFIA

- ❖ Alexander Y. Usenko, William N. Carr, "SOI Technology for MEMS Applications", *Electrochemical Society Proceedings*, Volume 99-3, pp347-352, 1999.
- ❖ ARI Lehto, "SOI Microsensors and MEMS", *Electrochemical Society Proceedings*.
- ❖ JAEGER Richard, INTRODUCTION TO MICROELECTRONIC FABRICATION. Second edition. Prentice Hall.
- ❖ KERN W, VOSSEN J. THIN FILM PROCESS. Academic Press. New York, 1978, V1.
- ❖ SIMMROSS Guillermo, FERRARI Luis, NIETO Sergio, MATA Eduardo, RODRÍGUEZ Marta. SENSORES Y ACTUADORES MEMS.
- ❖ TRAUTMANN Achim, Advance Microneedle and microelectrode arrays.. University of Freiburg. Alemania. Vol. 99-3, pp11-25, 1999.

Lista de páginas Web consultadas

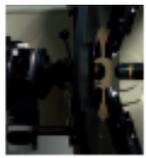
- ❖ www.Memsnet.Org/Mems
- ❖ www.ece.gatech.edu/research/labs/vc/processes/rcaClean.html

- ❖ Rober_man.tripod.com/archivos/solidos/Fabricaci_n_TC.pdf
- ❖ <http://www.bosch.com/content/language2/html/3283.htm>
- ❖ <http://www.bosch.com/content/language2/html/2919.htm>
- ❖ <http://www.ipht-jena.de/index.php?id=156>

ANEXOS

SENIsearch

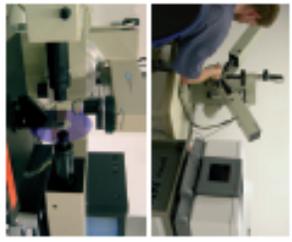
SENIsearch is a powerful software for the analysis of Raman spectra. It is designed to meet the requirements of modern research with special emphasis on speed and accuracy for an unattended variety of applications.



4-epi-illumination
20x magnification

Ultra-Sample Alignment
Sample alignment is critical for precise and accurate measurements. The SENIsearch uses a solution based on video calibration technology. Cycle of the scope, optical temperature and alignment.

Flexibility, Adaptability
The SENIsearch spectroscopic algorithm allows for flexible hardware configuration, which can be upgraded later on into the following FTRI performance.



Transferable
Customized algorithms and instrument ICD measurements can be performed with the SENIsearch, e.g. to improve the characteristics of fluorescence lines.



5-Step Scan Analyser principle
No moving optics during measurement for highest measurement accuracy.

Super achromatic compensator algorithm for Superchromatic compensator for ultra low noise detection provides optimal SN at low light levels.

Broadest spectral range of DUV-VIS-NIR for multiplexed ETRP sensor from 190 nm - 2500 nm
Applying multiplex diode array detection in the DUV-VIS and FT-IR spectroscopy in the NIR adds speed to high resolution and high signal to noise ratio.

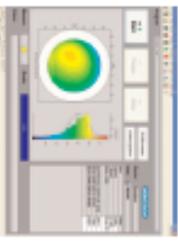
SPECTRA RAY II - SENTECH's comprehensive software for all purposes
Latest analysis technology for multiple arrays, multiple samples and combined photometric data analysis including large libraries of material data and sophisticated dispersion models, remote scripting as well as turn key applications.



Efficient durchlaufzeit

SPECTRARAY II

Comprehensive software for acquisition, modeling, fitting and reporting of Raman spectra, including multi-dimensional data sets. A, B, T, degree of polarization, cross-polarization and backscattering modes. Advanced algorithms for analysis of Raman angle, multi-sample, and high spatial resolution. Large range of data points for each data set. Flexible interface for remote control, scripting and integration of external hardware e.g. heating stage, cryostat.



Generality

The SPECTRARAY II is a general purpose software for Raman spectroscopy. It provides a wide range of data acquisition and analysis capabilities.

Model and data management

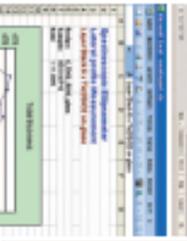
With SPECTRARAY II, the user can manage data at a specific coordinate system. The software provides a wide range of data acquisition and analysis capabilities.

A Ramanography

Ramanography is a technique for the visualization of Raman spectra. It allows for the visualization of Raman spectra at any other position of the sample.



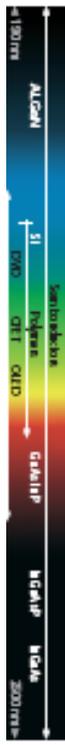
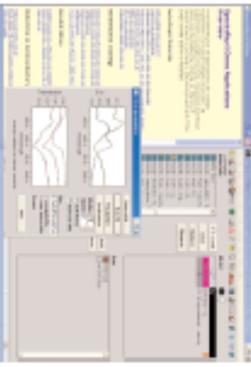
Backscattered Raman spectra for all.



5-pointing based on the standard optical display of results.



Dispersion model of the Raman spectra.



ANEXO B. HOJA DE DATOS MICROSCOPIO OLYMPUS MX-50

Hex #: 1313

Equipment Information Sheet

CNF

Olympus MX-50

Manager: Alan Bleier	<u>Work Phone</u> 254-4931	Calls to staff phones will be automatically forwarded to their cell phones during accessible hours. At other times leave a message or send them an email.
Backup: Gary Bordonaro	254-4936	
Backup:		

Safety

- No unusual hazards during normal operation
- No buddy system restrictions imposed on normal operation.

Process Restrictions

Material Restrictions

- None

Parameter Restrictions

- None

Scheduling / Sign-up Restrictions

- None

Requirements (Do Every Time)

When finished,

- Turn down illumination lamp to maximize bulb life
- Leave at 10X magnification and zoom = 1X
- Leave yellow filter in place for next photolithography user if you removed it
- Open aperture and field stop
- Leave in bright field mode

Prohibitions (Never Do)

- Never push microscope objective into sample

Common Problems

Problem:	Root Cause:	Solution:
- No illumination	- Bulb burned out	- During the day, page manager to change bulb; after hours, enter a trouble report on CNF web site
- Illumination present but no image in eyepiece or video	- Camera/eyepiece mirror in wrong position	- Move mirror control to correct position for both visual and video viewing
- Illumination present but image dim	- Aperture or field stop is closed down	- Open aperture or field stop
- Illumination present and stops open, but image dark	- System was left in dark field mode	- Switch back to bright field mode

Other Comments or Cautions

- Review the MX-50 computer-based training video on the computer next to the microscope to understand all of its features

ANEXO C. HOJA DE DATOS INSTRUMENTO REVELADOR EVG 6200

TECHNICAL DATA - EVG™6200TB / Rack

Tooling:

Water Chuck: Standard water chuck with bottomsides cut outs, capable of proximity, soft contact, hard contact and vacuum contact exposure mode

Water Thickness: 0.1 – 4,4 mm

Mask Holder: Standard mask holder

Mask Thickness: < 4 mm

Manual alignment stage:

Travel range, x: ± 5 mm
y: ± 5 mm
theta: + 3° (rotation)

(All movements are performed by manual high-precision spindles)

Microscopes:

Top side, motorized, split-field microscope with two objectives (10x)

Top side objective travel range,*
x: 30 – 200 mm
y: 100 to 1100mm
z: 4 mm

Bottom side, motorized, split-field microscope with two objectives (10x)

Bottom side objective travel range,*
x: 30 – 150 mm
y: 12 to 112mm
z: 4 mm

*actual travel range may be restricted by tool design

Monitor/camera:

17" TFT monitor
High resolution B/W CCD camera

Lamp house:

Modes: Constant Power, Constant Intensity

Optical setup, NUV for 350 - 450 nm

Lamp power: 1000W

UV light uniformity:
8" < ± 4%
6" < ± 5%

Contact force:

Between mask and substrate for wedge compensation
Adjustable from 0.5 – 40N

Exposure modes:

Soft contact, hard contact, vacuum contact, and proximity exposure mode

Separation/proximity adjustment:

Separation (Alignment Gap)
up to 350µm, motorized and fully recipe controlled

Proximity (Exposure Gap)
up to 350µm; motorized and fully recipe controlled

Alignment accuracy:

Up to 0.5 µm for top side alignment (with 20x objectives)

Printing resolution:

± 1µm, in vacuum contact and depending on process material

Process example*

- UV Standard Process
- AZ1505
- 28 µm (0.35µm)
- AZ100K, 1.4 DI, 20s
- Vacuum contact mode
- < 1µm printing resolution

General User Interface:

- Operating system: Windows 2000
- 3 different user log-levels
- Unlimited storage of recipes (1000 limited only)
- Remote diagnostics

© EVG 04-2007 - EVG reserves the right to change without prior notice

invent • innovate • implement



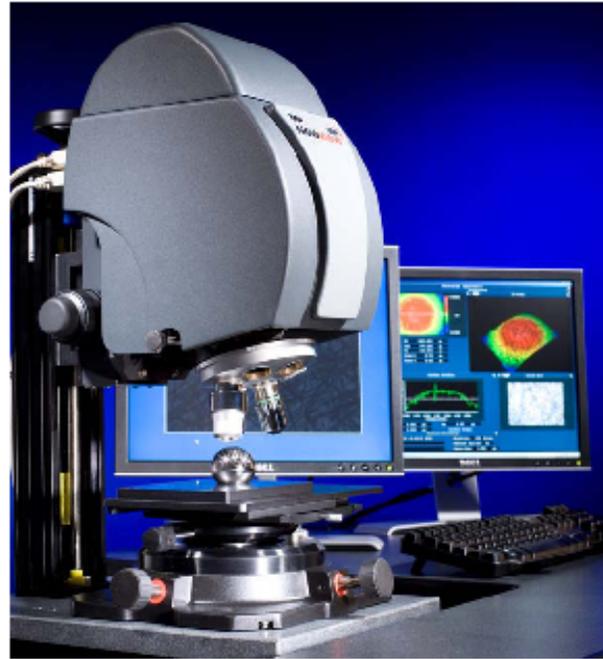
www.EVGroup.com

EV Group
Erich Thallner Strasse 1
A-4782 St. Florian / Inn
Phone: +43 7712 5311-0
Fax: +43 7712 5311-4600
Info@EVGroup.com

ANEXO D. HOJA DE DATOS INSTRUMENTO ZYGO 600S

NewView™ 600s Specifications

System	
Measurement Technique	Non contact, three dimensional, scanning white light interferometry
Scanner	Closed loop piezo based, with highly linear capacitive sensors
Field of View	0.05 to 3.5 mm (0.002 to 0.138 in.); objective dependent
Illuminator	Integrated long-life white-light LED with computer-controlled light level
Objective Mounting	Quick mount single objective dovetail
Controls	Optical Filter Tray and Focus Aid
Measurement Array	640x480; user selectable
Part Viewing	On-screen live display standard; second LCD monitor optional
Fine Focus Stage	Medium and fine manual control, with 1.2 in. (30 mm) of travel
Coarse Z-Stage	Coarse, large range manual control, with 10 in. (250 mm) of travel; actual travel is configuration dependent
Dimensions (HWD)	27.6 x 12 x 16.5 in. (702 x 300 x 420 mm) NewView only
Weight	~70 lb (32 kg), including part stage
Input Voltage	100/120/220/240 VAC, 50/60 Hz
Computer	High-performance Pentium-based Dell PC with LCD monitor
Software	ZYGO MetroPro software running under Microsoft Windows XP
Accessories (Options)	
Objectives	Infinite conjugate interferometric objectives; 2X, 2.5X, 5X, 10X, 20X, 50X, 100X; see Objective Table
Turrets	<ul style="list-style-type: none"> Manual 6-position turret Motorized 6-position turret
Part Stage	<ul style="list-style-type: none"> Manual tip/tilt/X/Y, with ±6° tip/tilt, 4 in. (100 mm) X/Y travel
Vibration Isolation System	<ul style="list-style-type: none"> Table, 31 x 24 x 24 in. (HWD) (787 x 610 x 610 mm); weight ~600 lb (272 kg); requires compressed air at 80 psi (4 bar) with 1/4 in. input hose Platform, tabletop, 2.75 x 20 x 24 in. (HWD) (70 x 506 x 610 mm); includes air pump
Worktable	<ul style="list-style-type: none"> Wrap-around, 34 x 52 x 35 in. (HWD) (864 x 1321 x 889 mm); nests next to the vibration isolation table
Measurement Standards	<ul style="list-style-type: none"> Lateral Calibration Standard Precision Lateral Calibration Standard SiC Reference Flat Step Height Standards



Performance	
Vertical Scan Range	≤ 150 μm (5906 μin)
Vertical Res.	< 0.1 nm (0.004 μin)
Lateral Res.	0.36 to 5.18 μm (14.2 to 204 μin); objective dependent
Data Scan Rate	≤ 15 μm/sec (591 μin/sec)
Maximum Data Points	307,200
RMS Repeatability	< 0.01 nm (0.0004 μin) RMS
Step Height	Accuracy < 0.25% Repeatability < 0.1% @ 1σ
Test Part Characteristics	
Material	Various surfaces: opaque, transparent, coated, uncoated, specular, and non specular
Reflectivity	1-100%
Environmental Requirements	
Temperature	15 to 30°C (59 to 86°F)
Rate of Temp. Change	< 1.0°C (1.8°F) per 15 min
Humidity	5 to 95% relative, noncondensing
Vibration Isolation	Required for vibration frequencies in the range of 1 Hz to 120 Hz

zygo®

NewView 600s Specifications

INTERFEROMETRIC OBJECTIVE SPECIFICATIONS										
Power	Type	Design	NA	WD (mm)	HVFOV (mm)	LRes (µm)	Samp (µm)	Turret Mount	Parfocal Dist (mm)	ZYGO P/N
2X	LWD	Michelson	0.056	29.6	3.52 x 2.84	5.18	5.50	No	101.0	6300-0216-01
2.5X	STD	Michelson	0.075	10.3	2.61 x 2.10	3.90	4.39	Yes	80.1	6300-0192-01
5X	STD	Michelson	0.13	6.3	1.41 x 1.06	2.19	2.30	Yes	56.5	6300-0193-01
6X	LWD	Michelson	0.14	29.6	1.41 x 1.06	2.04	2.20	No	101.0	6300-0219-01
10X	STD	Mirau	0.30	7.4	0.70 x 0.53	0.65	1.10	Yes	56.5	6300-0194-01
10X	LWD	Michelson	0.28	18.8	0.70 x 0.53	1.02	1.10	No	126.1	6300-0293-01
20X	STD	Mirau	0.40	4.7	0.35 x 0.26	0.71	0.55	Yes	56.5	6300-0195-01
50X	STD	Mirau	0.55	3.4	0.14 x 0.11	0.52	0.22	Yes	56.5	6300-0196-01
50X	TC	Mirau	0.55	3.4	0.14 x 0.11	0.52	0.22	Yes	56.5	6300-0196-01
100X	STD	Mirau	0.80	0.55	0.07 x 0.05	0.36	0.11	Yes	56.5	6300-0246-04

Objective Terminology

Power: Magnifying power of the objective.

Type: STD—Standard Working Distance; LWD—Long Working Distance; ST—Short-Throw Working Distance; HT—Low-Index Only; TC—Temperature Compensated.

Design: Interferometric type of objective.

NA: Numerical aperture, the sine of the half angle of the objective acceptance cone.

WD: Working distance, distance from the end of the slide to the lens surface when focused.

WD CV: The ratio of the total field of view of the objective to the field of view of the camera nose.

F Res: Lateral resolution, spatial resolution of the imaging system.

Samp: Spatial sampling, field size on the sample, based on the pixel size divided by the system magnification.

Turret Mount: Indicates if objective can be turret mounted. No means single objective mount only.

Parfocal Dist: Distance from the objective shoulder to the objective focal plane. Objectives with the same parfocal distance can be interchanged with little to no reocusing.