



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”**

**MANUFACTURA Y ANÁLISIS NUMÉRICO DE
SISTEMAS-MICRO-ELECTRO-MECÁNICOS
(MEMS)**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS
CON LA ESPECIALIDAD EN
INGENIERÍA MECÁNICA

P R E S E N T A

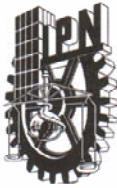
M. en C. LUIS ARMANDO FLORES HERRERA

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. EMMANUEL ALEJANDRO MERCHÁN CRUZ
DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA CALDERÓN



Mayo 2007



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

SIP-14

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 12:00 horas del día 7 del mes de Agosto del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E. S. I. M. E. para examinar la tesis de grado titulada:

**“MANUFACTURA Y ANÁLISIS NUMÉRICO DE
SISTEMAS-MICRO-ELECTRO-MECÁNICOS (MEMS)”.**

Presentada por el alumno:

FLORES

Apellido paterno

HERRERA

Apellido materno

LUIS ARMANDO

Nombre(s)

Con registro:

B	0	5	1	6	7	9
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis


DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA CALDERÓN

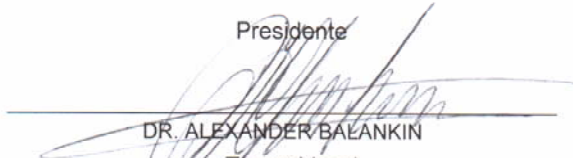
Segundo Vocal


DR. EMMANUEL ALEJANDRO MERCHAN CRUZ

Secretario


DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ

Presidente


DR. ALEXANDER BALANKIN

Tercer Vocal


DR. LUIS NIÑO DE RIVERA Y OYAZABAL

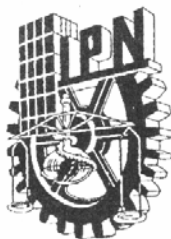
Suplente


DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


DR. JAIME ROBLES GARCIA





INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSTRADO E INVESTIGACION

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F., el día 03 del mes de Agosto del año 2007, el (la) que suscribe Luis Armando Flores Herrera alumno (a) del Programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica con número de registro B051679, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón y Dr. Emmanuel Alejandro Merchán Cruz y cede los derechos del trabajo intitulado "MANUFACTURA Y ANÁLISIS NUMÉRICO DE SISTEMAS-MICRO-ELECTRO-MECÁNICOS (MEMS)", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección lafloresh@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Luis Armando Flores Herrera

Nombre y firma

AGRADECIMIENTOS

AGRADEZCO INFINITAMENTE A DIOS, A MI ESPOSA, A MI MADRE, MI PADRE Y A TODA MI FAMILIA POR APOYARME SIEMPRE DE MANERA INCONDICIONAL.

A TODOS LOS PROFESORES DE LA SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN DE LA ESIME, QUIENES ME GUIARON DURANTE EL DESARROLLO DE MIS ESTUDIOS, EN ESPECIAL A LOS DOCTORES:

Dr. Alexander Balankin
Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón
Dr. Emmanuel Alejandro Merchán Cruz
Dr. Luis Héctor Hernández Gómez
Dr. Luis Niño De Rivera Y Oyarzabal
Dr. Guillermo Urriolagoitia Sosa
Dr. Pedro Tamayo Meza

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA POR EL APOYO ECONÓMICO OTORGADO PARA LA REALIZACIÓN DE ESTA INVESTIGACIÓN:

PROYECTO 2005-49701 ROBOTICA Y MICROTECNOLOGÍA APLICADA EN LA INGENIERÍA BIOMECÁNICA PARA EL DESARROLLO DE PRÓTESIS Y EQUIPO CON TECNOLOGÍA NACIONAL, DIRIGIDO POR DR. EMMANUEL MERCHÁN CRUZ

AL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL A QUIEN DEBO MI FORMACIÓN ACADÉMICA EN ESPECIAL A:

Dr. José Enrique Villa Rivera
Dr. Jaime Robles García
M. en C. Jesús Reyes García
Ing. Jorge Gómez Villarreal
M. en C. Enrique Cauich Soriano

A CONCORDIA UNIVERSITY Y AL CENTRO CONCORDIA DE INGENIERÍA VEHICULAR AVANZADA (CONCAVE), EN ESPECIAL A:

Dr. Nabil Esmail
Dr. Ion Stiharu
Dr. Muthukumaran Packirisamy
Dr. Rama Bhat
Dr. Subash Rakheja
Dr. Mingyuan Chen
Dr. Paula Wood-Adams

A LA FUNDACIÓN MÉXICO ESTADOS UNIDOS PARA LA CIENCIA (FUMEC) Y A LA RED INNOVACCE POR BRINDARME LA OPORTUNIDAD DE COLABORAR EN ESTA EMERGENTE ÁREA DE MEMS, EN ESPECIAL A:

Mtra. Guillermina Avendaño
Mtra. Gisela Martínez
Mtia. Leticia Almaguer Pérez

A TODOS MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. INTERÉS DE LA TESIS	1
1.3. REVISIÓN LITERARIA (ESTADO DEL ARTE)	2
1.3.1. <i>Trabajos Enfocados a la Fabricación de MEMS</i>	4
1.3.2. <i>Observaciones de la Cronología</i>	9
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	10
1.4.1. <i>Planteamiento del Problema</i>	10
1.4.2. <i>Organización de la Tesis</i>	11
1.4.3. <i>Alcances y Limitaciones</i>	11
1.5. CONTRIBUCIONES	12
1.6. DISCUSIÓN	13

2. ANTECEDENTES GENERALES 14

2.1. DEFINICIONES DE MEMS	15
2.2. EL ÉXITO INDUSTRIAL DE LOS MEMS	16
2.3. MEDIDAS ESCALARES	17
2.4. COMPONENTES DE LOS MEMS	18
2.5. MEMS MULTI DISCIPLINARIOS	18
2.5.1. <i>Disciplinas Enlazadas con MEMS</i>	19
2.6. ENLACE ENTRE EL MACROMUNDO Y EL NANOMUNDO	20
2.6.1. <i>Otras Aplicaciones</i>	23
2.7. VENTAJAS DE TRABAJAR EN LA MICRO ESCALA	25
2.8. VARIACIONES GENERALES DE LAS LEYES FÍSICAS EN EL AMBIENTE DE LA MICROINGENIERÍA	25
2.9. EMPAQUETAMIENTO	28
2.9.1. <i>Materiales Empleados en el Empaquetamiento</i>	29
2.10. DISCUSIÓN	29

3. MANUFACTURA DE MEMS..... 31

3.1. INTRODUCCIÓN	32
3.2. MANUFACTURA DE OBLEAS DE Si	33
3.2.1. <i>Propiedades Generales del Silicio</i>	34
3.3. MÉTODO DEL PROFESOR JAN CZOCHRALSKI	35
3.3.1. <i>DESCRIPCIÓN DEL PROCESO</i>	36
3.4. IDENTIFICACIÓN CRISTALOGRÁFICA	37
3.4.1. <i>Índice de Mller</i>	39
3.4.2. <i>Ángulo Entre Planos</i>	41
3.5. CORTE DE OBLEAS DE SILICIO EN EL LABORATORIO MEMS	42
3.6. EL PROCESO MUMPS® DE ADHESIÓN SUPERFICIAL	43
3.6.1. <i>Secuencia del Proceso</i>	44
3.7. EL PROCESO SUMMIT V™	45
3.8. FOTOLITOGRAFÍA	46
3.8.1. <i>Componentes</i>	46
3.8.2. <i>Mantenimiento de la Fotorresistencia</i>	47
3.8.3. <i>Máquina para Deposición de la Fotorresistencia</i>	48
3.8.4. <i>El Procedimiento de Deposición</i>	49
3.8.5. <i>Fotomáscara</i>	49
3.8.6. <i>Transferencia del Patrón</i>	50
3.9. DEGRADADO POR XEF ₂ EN ESTADO GASEOSO	52
3.9.1. <i>Materiales</i>	55

3.9.2. Degradador de XeF ₂ del CONCAVE	56
3.10. CONFIGURACIÓN GENERAL DE UN LABORATORIO MEMS	57
3.10.1. Cuarto Limpio (Clean Room).....	57
3.10.2. Laboratorio de Cómputo.....	58
3.10.3. Cuarto Amarillo	58
3.10.4. Equipo Complementario	59
3.11. INSTRUMENTACIÓN	59
3.11.1. Microscopio de Barrido Electrónico (SEM)	59
3.11.2. Microscopio de Fuerza Atómica (AFM)	60
3.11.3. Cortador LASER (FIB)	61
3.12. DISCUSIÓN	62
4. ANÁLISIS NUMÉRICO DE MICROESTRUCTURAS MEMS	64
4.1 INTRODUCCIÓN	65
4.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO	65
4.3. VOLTAJE DE ROMPIMIENTO	66
4.3.1. Descripción del Problema.....	66
4.3.2. Objetivo.....	66
4.3.3. Desarrollo	66
4.3.4. Análisis de Resultados.....	68
4.4. VOLTAJE DE ACTIVACIÓN Y LA FRECUENCIA NATURAL	69
4.4.1. Descripción del Problema.....	69
4.4.2. Objetivo.....	69
4.4.3. Desarrollo.....	70
4.4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	70
4.4.5. Comparación.....	71
4.5. FRECUENCIAS NATURALES Y MODOS DE VIBRACIÓN EMPLEANDO EL MÉTODO DE RAYLEIGH RITZ Y EL PROGRAMA ANSYS	72
4.5.1. Descripción del Problema.....	72
4.5.2. Objetivo.....	73
4.5.3. Desarrollo.....	73
4.5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	78
4.6. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EMPLEANDO EL MODELADO NUMÉRICO	82
4.6.1. Descripción del Problema.....	82
4.6.2. Objetivo.....	83
4.6.3. Desarrollo	83
4.6.4. Análisis de Resultados.....	83
4.7. MICROVIGA SIMPLEMENTE APOYADA.....	85
4.7.1. Descripción del Problema.....	85
4.7.2. Objetivo.....	85
4.7.3. Desarrollo	86
4.7.4. Análisis de Resultados.....	88
4.8. MICROVIGA TRIANGULAR EN CANTILEVER	90
4.8.1. Desarrollo.....	90
4.8.2. Objetivo.....	90
4.8.3. Desarrollo.....	91
4.8.4. Análisis de Resultados.....	94
4.9. DISCUSIÓN	97
5. TRABAJO EXPERIMENTAL.....	99
5.1 INTRODUCCIÓN	100
5.2. DESARROLLO DE LOS EXPERIMENTOS	100
5.3. DESCRIPCIÓN DE LA PRIMERA ETAPA: ENMASCARAMIENTO	101
5.3.1. Procedimiento para la Primera Etapa.....	102
5.3.2. Resultados de la Primera Etapa.....	104
5.4. DESCRIPCIÓN DE LA SEGUNDA ETAPA: DEGRADADO.....	106

5.4.1. Procedimiento para la Segunda Etapa	106
5.4.2. Resultados de la Segunda Etapa	107
5.5. DESCRIPCIÓN DE LA TERCERA ETAPA: MICROGRAFÍAS	108
5.5.1. Procedimiento para la tercera Etapa.....	108
5.5.2. Resultados de la Tercera Etapa	109
5.6. DESCRIPCIÓN DE LA CUARTA ETAPA: CORTE CON LÁSER DE GALIO SOBRE SILICIO ENMASCARADO NO DEGRADADO CON XeF_2	111
5.6.1. Procedimiento para la cuarta etapa	112
5.6.2. Resultados obtenidos de la cuarta etapa.....	113
5.7. DESCRIPCIÓN DE LA QUINTA ETAPA: CORTE CON LÁSER DE GALIO SOBRE SILICIO, DEGRADADO PREVIAMENTE CON XeF_2 ENMASCARADO	115
5.7.1. Procedimiento de la Quinta Etapa.....	116
5.7.2. Resultados de la Quinta Etapa.....	116
5.7.3. Resultados de la Quinta Etapa.....	119
5.8. DESCRIPCIÓN DE LA SEXTA ETAPA: CORTE CON LÁSER DE GALIO Y ANÁLISIS DE RAYOS X SOBRE SILICIO, DEGRADADO CON XeF_2 ENMASCARADO	119
5.8.1. RESULTADOS DE LA SEXTA ETAPA	120
5.9. DESCRIPCIÓN DE LA SÉPTIMA ETAPA: CORTE CON LÁSER DE GALIO SOBRE SILICIO, DEGRADADO CON XeF_2 NO ENMASCARADO	123
5.9.1. Procedimiento de la Séptima Etapa	123
5.9.2. Resultados de la Séptima Etapa	123
5.10. DESCRIPCIÓN DE LA OCTAVA ETAPA: MUESTREOS DE BARRIDO CON MICROSCOPIO DE FUERZA ATÓMICA SOBRE MUESTRAS DE SILICIO, DEGRADADO CON XeF_2 NO ENMASCARADO.....	125
5.10.1. Procedimiento de la Octava Etapa	126
5.10.2. Resultados de la Octava Etapa	127
5.11. DESCRIPCIÓN DE LA NOVENA ETAPA: OBTENCIÓN DE DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS BARRIDOS AFM.....	128
5.11.1 Análisis de Sección.....	129
5.11.2. Análisis de Rugosidad	129
5.11.3. Perfil de rugosidad.....	131
5.11.4. Análisis de profundidad	131
5.11.5. Densidad de potencia espectral	133
5.12. DESCRIPCIÓN DE LA DÉCIMA ETAPA: COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÉTODO RAYLEIGH-RITZ.....	134
5.12.2. Procedimiento de la décima etapa	134
5.12.3. Resultados de la décima etapa:.....	136
5.13. OBSERVACIONES.....	137
5.14. DISCUSIÓN	138
6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	140
6.1. CONCLUSIONES GENERALES DEL TRABAJO	141
6.2. PROPUESTAS DE TRABAJOS FUTUROS.....	143
REFERENCIAS.....	147

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Eventos relevantes en la historia de los MEMS y NEMS	3
2.1. Relación Objeto-dimensión	17
3.1. Incremento del diámetro de la oblea de <i>Si</i>	33
3.2. Propiedades mecánicas del Silicio	34
3.3. Capas empleadas en el proceso MUMPS	43
4.1: Voltajes de rompimiento para diferentes longitudes de viga	68
4.2. Comparación de resultados en Hz.	78
4.3. Propiedades de la capa estructural considerada	86
4.4. Valores de la deformación vs. voltaje	90
5.1 Material y equipo para la primera etapa	101
5.2. Material y equipo para la segunda etapa	106
5.3. Material y equipo para la tercera etapa	108
5.5. Material y equipo para la quinta etapa	116
5.7. Material y equipo para la octava etapa	126
5.8. Material y equipo para la décima etapa:	134

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Subcampos de la microtecnología	20
2.2. Diagrama de la escritura y lectura termomecánica. El mismo cantilever puede usarse para la escritura y lectura.	22
2.3. Cantilevers empleados en el sistema de lectura y escritura termomecánica. (a) Arreglo completo, (b) Ordenamiento de los cantilevers y (c) Acercamiento a un solo cantilever.	23
2.4. Estructura general de un microacelerómetro.	26
3.1. Proceso de obtención de una barra de <i>Si</i>	36
3.2 Cortes perpendiculares a la longitud de la barra	37
3.3. Cortes inclinados con respecto a la longitud de la barra.....	37
3.4. Identificación cristalográfica en las obleas de <i>Si</i>	38
3.5. Degradado anisotrópico, dependiente de la orientación cristalográfica	39
3.6. Degradado isotrópico, igual en todas direcciones.....	39
3.7. Planos cristalográficos en el <i>S</i>	40
3.8. Orientaciones de Miller.....	40
3.9. Degradado anisotrópico para posicionar fibra óptica (Moore & Syms, 2003).....	41
3.10. Ejemplos de degradados anisotrópicos, (a) en <i>V</i> y (b) rectos.....	42
3.11. Ordenamiento de las capas para fotolitografía.....	44
3.12. Transferencia del patrón a la fotoresistencia	44
3.13. Transferencia del patrón a la capa de óxido.....	44
3.14. Deposición de la capa estructural	45
3.15. Eliminación de la capa de óxido para liberar la estructura.	45
3.16. Partes constitutivas de la máquina para deposición de fotoresistencia.....	48
3.17. Fotomáscaras.....	49
3.18. Fotomáscara negativa y positiva.....	50
3.19. Fotomáscara para chip de microfluidos	50
3.20. Distribución de elementos en el proceso de fotolitografía.....	51
3.21. Sistema de fotolitografía de CONCAVE Research Center.....	51
3.22. Sistema de degradado de <i>Si</i> por <i>XeF₂</i> de U. Berkeley	52
3.23. Sistema de degradado de <i>Si</i> por <i>XeF₂</i> de K. Sugano.....	53
3.24. Sistema de degradado de <i>Si</i> por <i>XeF₂</i> de M. H. Hecht	53
3.25. Sistema de degradado de <i>Si</i> por <i>XeF₂</i> de Patrick B.	54
3.26. Variaciones en la presión de las cámaras para degradado	54
3.27. Sistema de degradado con <i>XeF₂</i> en estado gaseoso de CONCAVE.....	56
3.28. Vista lateral del sistema de degradado con <i>XeF₂</i> en estado gaseoso	56
3.29. Componentes generales de un laboratorio MEMS	57
3.30. Microfotografía de un cantilever para AFM.....	60
3.31. Funcionamiento de un AFM.....	61
4.1. Representación del sistema	66
4.2 Diagrama de cuerpo libre del sistema.....	67
4.3. Voltajes de rompimiento de vigas para longitudes (a) 100, (b) 150, (c) 200, (d) 250, (e) 300 y (f) 350 μm	69
4.4. Relación entre la frecuencia natural de las microvigas y el desplazamiento a través del claro para longitudes de: (a) 100, (b) 150 (c) 200, (d) 250 (e) 300 y (f) 350 μm	71

4.5. Voltaje de rompimiento y (a) relación entre la frecuencia natural y el desplazamiento (b) para una viga de 150 μm de largo y un claro de 1 μm	72
4.6. Voltaje de rompimiento y a) relación entre la frecuencia natural y el desplazamiento (b) para una viga de 150 μm de largo y un claro de 3 μm	72
4.7. Diagrama de flujo	77
4.8. Modos de vibración de la microviga en cantilever para (a) Primer modo (MEF), (b) Primer modo (RR), (c) Segundo modo (ANSYS), (d) Segundo (RR), (e) Tercer modo (ANSYS), (f) Tercer modo (RR), (g) Cuarto modo (ANSYS) y (h) Cuarto modo (RR).....	79
4.9. Frecuencia natural de la microviga, dependiente de la densidad del material de construcción, método directo y MEF.....	81
4.10. Frecuencia natural de la microviga, dependiente de la densidad del material de construcción, comparado con el método Rayleigh-Rytz.	81
4.11. Análisis para una amplia gama de densidades y el material relacionado.	82
4.12. Longitud del electrodo, voltaje y deflexión de la microviga	84
4.13. Vectores del campo electromagnético en V/ μm , (a) aplicando 30V con una longitud de electrodo de 200 μm y (b) aplicando 30V con una longitud de electrodo de 250 μm	84
4.14. Distribución del campo electromagnético V/ μm , (a) aplicando 50V con una longitud de electrodo de 225 μm y (b) aplicando 50V con una longitud de electrodo de 200 μm	85
4.15. Representación y vista en isométrico de la microviga doblemente empotrada	86
4.16. Frontera de acoplamiento.....	87
4.17. Voltaje entre el área inferior de la viga y el electrodo.....	88
4.18. Vectores de desplazamiento de la microviga.....	89
4.19. Desplazamientos máximos vs. voltaje	89
4.20. Posición del electrodo colocado debajo de la microviga	91
4.21. Vista superior de la microviga	91
4.22. Identificación de las capas estructurales en el proceso de fabricación	92
4.23. (a) Modelo de elementos finitos y (b) fotomáscara.	92
4.24. Conjunto de nodos frontera entre el medio estructural y el medio electrostático.....	93
4.25. Aplicación del voltaje en el sistema.....	94
4.26. Condiciones frontera del sistema acoplado.....	94
4.27. Vista en isométrico de la microviga, mostrando una máxima deformación en la punta con un valor de 0.81578 μm	95
4.28. Vista en isométrico de la microviga, con un esfuerzo máximo de 22.6 Pa.	95
4.29. Desplazamientos vectoriales de la deflexión de la microviga bajo la influencia de un voltaje de 30V, (a) vista isométrica y (b) lateral.....	96
4.30. Desplazamiento de la punta de la microviga al aplicar de 0 a 30V.....	96
4.31. Desplazamiento de la punta de la microviga al aplicar de 0 a 50V.....	97
5.1. Fotomáscara empleada en el proceso de enmascaramiento	104
5.2. Fotografías resultado de los trabajos de fotolitografía sobre obleas de Si.....	105
5.3. Microfotografías de las muestras enmascaradas.....	105
5.4. Micrografía de acercamiento a las muestras enmascaradas.....	106
5.5. Fotografía obtenida en microscopio estereoscópico de las muestras degradadas.....	107
5.6. Microfotografías obtenidas en la tercera etapa experimental, mostrando la distribución de las zonas circulares protegidas por el enmascaramiento.....	110
5.7. Micrografías obtenidas en la tercera etapa experimental, mostrando un acercamiento en a) la zona cóncava, b), c) y d) las zonas convexas y f) un acercamiento a la superficie degradada mostrando la rugosidad obtenida.....	110

5.8. Posición de la línea de corte (línea en color blanco)	113
5.9. Micrografía mostrando la longitud total del corte cercano a los 200 μ m	113
5.10. Micrografía del acercamiento a la zona del corte, mostrando un ancho aproximado de 4 μ m.	114
5.11. Micrografía de la muestra cortada con LÁSER solo en la zona protegida	114
5.12. Micrografía de la vista lateral de la sección cortada, mostrando las capas de Óxido y de la zona expuesta después de 50 minutos de exposición a 7nA.	115
5.13. Micrografía tomada en las instalaciones de CONCAVE Research Center en la Universidad de CONCORDIA, mostrando las zonas de micromaquinado con XeF ₂ y el corte con LÁSER (Stiharu, 2005).	116
Figura 5.14. Micrografías de (a) los detalles de la comparación y acercamientos (b), (c) y (d).	117
5.15. Vistas superiores del corte con LÁSER, sobre el corte con XeF ₂ ,	117
a) Observación total del corte y b) acercamiento.	117
5.16. a) Micrografías del corte con LÁSER y b) acercamiento en la zona del corte	120
5.17. Barrido de rayos X sobre la superficie de Si.	121
5.18. Barrido con rayos X de la capa de SiO.	122
5.19. Barrido con rayos X en el centro del corte	122
5.20. Micrografías de los cortes con LÁSER de Ga sobre muestras de Si degradadas con XeF ₂ a diferentes pulsos.	124
5.22. Análisis de sección de las muestras de a) 5 pulsos, b) 9 pulsos, c) 13 pulsos d) 17 pulsos e) 25 pulsos y f) 35 pulsos	129
5.23. Rugosidad RMS de una sección (nm)	129
5.24. Análisis de rugosidad de las áreas barridas de a) 5 pulsos, b) 9 pulsos, c) 13 pulsos d) 17 pulsos e) 25 pulsos y f) 35 pulsos.	130
5.25. Rugosidad RMS de toda el area (nm)	130
5.26. Análisis del perfil de rugosidad de a) 5 pulsos, b) 17 pulsos, c) 25 pulsos y d) 35 pulsos	131
5.27. Análisis estadístico de profundidad de (a) 5 pulsos (b) 9 pulsos (c) 13 pulsos (d) 17 pulsos (e) 25 pulsos (f) 35 pulsos	132
5.28. Profundidad promedio	132
5.30. RMS obtenida (nm)	133
5.31. Reflejo del LASER sobre la cara de la microviga	135
5.32. Panel de control del actuador piezoeléctrico	136
5.33. Amplitud vs. Frecuencia de excitación en la microviga.	137

RESUMEN

En este trabajo se estudian las técnicas actuales de miniaturización enfocadas la construcción de los Sistemas Micro Electro Mecánicos, mejor conocidos como MEMS. Las dimensiones de estos sistemas se encuentran en el rango de los micrómetros y debido a su reducido tamaño, estas micromáquinas ofrecen ventajas importantes que se muestran en esta investigación.

Las técnicas más empleadas en el desarrollo de Tecnología de Microsistemas (MST), forman parte de los capítulos iniciales de este trabajo. En ellos se muestran metodologías, procedimientos, materiales y equipos empleados para su fabricación. La evolución de estas metodologías ha contribuido a alcanzar los niveles tecnológicos actuales. Prueba de ello es el éxito industrial y comercial que ha logrado la tecnología electrónica. Desde la construcción de las primeras computadoras y hasta nuestros días, el éxito que han tenido los equipos de cómputo se basa principalmente en la miniaturización. Los sistemas de almacenamiento y procesamiento digital de datos en los llamados microprocesadores han hecho posible el desarrollo de las sociedades actuales. Estos sistemas no solo han reducido su tamaño, también han incrementado su capacidad y velocidad de trabajo y eso ha permitido el desarrollo de herramientas que son útiles a la humanidad como el caso de la Internet, originada por las grandes capacidades de comunicación que ya ha alcanzado inclusive la comunicación satelital. Los MEMS son originados como una derivación de esta tecnología electrónica, la cual ha demostrado ser altamente confiable, debido a estas razones, se espera que la miniaturización de las máquinas, transforme por completo las capacidades tecnológicas actuales.

El modelado matemático requerido para estimar el comportamiento estructural de los MEMS, es otro de los temas que se consideran en esta investigación. Un previo análisis estructural es requerido como paso inicial en el diseño de microestructuras, sobretudo para estimar sus dimensiones finales, las cuales pueden ser ligeramente alteradas durante los procesos de manufactura. Estos estudios se complementan con la comprobación experimental correspondiente que avala los resultados obtenidos numéricamente.

Parte de esta investigación se realizó en el Centro de Ingeniería Vehicular Avanzada de la Universidad de Concordia en Montreal Canadá. Los resultados obtenidos durante la estancia en esa escuela se exponen en los capítulos finales con fotografías y micrografías que demuestran el resultado de los experimentos realizados.

En el último capítulo se proponen trabajos que pueden ser elaborados como parte de una línea de investigación enfocada al tema de la miniaturización. Esto abre la oportunidad de interesar a los alumnos del posgrado en temas afines a esta especialidad. Durante el desarrollo de esta investigación, se han logrado colaboraciones de trabajo con otras instituciones, organismos y empresas que ven en los MEMS oportunidades de desarrollo importantes. En los anexos se muestran los resultados obtenidos de esta colaboración.

ABSTRACT

In this work, the miniaturization techniques for the construction of Micro Electro Mechanical Systems well known as MEMS are studied. The dimensions of these systems are located in the micrometer range, because of this reduced size; these micromachines offer a great amount of advantages that are shown in this research.

Most of the common techniques used for the development of Microsystems Technology (MST) are included in the initial chapters of this work. Methodologies, procedures and equipments considered for his fabrication are shown. The evolution of these methodologies has made an important contribution to achieve the recent technological advances. As a proof of this consideration, it is possible to talk about the industrial and economical success of the electronic industry. Since the construction of the first computers so far, the success of the computer industry is based on the miniaturization. Modern society's developments are based on digital storing and data management with microprocessors. Now, these systems are not only small, but faster and with increased capacities allowing the development of important software tools for the humanity, for instance, the internet which has reached the level of satellite communication. MEMS were originated as a new branch of this trustworthy electronic technology, because of these reasons; it is possible that the miniaturization of known machines completely change the technological achievements of today.

Mathematical modeling required to estimate the structural behavior of MEMS is also a subject considered in this work. A previous structural analysis is required as an initial step in microstructure design; because the final dimensions of the structure may have little change due the manufacturing process. These calculations were complimented with the corresponding experimental analysis supporting the obtained results.

Part of this research was carried in the Concordia Advanced Center for Vehicle Engineering of Concordia University in Montreal Canada. The obtained results during this period are shown in the last chapters of this work with the corresponding photographs and micrographs.

In the last chapter, proposals of different works are presented as the basis of a new research area focused on miniaturization. This increases the opportunity for graduate students to work in the development of this research field. During the progress of this work, collaborations with different institutions, organisms and companies have appeared. The results of these collaborations are also shown at the end of this thesis work.

1

INTRODUCCIÓN



En este capítulo se presenta una introducción al área de los Sistemas Micro-Electro-Mecánicos y la revisión literaria correspondiente. Al final de esta sección se describe la organización del trabajo de tesis y sus aportaciones.

1.1. INTRODUCCIÓN

Desde la construcción de la computadora ENIAC en la época de los 40's, y hasta nuestros días, se ha venido presentando una reducción considerable de las dimensiones geométricas de las herramientas de cálculo. Esta computadora con aproximadamente 2.4 metros de ancho por 30 metros de largo tenía un peso de 32 toneladas. Contaba con 17, 468 bulbos, permitiéndole realizar alrededor de 5000 sumas por segundo. La evolución de esta tecnología, permite en la actualidad, tener en un microcircuito, más de 40 millones de transistores y se ha observado que sigue la Ley de Moore de duplicar el número de transistores que caben en un microprocesador cada 18 meses (Gardner *et al.*, 2001).

Esta computadora ENIAC, fue construida dentro del *macromundo*, un mundo objetivo, en el cuál se desarrollan las tareas cotidianas, donde todo se puede distinguir a simple vista y las herramientas y equipos se manipulan fácilmente con las manos, por ejemplo; el conjunto de elementos de la mayoría de las piezas de la mencionada ENIAC, botones, cables, tornillos, etc., pertenecen al macromundo. Nuevos retos han aparecido, a medida que se van miniaturizado los componentes de un ordenador, la vista y los demás sentidos físicos, pierden su influencia a esa escala. En esta otra dimensión miniaturizada llamada micromundo ha sido necesaria la construcción de nuevas herramientas que sustituyan las capacidades humanas en esta escala microscópica. Este conjunto de herramientas forman parte de los llamados Sistemas Micro Electro Mecánicos. A partir del primer Sistema-Micro-Electro-Mecánico (MEMS por sus siglas en inglés), construido en los 60's, un resonador de oro con compuerta MOS (Metal Óxido de Silicio), presentado en (Nathanson, 1967), la necesidad de diseñar elementos miniaturizados ha sido motivo de investigación y estudio para científicos de diversas áreas a lo largo de la historia y se ha incrementado notoriamente en la última década.

1.2. INTERÉS DE LA TESIS

Este trabajo de investigación tiene el propósito de contribuir al desarrollo tecnológico en el área de la miniaturización. El trabajo que aquí se presenta es pionero en México y pretende mostrar, con propósitos académicos, algunos de los procedimientos y equipos que se emplean en la actualidad para poder manufacturar estructuras en escala microscópica. Cabe mencionar que este

trabajo de investigación, se realizó en conjunto con la Universidad de CONCORDIA en Montreal Canadá, específicamente en el CONCAVE o Concordia Centre for Advanced Vehicle Engineering, bajo la supervisión del Dr. Ion Stiharu y del Dr. Muthukumaran Packirisamy. De manera especial se agradece a la Universidad de CONCORDIA, al CONCAVE y su personal, todas las facilidades prestadas para la realización de esta investigación.

Se espera que en México y otros países, la inversión en esta rama de la ciencia se incremente notablemente, ya que el desarrollo de micromáquinas y microdispositivos que puedan ayudar al mejoramiento de la calidad de vida, es una tarea primordial. La tecnología MEMS permitirá incrementar la capacidad de atención al público y el nivel de calidad que se requiere. La demanda de pacientes por el uso de las instalaciones hospitalarias es cada vez mayor, así que esta tecnología también reducirá los gastos de hospitalización que debe cubrir el paciente y en consecuencia se reducirían los gastos de mantenimiento del equipo.

El desarrollo de mejoras en los sistemas de comunicación que brinden mayor velocidad y capacidad de comunicación y transmisión de datos es imprescindible, al igual que el desarrollo de nuevos medicamentos, productos químicos y procesos de transformación de materia prima, ya que se pueden ver beneficiados con el uso de los chips de microfluidos, los cuales, debidamente instrumentados multiplican las posibilidades de combinar sustancias químicas en la búsqueda de nuevos productos que pueden incluir al área de la ingeniería genética, química, bioquímica, alimenticia, etc.

1.3. REVISIÓN LITERARIA (ESTADO DEL ARTE)

La historia de los MEMS como lo muestra la tabla 1.1, tiene eventos relevantes, que han hecho evolucionar tanto a la micro como a la nanotecnología (Pelesco. & Bernstein., 2002). Se observa que, en los años 40's, un instrumento tan importante como el radar, fue motivo de gran atención y la tecnología de los semiconductores, emergente en aquel entonces, encontró ahí un sólido campo de aplicación. Las ventajas de la miniaturización ya se comenzaban a notar, siendo no sólo para Feynman motivo de gran interés, sino también para muchas compañías, que comienzan a establecer procesos de fabricación de grandes volúmenes, como el microprocesador, que tiene gran demanda aún en nuestros días. Ya en la época de los 80's, el tema de la nanotecnología

comienza a tomar fuerza sobre todo cuando se vincula con la medicina y la biología. Los circuitos integrados ya podían manufacturarse confiablemente y para 1984, la universidad de Berkeley, con el proceso de adhesión de superficies de silicio (*Si*), demuestra que es posible manufacturar una microestructura con propiedades mecánicas y un circuito microelectrónico en el mismo dispositivo. Lo extraordinario de esta combinación ha encontrado una aplicación actual en los acelerómetros que detonan las bolsas de aire en los sistemas de seguridad de los automóviles, ya que en el mismo dispositivo se integra la parte electrónica y mecánica, lo que, a la larga, produce grandes ahorros económicos, energéticos y mejoras en el rendimiento del sistema. Hoy en día considerando los grandes avances tecnológicos, se pueden esperar grandes avances en el área de la miniaturización. Las capacidades de cómputo actuales, el incremento de las redes de Internet de alta velocidad, el acceso a las nuevas tecnologías y avanzados programas de cómputo para diseño y cálculo, pronostican una inmensa cantidad de avances en el área de los Sistemas Micro y Nano-Electro-Mecánicos. Prueba de ello, es el desarrollo del Microscopio de Fuerza Atómica que en 1986 revolucionó por completo el análisis de rugosidad en superficies, permitiendo obtener no sólo imágenes tridimensionales de las muestras analizadas, sino datos estadísticos que permiten caracterizar diferentes materiales.

Tabla 1.1. Eventos relevantes en la historia de los MEMS y NEMS (Pelesco & Bernstein., 2002).

Año	Evento
1940s	<i>El radar da lugar al desarrollo de los semiconductores puros.</i>
1959	<i>La famosa conferencia de Richard P. Feynman "There's plenty of room at the bottom".</i>
1960s	<i>Invencción del proceso de fabricación planar de grandes volúmenes.</i>
1964	<i>H.C. Nathanson y equipo, en Westinhouse producen el transistor de compuerta resonante, el primer dispositivo MEMS producido en masa.</i>
1970s	<i>Invencción del microprocesador, incrementando cada vez más la demanda de los circuitos integrados.</i>
1979	<i>Se desarrolla el primer acelerómetro micromaquinado en la universidad de Stanford.</i>
1981	<i>Se publica el artículo: Protein design as a pathway to molecular. Este es posiblemente el primer artículo sobre nanotecnología molecular en aparecer.</i>
1982	<i>Se inventa el Microscopio de Barrido por corriente de Túnel.</i>
1984	<i>El proceso de adhesión de superficies de polisilicio es desarrollado en la universidad de Berkeley, California. Los MEMS y los circuitos integrados pueden fabricarse juntos por primera vez.</i>
1985	<i>Se descubre la molécula Buckyball.</i>
1986	<i>Se inventa el microscopio de fuerza atómica.</i>
1991	<i>Se descubre el nanotubo de carbón</i>
1996	<i>Richard Smalley desarrolla una técnica para desarrollar nanotubos de carbón de diámetro uniforme.</i>
2000s	<i>El número de dispositivos MEMS y sus aplicaciones se incrementa continuamente. La atención Nacional Estadounidense se centra en fundar investigación y educación en nanotecnología.</i>

1.3.1. Trabajos Enfocados a la Fabricación de MEMS

Con respecto al desarrollo de los sistemas y técnicas de fabricación de estructuras miniaturizadas, existen varias ideas, como la presentada en (Feynman, 1992), trabajo que recopila lo que Feynman había expuesto en 1959, donde expresaba su gran inquietud en los diferentes temas que involucran a la miniaturización hasta el grado de mencionar sus expectativas si se lograra arreglar o modificar la posición de los átomos de algún material. Desde entonces, y hasta la concepción de los primeros MEMS, su fabricación actual se ha llegado a constituir básicamente por un procedimiento que emplea un conjunto de fotomáscaras, las cuales se develan de manera selectiva y secuencial sobre delgadas películas de materiales semiconductores, metálicos, polímeros, etc. Estos enmascaramientos, como se verá en el capítulo dos, se emplean para proteger a los materiales de ácidos o gases, que al degradar el material, forman una estructura planar con propiedades electromecánicas importantes. Al respecto existen varios dispositivos construidos con estas técnicas de adhesión de capas delgadas. En (Hirano *et al.*, 1992), se presentan los pasos de diseño, fabricación y operación de un actuador tipo peine, mencionando que la clave para reducir el voltaje de activación de este tipo de actuadores es que el claro entre los dientes del peine se encuentre en un rango menor a un micrómetro. En el trabajo de (Eun *et al.*, 1992) se reporta un procedimiento empleando figuras de alineación en ambas caras de una oblea de silicio para remover material enmascarado, permitiéndole de esta forma la integración de una estructura mecánica en una cara y un circuito integrado en la otra. Esto demuestra que la dificultad de alinear las fotomáscaras así como su calidad de impresión ya representaba un conjunto de proyectos por resolver. En (Gianchandani & Najafi., 1992) se presenta un proceso para disolver obleas de silicio con el objeto de fabricar diferentes estructuras micromecánicas empleando EDP (Ethylene Diamine Pyrocatechol). En este tipo de trabajos, el proceso de litografía empleado debe tener una alta calidad y en ese tema ya se han obtenido grandes avances como se ve en (Buchmann *et al.*, 1992), donde se presenta un proceso de litografía de alta profundidad de foco, empleando una fuente de iones de helio y en (Wang *et al.*, 1992), se presenta un procedimiento para degradado de superficies empleando pulsos de voltaje en muestras de silicio.

El empleo de sustancias fotoresistivas adquiere gran importancia como se muestra en (Dizon *et al.*, 1993) donde se describe un método para transferir diseños o patrones empleando maquinado por iones direccionados. Este método evita las dificultades asociadas con el procesamiento de la

fotoreistencia en substratos para el mejoramiento del desarrollo de microestructuras en 3D. En (Deng *et al.*, 1994) se desarrolla un proceso de fabricación para generar un prototipo rápido de micromotores, hechos con capas de polisilicio, empleando fotoreistencia estándar empleada en la tecnología de circuitos integrados para realizar enmascaramiento. En (Toshiyoshi *et al.*, 1995) se describe una secuencia de enmascaramiento para la microfabricación de un interruptor óptico avanzado que no es activado por motores, eliminando el ruido asociado con estos actuadores mejorando el rendimiento general de la transmisión de señales.

En cuanto a actuadores miniaturizados que emplean fuerza electrostática en (Legtenberg *et al.*, 1997), al igual que en (Legtenberg *et al.*, 1998), se presenta un proceso de micromaquinado completo para fabricar este tipo de dispositivos, los cuales, se encuentran conectados a microengranes, generando una micromáquina más compleja que las mencionadas anteriormente. Este método emplea un proceso de deposición de 7 capas delgadas de polisilicio, comenzando en una oblea tipo *p* de silicio con orientación $\langle 100 \rangle$. Su trabajo presenta también la fabricación de un micromotor activado electrostáticamente empleando procesos de enmascaramiento y deposición de capas de polisilicio.

Los materiales y técnicas para miniaturizar se van experimentando en varias ramas, como en el trabajo reportado en (Papautsky *et al.*, 1998), que presenta un proceso de manufactura de baja temperatura compatible con la que soporta un circuito integrado, para la fabricación de superficies micromaquinadas, que es distinto del presentado en (Stanczyk *et al.*, 2000), en el que se presenta la microfabricación de un actuador electrostático para desplazamientos mayores, empleando *deposición por medio de vapor* formando un sándwich de capas de Parilene y una capa intermedia de Platino depositada por chisporroteo (*sputtering*). Pero también existen métodos combinados como el de (Yazdi & Najafi, 2000) que presentan el desarrollo de un acelerómetro empleando ambas técnicas de micromaquinado, tanto la de adhesión de superficies como la de remoción de superficies. Además de ello, muestra la importancia de los cambios que se producen en el entorno micrométrico, como el caso del amortiguamiento del aire que rodea a las microestructuras. El objetivo de combinar técnicas de microfabricación se basa en la necesidad de obtener en la misma oblea la parte estructural y la parte electrónica, como lo muestra (Pan & Lin, 2001) en el proceso de fabricación LIGA (*Lithographie Galvanoformung*

Abformung), empleado para transferir una microestructura a un sustrato de circuito integrado (IC), dejando instalados en el mismo chip el sistema mecánico y el sistema electrónico.

En (Takahata & Gianchandani, 2002), se describe una técnica de maquinado, empleando micro electro descargas con arreglos de electrones, para alcanzar un alto paralelismo y velocidad en el maquinado. Esta técnica permite cortar cualquier material eléctricamente conductor, incluyendo acero, grafito, silicio y magnetos permanentes. En ella se emplea una descarga secuencial de pulsos eléctricos entre un electrodo de dimensiones microscópicas y la pieza de trabajo, ambas sumergidas en un aceite dieléctrico. Esta técnica permite obtener piezas en tercera dimensión miniaturizadas, como engranes y ruedas dentadas, en el orden de los 300 μ m de diámetro. La existencia de estas técnicas alternativas se deriva de las dificultades encontradas en los métodos de deposición, como lo presenta (Shih *et al.*, 2001) en sus métodos, con los cuales se puede ayudar a disminuir las dificultades que se tienen al depositar capas delgadas de TiNi empleadas en el desarrollo de diferentes estructuras MEMS.

En (Yi *et al.*, 2002), se describen los pasos del proceso de deposición de silicio nitrurado para la fabricación de estructuras planares con cavidades. También se realiza la medición de los esfuerzos residuales por medio de un análisis de pandeo, del cual se estima el valor del modulo de Young de las películas delgadas depositadas. Similarmente, en (Seshia *et al.*, 2002) abordan el tema de las capas delgadas, se muestra en el trabajo la sección transversal de un conjunto de capas depositadas en la micro fabricación de un acelerómetro. En este trabajo se emplea el programa ANSYS® para modelar el acelerómetro y encontrar la relación entre las frecuencias de la viga con respecto a las diferentes aceleraciones aplicadas. Una forma de depositar esas capas delgadas, es empleando LPCVD, (siglas en inglés de *Low Pressure Chemical Vapor Deposition*). Esta técnica empleada en (Dougherty *et al.*, 2003), describe métodos para utilizar estos procesos LPCVD en la deposición de una capa de polisilicio para la fabricación de estructuras MEMS.

Continuando con esta temática, se puede mencionar el trabajo de (Rodjégard *et al.*, 2005) en el que se muestra una breve descripción del proceso de fabricación de un acelerómetro capacitivo para tres ejes. En (Steingoetter & Fouckhardt, 2005), se reporta la secuencia del proceso de degradado tipo húmedo, empleando una máscara dura de Cr. En (Matsuzuka *et al.*, 2005) se

publica un nuevo método de fabricación de microestructuras en tercera dimensión, empleando una doble exposición de rayos X, realizando estudios sobre la predicción de la forma de la estructura final. En (Lee *et al.*, 2005b) se reporta el desarrollo de un giroscopio MEMS, mostrando el proceso de fabricación por capas. También se puede mencionar la fabricación de los micro inductores en (Rais & Ayazi, 2005). En octubre de 2005, Hyung Suk Lee (Lee & Yoon, 2005), proponen un método de develado de fotoresistencia positiva, empleando un difusor de rayos UV.

De gran importancia para los sistemas de comunicación futuros, en (Niklaus *et al.*, 2003) presenta la fabricación de un arreglo de microespejos de silicio compatible con el proceso CMOS, que integra la estructura mecánica con los electrodos de activación. Estos microespejos se emplean para realizar conmutaciones ópticas de señales luminosas. Su trabajo muestra además, la forma en que el conjunto de capas fue adherido al substrato del MEMS. Aunado a esto, incluye la muestra extraída con AFM (Microscopio de Fuerza Atómica) de la superficie del microespejo, la cual es de suma importancia para conocer la longitud de onda que se puede conmutar en el microespejo.

En el campo de las aplicaciones de la *óptica*, en (Zhao *et al.*, 2002) se describe el proceso de fabricación de microcantilevers, empleado en el desarrollo de un generador de imágenes infrarrojas. En (Bosch *et al.*, 2002) se demuestra que es posible medir en tiempo real el degradado de superficies por DRIE (*Deep Reactive Ion Etching*), basándose en la magnitud de la interferencia que se produce entre los diferentes frentes de onda reflejados en la superficie al degradarse. Por otro lado, se describe en (Brian *et al.*, 2004) la fabricación de un lente Fresnel de 1.6 mm de diámetro empleando litografía en escala de grises y DRIE .

Pero la fabricación de los MEMS no sólo abarca el área mecánica estructural, sino que también pueden involucrar otras áreas como el estudio de la mecánica de fluidos a escala micrométrica, conocida como *microfluidos*, como se ve en (Jayachandran *et al.*, 2003), donde se reporta, la fabricación de microcanales de aire empleando policarbonatos fotosensibles, con la ventaja de que los rangos de temperatura en la manufactura se reducen de 350° a 150°C. Así como el trabajo de (Lee *et al.*, 2005a), en el que se muestran las capas empleadas en el proceso de fabricación de microcanales.

En cuanto a avances computacionales relacionados con MEMS, en (Senturia *et al.*, 1992) se describe el empleo del programa MEMCAD® como una herramienta de cómputo para generar los diseños de estructuras MEMS en un ambiente tridimensional, ya que, aunque en esa época ya existían muchas herramientas que podrían emplearse, un diseño MEMS requiere de un conjunto de datos específicos, diseñados especialmente para este tipo de tecnología.

Por otro lado, el Método del Elemento Finito encuentra una gran área de aplicación como se demuestra en (Hao *et al.*, 2003) donde se presenta la metodología de diseño de un microespejo torsional con activación electrostática. También muestra los modelos numéricos del microespejo, generados por medio de un modelo de elementos finitos hecho en el programa ANSYS® y electrónicos por medio del programa P-SPICE®. El uso de la computadora para el adecuado diseño de un MEMS es imprescindible y con los avances actuales de la Internet permite el trabajo multidisciplinario mundialmente distribuido.

En cuanto a *dispositivos funcionales* obtenidos, se pueden mencionar varios trabajos como por ejemplo en (Ahn *et al.*, 1993), se presenta ya un concepto más sofisticado; un micromotor activado eléctricamente por reluctancia magnética planar, construido en una oblea de silicio. En (Dargahi *et al.*, 2000), se presenta el desarrollo del micromaquinado de un sensor de tacto piezoeléctrico, altamente útil para la manipulación segura de los tejidos en las intervenciones quirúrgicas. En (Hopwood, 2000), se muestra por primera vez el diseño, fabricación y caracterización de un generador de plasma miniaturizado. Las dimensiones de todo el sistema conforman un rectángulo no mayor a 45 mm por lado y fue construido empleando técnicas de micromaquinado de adhesión de superficies. En (Melvas *et al.*, 2001), se presenta el primer estudio de un sensor de presión tipo viga micromaquinado. También se puede mencionar el trabajo de (Pattekar & Kothare, 2004), en el que se presenta un proceso de fabricación destinado a crear un microreactor de metanol, para producción de hidrógeno en microescala. Este reactor en combinación con una celda de combustible, es una alternativa propuesta para la generación portátil e ininterrumpida de energía eléctrica. Esto podría cambiar la concepción actual de obtención de energía como se ve en (Martinez *et al.*, 2004), en el que se trabaja en el Sistema de Energía de Máquinas Rotatorias MEMS, muestra los resultados obtenidos de un Ultra DRIE (Abreviación de *Deep Reactive Ion Etching* o en español sería degradado profundo con iones

reactivos). Este programa proyecta la implementación de un sistema de generación de potencia autónomo mayor del que se obtiene con las baterías convencionales.

En cuanto a aplicaciones industriales, que podrían considerarse de producción a grandes volúmenes y que podrían generar un cambio muy importante en cuanto a la forma que se maneja actualmente la información electrónica, se ve en (King *et al.*, 2002), la descripción de la lectura y escritura termo magnética, que tiene un concepto totalmente diferente al de las memorias electrónicas de la actualidad. El empleo de microvigas en cantilever para indentar y detectar datos binarios es una aplicación frontera de la probable próxima generación de almacenamiento y lectura de datos binarios.

1.3.2. Observaciones de la Cronología

Los primeros MEMS se desarrollaron con ayuda de las facilidades que tenían los investigadores para acceder a la tecnología correspondiente (equipo, materiales, herramienta, etc.). Se observa en la cronología un incremento en el uso de las técnicas de adhesión de capas delgadas, lo que indica que el crecimiento de estas tecnologías está incrementando su acceso a un número cada vez mayor de científicos, abriendo oportunidades para la manufactura de diseños novedosos. Esto aumenta el número de personas que diseñan MEMS. Los sistemas de manufactura actuales, permiten la manufactura de MEMS sin contar directamente con un laboratorio MEMS completo. Hoy en día es posible contar con un laboratorio de cómputo y los programas correspondientes para generar un diseño digital de un MEMS que puede ser enviado a fabricar para así obtener el dispositivo.

Tomando en cuenta los materiales y equipos empleados en los trabajos antes mencionados (por ejemplo DRIE o LPCVD) se observa que, existió un trabajo previo para la consecución y capacitación en el uso de dichos equipos. Esto puede interpretarse como nuevas oportunidades de inversión para el área de la miniaturización, no sólo en México sino en otros países, ya que el uso de estos equipos puede combinarse con los procesos industriales ya establecidos para obtener dispositivos manufacturados de manera híbrida.

Como se ha podido observar, la velocidad a la que están reportando los avances en MEMS es impresionante, pues si ya se tenían diminutas cámaras generadoras de plasma en el año 2000, se

puede esperar un sin número mayor de avances y aplicaciones de esta tecnología en los años por venir.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

1.4.1. Planteamiento del Problema

La meta principal de este trabajo de investigación es exponer el entorno de fabricación MEMS y comparar las técnicas de análisis estructural y experimental empleadas en el diseño de microsistemas. Para ello se observarán los resultados obtenidos mediante la técnica del método de Rayleigh-Rytz, la técnica del Método del Elemento Finito y el método de solución directa. Estos métodos son comúnmente empleados para el análisis matemático de microsistemas. Como parte de este objetivo, se debe presentar el resultado del análisis experimental sobre una viga en cantilever micromaquinada. El resultado correspondiente servirá como parámetro de referencia del análisis matemático. El establecimiento de estos análisis permite establecer las dimensiones finales de una microestructura MEMS. Específicamente se emplearán los programas ANSYS® y Matlab®.

Del establecimiento del estado del arte, se ha identificado que existe una tendencia notoria a emplear la tecnología de adhesión y remoción de superficies para desarrollar microsistemas. Se observa que estas técnicas requieren de un adecuado uso del concepto de las fotomáscaras, su interpretación y su relación con la técnica de manufactura a emplear. También se puede notar que se debe tener un concepto muy claro de la importancia del empaquetamiento final del dispositivo MEMS, ya que finalmente estos dispositivos se integrarán con otros elementos, formando así un producto útil para el usuario.

Es claro que el conjunto de objetivos mostrados a continuación deben cumplirse, para poder alcanzar la meta principal de esta investigación, de manera tal que no se hayan considerado en algunos trabajos anteriores:

1. Realizar una revisión literaria que despliegue los elementos generales que están involucrados en el proceso de microfabricación.

-
-
2. Describir las definiciones más comunes y los antecedentes generales de la investigación en Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS) así como la relación de esta ciencia con las demás áreas de la ingeniería.
 3. Mostrar una visión general de las técnicas, equipos y dispositivos empleados para la manufactura de los MEMS.
 4. Realizar el análisis numérico de una estructura MEMS cantilever comenzando por describir los conceptos de: voltaje de rompimiento y debilitamiento estructural, exponiendo bases teóricas de cálculo estructural MEMS, considerando para ello los métodos de solución de Rayleigh-Rytz, la técnica del Método del Elemento Finito y el método de solución directa.
 5. Mostrar los resultados de los análisis experimentales desarrollados durante el transcurso de la investigación con fotografías, gráficas y micrografías que evidencien los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos incluyendo el análisis experimental de la microviga en cantilever cuyo resultado servirá como parámetro de comparación para validar los resultados obtenidos en el punto 4.
 6. Realizar el conjunto de propuestas para trabajos futuros y mejoras.

1.4.2. Organización de la Tesis

Para alcanzar los propósitos mencionados, esta tesis está organizada de la siguiente manera: En el capítulo 2, se presentan los antecedentes generales y definiciones empleadas en la tecnología MEMS. La presentación de las técnicas empleadas para la manufactura de MEMS, mencionando algunos de los elementos y equipos requeridos para tal efecto se muestra en el capítulo 3. Como parte del trabajo de investigación requerido para el desarrollo de MEMS, en el capítulo 4 se presenta el análisis numérico de algunas de estas estructuras, en ellas se puede observar la complejidad del modelado y la ventaja que brinda el uso de un programa de cómputo, que por medio del Método del Elemento Finito, represente el ambiente físico involucrado en los sistemas MEMS. Finalmente se presenta en el capítulo 5, las conclusiones y recomendaciones para trabajo futuro para la continuación y crecimiento de esta línea de investigación.

1.4.3. Alcances y Limitaciones

En este trabajo se describirán los procedimientos de las técnicas de adhesión y remoción de superficies, para la obtención de microestructuras. Se mostrarán ejemplos de *análisis numéricos* para encontrar las frecuencias naturales y los modos de vibración de microestructuras. Se

realizarán análisis numéricos y en el programa ANSYS® empleando el método de campos acoplados, los cuales involucran los efectos electromagnéticos, con el objeto de conocer el comportamiento de microactuadores. Se mostrarán ejemplos, fotografías y micrografías de microelementos fabricados por medio de las técnicas mostradas en este trabajo de investigación.

1.5. CONTRIBUCIONES

El trabajo desarrollado en esta tesis contribuye al desarrollo de los estudios de la miniaturización, ya que propone una alternativa de inversión al uso de los recursos naturales del país, introduciendo una área de trabajo nueva, que puede brindar nuevas fuentes de trabajo que incrementen el desarrollo industrial de México y de otras partes del mundo.

De manera específica, este trabajo es pionero en el IPN en:

- El desarrollo de un trabajo de investigación internacional elaborado entre la Universidad de la CONCORDIA-CONCAVE y la SEPI ESIME IPN en el área de MEMS, mostrando los resultados obtenidos.
- Trabajar la temática de los MEMS y la descripción de las técnicas y equipos actualmente empleados en su desarrollo.
- Mostrar la técnica de modelado Rayleigh-Rytz aplicado a microestructuras y su comprobación experimental.
- La introducción del uso de la técnica de ambientes o campos acoplados, con el Método del Elemento Finito computarizado empleando el programa ANSYS® para modelar microestructuras MEMS.
- Mostrar el empleo de fotomáscaras para la generación de microestructuras MEMS.
- Mostrar la técnica de micromaquinado de *Si* con XeF_2 en estado gaseoso, realizadas en las instalaciones del CONCAVE en colaboración con los doctores Ion Stiharu, M. Packirisamy.
- Mostrar los resultados obtenidos al micromaquinar muestras de *Si* con FIB (*Focused Ion Beam*) gracias a las facilidades obtenidas por los doctores Ion Stiharu, M. Packirisamy de CONCORDIA University y el CONCAVE.

1.6. DISCUSIÓN

En este capítulo se ha mostrado el interés principal de la tesis, el estado del arte que guarda esta investigación y se describe la organización principal de este trabajo. Cada uno de los capítulos que se mostrará a continuación tiene el propósito de brindar al lector un conocimiento que pueda ser posteriormente aplicado al desarrollo de microsistemas y a incrementar la cultura de la miniaturización en el país, como una actividad que brinde nuevas oportunidades de crecimiento económico. En el siguiente capítulo se presentan algunas definiciones y antecedentes generales de la investigación en MEMS y su importancia, al presentarse como una ciencia multidisciplinaria que requiere de la estrecha colaboración entre especialistas de diferentes ramas de la ciencia.

2

ANTECEDENTES GENERALES

4 mm

En este capítulo se presentan definiciones y antecedentes generales de la investigación en Sistemas Micro-Electro-Mecánicos y la relación de esta ciencia con las demás áreas de la ingeniería.

2.1. DEFINICIONES DE MEMS

En (Feynman, 1992), se describe una idea clave, la posibilidad de poder fabricar elementos miniaturizados a una escala tan pequeña, que fuera posible escribir, los 24 volúmenes enteros de la enciclopedia Británica en la cabeza de un alfiler. Pero la idea de Feynman, considerado el padre de la nanotecnología, va más allá de lo que es actualmente almacenar en un chip de computadora, miles de kilobytes, de información. Su idea expresa lo que sucedería, si se escribieran (literalmente) todas y cada una de las letras de la enciclopedia en la cabeza de un alfiler y sus repercusiones. Este artículo es una transcripción de la plática titulada, “*There is Plenty of Room at the Bottom*” la cual, abre las puertas a la descripción de un campo de la ciencia, que permitiría posteriormente, experimentar desarrollos científicos sin precedentes.

El desarrollo de los MEMS, se deriva de una modificación en el uso de la tecnología de circuitos integrados, como se observa en (Madou, 2002), empleada para producir circuitos integrados. Su objetivo es, desarrollar de manera integrada, un sistema que brinde capacidades mecánicas y electrónicas al mismo tiempo, y cuyas dimensiones sean muy reducidas. La literatura define los conceptos de MEMS como; dispositivos que contienen componentes integrados y manufacturados en una escala extremadamente pequeña que ya son manufacturados por diferentes compañías internacionales.

En (Kovacs, 1998) se define que, el término micromaquinado, se refiere en su mayoría al uso de la litografía y otras técnicas de precisión, para llevar a cabo esa fabricación y que los dispositivos resultantes de ésta son comúnmente nombrados como MEMS, por abreviar las palabras de Sistemas-Micro-Electro-Mecánicos, aunque este término pueda disolverse, ya que muchos sistemas micromaquinados no sean mecánicos en ningún sentido.

En (Madou, 2002), se define que MEMS es la fabricación de dispositivos, con al menos algunas de sus dimensiones en el rango de los micrómetros.

2.2. EL ÉXITO INDUSTRIAL DE LOS MEMS

La tecnología para desarrollar circuitos integrados y las técnicas de microfabricación, han avanzado y generado mucha confiabilidad, no sólo para la fabricación de MEMS, sino también en la fabricación de celdas solares, paneles de pantalla plana y optoelectrónica como se ve en (Franssila, 2004), también en el desarrollo de sistemas de navegación terrestre, aérea, marítima y espacial. De forma similar al crecimiento de la tecnología IC, que ha avanzado a pasos agigantados, la tecnología MEMS puede presentar un crecimiento industrial considerable.

Se ha observado uno de los primeros MEMS comercialmente disponibles, fue el acelerómetro monolítico ADXL50. Este acelerómetro ha evolucionado y se emplea actualmente para la detonación de bolsas de aire en los sistemas de seguridad automotrices. Producido industrialmente a partir de 1993, este dispositivo rompió con muchos patrones establecidos, ya que fue:

- El primer acelerómetro micromaquinado superficialmente y en altos volúmenes
- El primer sensor micromaquinado que contenía, en el mismo chip, el elemento sensor móvil, los circuitos de acondicionamiento de señal y los de auto prueba.
- El primer sensor micromaquinado IC, cuyas partes móviles se encuentran en el mismo plano del chip.
- El primer sensor micromaquinado de su tamaño.

Este dispositivo, con un costo aproximado de \$5 dólares, tuvo una gran repercusión económica en los sistemas electrónicos de disparo de las bolsas de aire, reduciendo el costo de varios cientos de dólares a \$30. Esto representa un contundente éxito que demuestra que los MEMS, tienen un sin número de aplicaciones por explotar.

Otro de los más grandes avances en el desarrollo de los MEMS es el que presenta la tecnología conocida como procesamiento digital de luz. Es dentro de los MEMS, un sistema que ha alcanzado el nivel artístico en cuanto a desarrollo, funcionamiento y confiabilidad. El sistema ya es comercializado por las compañías que manufacturan televisores, equipos de proyección y video. El sistema DLP puede llegar a generar una combinación de colores primarios en un rango

de frecuencia que da como resultado 16.7 millones de colores diferentes en la pantalla, y conjunta en un mismo chip un sistema de dos capas, en una de ellas, se encuentra el sistema estructural de microespejos y en la otra capa se encuentra el sistema electrónico de conmutación. Ambas capas fueron fabricadas en el mismo lugar y por el mismo sistema de manufactura. Es decir, en un procedimiento de fabricación ya establecido, se generan tanto las partes estructurales, como las partes electrónicas, las cuales incluyen el agregado de impurezas, característico en la fabricación de un diodo o un transistor. Con estas ventajas, el número de unidades de video, basadas en tecnología MEMS, se incrementará evidentemente. Estos y otros productos basados en la tecnología MEMS, han formado un mercado de superior a los 8 billones de dólares por la gran cantidad de aplicaciones que tienen, representando una oportunidad de inversión exitosa.

2.3. MEDIDAS ESCALARES

Como una referencia de las medidas en las que se pretende trabajar en esta tesis, se presenta una relación objeto-dimensión en la tabla 2.1, esta tabla relaciona con un objeto conocido la dimensión micrométrica mencionada. Dicha tabla ayuda a comprender las diferentes magnitudes microscópicas en las que se encuentra el rango de trabajo de los MEMS. Por ejemplo, en la primera fila se ve que el diámetro de un cabello humano, en promedio es de 100 micrómetros. Esta dimensión corresponde al tamaño de la mayoría de las estructuras MEMS desarrolladas en la actualidad y verticalmente también pueden ir desde espesores atómicos (0.01nm) hasta cientos de micrómetros (Franssila, 2004).

Tabla 2.1. Relación Objeto-dimensión

<i>Dimensión</i>	<i>Objeto representativo</i>
<i>100 micrómetros</i>	<i>Grueso de un cabello, hojas de papel etc.</i>
<i>10 micrómetros</i>	<i>Células de la sangre</i>
<i>1 micrómetro</i>	<i>Bacteria</i>
<i>200 nanómetros</i>	<i>Elementos de circuitos integrados</i>
<i>100 nanómetros</i>	<i>Virus</i>

Una estructura MEMS, por ejemplo una micro viga, puede tener dos micrómetros de espesor y 50, 100 o más micrómetros de largo. Estas son, en general, las dimensiones en las que se trabajarán las microestructuras.

2.4. COMPONENTES DE LOS MEMS

De manera general, los MEMS cuentan con un *sistema electrónico* o cerebro que se interfasa con un *sistema mecánico* por diferentes medios, ya sean ópticos, magnéticos, electromagnéticos, etc. En el llamado macromundo, esa interfase puede producir ruidos o interferencias, pérdidas de señal, errores de lectura, etc. La ventaja de esto en el micromundo, es que esta interfase se encuentra integrada al mismo chip desde su fabricación, reduciendo los errores antes mencionados. Los acelerómetros automotrices también incluyen, desde su fabricación, un sistema mecánico interfazado con un sistema electrónico lo que permite una rápida instalación, ahorra espacio y brinda la ventaja de poder ser producido en grandes cantidades, haciéndolo accesible desde el punto de vista económico.

Los integrados DLP (*Digital Light Processing*) de igual forma cuentan con una parte mecánica y una parte electrónica ensamblada en el mismo circuito integrado. En algunos ensambles MEMS, la parte electrónica se encuentra en un nivel de base y sobre de este nivel se construye otro que contiene a la parte estructural. En otros casos la parte mecánica y la electrónica se encuentran ensambladas en el mismo nivel, ocupando diferentes áreas del integrado.

2.5. MEMS MULTI DISCIPLINARIOS

Los elementos mencionados en la sección anterior, indican que existen varias disciplinas trabajando en conjunto; por un lado el desarrollo estructural del micro espejo que trabaja a altas frecuencias, requiere de un adecuado análisis estructural (análisis modal, localización de las zonas de esfuerzos, vectores de desplazamiento, etc.). Estos análisis son necesarios en la mayoría de los diseños mecánicos actuales. Por otro lado, el desarrollo de los transistores, diodos y demás elementos electrónicos, debe involucrar los cálculos requeridos para determinar los niveles de deposición e impureza de las delgadas capas de polímeros y materiales semiconductores, es decir, un conjunto de elementos que son propios de expertos en la electrónica y la

microelectrónica. En caso de que un sistema de esta naturaleza se emplee para desempeñar un propósito en el área médica, biológica o química, los expertos en dichas áreas son necesarios para lograr la concepción de tal dispositivo. Aunado a esto, la experiencia en química, electroquímica y microelectrónica es necesaria al tratar las cuestiones técnicas de manufactura. Inclusive planeadores, economistas y analistas en proyectos de inversión, son requeridos para lanzar al mercado un nuevo producto MEMS, sin mencionar el conjunto de regulaciones gubernamentales que deben cumplirse previamente. Es así como se observa un conjunto de disciplinas que son requeridas para obtener un MEMS funcional. Esto indica que no sólo una persona es necesaria para la concepción de un MEMS, sino que es resultado de la sinergia de varios grupos especializados y que tienen un objetivo en común. En general no se pueden abarcar todos los elementos mencionados en un solo trabajo de tesis, pero se puede mostrar una base que, en conjunto con otras disciplinas, pueda llegar a producir buenos resultados, como las disciplinas que se mencionan a continuación.

2.5.1. Disciplinas Enlazadas con MEMS

Las aplicaciones de los MEMS encuentran sólidas áreas de trabajo, con una amplitud tan grande como la del macromundo actual. Basta con anteponer la palabra micro a las diferentes tecnologías existentes, para obtener una idea de las posibilidades tan grandes que ofrece la miniaturización. En la figura 2.1, tomada de (Franssila, 2004), se muestran algunos subcampos en los que está involucrada la microtecnología actualmente. Pero aun, esta concepción puede ampliarse adentrándose en cada uno de sus campos, como la de los esfuerzos residuales en microestructuras, microfluidos, etc., por ejemplo en el macromundo, el estudio de esfuerzos residuales y sus efectos ha ayudado a obtener productos como el concreto pretensado. En el micromundo el estudio de esta área podría, de igual forma ofrecer un conjunto de nuevos productos desconocidos hasta ahora. Como puede observarse, las técnicas de micro fabricación, combinadas con otras áreas de la ingeniería, pueden dar como resultado un conjunto de nuevas tecnologías que abren un campo de manufactura de productos industriales totalmente nuevos. Esto abre nuevas posibilidades de inversión, apertura de nuevos negocios y empleos que requieren de niveles académicos cada vez más competitivos. Otro aspecto interesante de este factor multidisciplinario, es que los expertos en cada área deben aprender a comunicarse entre sí, para poder concretar un objetivo en común. Los diferentes términos y conceptos médicos, deben ser entendidos por los ingenieros, al igual que la terminología química del especialista debe ser

entendida por el especialista en electrónica, para el desarrollo de un sensor o algún otro dispositivo.

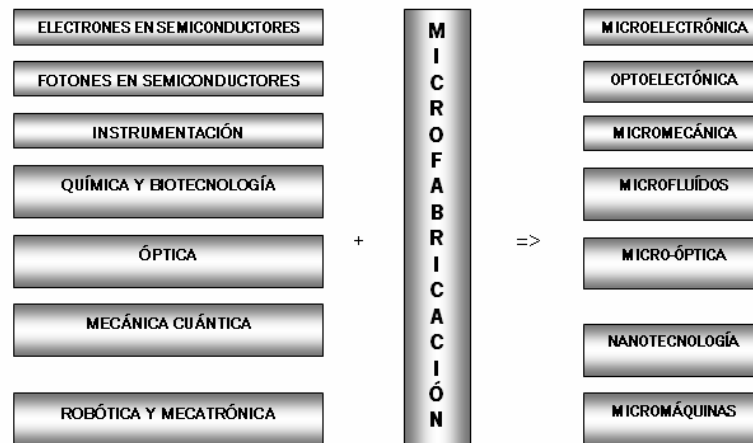


Figura 2.1. Subcampos de la microtecnología (Franssila, 2004).

2.6. ENLACE ENTRE EL MACROMUNDO Y EL NANOMUNDO

A medida que se reducen las dimensiones de trabajo y aumenta su complejidad, el equipo necesario para trabajar a esas dimensiones es cada vez es más especializado. De igual forma la intención de trabajar en el rango de la nano escala requiere de elementos cada vez más complejos y caros, que permitan la manipulación de estos objetos. Para ello los MEMS con sus reducidas dimensiones permiten, de una forma más apropiada, la manipulación de piezas con dimensiones inclusive menores a $1\mu\text{m}$ así, los MEMS ofrecen un *enlace entre el macromundo y el nanomundo*. La tecnología de almacenamiento de datos es una muestra del desarrollo donde los MEMS encuentran una utilidad al realizar este enlace.

El sistema de escritura termomecánica y lectura térmica es un modelo de la necesidad de crear diferentes elementos en la escala *micrométrica*, con el objeto de generar y manipular elementos y dispositivos en la escala *nanométrica*. Se puede decir que la microtecnología y la nanotecnología se encuentran altamente ligadas, ya que debe existir un fuerte enlace entre ambas tecnologías las cuales no se pueden ver ni tocar en el macro mundo. Se habla de generar dispositivos que puedan producirse en masa y de gran confiabilidad, además de que su costo

debe ser muy accesible. El usar las nuevas tecnologías para el manejo acelerado de grandes cantidades de información es prueba de ello.

Con el incremento en el uso de las memorias electrónicas, diferentes compañías y centros de investigación se han dado a la tarea de incrementar la cantidad de información que se puede almacenar y leer en los chips o memorias de silicio actuales. Por ejemplo, los "memory disk" de los 70's podían almacenar alrededor de 100KB. Para 1981, aparecen los discos de 3½" y mucho más se ha avanzado desde el 12 de septiembre de 1958 en que se probó con éxito el trabajo de Jack Kilby, (Patente U.S.A. 3,138,743) inventor del conocido circuito integrado.

El rápido avance en la tecnología del almacenamiento magnético de datos puede medirse por los incrementos continuos en la densidad de bits de datos por área en los discos comerciales, creciendo actualmente a un rango de 100%. El efecto súper magnético que gobierna la estabilidad térmica de un Bit, limitará la densidad de datos de la tecnología actual de almacenamiento magnético de datos, a cerca de 100 GBit/in². Diversos esfuerzos ingeniosos prometen expandir este límite más allá, por ejemplo, con un patrón magnético para grabado perpendicular y grabado magnético térmicamente asistido. De cualquier forma, no es claro cual tecnología permitirá dispositivos de almacenamiento capaces de 1 TB/in² y mayores. Por otro lado, varias tecnologías de almacenamiento de datos basadas en AFM (*Atomic Force Microscope*) que emplean la modificación de una superficie o indentaciones, que pueden producir marcas cuyo tamaño es significativamente más pequeño que el tamaño de los bits grabados magnéticamente. La investigación de modificación de superficies por AFM incluye:

- Cantilevers AFM diseñadas para guiar radiación electromagnética en polímeros foto reactivos
- Puntas de cantilevers cuya carga electrostática directa puede oxidar localmente una superficie
- Deposición química local con la punta del AFM
- Indentación directa de materiales suaves
- Indentación térmicamente asistida de materiales suaves.

En la escritura termomecánica de datos, una viga cantilever de AFM calentada por resistencia esta en contacto con, y realiza un barrido sobre, un sustrato cubierto con una película delgada de polímero. El calor generado en el cantilever fluye a lo largo de su punta y hacia la película de polímero, de manera local se incrementa la temperatura de la película y causa que el polímero se suavice. La fuerza aplicada al polímero suavizado por el calor de la punta del cantilever, causa que el polímero se deforme, por lo tanto se produce una indentación, con un radio de curvatura tan pequeño como 20 nm, la figura 2.2, ilustra el proceso de la escritura termomecánica. Muchas formas de modificar superficies de un polímero por medios termomecánicos siguen esta aproximación. Una viga de silicio en cantilever, calentada por medios resistivos, puede usarse para detectar térmicamente la presencia de un dato-bit escrito previamente, permitiendo la lectura del dato. En la operación de lectura, el cantilever es calentado a una temperatura que esta debajo de la temperatura límite para formar un bit. Mientras el cantilever sigue el contorno del dato escrito previamente, el cambio de la impedancia térmica, entre el cantilever y el sustrato produce un cambio medible en el cantilever, almacenando la información de la señal de la temperatura dinámica de la punta del cantilever, al moverse sobre la superficie del polímero, se puede generar un mapa del contorno.

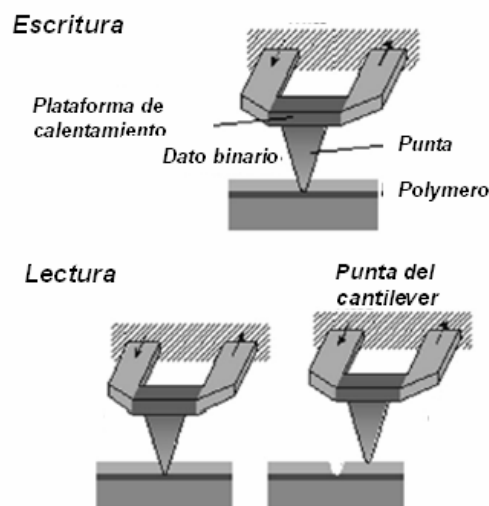


Figura 2.2. Diagrama de la escritura y lectura termomecánica. El mismo cantilever puede usarse para la escritura y lectura (King *et al.*, 2002).

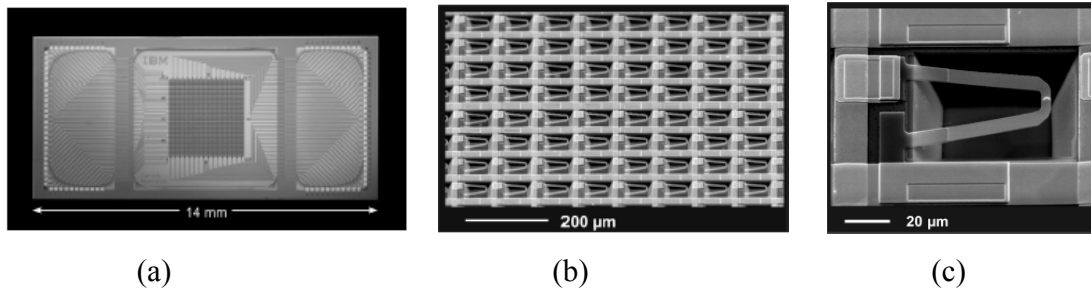


Figura 2.3. Cantilevers empleados en el sistema de lectura y escritura termomecánica. (a) Arreglo completo, (b) Ordenamiento de los cantilevers y (c) Acercamiento a un solo cantilever (King *et al.*, 2002).

La figura 2.3, (a), (b) y (c), muestra los cantilevers que tienen 50 μm de longitud y una punta cuya altura es de 500 nm. Las versiones más recientes de este tipo de cantilever tienen una altura de punta más pequeña y más delgada, para mejorar el rendimiento de su sensibilidad. La intención de este cantilever es que se emplee en un arreglo o formación de 1024 cantilevers, en un arreglo cuadrado de 32 x 32, demostrando una exitosa lectura de datos termomecánicamente y con una densidad de datos de 100-200 GB/in². (King *et al.*, 2002).

Es un salto de 100 GB/in² a 200 GB/in², el diseño de estos cantilevers en grandes cantidades es factible, rentable y esta demostrando ser mecánicamente muy efectivo. Un claro ejemplo que demuestra el enlace entre el macro mundo y el nanomundo. A simple vista parece un chip como tantos otros, pero la simple idea de que se tiene una estructura mecánica de 50 μm de longitud trabajando a altas frecuencias (100 Khz.) es sorprendente.

Se observa que el objetivo de los MEMS es extender las capacidades del ser humano, permitiéndole interactuar y hacer cambios a nivel microscópico o incluso nanoscópico para mejorar su calidad de vida. Le dan al ser humano la capacidad de abrir una nueva área de la investigación, aplicable a todos los campos de la ingeniería. Esta idea inmediatamente se direcciona al nivel médico, para que en el futuro, se tengan sistemas miniaturizados que permitan hacer intervenciones médicas llamadas de mínima invasión.

2.6.1. Otras Aplicaciones

Los avances actuales en medicina ya tienen un largo camino recorrido, desde el punto de vista químico, ya existen los sistemas de detección de sustancias en el cuerpo, que pueden detectar desde alcohol hasta anticuerpos y virus, pasando por detectores de contenido de glucosa, drogas

de diferentes tipos y hasta sustancias desconocidas de esteroides y anabólicos, muy empleados por los deportistas de alto rendimiento etc. Pero también desde el punto de vista mecánico se han llegado a crear las primeras cápsulas para ser introducidas en el cuerpo y tomar diminutas muestras que pueden ser analizadas después, sin la necesidad de inmovilizar y anestesiarse al paciente (Menciassi *et al.*, 2005). Esto, llevado a un nivel más avanzado significa ahorros en tiempo de hospitalización y consumibles para el paciente, además de disminuir los traumas que esto representa. Probablemente en el futuro estas cápsulas no sólo tomen muestras sino también puedan hacer reparaciones o intervenciones quirúrgicas de manera automatizada o controladas a distancia.

En medicina, la cirugía de mínima invasión (MIS: *Minimal Invasive Surgery*) es una técnica reciente, en donde los procesos quirúrgicos en los órganos internos se realizan empleando incisiones muy pequeñas. A través de los orificios de la incisión, los mecanismos quirúrgicos y endoscopios se insertan para manipular los tejidos y observar la zona de la cirugía. Las imágenes de los órganos internos y los instrumentos quirúrgicos insertados se pueden observar en un monitor. MIS tiene muchas ventajas como la reducción del trauma, menor riesgo de inflamación, reducción de complicaciones post operatorias y rápida recuperación (Dargahi *et al.*, 2000). Con respecto a la medición de presión de la sangre en las arterias coronarias, ésta se realiza comúnmente por medio de un catéter de transferencia de presión, que se encuentra lleno de líquido y conectado a un sensor de presión externo al cuerpo. Si se mide la presión por medio de un sensor miniaturizado, la respuesta, así como la exactitud de la medición, se pueden ver mejoradas. Por ejemplo, por medio de un diafragma conectado a una microestructura en un sistema encapsulado (Melvas *et al.*, 2001).

Otras aplicaciones MEMS involucran sensado de fuerza y sensado de desplazamiento, basándose en el principio de detección de aceleraciones. Los acelerómetros de sensado de desplazamiento operan transluciendo la aceleración a medirse en desplazamiento de una masa móvil. Los desplazamientos pueden entonces tomarse por medios ópticos, capacitivos, piezoresistivos o por principios de corriente de túnel. Los acelerómetros basados en el sensado de fuerza operan mediante la detección directa de la fuerza aplicada a una masa como resultado de la medición. El sensado resonante de las aceleraciones, puede clasificarse bajo la categoría de un acelerómetro

basado en sensado de fuerza. Aquí, la aceleración de entrada se detecta en la forma de un cambio en las características resonantes de un dispositivo de sensado acoplado a una masa.

Por otro lado, la detección de resonancias ha sido implementada exitosamente, no sólo en los dispositivos de microcanales para medir la aceleración, sino también en sensores de presión en cantilevers micromecánicas para AFM (Microscopio de Fuerza Atómica) e inmunosensores (Seshia *et al.*, 2002). También se emplean en la navegación por GPS y sistemas de direccionamiento, sismometría para exploración de petróleo, medición de microgravedad y estabilización de plataformas espaciales así como mediciones acústicas submarinas (Yazdi & Najafi, 2000).

2.7. VENTAJAS DE TRABAJAR EN LA MICRO ESCALA

Las ventajas de trabajar en pequeña escala se pueden observar claramente. Los MEMS obtienen una gran confiabilidad al heredar muchas características de *la tecnología IC* de fabricación de circuitos integrados, la cual ha demostrado ser altamente confiable. Esta misma cualidad ofrece la ventaja de la *producción en masa a bajo costo*, característica importante para la *rentabilidad* de su producción. Las reducidas dimensiones debidas a la miniaturización generan estructuras que necesitan *un bajo consumo de energía* para operar. Por otro lado estas microestructuras, debido a su tamaño, pueden operar a muy *altas frecuencias* lo que brinda un amplio margen de operación. Un sistema MEMS ofrece las ventajas de operar en el ámbito electrónico y mecánico lo que lo hace un *sistema multifuncional*. Actualmente ya se pueden generar diseños MEMS que en la misma oblea contienen la circuitería electrónica y el sistema mecánico, esto reduce ampliamente la razón de ruido con respecto a la señal generada. Otra ventaja es indudablemente *la reducción del espacio* que ocupa un MEMS, dando cabida a más sistemas, en caso de ser necesario, en un área muy reducida.

2.8. VARIACIONES GENERALES DE LAS LEYES FÍSICAS EN EL AMBIENTE DE LA MICROINGENIERÍA

A medida que se reduce la dimensión de una estructura mecánica, el efecto del ambiente físico externo, como se conoce normalmente, puede generar cambios en las decisiones de un diseño. Cuando el tamaño de las cosas disminuye, se tiene una condición en la que la masa total de la

estructura disminuye con respecto a su tamaño. Las áreas y momentos de inercia se vuelven más pequeños, igualmente las fuerzas que se pueden soportar. Al disminuir el tamaño de las áreas, los esfuerzos que se soportan son más grandes. Las dilataciones por temperatura son otro de los factores importantes que se deben considerar en el diseño de microestructuras. En relación al ambiente externo con el cual interactúan los microsistemas, se ha observado que éste puede llegar a alterar por completo el rendimiento estructural. Uno de los efectos más comunes es el efecto de la densidad del aire. Por ejemplo, en el macro mundo se considera a la velocidad del viento como factor que puede ser de carga, sobre todo en estructuras grandes. En el diseño a escala micrométrica el aire se considera como factor de amortiguación. La densidad del aire juega un papel importante, así como su temperatura y contenido de humedad. Muchos actuadores electrostáticos, tienen dos electrodos, separados a una distancia que puede ser de 2 a 5 μm . Esta distancia tan corta, conocida como claro (espacio entre la estructura y el sustrato) se toma en cuenta al calcular las fuerzas que puede generar un pequeño actuador. Pero el mover o desplazar una masa de aire tan pequeña, a una alta frecuencia, es un hecho que los diseñadores consideran en sus diseños.

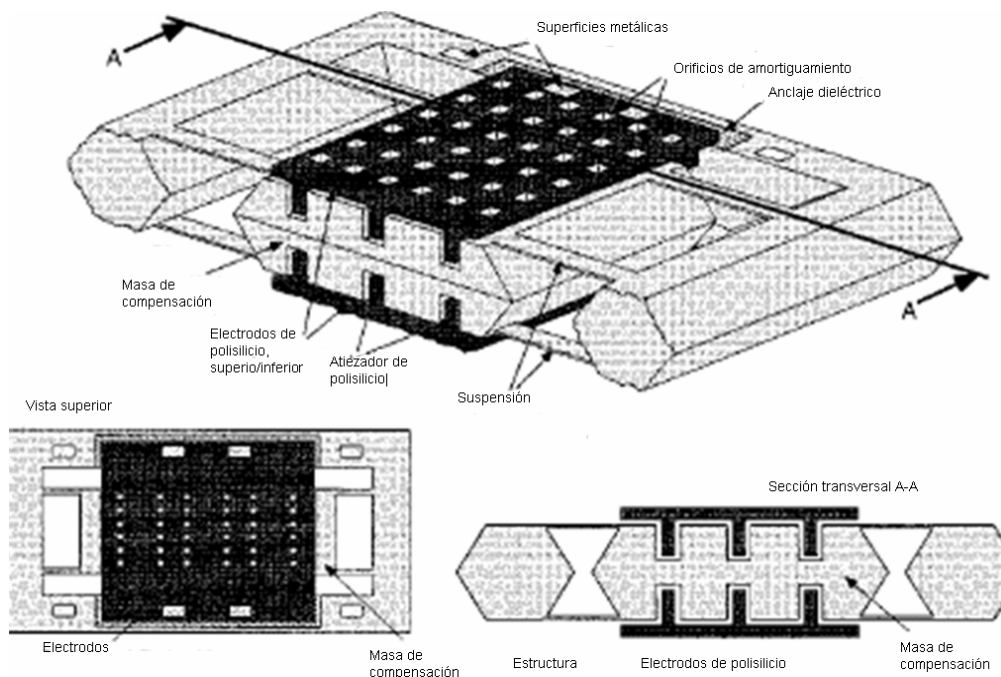


Figura 2.4. Estructura general de un microacelerómetro (Yazdi & Najafi, 2000).

Traduciendo esto al micromundo, se puede decir que en la tecnología planar o de adherencia de superficies, es necesario que las áreas estructurales lleven una serie ordenada de orificios, que en algunos casos se emplean en el proceso de fabricación, para liberar esa parte de la estructura, como se ve en la figura 2.4. Esa combinación de orificios y el trabajo de la estructura a alta frecuencia, convierten a la estructura en un pequeño amortiguador (Yazdi & Najafi, 2000). En estos orificios circulan pequeñas cantidades de aire que producen un amortiguamiento muchas veces mayor al producido mecánicamente por la estructura, tal es el caso, que éste nivel de amortiguamiento se puede variar cambiando el número de orificios en la estructura o por la densidad del gas en el que se encuentra; por ejemplo, el factor de amortiguamiento de una placa con orificios de amortiguamiento espaciados se puede expresar como:

$$D = 0.427 N \mu \frac{L^4}{d^3} \quad (2.1)$$

$$L = \sqrt{p^2 - a^2} \quad (2.2)$$

Donde:

N = Número de orificios de amortiguamiento

μ = Viscosidad del gas

d = Espaciamiento o claro

L = Longitud efectiva de la placa, relacionada con la dimensión del orificio a y al paso p

Por otro lado, la masa tan pequeña que tiene una micro estructura, en algunos casos hace que el efecto de la gravedad la flexione en menor cantidad que si fuera una macro estructura. Así que, en este caso, los efectos de la gravedad pueden o no considerarse en estado estático.

En el caso de los canales para microfluidos, se consideran efectos en el líquido a transportar, en algunos casos se considera que a esas dimensiones el flujo es laminar, tal es el caso para las aplicaciones de señalización óptica o que conectan señales luminosas con fibras ópticas para transmisión de señales y sensado. Pero existen otras aplicaciones que modifican esta consideración para generar micro mezclas, micro turbulencias y micro reacciones para alguna aplicación específica. También consideran estas características para aplicaciones de transporte de pequeñas cantidades de materia sólida o transporte de material biológico como las células.

2.9. EMPAQUETAMIENTO

Una vez que se manufacturan los pequeños elementos de un MEMS, es necesario colocarlo sobre una estructura que lo proteja del medio ambiente y que a su vez le brinde el soporte mecánico necesario para ser colocado en su lugar de trabajo. Las condiciones ambientales a las que estará sujeto el MEMS como el polvo, el ruido, la exposición a ambientes químicos o gaseosos corrosivos, golpes mecánicos, etc., deben ser propiamente aislados. Debido al tipo de tecnología que se emplea en su manufactura, derivado de la tecnología IC, los MEMS normalmente se encapsulan de forma similar a la de los circuitos integrados. Esta protección es de vital importancia, ya que debe prevenir que ocurran fallas mecánicas durante su ensamble u operación. El concepto de empaquetamiento a este nivel, puede contar con una plataforma, un sustrato, los elementos miniaturizados y una cubierta. Pero a otros niveles, este encapsulado debe integrarse a una tarjeta electrónica, que a su vez va integrada a sistemas de control o accionamiento. Es decir, la concepción del empaquetamiento involucra al usuario final del producto completo.

A una persona promedio, no le serviría de mucho tener el chip en su mano si éste no se encuentra conectado a una aplicación específica o realizando alguna función. Supóngase el ejemplo de un conjunto de microengranes conectados a un micromotor, todo esto agrupado en un chip de 1cm de largo por 0.5cm de ancho. Si este sistema no tiene una aplicación específica, realmente sólo sirve como materia de investigación. Esto lleva el problema del empaquetamiento a un nivel más complejo, porque no sólo se habla de la aplicación, sino de su transporte, forma de alimentación, instrucciones de uso, cuidados, precio, etc. Así que, el introducir la tecnología de la miniaturización se convierte en un conjunto de problemas a resolver, que van más allá del problema de fabricación de la estructura planar. De la misma forma que en el diseño de una máquina en el macromundo, se deben considerar todos estos aspectos al proponer el diseño de un MEMS, con la particularidad de que los MEMS no se ven a simple vista y eso representa un riesgo distinto para el usuario. Cuando se empaqueta, por ejemplo una lámpara de mano, esta tiene un recipiente o espacio destinado para cada una de sus partes (batería foco, interruptor, etc.), y debe ser manejada con cierto cuidado ya que al caerse sus partes pueden golpear a alguien, producir un corto circuito u otro tipo de accidente. Pero a nivel micrométrico, una pequeña pieza MEMS puede ser tragada o enterrada en alguna parte del cuerpo y este es un tipo

de accidente que realmente no es tan común como un golpe o una quemadura. Los empaquetamientos de microsistemas también dependen de la aplicación, la cual es muy variada, por ejemplo, en el caso de las microválvulas para lectura en Braille se requiere un tipo de empaque totalmente distinto al de un interruptor óptico.

2.9.1. Materiales Empleados en el Empaquetamiento

Con respecto a los materiales que se emplean para empaquetar MEMS, estos deben presentar una buena compatibilidad grado médico, facilidad de esterilización y encapsulado rápido, el **Poliuretano**, que presenta buena resistencia química y a la humedad, alta resistencia dieléctrica, buenas propiedades mecánicas y facilidad para modelarse con solventes, las resinas **epóxicas**, por presentar buenas propiedades mecánicas, se encoje al curarse y cambian sus propiedades eléctricas y térmicas. Otro de los materiales empleados es el **fluoro carbón**, por sus características eléctricas, el **acrílico**, por sus características de dureza, rigidez y poco encogimiento al curarse, el **parylene**, que puede usarse con CVD (*Chemical Vapor Deposition*) para generar películas delgadas, las **poliamidas**, que presentan buenas propiedades químicas y mecánicas y se presentan estables sobre un amplio rango de temperaturas, el **vidrio**, por su alta resistencia a la compresión, las **cerámicas**, que son químicamente inertes, con buenas propiedades eléctricas y que presentan una excelente barrera a la humedad y también los **metales**, por presentar buena resistencia a la corrosión, además de buenas propiedades mecánicas. Por otro lado, las aplicaciones específicas de cada dispositivo podrían determinar otro tipo de material a emplear

2.10. DISCUSIÓN

En este capítulo se han señalado algunos de los conceptos y definiciones básicas que están involucrados en el área de los MEMS. El éxito industrial que se pronostica para ellos crece rápidamente y las aplicaciones producidas por diferentes investigadores alrededor del mundo, están abarcando cada vez más disciplinas. Es de esperarse que su desarrollo se incremente inicialmente en las aplicaciones comerciales, como ha sucedido en el área de las telecomunicaciones y el área automotriz. Tanto el área de las comunicaciones como el área automotriz, han desarrollado sus productos hasta el nivel de empaquetamiento. El caso de los celulares ha avanzado a un grado tal que, cuando se llegan a caer por accidente o descuido desde

una altura moderada, no sufren un daño irreparable, en comparación con algunos MEMS aun experimentales que deben ser tratados actualmente con mucho cuidado. Conforme se avanza en su desarrollo, los MEMS llegarán a alcanzar un grado de confiabilidad tan grande como lo son ahora los circuitos integrados de los teléfonos portátiles, su resistencia mecánica les permitirá operar inclusive en condiciones en las que el ser humano no podría sobrevivir, como presión de vacío, ambientes corrosivos o cambios bruscos de velocidad. También podrán operar a grandes alturas y en aplicaciones espaciales, requiriendo un mínimo consumo de energía. Acoplados a una celda solar, los MEMS serán capaces de ofrecer autonomía de operación por periodos prolongados de tiempo. En el caso de que no se cuente con la facilidad de una celda solar, los micro generadores MEMS y las microturbinas de gas, están presentando resultados experimentales sorprendentes, ya que se han obtenido eficiencias mayores que las que se obtienen con las turbinas actuales. Otra parte importante que se ha observado en este capítulo, es que las dimensiones en que se pueden construir estas estructuras miniaturizadas, quedan fuera del campo visual del ser humano. Los detalles finos y las figuras geométricas de las estructuras MEMS, ya no pueden manipularse a simple vista. Se requiere el uso de microscopios de buena calidad, con algunas herramientas especiales auxiliares. Es necesario en algunos casos, que el microscopio cuente con una cámara que permita obtener una fotografía o inclusive obtener una filmación digitalizada del espécimen. Aunado a esto, se requiere de elementos de manipulación que pueden caer dentro del nivel médico, como el caso de las pinzas y demás herramientas de manipulación.

3

A photograph of a square silicon chip with a white micro-actuator structure in the center. The chip has a textured surface and is mounted on a light-colored substrate.

MANUFACTURA DE MEMS

En este capítulo se muestra una visión general de las técnicas, equipos y dispositivos empleados para la manufactura de Sistemas-Micro-Electro-Mecánicos.

3.1. INTRODUCCIÓN

Para generar una microestructura existen varios métodos, algunos desarrollados experimentalmente y otros ya establecidos de manera industrial, compuestos por un conjunto de tareas individuales. Con base en esto, los investigadores y diseñadores han propuesto a lo largo de los años, nuevas técnicas y mejoras para construir sistemas miniaturizados. La tendencia industrial de hoy en día, es la de emplear la experiencia de la tecnología de circuitos integrados (IC) con algunas modificaciones, debido a que esta ya cuenta con una serie de productos, materiales y equipos para generar microestructuras. Esta tecnología ha evolucionado hasta alcanzar los logros de la electrónica actual que ha demostrado ser muy confiable, como resultado de esto, las obleas de Silicio (*Si*) han formado uno de los elementos más frecuentemente utilizados para generar sistemas miniaturizados. La fabricación de MEMS, en general involucra una serie de tareas de enmascaramientos y degradados, realizados continuamente hasta alcanzar una estructura deseada, la cual es empaquetada para el usuario final. Cada uno de estos pasos puede pertenecer a un tipo de micromaquinado, ya sea por *adhesión superficial* o por *degradado superficial*. El primero involucra la adhesión y remoción selectiva de delgadas películas de metal, *polisilicio*, material semiconductor o polímetros, depositadas de manera experimental o industrial. El segundo tipo involucra la remoción o eliminación del material, causada por la exposición controlada en ácidos o gases y puede seguir un proceso *isotrópico* o *anisotrópico*, dependiendo de la dirección y ángulo del degradado, lo cual es útil para obtener la estructura deseada. El uso de estas técnicas, permite obtener estructuras miniaturizadas, nuevos dispositivos estructurales, e inclusive conjuntos combinados.

En este capítulo se comienza por realizar una descripción general del proceso Czochralski, empleado para la generación de obleas de Silicio. También se introduce el tema del proceso MEMS multiusuario y del proceso SUMMIT, que se emplean industrialmente para la fabricación a gran escala de estructuras miniaturizadas, lo cual es importante para que el diseñador conozca el potencial y limitaciones de la tecnología (Weste & Eshraghian, 1993). Después de ello, se trata el tema del degradado de obleas de *Si* empleando XeF_2 en estado gaseoso, el cual es un tipo de micromaquinado no convencional, que puede ser ampliamente empleado para liberar estructuras y llevar acabo microfabricaciones tipo híbridas. Esta investigación fue realizada en las instalaciones del CONCAVE en la Universidad de Concordia, bajo la dirección de los

doctores Ion Stiharu y M. Packirisamy. Al final del capítulo se mencionan los componentes básicos que pueden conformar un laboratorio MEMS.

3.2. MANUFACTURA DE OBLEAS DE Si

El cristal de *Si* tiene características especiales y es producido industrialmente por métodos de cristalización, los cuales se ha mejorado con los años. La palabra se deduce del latín “silex” por la piedra de pedernal que en su mayoría es SiO_2 amorfo. El silicio fue producido inicialmente como una mezcla de silicio y hierro en el año 1810 por Berzelius. En 1823 él obtuvo silicio de hierro reduciendo SiF_4 con metal de potasio. La producción comercial del silicio inicio en 1902 en la forma de ferro silicio, una aleación de hierro con típicamente 25% por peso de hierro, que se empleaba en la industria del acero como un excelente desoxidante para fundiciones de hierro. El más alto grado de silicio puro, apareció con la producción industrial, cuando se necesitaba como un elemento de aleación para el aluminio. Hoy en día más de un millón de toneladas de silicio de grado metalúrgico conteniendo 99% de silicio son producidos cada año. El incremento en el diámetro de la oblea y el peso correspondiente de los cristales desde 1950 ha evolucionado y se muestra en la tabla 3.1. (Zulehner, 2000).

Tabla 3.1. Incremento del diámetro de la oblea de *Si* (Zulehner, 2000).

<i>Año</i>	1950	1956	1962	1967	1972	1973	1980	1984	1988	1992	1997	2005
<i>Diámetro</i>	½ ”	1”	1.5”	2 ”	2.5 ”	3 ”	100 <i>mm</i>	125 <i>mm</i>	150 <i>mm</i>	200 <i>mm</i>	300 <i>mm</i>	400 <i>mm</i>
<i>Peso, kg</i>	0.05	0.4	1.2	2.5	6	12	24	38	65	110	200	350

Se observa que se han llegado a obtener obleas inclusive de 400 mm de diámetro. La producción industrial de cristales, comenzó con A. Verneuil en 1902. A él puede denominársele como el padre de la tecnología del crecimiento de cristal y sus principios de control de nucleación y control de diámetro de cristal, se adaptan en la mayoría de los métodos de crecimiento que inician por fundición, como Tammann, Stöber, Bridgman, Czochralski, Kyropoulos, Stockbarger, etc. (Scheel & Fukuda, 2003).

3.2.1. Propiedades Generales del Silicio

El Silicio en su estado puro es un semiconductor cuya conductividad puede variar sobre un rango grande al introducir impurezas en su estructura cristalina, el silicio que contiene en su mayoría donadores o elementos de impureza que proveen electrones, se conoce como tipo n y el que contiene mayoría de receptores, se conoce como tipo p (Weste & Eshraghian, 1993). Las propiedades mecánicas generales del *Si* se muestran en la tabla 3.2. (Kovacs, 1998), en la tabla se pueden comparar sus propiedades con respecto a las de otros materiales como el acero inoxidable, el hierro o el aluminio, que generalmente se emplea en conjunto con el *Si* por sus propiedades reflectivas en el área de MOEMS o Sistemas Micro Opto Electro Mecánicos.

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas del Silicio (Kovacs, 1998).

<i>Material</i>	<i>Límite elástico (10⁹N/m²)</i>	<i>Dureza (kg/mm²)</i>	<i>Módulo de Young (GPa)</i>	<i>Densidad (g/cm³)</i>	<i>Conductividad térmica (W/cm K)</i>	<i>Coefficiente de expansión térmica (10⁶/K)</i>
<i>Diamante</i>	53	7,000	1,035	3.5	20	1
<i>SiC</i>	21	2,480	700	3.2	3.5	3.3
<i>TiC</i>	20	2,470	497	4.9	3.3	6.4
<i>Al₂O₃</i>	15.4	2,100	530	4	0.5	5.4
<i>Si₃N₄</i>	14	3,486	385	3.1	0.19	0.8
<i>Iron</i>	12.6	400	196	7.8	0.803	12
<i>SiO₂</i>	8.4	820	73	2.5	0.014	0.55
<i>Si</i>	7	850	190	2.3	1.57	2.33
<i>Steel</i>	4.2	1,500	210	7.9	0.97	12
<i>W</i>	4	485	410	19.3	1.78	4.5
<i>Acero inoxidable</i>	2.1	660	200	7.9	0.329	17.3
<i>Mo</i>	2.1	275	343	10.3	1.38	5
<i>Al</i>	0.17	130	70	2.7	2.36	25

La importancia de estas propiedades en las estructuras MEMS, se debe a que estas estarán sujetas tanto a condiciones de carga estática como dinámica, en algunos casos llevarán o transportarán una masa (Allameh, 2003) o estarán sujetos a diferentes ambientes, así que mientras mayor información pueda tenerse, se podrá estimar con una mayor aproximación su comportamiento de trabajo.

3.3. MÉTODO DEL PROFESOR JAN CZOCHRALSKI

El primer descubrimiento del profesor Jan Czochralski (1885-1953) a principios del siglo XX, para producción de altos volúmenes de *Si*, fue redescubierto más tarde a mediados de siglo por especialistas de *American Semiconductor Technology*. Esto aseguró para Jan Czochralski una posición remarcable en la ciencia moderna. Czochralski perteneció a una generación activamente participativa en el excitante progreso de la ciencia y la tecnología a principios del siglo XX por ejemplo el primer vuelo aéreo por los hermanos Wright (1903), la condensación del helio (H. Kamerlingh Onnes, 1908) el descubrimiento del núcleo del átomo (Rutherford, 1911), el descubrimiento de la superconductividad (H. Kamerlingh Onnes, 1911) La difracción de los rayos X por medio de cristales (M. von Laue, 1912), el modelo del átomo (N. Bohr, 1914), la teoría de la relatividad (A. Einstein, 1916), el primer vuelo sobre el atlántico (J. Alcock y A. W. Brown, 1919) y la formulación de la mecánica cuántica (W. Heisenberg, 1925), etc., así que existía una gran corriente científica altamente motivada.

El método Czochralski, fue desarrollado en 1916, como resultado de un accidente y de las cuidadosas observaciones de Czochralski: *Una tarde él dejó un crisol con estaño fundido y regreso a escribir sus notas sobre un estudio que estaba haciendo sobre cristalización. En algún momento, perdido en sus pensamientos, en lugar de introducir su pluma en el recipiente de tinta, la sumergió en el crisol y la retiro de inmediato. Observó entonces una delgada pieza de metal solidificado colgando de la punta de su pluma. El descubrimiento estaba hecho!*. La pieza en la que se había hecho la cristalización fue reemplazada por un capilar y en algunos casos por una semilla de cristal creciente. Czochralski observó después que el cable cristalizado era un solo cristal. Los cristales obtenidos de esa forma tienen diámetros de alrededor de un milímetro y longitudes de hasta 150cm, Czochralski publicó un artículo en el estudio del rango de cristalización del estaño, zinc y plomo y el máximo rango de pulido de un cristal fue reconocido como la característica de un material cristalizado. El incremento en la demanda de los materiales semiconductores en 1950, llevo a los americanos G.K. Teal y J.B. de Bell Telephone Laboratories, a redescubrir y aplicar ampliamente el método, dándole su fama mundial por producir cristales únicos a gran escala (William, 1968).

3.3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El proceso se lleva a cabo de la siguiente manera: El material semilla, se mantiene por un momento sumergido en el *Si* líquido. Esto provoca una cristalización inicial alrededor de la semilla. Esta cristalización sigue la orientación cristalográfica de la semilla, como una respuesta encadenada. Un instante después, se levanta de la superficie líquida a una distancia muy reducida y se comienza un proceso de rotación controlada y elevación simultáneas, como lo muestra la figura 3.1. En cada instante estas pequeñas cristalizaciones generan un cono con diámetro que se incrementa hasta que se alcanza el diámetro deseado, con este proceso de solidificación se obtiene una barra de Silicio (William, 1968).

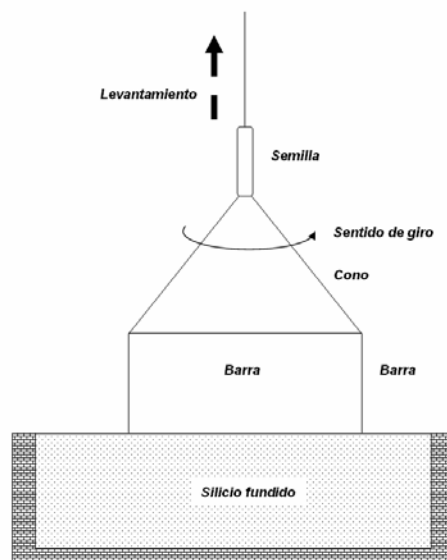


Figura 3.1. Proceso de obtención de una barra de *Si*.

La barra obtenida contiene una orientación cristalográfica determinada por la semilla. Esto no limita la obtención de una oblea con cristalografía única. Para ello, la barra es después cortada, no sólo al espesor deseado por medio de discos de diamante, sino a la orientación deseada. El corte del disco puede ser perpendicular a la longitud de la barra o puede tener una inclinación, como se ve en la figuras 3.2 y 3.3. El propósito de la inclinación del corte es obtener una oblea de *Si* cuya cara tenga una orientación cristalográfica deseada. Esta orientación puede ser igual o distinta a la orientación de la semilla original.

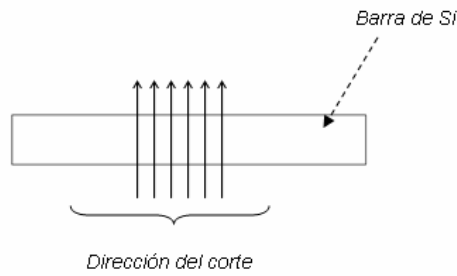


Figura 3.2 Cortes perpendiculares a la longitud de la barra

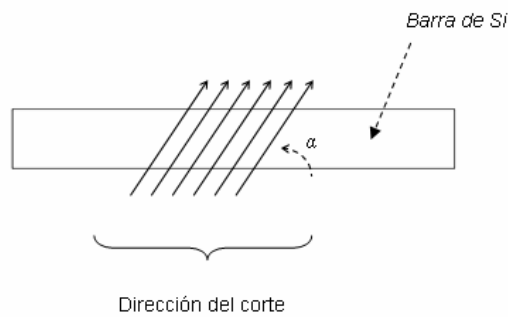


Figura 3.3. Cortes inclinados con respecto a la longitud de la barra

Después del corte y pulido, se obtiene un conjunto de discos brillantes de Silicio. Tienen una textura liza con acabado prácticamente espejo. Estas obleas se entregan al cliente en un recipiente de plástico diseñado para ello con espacios para mantener a cada oblea en su lugar y facilitar su transportación.

3.4. IDENTIFICACIÓN CRISTALOGRÁFICA

Como se mencionó anteriormente, cada oblea se puede tener con una orientación cristalográfica deseada, dependiendo de la dirección del corte y la orientación cristalográfica de la semilla. Para poder identificar la orientación cristalográfica de cada oblea, se considera (Kovacs., 1998) (Madou., 2002) una serie de planicidades o cortes laterales que codifican la orientación cristalográfica de la oblea, como lo muestra la figura 3.4.

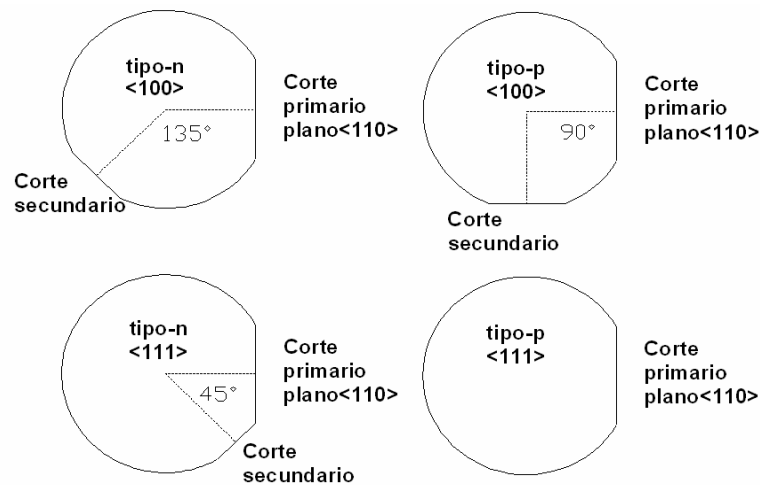


Figura 3.4. Identificación cristalográfica en las obleas de Si

En esta figura, se observan cuatro círculos, representando la vista superior de las obleas de Si, las dos obleas superiores muestran direcciones $\langle 100 \rangle$ para silicio tipo p y n, y las dos inferiores muestran las direcciones $\langle 111 \rangle$ tipo p y n. Nótese que el código de planicidad de la oblea $\langle 100 \rangle$ tipo n, esta formado por dos cortes laterales o caras planas, una larga y otra más corta localizadas a 135° de la otra, para identificar la de orientación cristalográfica de la oblea. Estas direcciones cristalográficas están basadas en los índices de Miller y tienen una importancia primordial en el desarrollo de muchos micromaquinados, en especial los desarrollados con degradadores anisotrópicos, los cuales son químicos, ácidos o reactivos, que eliminan paulatinamente el material con el que están en contacto. Esta degradación puede seguir una dirección y velocidad específica o puede no tener dirección fija, esto es; cuando el degradante ataca a la superficie en una dirección cristalográfica específica, se le denomina ataque o degradación *anisotrópica* (figura 3.5) y cuando el ataque es independiente de la orientación cristalográfica de la superficie de la oblea, se le denomina degradación *isotrópica* (figura 3.6). Por estas razones tiene primordial importancia en el desarrollo de las microestructuras, pues la adecuada combinación de degradante, tiempo de exposición y orientación cristalográfica, producen la geometría final de la microestructura y el diseño exitoso de un MEMS.

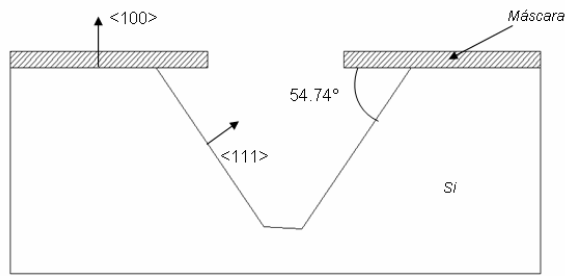


Figura 3.5. Degradado anisotrópico, dependiente de la orientación cristalográfica

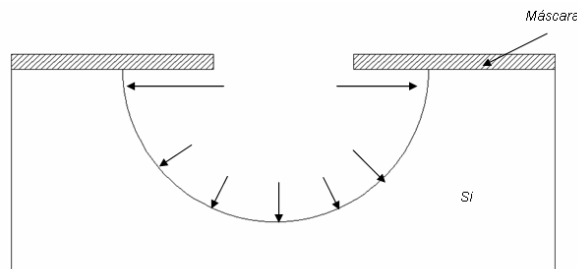


Figura 3.6. Degradado isotrópico, igual en todas direcciones

El ángulo de 54.74° , de la figura 3.5, corresponde al plano inclinado de la cara $\langle 111 \rangle$ obtenida de la nomenclatura de los índices de Miller al ser:

$$\text{ángulo} = \cos^{-1} \left[\frac{1*1*1}{\sqrt{(1)^2 + (1)^2 + (2)^2}} \right] = 54.74^\circ \quad (3.1)$$

3.4.1. Índice de Miller

Los índices de Miller se emplean para representar orientaciones de planos en una triada espacial de una oblea de *Si*. La composición cristalográfica del *Si* es de suma importancia al realizar micromaquinados en este tipo de obleas. Cualquier diseño de una microestructura sobre una oblea de cristal de *Si*, podrá ser exitoso si se consideran correctamente los planos cristalográficos que se desean degradar. Las figuras 3.7. y 3.8, muestran la orientación de los planos cristalográficos $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ y $\langle 111 \rangle$, así como su posición con respecto a los demás planos. Esto ayudará a colocar adecuadamente las fotomáscaras para degradados posteriores, especialmente los de tipo anisotrópico en los que se depende de esta orientación para degradar la cara adecuada.

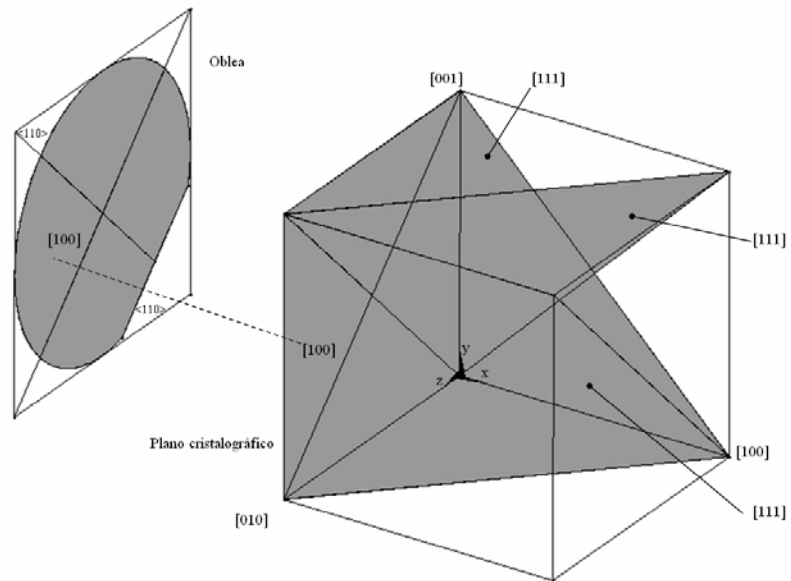


Figura 3.7. Planos cristalográficos en el *S*.

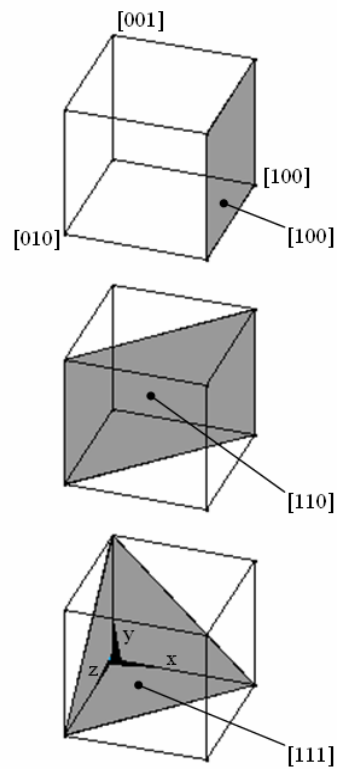


Figura 3.8. Orientaciones de Miller

3.4.2. Ángulo Entre Planos

Los planos cristalográficos guardan un ángulo de inclinación entre ellos, este ángulo se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{(P1_1 * P2_1) + (P1_2 * P2_2) + (P1_3 * P2_3)}{\left(\sqrt{(P1_1)^2 + (P1_2)^2 + (P1_3)^2} \right) * \left(\sqrt{(P2_1)^2 + (P2_2)^2 + (P2_3)^2} \right)} \right] \quad (3.2)$$

En donde $P1_N$ es el enésimo índice del plano. Conocer el plano que se desea obtener, así como su inclinación con respecto a los demás planos, es de mucha utilidad en el diseño de microcanales y microplataformas, sobre todo para diseñar soportes de fibra óptica para sujetar una o varias fibras ópticas en un interruptor óptico, o sujetar microesferas de cristal, también empleadas en MOEMS.

La importancia de este tipo de consideraciones, es la de generar estructuras como las mostradas en las figuras 3.9 y 3.10, las cuales forman canales que pueden utilizarse para sujetar fibras ópticas o construir microcanales.

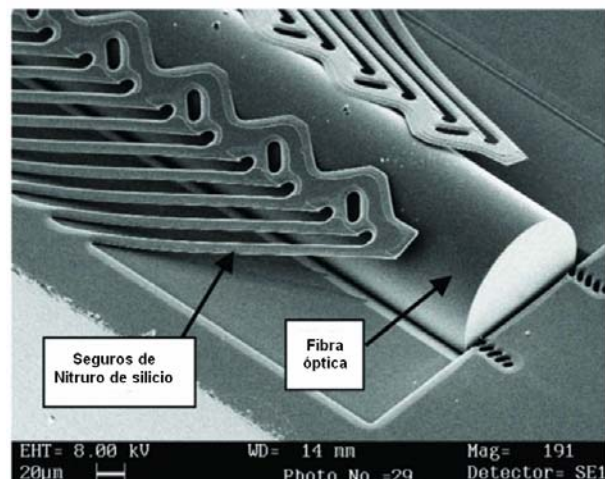


Figura 3.9. Degradado anisotrópico para posicionar fibra óptica (Moore & Syms, 2003)

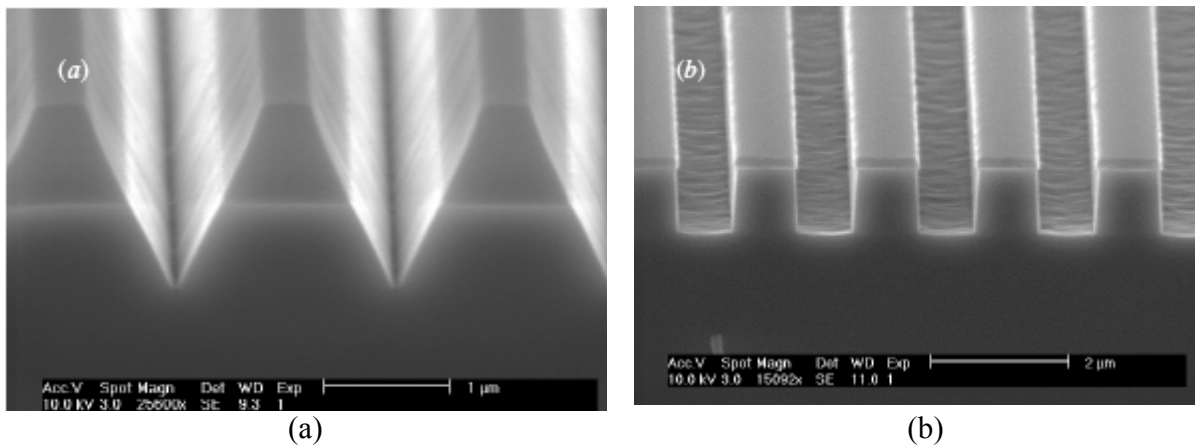


Figura 3.10. Ejemplos de degradados anisotrópicos (Kennedy. *et al.*, 2006), (a) en V y (b) rectos

3.5. CORTE DE OBLEAS DE SILICIO EN EL LABORATORIO MEMS

Algunas veces las obleas de *Si* deben ser cortadas en laboratorio, ya que en la mayoría de los experimentos no es necesario emplear toda la oblea, sino una pequeña parte. Para realizar el corte, es recomendable usar bata, lentes protectores, guantes y pinzas. Sobre una servilleta y una superficie limpia, se coloca la oblea sobre una superficie rígida y plana. Se puede tomar de referencia la planicidad indicadora de la oblea, ya que su orientación cristalográfica es conocida. La punta de las pinzas o un punzón, se coloca en la orilla de la planicidad aplicando un poco de presión rápidamente. Esta presión debe ser lo suficientemente fuerte para generar una grieta y romper el cristal en esa orilla. Por el mismo ordenamiento cristalográfico del *Si*, la grieta se prolongará por sí sola a lo largo de la oblea y en línea recta hasta cruzarla completamente. Después de eso se contará con dos planicies rectas y perpendiculares. El procedimiento se repite para formar las otras dos caras del rectángulo o cuadrado, según se desee. Es importante emplear el equipo de protección, mencionado ya que algunas veces el corte deja pequeños trozos de cristal que se recolectan fácilmente con la servilleta. Estos trozos pueden proyectarse a la cara o incrustarse en las manos debido a la velocidad del corte de la grieta. Otras veces, la grieta no llega a cruzar toda la oblea, desviándose y dejando puntas agudas. En cualquiera de los casos es necesario contar con un botiquín de primeros auxilios, ya que los guantes de hule pueden ser dañados o rasgarse por las puntas de cristal. Con un poco de práctica se llega a obtener la habilidad suficiente para realizar buenos cortes.

3.6. EL PROCESO MUMPS® DE ADHESIÓN SUPERFICIAL

El proceso MUMPS® o Proceso MEMS multiusuario, es un proceso comercial que se emplea industrialmente para la producción en serie de estructuras MEMS. El término multiusuario se refiere a institutos, empresas, universidades y centros de investigación que pueden tener acceso al desarrollo de la tecnología MEMS, empleando las mismas herramientas de diseño. En este proceso, el usuario debe enviar un diseño de la estructura MEMS en forma de dibujos digitalizados. Estos dibujos son formatos electrónicos que representan la forma geométrica de las fotomáscaras que deben emplearse para producir la microestructura. Para poder generar estas máscaras, el usuario debe contar con algún programa de cómputo desarrollado para ese fin, así como las licencias y permisos correspondientes. En general, el proceso esta compuesto por un conjunto de 7 diferentes capas que se depositan, enmascaran y retiran sucesivamente, con el objeto de formar una estructura de tecnología planar. La tabla 3.3, muestra las características de cada una de las capas, con su respectivo material y nombre del nivel litográfico:

Tabla 3.3. Capas empleadas en el proceso MUMPS (Koester *et al.*, 2001)

Material de la capa	Espesor (μm)	Nombre del nivel litográfico
<i>Nitruuro</i>	<i>0.6</i>	--
<i>Poly 0</i>	<i>0.5</i>	<i>Poly0 (Orificio 0)</i>
<i>Primer Óxido</i>	<i>2.0</i>	<i>Orificios Anclaje 1</i>
<i>Poly 1</i>	<i>2.0</i>	<i>Poly1 (Orificio 1)</i>
<i>Segundo Óxido</i>	<i>0.75</i>	<i>Poly1_Poly2_VIA Anclaje 2</i>
<i>Poly 2</i>	<i>1.5</i>	<i>Poly2 (Orificio 2)</i>
<i>Metal</i>	<i>0.5</i>	<i>Metal (OrificioM)</i>

En este proceso las máscaras pueden ser de campo iluminado o de campo oscuro, identificadas por algunos como dibujo en positivo o dibujo en negativo. Todas las capas de nivel Polysilicio son de campo iluminado y todas las capas de óxido son de campo oscuro. En los niveles de campo iluminado, se dibuja la figura o el objeto que se desea quede impreso después del degradado. En los niveles de campo oscuro, se dibujan los orificios o las áreas que se desea que se remuevan por degradado. Por ejemplo, Poly0 es un nivel de campo iluminado. Cuando se dibuja Poly0 se dibujarán las estructuras Poly. Cuando se dibuja Anclaje1, un nivel de campo oscuro, se dibujarán los orificios que servirán después como orificios de anclaje de Poly1, en el

capítulo 3 se muestra un ejemplo del conjunto de máscaras, en formato electrónico, que forman el diseño de un microespejo para conmutación óptica.

3.6.1. Secuencia del Proceso

El proceso comienza, teniendo como base un sustrato, generalmente de nitruro. Sobre el sustrato se deposita una capa de óxido (PECVD, LPCVD, etc) que servirá como máscara dura (*hard mask*) y también como capa de sacrificio (*sacrificial layer*). Esta capa de óxido dará el espaciamiento entre la estructura y el sustrato de base. Sobre la capa de óxido se deposita la fotorresistencia (photoresist), y se expone a la luz UV a través de una fotomáscara (*photomask*), la fotorresistencia servirá como máscara suave (*soft mask*), figura 3.11.

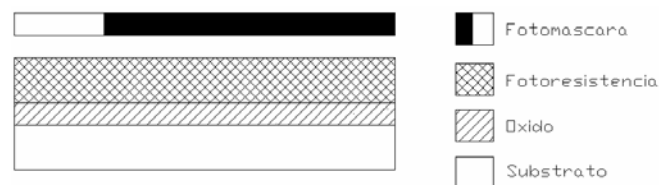


Figura 3.11. Ordenamiento de las capas para fotolitografía

Después de sumergir la fotorresistencia, expuesta en líquido develador, el patrón del dibujo queda transferido a la capa de óxido, a esto se le nombra transferencia de patrón (*transfer pattern*), figura 3.12.

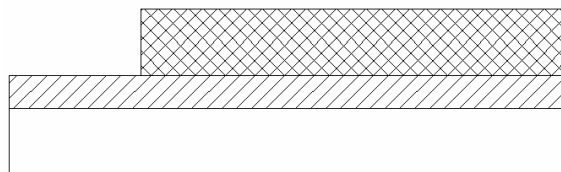


Figura 3.12. Transferencia del patrón a la fotorresistencia

Una vez transferido el patrón, se degrada la capa de óxido, generalmente en un ácido corrosivo como el *HF*, quedando descubierta una parte del sustrato figura 3.13.

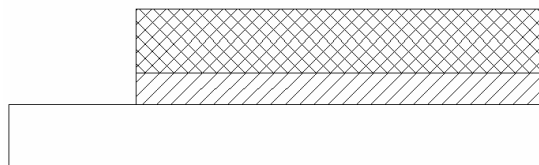


Figura 3.13. Transferencia del patrón a la capa de óxido.

A continuación, se retira la fotoresistencia, (*strip photoresist*) por medio de las acetonas correspondientes para diluirla. Al término de ello se prepara la muestra y se deposita el polisilicio (*sputtering*). Esta capa de polisilicio servirá como capa estructural, figura 3.14.

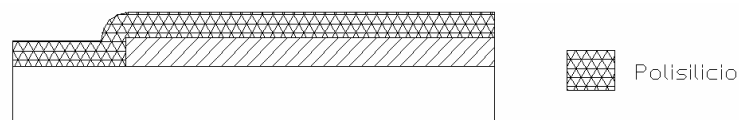


Figura 3.14. Deposición de la capa estructural

La etapa final del micromaquinado sirve para liberar la estructura, en esta etapa, la capa de óxido es retirada, dejando la capa estructural suspendida, figura 3.15. En el caso de esta figura, se tiene un ejemplo de lo que sería una microviga en cantilever, la cual puede tener diferentes aplicaciones para sensado, conmutación óptica y como microactuador.

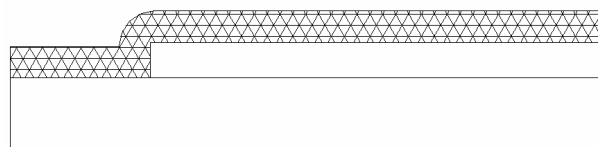


Figura 3.15. Eliminación de la capa de óxido para liberar la estructura.

3.7. EL PROCESO SUMMIT V™

SUMMIT son las siglas de Tecnología MEMS Ultra-planar Multinivel de los laboratorios SANDIA. Esta tecnología es un tipo de micromaquinado de adhesión superficial (SMM o *Surface Micro Machining*) de cinco niveles, diseñada para construir capas mecánicas de polisilicio, fabricadas sobre una capa plana que sirve como tierra, altamente dopada de polisilicio, eléctricamente. Se cuenta también con una capa de sacrificio de Óxido que queda entre cada nivel de polisilicio. La delgada película de sacrificio, define la cantidad de huelgo en el eje de un microengrane o en un conjunto de microbisagras. El óxido que queda debajo de los dos niveles superiores de polisilicio mecánico se aplana empleando un pulido químico-mecánico (CMP), el cual alivia varias tareas fotolitográficas y degradados de capas delgadas, liberando al diseñador de restricciones que, de otra forma, serían impuestas por la topología descrita.

Todo el paquete, se fabrica en una oblea de cristal único de silicio de 6 pulgadas, con una base dieléctrica de 0.63 μm de óxido y 0.80 μm de nitruro. Las capas de polisilicio están diseñadas desde el sustrato como MMPOLY0 hasta MMPOLY4. Prefijando estos niveles con “MM” para prevenir confusión con los nombres de las capas micromecánicas, comúnmente usadas en los procesos de Metal de Óxido de Silicio Complementario (CMOS *Complementary Metal Oxide Silicon*) (Weste & Eshraghian, 1993). Las películas de sacrificio están diseñadas desde SACOX1 hasta SACOX4, con el número final que corresponde al número de la capa que se deposita sobre la capa de óxido.

Los procesos mencionados anteriormente ya siguen una secuencia que no se puede cambiar, así que se debe respetar cada una de las reglas de diseño y fabricación establecidas por cada compañía. Esto brinda ventajas, como la de tener una garantía en las dimensiones finales de la microestructura y también desventajas, ya que la falta de aplicación de alguna de las reglas de diseño, podrían impedir la fabricación del prototipo. La manufactura de prototipos se efectúa por medio de un proceso de selección que se lleva a cabo varias veces por año. En estos proyectos intervienen diseñadores enviando sus trabajos en forma digital y en espera de una respuesta aprobatoria. Si el diseño es aprobado, el cliente recibirá, al cabo de unos meses, su diseño ya manufacturado y listo para entrar a la etapa de pruebas. Al cabo de varios prototipos y mejoras se puede obtener un dispositivo con un gran potencial de ser fabricado a gran escala.

3.8. FOTOLITOGRAFÍA

Dentro de todas las tareas que se llevan a cabo para la manufactura de una estructura miniaturizada, se puede mencionar a la fotolitografía como una de las más importantes, este proceso involucra el mantenimiento de la fotoresistencia, la maquinaria para la deposición de la fotoresistencia, el proceso de deposición, la generación de las fotomáscaras, la transferencia de los patrones y los degradados. A continuación se describe brevemente, cada una de estas tareas que cotidianamente se realizan en un laboratorio MEMS.

3.8.1. Componentes

La fotolitografía es la técnica empleada para transferir copias de un patrón maestro en la superficie de un material sólido (Madou., 2002). Esta técnica debe realizarse en laboratorios dedicados para ese propósito. Esto significa que las condiciones de luz y calidad del aire deben

ser controladas. Además el proceso requiere de un equipo de exposición litográfica que consta de (Sheats. & Smith., 1998):

- *Lentes de Proyección Litográfica:* Este sistema está compuesto de un conjunto de 10 a 20 lentes montados rígidamente en un cilindro. Estos formarán una imagen miniaturizada del patrón maestro de alta definición, la cual es proyectada sobre un líquido fotosensible. En algunos sistemas, la distorsión geométrica no es mayor a $0.05\mu\text{m}$ y los filtros dejan pasar una longitud de onda de 365nm .
- *Subsistema de Iluminación:* Normalmente consta de una lámpara de arco de mercurio de 1000W y espejos para coleccionar y filtrar las longitudes de onda no deseadas de la lámpara.
- *Subsistema de Posicionamiento:* El sistema de posicionamiento básicamente es una mesa tipo x-y que, por interferometría láser, puede dar una exactitud de alineación de 20nm .

Una vez que la fotorresistencia o líquido fotosensible depositado en la oblea de *Si*, se expone a la luz. Se produce un cambio fotoquímico que endurece o suaviza, según sea el caso, la zona expuesta y permite, al enjuagar, obtener una imagen con la vista superior de la estructura deseada.

3.8.2. Mantenimiento de la Fotorresistencia

La fotorresistencia, es un líquido que cambia sus propiedades al estar expuesto a diferentes condiciones de iluminación. Para el caso de micromaquinados, se emplean comúnmente las fotorresistencias que reaccionan con luz ultravioleta. Los líquidos fotorresistivos se mantienen en un refrigerador, lo que proporciona un lugar oscuro y fresco que ayuda a mantenerlos en estado de conservación, pero no deben estar congelados, así como todos los elementos químicos empleados en la fotolitografía, esto es líquidos, develadores, removedores, agua destilada, acetonas, etc., también pueden conservarse en el refrigerador. Es importante contar con recipientes para recolectar los químicos usados y evitar derramarlos en las cañerías. Existen varias compañías dedicadas a la recolección de sustancias químicas que las tratan para ser reutilizadas o las almacenan en contenedores especiales para evitar dañar el medio ambiente. Por otro lado, es importante mantener el refrigerador en un cuarto con luz ámbar y en ese mismo cuarto realizar las tareas fotolitográficas pues es la luz que menos daña la composición química de la fotorresistencia, permitiendo su manipulación y transporte.

3.8.3. Máquina para Deposición de la Fotorresistencia

La fotorresistencia se deposita por medio de fuerza centrífuga, en un dispositivo de giro a alta velocidad o *Spin Coat Machine*. Esto se realiza dentro de un cuarto con luz Amarilla o Ámbar para no dañar la composición química de la fotorresistencia. La configuración de la máquina para enmascarar, se muestra en la figura 3.16. Esta cuenta con una *tapa* que tiene un orificio central o *puerto de entrada*. Este orificio se encuentra alineado con el centro del eje de rotación del rotor. Por ese puerto, es por donde se deposita la fotorresistencia. La tapa protege de salpicaduras y lanzamientos a alta velocidad. El *eje hueco* se encuentra dentro de un *cilindro contenedor*. Este eje tiene, en la parte superior un maquinado en forma de canal para sujetar el *anillo de sello*.

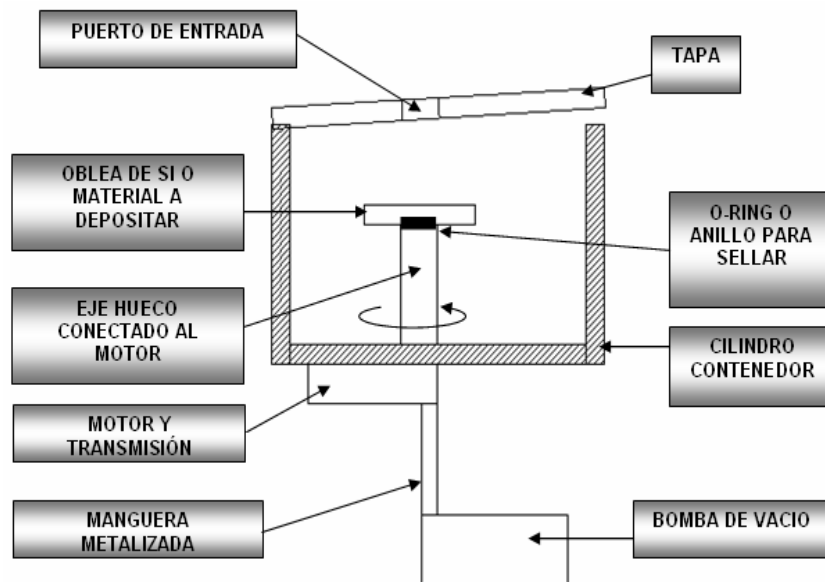


Figura 3.16. Partes constitutivas de la máquina para deposición de fotorresistencia

El eje también se encuentra conectado a la transmisión del motor y la manguera metálica que transmite el vacío generado por la bomba. A este sistema se le añade un sistema de control de velocidad y de tiempo para regulación, según se requiera y pueden estar localizados en la parte frontal de la máquina.

3.8.4. El Procedimiento de Deposición

El procedimiento de deposición de la fotoresistencia, esta conformado por las siguientes etapas:

- Se limpia previamente la oblea de *Si* con acetona y agua destilada. Se pueden emplear hisopos de algodón para este propósito.
- Se seca y se coloca en un plato calentado por resistencia eléctrica conocido como *Hot Plate*. Esto asegura que no haya humedad y calienta la superficie de la oblea para mejorar el proceso de adherencia y distribución de la fotoresistencia.
- Se coloca la oblea en el eje hueco sobre el anillo de sello y se enciende la bomba de vacío, la cual sujetará la oblea por presión de vacío.
- Se arranca el motor y al mismo tiempo se dejan caer gotas de fotorresistencia sobre la oblea.
- La fuerza centrífuga distribuye el líquido fotorresistivo de manera uniforme.
- Al terminar el ciclo se retira la oblea y se coloca de nuevo en el plato caliente para ayudar a endurecerla y secarla.

3.8.5. Fotomáscara

La máscara básicamente es un dibujo en 2D de la vista superior de la microestructura que se desea obtener. Se tienen varios programas de cómputo dedicados a este fin. El programa AUTOCAD de dibujo puede también emplearse para generar un conjunto de fotomáscaras. La impresión de estas se debe realizar en impresoras de alta calidad con una alta densidad de tinta, para obtener el mayor contraste posible a la exposición. La figura 3.17, muestra un ejemplo de dibujos que se pueden emplear para imprimir fotomáscaras. En ella se ve un conjunto de círculos de diferentes tamaños.

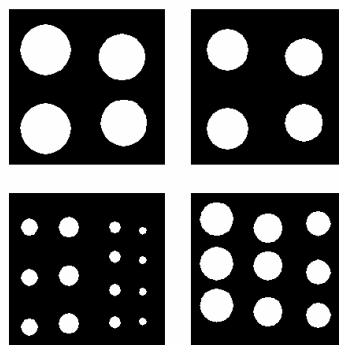


Figura 3.17. Fotomáscaras

En la figura 3.18, se muestra un arreglo de círculos en positivo y en negativo, que también se puede emplear para imprimir una fotomáscara. Comúnmente se les conoce a las imágenes de la izquierda, como de campo oscuro o *Dark field* y a las de la derecha, como de campo claro o *Light field*. El uso de cada una depende también de la fotoresistencia que puede ser positiva o negativa. En esta figura se ve un ordenamiento matricial que permite incrementar el número de círculos a medida que a estos se les reduce su tamaño.

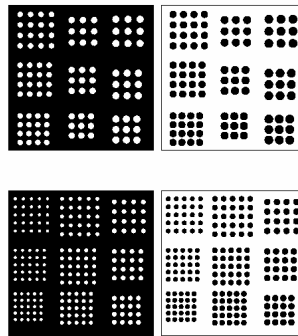


Figura 3.18. Fotomáscara negativa y positiva

La figura 3.19, muestra un ejemplo de máscara que puede emplearse para develar un chip de microfluidos. Nótese que la distribución de los microcanales puede mejorarse, incrementando la distancia recorrida por el fluido, el tamaño de los puertos de entrada y salida, etc.

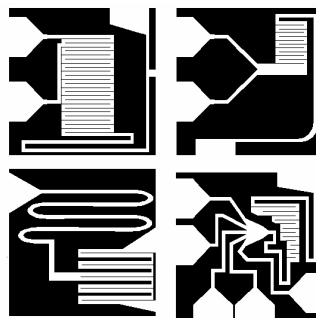


Figura 3.19. Fotomáscara para chip de microfluidos

3.8.6. Transferencia del Patrón

Una vez colocada la fotorresistencia en la oblea, se expone a la máscara o patrón, por medio de un sistema de fotolitografía, como el descrito anteriormente. Cabe señalar que el tiempo de exposición de 45 a 60 segundos puede variar dependiendo del tipo de líquido fotoresistivo empleado y la potencia de la lámpara. La figura 3.20, muestra la disposición general del sistema

de exposición. Al terminar la exposición, se sumerge la muestra al líquido develador, el cual removerá la fotorresistencia no deseada, dejando develado el patrón. En el capítulo cinco se muestran las microfotografías obtenidas del trabajo de investigación realizado en la Universidad de Concordia en Montreal Canadá.

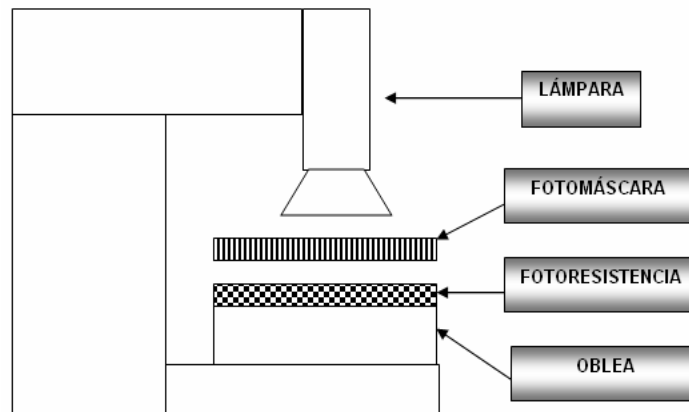


Figura 3.20. Distribución de elementos en el proceso de fotolitografía

Un buen sistema de litografía es esencial para obtener estructuras de buena calidad y evitar que la suma del error del degradado con el error del develado se incremente.



Figura 3.21. Sistema de fotolitografía en cuarto amarillo, cortesía de CONCAVE Research Center.

En la Universidad de Concordia en el CONCAVE *Research Center*, se cuenta con este tipo de instalaciones, convenientes para realizar diferentes ejercicios de fotolitografía. La figura 3.21, muestra el equipo de fotolitografía de este centro de investigación. En la fotografía se puede observar al centro de la imagen de color gris, el soporte de la lámpara UV y su fuente de

alimentación localizada a la izquierda. Del lado derecho de la imagen se muestra la máquina para deposición de fotoresistencia. Todo este equipo se encuentra dentro de un cuarto apropiado con iluminación de color ámbar. Las facilidades de este equipo, permiten realizar transferencias de patrón y fotodevelados sobre obleas de *Si*. Esto permite experimentar con un sin número de diseños para generar microestructuras.

3.9. DEGRADADO POR XeF_2 EN ESTADO GASEOSO

Para degradar obleas de *Si* se utiliza el XeF_2 en estado gaseoso. Debido a su peligrosidad se deben tener las consideraciones de seguridad necesarias para evitar riesgos. El XeF_2 tiene una presión de sublimación de 4 Torr a temperatura ambiente y forma *HF* en presencia de vapor de agua. La reacción química del XeF_2 al entrar en contacto con la superficie de *Si*, es la siguiente:



El degradado de *Si* por XeF_2 en estado gaseoso se realiza dentro de una cámara de degradado. Varios autores han publicado trabajos empleando sus sistemas de degradado por XeF_2 . En los trabajos de la Universidad de Berkeley que es famosa por sus trabajos en MEMS, *E. Hoffman, et al.* (Hoffman. *et al.*, 1995) publican su sistema de degradado por XeF_2 , como lo muestra la figura 3.22. Básicamente se tiene una campana invertida de cristal como cámara de degradado. Esta cámara esta conectada a una entrada de suministro de XeF_2 , a una entrada de la bomba de UHVAC y una entrada de gas N_2 , que usualmente se emplea para detener la reacción del XeF_2 .

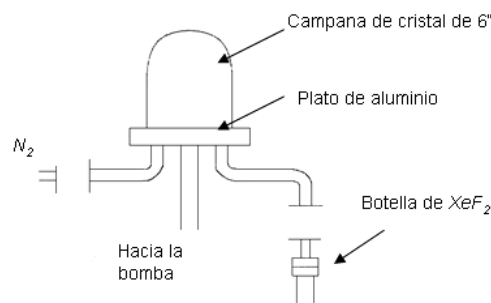


Figura 3.22. Sistema de degradado de *Si* por XeF_2 de U. Berkeley (Hoffman. *et al.*, 1995)

K. Sugano y O. Tabata (Sugano & Tabata, 2002) muestran en su publicación el aparato empleado en sus trabajos de investigación. El sistema de degradado, esta instrumentado con galgas de presión y cuenta con una cámara de expansión para mejorar la magnitud del pulso de exposición, figura 3.23.

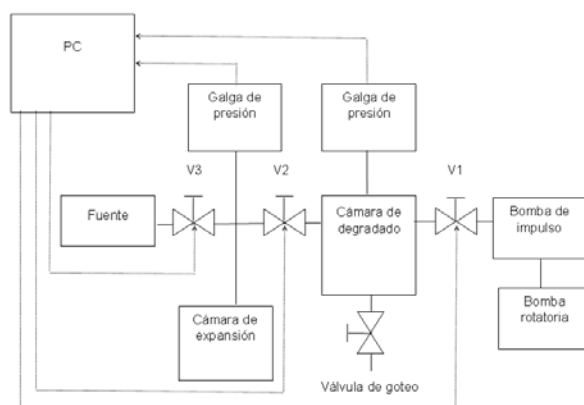


Figura 3.23. Sistema de degradado de Si por XeF_2 de K. Sugano (Sugano & Tabata, 2002).

Lo interesante del trabajo de Sugano, es que emplea una cámara de expansión localizada antes de la cámara de degradado. Esto representa un avance considerable ya que permite almacenar una cantidad controlada de XeF_2 , antes de comenzar el degradado y monitorear la presión de la cámara de expansión durante el proceso. M. H. Hecht publica el uso de un sistema de degradado por XeF_2 (Hecht *et al.*, 1985) también, la figura 3.24, muestra un diagrama del sistema empleado.

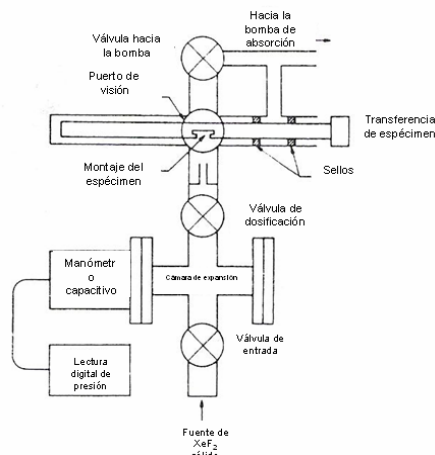


Figura 3.24. Sistema de degradado de Si por XeF_2 de M. H. Hecht (Hecht *et al.*, 1985)

De manera similar al anterior, cuenta con una cámara de expansión, la cual permite una mayor acumulación de gas XeF_2 , permitiendo incrementar el efecto del pulso al abrir las válvulas de

dosificación. La cámara de degradado cuenta con una ventana de vidrio, conveniente para la observación del proceso en tiempo real o inclusive para su filmación, permitiendo un posterior análisis en cámara lenta. Patrick B. Chu publica también el uso de un sistema de degradado de XeF_2 , empleando también cámara de expansión (Chu *et al.*, 1997).

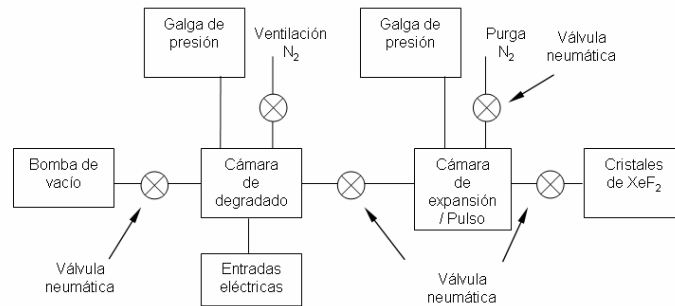


Figura 3.25. Sistema de degradado de Si por XeF_2 de Patrick B. (Chu *et al.*, 1997)

En la figura 3.25, se puede apreciar que la cámara de expansión esta instrumentada con una galga de presión, permitiendo conocer la presión de pulso antes de abrir las válvulas de dosificación. La presencia de las válvulas neumáticas ya da indicios de una dirección hacia la automatización del proceso. El comportamiento de la presión, al degradar Si con XeF_2 en estado gaseoso, se puede ver en la figura 3.26 y ayuda a explicar a detalle, el proceso que se lleva acabo en los sistemas mostrados anteriormente (Sugano & Tabata, 2002).

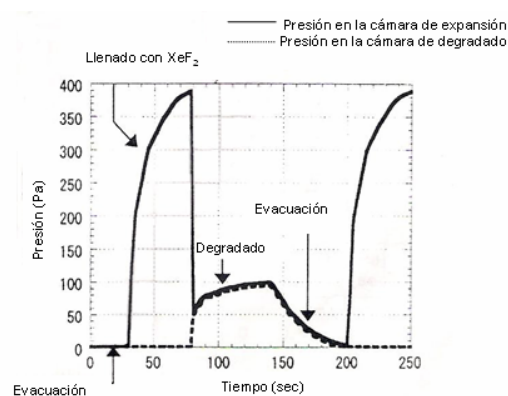


Figura 3.26. Variaciones en la presión de las cámaras para degradado (Sugano & Tabata, 2002).

Inicialmente, la cámara de expansión y la cámara de degradado se evacuan para obtener una presión de 1.0×10^{-1} Pa. Se carga la cámara de expansión de XeF_2 , y cuando se alcanza la presión

designada, se detiene el proceso de carga. La razón entre la cámara de expansión y la cámara de degradado es de 12.7. Se inyecta el XeF_2 en la cámara de degradado y el degradado comienza. En la gráfica se observa que se dejó incrementar la presión hasta 390 Pa y en ese instante se abrió la válvula de la cámara de degradado, justo a los 80 segundos de iniciado el proceso. Esta abertura incrementó su presión de 50 a 100 Pa de la cámara de degradado, mostrando el tiempo de degradado. Después se muestra, a los 140 segundos, un proceso de evacuación que en algunos casos incluye una purga con N_2 , terminando a los 200 segundos, para comenzar de nuevo el ciclo. A cada ciclo se le llama pulso y se deben realizar un conjunto de varios pulsos para generar un degradado considerable. Este tipo de degradado por pulsos, tiene el objetivo de mantener controlado el proceso ya que no es sencillo tener un control, en tiempo real, de la degradación, por otro lado, no se sabe con exactitud la cantidad de moléculas de gas que entran en contacto con la superficie de Si , esto hace que el proceso utilice una gran cantidad de XeF_2 para obtener degradados pequeños. Esto se debe a que el contacto entre las moléculas de XeF_2 y el Si es espontáneo y las microreacciones arrancan aleatoriamente a lo largo de la superficie del Si . Existen otros métodos que mantienen por más tiempo el contacto de XeF_2 con el Si . A esos métodos se les llama de degradado continuo, y pretenden emplear al máximo todo el XeF_2 generado en la etapa inicial. La ventaja de tener un método relativamente lento es que esa lentitud permite una mayor exactitud. Supóngase que el degradador elimina el material a una velocidad de $1\mu\text{m}$ por minuto. Eso significa que se tienen $1/60\mu\text{m}$ de degradado cada segundo. A esta velocidad se pueden obtener distancias de degradado muy aproximadas a las deseadas.

3.9.1. Materiales

Los materiales empleados en la construcción de este tipo de sistemas, juegan un papel importante, tanto así, que la calidad del producto obtenido, la seguridad del personal y el tiempo de vida del sistema, dependen de la adecuada selección de cada uno de ellos. Normalmente se emplea acero inoxidable 304 y 316 y para los sellos se emplean anillos tipo VITON O-Ring o de TEFLON. Los anillos O-Ring pueden durar un tiempo considerable pues a la larga se desgastan y comienzan a picarse, lo que produciría peligrosas fugas de presión. Las campanas de cristal de alta resistencia permiten conformar las cámaras de degradado, aunque también se pueden construir con un cilindro de acero inoxidable con una compuerta con ventana (*view port*) rodeada de un anillo tipo O-Ring y un seguro de presión. Es decir la conformación del equipo queda a iniciativa del diseñador.

3.9.2. Degradador de XeF_2 del CONCAVE

El Centro de Ingeniería Vehicular Avanzada de Canadá o CONCAVE, cuenta en su división de MEMS, con un amplio laboratorio, conveniente para la realización de diferentes investigaciones en el área de MEMS y MOEMS. En este centro de investigación se cuenta con un sistema de degradado con XeF_2 en estado gaseoso. El sistema fue construido por los doctores Ion Stiharu y M. Packirisamy, dando buenos resultados al degradar diferentes muestras de *Si*. El sistema, como se ve en la figura 3.27, está compuesto de una cámara de degradado, un medidor de presión, una bomba de alto vacío, una trampa de Nitrógeno líquido, una entrada de gas Nitrógeno para purgar y un conjunto de válvulas para el control del proceso. La figura 3.28, muestra la fotografía del sistema. Se observa a la derecha la bomba de alto vacío, conectada a la trampa de Nitrógeno líquido. También cuenta con una adecuada estructura encargada de soportar a la cámara de degradado con todos sus componentes.

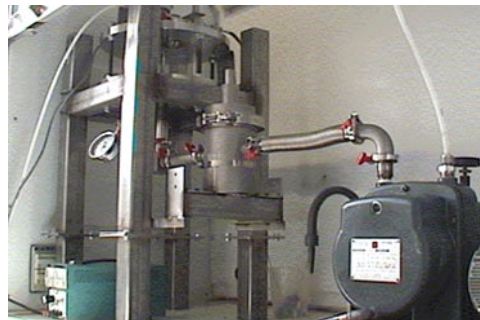


Figura 3.27. Sistema de degradado con XeF_2 en estado gaseoso cortesía de CONCAVE Research Center.



Figura 3.28. Vista lateral del sistema de degradado con XeF_2 en estado gaseoso cortesía de CONCAVE Research Center

En estos equipos se realizaron los análisis experimentales presentados más adelante. En ellos se realizaron degradados en muestras de silicio. Resultado de esto, fue la publicación del artículo en

el *Journal of Manufacturing Technology and Management* con el título "*Roughness Characterization of Gas Phase Micromachining Process Suitable for Fabricating Silicon Based Microsystems*", los otros resultados también se muestran más adelante.

3.10. CONFIGURACIÓN GENERAL DE UN LABORATORIO MEMS

No existen limitantes en cuanto a los componentes de un laboratorio MEMS, de manera general se debe contar con un conjunto de equipos como los que se muestran en la figura 3.29:

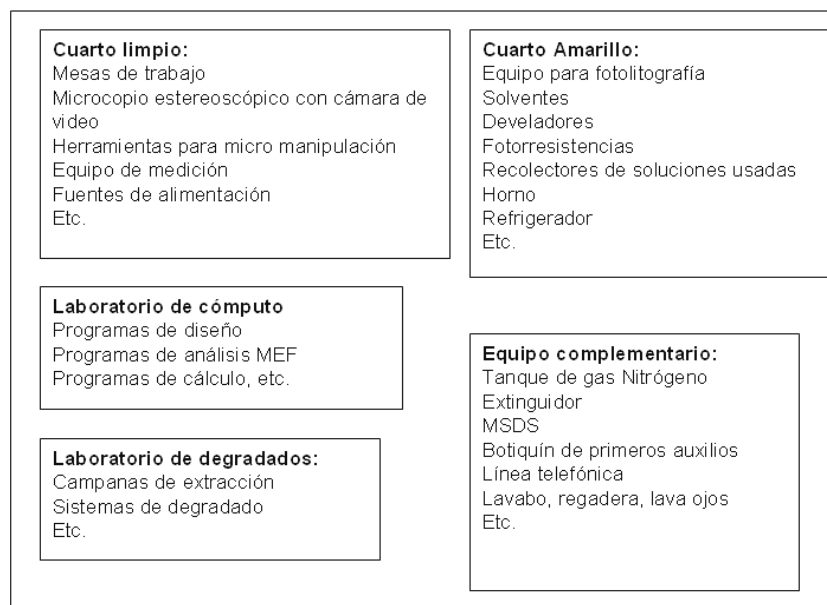


Figura 3.29. Componentes generales de un laboratorio MEMS

3.10.1. Cuarto Limpio (*Clean Room*)

El cuarto limpio es el concepto de un cuarto con filtros de aire que paulatinamente eliminan la cantidad de partículas en suspensión en el aire. Para lograr esto, se instalan un conjunto de cuartos limpios, uno dentro del otro, disminuyendo gradualmente la suciedad en el aire, hasta llegar a un máximo. Esta máxima magnitud de limpieza depende de la capacidad de las instalaciones, mientras más se invierta en ello, más limpia es la calidad del aire que se puede obtener. Así se pueden tener por ejemplo, cuartos con clase 100 000 que contienen esa cantidad de partículas por pie cúbico, con un tamaño de partícula de $0.5\mu\text{m}$ y va disminuyendo a 10 000, 1000, 100 etc., hasta donde la instalación lo permita. El objetivo de este tipo de instalaciones es disminuir al máximo posible, el riesgo de contaminación durante el proceso de manufactura de los MEMS. Esto incluye el evitar al máximo la entrada de diminutas partículas de polvo que

podrían llegar a hacer contacto con las obleas de *Si* y arruinar el proceso de fabricación. Es importante que el personal que ingresa a este tipo de instalaciones cuente con la vestimenta adecuada para evitar la contaminación del equipo.

Se puede tener un cuarto limpio para un laboratorio MEMS el cual consta de una estructura de soporte, un conjunto de filtros y ventiladores localizados en la parte superior, un sistema de iluminación y una cubierta de plástico.

Con respecto al microscopio estereoscópico, este permite un rápido acceso al micromundo, sobretodo en las labores de inspección y medición de microestructuras. Se prefiere del tipo estereoscópico para poder tener la sensación de profundidad al poder observar en él con ambos ojos. La mayoría cuenta con una escala graduada y control de la posición de la muestra en sus direcciones horizontales (*x*, *y*), vertical y control de foco. Además de ello, este tipo de microscopio debe contar con una luz que ilumine las muestras sólidas de arriba hacia abajo y con control de intensidad.

3.10.2. Laboratorio de Cómputo

Esta es una sala de cómputo común, con la característica de que los equipos de cómputo cuentan con programas de cómputo y licencias correspondientes para el diseño de MEMS. El objetivo de este es realizar los diseños en formato electrónico, para su posterior manufactura. Esto implica, como en todo laboratorio de diseño por cómputo, el uso de procesadores de alta velocidad y pantallas de alta resolución. Algunos de los programas que se deben tener son: AUTOCAD, L-EDIT®, ANSYS®, FEMLAB®, COVENTOR®, etc.

3.10.3. Cuarto Amarillo

En este cuarto se realizan todas las labores que tienen que ver con la fotolitografía, todos los químicos que se emplean en ese laboratorio se deben conservar frescos y en buen estado, manipulándolos preferentemente con guantes que soporten la exposición a estos químicos. Una vez que se han utilizado los guantes y las soluciones químicas, no deben desecharse por la cañería, más bien se recolectan en recipientes de vidrio correctamente cerrados y se entregan a una compañía encargada de tratar con este tipo de residuos. La estancia prolongada en este cuarto de luz ámbar o amarilla puede llegar a producir malestar. Así que es conveniente contar con todo el material y herramientas necesarias antes de comenzar a trabajar, para evitar pérdidas

de tiempo innecesarias. El punto más importante en este tipo de laboratorios es no mirar a la fuente de luz ultravioleta por ningún motivo, ya que puede producir daños considerables a la vista como la ceguera. En este cuarto se encuentran varios equipos eléctricos como la fuente de energía para la luz ultravioleta, los hornos, así como la máquina de deposición de fotoresistencia por giro y otros equipos, debido a ello se deben tomar las precauciones necesarias para evitar accidentes.

3.10.4. Equipo Complementario

El equipo complementario es variado, se pueden incluir tantas herramientas como se desee, pero el gas nitrógeno es indispensable ya que se emplea en muchas fases del proceso de manufactura, entre ellas en la limpieza y secado de las muestras y para detener la reacción de los degradantes, sobre todo el XeF_2 al reaccionar con el Si . Debido a ello es importante contar con un buen tanque de gas nitrógeno, con reguladores e indicadores de nivel, pues sería demasiado peligrosa la falta de nitrógeno a la mitad de un proceso de fabricación, además debe tenerse sujeto, por medio de una cadena a la pared, para evitar que se caiga al momento de manipularlo. Otros equipos complementarios pueden ser los lentes de aumento, pinzas de diferentes tamaños y que pueden ser de acero inoxidable o plástico, recipientes petri, goteros, cotonetes, papel higiénico, papel aluminio, envases, etc. Es muy importante contar con un buen equipo de primeros auxilios, así como las Hojas de Seguridad de las soluciones químicas que se encuentran en el laboratorio, conocidas como MSDS (*Material Safety Data Sheet*), extinguidor y fuentes de agua como lavabos, lava ojos y regadera.

3.11. INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación requerida para trabajar en la microescala, no necesariamente debe pertenecer forzosamente al laboratorio MEMS, pero si es importante tener acceso a equipos como el Microscopio de Barrido Electrónico, el Microscopio de Fuerza Atómica y algún tipo de micromanipulador como el caso del cortador láser, a continuación se da una breve descripción de la importancia que representa para esta área de la investigación.

3.11.1. Microscopio de Barrido Electrónico (SEM)

El Microscopio de Barrido Electrónico, es una herramienta fundamental en el diseño de microestructuras. Este tipo de microscopio permite obtener fotografías en perspectiva a

diferentes ángulos de inclinación, de muestras cuyas dimensiones rondan el orden de los micrómetros y en algunos casos menores. Las fotografías obtenidas con este microscopio cuentan con una escala graduada que permite tener una apreciación más clara de las dimensiones finales de la microestructura. En los microscopios electrónicos actuales, estas fotografías ya se obtienen en formatos electrónicos, lo que permite su rápida transferencia y utilización en medios de cómputo. Los microscopios de modelos anteriores empleaban una película de fotografía tipo polaroid para tomar la imagen, pero de igual forma son muy funcionales.

3.11.2. Microscopio de Fuerza Atómica (AFM)

El Microscopio de Fuerza Atómica es uno de los grandes avances en la ingeniería. Ganador del premio Nobel de física en 1986 por G. Binnig and H. Rohrer permite la toma de muestra por medio del registro de un barrido superficial con la punta de una microviga, en pequeñas áreas de distintos materiales. Esto permite obtener lecturas de la rugosidad de la muestra. El procedimiento de barrido se lleva a cabo mediante una microviga en cantilever, como la de figura 3.30, fotografía tomada con las facilidades del CONCAVE en un Microscopio de Barrido Electrónico. Se observa que tiene una punta en forma de pirámide. Como se observa en la figura 3.31, la viga se coloca en contacto con la superficie a analizar y se desplaza sobre la superficie generando un perfil en tercera dimensión, por el cambio en la deflexión de un haz LÁSER. Este proceso se repite hasta obtener una muestra cúbica en 3D de la rugosidad de la superficie.

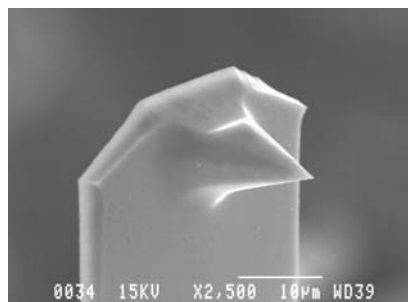


Figura 3.30. Microfotografía de un cantilever para AFM (Muthukumaran., 2004)

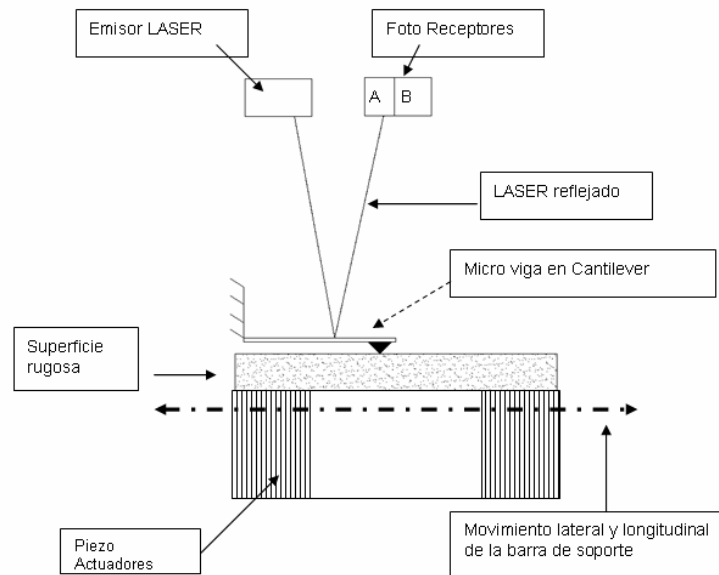


Figura 3.31. Funcionamiento de un AFM

Este tipo de microscopio se encuentra conectado a una computadora que tiene un programa que permite proporcionar datos estadísticos sobre la superficie y para efectos de observación, permite combinar colores y valores de iluminación virtual, para iluminar zonas específicas de la muestra (Franssila., 2004).

3.11.3. Cortador LASER (*FIB*)

Otro de los grandes avances de la ingeniería es el Haz de Iones Enfocados (*Focused Ion Beam* ó *FIB*). Este instrumento es la unión de un microscopio electrónico con un haz láser en su interior. Esto permite realizar micro cortes con alta calidad e incluso realizar cortes en escala nanoscópica. Estos equipos actualmente son controlados por la computadora, lo que incrementa sus capacidades de manejo, brindando servicios muy importantes.

A diferencia del degradado superficial, en el que se emplea un conjunto de fotomáscaras, previamente develadas y grabadas en el substrato, en el *FIB* se realiza este enmascaramiento empleando una máscara electrónica. Esto es, empleando la interfaz gráfica de la computadora, la cual permite importar la máscara de un archivo en forma de dibujo, que fue previamente generado como los de tipo mapa de bits o los de extensión *jpg*. También permite generar la máscara en la misma computadora, instantes antes de generar el corte. El procedimiento inicia

colocando la muestra a cortar, en una base que, en algunos casos, no es mayor a los 3 mm². Esta base generalmente está cubierta de cinta de doble adhesivo, para evitar que la muestra se caiga o se mueva de su posición. Si se llegara a caer, el equipo podría dañarse ya que trabajan a alto vacío en una pequeña cámara muy delicada y sensible a las vibraciones, en la cual, la caída de una de las muestras podría provocar, la pérdida total de la muestra, cuando menos hasta llevar a cabo un mantenimiento que permitiera abrir la cámara para extraer la muestra. Una vez dentro de la cámara, se realiza el proceso de alto vacío que en las máquinas modernas lleva sólo unos instantes. Ya en la pantalla de la computadora puede apreciarse la muestra y seleccionar el área de corte, así como la posición de la máscara en la muestra. Este paso debe realizarse rápidamente ya que el FIB tiene el inconveniente de generar una quemadura en la superficie que se está observando. En el capítulo de resultados se muestran microfotografías de elementos donde se realizaron este tipo de micromaquinados.

En el siguiente capítulo, se muestran análisis de tipo numérico de diferentes microestructuras, introduciéndose por primera vez, el análisis de campos acoplados con el programa ANSYS® de Elemento Finito, donde se involucra la interacción de varios campos físicos, generando un problema de tipo mecánico-electrostático al mismo tiempo, indispensable para conocer los rangos de trabajo de microdispositivos, en el área conocida como actuación electrostática.

3.12. DISCUSIÓN

En este capítulo se han presentado diferentes temas involucrados en la manufactura de obleas de silicio, que es el material comúnmente más empleado en la fabricación de MEMS, desde las propiedades generales del silicio, hasta el proceso MUMPS® de adhesión superficial. En este recorrido se ha discutido la forma de obtener obleas de silicio empleando el método del profesor Jan Czochralski y la identificación cristalográfica que se puede denotar con ayuda de los índices de Miller. También se ha mostrado un procedimiento manual para realizar el corte de las obleas y los componentes principales que se requieren en un laboratorio MEMS. El mantenimiento y aplicación del líquido fotoresistivo, por medio de la máquina para deposición por giro, también se analiza en este capítulo, el cual es esencial para el tema del degradado superficial, empleando XeF_2 en estado gaseoso. Los componentes de un laboratorio MEMS son otro aspecto analizado en este capítulo, así como los equipos complementarios y el equipo de microscopía requerido

para realizar las caracterizaciones correspondientes. Los temas analizados en esta sección han mostrado una visión general de la infraestructura requerida para trabajar en la microescala. Estos temas pueden aclarar las razones por las cuales se requiere realizar una fuerte inversión en el país en este tipo de tecnologías. Para facilitar la realización del gran proyecto que representa el acceso a esta tecnología, se están generando las llamadas redes de diseño MEMS, formadas por diferentes instituciones a lo largo de la nación y tienen el propósito de aumentar las actividades en el área de MEMS en México. De esta forma, el trabajo repartido en diferentes lugares, permitirá la obtención de un servicio que contribuya a ensamblar un elemento de la cadena de valores que se requieren para obtener un MEMS. Esto se refiere al diseño, análisis, manufactura, caracterización, empaquetamiento, análisis experimentales de los dispositivos, etc. Todas estas actividades requieren equipo y personal capacitado y el trabajo en redes presenta una oportunidad de cubrir todos esos aspectos.

A continuación se trata el tema del análisis numérico de diferentes microestructuras mecánicas, este análisis se realiza empleando el método del elemento finito, lo cual permite considerar los diferentes aspectos físicos involucrados al trabajar con un Sistema-Micro-Electro-Mecánico. Esto implica la solución de un problema que acopla el campo electrostático y el campo mecánico estructural.



4

ANÁLISIS NUMÉRICO DE MICROESTRUCTURAS MEMS

En este capítulo se presenta el análisis numérico de estructuras MEMS comenzando por describir los conceptos de voltaje de rompimiento y debilitamiento estructural, exponiendo bases teóricas de cálculo estructural MEMS.

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se presenta el modelado numérico de diferentes estructuras MEMS. Estos análisis se realizan con el propósito de conocer el comportamiento de las microestructuras bajo diversas situaciones de trabajo. Para el caso de las microestructuras actuadas de manera electrostática, el análisis se basa, en el principio de que, al circular una corriente eléctrica a través de dos placas planas paralelas, colocadas a corta distancia una de la otra, se genera entre ellas una fuerza de atracción electrostática. Si una de las placas se encuentra fija o sujeta a tierra y sobre ella se encuentra suspendida la otra, por ejemplo el caso de una viga en cantilever, la magnitud de esta fuerza electrostática podría llegar a deformar elásticamente a la viga suspendida. Mientras más delgada sea la placa superior, la magnitud de la deformación se incrementará considerablemente. En los MEMS, las capas estructurales tienen espesores muy delgados, cercanos a los $2\mu\text{m}$, lo que las hace convenientes para emplear este principio. El modelado numérico de estas estructuras, involucra entonces la consideración de un campo físico mecánico-estructural, combinado con otro campo físico, formado por un dieléctrico que transmite la fuerza electrostática. Es importante considerar la influencia de un campo sobre el otro, ya que, como se verá más adelante, la frecuencia natural de estas estructuras puede verse afectada por el voltaje de activación. Es posible emplear la técnica de multi campos, o la técnica de campos acoplados del programa ANSYS®, para realizar este tipo de análisis. En este capítulo se emplean esas técnicas para encontrar la deflexión producida en la microestructura por este efecto electrostático. Las aplicaciones de este efecto están altamente enfocadas al desarrollo de microsensores y microactuadores, que debido a su reducido tamaño, permiten abarcar rangos de detección más amplios o frecuencias de actuación más altas. Su aplicación en MOEMS (Sistemas Micro Opto Electro Mecánicos) es bastante amplia, para reflejar a diferentes ángulos la luz LÁSER en el uso de sensores, fotónica, AFM, biosensores, etc. La conformación de este capítulo, sigue la metodología de trabajo que se describe a continuación.

4.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo considerada para esta sección involucra, inicialmente, una descripción del problema y el objetivo que se desea alcanzar, el desarrollo de la solución y el análisis de los resultados obtenidos. Los casos de análisis a estudiar son:

-
-
- a) Voltaje de rompimiento
 - b) Voltaje de activación y la frecuencia natural
 - c) Cálculo de las frecuencias naturales y modos de vibración de una microviga en cantilever empleando el método de Rayleigh–Ryts y el Método del Elemento Finito.

4.3. VOLTAJE DE ROMPIMIENTO

4.3.1. Descripción del Problema

Al aplicar un voltaje entre una microviga en cantilever y un electrodo a tierra, separadas por un claro, existe una fuerza de atracción que se incrementa a medida que la distancia entre ambas se reduce. Para cada magnitud de voltaje aplicado, se puede tener una deflexión equivalente, pero existe un punto límite llamado voltaje de rompimiento, en el cual la fuerza de atracción llega a un punto en el que jala por completo a la microviga. Este límite debe considerarse para evitar dañar la estructura y mantenerla en condiciones de operación seguras.

4.3.2. Objetivo

Se desea encontrar la magnitud del voltaje de rompimiento en microvigas cantilever de diferentes magnitudes, empleando los conceptos propuestos por (Muthukumaran. *et al.*, 2002).

4.3.3. Desarrollo

La microviga en cantilever puede representarse como un sistema masa-resorte sujeto a la excitación de una fuerza electrostática, que se produce al aplicar un voltaje entre la microviga y el electrodo, como lo muestra la figura 4.1.

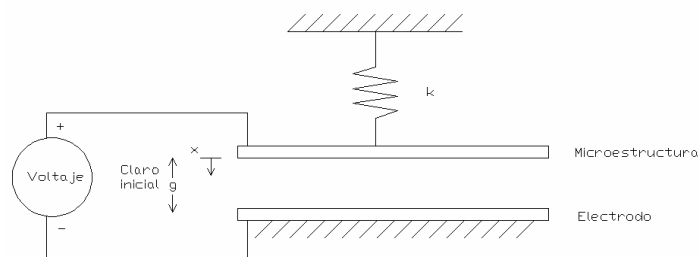


Figura 4.1. Representación del sistema

El diagrama de cuerpo libre del sistema de la figura 4.2, muestra que debe haber un equilibrio entre la rigidez mecánica y la fuerza electrostática.

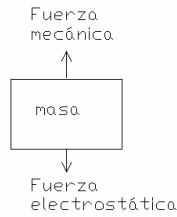


Figura 4.2 Diagrama de cuerpo libre del sistema

De esta forma, como lo trata (Muthukumarán. *et al.*, 2002), se puede expresar:

La fuerza producida por la rigidez mecánica (4.1).

$$F_{mec} = kx \quad (4.1)$$

La fuerza electrostática (4.2) (Kovacs., 1998):

$$F_{elec} = \frac{\Sigma_e \Sigma_o AV^2}{2d^2} \quad (4.2)$$

Donde:

F_{mec} = Fuerza mecánica

F_{elec} = Fuerza electrostática

k = Rigidez mecánica

x = Desplazamiento

Σ_o = Permitividad absoluta

Σ_r = Permitividad relativa

A = Área traslapada por las placas

V = Voltaje

d = Distancia del claro entre placas

Al igualar (4.1) con (4.2) y considerar a d como el cambio $(d-x)$ se obtiene (4.3.3):

$$-kx + \frac{\Sigma_r \Sigma_o AV^2}{2(d-x)^2} = 0 \quad (4.3)$$

Muthukumarán *et al.*, proponen que para mantener la condición de equilibrio en el sistema, el cambio en el valor de la fuerza neta debe ser menor a cero (4.3.4) (Muthukumarán., 2006):

$$\frac{\partial F_{total}}{\partial x} < 0 \quad (4.4)$$

Entonces, al derivar parcialmente (4.3) con respecto a x se obtiene la condición de estabilidad (4.5):

$$-k + \frac{\Sigma_r \Sigma_o A V^2}{(d-x)^3} = 0 \quad (4.5)$$

De (4.3) puede despejarse k y sustituirse en (4.5) para obtener (4.6)

$$x = \frac{d}{3} \quad (4.6)$$

Lo que indica que se puede obtener el voltaje de rompimiento cuando se ha recorrido cerca de 1/3 del claro total entre las placas. Al sustituir (4.6) en (4.3) se obtiene que el voltaje de rompimiento puede expresarse entonces como (4.7) (Muthukumaran., 2006)

$$V = \sqrt{\frac{8}{27} \frac{kd^3}{\Sigma_o \Sigma_r A}} \quad (4.7)$$

4.3.4. Análisis de Resultados

Por medio de un programa en MATLAB, pueden analizarse estas ecuaciones y encontrar la respuesta para vigas de diferentes longitudes, en este caso, se consideraron vigas de 8 μm de ancho, 2 μm de espesor y longitudes de: 100, 150, 200, 250, 300 y 350 μm . En todos los casos se consideró un claro de 2 μm , típico del proceso MUMPS. Los voltajes de rompimiento obtenidos para cada microviga se observan en la tabla 4.1:

Tabla 4.1: Voltajes de rompimiento para diferentes longitudes de viga

<i>Longitud</i>	<i>Voltaje de rompimiento</i>
100	30.0813
150	13.3695
200	7.5203
250	4.8130
300	3.3424
350	2.4556

Al graficar para cada una de las longitudes, se observa una correspondencia entre el voltaje de rompimiento y la deflexión obtenida, como lo muestra la figura 4.3 (a) para 100, (b) 150, (c) 200, (d) 250, (e) 300 y (f) 350 μm , en estas figuras puede observarse también, que este voltaje de rompimiento mantiene la condición de (4.6) observada por Muthukumaran et al. Si se tiene un claro de 2 μm es de esperarse un rompimiento a aproximadamente los 0.66 μm de actuación,

como puede comprobarse en las gráficas de la figura 4.3, donde la curva alcanza su máximo valor y cambia de dirección a los $0.66\mu\text{m}$.

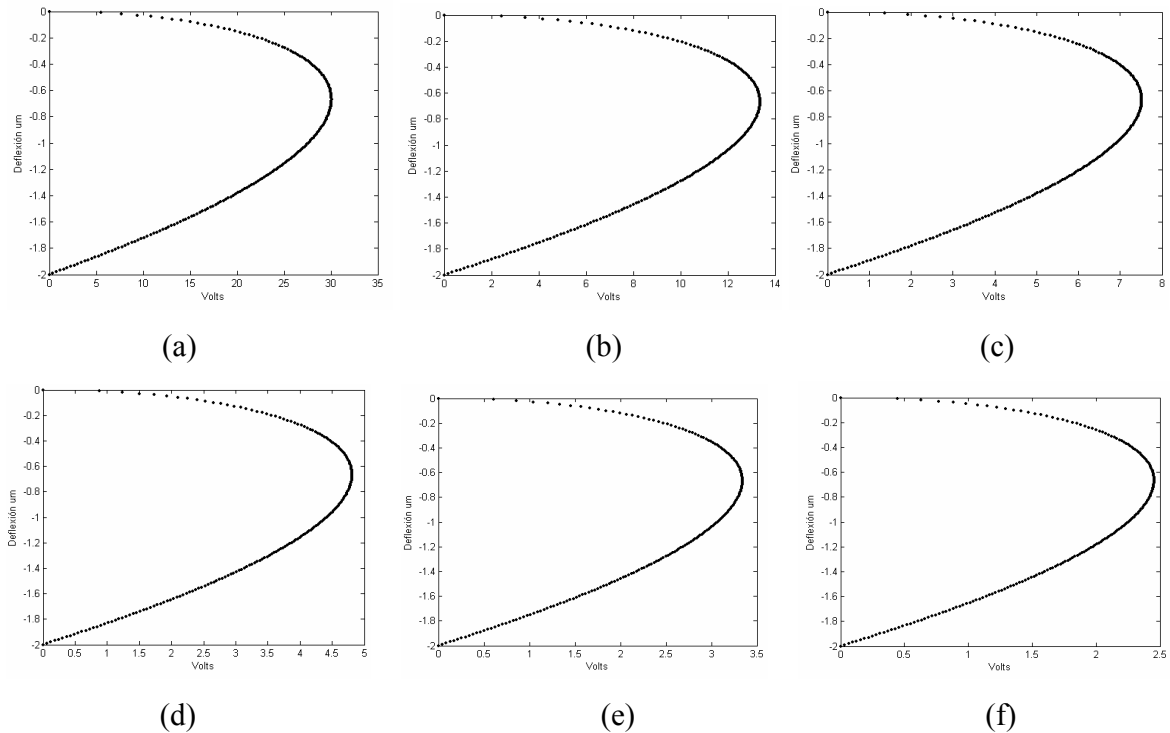


Figura 4.3. Voltajes de rompimiento de vigas para longitudes (a) 100, (b) 150, (c) 200, (d) 250, (e) 300 y (f) 350 μm

4.4. VOLTAJE DE ACTIVACIÓN Y LA FRECUENCIA NATURAL

4.4.1. Descripción del Problema

Muthukumaran *et al*, también han observado que el comportamiento dinámico de las microestructuras MEMS se ve afectado por el voltaje de activación. Este estudio puede ser benéfico o contraproducente, dependiendo de las aplicaciones y utilidad que se le dé. El problema plantea conocer la relación entre la frecuencia natural de la microviga y el voltaje de activación.

4.4.2. Objetivo

Se desea encontrar la magnitud de la frecuencia natural de las microvigas analizadas anteriormente y la influencia del voltaje de activación, empleando los conceptos propuestos por (Muthukumaran. *et al.*, 2002).

4.4.3. Desarrollo

Tomando como referencia el sistema mostrado en la figura 4.3, se puede expresar su comportamiento dinámico de la forma (4.8):

$$m\ddot{x} + kx = F_{elec} \quad (4.8)$$

De (4.2), puede observarse que el sistema no es lineal en términos de x y se puede linearizar empleando series de Taylor (Muthukumaran., 2006):

$$F_{elec}(x) = F_{elec}(x_o) + \left. \frac{dF_{elec}}{dx} \right|_{x_o} (x - x_o) + \dots \quad (4.9)$$

Quedando del lado derecho de la igualdad de (4.8). Obteniendo para el caso de vibraciones libres (4.10):

$$m\ddot{x} + x \left[k - \frac{\Sigma_r \Sigma_o AV^2}{(d-x)^3} \right] = 0 \quad (4.10)$$

De donde puede obtenerse, por medio de un manejo algebraico (4.11) (Muthukumaran., 2006):

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m} \left(1 - \frac{2x}{d-x} \right)} \quad (4.11)$$

(4.11) expresa la influencia del voltaje de activación en la primera frecuencia natural de la microviga, lo que es conocido como endurecimiento electrostático o debilitamiento estructural MEMS.

4.4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De igual forma que en el análisis anterior, se realizó un programa en MATLAB® para introducir los datos correspondientes a cada una de las vigas analizadas. Como podrá observarse en la figura 4.4., efectivamente existe una caída en el valor de la frecuencia natural, que observa un comportamiento no lineal, a medida que la viga es actuada. Para un claro de $2\mu\text{m}$, considerado para todas las vigas, se observa un comportamiento constante de debilitamiento estructural, que alcanza su máximo valor justamente en el punto de voltaje de rompimiento, para este caso de $0.66\mu\text{m}$. El debilitamiento estructural modifica entonces la posición de la zona de desplazamiento máximo para esa condición, lo cual no significa una circunstancia negativa para el sistema, por ejemplo, para la viga de $100\mu\text{m}$ se puede alcanzar su máximo desplazamiento de trabajo al excitarla cerca de los 120 kHz, pero este valor puede emplearse a conveniencia del usuario. La figura 4.4, muestra la relación entre la frecuencia natural de las microvigas y el

desplazamiento a través del claro, que correspondería a un voltaje de activación para longitudes de (a) 100, (b) 150, (c) 200, (d) 250 (e) 300 y (f) 350 μm . Esta información puede ser de gran utilidad para ayudar a estimar en los sistemas de control, los valores de voltaje y frecuencias de activación de micro vigas MEMS en cantilever.

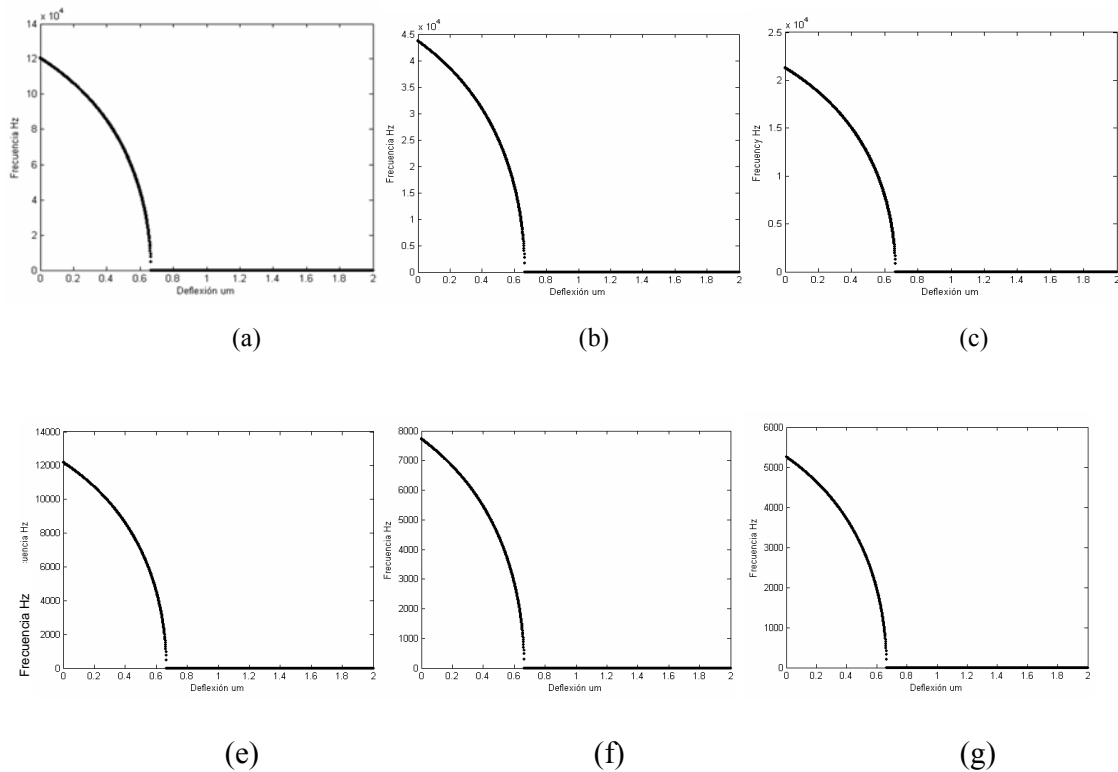


Figura 4.4. Relación entre la frecuencia natural de las microvigas y el desplazamiento a través del claro para longitudes de: (a) 100, (b) 150 (c) 200, (d) 250 (e) 300 y (f) 350 μm .

4.4.5. Comparación

Si la aproximación anterior es correcta, se debe de mantener un valor muy cercano a 1/3 del claro, inclusive si este es distinto de $2\mu\text{m}$. De esta forma, se consideró entonces el caso de un claro de 1 y $3\mu\text{m}$, para una viga de $150\mu\text{m}$ de largo. Esto se confirma, como se ve en la figura 4.5 (a) donde se ve el voltaje de rompimiento para un claro de $1\mu\text{m}$ se encuentra cerca de los $0.33\mu\text{m}$ y la caída de la frecuencia 4.5 (b) que tiende a ser mínima al mismo valor. Este comportamiento se conserva para $3\mu\text{m}$ como lo muestra la figura 4.6 (a) y (b).

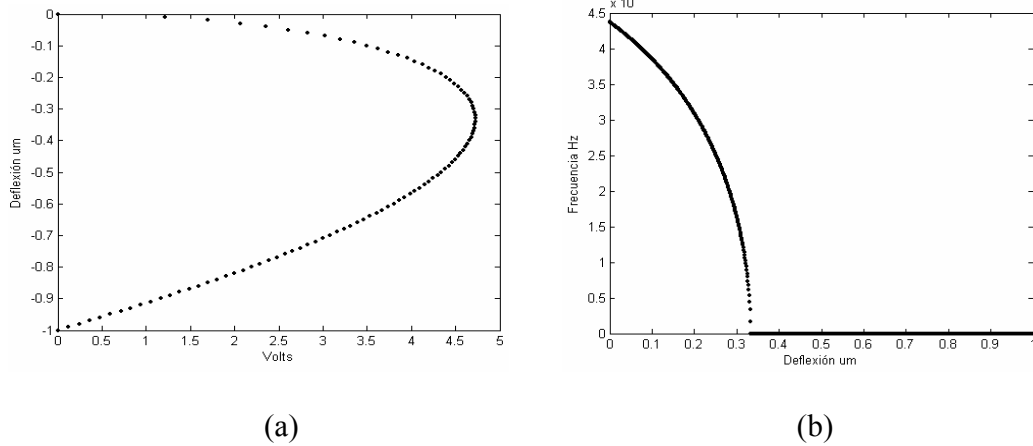


Figura 4.5. Voltaje de rompimiento y (a) relación entre la frecuencia natural y el desplazamiento (b) para una viga de 150µm de largo y un claro de 1µm.

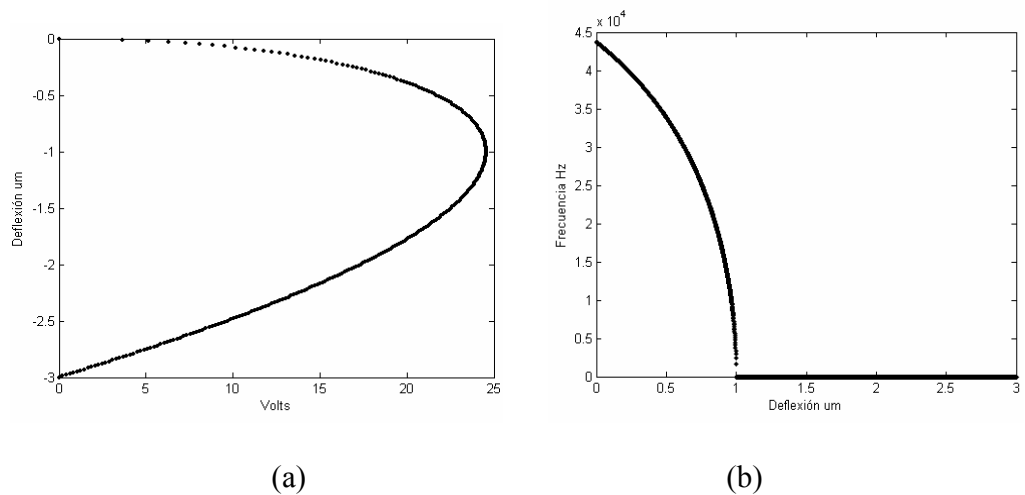


Figura 4.6. Voltaje de rompimiento y a) relación entre la frecuencia natural y el desplazamiento (b) para una viga de 150µm de largo y un claro de 3 µm.

4.5. FRECUENCIAS NATURALES Y MODOS DE VIBRACIÓN EMPLEANDO EL MÉTODO DE RAYLEIGH RITZ Y EL PROGRAMA ANSYS®

4.5.1. Descripción del Problema

Es posible obtener las frecuencias naturales y los modos de vibración de una microviga en cantilever, empleando el método de Rayleigh-Ritz. En su tratado de teoría del sonido, Lord Rayleigh mostró que la frecuencia fundamental, calculada de una *forma supuesta de una curva de deflexión dinámica* de un sistema, podría ser igual o más alta que la verdadera frecuencia natural del sistema, más aún, si la forma asumida de la curva es una aproximación cercana de la verdadera (Jacobsen, 1958). La expresión de la energía potencial total es formulada y el patrón

de desplazamiento se asume que varía dentro de un conjunto finito de parámetros indeterminados (Zienkiewics. & Taylor., 1989). El principio de Rayleigh-Ritz establece que **“En el modo fundamental de vibración de un sistema elástico, la distribución de la energía cinética y potencial es tal que hace la frecuencia un mínimo”**. “Solamente es necesario obtener (por observación o intuición) una moderada y correcta representación de las amplitudes de vibración en el modo fundamental” (Church, 1963, Temple, 1993). El programa de Elemento Finito ANSYS® puede emplearse para comparar los resultados.

4.5.2. Objetivo

Se desean encontrar los valores de las frecuencias naturales y los modos de vibración de una microviga en cantilever MEMS, empleando el método de Rayleigh-Ritz, de forma similar a la que propone (Muthukumaran. *et al.*, 2002) y compararlo con el programa del Elemento Finito ANSYS®.

4.5.3. Desarrollo

Se comienza por asumir la condición geométrica de frontera de la microviga, que satisfaga su comportamiento como en (Genta, 1993) y como lo propone (Muthukumaran. *et al.*, 2002), en este caso se propone (4.12):

$$w(x) = c_1x^2 + c_2x^3 + c_3x^4 + \dots \quad (4.12)$$

En donde el orden del polinomio depende del número de frecuencias que se deseen obtener, los coeficientes c_i deben entonces calcularse. El promedio de las energías potencial y cinética en el sistema es constante, esto es (4.13):

$$T_{tot} + U_{tot} = c \quad (4.13)$$

Donde.

T_{tot} = Energía cinética total

U_{tot} = Energía potencial total

La energía cinética total T_{tot} de la microestructura se puede representar como (4.14):

$$T_{tot} = \frac{mL}{2} \int_0^1 (w')^2 dx \quad (4.14)$$

Donde w satisface la condición geométrica de frontera, m es la masa y L la longitud de la viga. La energía potencial total (4.15), esta compuesta de la energía potencial de la viga U_b más, si es que se desea considerar, la energía de deformación debida al esfuerzo residual U_σ

$$U_{tot} = U_b + U_\sigma \quad (4.15)$$

La energía potencial de la viga U_b se puede expresar como (4.16):

$$U_b = \frac{EI}{L^3} \int_0^1 \left(\ddot{w} \right)^2 dx \quad (4.16)$$

Donde E es el módulo de Young e I es el momento de inercia, si se deseara considerar en el análisis el efecto del esfuerzo residual, se puede aplicar la relación para la energía de deformación empleada por (Muthukumarán. *et al.*, 2002), con (4.17). Donde N es el número de vigas en el sistema y W es el ancho, con una sola viga la relación se convierte en (4.18), donde Rv es la fuerza vertical de corte debida al esfuerzo residual, pudiéndose estimar por (4.19), entonces la energía potencial total queda como en (4.20). Al considerar las constantes fuera de la integral, la ecuación resultante es (4.21). Con estas ecuaciones se puede construir un problema de eigenvalores de la forma (4.22):

$$U_\sigma = NW \int_0^1 Rvh dy(x) dx \quad (4.17)$$

$$U_\sigma = W \int_0^1 Rvh dy(x) dx \quad (4.18)$$

$$Rv = \sigma_d h w'' \quad (4.19)$$

$$U_{tot} = \left(\frac{EI}{L^2} \int_0^1 (\omega'')^2 dx \right) + \left(WL \int_0^1 \sigma_d \omega'' h^2 \omega dx \right) \quad (4.20)$$

$$U_{tot} = \left(\frac{EI}{L^2} \int_0^1 (\omega'')^2 dx \right) + Wh^2 \sigma_d L \int_0^1 \omega'' \omega dx \quad (4.21)$$

$$\left[\frac{\partial U_{tot}}{\partial c_i} \right] - \omega^2 \left[\frac{\partial T_{tot}}{\partial c_i} \right] = 0 \quad (4.22)$$

Donde c_i representa los coeficientes y ∂U_{tot} y ∂T_{tot} son las derivadas parciales de las energías potencial y cinética respectivamente, con respecto a cada coeficiente. Por ejemplo, se pueden

proponer cinco eigenvalores y una matriz cuadrada de eigenvectores se obtienen, para los cinco primeros modos de vibración y para las cinco primeras frecuencias naturales. La raíz cuadrada de cada eigenvalor representa la frecuencia natural correspondiente y cada columna de eigenvectores representa los coeficientes c_i , que serán sustituidos en la ecuación inicial propuesta, la primera columna para la primera frecuencia natural, la segunda columna para la segunda frecuencia natural y así sucesivamente. Cada coeficiente será sustituido en la condición geométrica de frontera w y se graficará con respecto a la longitud normalizada x .

Para encontrar la solución con valores numéricos, se generó un programa de cómputo que sigue una secuencia que va, desde el establecimiento de las condiciones iniciales del problema, hasta la solución final y gráficas. Se pueden organizar los pasos del algoritmo de la siguiente manera:

- a) Inicio: Se comienza por limpiar todas las variables que pudieron haber sido utilizadas anteriormente, para evitar acarrear algún valor no deseado.
- b) Declaración de variables simbólicas: Se declaran todas las variables que formarán las ecuaciones y que además serán objeto de manipulación matemática, como el caso de las derivadas ordinarias y derivadas parciales.
- c) Establecimiento de los valores geométricos: Se establecen las dimensiones geométricas de la microviga, para permitir una programación parametrizada. Esto permitirá al usuario calcular vigas de diferentes tamaños o de diferentes secciones transversales.
- d) Establecimiento de las propiedades mecánicas del material: Esto involucra el Módulo de Young, la relación de Poisson y la densidad del material. En este caso se consideran microvigas de Si y sólo se toman los parámetros principales, aunque el tema de las propiedades mecánicas de materiales y sus cambios después de someterse a procesos de fabricación, llegan a ser mucho más complejos.
- e) Cálculo del momento de inercia: Se establece la ecuación para calcular el momento de inercia.
- f) Establecimiento del polinomio de aproximación.

-
-
- g) Cálculo de la segunda derivada del polinomio de aproximación, con respecto a la longitud ℓ , de la microviga.
- h) Establecimiento de la ecuación de energía potencial U de la microviga: En este caso, la energía potencial corresponde a la energía de deformación, involucrando el Módulo de Young y el momento de inercia de la microviga.
- i) Establecimiento de la ecuación de energía cinética T de la microviga: este punto involucra los términos de l , e , a y ρ , que corresponden a la longitud, espesor y ancho de la estructura considerada y densidad del material con que se desea analizar.
- j) Cálculo de las derivadas parciales de la energía potencial, con respecto a las constantes del polinomio de aproximación.
- k) Cálculo de las derivadas parciales de la energía cinética, con respecto a las constantes del polinomio de aproximación.
- l) Conversión de las variables simbólicas a numéricas: Una vez calculadas todas las ecuaciones requeridas, estas se convierten a variables numéricas, lo que permite sustituir los parámetros de los puntos c y d.
- m) Generación y solución del problema de eigenvalores: Con los elementos obtenidos en los puntos anteriores, se genera un problema de eigenvalores.
- n) Cálculo de las raíces cuadradas de los eigenvalores: Se calculan las raíces cuadradas de los eigenvalores obtenidos λ , ya que corresponden al valor de las frecuencias naturales que se desea encontrar.
- o) Sustitución de los valores de los eigenvectores en el polinomio de aproximación: En este punto se sustituyen las constantes c_i en la ecuación de aproximación, obteniéndose el modo de vibración que se desea encontrar.

p) Evaluación gráfica del polinomio de aproximación: En este paso se grafican las ecuaciones del punto, con respecto a la descriptiva de la microviga y se muestran los resultados en la pantalla de la computadora. La figura 4.7, muestra el diagrama de flujo.

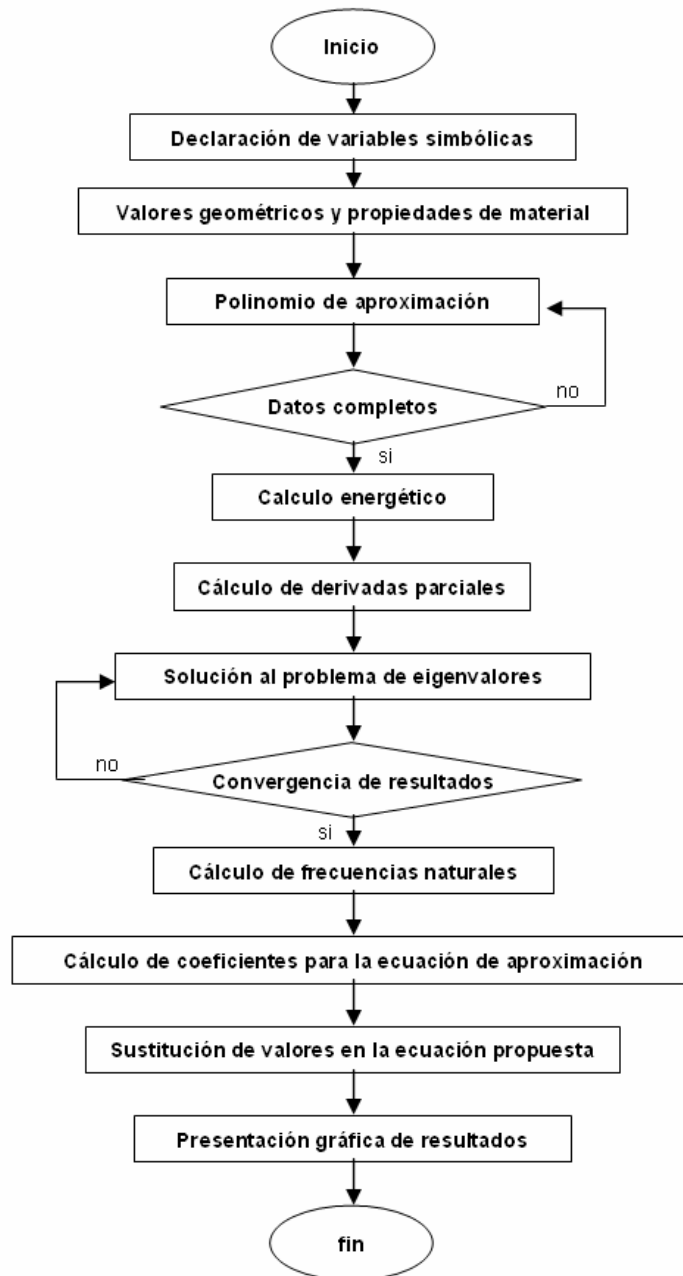


Figura 4.7. Diagrama de flujo

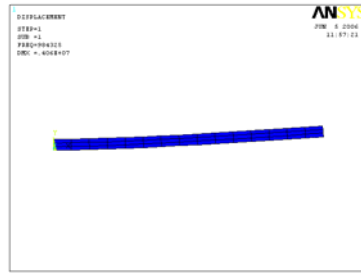
4.5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La tabla 4.2, muestra los resultados obtenidos para los valores de las cuatro primeras frecuencias naturales de la microviga, así como la comparación con el método de solución directa, para una viga corta de 50, 5 y 2 μm , correspondientes a largo, ancho y espesor.

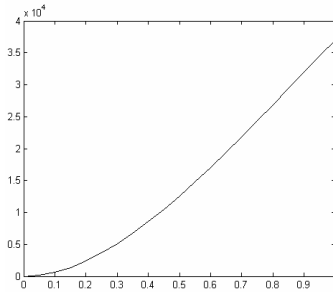
Tabla 4.2. Comparación de resultados en Hz.

<i>Frecuencia Natural</i>	<i>Método directo</i>	<i>Algoritmo</i>	<i>ANSYS</i>
<i>1ra</i>	<i>9.807e+005</i>	<i>9.8074e+005</i>	<i>9.8433E+05</i>
<i>2da</i>	<i>6.199e+006</i>	<i>6.1998e+006</i>	<i>6.3143E+06</i>
<i>3ra</i>	<i>1.7204e+007</i>	<i>1.7634e+007</i>	<i>1.8083E+07</i>
<i>4ta</i>	<i>3.371e+007</i>	<i>3.2944e+007</i>	<i>3.6356E+07</i>

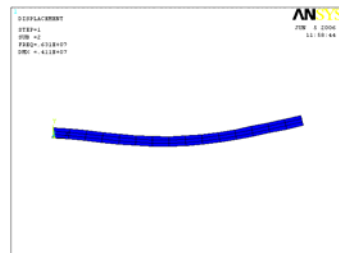
Los resultados presentan los valores de las frecuencias naturales de microviga, de la uno a la cuatro. Las propiedades del material empleadas en el modelado numérico son las mismas que las empleadas en el algoritmo de programación. Las variantes en los valores obtenidos, se deben a que el método de Rayleigh-Ritz es un método que considera la energía total de la estructura, y propone la ecuación de solución en base a observación y estimación, en comparación con el Método del Elemento Finito, en el cual se considera la matriz de masas y la matriz de rigidez, dividiendo el continuo propuesto en un número finito de elementos. En el método de Rayleigh-Ritz, un grupo de ecuaciones simultáneas minimizan la energía potencial total, los desplazamientos se prescriben, por un conjunto de expresiones válidas a lo largo de toda la región, dando lugar a ecuaciones simultáneas cuya matriz de coeficientes se encuentra llena y no es diagonal. En el proceso del Elemento Finito, esta especificación es definida para cada elemento y cada parámetro nodal influencia solamente elementos adyacentes y por lo tanto se encuentra una matriz de coeficientes escasa y diagonal. El proceso de Rayleigh-Ritz, se limita a formas geométricas relativamente simples de la región total y ésta limitante, en el Método del Elemento Finito, sólo ocurre dentro del elemento mismo, por lo tanto, en este caso, se pueden ensamblar configuraciones realistas complejas, a partir de elementos de formas simples (Zienkiewics. & Taylor., 1989). La figura 4.8, muestra la representación gráfica de los modos de vibración de las primeras cuatro frecuencias, se observa que siguen el comportamiento propuesto por el polinomio de aproximación. En la figura 4.8 (a) y (b), se tiene el primer modo de vibración obtenido en ANSYS® y en MATLAB® respectivamente. En la (c) y (d) el segundo, en la (e) y (f), el tercero y en la (g) y (h) el cuarto, siguiendo el mismo orden.



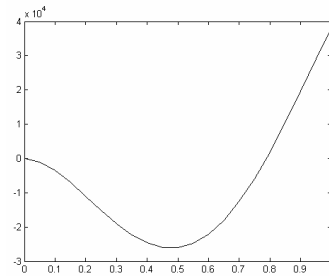
(a)



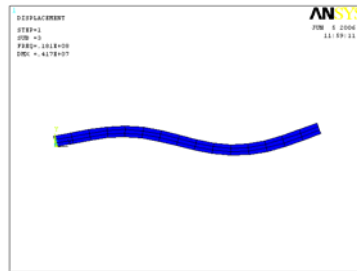
(b)



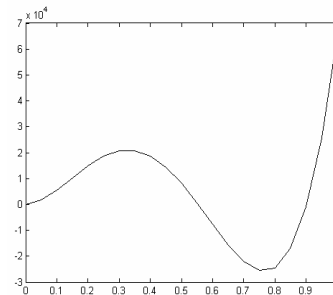
(c)



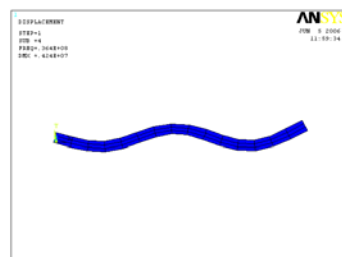
(d)



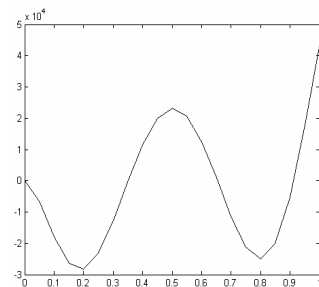
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 4.8. Modos de vibración de la microviga en cantilever para (a) Primer modo (MEF), (b) Primer modo (RR), (c) Segundo modo (ANSYS®), (d) Segundo (RR), (e) Tercer modo (ANSYS®), (f) Tercer modo (RR), (g) Cuarto modo (ANSYS®) y (h) Cuarto modo (RR).

El algoritmo propuesto permite realizar el cambio de la ecuación de aproximación, ampliar el número de constantes c_i y las dimensiones de la geometría de la estructura. Debido a la parametrización en la toma de datos, la sección transversal de la viga puede cambiarse como se desee, al igual que el tipo de material, aunque se pueden encontrar variaciones en los resultados, al cambiar estos valores como la densidad del material.

En la actualidad es común emplear dos métodos para determinar las frecuencias naturales en vigas; el método de formulación directa y el Método del Elemento Finito. Extrapolando estas metodologías a la escala MEMS, la metodología de formulación directa emplea la relación (4.23) (Rao, 1995):

$$\omega = \eta \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (4.23)$$

Donde; el valor de η depende de la frecuencia que se desea obtener, en este caso para la primera frecuencia, el valor que se considera es de 3.5171. La metodología del elemento finito, para este caso considera que el material es lineal, isotrópico y homogéneo (idealizado) y se puede tomar la formulación de Block Lanczos (ANSYS, 2006), empleado para resolver problemas de eigenvalores simétricos.

Los valores de frecuencia de una microviga comercial de 125 μm de largo, 35 de ancho y un espesor de 4.5 μm se obtienen resolviendo para cada caso. Se aprecia una diferencia que tiene que ver con la densidad del material, como lo muestra la figura 4.9. Como se aprecia en la figura, los métodos presentan una variación. Estas curvas características de frecuencia, corresponden cualitativamente en su distribución a lo largo del espectro de las densidades, sin embargo cuantitativamente existe una diferencia. No teniendo otros parámetros para la validación de esta comparación numérica, la investigación plantea el desarrollo de un modelo energético, basado en el planteamiento de Rayleigh-Rytz mostrado en la sección 4.5. La formulación planteada se basa en la energía total del sistema y da lugar a la solución de un problema de eigenvalores, característico de los modos de vibración del sistema. Basados en esta formulación, se obtiene una nueva curva característica que relaciona a la frecuencia con la densidad. Como se aprecia en la figura 4.10, ésta nueva curva, corresponde cualitativamente a los métodos directo y MEF, y

cuantitativamente por observación corresponde aproximadamente al promedio de las dos formulaciones anteriores.

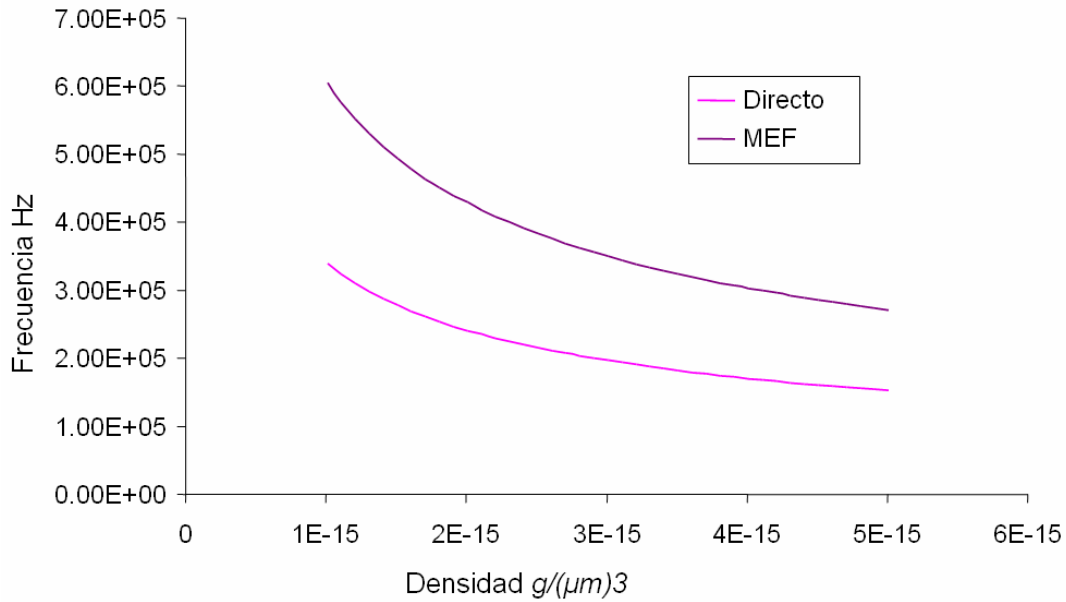


Figura 4.9. Frecuencia natural de la microviga, dependiente de la densidad del material de construcción, método directo y MEF.

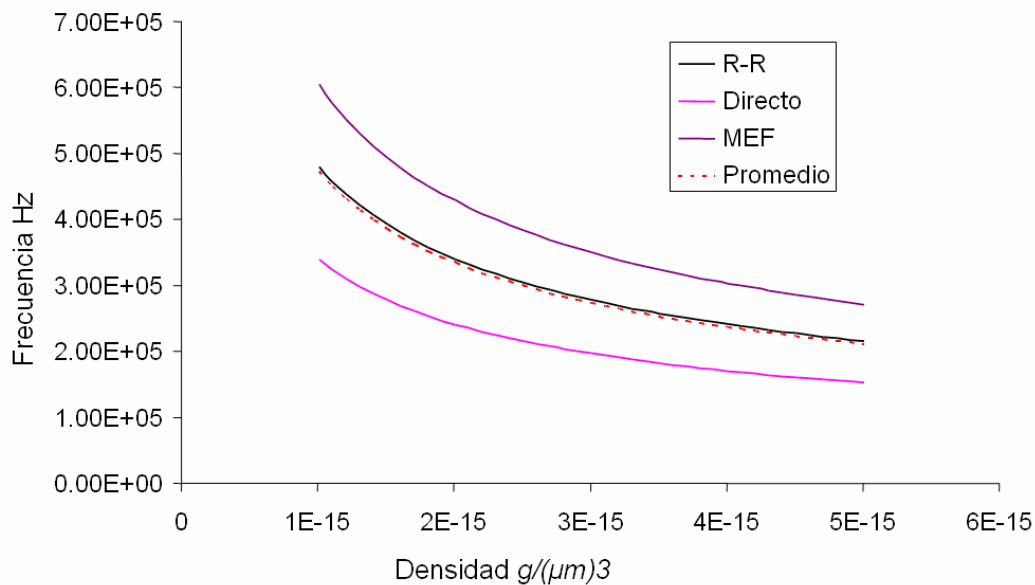


Figura 4.10. Frecuencia natural de la microviga, dependiente de la densidad del material de construcción, comparado con el método Rayleigh-Rytz.

Lo anterior, permite establecer que la formulación propuesta está dentro de los rangos que establecen las dos metodologías usadas anteriormente. La figura 4.11, muestra el análisis

realizado para una amplia gama de densidades, que se pueden relacionar o asociar a diferentes materiales. Se observa que el comportamiento del algoritmo semeja el comportamiento de los dos métodos anteriores

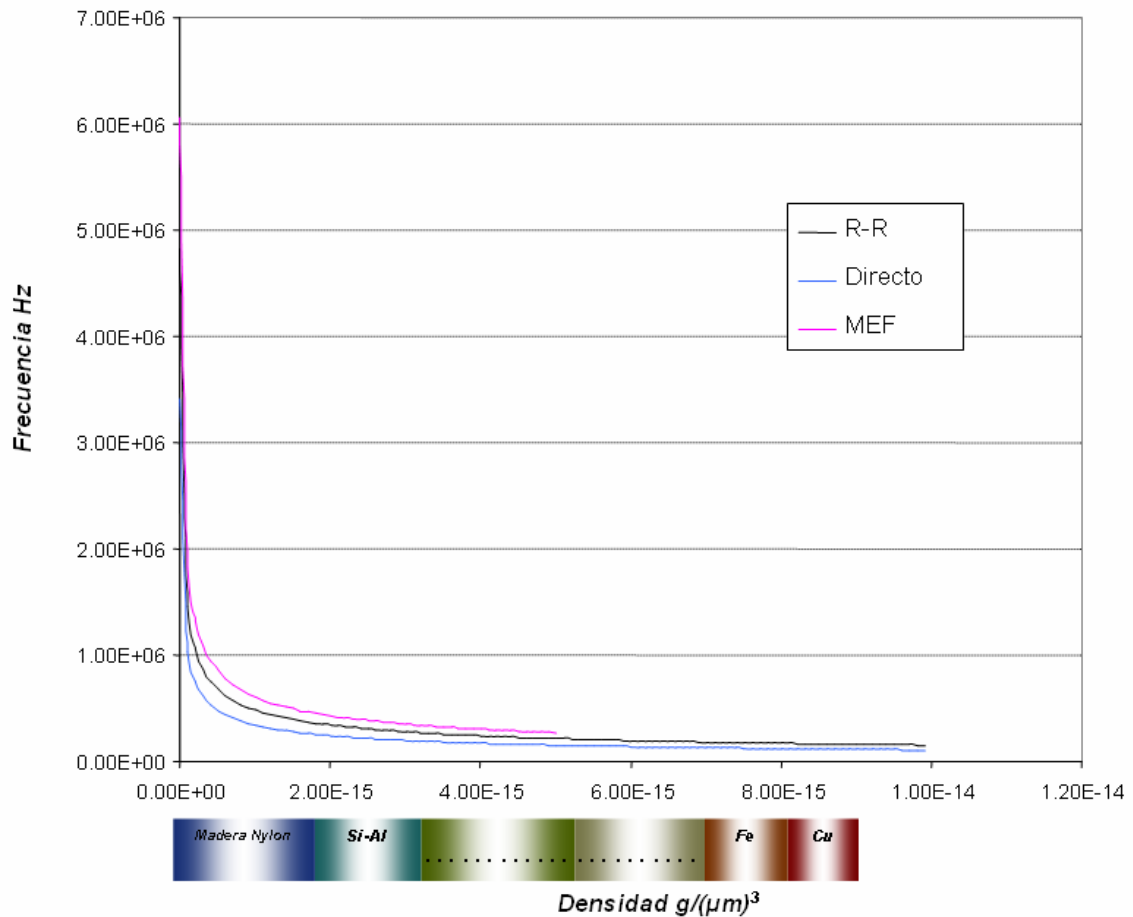


Figura 4.11. Análisis para una amplia gama de densidades y el material relacionado.

Para este caso de estudio, el valor real de 315 KHz., se obtuvo mediante la prueba mostrada en la sección experimental de esta investigación en donde se detallan los materiales, equipos y procedimientos realizados en una microviga comercial.

4.6. ACTUACIÓN ELECTROSTÁTICA EMPLEANDO EL MODELADO NUMÉRICO

4.6.1. Descripción del Problema

La actuación electrostática también se puede modelar numéricamente por medio del programa ANSYS®, empleando la técnica de trabajo con campos acoplados. Esto quiere decir que se

puede construir un modelo compuesto por dos grupos. El primer grupo estará formado por el campo estructural del sistema, esto es todas las capas estructurales. El otro grupo estará compuesto por los elementos que conforman el ambiente electrostático, esto es el medio de transmisión y los electrodos conductores. Ambos conjuntos forman parte del mismo sistema y el programa los resolverá empleando el método de campos acoplados. En este método, se resuelve independientemente cada condición y al final se juntan estos resultados para obtener la solución final. En este caso los resultados de interés, tienen que ver con la máxima deflexión obtenida. La máxima deflexión se traduce en mayor ángulo de reflexión. Esto quiere decir que se pueden incluir más canales de transmisión, o más rangos de medición o mayor capacidad de actuación, etc.

4.6.2. Objetivo

Se desea realizar un modelo de elementos finitos en dos dimensiones, en el cual se considera una microviga de 200 μm de longitud, sometida a diferentes voltajes, aplicados por electrodos de diferentes longitudes, localizados por debajo de la microviga.

4.6.3. Desarrollo

Para la solución de este caso de estudio se consideraron las mismas propiedades del material que en los casos anteriores. En este caso se genera un modelo de elementos finitos en dos dimensiones, en el que se representa, tanto la geometría de la viga, como la posición del electrodo y el medio de transmisión. Por otro lado, se establecen las condiciones de frontera del sistema y se establecen los valores de voltaje aplicados entre la microviga y el electrodo. La microviga se encuentra restringida en uno de sus lados, que será el lado empotrado, donde sus nodos correspondientes no podrán moverse y la parte restante de la estructura es libre de poder moverse. Un programa de subrutina de ANSYS® llamado ESSOLV, acopla tanto al campo mecánico como al campo electrostático y encuentra la solución al problema. De esta forma se pueden conocer los valores de deflexión alcanzados por la microviga y observar los vectores de flujo eléctrico en el medio.

4.6.4. Análisis de Resultados

En este caso se consideró aplicar 30, 50, 80, 100, 120, 140 y 180 volts, para longitudes de electrodos de 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 260, 260, 270 y 300 μm , colocados por debajo de la microviga. Se puede observar que el programa no considera el efecto de

debilitamiento estructural observado en la sección 4.4. La figura 4.12, muestra la respuesta del sistema al ser aplicados diferentes niveles de voltaje.

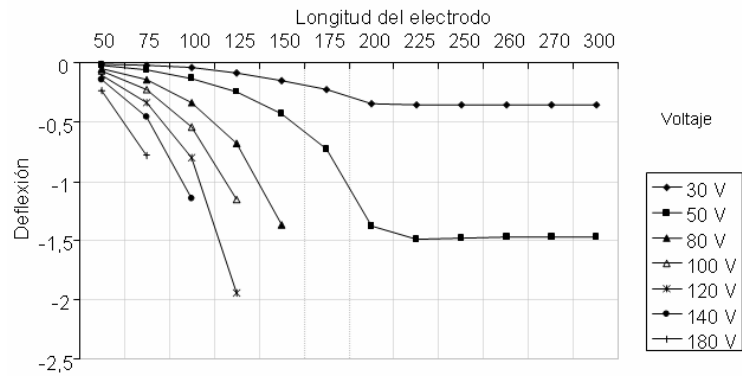


Figura 4.12. Longitud del electrodo, voltaje y deflexión de la microviga

Las figuras 4.13 (a) muestran los vectores de desplazamiento y la distribución del campo electromagnético del sistema, al aplicar el voltaje de trabajo, aplicando 30V con una longitud de electrodo de 200 μm y (b) aplicando 30V con una longitud de electrodo de 250 μm . Por otro lado, la figura 4.14 (a) muestra la distribución del campo electromagnético, al aplicar 50V con una longitud de electrodo de 225 μm y la figura (b) muestra también la distribución del campo electromagnético aplicando 50V pero con una longitud de electrodo de 200 μm

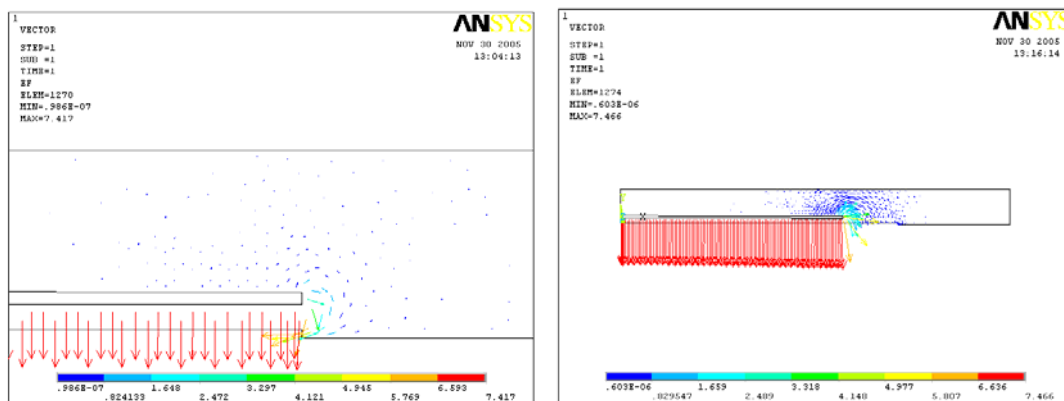


Figura 4.13. Vectores del campo electromagnético en $\text{V}/\mu\text{m}$, (a) aplicando 30V con una longitud de electrodo de 200 μm y (b) aplicando 30V con una longitud de electrodo de 250 μm

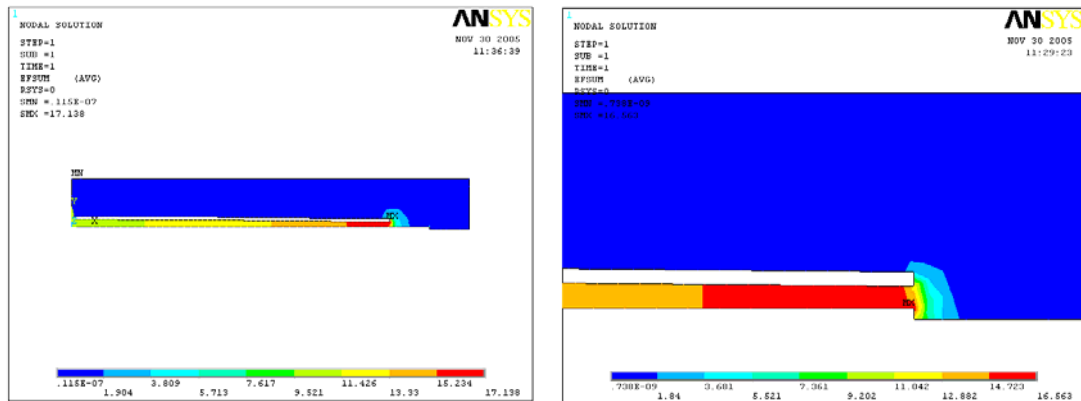


Figura 4.14. Distribución del campo electromagnético V/ μm , (a) aplicando 50V con una longitud de electrodo de 225 μm y (b) aplicando 50V con una longitud de electrodo de 200 μm

La ventaja de poder utilizar un programa parametrizado, es quien permite modelar el sistema con diferentes valores, por ejemplo, cambiar la magnitud del voltaje, la longitud del electrodo o de la microviga, lo que permite construir un problema nuevo y obtener su solución en unos cuantos segundos. También se observó que, si se sobrepasa 1/3 de la distancia del claro, la estructura puede llegar a cruzar el nivel de tierra y en ese caso el programa no converge a una solución.

4.7. MICROVIGA SIMPLEMENTE APOYADA

4.7.1. Descripción del Problema

En esta parte del estudio se consideró una estructura tridimensional de una microviga simplemente apoyada, que puede tener muchas aplicaciones tanto en MEMS como en sensores o actuadores. El estudio involucra el modelado numérico de la microestructura y considera tanto la parte estructural como la parte electrostática. Se considera el uso de un programa parametrizado, que permita el análisis en estructuras de diferentes longitudes y la aplicación de diferentes niveles de voltaje.

4.7.2. Objetivo

Se desea realizar un modelo de elementos finitos en tres dimensiones, en el cual se considera una microviga simplemente apoyada de diferentes longitudes y conocer su respuesta al ser sometida a diferentes magnitudes de voltaje, aplicados por un electrodo localizado por debajo de la microviga.

4.7.3. Desarrollo

El modelado del sistema propuesto está dividido en dos partes, en la primera se genera la representación del modelo estructural, que incluye únicamente a la estructura de la viga, sus propiedades mecánicas y sus condiciones frontera. Para las condiciones frontera de la estructura, se consideró que las caras transversales de ambos lados de la viga, se encontraban fijas, al no permitir que los nodos correspondientes a dichas caras, tuvieran traslaciones ni rotaciones en las direcciones nodales X, Y y Z. Las propiedades mecánicas de la capa estructural considerada se muestran en la tabla 4.3, obtenidas de (Guide, 2005).

Tabla 4.3. Propiedades de la capa estructural considerada

<i>Módulo de elasticidad</i>	$E = 169 \times 10^3 \text{ kg}/\mu\text{m s}^2$
<i>Relación de poisson</i>	0.066
<i>Densidad</i>	$2.329 \times 10^{-15} \text{ kg}/\mu\text{m}^3$

Para la segunda parte del modelo, que es el medio electrostático, se considera que la permitividad del medio es de $8.854 \times 10^{-6} \text{ pF}/\mu\text{m}$. Estos valores pueden adecuarse en el caso de que la estructura no se fabrique en Si, sino en algún otro material, o que se trabaje en algún medio que tenga una permitividad distinta. También se incluye la aplicación del voltaje, en sus diferentes magnitudes, en este caso en incrementos de 10 hasta llegar a 120V. La figura 4.15, muestra una representación y una vista en isométrico de la microviga considerada y la posición del electrodo.

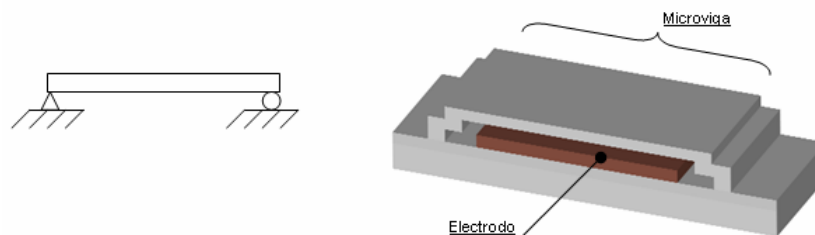


Figura 4.15. Representación y vista en isométrico de la microviga doblemente empotrada

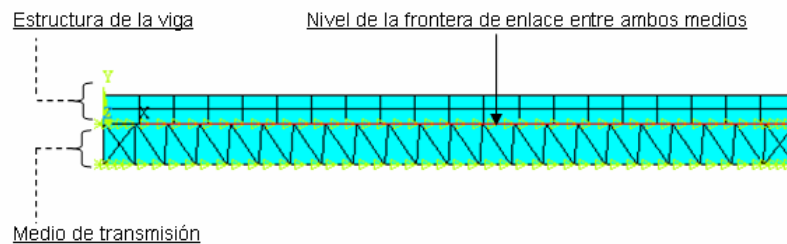


Figura 4.16. Frontera de acoplamiento

La distancia del claro que existe entre la cara superior del electrodo y la cara inferior de la microviga, se consideró de $2\mu\text{m}$, debido a que el mismo proceso de fabricación ya establece esta distancia. Los valores de su deflexión encontrarán un máximo desplazamiento en la parte central de la viga. La fuerza electrostática actúa uniformemente sobre la cara inferior de la viga y el valor de esta deflexión, tiende a cero a medida que se aproxima al empotramiento, inclusive, en el caso de que el electrodo sea de igual tamaño o mayor que el de la viga. Así, tenemos un comportamiento más complejo para describir la deflexión de la viga, ya que se pierde el paralelismo entre las placas, al estar presente el campo electrostático y producir la deflexión.

Ambos campos se encuentran unidos por una frontera nodal localizada en la superficie inferior de la estructura, representando el contacto con el medio de transmisión y la estructura. Esta frontera también desempeña la labor de mantener una diferencia de potencial con respecto al electrodo conectado a tierra. Al modelar tanto la parte estructural, como la parte electrostática, se declaran también los nodos superficiales que unen a ambos medios, como lo muestra la figura 4.16. En esta figura se muestra la distribución de ambos ambientes, siendo el rectángulo superior, la representación de la microviga y el rectángulo inferior el medio electrostático. La figura 4.17, muestra una vista en perspectiva de la zona de transición, donde se une la microviga con el aire. También muestra las áreas en las que se aplica el voltaje de actuación. El modelo cuenta con 601 nodos y 210 elementos, formados por un conjunto de elementos tipo brick 45 y un conjunto de elementos tipo solid 145, para la estructura y el medio respectivamente.

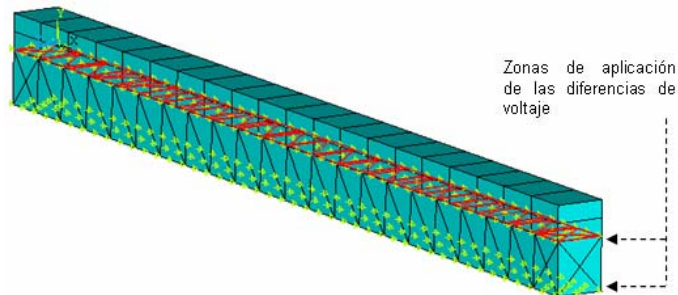


Figura 4.17. Voltaje entre el área inferior de la viga y el electrodo.

El programa de elemento finito, genera soluciones que son en primera instancia, almacenadas en una base de datos temporal, en este caso del campo electrostático que genera el conjunto de fuerzas electrostáticas. Estos resultados son leídos por el programa y son introducidos como cargas estáticas en el campo estructural. Al resolverse, generan una sucesión de puntos que, graficados adecuadamente, describen el comportamiento de la deflexión de la viga. De igual forma, los valores de los desplazamientos de la estructura son transmitidos de nuevo al campo electrostático, cerrando el ciclo de cálculo, y reiniciándolo hasta completar el número total de ciclos solicitados, en este caso 10. Se seleccionó el nodo localizado en el centro de la viga, en la superficie de su cara inferior, como nodo de observación, por ser en el que se presenta la deflexión más representativa, al encontrarse más alejado de los empotramientos. Siguiendo este ciclo, se realizaron cambios en la longitud de la viga, creando así incrementos en su longitud desde los $50\mu\text{m}$ hasta los $180\mu\text{m}$, y cambiando el ancho de la viga de 5, 10, 15 y $20\mu\text{m}$.

4.7.4. Análisis de Resultados

El comportamiento de la estructura presenta una deflexión máxima en la zona central de la viga, como se puede ver en la figura 4.18, la cual muestra la distribución de los vectores de desplazamiento. Esta deflexión tiende a ser muy pequeña cuando la viga tiene una longitud igual o menor a los $70\mu\text{m}$. Cuando la longitud de la viga es mayor a $70\mu\text{m}$, la deflexión comienza, alcanzándose la máxima al tener una viga de $180\mu\text{m}$. De ahí en adelante, se observa un incremento en la deflexión, limitado por el espaciamiento entre la microviga y el electrodo. En el caso de que se generara un contacto entre ambos elementos, se tendría un corto circuito, que calentaría la microestructura al grado de destruirla. Este evento podría, eventualmente, dañar el

circuito de control electrónico también. Aunque los circuitos electrónicos cuentan con protecciones, la existencia de este riesgo, indica que en el diseño podrían ser útiles, elementos estructurales extras que ayuden a evitar este riesgo. A esto, se agrega que los sistemas de manufactura integran ambas partes, tanto la mecánica como la electrónica en el mismo circuito integrado.

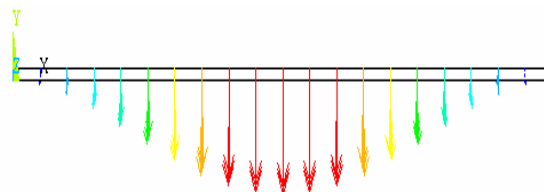


Figura 4.18. Vectores de desplazamiento de la microviga

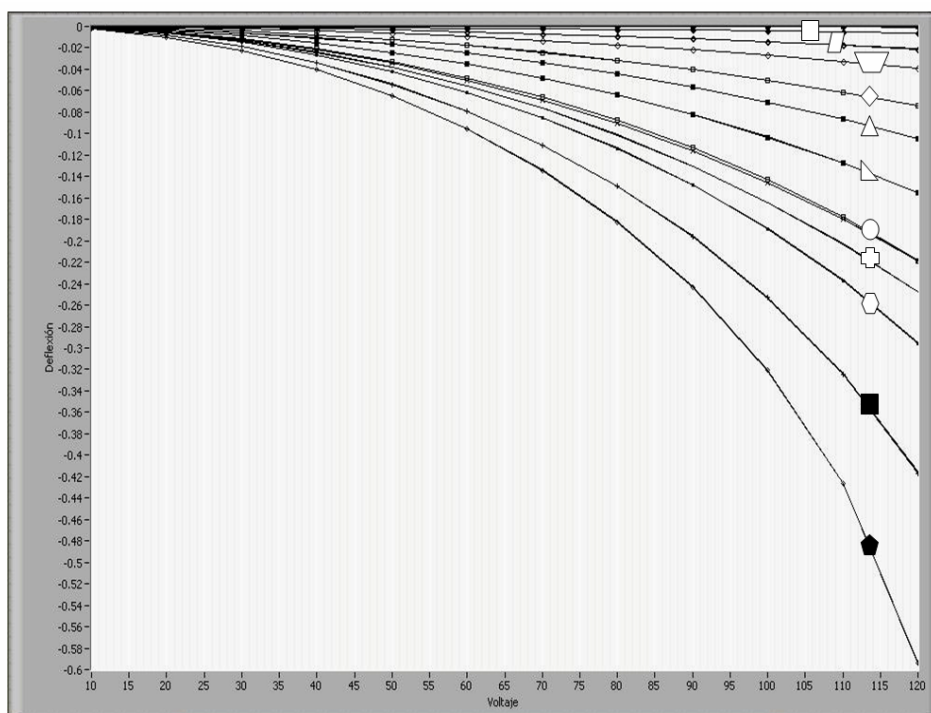













Figura 4.19. Desplazamientos máximos vs. voltaje

Para cada caso, se calcularon las soluciones correspondientes a distintos valores de voltaje de actuación, como lo muestra la figura 4.19, simulando lo que sería su forma de trabajo. Estos distintos voltajes se pueden aplicar por medio de un control electrónico que dosificaría, en forma periódica, la señal de voltaje. Los valores de las longitudes correspondientes a las curvas mostradas se indican en la tabla 4.4.

El análisis mostró que, cuando la microviga tiene una longitud menor a 70 μm . Su deflexión máxima es muy pequeña. También se mostró que, el cambio en el ancho de la viga no altera considerablemente los valores de deflexión para cada longitud de viga.

Por otro lado, cuando la longitud de la viga se incrementa, se corre el riesgo de hacer contacto con el electrodo, produciéndose un corto circuito al quedar directamente ambos polos en contacto. Se concluye también que el programa ANSYS® es una buena herramienta para poder resolver este tipo de problemas estructurales que combinan diferentes ambientes físicos.

Tabla 4.4. Valores de la deformación vs. voltaje

Curva	Longitud en μm
	80
	90
	100
	110
	120
	130
	140
	150
	160
	170
	180

4.8. MICROVIGA TRIANGULAR EN CANTILEVER

4.8.1. Desarrollo

La deflexión de esta microviga puede emplearse para desviar un haz de luz LÁSER, previamente reflejado sobre la cara superior de la microviga. Esta desviación o cambio en el ángulo de reflejo del haz, puede emplearse para direccionar una señal hacia receptores localizados en diferentes lugares y colocados sobre la microviga. Con este principio se han construido diferentes sensores y microactuadores. En esta parte del trabajo, se presenta el modelado numérico de una microviga en cantilever, con forma triangular, de 150 μm de largo y 50 μm de ancho en el empotramiento.

4.8.2. Objetivo

En este caso, el modelado numérico tridimensional tiene el objetivo de simular el comportamiento de la microestructura, al ser actuada electrostáticamente. Tiene un espesor de 2 μm , común en la tecnología planar. Debajo de esta microestructura, se localiza un electrodo que

tiene el propósito de conectar a tierra el circuito de control de la microviga. Se emplea un programa que, por medio del método del Elemento Finito, ayude a calcular la máxima deflexión que puede obtenerse en la microviga, al aplicar una corriente eléctrica.

4.8.3. Desarrollo

El problema plantea la solución de dos campos como en la sección 4.8, por un lado se tiene el campo estructural en el que se deben considerar las propiedades mecánicas del material estructural, esto es el módulo de Young, la relación de Poisson y la densidad del material, así como sus condiciones frontera. Por otro lado, se tiene el campo electrostático que involucra al medio de transmisión y los valores de la energía que se transmite por ese medio, además de sus propias condiciones frontera. Aunado a esto, se tienen las condiciones de acoplamiento donde las fuerzas electrostáticas causarán la deformación estructural, generando una nueva condición de espaciamiento y formando un ciclo de cálculo con cada incremento de voltaje. La figura 4.20, muestra la conformación general del sistema.

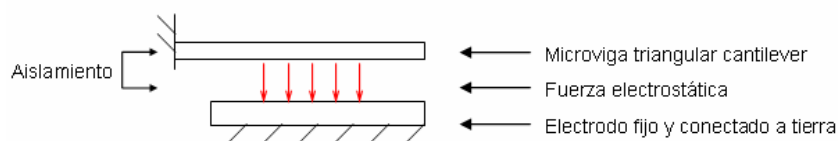


Figura 4.20. Posición del electrodo colocado debajo de la microviga

Con respecto a las dimensiones de la microviga, se consideraron $150\mu\text{m}$ de largo y $50\mu\text{m}$ de ancho en la base y un espesor de la estructura de $2\mu\text{m}$, como lo muestra la figura 4.21.

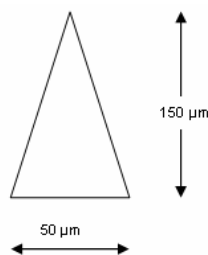


Figura 4.21. Vista superior de la microviga

La complejidad del problema radica en que la estructura no tiene una sección transversal uniforme, entonces, el área trasladada cambia a lo largo de la microviga, disminuyendo hasta

llegar a la punta. Otra parte del problema es que, la deflexión de la viga sigue una curvatura mayormente pronunciada en la punta, lo que produce que la distancia d , entre las placas, que no sea uniforme. Esto indica, que la fuerza F_{ele} cambia a lo largo de la viga y en cada instante en que se aumenta el voltaje, al igual que la curva de deformación. En la figura 4.22, se muestra la distribución de las capas estructurales que podrían emplearse en su fabricación, (a) Deposición de Poly 0, (b) Deposición de la capa de óxido, (c) Deposición de Poly 1 y (d) Remoción de la capa de sacrificio. En la figura 4.23 (a), se puede apreciar el modelo de elementos finitos resultante. Después de la discretización, el modelo quedó compuesto por 576 elementos que forman la parte estructural. Otros 861 elementos forman la parte electrostática del modelo. En total el modelo está compuesto de 1438 elementos. Sólo se modelaron las partes estructurales de interés, por ello se observa una diferencia con el modelo de la figura 4.22. En la figura 4.23 (b), se muestra un ejemplo de la fotomáscara que puede emplearse para la construcción de la microestructura.

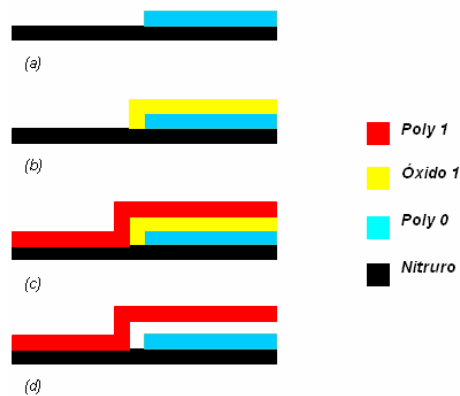


Figura 4.22. Identificación de las capas estructurales en el proceso de fabricación

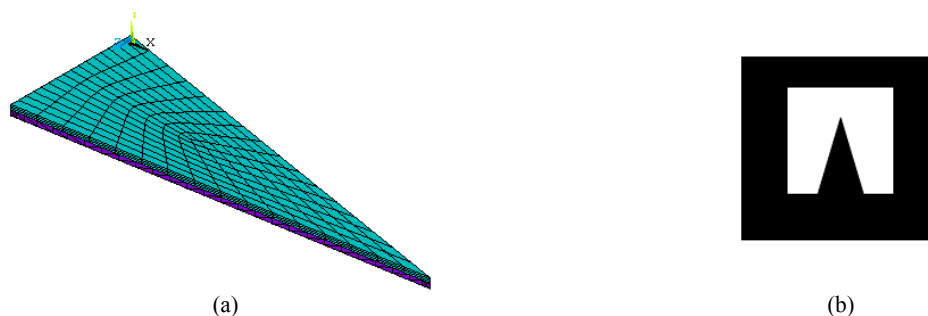


Figura 4.23. (a) Modelo de elementos finitos y (b) fotomáscara.

Con respecto a las propiedades mecánicas del material consideradas en el modelo, se tomaron las empleadas para el silicio (ANSYS, 2006) y se muestran en la tabla 4.3. Con respecto a las

condiciones de frontera, el modelo se restringió en diferentes zonas. Por un lado se tienen las restricciones de movimiento en el empotramiento. Los nodos de esta zona no presentarán desplazamientos ni rotaciones a lo largo de sus ejes nodales X, Y y Z. Los demás nodos del modelo se encuentran en libertad de moverse en todos sus grados de libertad. La parte del modelo que corresponde a la parte electrostática, también está formada por un volumen tipo triangular, localizado por debajo de la microviga. Las caras de dicho volumen, con excepción de la cara superior, se restringieron para que no se trasladaran a lo largo de la dirección nodal Z.

En la figura 4.24, se muestra en color rojo, un conjunto de líneas localizadas entre la parte estructural y el medio de transmisión. La definición de la zona de frontera entre el aire y la cara inferior de la estructura, debe definirse para cada elemento y está representada por estas líneas de color rojo. Existe un conjunto de nodos frontera para cada tipo de elemento. En este caso se tiene una frontera para la parte estructural y una frontera para la parte electrostática. Ambas fronteras se acoplan y transmiten las informaciones de la fuerza electrostática y valores de deflexión estructural a cada una. Los valores actualizan las condiciones de cálculo en cada ciclo, cambiando la distancia del claro con el electrodo a lo largo y ancho de la estructura. En la figura 4.25, se observan las marcas que indican los puntos en donde se aplicó el voltaje. En este caso, en cada uno de los nodos se aplican 50V. Estos nodos pertenecen a la parte del medio de transmisión, aunque se encuentren colocados al mismo nivel de los nodos que pertenecen al medio estructural, es decir a la cara inferior de la microviga.

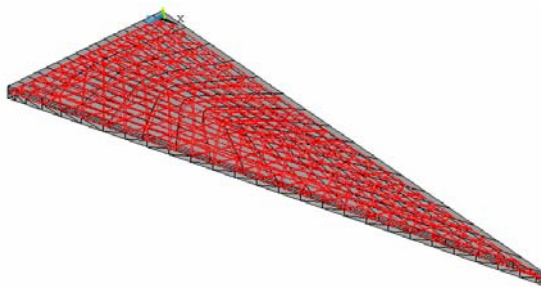


Figura 4.24. Conjunto de nodos frontera entre el medio estructural y el medio electrostático

En la solución del problema, se incrementará el valor del voltaje empezando en cero y hasta llegar a los 50V. Los nodos que representan el electrodo a tierra, se encuentran fijos y no pueden trasladarse ni rotar a lo largo de los ejes nodales X, Y y Z, y siempre tienen un voltaje igual a

ceros. Todas las condiciones de frontera mencionadas, conforman, como lo muestra la figura 4.26, el modelo completo y listo para resolver. Se observa un conjunto de marcas de diferentes tipos de colores, que ilustran todas las condiciones antes mencionadas.

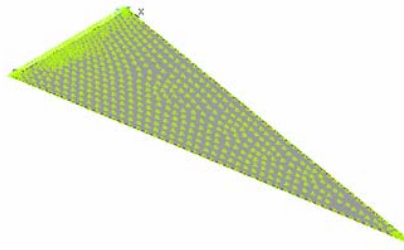


Figura 4.25. Aplicación del voltaje en el sistema

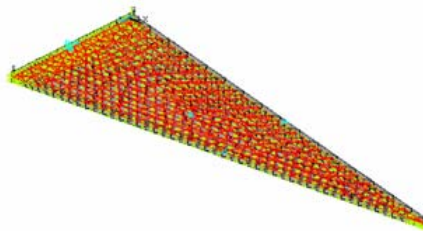


Figura 4.26. Condiciones frontera del sistema acoplado

4.8.4. Análisis de Resultados

Una vez obtenida la solución del problema, se procede a recabar los resultados con ayuda del post procesador de ANSYS®. En este post procesador se obtienen los valores de deformación máxima en la punta de la microviga. Se observó que el máximo valor de deflexión, obtenido al aplicar los 50V, fue de $0.841578\mu\text{m}$, como lo muestra la figura 4.27, en donde el color rojo muestra la zona que sufre la mayor deflexión. En la parte inferior de la imagen se muestran los valores, en colores, de la deflexión.

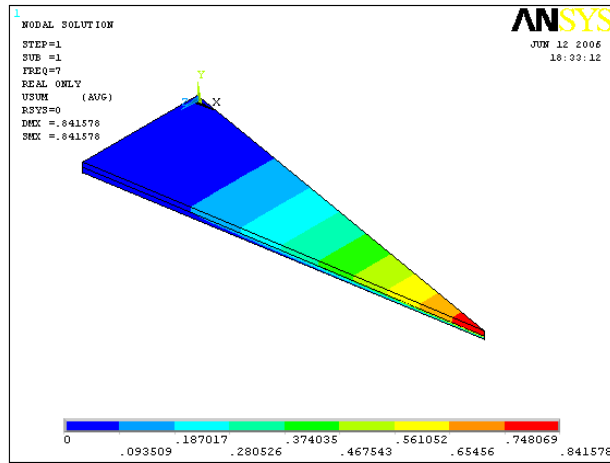


Figura 4.27. Vista en isométrico de la microviga, mostrando una máxima deformación en la punta con un valor de $0.81578\mu\text{m}$.

En la figura 4.28, se observa el valor del esfuerzo máximo a tensión, que se presenta con un valor de 22.6 Pa en el empotramiento, este es inferior al límite de cedencia del silicio de 7 GPa.

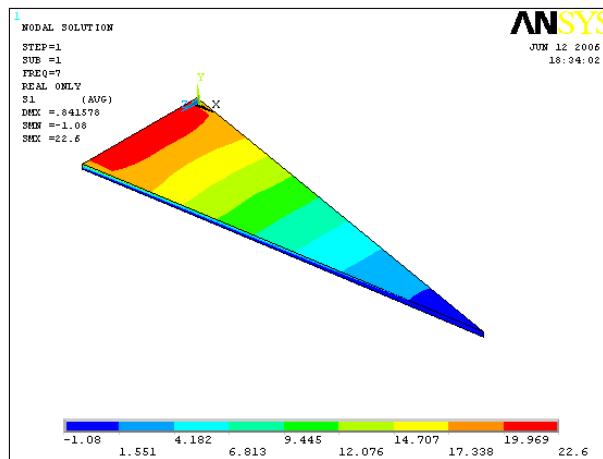
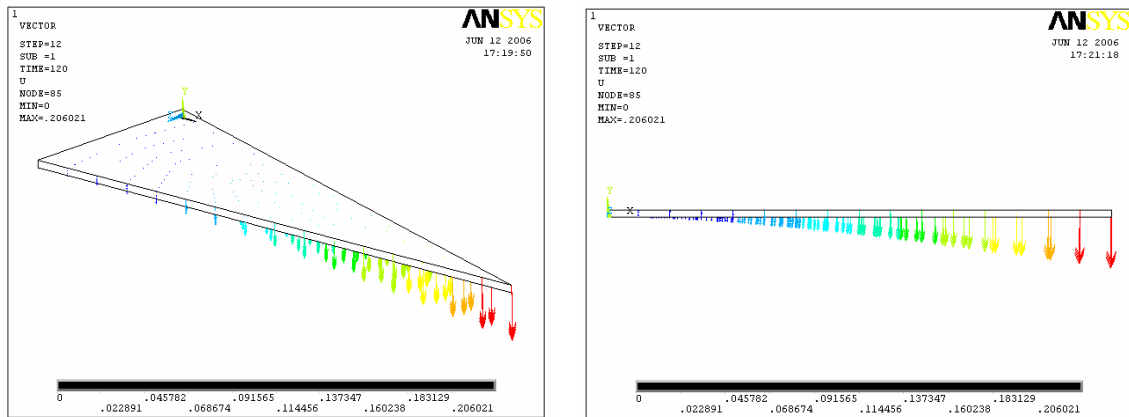


Figura 4.28. Vista en isométrico de la microviga, con un esfuerzo máximo de 22.6 Pa.

En la figura 4.29 (a), se observa una vista en isométrico de la microestructura, mostrando los desplazamientos vectoriales, con el mayor desplazamiento en la punta. En este caso, al aplicarse 30V, se obtiene un desplazamiento de $0.206021\mu\text{m}$. En la figura 4.29 (b), se observa una vista lateral.



(a)

(b)

Figura 4.29. Desplazamientos vectoriales de la deflexión de la microviga bajo la influencia de un voltaje de 30V, (a) vista isométrica y (b) lateral.

Al registrar todos los valores de desplazamiento en la punta de la microviga, correspondientes a todos los valores de voltaje desde 0V hasta 30V, se obtiene la gráfica de deflexión contra voltaje. Se observa claramente que el comportamiento no es lineal como lo muestra la figura 4.30. En la figura 4.31, se observa un comportamiento similar al aplicar un voltaje desde 0 hasta 50V. Se observa una correspondencia a los 30V en ambas gráficas.

Más allá de los 50V, la solución ya no converge debido a que se alcanza un contacto entre la microviga y el electrodo. Este contacto produce, inmediatamente, un corto circuito que en la estructura real podría traducirse en una quemadura o un daño irreparable en la microviga.

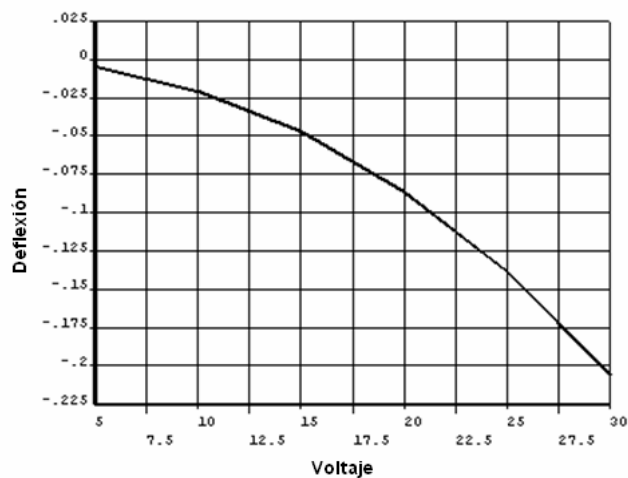


Figura 4.30. Desplazamiento de la punta de la microviga al aplicar de 0 a 30V.

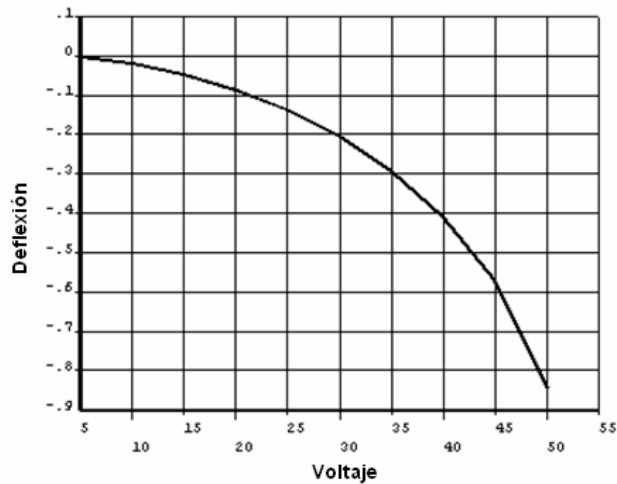


Figura 4.31. Desplazamiento de la punta de la microviga al aplicar de 0 a 50V.

Se observó que la deflexión en la punta de la microviga, a medida que se va aumentando el voltaje de entrada, presenta un comportamiento no lineal. También se observó que la técnica de solución empleada, es adecuada y ayuda a simular el comportamiento estructural bajo las condiciones de carga solicitadas.

Bajo dos condiciones de carga de 0 a 30V y de 0 a 50V, se encuentran comportamientos similares, obteniendo el mismo valor de deflexión a 30V de $0.206021\mu\text{m}$. Repitiendo el análisis a 60V, la solución ya no converge, lo que se atribuye a un contacto de la microviga con el electrodo, creando un corto circuito. La generación del modelo requiere de diferentes pasos y realizados estos correctamente, pueden dar como resultado una gran cantidad de información que puede ser de mucha utilidad para el diseñador. Se debe tener cuidado al seleccionar las superficies de transición de frontera ya que una de ellas debe pertenecer a la parte estructural y la otra al medio de transmisión y se encuentran ambas en la misma posición y tienen el mismo tamaño. Para este análisis, éstas fueron las condiciones geométricas consideradas, pero en otros modelos puede haber variaciones.

4.9. DISCUSIÓN

En este capítulo se trató la modelación numérica de los sistemas MEMS. Su complejidad se debe a que, los Sistemas-Micro-Electro-Mecánicos trabajan tanto en el ámbito mecánico-estructural, como en la parte electrostática. La adecuada modelación de las condiciones frontera es un punto

clave para poder obtener los resultados requeridos. El programa de Elemento Finito empleado en este estudio, cuenta con una subrutina que tiene la capacidad de calcular, con su algoritmo, las fuerzas electrostáticas que se generan al aplicar un voltaje entre el substrato de tierra y la capa estructural. Después de obtener estos resultados, la misma subrutina es capaz de transferir las fuerzas electrostáticas equivalentes y aplicarlas a la capa estructural mecánica, para obtener la deformación de la pieza.

La forma de programación por instrucciones o comandos, es más eficiente para poder resolver este tipo de problemas. El número de pasos y la complejidad de manipular modelos en tercera dimensión, dificultan la velocidad del trabajo. Debido a ello se recomienda construir un programa empleando instrucciones que ahorran bastantes horas de cómputo. Otra de las ventajas de trabajar con programación estructurada, es que permite resolver el problema en unos cuantos minutos, en comparación con el llamado método guiado. Esto representa aproximadamente la reducción de un trabajo de 45 minutos a 1 minuto. Con ello se puede resolver, en una hora, una cantidad considerable de problemas. La programación permite modificar dimensiones en el modelo. Por ejemplo, en el caso de una micro viga, las longitudes, espesores, anchos y hasta propiedades de material pueden cambiarse rápidamente.

Combinando la velocidad de cálculo con la parametrización, se puede estimar el comportamiento de una microestructura MEMS y los datos obtenidos de esta manera, se pueden emplear para establecer sus dimensiones antes de la etapa de manufactura. El MEF es una herramienta que va a ayudar a conocer el comportamiento real de la estructura. Los análisis experimentales correspondientes son indispensables para poder caracterizar por completo, el comportamiento de una microestructura. En el siguiente capítulo se presenta el trabajo experimental realizado a lo largo de esta investigación, esto incluye una descripción de los procedimientos experimentales que se llevaron a cabo, los equipos y los materiales utilizados. Las fotografías y gráficas resultantes de estos estudios se comentan y se muestran también en cada etapa.

5

TRABAJO EXPERIMENTAL

En esta etapa se muestran los resultados de los análisis experimentales desarrollados durante el transcurso de la investigación. Se incluyen fotografías, gráficas y micrografías que evidencian los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos.

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se muestran los resultados del trabajo experimental realizado en las instalaciones del *CONCAVE Research Centre* de la Universidad de CONCORDIA en Montreal Canadá, bajo la dirección de los doctores Ion Stiharu y M. Packirisamy. Los experimentos tienen el objetivo de dar a conocer las técnicas básicas empleadas para fabricar estructuras MEMS. El trabajo experimental, incluye la transferencia del patrón a una oblea de silicio, empleando técnicas de fotolitografía. Una vez enmascaradas las obleas, se expusieron a XeF_2 y se tomaron las micrografías correspondientes, empleando el Microscopio de Barrido Electrónico, lo que permite observar el resultado de este trabajo. También se efectuaron análisis de rugosidad de un conjunto de muestras degradadas con XeF_2 . Este análisis se realizó empleando un Microscopio de Fuerza Atómica y las imágenes y resultados de esta parte de la investigación también son mostradas en este capítulo. El equipo en que se realizaron los degradados así como las muestras analizadas, se encuentran en el CONCAVE y actualmente ya se trabaja en el diseño de un nuevo aparato para degradar, que será automatizado y controlado por computadora, para mejorar la capacidad y calidad de los degradados con XeF_2 . Este avance es extremadamente importante para poder liberar microestructuras, sobre todo las desarrolladas con tecnología CMOS. Los MEMS obtenidos con esta tecnología integran elementos micro-electrónicos adheridos a la estructura, que requieren de un post proceso para la liberación estructural. El degradado en estado gaseoso con XeF_2 , permite degradar y liberar la estructura, sin dañar a los circuitos micro-electrónicos.

5.2. DESARROLLO DE LOS EXPERIMENTOS

El trabajo experimental se dividió en varias etapas, en cada una de ellas se describe el experimento, se menciona el material y el equipo utilizado, al final de cada etapa se muestran los resultados obtenidos. Los procedimientos descritos pueden ayudar, en el futuro, a tener un punto de referencia con el cual implementar en México, un laboratorio MEMS, estos procedimientos pueden servir de base para la enseñanza académica de los múltiples procesos de manufactura MEMS.

5.3. Descripción de la Primera Etapa: Enmascaramiento

El objetivo de esta fase experimental involucra la cobertura de una oblea de silicio con líquido fotoresistivo. Empleando técnicas de fotolitografía, se esperan obtener patrones geométricos impresos sobre las obleas. Estos patrones servirán, en la segunda etapa, para proteger o exponer la muestra de silicio con XeF_2 , en algunas zonas definidas por la máscara. La tabla 5.1, muestra una lista del material y equipo requerido para el desarrollo experimental de esta etapa.

Tabla 5.1 Material y equipo para la primera etapa

Material	Equipo
Fotoreistencia	Plato caliente
Obleas de Silicio	Horno eléctrico
Acetona	Máquina para deposición por giro
Develador	Refrigerador
Hisopos de algodón (Cotonetes)	Mesa de trabajo
Guantes	Lavabo
Bata	Cuarto limpio
Cubre boca	Cuarto amarillo
Cubre cabello	Gas nitrógeno
Cubre calzado	Lámpara UV
Lentes protectores	Fuente de alimentación
Pinzas	
Escalímetro	
Botellas para recolectar químicos	
Hojas MSDS (Material Safety Data Sheet)	
Envases Petri	
Etiquetas adheribles	
Cuadernillo y pluma	
Papel servilleta o absorbente	
Fotomáscara	
Gotero	

5.3.1. Procedimiento para la Primera Etapa

Esta etapa comienza con el corte de las obleas, para ello se deben utilizar; guantes, lentes protectores y pinzas, se deben seguir los siguientes pasos:

- i. Identifique las caras de la oblea, algunas de ellas son más brillantes de un lado y más opacas del otro.
- ii. Sobre una superficie firme o mesa de trabajo, coloque la oblea sobre una hoja de papel servilleta.
- iii. Realice el corte de la muestra al tamaño deseado por el lado opaco, auxiliándose del escalímetro, como se describe en el capítulo dos sección 2.5.
- iv. Coloque la muestra en un envase Petri y recolecte los residuos con ayuda del papel servilleta, en un envase cerrado y etiquetado.

Varias muestras pueden cortarse a la vez, para tenerlas disponibles en futuros experimentos. Es conveniente también limpiarlas como se describe a continuación y colocarlas en envases Petri debidamente identificadas. Para la limpieza de las obleas se recomiendan los siguientes pasos:

- v. Sujete una muestra con las pinzas, cuidando de tocar únicamente las esquinas para no dañar el área central.
- vi. Sumerja las obleas en un recipiente con acetona y enjuague con agua destilada. Un hisopo de algodón puede ayudar a borrar huellas digitales y suciedad utilizándolo gentilmente sobre la superficie de la muestra.
- vii. Deje secar, el plato caliente a baja temperatura, asegurando el secado y preparando la muestra para la deposición de la fotoresistencia.

Una vez que se ha limpiado la muestra, se retira del plato caliente y se coloca en la máquina de deposición por giro. Las siguientes actividades se realizan dentro del cuarto amarillo, algunos detalles que se deben considerar son:

- viii. Utilice las pinzas y transpórtense las muestras tocando solamente las esquinas.
- ix. Levante la tapa de la máquina de deposición por giro, y colóquese la muestra en el centro, asegúrese de que la válvula de vacío este cerrada para que pueda centrar o ajústese a la posición de la muestra.
- x. Abra la válvula de vacío para fijar la muestra.
- xi. Cierre la tapa de la máquina y reiníciense los valores iniciales del cronómetro.

A continuación se preparan los goteros con fotoresistencia para la deposición. La máquina tiene un orificio en la parte superior por donde se dejarán caer las gotas de fotoresistencia, para esto:

- xii. Coloque el gotero justo sobre el orificio.
- xiii. Arranque la máquina poniendo atención al movimiento inicial del motor.
- xiv. Deje caer las gotas de fotoresistencia necesarias, dos o tres gotas serán suficientes para una muestra de aproximadamente 1cm^2 , pero esto varía dependiendo del espesor que se desee obtener y del tamaño de la muestra.

La aceleración de la máquina distribuirá uniformemente la fotoresistencia, si el tiempo o la velocidad son muy prolongados, habrá poca fotoresistencia en la parte central y si es muy corto, quedará en la parte central y no se cubrirá toda el área. De igual forma, esto sucederá si las gotas son muy abundantes o muy escasas.

Una vez realizada la deposición, se colocan las muestras en la plataforma de la fuente de luz UV, sobre la cual se coloca la fotomáscara, la cual, debe estar lo más cerca posible de la muestra. En algunos casos se colocan varias muestras bajo la fotomáscara que contiene un dibujo para cada muestra, así que una buena alineación es importante:

- xv. Una vez colocadas las muestras sobre las plataformas, encienda la fuente de alimentación y espere a que se cargue adecuadamente.
- xvi. Prepare su cronómetro para que la alarma suene en el tiempo correspondiente, por ejemplo a los 60 segundos.
- xvii. Cubra y proteja su vista, recorra la cortina de protección y colóquese de espaldas a la lámpara UV.
- xviii. Arranque el cronómetro, encienda el interruptor de la lámpara UV y espere a que pase el tiempo de exposición, protegiendo su vista.
- xix. *POR NINGÚN MOTIVO MIRE HACIA LA LÁMPARA UV DURANTE EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN YA QUE PUEDE CAUSAR CEGUERA.*
- xx. Cuando el tiempo haya transcurrido y la alarma de su cronómetro suene, apague el interruptor de la lámpara.
- xxi. Con las pinzas, retire cuidadosamente la muestra y sumérgala en un envase con líquido develador.
- xxii. Observe cuidadosamente la muestra, notará que la imagen deseada comienza a aparecer.
- xxiii. Una vez que esté listo el develado, enjuague con agua destilada y deje secar. El gas nitrógeno puede ayudar a secar rápidamente, antes de que se formen manchas por las

gotas. Colocar la muestra en el horno eléctrico por un tiempo, ayudará a endurecer la fotoresistencia.

Asegúrese de colocar su muestra en un envase Petri etiquetado y bien cerrado y coloque sus envases en un lugar seguro. Limpie el lugar y recolecte todos los químicos empleados en los recipientes de recolección, esto es, botellas de vidrio bien cerradas. Utilice un recipiente para cada sustancia. **Por ningún motivo mezcle las sustancias** y llame a una compañía recolectora para que retire los recipientes, nunca tire las sustancias al drenaje. Estas compañías recolectoras le brindarán soporte técnico, materiales y le ayudarán en caso de emergencias de derramamiento, fuego o ingestión de las sustancias. También le proveerán de las Hojas de Seguridad de Materiales (MSDS-*Material Safety Data Sheet*) de todas las sustancias que utilice. La figura 5.1, muestra una imagen de la geometría considerada para una de las fotomáscaras utilizadas.

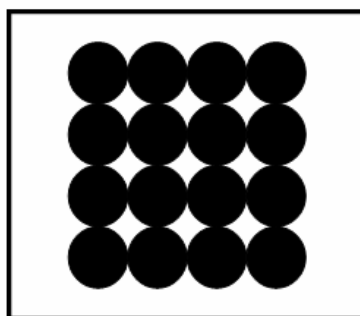


Figura 5.1. Fotomáscara empleada en el proceso de enmascaramiento

5.3.2. Resultados de la Primera Etapa

Dependiendo del tipo de oblea empleada, algunas quedan listas para la exposición al XeF_2 , después del procedimiento descrito, otras requieren de una inmersión previa en HF para descubrir por completo las zonas a degradar, como en el caso de las capas de SiO_2 . Las fotografías, tomadas desde un microscopio estereoscópico, muestran la forma final del proceso fotolitográfico. En la figura 5.2 a), se observa una forma circular en el centro de la imagen, esta es la zona descubierta y la zona que lo rodea, es la zona protegida. La zona intermedia es la frontera entre ambas y se muestran con más detalle, ejemplos de otras muestras en las figuras 5.2 b), c) y d). La variación de los tonos de colores se debe a la descomposición de la luz en la zona de transición, la intensidad de la iluminación y los ajustes de enfoque que se realizaron para poder tomar una fotografía clara y representativa.

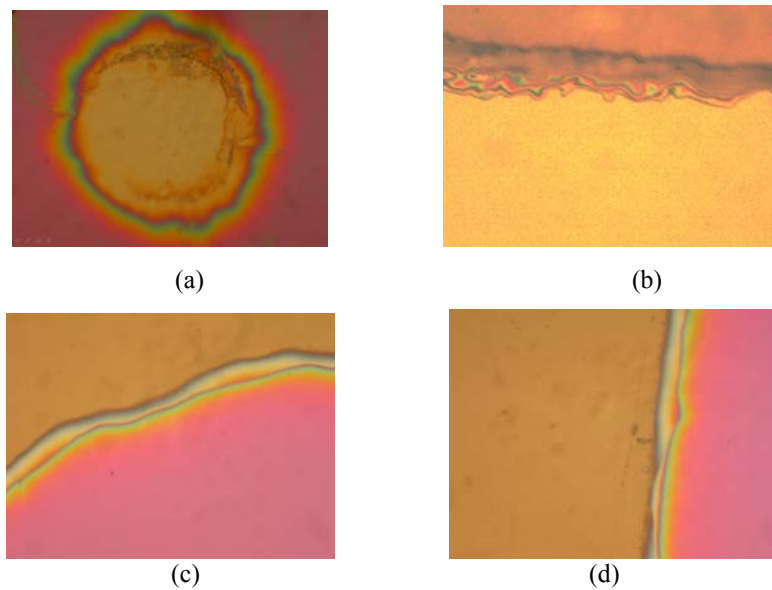


Figura 5.2. Fotografías resultado de los trabajos de fotolitografía sobre obleas de Si

En las imágenes puede observarse que existen irregularidades en el perfil transferido. Estas irregularidades, pueden mejorarse con equipos, materiales e instrumentos más sofisticados. Por ejemplo, existen filtros especiales para luz UV que además de filtrar una longitud de onda específica, proyectan una geometría muy definida, por medio de un conjunto de lentes especiales que eliminan cualquier difusividad entre luz y sombra.

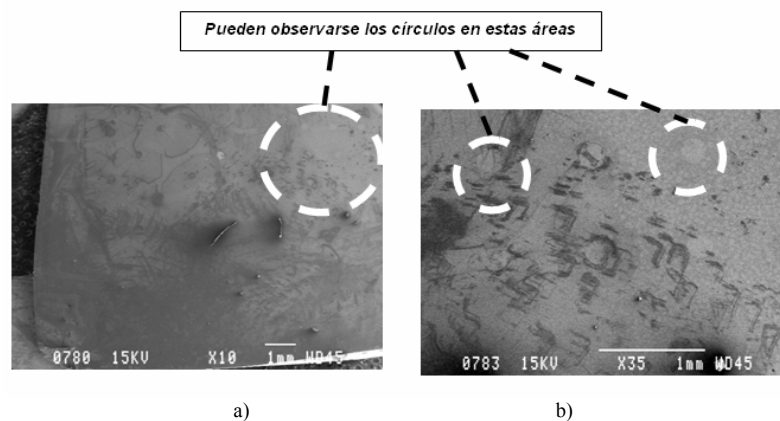


Figura 5.3. Microfotografías de las muestras enmascaradas

Existen también fuentes de alimentación que permiten una intensidad de luz invariante, plataformas especiales para las fotomáscaras, sistemas de alineación, etc. En la figura 5.3 a) y b), se aprecian las microfotografías de las zonas enmascaradas. Se observa un conjunto de círculos

pequeños en la superficie. Debido a la fotografía en blanco y negro, se debe observar con atención para poder distinguir los círculos transferidos. Un acercamiento a uno de los círculos se puede apreciar en la figura 5.4 a) y b).

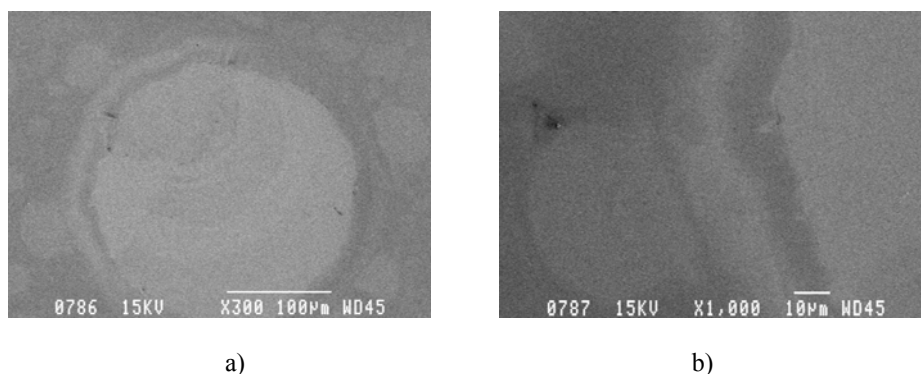


Figura 5.4. Micrografía de acercamiento a las muestras enmascaradas

5.4. Descripción de la Segunda Etapa: Degradado

El aparato para degradar con XeF_2 conforme lo han reportado varios autores (Hecht *et al.*, 1985, Hoffman *et al.*, 1995, Sugano & Tabata, 2002), consta básicamente de un recipiente donde se aloja el XeF_2 en estado sólido. Este recipiente se encuentra conectado a una cámara de degradado y ésta a su vez, a una bomba de vacío. La tabla 5.2, muestra una lista del material y equipo requerido para el desarrollo experimental de esta etapa.

Tabla 5.2. Material y equipo para la segunda etapa

Material	Equipo
Muestras enmascaradas	Aparato para degradar con XeF_2
Equipo de protección personal para trabajar con agentes altamente corrosivos	Campana de extracción
Soportes para muestras	

5.4.1. Procedimiento para la Segunda Etapa

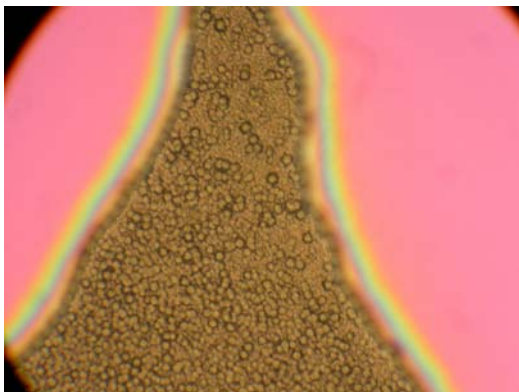
El degradado se realiza dentro de una cámara de vacío, donde previamente se encuentra la muestra de *Si*.

- i. Se genera una presión de vacío por medio de la bomba

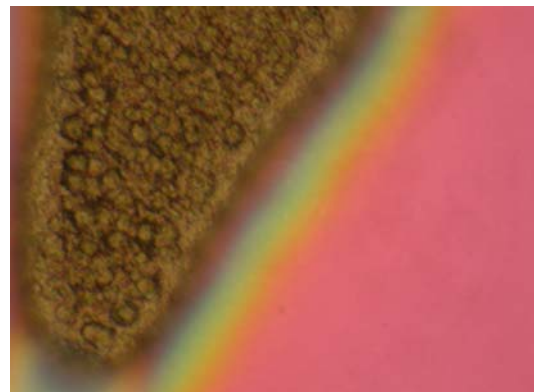
-
-
- ii. Una vez alcanzada esta presión (2.7 Pa) (Tea *et al.*, 1997), se abre la conexión con el XeF_2 en estado sólido.
 - iii. En ese instante el XeF_2 se convierte en un gas, que entra a la cámara y es entonces cuando comienza el degradado.
 - iv. La presión comienza a incrementarse (400 Pa), se cierra la conexión con el XeF_2 y se purga la cámara con gas Nitrógeno para detener la reacción.
 - v. Este proceso puede seguirse de manera simultánea, repitiendo los pasos y obteniendo una cantidad de degradado en cada etapa. Por ejemplo, 1 ó 5 μm por minuto, pero estos valores pueden variar dependiendo de los valores de presión que se alcancen o consideren, el tamaño de las cámaras, la antigüedad del XeF_2 almacenado, las dimensiones de las aperturas de ventana, etc.

5.4.2. Resultados de la Segunda Etapa

En la figura 5.5, a) y b), se aprecian dos fotografías de acercamiento que muestran, en color rosa, la zona protegida contra el ataque y en un color más oscuro se muestra la zona degradada. Esta es la apreciación que se tiene a simple vista del degradado con XeF_2 , se ven también los detalles de acabado de la etapa fotolitográfica, mostrando irregularidades en el contorno del círculo. Estos detalles se pueden apreciar mejor en las micrografías mostradas en la etapa siguiente, ya que el Microscopio de Barrido Electrónico permite obtener imágenes con mucho mayor detalle.



a)



b)

Figura 5.5. Fotografía obtenida en microscopio estereoscópico de las muestras degradadas

5.5. Descripción de la Tercera Etapa: Micrografías

En esta etapa se trasladaron las muestras degradadas al Microscopio de Barrido Electrónico. Este microscopio cambia totalmente la visión del mundo que se observa a simple vista. En él se pueden apreciar detalles de las muestras, en imágenes magnificadas más de 4000 veces, develando detalles que sería imposible detectar con los sentidos físicos. A continuación se describe el trabajo que se realizó en este equipo así como los resultados obtenidos.

Tabla 5.3. Material y equipo para la tercera etapa

Material	Equipo
Envase Petri	Microscopio de Barrido Electrónico
Obleas de Si	
Pinzas de acero inoxidable	
Cinta doble adherente conductiva de grafito marca 3M	
Porta muestras	

5.5.1. Procedimiento para la tercera Etapa

El procedimiento general para introducir las muestras en el microscopio se describe a continuación:

- i. En un porta muestras limpio, se coloca un trozo de cinta doble adherente que servirá para fijar la muestra.
- ii. Se retiran cuidadosamente las tapas del envase Petri que contienen a las muestras de Si.
- iii. Con las pinzas se transporta la muestra hacia la cinta doble adherente que fue previamente colocada en el porta muestras, cuidando de sujetar la muestras de la orilla para no dañar la zona de interés.
- iv. Una vez colocada en el porta muestra se recomienda utilizar un ligero soplido con un poco de aire limpio a presión para eliminar el polvo o residuos de impureza que pudiera tener la muestra.
- v. Una vez que la señal del microscopio indica que la presión de vacío se ha alcanzado se procede a introducir el porta muestra.
- vi. Con ayuda del monitor de la computadora se localizan las imágenes más adecuadas y la magnificación que permita obtener la micrografía más representativa.

-
-
- vii. Se deben cuidar detalles de iluminación y enfoque en la imagen y asegurarse de guardar en formato electrónico cada una de las imágenes.

Nota: Algunos Microscopios Electrónicos, no permiten la digitalización de la imagen y en lugar de ello toman la micrografía con papel fotográfico tipo Polaroid o en negativo para post develado. En este caso asegúrese de contar con material suficiente para obtener varias imágenes ya que pueden aparecer más detalles en la imagen que originalmente no se consideraba encontrar. Este procedimiento se llevó a cabo con las muestras degradadas en la segunda etapa y se obtuvieron diferentes imágenes.

5.5.2. Resultados de la Tercera Etapa

Con el microscopio de Barrido Electrónico, se obtuvo el conjunto de imágenes que se muestra a continuación. Puede apreciarse, en la figura 5.6. a), la distribución de las zonas circulares protegidas por el enmascaramiento. En este caso, los círculos se encuentran muy cerca, prácticamente tocándose. En la zona de contacto entre círculos, se pierde la terminación del círculo, situación que no sucede en las figuras b), c) y d), donde se consideró una separación entre cada uno de ellos. La influencia de esta separación no parece mejorar ni empeorar el acabado final del micromaquinado. Más bien se observan los errores provocados en el proceso de fotolitografía que no generó círculos perfectos, dejando muescas en el perfil de la figura. Estas imperfecciones se deben a la suma de las imperfecciones ocurridas en los diferentes pasos que se siguieron para llegar hasta esta etapa. Por ejemplo, al develar la imagen en la fotoresistencia, o en la misma impresión de la fotomáscara. Todos estos errores son imperceptibles al ojo humano ya que, a simple vista, no se aprecian, debido al reducido tamaño que tienen. Con respecto a la profundidad del degradado, se consideraron 10 pulsos y se observa uniformidad en la profundidad del escalón entre la superficie protegida y la superficie descubierta, siendo éste de aproximadamente 10 μm . Con respecto al procedimiento de corte, descrito en el capítulo dos de la sección 2.5, en la imagen 5.6. c), se puede apreciar la rectitud del corte realizado a mano. Se ve claramente que se obtuvo un ángulo recto en la esquina y que la linealidad del corte es constante no solo a lo largo de la muestra, si no también a lo ancho, sin presentar despostillamiento del cristal. En las siguientes figuras 5.7, se aprecian las micrografías obtenidas en la tercera etapa experimental, por un lado en a) la zona cóncava, y en las figuras b), c) y d) los contornos obtenidos de los círculos, conocidos como zonas convexas y en f) un acercamiento a la superficie degradada.

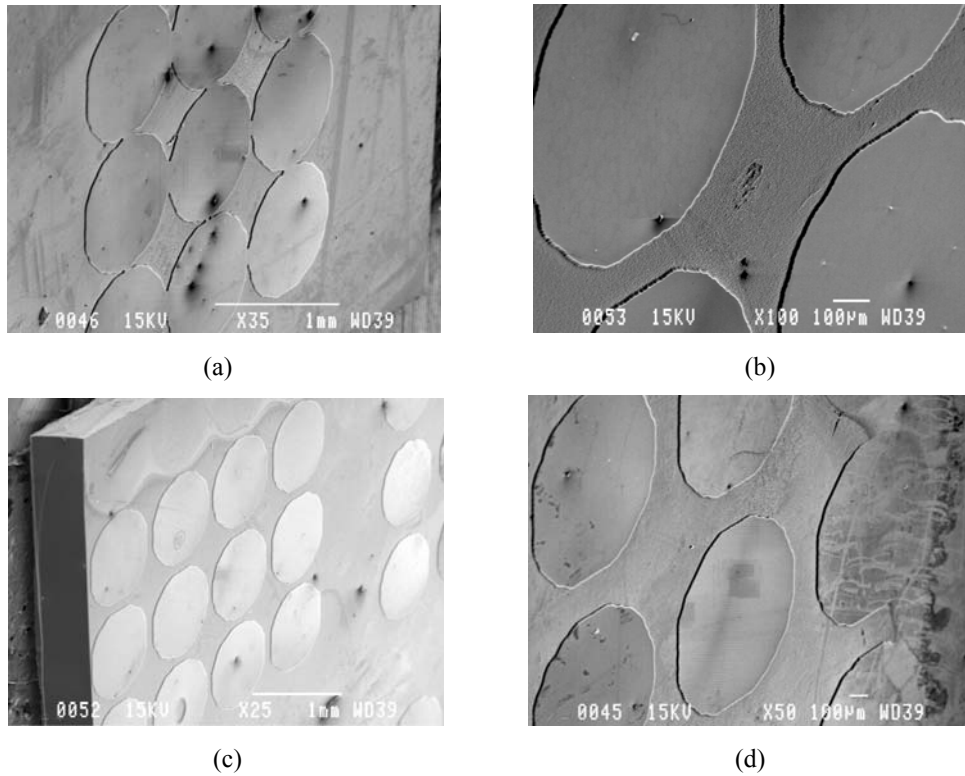


Figura 5.6. Microfotografías obtenidas en la tercera etapa experimental, mostrando la distribución de las zonas circulares protegidas por el enmascaramiento

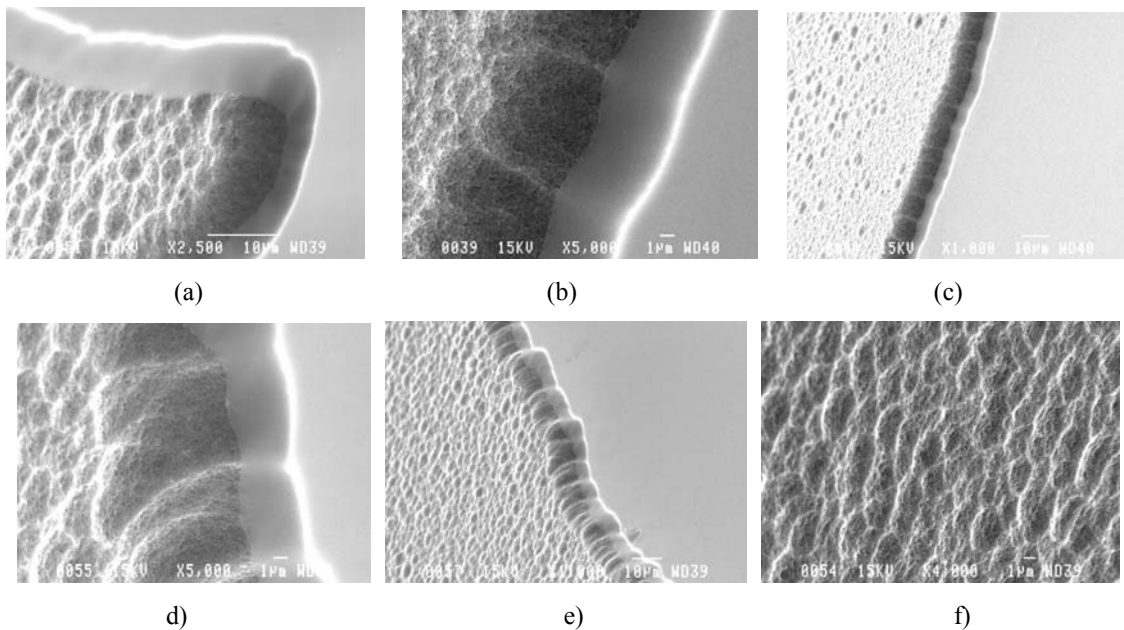


Figura 5.7. Micrografías obtenidas en la tercera etapa experimental, mostrando un acercamiento en a) la zona cóncava, b), c) y d) las zonas convexas y f) un acercamiento a la superficie degradada mostrando la rugosidad obtenida.

En la figuras 5.7. b) c) y d), también puede observarse un degradado por debajo de la zona protegida (*undercut*). Se aprecia que la protección se pliega hacia el material, develando la irregularidad del contorno que se generó. Lo más interesante de este pliegue es su distancia. En las imágenes se aprecia que en las zonas convexas, el pliegue alcanza prácticamente la mitad de la profundidad degradada. En las zonas cóncavas (figura 5.7. a) el pliegue tiene una longitud entre dos y tres micrómetros más larga, confirmando las observaciones de I. Stiharu y M. Packirisamy donde hacen notar la importancia del degradado en esquinas cóncavas y convexas.

5.6. Descripción de la Cuarta Etapa: Corte con LÁSER de Galio Sobre Silicio Enmascarado no Degradado con XeF_2

El FIB (*Focused Ion Beam*) o haz de iones concentrados, es una herramienta de tecnología avanzada, que puede enviar un haz de LÁSER de Galio y permite realizar cortes miniaturizados, prácticamente sobre cualquier material, inclusive con longitudes de corte en el rango de los nanómetros. Otra de las ventajas que tiene este tipo de micromaquinado, es que puede generar cortes verticales, permitiendo la construcción de geometrías con muros rectos. Aunque esto puede generarse también con degradados anisotrópicos, el FIB permite alcanzar, sin problemas, mayor profundidad de corte y la construcción de estos micromuros en cualquier dirección, sin importar la orientación cristalográfica del material, lo cual está limitado con el degradado anisotrópico. En este tipo de micromaquinados, se puede colocar la muestra con un ángulo de inclinación distinto a la horizontal o también se puede rotar la base de la muestra, estos cambios permiten generar cortes en diagonal, permitiendo la construcción de paredes en diagonal, escalón, etc. En esta etapa experimental se realizaron dos cortes iniciales sobre muestras de silicio, ya enmascarado, pero no degradado en XeF_2 . El FIB permite obtener las micrografías correspondientes para observar los resultados obtenidos. Al término de ellas se pueden proponer nuevas etapas experimentales y entre ellas comprobar la posibilidad de poder combinar la técnica de degradado volumétrico con la técnica de corte con LÁSER. El FIB puede enviar LÁSER de diferentes magnitudes, con un consumo de nanoamperes y aceleraciones en el rango de los 30K eV. En esta prueba se observará si efectivamente el haz puede cortar el enmascaramiento del material a pesar de su alta reflectividad. La tabla 5.4, muestra una lista del material y equipo requerido para el desarrollo experimental de esta etapa.

Tabla 5.4. Material y equipo para la cuarta etapa

Material	Equipo
Muestra degradada	FIB
Cinta doble adherente	
Pinzas	
Envase Petri	

5.6.1. Procedimiento para la cuarta etapa

Dentro de una cámara de vacío, el FIB envía un LÁSER, hacia una diminuta pieza de Silicio o alguna otra muestra de material. Este LÁSER realiza un barrido sobre toda la superficie y en una pasada puede fundir o evaporar una delgada capa superficial de unos cuantos nanómetros. Después de varias pasadas se puede alcanzar una profundidad deseada, de degradado. Para ello se sugiere manipular la muestra con las pinzas, sujetándola de una orilla. Se recomienda:

- i. En un porta muestras limpio, colocar un trozo de cinta doble adherente que servirá para fijar la muestra.
- ii. Se retira cuidadosamente la tapa del envase Petri que contiene la muestra de *Si*.
- iii. Con las pinzas se transporta la muestra hacia la cinta doble adherente que fue previamente colocada en el porta muestras, cuidando de sujetar la muestras de la orilla para no dañar la zona de interés.
- iv. Una vez que la señal del FIB indica que la presión de vacío se ha alcanzado, se procede a introducir el porta muestra. En este dispositivo la presión de trabajo se alcanzará rápidamente.
- v. Con ayuda de las herramientas de control en la pantalla del sistema, se puede construir un enmascaramiento digital. Este enmascaramiento permite montar diferentes figuras geométricas y protege selectivamente al material del degradado del LÁSER en las partes deseadas, dando la posibilidad de construir así estructuras tridimensionales.
- vi. Se seleccionan los parámetros deseados de corte y comienza el proceso de manera automática. El sistema indica el fin del proceso y se procede a retirar la muestra.
- vii. Se recomienda obtener las micrografías correspondientes y almacenarlas digitalmente. Esos archivos pueden analizarse en una computadora personal para apreciar los detalles del maquinado.

La figura 5.8, muestra la zona donde se realizó el corte, abarcando una zona enmascarada y una zona descubierta.

5.6.2. Resultados obtenidos de la cuarta etapa

Se obtuvo una longitud de corte de aproximadamente $200\mu\text{m}$ y $4\mu\text{m}$ de ancho, se utilizó un tipo de haz MI-300 a 7nA 30KeV , por un tiempo de exposición de 50 minutos. La longitud total del corte se puede apreciar en la figura 5.9, este corte abarca la zona enmascarada y la zona descubierta. Se puede apreciar también la línea de frontera entre ambas zonas. En la figura 5.10, se observa un acercamiento en la zona del corte y se aprecia que se obtuvo un ancho de corte de aproximadamente $4\mu\text{m}$ y una profundidad de $1\mu\text{m}$.

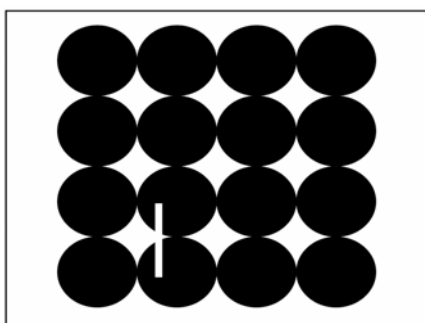


Figura 5.8. Posición de la línea de corte (línea en color blanco)

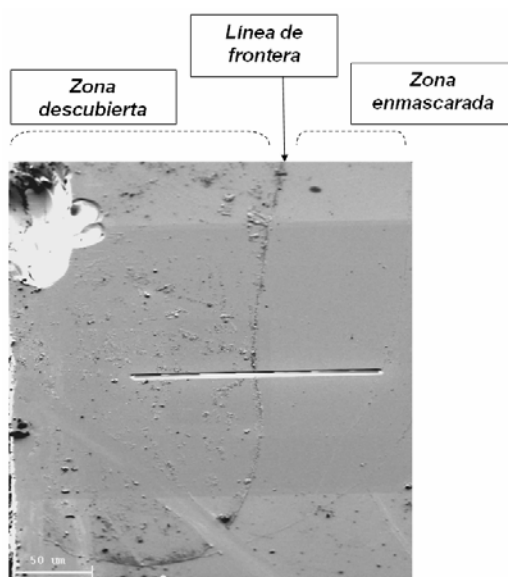


Figura 5.9. Micrografía mostrando la longitud total del corte cercano a los $200\mu\text{m}$

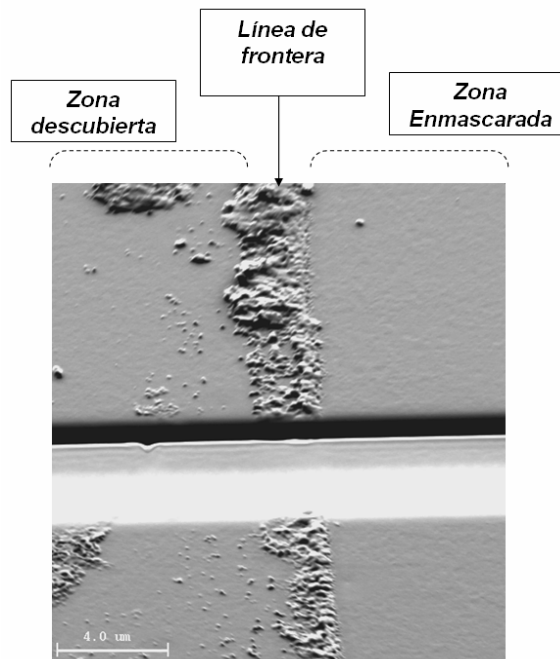


Figura 5.10. Micrografía del acercamiento a la zona del corte, mostrando un ancho aproximado de 4μm.

Se observa en ambas figuras una línea de corte muy recta y limpia, pero no se aprecia ninguna diferencia entre ambas zonas. La diferencia se apreciará cuando la muestra sea degradada como en el caso de la figura 5.11, en donde se realizó un corte de similar magnitud, en la unión entre dos círculos. En esta si se aprecia, en la parte superior de la imagen, el degradado que generó el XeF_2 , haciéndose notorio el cambio de rugosidad superficial.

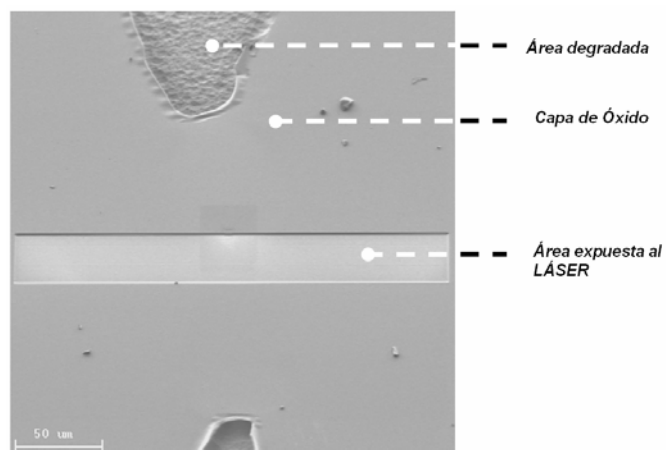


Figura 5.11. Micrografía de la muestra cortada con LÁSER solo en la zona protegida.

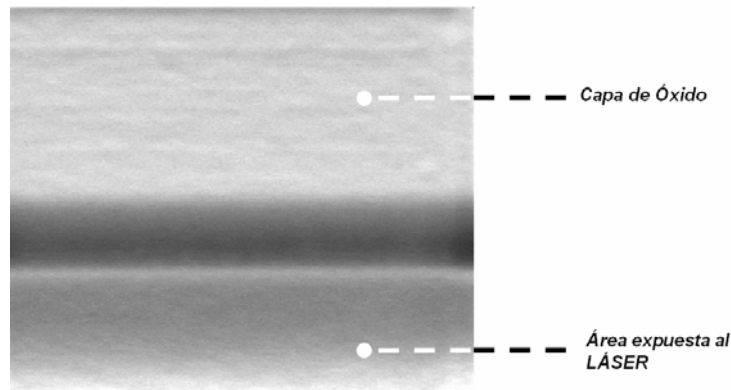


Figura 5.12. Micrografía de la vista lateral de la sección cortada, mostrando las capas de Óxido y de la zona expuesta después de 50 minutos de exposición a 7nA.

En la figura 5.12, se muestra un acercamiento en la zona del corte, con el objeto de apreciar las capas de SiO y de Si puro. Es difícil identificar con esta imagen, la frontera entre la capa de silicio puro y la capa de óxido de silicio, lo que plantea una incógnita a resolver. Se debe conocer qué tipo de haz debe utilizarse y a qué amperaje se debe disparar, para poder eliminar por completo la capa de óxido de silicio. Entonces, la interrogante se enfoca a, cómo saber cuando esto ha ocurrido. Resolver esta incógnita ayudará a construir enmascaramientos sobre la capa de óxido y dejar la muestra lista para el degradado con XeF_2 , sobre todo en zonas donde se deba tener detalles finos en el micromaquinado. La solución a esta cuestión se encontró de manera experimental y se muestra en la sexta etapa experimental.

5.7. Descripción de la Quinta Etapa: Corte con LÁSER de Galio Sobre Silicio, Degradado Previamente con XeF_2 Enmascarado

El FIB permite, de igual forma, realizar un sin número de cortes, que en el caso del Si, no dependen de su orientación cristalográfica, como sucede en el caso del degradado anisotrópico. En esta etapa del trabajo, se propone la combinación de dos técnicas de micromaquinado, las cuales ofrecen al diseñador, alternativas para construir nuevos productos. Por un lado el degradado con XeF_2 en fase gaseosa y por otro lado el corte por LÁSER. Una vez que se realizó el degradado de la muestra en XeF_2 , se procedió a colocar la muestra en el FIB, donde se realizaron los cortes con LASER. La figura 10.2, muestra, con una línea de color blanco, el lugar en donde se realizó el corte. Se puede observar que el corte atraviesa la zona degradada con XeF_2 , y también atraviesa la zona protegida. La posición y tipo del corte permitirá observar el

efecto en la zona no degradada y la degradada isotrópicamente y también comparar los acabados de ambos procesos

Tabla 5.5. Material y equipo para la quinta etapa

Material	Equipo
Muestra degradada	FIB
Cinta doble adherente	SEM
Pinzas	
Envase Petri	

5.7.1. Procedimiento de la Quinta Etapa

El procedimiento para esta quinta etapa es el mismo que se debe seguir en la cuarta etapa, sección 5.6.1.

5.7.2. Resultados de la Quinta Etapa

El corte se realizó empleando el LÁSER de Galio, acelerado a 30KeV. Se aplicaron 14.355 nA, con un tipo de haz: Beam-500. Con respecto a la máscara digital, se consideró un rectángulo de 220 μ m de largo y 20 μ m de ancho. El tiempo de exposición a través de esta máscara fue de 15 minutos en dirección vertical.

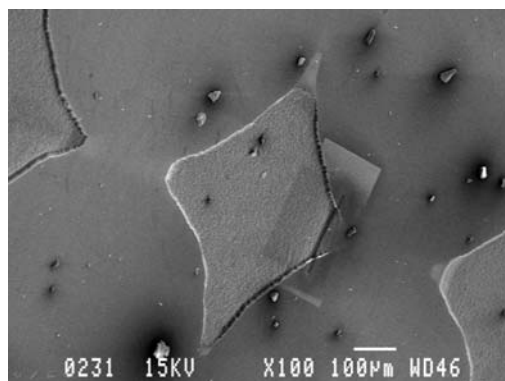


Figura 5.13. Micrografía tomada en las instalaciones de CONCAVE Research Center en la Universidad de CONCORDIA, mostrando las zonas de micromaquinado con XeF₂ y el corte con LÁSER (Stiharu, 2005).

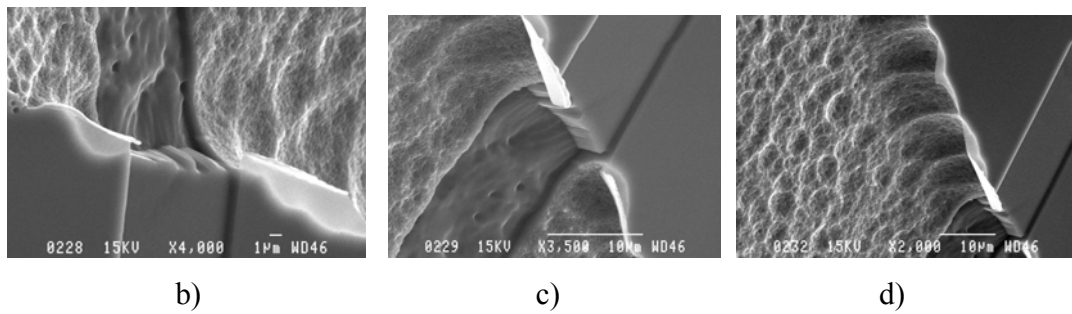
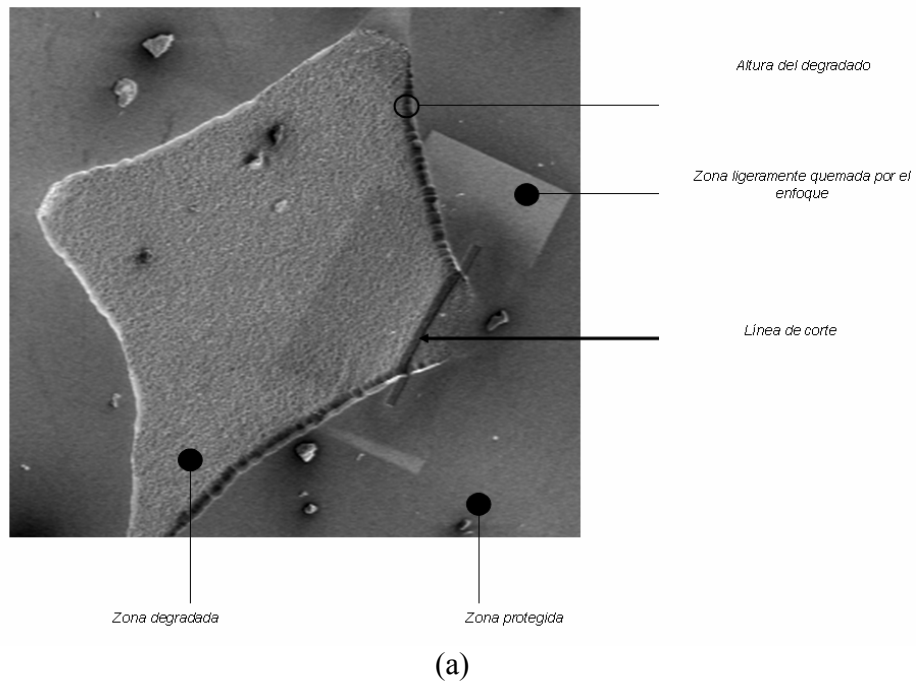


Figura 5.14. Micrografías de (a) los detalles de la comparación y acercamientos (b), (c) y (d).

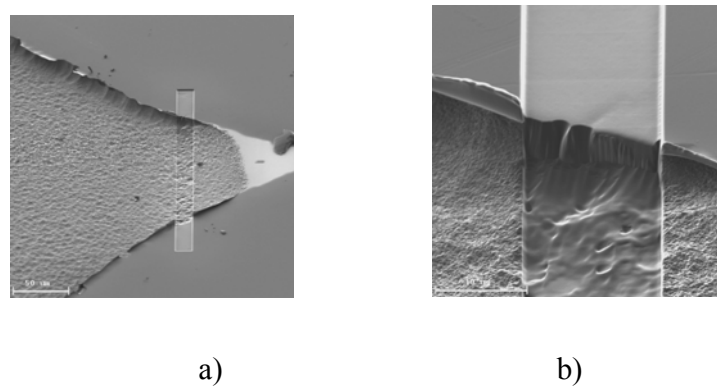


Figura 5.15. Vistas superiores del corte con LÁSER, sobre el corte con XeF₂,
a) Observación total del corte y b) acercamiento.

La figura 5.13, muestra una micrografía de la muestra experimental obtenida. En ella se observan dos patrones principales, uno de color más oscuro y de apariencia lisa, que sigue un perfil curvo formando cuatro círculos, uno junto al otro. Esta es la zona protegida. El otro patrón tiene un color más claro en la imagen y es de apariencia más rugosa. Esta zona rugosa es la zona expuesta al XeF_2 . Los demás objetos pequeños son residuos de polvo e impurezas impregnadas durante los procesos de manipulación. Se observa en la figura, que al realizar los ajustes de colocación de la máscara sobre la muestra, se produjo una ligera quemadura de forma rectangular, provocada por el tiempo de observación que transcurre al enfocar la zona de interés. Esta quemadura se aprecia alrededor del corte en la parte central del lado derecho de la imagen. Junto a esta marca rectangular existe otra, justo a la izquierda y de menor tamaño, en un tono más oscuro que el anterior. También es una quemadura en forma de rectángulo, la cual se produjo instantes después de finalizado el corte, al realizar las observaciones y grabado de imágenes. Estas marcas podrían dar una idea visual de lo diminuto que puede llegar a ser un corte con esta herramienta, es decir, se pueden realizar cortes de escala nanométrica, no sólo de geometrías rectangulares, sino también con perfiles complicados. Estos detalles se identifican en la figura 5.14 a). Debe considerarse este efecto para obtener beneficios en la microfabricación estructural y no se dañen los fragmentos finos del corte. En esta figura también se observa el efecto de la apertura de la ventana, provocado por el enmascaramiento. En el degradado con XeF_2 se observa también que el perfil de frontera quedó con una irregularidad, es decir no se construyó un corte liso totalmente uniforme como en el caso del corte con LÁSER. Este detalle se puede observar en el acercamiento mostrado en las figuras 5.14 b), c) y d), en ellas se puede observar el acabado del corte LÁSER, el corte por debajo de la protección en diferentes ángulos de observación y el cambio de rugosidad provocado por el LÁSER. La rugosidad producida con el degradado volumétrico, puede variar con respecto a otros especímenes tratados de la misma manera, ya que existe un cambio en la rugosidad de la superficie que depende del tiempo de exposición al XeF_2 . Esta rugosidad se atenúa si se expone más tiempo con el LÁSER, ya que éste funde ligeramente la superficie con cada pasada.

En la figura 5.15 a), se muestra una vista superior del corte, y un acercamiento en la figura 5.15 b) que permite ver la rectitud del corte, en comparación con el degradado volumétrico, así como el cambio de rugosidad. La rugosidad superficial es bastante útil para aplicaciones que tienen que ver con la óptica, como lo son, la fijación o posicionamiento de fibras ópticas o ensamblajes

de varias fibras ópticas que deben alinearse con rangos muy altos de exactitud. La importancia de este alineamiento radica en que no deben existir pérdidas en la intensidad de transmisión de la señal transportada.

Se aprecia, en este conjunto de imágenes, que efectivamente existe una gran cantidad de degradado, debido al factor de apertura de ventana grande, que existe entre círculos. Se identifica una uniformidad en el acabado superficial del material expuesto a XeF_2 , que puede modificarse en la zona de interés por el número de pasadas del LÁSER, la intensidad en nA de la emisión y el estilo de *BEAM* declarado en los parámetros iniciales del FIB.

5.7.3. Resultados de la Quinta Etapa

Durante el desarrollo de este proceso experimental, se identificaron puntos que permiten mostrar que es posible combinar ambas técnicas de micromaquinado. Por un lado, el degradado volumétrico puede dar forma a grandes áreas de la muestra, empleando relativamente poca energía. El degradado con LÁSER, requiere mayor cantidad de energía y permite acabados de alta calidad, pero las dimensiones de los micromaquinados deben ser muy pequeñas para que la muestra pueda caber dentro de la cámara de vacío del FIB. Se observa que, al llevar a cabo las labores de ajuste previas al corte, se produce una ligera quemadura alrededor de la región de interés, factor que debe considerarse previamente. La combinación de ambas técnicas abre la oportunidad, a los diseñadores, de concebir nuevas estructuras, en las cuales se requiera, por un lado, degradar grandes superficies y por otro, afinar el acabado en las zonas de interés. Se observa que la rectitud del corte es muy fina comparada con la frontera producida por el degradado con XeF_2 .

5.8. Descripción de la Sexta Etapa: Corte con LÁSER de Galio y análisis de Rayos X Sobre Silicio, Degradado con XeF_2 Enmascarado

En esta etapa se resuelve la interrogante de cómo saber cuando el LÁSER ha atravesado la capa de SiO de la oblea y deja descubierto al silicio puro. Para ello se volvió a utilizar el Microscopio de Barrido Electrónico, en este caso se empleó la herramienta interna de Rayos X con que cuenta el microscopio. Con esta herramienta, se puede conocer el tipo de material que se está analizando en el microscopio. En cuanto al material, equipo y procedimiento, se deben seguir

los mismos que se consideraron para la tercera y cuarta etapa, ya que se emplean el FIB y el Microscopio de Barrido Electrónico.

5.8.1. Resultados de la sexta etapa

En la misma muestra se realizaron cortes a diferentes magnitudes y con diferentes tipos de haz. El corte resultante, se muestra en la figura 5.16 a), donde se aprecia un pequeño cuadro realizado por el LÁSER. En la figura 5.16 b), se muestra un acercamiento de la zona del corte. Se decidió en este caso, disminuir la longitud del corte a una ventana de 20 x 20 μm y se incrementó el amperaje a 14.355nA. En este caso, el tipo de haz utilizado fue el MI-500 y el tiempo de exposición fue de 15 minutos.

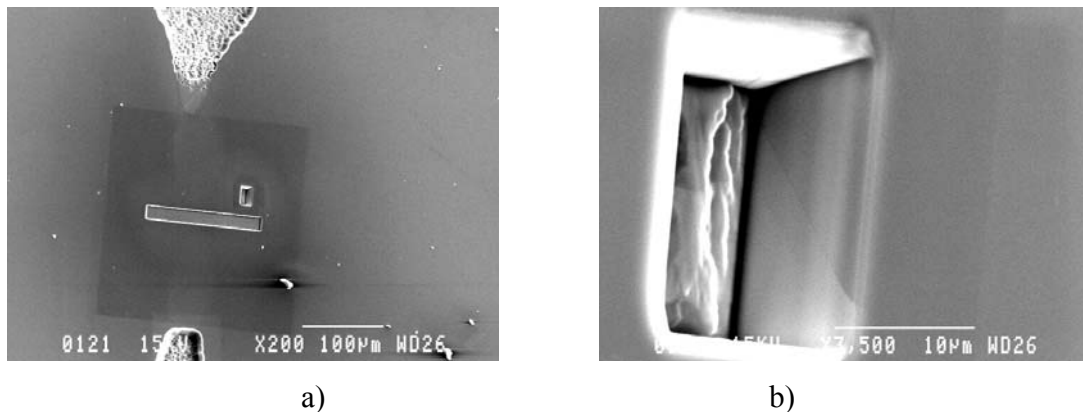


Figura 5.16. a) Micrografías del corte con LÁSER y b) acercamiento en la zona del corte

De acuerdo a la figura 5.16 b), se obtuvo una profundidad de corte cercana a los 10 μm . A esa profundidad se pueden ver las capas que conforman la oblea y aunque se distinguen cambios en su coloración, la inspección visual no es suficiente para determinar si se ha descubierto la capa de silicio, debido a ello se procedió a realizar los barridos con rayos X. El primer barrido con Rayos X fue disparado solamente sobre la capa de silicio que ya había sido degradada previamente con XeF_2 . La figura 5.17, muestra el resultado del barrido. Los sensores detectan una fuerte presencia de silicio como el material principal que conforma el barrido.

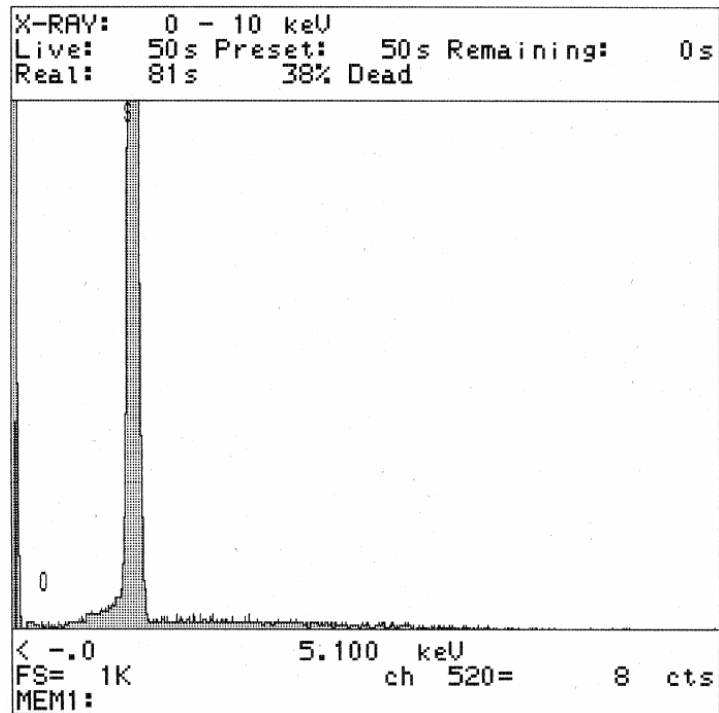


Figura 5.17. Barrido de rayos X sobre la superficie de *Si*.

Los resultados del Segundo barrido, se muestran en la figura 5.18. Este barrido se realizó en la capa de *SiO* y como puede observarse en el análisis, el sistema detecta a ambos elementos presentes, por un lado al elemento oxígeno y por otro al elemento silicio.

El tercer barrido se realizó enfocando únicamente el centro del cuadrado maquinado, como puede observarse, la cuenta de oxígeno es mucho menor que la anterior, mostrando que la selección de parámetros declarada en el FIB, efectivamente elimina la capa de óxido de silicio, como puede observarse en la figura 5.19.

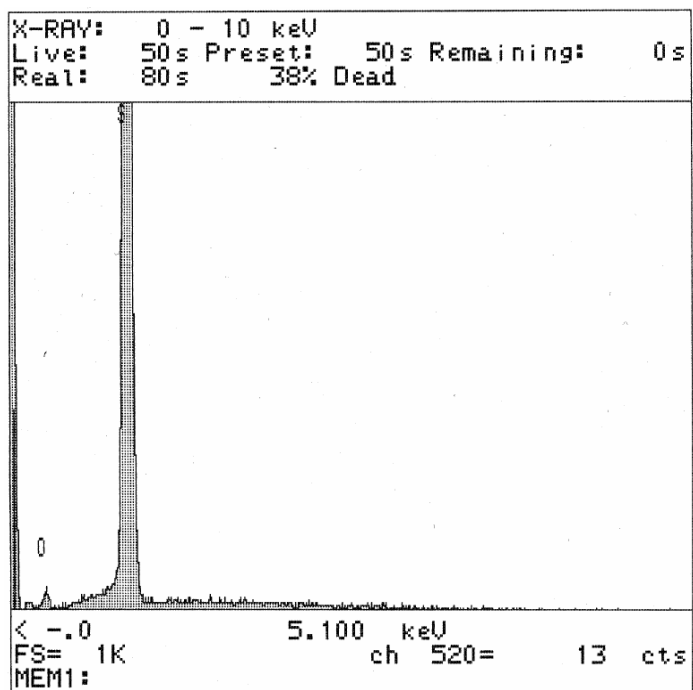


Figura 5.18. Barrido con rayos X de la capa de SiO_2 .

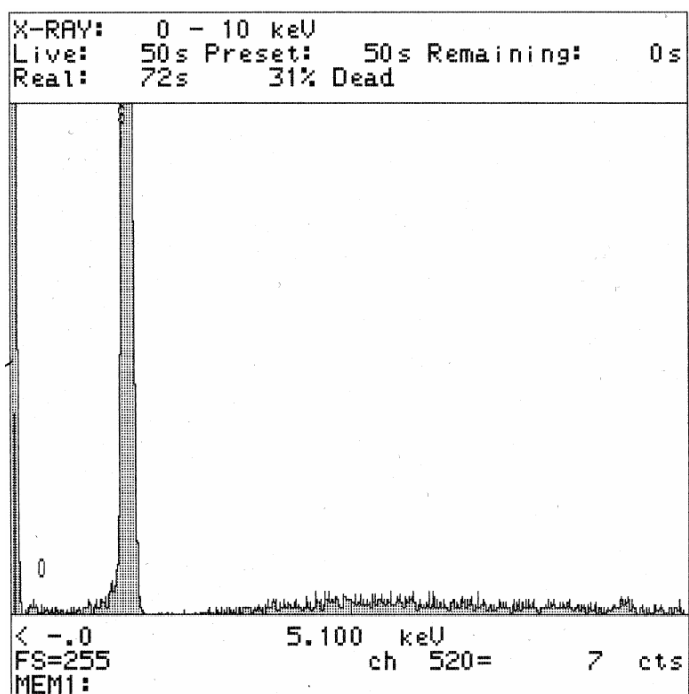


Figura 5.19. Barrido con rayos X en el centro del corte

5.9. Descripción de la Séptima Etapa: Corte con LÁSER de Galio Sobre Silicio, Degradado con XeF_2 no Enmascarado

En esta etapa experimental, se tomaron muestras de silicio degradadas en XeF_2 , en estado gaseoso, para ser estudiadas. Los tiempos de exposición, con duración de 1 minuto, denominados pulsos, determinan la profundidad del corte y la rugosidad superficial de las muestras. En esta ocasión, M. Packirisamy y I. Stiharu, degradaron las muestras con diferente número de pulsos. Esto fue a 5, 9, 13, 17, 25 y 35 pulsos. Las muestras se llevaron al FIB y se realizaron cortes con el LÁSER de Ga . El objetivo es el de observar el perfil de rugosidad de cada una de las muestras, realizando un degradado en forma de escalón. La tabla 5.6, muestra una lista del material y equipo requerido para el desarrollo experimental de esta etapa.

Tabla 5.6. Material y equipo para la séptima etapa

Material	Equipo
Muestra degradada	FIB
Cinta doble adherente	
Pinzas	
Envase Petri	

5.9.1. Procedimiento de la Séptima Etapa

Para esta etapa, se transporta cada muestra al FIB en su correspondiente envase Petri. Es importante identificar cada una de las muestras para evitar confundirlas. A simple vista la diferencia entre sus superficies, es poco perceptible y cualquier descuido puede complicar su manejo. M. Packirisamy sugiere tener un dibujo representativo de cada muestra, de esta forma su geometría irregular se puede identificar fácilmente. Con respecto al procedimiento se debe seguir el mismo que se describió en la cuarta etapa para cada una de las muestras.

5.9.2. Resultados de la Séptima Etapa

En esta etapa se tuvieron que manipular muy cuidadosamente cada una de las muestras, ya que el tamaño máximo de ejemplar que se puede introducir en el soporte del FIB, no puede ser mayor a 3 mm^2 de lado. Esto indica que el tamaño de la cinta doble adherente, que debía emplearse, también se encontraría en el rango de los milímetros. La manipulación de las muestras no debe dañar en absoluto las zonas de interés, es decir la superficie central y es inevitable, por las características de las pinzas con terminación afilada, que en la manipulación se dañe la superficie

en las esquinas de las muestras. Con la experiencia tomada en la etapa anterior, se realizaron los cortes en cada muestra en las zonas centrales y se obtuvo un conjunto de micrografías que se muestran a continuación:

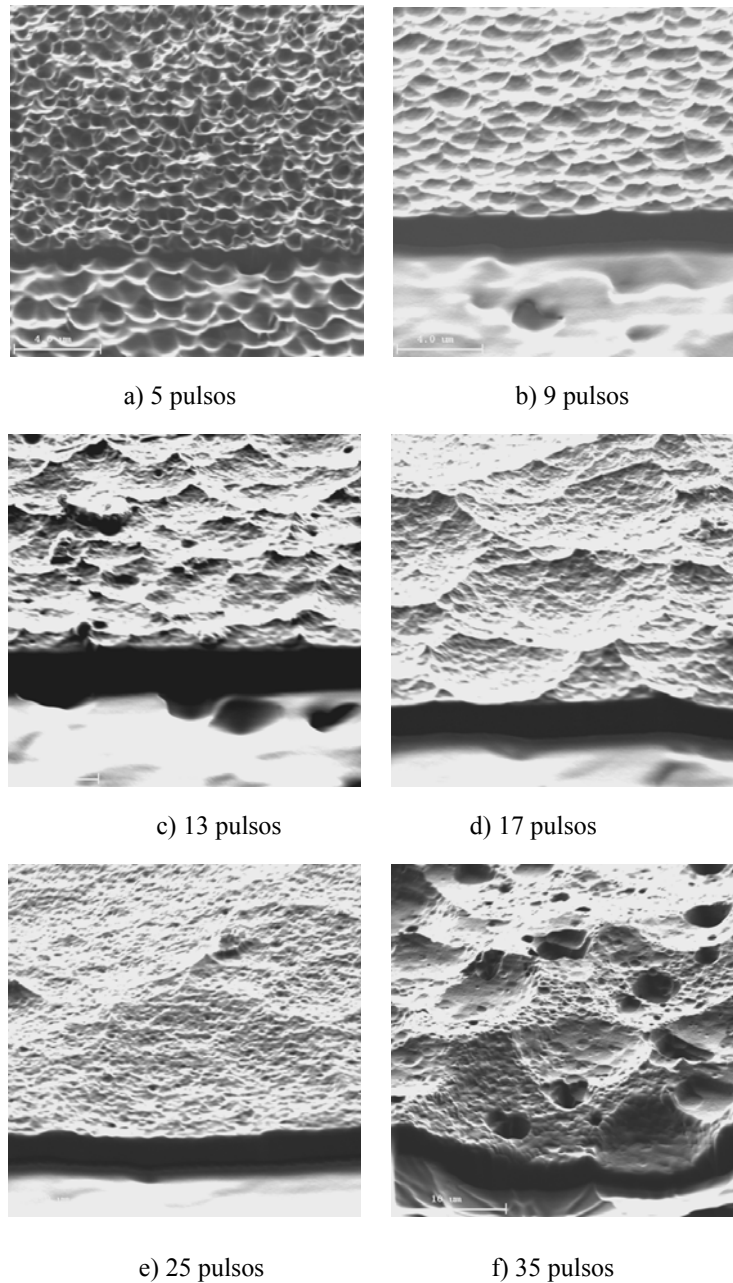


Figura 5.20. Micrografías de los cortes con LÁSER de *Ga* sobre muestras de *Si* degradadas con XeF_2 a diferentes pulsos.

En las figuras 5.20, se muestran los cortes resultantes de cada muestra. Puede observarse que existe un cambio en la rugosidad de cada una de las superficies degradadas. El corte se identifica por el escalonamiento en la imagen. La parte superior de las imágenes muestran la rugosidad original para cada pulso. Debajo del escalón, se muestra una rugosidad más atenuada que la original, esto se debe al efecto que produce el LÁSER al evaporar el material sobre la superficie. En la figura 5.20 a) y b), correspondientes a exposiciones de 5 y 9 pulsos respectivamente, se observan picos abundantes y una rugosidad muy alta. En las figuras c) y d) que corresponde a los 13 y 17 pulsos respectivamente, se observa que los picos se atenúan y son menos abundantes. También se observan restos de la rugosidad anterior los cuales parecen desvanecerse y se aprecia la aparición de valles más amplios en la superficie. En las figuras e) y f) que corresponde a los pulsos 25 y 35, se observa que este patrón lleva una continuidad, pero en la figura f) comienza un conjunto de orificios que se presentan aleatoriamente. Estos orificios, como se verá más adelante, tienen un tamaño variable y tienen una forma rectangular, siguen la misma orientación. Se atribuyen a la misma configuración cristalográfica y a imperfecciones en la conformación estructural del material.

El estudio de estas imágenes llevó a la decisión de que, debía hacerse un estudio más detallado de las superficies obtenidas. Así que, se propuso la siguiente etapa experimental, que involucra el análisis de rugosidad de las muestras, empleando el Microscopio de Fuerza Atómica, como se verá a continuación.

5.10. Descripción de la Octava Etapa: Muestreos de Barrido con Microscopio de Fuerza Atómica Sobre Muestras de Silicio, Degradado con XeF_2 no Enmascarado

En esta etapa se empleó el Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) para tomar muestras de la rugosidad superficial de cada una de las muestras. Este aparato es extremadamente delicado así que se recomienda contar con los manuales de procedimiento y asegurarse que se encuentre debidamente colocado en una plataforma neumática de aislamiento de vibraciones. El barrido se realiza por medio de una microviga en cantilever que refleja un haz de luz LÁSER hacia un detector. La microviga tiene una punta en el lado libre, con la que barre la superficie de la muestra, siguiendo su perfil. Como se ilustra en el capítulo dos, sección 2.11.2, la muestra se encuentra fija sobre actuadores piezoeléctricos, que le brindan movimientos transversales, con

una resolución en el rango de los micrómetros. En este caso se seleccionó un barrido que forma un área cuadrada de inspección, de 100 x 100 μm por lado.

Tabla 5.7. Material y equipo para la octava etapa

Material	Equipo
Muestras degradadas	Microscopio de Fuerza Atómica.
Pinzas	Emisor-Detector LÁSER
Envase Petri	Cámara de TV
Manuales del AFM correspondiente	Monitor
Microvigas cantiliver, en este caso rectas de 100 μm de longitud	Microscopio y mesa neumática para aislar vibraciones
Plataforma de sujeción de la microviga	PC con programa de control, en este caso se empleó <i>Nano Scope Control</i> y <i>Nano Scope Image</i> para el VEECO <i>Digital Instruments Metrology Group 2000</i> .

5.10.1. Procedimiento de la Octava Etapa

El procedimiento descrito a continuación, fue el utilizado y puede tener variantes, según el modelo de microscopio o tipo de análisis que se desee realizar:

- i. Saque la muestra a analizar del envase Petri, utilice las pinzas y decida tocar únicamente una esquina de la muestra para no dañar la superficie.
- ii. Coloque la muestra sobre la columna piezoeléctrica del microscopio. Tenga cuidado de situar la muestra de manera que la microviga tenga suficiente espacio para ser manipulada.
- iii. Tome la microviga con las pinzas, sujetándola de su base y colóquela en el soporte levantando cuidadosamente el seguro.
- iv. Coloque la base de la viga en la plataforma correspondiente.
- v. Coloque el emisor-detector LÁSER sobre su base y asegúrelos con los dos resortes laterales. Sujete con una mano el dispositivo y con la otra manipule los seguros, asegúrese de no soltarlo hasta que esté bien asegurado.
- vi. Dirija el LASER justo hacia la cara superior de la microviga.
- vii. Ajuste los detectores y los parámetros de nivelación del microscopio.
- viii. Coloque el microscopio óptico sobre la mirilla del sensor.
- ix. Encienda el monitor y coloque la cámara de TV sobre el microscopio óptico.

-
-
- x. Con ayuda de los lentes del microscopio enfoque a la viga hasta que aparezca clara la imagen de la microviga en el monitor. Esa será su posición de referencia.
 - xi. Baje la cámara con el tornillo de ajuste de altura, hasta que aparezca clara la imagen de la muestra.
 - xii. Con estas dos referencias puede juzgar la distancia y acercar manualmente la microviga a la muestra.
 - xiii. Cuando la microviga y la muestra estén lo suficientemente cerca y antes de que se toquen, detenga el acercamiento manual. Notará la cercanía suficiente, ya que con muy poco movimiento del tornillo de ajuste de altura enfocará claramente a la muestra y a la microviga.
 - xiv. Con el programa de control cambie a acercamiento automático y defina los parámetros de barrido.
 - xv. Los sensores detectarán el contacto con la muestra y comenzarán el barrido.
 - xvi. Al finalizar el barrido guarde el archivo digital
 - xvii. Retire la muestra removiendo cuidadosamente los componentes del microscopio.
 - xviii. Regrese la muestra al envase Petri correspondiente.

Puede repetir el procedimiento para las siguientes muestras. Es conveniente realizar todos los barridos primero y después dedicar tiempo al análisis con la computadora, así optimizará su tiempo.

5.10.2. Resultados de la Octava Etapa

Los barridos realizados en cada una de las muestras, dan como resultado las micrografías mostradas en las figuras 5.21. a), b), c), d), e) y f), que corresponden a los 5, 9, 13, 17, 25 y 35 pulsos de exposición respectivamente. Las imágenes muestran una vista en isométrico de una pequeña zona de la muestra de $100\mu\text{m}^2$ y puede observarse el cambio en la rugosidad de cada uno de ellas, cuyos valores se mostrarán en la siguiente etapa. Para los primeros pulsos se observa una rugosidad que se va incrementado sobre la superficie, más o menos uniforme.

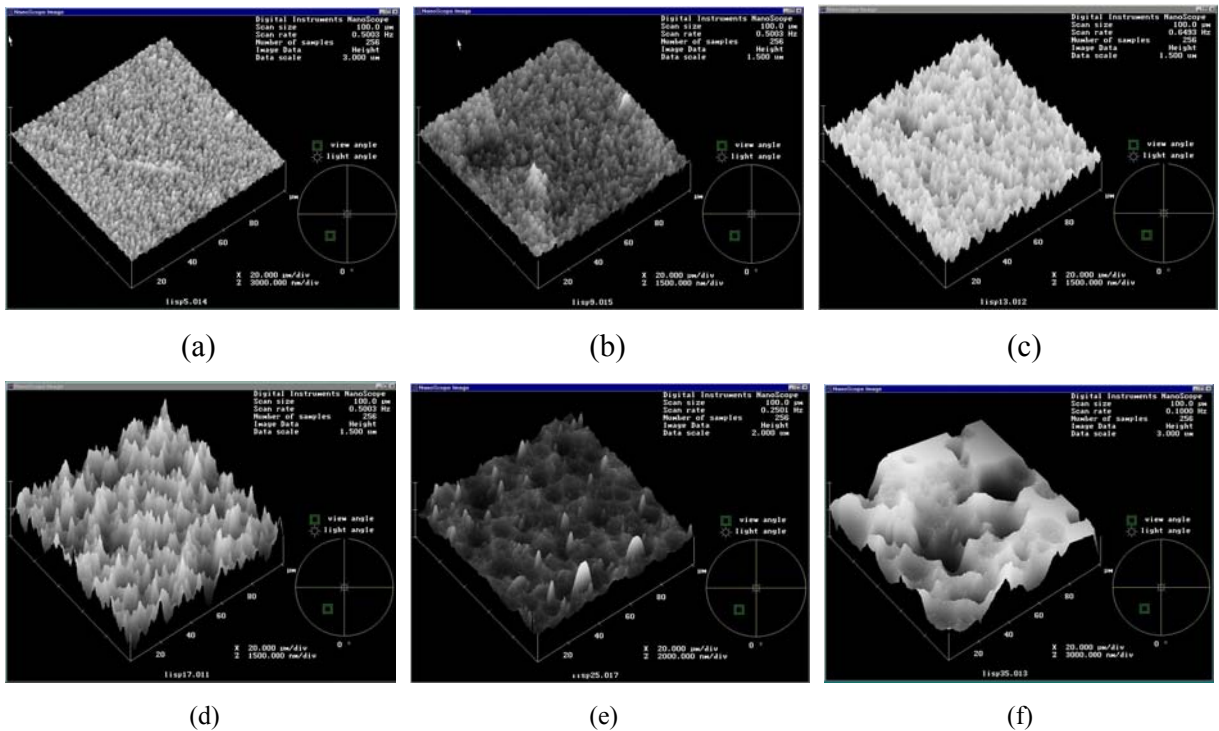


Figura 5.21. Micrografías de barrido por AFM, obtenidas de los muestreos para a) 5 Pulsos, b) 9 pulsos, c) 13 pulsos, d) 17 pulsos, e) 25 pulsos y f) 35 pulsos

Ya en la última imagen se observa que la planicidad de la superficie ya no es uniforme, más bien se muestra muy discontinua, accidentada y con orificios de aproximadamente 10 μm de diámetro. Debido a lo accidentado de la última muestra, la microviga en cantilever alcanza sus límites máximos de deflexión, más allá de los cuales la lectura se muestra constante, debido a ello se muestran en la parte superior de la imagen, unas zonas de superficie plana. En los lados derecho e izquierdo de cada imagen, puede observarse el perfil de rugosidad de las muestras. Puede apreciarse que se va haciendo más áspero y desnivelado a medida que aumenta el número de pulsos de exposición. Estos perfiles pueden compararse visualmente con los que se muestran en la séptima etapa.

5.11. Descripción de la novena etapa: Obtención de Datos Estadísticos de los Barridos AFM

En esta novena etapa, se extrajeron los datos estadísticos de los barridos realizados en cada muestra, extraídos del programa NANO SCOPE.

5.11.1 Análisis de Sección

Los análisis de sección de cada una de las muestras, se aprecia en la figuras 5.22. En la gráfica 5.23, se observa el crecimiento de la rugosidad de cada sección.

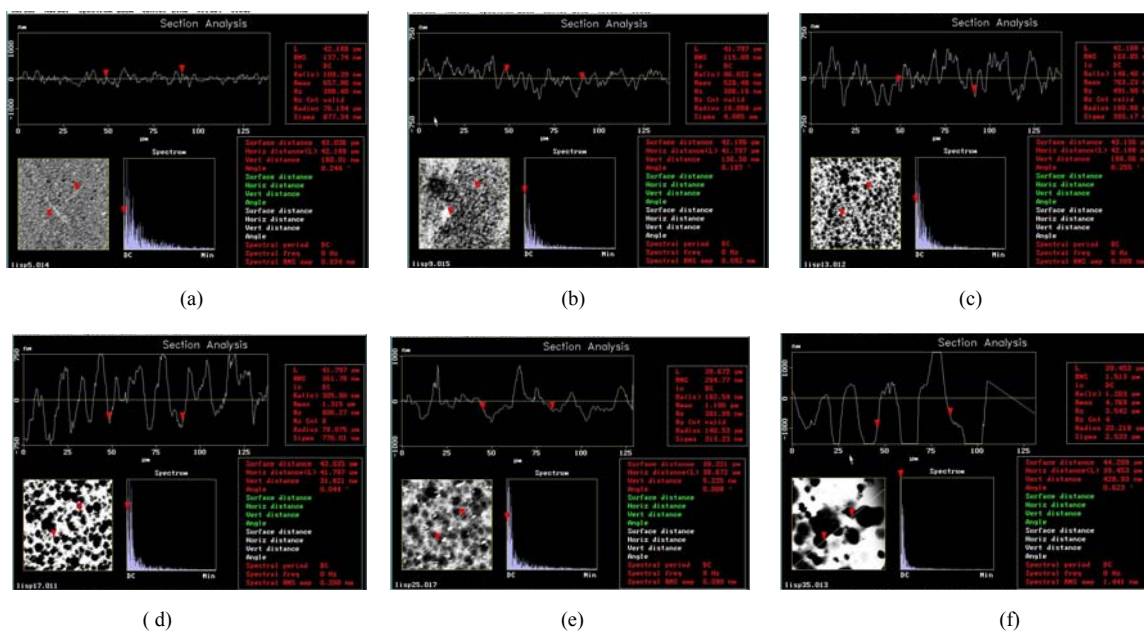


Figura 5.22. Análisis de sección de las muestras de a) 5 pulsos, b) 9 pulsos, c) 13 pulsos d) 17 pulsos e) 25 pulsos y f) 35 pulsos

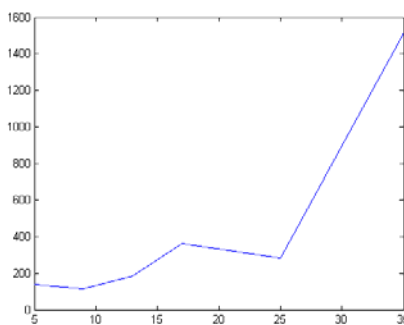


Figura 5.23. Rugosidad RMS de una sección (nm)

5.11.2. Análisis de Rugosidad

El análisis de rugosidad de las muestras se realizó para cada una de ellas. El programa muestra los resultados del análisis como se puede apreciar en la figura 5.24 para a) 5, b) 9, c) 13, d) 17, e) 25 y f) 35 pulsos. En ellas se muestra del lado izquierdo una micrografía de la muestra

correspondiente y del lado derecho se muestran los resultados que indican los valores de rugosidad de toda el área mostrada.

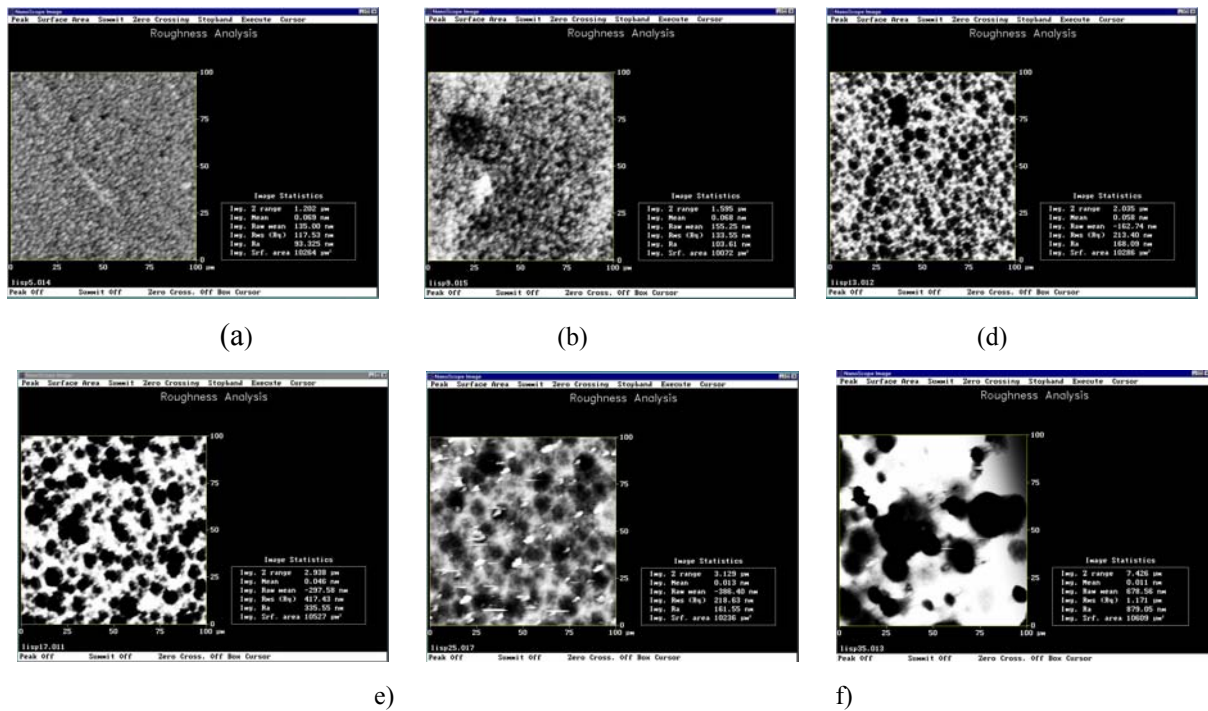


Figura 5.24. Análisis de rugosidad de las áreas barridas de a) 5 pulsos, b) 9 pulsos, c) 13 pulsos d) 17 pulsos e) 25 pulsos y f) 35 pulsos.

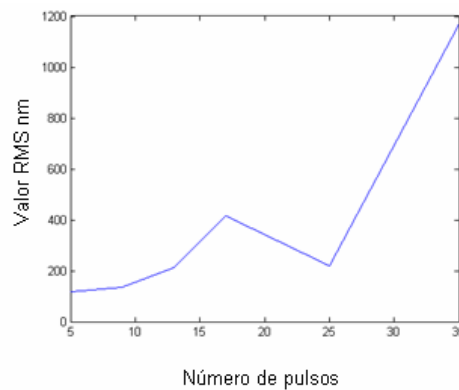


Figura 5.25. Rugosidad RMS de toda el area (nm)

En la figura 5.25, se aprecia una gráfica de todos los valores de rugosidad RMS de las muestras. Se observa el comportamiento que tiene el proceso de degradado, incrementando estos valores a medida que se expande el número de pulsos de exposición.

5.11.3. Perfil de rugosidad

En las figuras 5.26 a), b), c) y d), se aprecian los perfiles de rugosidad de los 5, 17, 25 y 35 pulsos respectivamente. Las imágenes permiten observar del lado inferior izquierdo, una micrografía de la superficie analizada.

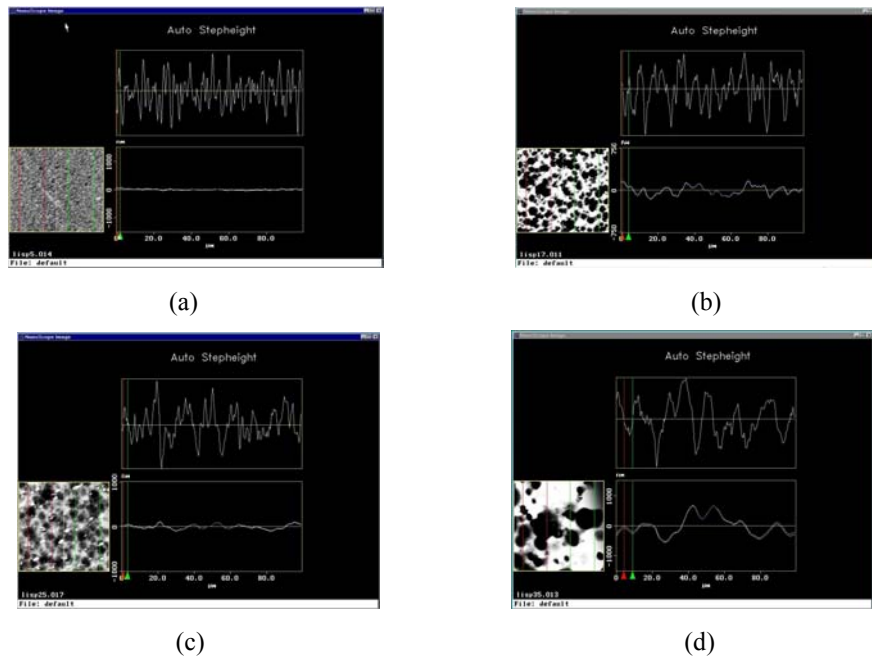


Figura 5.26. Análisis del perfil de rugosidad de a) 5 pulsos, b) 17 pulsos, c) 25 pulsos y d) 35 pulsos

Del lado izquierdo se muestra el contorno del perfil de una línea que cruza de lado a lado la imagen. Puede observarse el gran cambio de rugosidad con respecto a los primeros 5 pulsos.

5.11.4. Análisis de profundidad

En la figura 5.27, se aprecia el análisis de profundidad de cada una de las muestras para a) 5, b) 9, c) 13, d) 17, e) 25 y f) 35 pulsos. En la parte superior izquierda de las imágenes se observa la micrografía correspondiente a cada una. Del lado derecho se tiene el análisis estadístico de los niveles de profundidad alcanzados por el barrido. La gráfica 5.28, indica el crecimiento de la profundidad promedio contra el número de pulsos.

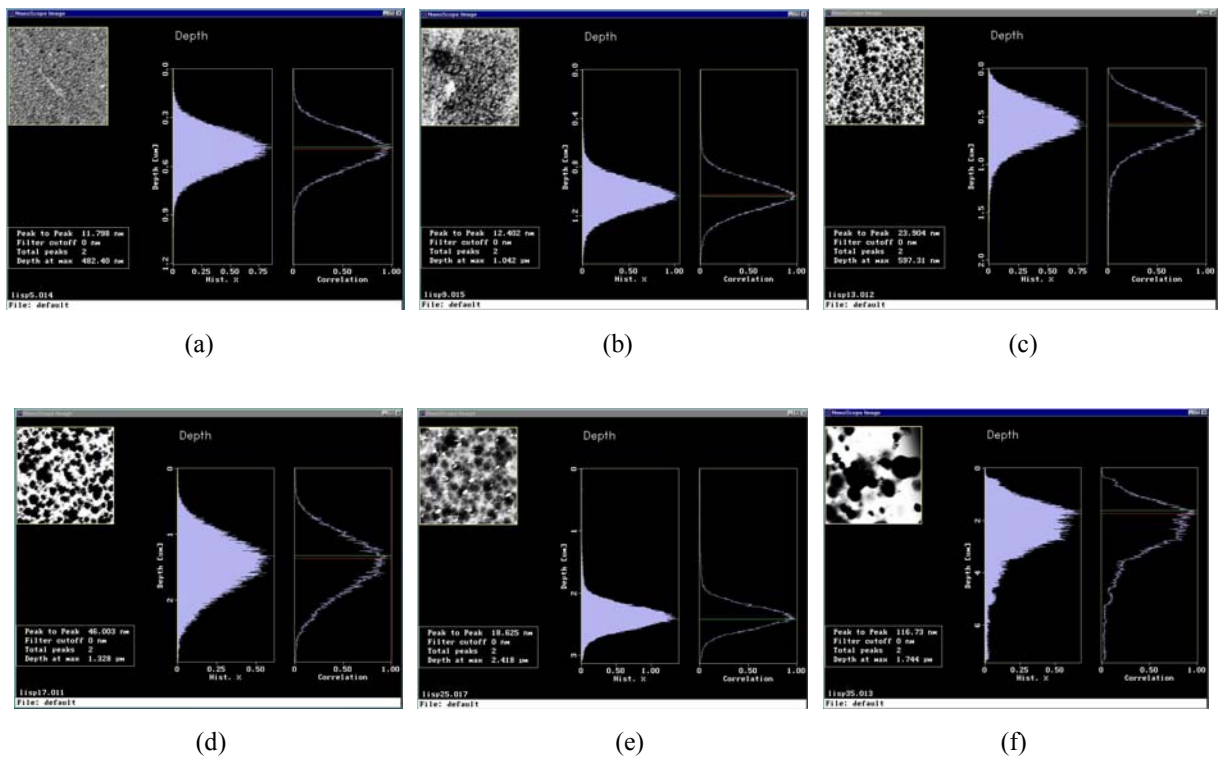


Figura 5.27. Análisis estadístico de profundidad de (a) 5 pulsos (b) 9 pulsos (c) 13 pulsos (d) 17 pulsos (e) 25 pulsos (f) 35 pulsos

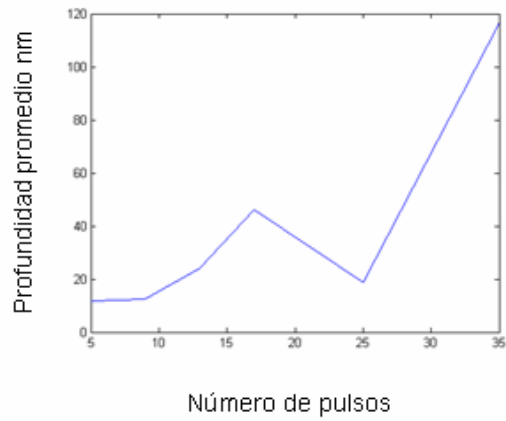


Figura 5.28. Profundidad promedio

5.11.5. Densidad de potencia espectral

En la figura 5.29, se observa el análisis de densidad de potencia espectral de a) 5 pulsos, b) 9 pulsos c) 13 pulsos d) 17 pulsos y e) 35 pulsos

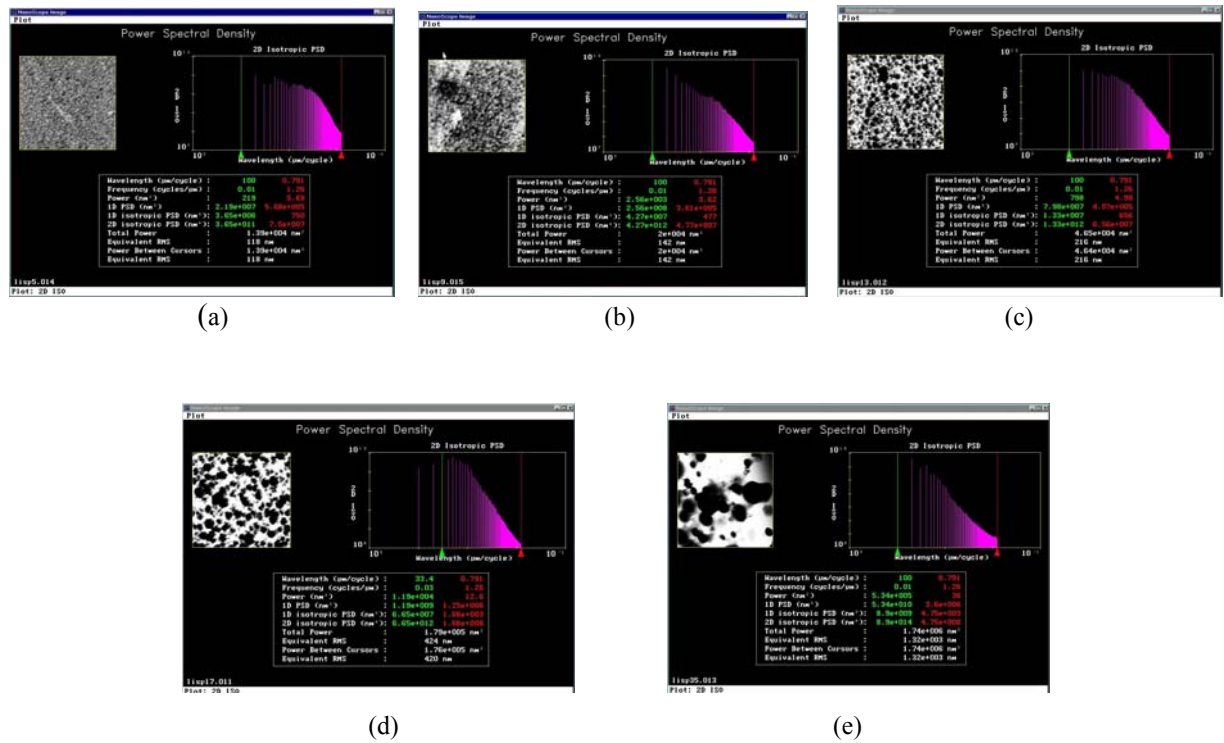


Figura 5.29. Análisis de densidad de potencia espectral de a) 5 pulsos, b) 9 pulsos c) 13 pulsos d) 17 pulsos y e) 35 pulsos.

La figura 5.30, muestra el crecimiento en el RMS obtenido contra el número de pulsos.

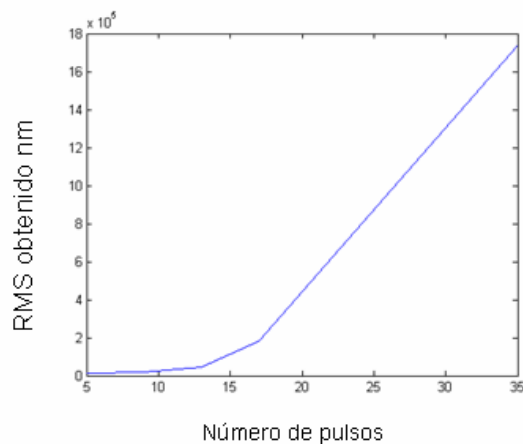


Figura 5.30. RMS obtenida (nm)

5.12. Descripción de la décima etapa: Comprobación experimental del método Rayleigh-Ritz.

Esta etapa tiene el propósito de corroborar experimentalmente que la metodología aplicada en el capítulo cuatro, utilizada para encontrar los valores de las frecuencias naturales es válida y trabaja dentro de rangos verídicos. Para ello se decidió determinar de manera experimental el valor de la primera frecuencia natural de una microviga en cantilever. El AFM JEOL-1000, permite el desarrollo de este experimento ya que cuenta con los elementos necesarios para la medición. El sistema envía un haz LASER hacia la superficie de la microviga de la misma forma en que se muestra en la sección 3, figura 3.31. La oscilación generada por el actuador piezoeléctrico, excitará el primer modo de vibración del microcantilever y éste alcanzará su amplitud de desplazamiento máximo cuando llegue al valor de su frecuencia natural. La tabla 5.8 muestra los elementos empleados en el experimento.

Tabla 5.8. Material y equipo para la décima etapa:

ELEMENTOS EMPLEADOS
CPU Dual Core
Software de control WINSPM
Microviga marca ULTRASHARP NSC15/AIBS
Pinzas de sujeción
Actuador piezoeléctrico de 10V
Cámara CCD
Equipo de protección personal
Sensor LASER de 24V
Fuente de alimentación para el LASER
Fuente de baterías de respaldo de 240V

5.12.1. Procedimiento de la décima etapa

El procedimiento requiere de una previa capacitación especializada en el uso de las herramientas del equipo, sin embargo, las etapas que se llevan a cabo para la medición son las siguientes:

- i. **Colocación de la microviga en el actuador piezoeléctrico:** La base de la microviga debe colocarse cuidadosamente sobre el soporte del actuador piezoeléctrico. Desalineamientos y colocaciones fuera de los rangos longitudinales en la base del piezoactuador, pueden derivar en lecturas erróneas. El uso de las pinzas de colocación

requiere un cuidado especialmente delicado ya que los movimientos bruscos o sujeciones forzadas, pueden despostillar inmediatamente a la microviga.

- ii. **Alineación del LASER:** El haz de luz LASER debe ser apuntado directamente sobre la cara de la microviga. Para ello se deben manipular los espejos direccionales con ayuda de los tornillos de ajuste. Los tornillos de ajuste permiten mover los espejos en pequeñas cantidades de grado. El reflejo del LASER en la cara de la microviga es detectado por un juego de fotosensores que indican la magnitud de la energía recibida. En este caso se obtuvo un valor máximo de 7.85 Volts. La figura 5.31, muestra una fotografía de la microviga y el reflejo del haz LASER sobre la superficie de la microestructura. Se observa también que el microcantilever se encuentra adherido a su base que es varias veces más grande y permite considerar la condición de frontera de empotramiento.

- iii. **Determinación de los parámetros de activación del actuador piezoeléctrico:** El actuador piezoeléctrico requiere de ser alimentado a un voltaje y frecuencia que se aproximen a los valores calculados numéricamente. De esta forma el tiempo de barrido entre las posibles frecuencias será más corto. En base a los estudios realizados anteriormente, se observó como lo muestra la figura 5.32., que la frecuencia natural de la microviga se debería encontrar entre los 250 y los 350 Khz. Esta figura muestra la configuración del panel de control del actuador piezoeléctrico y en el recuadro de ajuste (tuning) se colocan los valores mencionados.

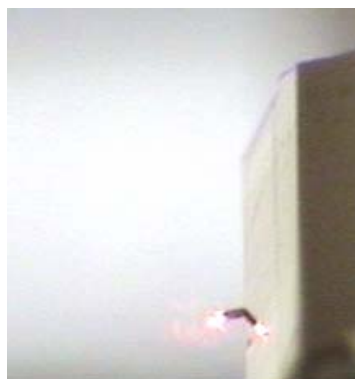


Figura 5.31. Reflejo del LASER sobre la cara de la microviga

En la misma figura se observa en el recuadro OSC control que se debe seleccionar el valor de frecuencia inicial, establecido en 250 KHz para este experimento y una amplitud de salida de 0.01 Volts. Los filtros de ganancia pasa altos y pasa bajos también permiten que el barrido de frecuencias se realice sólo dentro de los rangos establecidos, evitando de esta forma el excesivo tiempo de búsqueda en el barrido. Una vez seleccionados los valores de trabajo del piezoeléctrico, se comienza el barrido el cuál enviará una señal de voltaje al actuador a una frecuencia de 250 KHz. Esta frecuencia se incrementará hasta alcanzar los 350 KHz. En el transcurso de este barrido, el fotodetector recibirá una cantidad de energía que se grafica contra la frecuencia y que alcanza un pico máximo detectando en ese momento el valor de deflexión máxima en la microviga. Este valor máximo se caracteriza por que la frecuencia natural de la microviga y la frecuencia de actuación del piezoeléctrico se igualan, generando una condición resonante. En este caso la condición de resonancia, no alcanza el valor crítico por más de medio segundo, lo que evita la suma de amplitudes que podrían destruir al microcantilever.

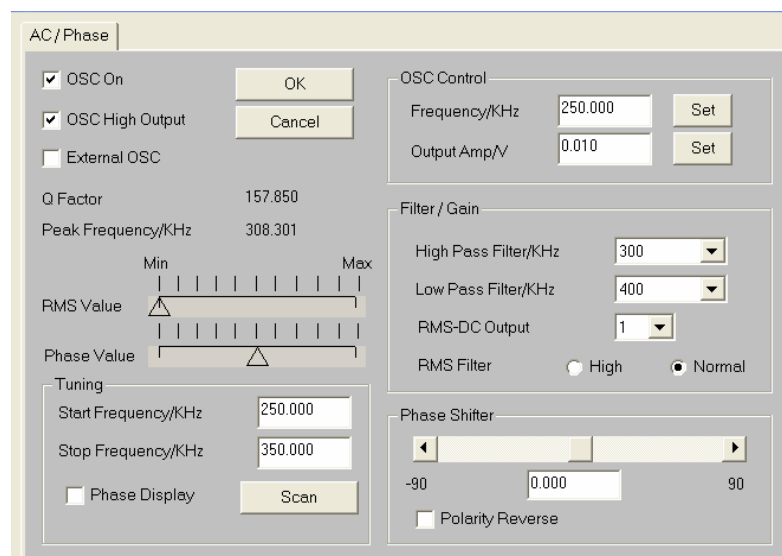


Figura 5.32. Panel de control del actuador piezoeléctrico

5.12.2. Resultados de la décima etapa:

El pico máximo de desplazamiento se encontró entre los 300Khz y los 315 KHz. Este valor coincide con el valor encontrado con el método de Rayleigh-Rytz, mostrado en el capítulo 3 que da una respuesta de 309 KHz. La cercanía en los valores obtenidos comprueba que la metodología mostrada es correcta y se encuentra trabajando en rangos verídicos. El ensayo se

realizó para una microviga cuyas dimensiones son: 126 μm de longitud, 35 μm de ancho y 4.5 μm de espesor.

Diferentes factores pueden crear variaciones en los resultados obtenidos. En la práctica de un experimento de esta naturaleza, los factores ambientales juegan un papel importante. El caso de la humedad puede afectar la respuesta del microcantilever al adherirse pequeñas partículas de agua sobre su superficie. El efecto de la temperatura puede llegar a producir pequeñas dilataciones sobre la estructura, generando una variable más. El tiempo de exposición del LASER sobre la cara del microcantilever, puede también producir pequeñas dilataciones. El exceso o ausencia de luz solar ha demostrado además de incrementar la temperatura exterior, la de incluir una fuerza mecánica en elementos micromecánicos conocida como fuerza fotónica. De igual forma los ruidos de alta frecuencia producidos por elementos externos al experimento pueden generar estas variaciones.

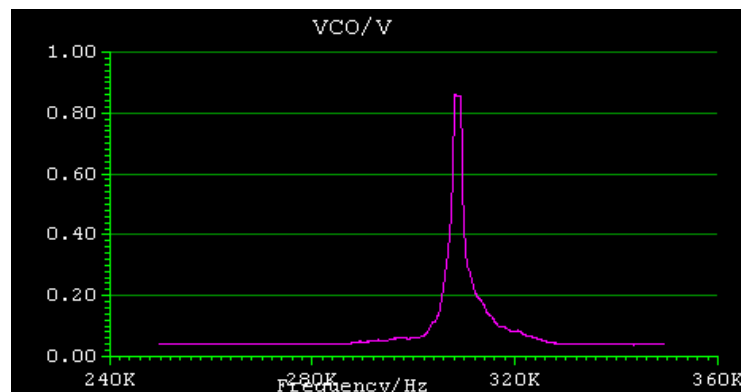


Figura 5.33. Amplitud vs. Frecuencia de excitación en la microviga.

5.13. OBSERVACIONES

El último experimento realizado muestra que la metodología propuesta en el capítulo 4, concuerda con los valores reales. Se ha observado a lo largo del experimento que varios factores pueden alterar el resultado final del análisis. Los elementos ambientales externos son un factor importante para la obtención de valores numéricos iguales, es decir, la temperatura, la humedad, el ruido las condiciones iniciales del laboratorio. Pero por otro lado las condiciones finales de manufactura del microcantilever son un factor importante. Los fabricantes de estos

microsistemas entregan productos con ciertos rangos de tolerancia dimensional. Estas pequeñas variaciones también pueden alterar el resultado del experimento. El historial del microelemento es otro de los factores que pueden afectar el resultado experimental. Por ejemplo, si durante la manipulación o el transporte, se generaron diminutas microgrietas a causa de un movimiento brusco o una caída que a simple vista no pudiera detectarse. En el rango de posibilidades que puede presentarse se observa que los valores obtenidos se encuentran cercanos entre si con una diferencia menor a los 5 Khz. Esto permite el empleo de la metodología mostrada para proponer variantes en las estructuras analizadas de esta forma. Uno de los beneficios obtenidos es el ahorro que se puede obtener durante la etapa del diseño de un microsistema. Diferentes variables de decisión entran en juego al diseñar un microsistema y el caso de la frecuencia natural es uno de ellos. Empleando el método de Rayleigh-Rytz, se pueden estimar valores de frecuencia natural de microsistemas con la certeza de que estos se encontrarán dentro de los valores reales.

5.14. DISCUSIÓN

En las figuras correspondientes a los degradados, se observó un crecimiento en los diferentes valores analizados. Esta tendencia aún no puede establecerse como un patrón estándar, ya que, requeriría de un número grande de pruebas experimentales para poder obtener un valor estadístico adecuado. Las condiciones externas en el momento de realizar el experimento, las condiciones de las máquinas y equipos utilizados podrían, producir algunas variaciones. En esta etapa de la investigación se demuestra la importancia de contar con el equipo y los materiales necesarios, como a los que se hace referencia en el capítulo 3. El campo del diseñador mecánico en esta área de la miniaturización, se expande completamente pues, como se observa, otras disciplinas se integran a la investigación, como el caso de las técnicas empleadas en los laboratorios de química. Los trabajos experimentales realizados, demuestran que la tarea de la miniaturización requiere, en varias ocasiones, del trabajo constante y repetido de prueba y error. Por ejemplo, para poder obtener una deposición uniforme de la capa de fotoresistencia, no basta con tener la máquina correspondiente, en algunos casos la temperatura exterior, la temperatura de la oblea, la humedad del aire y otros factores externos pueden llegar a afectar estos trabajos. La alineación y posición, tanto de la fotomáscara como de la lámpara UV, también son factores que deben ajustarse adecuadamente para obtener buenos resultados y en muchos de estos casos, se habla de ajustes muy finos. Por poner otro ejemplo, la limpieza de los sellos O-ring, también

representó un factor de gran consideración para la adecuada obtención de una deposición uniforme. Todo esto representa un reto grande, pero los resultados que se pueden obtener, ayudarán a aumentar la calidad del producto final. Varios de los temas que se han observado en otros capítulos, se conjuntan en esta sección experimental y se puede observar que esta investigación puede seguir ampliándose hacia diferentes direcciones, abriendo la posibilidad de, en un futuro, formar una línea de investigación que requiera del trabajo en conjunto de diferentes investigadores.

6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En esta última etapa se muestran las conclusiones generales de este trabajo de investigación y se propone un conjunto de trabajos que tienen el propósito de continuar con esta línea de investigación.

6.1. CONCLUSIONES GENERALES DEL TRABAJO

Durante el desarrollo de esta investigación se han descubierto oportunidades nuevas de trabajo, no solo en ingeniería mecánica, sino en todas las áreas de la ciencia, que pueden aplicar sus conocimientos y enfocarlos a la miniaturización. En este trabajo se ha observado el estado del arte de las técnicas de micro manufactura. En ellas, se pudo observar que existe una tendencia notoria a emplear la técnica de deposición y remoción de capas delgadas de diferentes materiales, en su mayoría polímeros, metales y óxidos. Estas capas que tienen en promedio $2\mu\text{m}$ de espesor, dieron lugar a la construcción de diminutas micro máquinas cuya geometría es muy similar a las geometrías creadas por las técnicas de diseño mecánico tradicional. Se ha observado que las técnicas de diseño mecánico sufren modificaciones al ser aplicadas al ambiente de la microingeniería. Un ejemplo claro ha sido el concepto de los rodamientos, que para funcionar en estas micrométricas dimensiones, requieren de ser diseñados de forma distinta a las formas tradicionales conocidas. El desarrollo de micromotores es otro ejemplo que rompe con los paradigmas que se conocen en la mecánica. En este caso el eje de sus rotores permanece estático para poder brindar la estabilidad del motor, cosa que no es muy común en las máquinas conocidas. La escritura y lectura termomecánica también ha cambiado por completo los conceptos tradicionales de almacenamiento y manejo de información digital, abriendo la oportunidad de alcanzar fácilmente capacidades de administración de datos en el rango de los Terabytes.

Las metodologías, materiales y equipos requeridos para el desarrollo de estas técnicas de miniaturización ha sido otro de los elementos descritos en esta investigación. El conjunto de materiales que se requieren para realizar este tipo de trabajos, ofrece la oportunidad de desarrollar temas de investigación enfocados a adquirir el conocimiento y mejora de los equipos que se emplean actualmente. Un ejemplo claro es el desarrollo de las máquinas de deposición de fotoresistencia por giro, en el cual diferentes técnicas de monitoreo en tiempo real y control de velocidad de motores pueden aplicarse para mejorar el desempeño de estas máquinas.

La técnica comercial de manufactura del proceso MEMS multi usuario mostró que, aplicada adecuadamente permite la construcción de elementos de tecnología planar, adecuados para el desarrollo de microsensores y microactuadores. La complejidad del proceso y la exactitud

requerida para su fabricación, indica claramente la conveniencia de su uso y aplicación. Su implementación en un laboratorio de diseño, requiere de una inversión que es rápidamente recuperada por su comercialización, la cual es muy similar a la de los circuitos electrónicos actuales. A este respecto, la electrónica ha demostrado a lo largo de los años su confiabilidad y rendimiento económico que ha permitido muchos de los avances tecnológicos de la actualidad.

Los desarrollos experimentales enfocados a la obtención de estructuras miniaturizadas es otro de los puntos tratados. Las técnicas de manufactura comerciales son útiles y brindan la oportunidad a los usuarios de obtener un producto de alta calidad de manera segura en corto tiempo. Pero también se deben considerar los trabajos realizados de manera individual por investigadores de todo el mundo, los cuales han obtenido en sus laboratorios resultados sorprendentes. El desarrollo experimental de estos microsistemas requiere de un adecuado modelado matemático que permita estimar el comportamiento que podría tener un microsistema en condiciones de operación. Debido a esta razón, el tema del modelado matemático forma una parte fundamental de este trabajo. En el capítulo cuatro se han mostrado técnicas de modelado estructural que pueden utilizarse para este fin. La metodología energética de Rayleigh-Rytz es una técnica que debe trabajarse profundamente ya que la ausencia de los equipos de cómputo en la antigüedad, requirió de trabajos de modelado estructural avanzados que fueron evolucionando y sus principios son ampliamente válidos aún en nuestros días, por ello es importante que en el modelado estructural de un micromecanismo, se empleen no solo las técnicas computacionales sino que se combinen con las técnicas de análisis tradicional. Desde luego el trabajo experimental es una parte complementaria y permite la comprobación física de los fenómenos esperados durante la fase de diseño teórica. Los trabajos experimentales han formado una parte fundamental de esta investigación, por esta razón se han descrito detalladamente siguiendo un formato que de manera concreta, describe los equipos, materiales y procesos que se llevaron a cabo para la obtención de los resultados mostrados. De primordial importancia se tiene el resultado experimental de la frecuencia natural de una microviga en cantilever, con la cual se validan los resultados obtenidos en los trabajos de análisis numérico, los cuales también se han complementado con el modelado por medio del Método del Elemento Finito. Este método ha permitido mostrar que se pueden generar modelos donde se acoplan los diferentes campos físicos involucrados en un microsistema. El acoplamiento de un campo estructural al medio que lo rodea representa por si mismo un problema complejo. Este se ve incrementado al emplear en él

un medio de transmisión de energía que sea capaz de afectar al elemento estructural. El trabajo en el área de campos acoplados empleando el método del elemento finito ha sido una parte tratada en este trabajo y que puede explotarse ampliamente para el desarrollo de microsistemas.

Como parte complementaria a lo presentado anteriormente, a lo largo de esta investigación se han realizado de manera paralela, trabajos enfocados a la divulgación y enseñanza de esta tecnología. En los anexos de esta tesis se incluyen los resultados de las publicaciones y trabajos realizados durante este periodo.

6.2. PROPUESTAS DE TRABAJOS FUTUROS

Con el objetivo de continuar esta línea de investigación, se propone a continuación un conjunto de trabajos complementarios que pueden realizarse a futuro. Actualmente la divulgación que ha tenido el crecimiento de esta tecnología ha incrementado el número de estudiantes e investigadores en MEMS. Los trabajos propuestos se enlistan a continuación y se detallan brevemente:

- i. Retomar el método de Rayleigh-Rytz para encontrar el comportamiento modal de diferentes estructuras miniaturizadas: En este trabajo se deben reconsiderar los polinomios de aproximación para trabajar con otros que permitan la representación del comportamiento modal de otras estructuras micromaquinadas. Con ello se podrán comprobar experimentalmente los comportamientos de las microestructuras a diferentes frecuencias de operación.
- ii. Análisis del comportamiento de aterrizaje brusco en estructuras MEMS: Este trabajo de investigación debe estar enfocado a la parte no lineal del comportamiento creado por la fuerza electrostática a partir del punto crítico del voltaje de rompimiento. Al caracterizar este evento, se pueden proponer diferentes leyes de control que puedan interactuar con las grandes velocidades a las que se presenta este fenómeno.
- iii. Comparación de los parámetros obtenidos con las técnicas de Elementos Finitos: La comparación de métodos energéticos con soluciones encontradas por medio del Método del Elemento Finito es un área de trabajo que puede emplearse para predecir los

-
-
- comportamientos mecánicos de diferentes microestructuras y ayudar a proponer dimensiones estructurales adecuadas antes de su manufactura.
- iv. Desarrollar profundamente el uso de la técnica computacional de campos acoplados del programa ANSYS®: El programa computacional de Elemento Finito permite la incorporación de distintos ambientes físicos, por ello es importante continuar el desarrollo de estos modelos ya que estos permiten la incorporación de distintos ambientes de trabajo a los cuales podría trabajar un diseño MEMS.
 - v. Desarrollo de un modelo matemático que describa el proceso físico del degradado tipo isotrópico o anisotrópico sobre material metálico o cristalino: Este trabajo debe trabajar las simulaciones tipo Montecarlo para poder simular el ataque de diferentes degradantes sobre las superficies metálicas o cristalinas. Con ello se pretende estimar las geometrías que se pueden obtener al exponer las muestras a diferentes tipos de degradado. El objetivo de este desarrollo deberá dar como resultado las dimensiones finales de una fotomáscara para obtener las formas deseadas.
 - vi. Diseño mecánico de una máquina de deposición de fotoresistencia por giro a alta velocidad: Para el trabajo en fotolitografía es indispensable el desarrollo de la llamada *Spin coat Machine* o máquina para deposición por giro, mostrada anteriormente. Con esta propuesta se puede trabajar en áreas de diseño mecánico, electrónica y control, incluyendo también el área de procesos de manufactura.
 - vii. Implementación de un laboratorio de diseño MEMS: Este trabajo debe lidiar con la incorporación de equipo de cómputo, programas y licenciamiento de los mismos para la formación de un laboratorio de diseño MEMS. A demás de ello, debe incluir el desarrollo de un cuarto limpio que permita el análisis y post procesamiento de microestructuras MEMS una vez que han sido microfabricadas. Es importante recalcar que esta propuesta no considera la construcción de un laboratorio de fabricación de MEMS sino únicamente de diseño y post proceso. La construcción de un laboratorio de manufactura de MEMS requiere de la labor en conjunto de varios investigadores.
 - viii. Modelado y fabricación de sistemas de microfluidos: Los sistemas de microfluidos representan también un área de trabajo tan compleja como la mecánica estructural mostrada. Incluye el trabajo de modelado por medio del Método del elemento Finito y el trabajo en conjunto con otras disciplinas para desarrollar el área de los biosensores, parte importante de la evolución MEMS.

Como se ha observado, las propuestas de trabajo son amplias y pretenden continuar con el interés del estudiante en ésta área de la investigación. Algunos de los proyectos propuestos requieren de un soporte financiero y esto abre oportunidades de búsqueda de recursos económicos gubernamentales, privados, obtención de becas y trabajo con el ámbito industrial.

Uno de los beneficios obtenidos durante el desarrollo de esta investigación se refleja en la representación nacional e internacional de la SEPI ESIME en la rama de los MEMS. Se puede mencionar que se ha logrado con éxito la incorporación de la SEPI ESIME a la red nacional MEMS formada por la Fundación México Estados Unidos Para la Ciencia (FUMEC). Esta fundación liderada en la rama de MEMS por la M. en C. Guillermina Avendaño y la Ing. Gisela I. Martínez Rodríguez se ha encargado de promover y apoyar actividades que tienen que ver con la implementación de MEMS en el mercado nacional, la formación de recursos humanos en el área y la formación de la Red de diseño MEMS en la cual diferentes escuelas y centros de investigación del país colaboran como eslabones de una gran cadena de valores que requiere la implementación de esta tecnología en México. A esto se une el primer curso intersemestral de MEMS efectuado en la SEPI ESIME que contribuye con los trabajos académicos que se realizan en los diferentes campus de la escuela, en especial los desarrollados por el Dr. Luis Niño de Rivera, fuerte promotor de esta área de la ciencia en México.

REFERENCIAS

- AHN, C. H., KIM, Y. J. & ALLEN, M. G. (1993) A planar variable reluctance magnetic micromirror with fully integrated stator and coils. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 2, pp. 165-173, ISSN: 1057-7157.
- ALLAMEH, S. M. (2003) An introduction to mechanical properties related issues in mems structures. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*, Vol. 38, pp. 4115-4123, ISSN: 0022-2461
- ANSYS (2006) Theory reference manual. *Version 9.0*.
- BOSCH, C. S., XU, J., HAIGIS, J., ROSENTHAL, P. A., SOLOMON, P. R. & BUSTILLO, J. M. (2002) Real-time etch-depth measurements of mems devices. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS* Vol. 11, pp. 111-117, ISSN: 1057-7157.
- BRIAN, M. B., WAITS, C. M., KRIZMANIC, J. & GHODSSI, R. (2004) Development of a deep silicon phase fresnel lens using gray-scale lithography and deep reactive ion etching. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 13, pp. 113-120, ISSN: 1057-7157.
- BUCHMANN, L.-M., SCHNAKENBERG, U., TORKIER, M., LÖSCHNER, H., STENGL, G., TRAHER, C., FALLMANN, W., STANGL, G. & CEKAN, E. (1992) Lithography with high depth of focus by an ion projection system., *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 1, pp. 116-120, ISSN: 1057-7157.
- CHU, P. B., CHEN, J. T., YEHT, R., LIN, G., HUANG, J. C. P., WARNEKET, B. A. & PISTER, K. S. J. (1997) Controlled pulse-etching with xenon difluoride. *Transducers '97, the Ninth Inter. Conf. Solid-State Sensors & Actuators, Chicago, IL*, Vol., pp. ISSN.
- CHURCH, A. H. (1963) *Mechanical vibrations*, ISBN:0835799336.
- DARGAHI, J., PARAMESWARAN, M. & PAYANDEH, S. (2000) A micromachined piezoelectric tactile sensor for an endoscopic grasper—theory, fabrication and experiments. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, , Vol. 9, pp. 329-335, ISSN: 1057-7157.
- DENG, K., MEHREGANY, M. & DEWA, A. S. (1994) A simple fabrication process for polysilicon side - drive micromotors. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS* Vol. 3, pp. 126-133, ISSN: 1057-7157.
- DIZON, R., HAN, H., RUSSELL, A. G. & REED, M. L. (1993) An ion milling pattern transfer technique for fabrication of three - dimensional micromechanical structures. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS* Vol. 2, pp. 151-159, ISSN: 1057-7157.
- DOUGHERTY, G. M., SANDS, T. D. & PISANO, A. P. (2003) Microfabrication using one-step lpcvd porous polysilicon films. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 12, pp. 418-424, ISSN: 1057-7157.
- EUN, E. S., MULLER., R. S. & HIJAB., R. S. (1992) Front - to - backside alignment using resist - patterned etch control and one etching step. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 1, pp. 95-99, ISSN: 1057-7157.
- FEYNMAN, P. R. (1992) There's plenty of room at the bottom. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 1, pp. 60-66, ISSN: 9105621.
- FRANSSILA, S. (2004) *Introduction to microfabrication*, ISBN:0-470-85105-8.
- FRANSSILA., S. (2004) *Introduction to microfabrication*, ISBN:0-470-85105-8.
- GARDNER, J. W., VARADAN., V. & AWADELKARIM., O. O. (2001) *Microsensors, mems, and smart devices*, ISBN:0-471-86109-X.
- GENTA, G. (1993) *Vibration of structures and machines*, ISBN:0387985069.

-
-
- GIANCHANDANI, Y. B. & NAJAFI, K. (1992) A bulk silicon dissolved wafer process for microelectromechanical devices. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS* Vol. 1, pp. 77-85, ISSN: 1057-7157.
- GUIDE, A. (2005) Coupled field analysis guide.
- HAO, Z., WINGFIELD, B., WHITLEY, M., BROOKS, J. & HAMMER, J. A. (2003) A design methodology for a bulk-micromachined two-dimensional electrostatic torsion micromirror. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS* Vol. 12, pp. 692-701, ISSN: 1057-7157.
- HECHT, M. H., VASQUEZ, R. P., GRUNTHANER, F. J., ZAMANI, N. & MASERJIAN, J. (1985) A novel x-ray photoelectron spectroscopy study of the al/sio₂ interface. *Journal of Applied Physics*, Vol. 57, pp. 5256-5261, ISSN: 0021-8979/85.
- HIRANO, T., FURUHATA, T., GABRIEL, K. J. & FUJITA, H. (1992) Design, fabrication, and operation of submicron gap comb drive microactuators. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 1, pp. 52-59, ISSN: 1057-7157.
- HOFFMAN, E., WARNEKE, B., KRUGLICK, E., WEIGOLD, J. & PISTER, K. S. J. (1995) 3d structures with piezoresistive sensors in standard cmos. *PROCEEDINGS IEEE MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol., pp. 288-293, ISSN: 0-7803-2503-6.
- HOFFMAN, E., WARNEKE, B., KRUGLICK, E., WEIGOLD, J. & PISTER, K. S. J. (1995) 3d structures with piezoresistive sensors in standard cmos. *PROCEEDINGS IEEE MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol., pp. 288-293, ISSN: 0-7803-2503-6.
- HOPWOOD, J. A. (2000) A microfabricated inductively coupled plasma generator. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 9, pp. 309-313, ISSN: 1057-7157.
- JACOBSEN, S. (1958) *Engineering vibrations pp. 71*, ISBN:11158422
- JAYACHANDRAN, J. P., REED, H. A., ZHEN, H., RHODES, L. F., HENDERSON, C. L., ALLEN, S. A. B. & KOHL, P. A. (2003) Air-channel fabrication for microelectromechanical systems via sacrificial photosensitive polycarbonates. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 12, pp. 147-159, ISSN: 1057-7157.
- KENNEDY, K., GROOM, K. M. & HOGG, R. A. (2006) Fabrication of v-groove gratings in inp by inductively coupled plasma etching with sicl₄/ar. *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 21, pp. L1-L5, ISSN: 0268-1242.
- KING, W. P., KENNY, T. W., GOODSON, K. E., CROSS, G. L., DESPONT, M., DÜRIG, U. T., ROTHUIZEN, H., BINNIG, G. & VETTIGER, P. (2002) Design of atomic force microscope cantilevers for combined thermomechanical writing and thermal reading in array operation. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 11, pp. 765-774, ISSN: 1057-7157.
- KOESTER, D. A., MAHADEVAN, R., HARDY, B. & MARKUS, K. (2001) Mumps design handbook. IN *MICROSYSTEMS*, C. I. (Ed.).
- KOVACS, G. T. A. (1998) *Micromachined transducers source book*, ISBN:0-07-290722-3.
- KOVACS, G. T. A. (1998) *Micromachined transducers source book*, ISBN:0-07-290722-3.
- LEE, H. S. & YOON, J. (2005) A simple and effective lift-off with positive photoresist. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, Vol. 15, pp. 2136-2140, ISSN: 0960-1317
- LEE, M., CHEUNG, L. S. L., LEE, Y. & ZOHAR, Y. (2005a) Height effect on nucleation-site activity and size-dependent bubble dynamics in microchannel convective boiling. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, Vol. 15 pp. 2121-2129, ISSN: 0960-1317
-
-

-
-
- LEE, M. C., KANG, S. J., JUNG, K. D., CHOA, S. & CHO, Y. C. (2005b) A high yield rate mems gyroscope with a packaged siog process. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, Vol. 15, pp. 2003-2010, ISSN: 0960-1317
- LEGTENBERG, R., BERENSCHOT, E., BAAR, J. & ELWENSPOEK, M. (1998) An electrostatic lower stator axial-gap polysilicon wobble motor part ii: Fabrication and performance, . *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS* Vol. 7, pp. 87-93, ISSN: 1057-7157.
- LEGTENBERG, R., BERENSCHOT, E., ELWENSPOEK, M. & FLUITMAN, J. H. (1997) A fabrication process for electrostatic microactuators with integrated gear linkages. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 6, pp. 234-241, ISSN: 1057-7157.
- MADOU, M., J. (2002) *Fundamentals of microfabrication*, ISBN:0-8493-0826-7.
- MADOU., M., J. (2002) *Fundamentals of microfabrication*, ISBN:0-8493-0826-7.
- MARTINEZ, F. C. C., N., WASILIK, M. & PISANO, A. P. (2004) Optimized ultra-drie for the mems rotary engine power system. *European micro and nano systems 2004* France, TIMA, Grenoble, FRANCE (2004) ISBN:2-916187-02-2.
- MATSUZUKA, N., HIRAI, Y. & TABATA, O. (2005) A novel fabrication process of 3d microstructures by double exposure in deep x-ray lithography (d2xrl). *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, Vol. 15, pp. 2056-2062, ISSN: 0960-1317.
- MELVAS, P., KÄLVESTEN, E. & STEMME, G. (2001) A surface-micromachined resonant-beam pressure-sensing structure. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 10, pp. 498-502, ISSN: 1057-7157.
- MENCIASSI, A., MOGLIA, A., GORINI, S., PERNORIO, G., STEFANINI, C. & DARIO, P. (2005) Shape memory alloy clamping devices of a capsule for monitoring tasks in the gastrointestinal tract. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, Vol. 15, pp. 2045-2055, ISSN: 0960-1317.
- MOORE, D. F. & SYMS, R. R. A. (2003) Silicon technology for optical mems. *Europhysics News*, Vol. 34, pp. ISSN.
- MUTHUKUMARAN., P. (2004) Microcantilever tip. Montréal.
- MUTHUKUMARAN., P. (2006) Effect of voltage on snapping. Montreal Canada.
- MUTHUKUMARAN., P., STIHARU., I. & BHAT., R. B. (2002) Boundary conditioning of capacitive mems devices through fabrication methods and operating environments". *Proceedings of ISSS-SPIE 2002/SD-406*, Vol., pp. ISSN.
- NATHANSON, H. C. (1967) The resonant gate transistor. *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 14, pp. 117-133, ISSN: 0018-9383.
- NIKLAUS, F., HAASL, S. & STEMME, G. (2003) Arrays of monocrystalline silicon micromirrors fabricated using cmos compatible transfer bonding. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 12, pp. 465-469, ISSN: 1057-7157.
- PAN, L.-W. & LIN, L. (2001) Batch transfer of liga microstructures by selective electroplating and bonding,. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, , Vol. 10, pp. 25-32, ISSN: 1057-7157.
- PAPAUTSKY, I., BRAZZLE, J., SWERDLOW, H. & FRAZIER, A. B. (1998) A low-temperature ic-compatible process for fabricating surface-micromachined metallic microchannels, , june 1998 267, . *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 7, pp. 267-273, ISSN: 1057-7157.
-
-

-
- PATTEKAR, A. V. & KOTHARE, M. V. (2004) A microreactor for hydrogen production in micro fuel cell applications,. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 13, pp. 7-18, ISSN: 1057-7157.
- PELESCO, J. A. & BERNSTEIN., D. H. (2002) *Modeling mems and nems*, ISBN:1-58488-306-5.
- PELESCO., J. A. & BERNSTEIN., D. H. (2002) *Modeling mems and nems*, ISBN:1-58488-306-5.
- RAIS, Z. M. & AYAZI, F. (2005) Characterization of high-q spiral inductors on thick insulator-on-silicon, . *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, Vol. 15, pp. 2105-2112, ISSN: 0960-1317.
- RAO, S. (1995) *Mechanical vibrations*, ISBN:0-201-52686-7.
- RODJEGARD, H., ANDERSSON, G., RUSU, C., LÖFGREN, M. & BILLGER, D. (2005) Capacitive slanted-beam three-axis accelerometer: I. Modelling and design,. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*,15 (2005) 1989–1996 20 September 2005, Vol. 15, pp. 1989-1996 ISSN: 0960-1317.
- SCHEEL, H. J. & FUKUDA, T. (2003) *The development of crystal growth technology*, ISBN:0471495247.
- SENTURIA, S. D., HARRIS, R. M., JOHNSON, B. P., KIM, S., NABORS, K., SHULMAN, M. A. & WHITE, J. K. (1992) A computer - aided design system for microelectromechanical systems (memcad). *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 1, pp. 3-13, ISSN: 1057-7157.
- SESHIA, A. A., PALANIAPAN, M., ROESSIG, T. A., HOWE, R. T., GOOCH, R. W., SCHIMERT, T. R. & MONTAGUE, S. (2002) A vacuum packaged surface micromachined resonant accelerometer. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 11, pp. 784-793, ISSN: 1057-7157.
- SHEATS., J. R. & SMITH., B. W. (1998) *Microlithography science and technology*, ISBN: 0-8247-9953-4.
- SHIH, C.-L., LAI, B.-K., KAHN, H., PHILLIPS, S. M. & HEUER, A. H. (.2001) A robust co-sputtering fabrication procedure for tini shape memory alloys for mems. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 10, pp. 69-79, ISSN: 1057-7157.
- STANCZYK, T., ILIC, B., HESKETH, P. J. & BOYD, J. G. (2000) A microfabricated electrochemical actuator for large displacements. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 9, pp. 314-320, ISSN: 1057-7157.
- STEINGOETTER, I. & FOUCKHARDT, H. (2005) Deep fused silica wet etching using an au-free and stress-reduced sputter-deposited cr hard mask. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, , Vol. 15 pp. 2130-2135 ISSN: 0960-1317.
- STIHARU, I. (2005) *Micromaquinado y corte con laser*. Montreal, Qc.
- SUGANO, K. & TABATA, O. (2002) Effects of apertura size and pressure on xef2 etching of silicon. *Microsystems Technologies* Vol. 9, pp. ISSN: 0946-7076.
- TAKAHATA, K. & GIANCHANDANI, Y. B. (2002) Batch mode micro-electro-discharge machining. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 11, pp. 102-110, ISSN: 1057-7157.
- TEA, N. H., MILANOVIC, V., ZINCKE, C. A., SUEHLE, J. S., GAITAN, M., SAGHLOUL, M. E. & GEIST, J. (1997) Hibrid postprocessing etching for cmos-compatible mems. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 6, pp. 363-372, ISSN: 1057-7157.
- TEMPLE, G. (1993) *Rayleig’s principle and its applications to engineering*, ISBN:048643902X.
-

-
-
- TOSHIYOSHI, H., FUJITA, H. & UEDA, T. (1995) A piezoelectrically operated optical chopper by quartz micromachining, . *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 4, pp. 3-9, ISSN: 1057-7157.
- WANG, S. S., MCNEIL, V. M. & SCHMIDT, M. A. (1992) An etch - stop utilizing selective etching of n - type silicon by pulsed potential anodization,. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, , Vol. 1, pp. 187-192, ISSN: 1057-7157.
- WESTE, N. & ESHRAGHIAN, K. (1993) *Principles of cmos vlsi design*. Eua, ISBN:020108222.
- WILLIAM, K. H. R. (1968) *The plastic deformation of metals*, ISBN:0713121815.
- YAZDI, N. & NAJAFI, K. (2000) An all-silicon single-wafer micro-g accelerometer with a combined surface and bulk micromachining process,. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 9, pp. 544-550, ISSN: 1057-7157.
- YI, S. H., PREISSIG, F. J. & KIM, E. S. (2002) Electroless nickel films: Properties and fabricated cavity structure. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, Vol. 11, pp. 293-301, ISSN: 1057-7157.
- ZHAO, Y., MAO, M., HOROWITZ, R., MAJUMDAR, A., VARESI, J., NORTON, P. & KITCHING, J. (2002) Optomechanical uncooled infrared imaging system: Design, microfabrication, and performance. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS* Vol. 11, pp. 136-146, ISSN: 1057-7157.
- ZIENKIEWICS., O. C. & TAYLOR., R. L. (1989) *The finite element method*, UK, ISBN:0-07-084174-8.
- ZULEHNER, W. (2000) Historical overview of silicon crystal pulling development *Materials Science and Engineering*, Vol. 73, pp. 7-15, ISSN: 0921-5107