



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE INTERRUPTORES MEMS
PARA APLICACIONES EN ALTA FRECUENCIA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

**OSCAR ROMERO AROCHE
ROGELIO LÓPEZ MORALES**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JORGE RODRÍGUEZ CUEVAS**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D. F., 2005



m. 344013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS

*A mi madre, abuela y hermana, por su apoyo para
llegar al término de un ciclo más en mi preparación, por su esfuerzo
para hacer de mí un profesionalista y por la dedicación que siempre me brindaron.*

Oscar

*A mi padre y hermano, gracias por estar siempre a mi lado,
a mis tíos, sus consejos y apoyo incondicional hicieron posible esto... gracias,
a mi madre, siempre fuiste y serás parte de mí... te llevaré en mi corazón por siempre.*

Rogelio

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a:

Dios, porque es el dueño de todas las cosas y en su infinita misericordia, tuvo a bien darnos esta profesión.

Nuestros familiares, porque siempre nos mostraron su amor, apoyándonos en todo cuanto pudieron.

Nuestros profesores, porque nos brindaron su ayuda y consejo profesional.

El *Dr. Jorge Rodríguez Cuevas* por habernos motivado y apoyado a realizar este trabajo, pero sobre todo apreciamos el tiempo y experiencia que nos brindó para que éste se realizara con la mejor calidad posible.

El *Dr. Oleksandr Martynyuk* por su enorme interés y contribución en el presente trabajo.

El *Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT)* por la beca otorgada para la realización del presente trabajo.

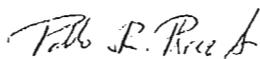
Nuestros amigos, por su constante estímulo y aliento para seguir adelante.

Aquellas personas, que siempre nos comprendieron y brindaron su apoyo y fortaleza incondicional en cada momento de la vida.

Las escuelas que nos formaron.

La *UNAM*, por ser nuestra Alma Mater, por los múltiples conocimientos que nos ha transmitido y por dejarnos gozar como alumnos a tan amada institución.

JURADO



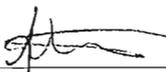
Dr. Pablo Pérez Alcazar
Presidente



Dr. Jorge Rodríguez Cuevas
Vocal



Dr. José Ismael Martínez López
Secretario



Dr. Oleksandr Martynyuk
1^{er} Suplente



Dr. Volodymyr Svyryd
2^{do} Suplente

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Introducción | 1 |
| 1. Microsistemas electromecánicos | 3 |
| 1.1. ¿Qué son los MEMS? | 3 |
| 1.2. Reseña histórica de los MEMS | 4 |
| 1.3. MEMS para RF | 5 |
| 1.4. ¿Por qué usar MEMS para RF? | 6 |
| 1.5. Conclusiones | 6 |
| 2. Aspectos Generales | 7 |
| 2.1. ¿Qué es el micromaquinado? | 7 |
| 2.1.1. Micromaquinado de volumen | 8 |
| 2.1.2. Micromaquinado de superficie | 8 |
| 2.2. Materiales para la fabricación de MEMS | 9 |
| 2.2.1. Silicio | 9 |
| 2.3. Técnicas de deposición para la fabricación de MEMS | 13 |
| 2.3.1. Crecimiento epitaxial | 13 |
| 2.3.2. Oxidación térmica | 13 |
| 2.3.3. Pulverización catódica (Sputtering) | 14 |
| 2.3.4. Evaporación | 15 |
| 2.3.5. Deposición química en fase vapor | 16 |
| 2.3.6. Deposición de materiales | 16 |
| 2.3.7. Métodos de giro | 18 |
| 2.3.8. Litografía | 18 |
| 2.3.9. Grabado | 19 |
| 2.4. Conclusiones | 19 |
| 3. Estado del arte de los interruptores MEMS para RF | 21 |
| 3.1. Interruptores MEMS para RF | 21 |
| 3.1.1. Clasificación de los interruptores MEMS | 23 |
| 3.2. ¿Por qué usar interruptores MEMS para RF? | 25 |
| 3.3. Estado del arte de los interruptores MEMS | 27 |
| 3.3.1. Interruptor capacitivo RALYTHEON | 27 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.3.2. | Interruptor en paralelo desarrollado por la Universidad de Illinois | 28 |
| 3.3.3. | Interruptor capacitivo <i>en línea</i> | 29 |
| 3.3.4. | Interruptor de bajo voltaje de actuación | 30 |
| 3.3.5. | Interruptor capacitivo en serie desarrollado por los laboratorios LINCOLN | 31 |
| 3.3.6. | Interruptor en serie desarrollado por la Compañía ROCKWELL SCIENTIFIC | 32 |
| 3.3.7. | Interruptor en forma de S de bajo voltaje de actuación | 33 |
| 3.4. | Aplicaciones de los interruptores MEMS | 35 |
| 3.5. | Conclusiones | 37 |
| 4. | Modelado Electromecánico del Interruptor | 39 |
| 4.1. | Especificaciones de diseño | 39 |
| 4.2. | Análisis electromecánico del interruptor capacitivo | 39 |
| 4.3. | Diseño mecánico | 43 |
| 4.4. | Diseño de los interruptores | 44 |
| 4.4.1. | Diseño del primer interruptor | 44 |
| 4.4.2. | Diseño mecánico del primer interruptor | 44 |
| 4.4.3. | Diseño del segundo interruptor | 48 |
| 4.4.4. | Diseño mecánico del segundo interruptor | 48 |
| 4.5. | Simulación mecánica | 51 |
| 4.5.1. | Constante de rigidez de la viga | 51 |
| 4.6. | Simulación electromecánica | 53 |
| 4.6.1. | Voltaje de actuación | 53 |
| 4.6.2. | Voltaje de liberación | 55 |
| 4.7. | Simulación dinámica | 57 |
| 4.7.1. | Velocidad de conmutación | 57 |
| 4.8. | Resultados finales y conclusiones | 59 |
| 5. | Modelado Electrodinámico del Interruptor | 61 |
| 5.1. | Factor de Calidad de Conmutación (FCC) | 61 |
| 5.2. | FCC de los interruptores propuestos | 62 |
| 5.2.1. | Modelo eléctrico de los interruptores propuestos | 63 |
| 5.3. | Simulación electrodinámica | 64 |
| 5.3.1. | Parámetros del modelo eléctrico | 65 |
| 5.4. | Optimización | 68 |
| 5.5. | Resultados | 69 |
| 5.5.1. | Valores del modelo eléctrico | 69 |
| 5.5.2. | Estudio paramétrico para obtener el Factor de Calidad de Conmutación | 71 |
| 5.5.3. | FCC del primer interruptor | 72 |
| 5.5.4. | FCC del segundo interruptor | 72 |
| 5.5.5. | Modificaciones al proceso MetalMUMI's | 74 |
| 5.6. | Conclusiones | 76 |

| | |
|--|-----------|
| 6. Conclusiones Generales | 77 |
| Apéndice A. Proceso MetalMUMPs | 81 |
| A.1. Introducción | 81 |
| A.2. Pasos del proceso MetalMUMPs | 82 |
| A.2.1. Flujo del proceso MetalMUMPs | 85 |
| Apéndice B. Introducción a COVENTORWARE | 87 |
| B.1. Descripción general | 87 |
| B.1.1. Principales componentes de COVENTORWARE | 88 |
| B.2. Diseño de MEMS utilizando COVENTORWARE | 88 |
| B.2.1. Diseño y simulación a nivel sistema | 89 |
| B.2.2. Diseño y simulación física | 89 |
| Apéndice C. Bandas de frecuencia | 91 |
| Bibliografía | 93 |
| Índice alfabético | 96 |

Índice de figuras

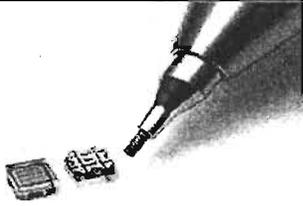
| | | |
|-------|---|----|
| 2.1. | Proceso de micromaquinado | 8 |
| 2.2. | Planos cristalográficos | 10 |
| 2.3. | Planos de corte, caras primarias y secundarias de las obleas | 11 |
| 2.4. | Tipos de esfuerzos que presentan las capas estructurales al ser depositadas | 14 |
| 3.1. | Configuraciones de los Interruptores MEMS | 23 |
| 3.2. | Interruptor capacitivo RAYTHEON | 27 |
| 3.3. | Interruptor desarrollado por la Universidad de Illinois | 28 |
| 3.4. | Interruptor capacitivo desarrollado por la universidad de Michigan | 29 |
| 3.5. | Interruptor de bajo voltaje de actuación | 30 |
| 3.6. | Interruptor en serie desarrollado por los Laboratorios Lincoln | 31 |
| 3.7. | Vista transversal del interruptor en serie <i>Lincoln</i> | 32 |
| 3.8. | Interruptor en serie desarrollado por la compañía ROCKWELL SCIENTIFIC | 32 |
| 3.9. | Parte superior del interruptor en forma de S. | 33 |
| 3.10. | Parte inferior del interruptor en forma de S. | 33 |
| 3.11. | Concepto básico del interruptor en forma de S. | 34 |
| 3.12. | Interruptor en forma de S durante la transición del estado abierto al cerrado | 34 |
| 3.13. | Aplicaciones de los interruptores MEMS | 36 |
| 4.1. | Fuerzas ejercidas en el interruptor electrostático | 40 |
| 4.2. | Voltaje de actuación de un interruptor MEMS electrostático | 42 |
| 4.3. | Conexión entre los parámetros electromecánicos del interruptor | 43 |
| 4.4. | Primer interruptor | 44 |
| 4.5. | Flujo del proceso de fabricación del primer interruptor | 46 |
| 4.6. | Dimensiones del primer interruptor | 47 |
| 4.7. | Segundo interruptor | 48 |
| 4.8. | Flujo del proceso de fabricación del segundo interruptor | 49 |
| 4.9. | Dimensiones del segundo interruptor | 50 |
| 4.10. | Mallado de la viga del primer interruptor | 52 |
| 4.11. | Mallado de la viga del segundo interruptor | 52 |
| 4.12. | Constante de rigidez de las vigas de los interruptores | 53 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.13. | Mallado del primer interruptor | 54 |
| 4.14. | Mallado del segundo interruptor | 54 |
| 4.15. | Voltaje de actuación de los interruptores | 55 |
| 4.16. | Fenómeno de histéresis en un interruptor electrostático | 56 |
| 4.17. | Fenómeno de histéresis en los interruptores propuestos | 56 |
| 5.1. | Circuito ideal equivalente de un interruptor en serie | 62 |
| 5.2. | Trayectoria que sigue la señal de microondas en el primer interruptor y su circuito equivalente | 63 |
| 5.3. | Trayectoria que sigue la señal de microondas en el segundo interruptor y su circuito equivalente | 64 |
| 5.4. | Modelo eléctrico general | 64 |
| 5.5. | Comportamiento de los elementos del modelo eléctrico del primer interruptor en la carta de Smith | 66 |
| 5.6. | Comportamiento de los elementos del modelo eléctrico del segundo interruptor en la carta de Smith | 67 |
| 5.7. | Modelo eléctrico utilizado en la obtención de las impedancias de los interruptores en los estados abierto y cerrado | 71 |
| 5.8. | Factor de calidad de conmutación del primer interruptor | 72 |
| 5.9. | Factor de calidad de conmutación del segundo interruptor | 73 |
| 5.10. | Comparación entre los factores de conmutación de los dos interruptores | 73 |
| 5.11. | Factor de calidad de conmutación del segundo interruptor con una capa de 500 [nm] de Pt | 74 |
| 5.12. | Factor de calidad de conmutación del segundo interruptor con una conductividad de la capa de polisilicio del doble | 75 |
| 5.13. | Factor de calidad de conmutación del primer interruptor con la segunda capa de sacrificio de 2 [μm] | 75 |
| 6.1. | Flujo de diseño utilizado | 78 |
| A.1. | Flujo del proceso MetalMUMPs | 86 |
| B.1. | Módulos que conforman COVENTORWARE | 87 |

Índice de tablas

| | | |
|-------|--|----|
| 1.1. | Aplicaciones de los dispositivos MEMS | 5 |
| 3.1. | Clasificación de los interruptores MEMS | 24 |
| 3.2. | Comparación entre interruptores MEMS, diodos PIN e interruptores a FET's para RF | 26 |
| 3.3. | Ventajas y desventajas de interruptores MEMS para RF | 26 |
| 3.4. | Parámetros del interruptor capacitivo RAYTHEON | 28 |
| 3.5. | Parámetros del interruptor en paralelo desarrollado por la Universidad de Illinois | 29 |
| 3.6. | Parámetros del interruptor capacitivo <i>en línea</i> desarrollado por la Universidad de Michigan | 30 |
| 3.7. | Parámetros del interruptor de bajo voltaje de actuación desarrollado por la Universidad de Michigan | 31 |
| 3.8. | Parámetros del interruptor en serie desarrollado por los laboratorios Lincoln | 32 |
| 3.9. | Parámetros del interruptor desarrollado por la compañía ROCKWELL SCIENTIFIC | 33 |
| 3.10. | Parámetros del interruptor en forma de S en serie con contacto metal-metal | 34 |
| 4.1. | Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la simulación | 51 |
| 4.2. | Resultados de la simulación de la constante de rigidez de la viga del primer interruptor | 52 |
| 4.3. | Resultados de la simulación de la constante de rigidez de la viga del segundo interruptor | 53 |
| 4.4. | Resultados de la simulación del voltaje de actuación | 55 |
| 4.5. | Resultados de la simulación del voltaje de liberación | 57 |
| 4.6. | Resultados de la simulación de la frecuencia de resonancia mecánica y velocidad de conmutación | 58 |
| 4.7. | Parámetros y resultados del primer interruptor | 58 |
| 4.8. | Parámetros y resultados del segundo interruptor | 58 |
| 5.1. | Impedancia del primer interruptor en el estado abierto y cerrado | 70 |
| 5.2. | Impedancia del segundo interruptor en el estado abierto y cerrado | 70 |

| | |
|--|----|
| 5.3. Impedancia de los anclajes y contactos del primer interruptor | 70 |
| 5.4. Impedancia de los anclajes y contactos del segundo interruptor | 70 |
| 6.1. Parámetros y resultados finales del primer interruptor | 80 |
| 6.2. Parámetros y resultados finales del segundo interruptor | 80 |
| A.1. Nombres de las capas, espesores y máscaras usadas en el proceso MetalMUMPs | 84 |
| A.2. Parámetros mecánicos y eléctricos de los materiales del proceso MetalMUMPs | 84 |
| C.1. Bandas de Frecuencia | 91 |



Introducción

Introducción General

Los altos niveles de desempeño y la creciente demanda de flexibilidad de operación requeridos en los sistemas de telecomunicaciones actuales han llevado a la búsqueda de soluciones con mayor nivel tecnológico. Dentro de las nuevas tecnologías aparecen los microsistemas electro-mecánicos (MEMS).

MEMS (Microelectromechanical Systems) es un acrónimo que describe un campo de investigación multidisciplinario de acelerado crecimiento sobre sistemas a escala microscópica. Estos sistemas comprenden la integración de elementos electrónicos y mecánicos al utilizar la microelectrónica junto con las tecnologías de micromaquinado sobre un mismo sustrato, permitiendo así la posibilidad de desarrollar etapas de sensado, de actuación, de procesamiento y de comunicación en un mismo circuito integrado. La tecnología MEMS ofrece una amplia gama de ventajas y permitirá el desarrollo de productos inteligentes en diversas áreas tales como biomedicina, instrumentación, control y telecomunicaciones, entre otras.

En la actualidad la conmutación electrónica en los circuitos de comunicaciones se realiza principalmente mediante diodos pin o transistores de efectos de campo FET's (dispositivos de estado sólido), sin embargo las pérdidas de inserción en estos dispositivos resultan ser altas en aplicaciones críticas. Comparando el desempeño de dichos dispositivos con los interruptores MEMS se tiene que mientras los interruptores a FET's presentan pérdidas dependiendo de la frecuencia entre 0.4 a 2.5 dB y los diodos pin entre 0.3 a 1.2 dB, los interruptores MEMS presentan pérdidas de tan solo 0.05 a 0.2 dB. Además de poseer frecuencias de corte más altas, mejor aislamiento, menores productos de intermodulación, menor consumo de potencia y un costo mucho más bajo.

En el área de las telecomunicaciones, uno de los dispositivos MEMS más importantes es el **interruptor**, debido a que es un elemento básico, utilizado en diversos circuitos y sistemas de comunicaciones, tales como desplazadores de fase, transceptores, antenas reconfigurables y arreglos de fase, entre otros.

Objetivo y metodología de esta tesis

El objetivo de esta tesis es analizar, diseñar y simular diferentes estructuras de interruptores MEMS electrostáticos de bajo voltaje de actuación para aplicaciones en la banda Ka utilizando el proceso de fabricación MetalMUMPs.

Primeramente se analizará el proceso de fabricación y se determinarán las opciones viables para diseñar las estructuras de los interruptores MEMS, posteriormente se simularán dichas estructuras con ayuda de software especializado.

Estructura de esta tesis

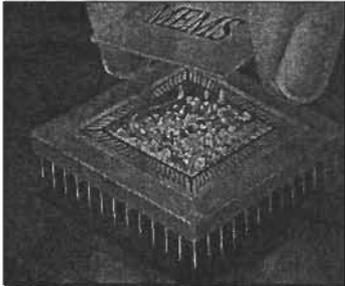
En el primer capítulo de esta tesis se muestra un panorama general de los Microsistemas Electromecánicos dentro del desarrollo tecnológico actual en telecomunicaciones.

En el segundo capítulo se hace un repaso general del conjunto de técnicas para diseñar y fabricar los Microsistemas Electromecánicos, de las características de los materiales utilizados en su fabricación y de las técnicas utilizadas actualmente en la deposición de dichos materiales.

En el tercer capítulo se definen el concepto de interruptor MEMS para RF y sus parámetros de diseño más importantes. Además se hace una revisión del *estado del arte* de los interruptores MEMS, mostrando los más sobresalientes durante los últimos diez años y se hace una descripción de las configuraciones que presentan mejores características, así como de los materiales utilizados en su fabricación.

En el cuarto capítulo se analizan los parámetros de los que depende el **voltaje de actuación** de un interruptor electrostático MEMS. Posteriormente se propone un proceso de fabricación real y a partir de éste se diseñan dos diferentes estructuras de interruptores MEMS para aplicaciones en la banda Ka y se caracterizan.

Finalmente en el quinto capítulo se optimizan y caracterizan en **frecuencia** los interruptores propuestos mediante el uso de la figura de mérito llamada *Factor de Calidad de Conmutación*.



Capítulo 1

Microsistemas electromecánicos

1.1. ¿Qué son los MEMS?

En América, esta tecnología es conocida como *microsistemas electromecánicos* (MEMS); en Europa la llaman *tecnología de microsistemas* (MST). Los MEMS son simultáneamente un conjunto de herramientas, un producto físico y una metodología. Algunas definiciones son:

- ▶ Es un conjunto de técnicas y procesos para diseñar y crear sistemas miniatura.
- ▶ Es un producto físico a menudo especializado y único para una aplicación final.
- ▶ "MEMS es una manera de hacer cosas". Estas "cosas" fusionan las funciones de sensado y actuación con el cálculo y comunicación de parámetros físicos para controlar localmente parámetros físicos en la micro escala, y aún causar efectos en escalas mucho más grandes.

Aunque no existe una definición universal, los MEMS poseen un número de características distintivas. Son sistemas miniatura fabricados mediante *micro-maquinado* sobre un sustrato y formados de uno o más componentes o estructuras. Permiten funciones de muy alto nivel. Por lo general integran funciones pequeñas dentro de un sistema para mayores utilidades. Traen beneficios en cuanto a costos, directamente a través de su bajo precio por unidad, o indirectamente a través de los bajos costos de servicio y mantenimiento.

En la actualidad aunque la mayoría de los productos MEMS entran en la categoría de componentes o subsistemas, el énfasis de ésta tecnología recae en sus beneficios como "sistema". A pesar de que los microsistemas estarán disponibles

en un futuro cercano, su evolución recae en el éxito de los componentes actuales. La construcción de MEMS es un proceso evolutivo en el que en los últimos 30 años se ha aprendido a construirlos mediante el micromaquinado, recientemente se han integrado dentro de subsistemas y últimamente dentro de microsistemas completos.

Un ejemplo notable es la evolución de sensores para las bolsas de aire de sistemas de seguridad en accidentes automovilísticos. Los primeros sensores eran interruptores mecánicos. Después evolucionaron a sensores micromecánicos que median la aceleración de manera directa. La generación actual integra circuitería electrónica con sensores micromecánicos para proveer auto-diagnósticos e información digital. Eso anticipa que la próxima generación de estos dispositivos incorporará circuitos electrónicos en la totalidad de la bolsa de aire para decidir su despliegue e inflado.

Los ejemplos de futuros microsistemas no se limitan a aplicaciones automovilísticas (ver tabla 1.1). El desarrollo de componentes micromecánicos para el control de fluidos comienza a dar frutos. Éstos permitirán la integración de microbombas con microválvulas y depósitos para la construcción de nuevos sistemas miniatura que administren medicamentos [1].

1.2. Reseña histórica de los MEMS

Las raíces de los *microsistemas electromecánicos* recaen en los desarrollos tecnológicos que acompañaron a la Segunda Guerra Mundial. En particular, en el desarrollo del radar, basado en la investigación de materiales semiconductores puros. Estos materiales, en especial el silicio puro, son de vital importancia en las tecnologías de circuitos integrados y actualmente en la de los MEMS.

En 1964, H.C. Nathanson y sus compañeros en Westinghouse construyeron el primer lote de fabricación planar de dispositivos MEMS. Su transistor de compuerta resonante presentó todas las características de los modernos MEMS. El modelado matemático tuvo un papel importante en el desarrollo de este sistema.

La invención del microprocesador en 1970, a pesar de que no tuvo una contribución a los MEMS en términos técnicos, provocó un interés en las técnicas de fabricación litográfica que tendrían un gran impacto en los métodos de fabricación de MEMS.

En 1979, surgió el primer acelerómetro MEMS desarrollado por investigadores de la Universidad de Stanford. El acelerómetro MEMS fue el primer dispositivo MEMS que tuvo éxito comercial. En 1998, se fabricaron 27 millones de micro-accelerómetros de silicio. Ver tabla 1.1.

Algunos otros desarrollos tecnológicos, que impulsaron el desarrollo de la nanotecnología, en el periodo de 1980 a 1990, fueron: El microscopio de escaneo por efecto túnel en 1982, el microscopio de fuerza atómica en 1986 y el descubrimiento del nanotubo de carbón en 1991 [2].

TABLA 1.1: Aplicaciones de los dispositivos MEMS [3].

| Producto | Descubrimiento | Evolución | Expansión y reducción de costo | Comercialización |
|------------------------------|------------------|------------------|-----------------------------------|------------------|
| Sensores de presión | 1954-1960 | 1960-1975 | 1975-1990 | 1990-2005 |
| Acelerómetros | 1974-1985 | 1985-1990 | 1990-1998 | 1998 |
| Sensores de gas | 1986-1994 | 1994-1998 | 1998-2005 | 2005 |
| Válvulas | 1980-1988 | 1988-1996 | 1996-2002 | 2002 |
| Inyectores | 1972-1984 | 1984-1990 | 1990-1998 | 1998 |
| Displays | 1980-1986 | 1986-1998 | 1998-2004 | 2004 |
| Sensores bioquímicos | 1980-1994 | 1994-1999 | 1999-2004 | 2004 |
| Sensores giratorios | 1982-1990 | 1990-1996 | 1996-2002 | 2002 |
| Interruptores para RF | 1991-1998 | 1998-2001 | 2001-2005 | 2005 |
| Micro-relays | 1977-1982 | 1993-1998 | 1998-2006 | 2006 |

1.3. MEMS para RF

A mediados de los 90's se publicaron una gran variedad de artículos sobre dispositivos MEMS para RF; sin embargo, al final de los 90's los artículos presentaban más y más retos acerca del funcionamiento de estos dispositivos, lo cual era indicación de que esta tecnología comenzaba a madurar.

Los MEMS para RF son dispositivos construidos por medio de micromaquinado, los cuales interactúan con señales eléctricas que pertenecen al rango de radiofrecuencias (ver Apéndice C).

Los dispositivos MEMS para RF de mayor interés son los interruptores, los capacitores variables e inductores, los cuales presentan un mejor comportamiento que sus homólogos de estado sólido. Otros dispositivos son: cavidades resonantes para aplicaciones de selección de frecuencia, antenas y líneas de transmisión. Algunos circuitos MEMS para RF son: desplazadores de fase de banda ancha, los cuales están realizados con interruptores o capacitores variables MEMS para RF, antenas reconfigurables, osciladores controlados por voltaje (VCO's), acopladores de impedancia, etc.

Todos estos dispositivos se prefieren por sus excelentes características: bajas pérdidas de inserción y alta linealidad para el caso de interruptores; alta selectividad de frecuencia y tamaño muy pequeño para filtros; un valor alto de Q y alta frecuencia de autoresonancia (SRF) para inductores; gran rango de sintonización,

bajas resistencias en serie y alta linealidad para capacitores variables. Sin embargo su fabricación es compleja, presentan problemas de confiabilidad, dificultades para integrarlos con circuitos de tecnología planar debido a sus requerimientos de empaquetamiento y a los problemas específicos del dispositivo, tales como alta impedancia para los resonadores y un bajo manejo de potencia en el caso de los interruptores.

1.4. ¿Por qué usar MEMS para RF?

En la práctica, una solución a un problema en especial que implique utilizar MEMS, es atractiva solo si posibilita realizar funciones nuevas y/o reduce los costos significativamente.

Para aplicaciones que pueden beneficiarse con la existencia de los MEMS (e.j., acelerómetros, interruptores, inyector), la respuesta a la pregunta citada recae en la habilidad de satisfacer las especificaciones requeridas. De toda la variedad de MEMS, debido al crecimiento de los dispositivos portátiles de comunicación personal actuales y a la necesidad de expansión de las características de estos, los MEMS para RF tendrán una mayor comercialización. Entre las aplicaciones de MEMS para RF destacan: los equipos de prueba y medición automatizados, seguridad automovilística, sistemas de comunicación y aplicaciones militares y espaciales.

1.5. Conclusiones

Se obtuvo un panorama general de los Microsistemas Electromecánicos dentro del desarrollo tecnológico actual en telecomunicaciones. Se encontró que esta tecnología esta comenzando a madurar y actualmente representa una opción prometedora para construir interruptores debido a sus excelentes características en altas frecuencias.

Se concluye que entre los Microsistemas Electromecánicos de mayor interés y desarrollo en la actualidad se encuentran los MEMS para RF y dentro de éstos últimos el interruptor. Así mismo, aunque esta tecnología representa una solución al bajo rendimiento de los sistemas de telecomunicaciones actuales en altas frecuencias, ésta requiere de un proceso de fabricación complejo, la confiabilidad de los sistemas obtenidos es baja y existen dificultades para integrarlos con circuitos de tecnología planar debido a sus requerimientos de empaquetamiento.

La construcción de la microestructura consiste en una serie de repeticiones de la metodología anterior (figura 2.1).

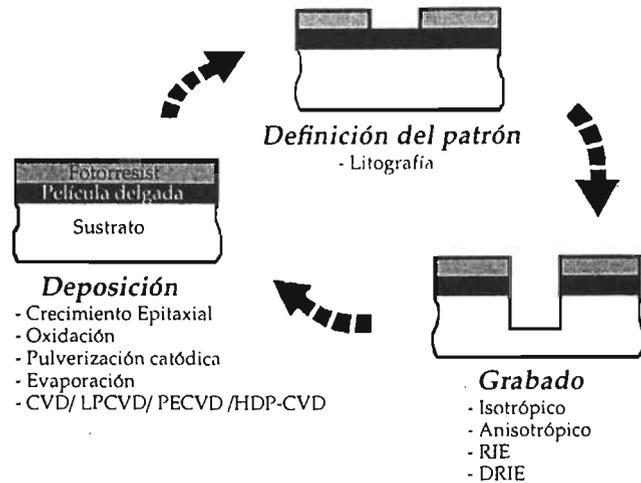


Figura 2.1: Ilustración del proceso de micromaquinado: se depositan las capas, se graba el patrón en el fotorresist por medio de litografía y éste es usado como máscara para atacar los materiales subyacentes mediante un solvente.

2.1.1. Micromaquinado de volumen

El micromaquinado de volumen consiste en remover selectivamente parte del material que constituye el sustrato, utilizando un grabado húmedo o seco para formar diferentes estructuras dentro de éste, como membranas, trincheras, huecos, barras, etc. El tamaño de las microestructuras fabricadas por esta técnica varían entre 200 a 500 μm [4].

2.1.2. Micromaquinado de superficie

El micromaquinado de superficie construye una microestructura sobre la superficie de un sustrato mediante capas estructurales y de sacrificio que pueden ser o no removidas según la aplicación para liberar las estructuras mecánicas. Las dimensiones de las estructuras fabricadas por medio de esta técnica pueden ser varios ordenes de magnitud más pequeñas que las fabricadas mediante una técnica de micromaquinado de volumen. El micromaquinado de superficie ofrece gran flexibilidad para fabricar estructuras planares, pero el pequeño espesor de sus capas limita las aplicaciones a aquellas que no requieran de un volumen muy grande.

2.2. Materiales para la fabricación de MEMS

2.2.1. Silicio

El silicio es uno de los pocos materiales que puede ser económicamente manufacturado en sustratos de cristal sencillos. Su naturaleza cristalina posee ventajas eléctricas y mecánicas significativas. Eléctricamente, se puede lograr una modulación precisa de su conductividad a través de un dopado con impurezas. Y mecánicamente, el silicio es un material elástico y fuerte. El silicio es un material adecuado en el cual se pueden integrar funciones electrónicas, mecánicas, térmicas, ópticas y aún de fluidos pueden ser integradas. Su bajo costo por oblea hace de este un material atractivo para la fabricación de componentes y sistemas micromecánicos.

La visualización apropiada de los planos cristalográficos es la llave para entender la dependencia de las propiedades del material con la orientación del cristal y los efectos de los ataques químicos en los diferentes planos del material.

El silicio tiene una estructura reticular en forma de diamante la cual puede ejemplificarse como un cubo. Los tres ejes de mayor importancia del cubo son llamados *ejes principales* (x, y, z). Las direcciones específicas y los planos dentro del cristal son designados con referencia a los ejes principales usando "*Indices de Miller*". La cual es una notación especial que incluye tres enteros encerrados entre corchetes, signos de intercalación, paréntesis y llaves. Las direcciones se especifican mediante corchetes o signos de intercalación, mientras que los planos son definidos mediante paréntesis o llaves. Por ejemplo, $[1\ 0\ 0]$ representa un vector en la dirección x con referencia a los tres ejes principales del cubo, y $\langle 1\ 0\ 0 \rangle$ denota las seis direcciones equivalentes a $[1\ 0\ 0]$ (las direcciones $+x, -x, +y, -y, +z$ y $-z$). Análogamente, $(1\ 1\ 1)$ representa un plano perpendicular al vector $[1\ 1\ 1]$, mientras $\{1\ 1\ 1\}$ representa los ocho planos cristalográficos de $(1\ 1\ 1)$ (figura 2.2).

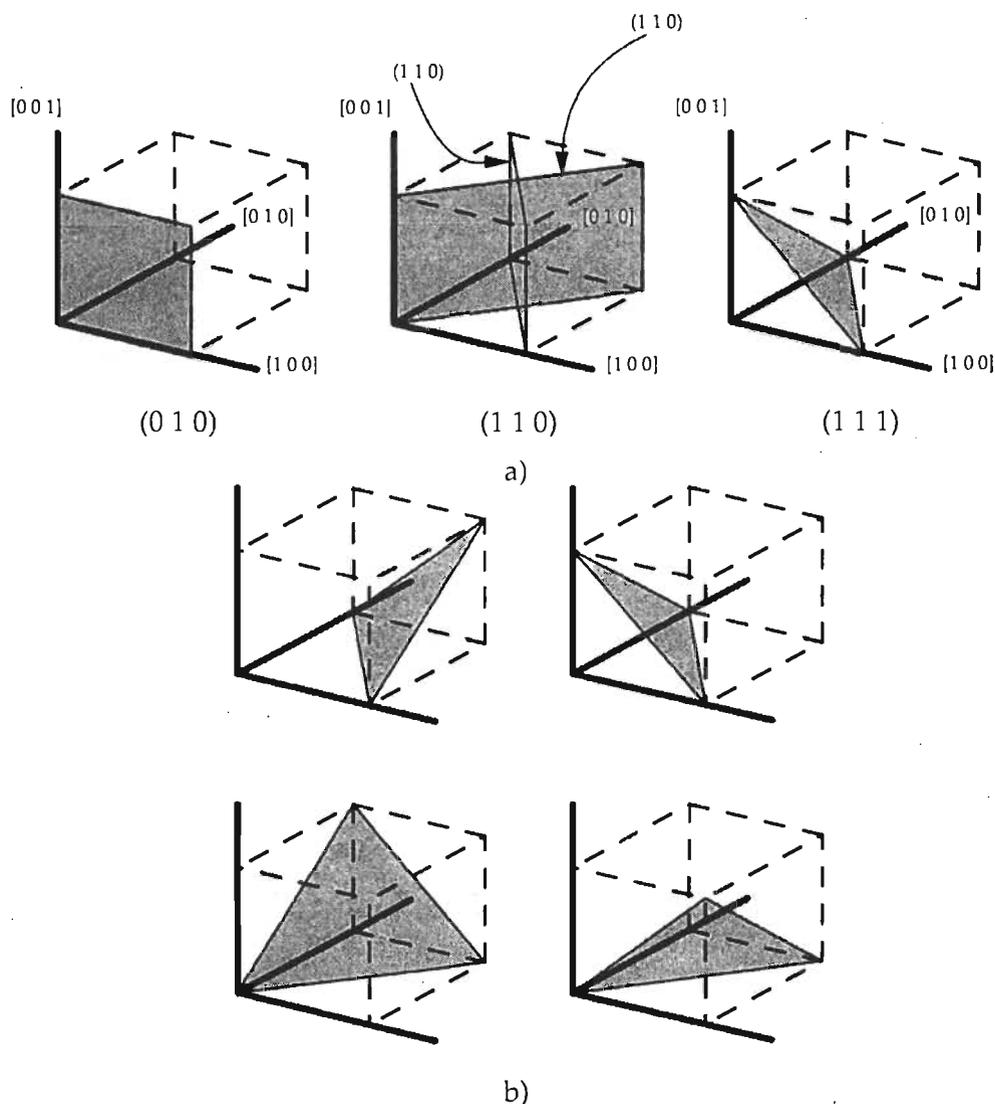


Figura 2.2: a) Tres planos cristalográficos y su notación de Miller. Se identifican dos planos (1 1 0) equivalentes de la familia $\{1\ 1\ 0\}$. b) Cuatro de los ocho planos (1 1 1) equivalentes de la familia $\{1\ 1\ 1\}$.

El algebra de vectores muestra que los ángulos entre los planos $\{1\ 0\ 0\}$ y $\{1\ 1\ 0\}$ y entre los planos $\{1\ 0\ 0\}$ y $\{1\ 1\ 1\}$ son de 45° y 54.74° respectivamente. De manera análoga, los planos $\{1\ 1\ 1\}$ y $\{1\ 1\ 0\}$ se intersecan el uno al otro con ángulos de 35.26° , 90° o 144.54° . Los ángulos entre los planos $\{1\ 0\ 0\}$ y $\{1\ 1\ 1\}$ son importantes en el proceso de micromaquinado por que soluciones acuosas alcalinas, tal como el hidróxido de potasio (KOH), ataca los planos $\{1\ 0\ 0\}$ y no los $\{1\ 1\ 1\}$ del silicio [1].

Los fabricantes de materiales cortan obleas de silicio delgadas y circulares de trozos más grandes a lo largo de planos específicos. El plano de corte (cara superior de la oblea) se conoce como la **orientación del corte**, y se identifica mediante lados planos primarios y secundarios en la misma oblea (figura 2.3). Por ejemplo, la cara superior de una oblea con **orientación** $\{1\ 0\ 0\}$ es un plano $(1\ 0\ 0)$, el cual puede ser cualquiera de los seis planos equivalentes $\{1\ 0\ 0\}$. Las obleas comerciales disponibles tienen una orientación predominante $\{1\ 0\ 0\}$, que es la orientación del plano de corte preferido en la tecnología CMOS. Adicionalmente a la orientación del corte, otras dos especificaciones importantes son el tipo de impurezas dopantes (n o p) y la resistividad eléctrica (sus unidades son $\Omega \cdot \text{cm}$).

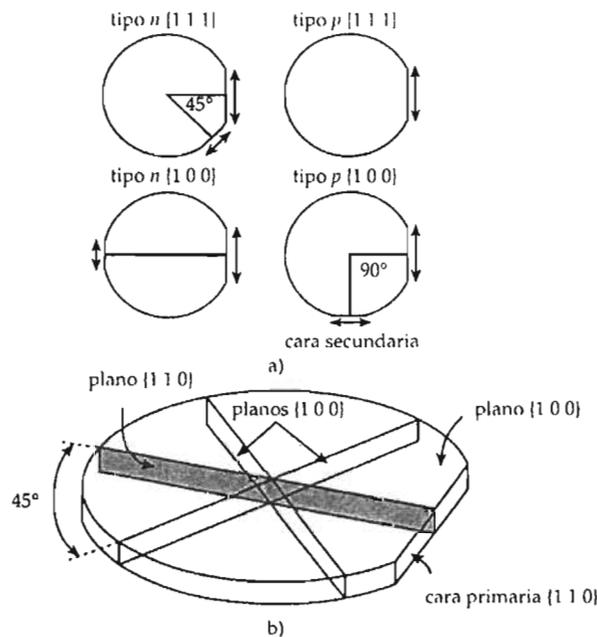


Figura 2.3: a) Ilustración que muestra las caras primarias y secundarias de las obleas $\{1\ 0\ 0\}$ y $\{1\ 1\ 1\}$, para un dopado tipo n y p . b) Ilustración de los diferentes planos en una oblea con orientación $\{1\ 0\ 0\}$.

El silicio es un elemento que existe en tres formas: Cristalina, policristalina y amorfa.

El silicio cristalino es un material fuerte y frágil, deformable elásticamente hasta que alcanza su punto de ruptura. Su módulo de Young depende de la orientación del cristal y en promedio es de 160 GPa, cercano al del acero inoxidable. Como una consecuencia de la naturaleza cristalina, las propiedades mecánicas son uniformes en cada parte de la oblea y las obleas están libres de tensiones intrínsecas. La mayoría de las propiedades mecánicas del silicio cristalino son independientes del dopado de impurezas, pero la tensión tiende a aumentar cuando las concentraciones de dopado alcanzan niveles de $(\sim 10^{20} \text{cm}^{-3})$ [1].

Las propiedades mecánicas del polisilicio y el silicio amorfo varían con las condiciones de deposición; pero la mayoría son similares a las del silicio cristalino. Ambos sufren de altos niveles de tensión intrínseca (millones de MPa). Las vigas hechas de polisilicio o silicio amorfo que no se someten a un proceso cuidadoso de recocido (stress-annealing) pueden deformarse debido a los efectos de la tensión intrínseca.

El polisilicio es un material igualmente importante y atractivo para construir MEMS. Este ha sido utilizado exitosamente para fabricar estructuras micromecánicas y para integrar interconexiones eléctricas, termoacopladores, diodos de uniones *p-n*, y otros dispositivos eléctricos con estructuras micromecánicas.

Dióxido de silicio

El dióxido de silicio es un aislante muy bueno debido a su estabilidad, a diferencia de otros como el dióxido de germanio el cual es soluble en agua. Varias formas del dióxido de silicio (SiO_2 , SiO_x , silicato de vidrio) son ampliamente usadas en el proceso de micromaquinado debido a sus excelentes propiedades térmicas y eléctricas como aislantes. También son usados como capas de sacrificio en el proceso de micromaquinado de superficie debido a que pueden ser atacados con una gran selectividad utilizando ácido fluorhídrico (HF). Una desventaja de los óxidos de silicio es que es difícil controlar sus tensiones intrínsecas.

Nitruro de Silicio

El nitruro de silicio (Si_xN_y) es ampliamente usado en forma de capas delgadas aislantes y como barrera contra la difusión de iones móviles, en particular, iones de sodio y potasio encontrados en ambientes biológicos. Su módulo de Young es mayor al del silicio y sus tensiones intrínsecas se pueden controlar variando las condiciones de deposición del material. También es un buen material para hacer máscaras que pueden ser utilizadas con soluciones de ataque alcalinas.

Capas delgadas de metal

Las capas delgadas de metal se depositan normalmente ya sea por pulverización catódica, evaporación o deposición química en fase vapor. También se pueden depositar capas de oro, níquel y Permalloy™ (Ni_xFe_y) por electroplateado. Se pueden fabricar microelectrodos utilizando oro, platino e iridio. Las capas de cromo y titanio (10-100 nm) se utilizan para adherir metales que tienen tendencia a desprenderse, como pueden ser tungsteno, níquel, platino o paladio depositados mediante evaporación o pulverización catódica.

2.3. Técnicas de deposición para la fabricación de MEMS

Los métodos de crecimiento epitaxial, pulverización catódica (sputtering), evaporación, deposición química en fase vapor, y de giro son técnicas comunes usadas para depositar capas uniformes de silicio, metales, aislantes o polímeros.

2.3.1. Crecimiento epitaxial

El crecimiento epitaxial es un método de deposición que hace crecer una capa de silicio cristalino sobre una oblea de silicio, pero con un tipo diferente de dopante y concentración. La capa epitaxial tiene un grosor típico de 1 a 20 μm . Esta presenta la misma orientación del cristal que el sustrato base, excepto cuando crece sobre un material amorfo (por ejemplo el polisilicio se logra a partir de un crecimiento de dióxido de silicio sobre un sustrato de material amorfo). El crecimiento epitaxial es ampliamente usado en la fabricación de circuitos CMOS, y ha demostrado ser eficiente en la formación de obleas de uniones p - n por grabado electroquímico controlado.

El crecimiento ocurre en un reactor de deposición química en fase vapor por disociación de una fuente de gas de silicio a una temperatura mayor a 800°C. Las fuentes de silicio comunes son el silano (SiH_4), diclorosilano de silicio (SiH_2Cl_2) o tetracloruro de silicio (SiCl_4). Las tasas nominales de crecimiento varían entre 0.2 y 1.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ dependiendo de la fuente de gas y la temperatura de crecimiento. Si se desea dopar el material, las impurezas dopantes son incorporadas simultáneamente durante el crecimiento por disociación de una fuente de gas dopante en el mismo reactor. Para un dopado tipo n se utilizan dos gases extremadamente tóxicos: arsina (AsH_3) y fosfina (PH_3). Para un dopado tipo p se utiliza el diborano (B_2H_6).

Se puede hacer crecer silicio cristalino sobre otros tipos de sustratos cristalinos tales como zafiro (Al_2O_3), este proceso es llamado crecimiento heteroepitaxial para indicar la diferencia en los materiales. Dichas obleas de silicio-sobre-zafiro (SOS) se encuentran disponibles en el mercado, y tienen gran eficacia en aplicaciones donde se requiere un sustrato aislante o transparente.

2.3.2. Oxidación térmica

La oxidación térmica es el método por el cual se genera una película delgada de dióxido de silicio sobre una oblea de silicio. La oxidación del silicio se lleva a cabo dentro de oxígeno seco o de vapor de agua a temperaturas elevadas (850-1150°C).

La oxidación térmica del silicio genera esfuerzo de compresión en la película de dióxido de silicio. Hay dos razones por las que se presenta este esfuerzo: las moléculas del dióxido de silicio poseen más volumen que los átomos de silicio y hay una diferencia entre los coeficientes de expansión térmica del silicio y del

dióxido de silicio. El esfuerzo de compresión depende del grosor total de la capa de dióxido de silicio, y puede alcanzar cientos de MPa. En consecuencia, las películas de dióxido de silicio crecidas térmicamente con un espesor mayor a una micra pueden provocar deformaciones en el sustrato en las que serán depositadas. Por ejemplo, las membranas y vigas construidas por el material anterior tienden a presentar problemas de deformación (figura 2.4).

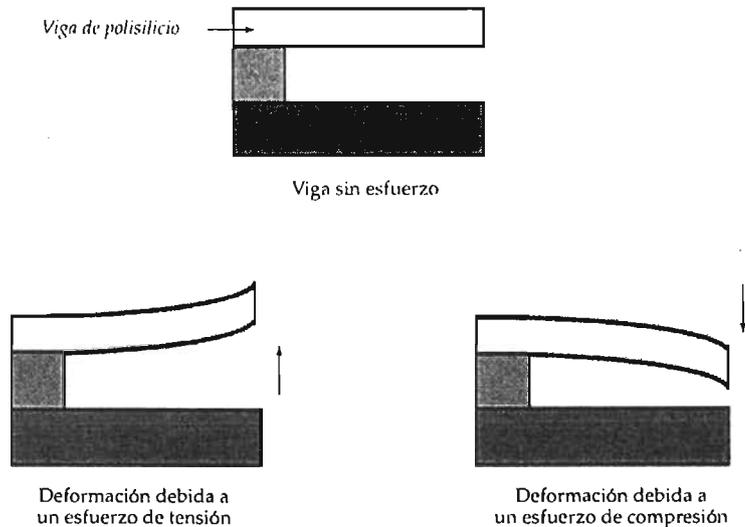


Figura 2.4: Tipos de esfuerzos que presentan las capas estructurales al ser depositadas.

2.3.3. Pulverización catódica (Sputtering)

En este tipo de deposición, el material que se quiere depositar es bombardeado físicamente por un flujo de iones (e.j., argón, helio) en un cuarto al vacío. Las partículas del material son expulsadas y depositadas sobre la superficie del sustrato. La excitación del flujo de iones se puede realizar mediante una fuente de poder de DC, de RF ó magnética. Para la deposición de materiales aislantes como el vidrio, se prefieren fuentes de DC o RF.

El método de pulverización catódica es útil en la comunidad de los MEMS para depositar películas delgadas de metales a bajas temperaturas ($< 150^{\circ}\text{C}$) tales como aluminio, titanio, cromo, platino y paladio, así como de silicio amorfo y dieléctricos como el vidrio y cerámicos piezoeléctricos (e.j., PZT, ZnO). Las películas depositadas mediante este método son uniformes pero la terminación en sus extremos son de mala calidad debido a la aleatoriedad con que se depositan las partículas del material sobre el sustrato. Los niveles de esfuerzo que presentan dichas películas varían normalmente con las condiciones de presión del cuarto en el cual se lleva a cabo la deposición, pasando de un régimen de esfuerzo de compresión a bajas presiones (0.1-1 Pa) a uno de esfuerzo de tensión a altas

presiones (1-10 Pa). La transición entre el régimen de compresión y el de tensión es por lo regular de unas decenas de Pa, por lo que es difícil de controlarla en una deposición.

2.3.4. Evaporación

La evaporación implica el calentamiento del material a una temperatura lo suficientemente alta para generar vapor el cual se condensa sobre un sustrato. Casi cualquier material puede ser evaporado (e.j., Al, Si, Ti, Mo, vidrio, Al_2O_3 ... etc), incluyendo muchos metales con un punto de fusión alto (W, Au, Cr, Pd, Pt), si se logra una presión de vapor un poco mayor a la del medio ambiente (0.1-10 Pa), permitiendo que el contenedor, fabricado usualmente de tungsteno, en el cual se encuentra el material no sea evaporado.

El calentamiento del material se logra ya sea de manera resistiva, pasando una corriente eléctrica a través de un filamento hecho del material deseado, ó mediante un haz de electrones sobre el material que se quiere depositar. En el primer caso, los electrones emitidos por el filamento caliente son acelerados a un potencial de 10 KV antes de que choquen y fundan el material. La evaporación resistiva es sencilla, pero puede propagar impurezas u otros contaminantes presentes en el filamento. El tamaño del filamento limita el grosor de la película depositada. Por lo contrario, la evaporación mediante un haz de electrones permite obtener una mejor calidad en la película y mayores tasas de deposición (50-500 nm/min), pero el sistema de deposición es más complejo, requiere de enfriamiento del material con agua, y de una capa protectora de rayos x generados cuando los electrones chocan contra el material. Además, la radiación que atraviesa la superficie del sustrato de silicio durante el proceso de deposición puede dañar el cristal y degradar las características de los circuitos electrónicos.

La evaporación es un proceso de deposición direccional por lo cual la mayoría de las partículas del material son depositadas en un ángulo específico sobre el sustrato, lo cual genera una cubierta no uniforme en las esquinas. Esto es un efecto indeseable si se desea que haya continuidad en la película delgada. Para reducir este efecto se puede girar el sustrato durante la deposición; sin embargo, en algunos casos, este efecto puede ser usado deliberadamente para seleccionar las regiones en las que se desea o en las que es indeseable depositar material.

Las películas delgadas depositadas mediante evaporación presentan altos esfuerzos de tensión, los cuales se incrementan con los altos puntos de fusión del material. La evaporación de películas de tungsteno o níquel, por ejemplo, tienen esfuerzos de 500 MPa, lo suficiente para causar deformaciones o peor aún rupturas en la película. De forma similar al sputtering, si se eleva la temperatura de deposición del sustrato se puede disminuir el esfuerzo de tensión en la película.

2.3.5. Deposición química en fase vapor

El método de deposición química en fase vapor *a presión atmosférica* (CVD) se basa en la generación de una reacción química en un cuarto al vacío, con la cual se puede lograr la deposición de los constituyentes de la reacción sobre la superficie de un sustrato caliente para formar un sólido. De manera opuesta al sputtering, CVD es un proceso que trabaja a altas temperaturas (mayores a 300°C). Con este método de deposición se pueden obtener películas delgadas de dieléctricos y metales de alta calidad. Películas de polisilicio, óxido de silicio, nitruros de silicio, tungsteno, titanio, y tantalio así como sus nitruros, y más recientemente, cobre y dieléctricos con permitividad baja son películas comunes que son depositadas mediante el método de CVD.

Los métodos basados en la deposición química en fase vapor son: *de baja presión* (LPCVD), *o de plasma mejorado*¹ (PECVD), del cual se desprende el método de *plasma de alta densidad* (HDP-CVD). Los métodos de CVD y LPCVD operan con un sustrato a temperaturas de 500°C a 800°C. En PECVD y HDP-CVD, la temperatura del sustrato es cercana a los 300°C, con estos métodos también es factible la deposición de nitruros de silicio. Las características de las películas finales (especialmente las de dióxido de silicio y nitruros de silicio) dependen en gran medida de los parámetros de deposición: la temperatura del sustrato, la presencia de gases, los dopantes, la presión y la potencia y frecuencia de RF de excitación del plasma [1].

2.3.6. Deposición de materiales

Deposición de polisilicio

El proceso de deposición química en fase vapor (CVD) permite depositar películas delgadas de polisilicio sobre un sustrato. El grosor de la película varía entre unas decenas de nanómetros a varios micrómetros. Se pueden realizar estructuras con capas múltiples de polisilicio. El polisilicio es depositado por la descomposición por pirólisis del silano (SiH_4) en silicio e hidrógeno en un reactor de LPCVD. La temperatura de deposición en LPCVD afecta la estructura de la película. Por lo cual, por debajo de 600°C la película presenta una estructura completamente amorfa y por arriba de 630°C presenta una estructura cristalina granular. La orientación preferida en el polisilicio es la $\{110\}$, pero si se trabaja con temperaturas de deposición mayores a 650°C dicha orientación cambia a $\{100\}$. La tasa de deposición varía entre 10 nm/min a 630°C y 70 nm/min a 700°C. La presión y la tasa del flujo de gas de silano afecta la tasa anterior.

¹Se le llama plasma a la mezcla de electrones, iones, y neutrones, la cual es una fase diferente a la sólida, líquida o gaseosa. La utilización de la fase de plasma incrementa la densidad de los iones y neutrones que pueden participar en una reacción química; por lo tanto se acelera la velocidad de la reacción, ya sea una deposición o un grabado.

Si se desea dopar el polisilicio, el proceso de dopado debe de ser realizado durante la deposición introduciendo fuentes de gases dopantes, en particular arsénico (AsH_3) o fosfina (PH_3) para un dopado tipo *n*, y diborano (B_2H_6) para un dopado tipo *p*. Después del proceso de dopado la resistividad de la película de polisilicio permanece en el rango de 1 a 10 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$. Estas películas tienen esfuerzos intrínsecos mayores a 500 MPa, lo cual provoca deformaciones o rupturas en las estructuras mecánicas fabricadas de éstas. Se pueden disminuir los esfuerzos intrínsecos en estas películas hasta niveles menores a 50 MPa, generando cambios en los límites granulares de la estructura a través de un proceso de recocido (*annealing*) a una temperatura de 900°C o mayor.

Deposición de dióxido de silicio

La deposición se puede realizar mediante CVD, LPCVD o PECVD a través de la reacción de silano y oxígeno, mediante pirólisis de tetraetosilano (TEOS) [$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$] o por la reacción de diclorosilano (SiCl_2H_2) con óxido nítrico (N_2O). Se utiliza fosfina o diborano para obtener películas dopadas con fósforo o boro, respectivamente. Una película dopada con fósforo se le conocen como fosfosilicato de vidrio (PSG) y aquellas dopadas con fósforo y boro como borofosfosilicato de vidrio (BPSG).

Las películas depositadas mediante los métodos de CVD son generalmente usadas como aislantes entre capas de metal o como capas de sacrificio en el proceso de micromaquinado de superficie. Estas películas presentan esfuerzos de compresión entre 100-300 MPa, este esfuerzo se puede controlar cuando se utiliza el método de PECVD.

Deposición de nitruros de silicio

El nitruro de silicio estequiométrico (Si_3N_4) se puede depositar por CVD o LPCVD, mediante la reacción de silano (SiH_4) y amoníaco (NH_3) a presión atmosférica o por la reacción de diclorosilano (SiCl_2H_2) y amoníaco a baja presión. Estas películas presentan esfuerzos cercanos a 1000 MPa; sin embargo, si la película es rica en silicio ésta presenta un esfuerzo menor a 100 MPa, el cual es aceptable para la mayoría de las aplicaciones de micromaquinado de superficie. En el micromaquinado de superficie, las películas de nitruro de silicio se utilizan generalmente como máscaras para realizar el grabado con soluciones alcalinas como el hidróxido de potasio.

El nitruro de silicio no estequiométrico (Si_xN_y) es depositado por PECVD mediante la reacción de silano con amoníaco, teniendo como ventaja la posibilidad de controlar el esfuerzo durante la deposición. Este esfuerzo depende de la frecuencia de excitación del plasma en el proceso de deposición, para una frecuencia de 13.56 MHz se tiene un esfuerzo de tensión de 400 MPa, mientras que para una frecuencia de 50 KHz se tiene un esfuerzo de compresión de 200 MPa [1].

El índice de refracción es una medida indirecta del contenido de impurezas y sobretodo de la calidad de una película de nitruro de silicio. En películas depositadas por PECVD el índice de refracción varía entre 1.8 y 2.5 y para películas depositadas por LPCVD es de 2.01; un valor alto indica un exceso de silicio, mientras que un valor bajo indica un exceso de oxígeno.

2.3.7. Métodos de giro

El método de giro es un proceso simple para colocar capas de dieléctricos y materiales orgánicos. El proceso se realiza con una mesa giratoria de velocidad variable con ventanas de seguridad. Un inyector provee el material en forma líquida en el centro de la oblea, el cual se esparce de manera uniforme al hacer girar el sustrato a grandes velocidades (500 a 5000 rpm).

Los materiales orgánicos comunes que se pueden depositar con éste método son el material fotorresistivo y los polímeros con grosores típicos de 0.5 - 20 μm , aunque existen algunos materiales con propósitos especiales, como el epoxy SU-8, el cual puede llegar a tener un grosor de 100 μm .

2.3.8. Litografía

La litografía es un proceso fotográfico que imprime patrones sobre capas de polímeros fotosensitivos (fotorresist) que son usadas subsecuentemente como máscaras protectoras cuando se lleva a cabo el ataque. La litografía consta de los siguientes pasos:

- ▶ Aplicación de fotorresist el cual es una emulsión fotosensitiva.
- ▶ Exposición óptica para imprimir la imagen de la máscara en el fotorresist.
- ▶ Inmersión dentro de una solución acuosa reveladora para disolver el fotorresist expuesto y hacer visible la imagen deseada.

La máscara consiste en un patrón formado por una capa opaca de cromo sobre un sustrato de vidrio transparente. El diseño del patrón se hace con una herramienta de diseño asistido por computadora (CAD) y posteriormente se transfiere a una capa delgada de cromo. Un proceso de microfabricación completo involucra repetir varias veces la secuencia de pasos anterior.

El fotorresist *positivo* es una resina orgánica que contiene un *sensibilizador*, el cual impide que el fotorresist se disuelva al sumergirlo dentro de la solución reveladora. Para imprimir la imagen de la máscara en el fotorresist, este último se expone a una luz en el rango de 200 a 450 nm (ultravioleta a azul), la cual rompe el *sensibilizador* provocando que las regiones expuestas se disuelvan cuando se

sumerge dentro de la solución reveladora. El proceso opuesto ocurre con el fotorresist *negativo*, las áreas expuestas a la luz son las que permanecen.

Existen tres diferentes modos de realizar la exposición óptica del fotorresist: por *contacto*, *proximidad* y *proyección*. En la litografía por *contacto* la máscara toca la oblea, lo que provoca que se disminuya el periodo de vida de ésta y que deje residuos indeseables en la oblea y en la misma máscara. Mediante el modo de *proximidad* la máscara se coloca de 25-50 μm de la superficie del fotorresist. Finalmente, en la litografía por *proyección*, la imagen de la máscara se proyecta sobre la oblea por medio de lentes ópticas.

2.3.9. Grabado

El objetivo es eliminar material selectivamente usando los patrones grabados en el fotorresist como plantilla enmascarante. Este patrón puede grabarse directamente en un sustrato de silicio o en una película delgada la cual puede ser usada como máscara para subsecuentes grabados. Para llevar a cabo un ataque apropiado debe existir una alta selectividad entre el material enmascarante y el material que se quiere remover.

En el grabado **isotrópico** el ataque se lleva a cabo de manera uniforme en todas direcciones, por lo cual se tienen cavidades redondeadas. Por el contrario, en un grabado **anisotrópico**, el ataque se lleva a cabo preferentemente en ciertas direcciones obteniendo cavidades delineadas por superficies planas bien definidas, las cuales no son necesariamente perpendiculares a la oblea.

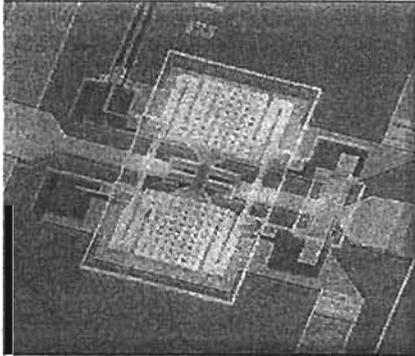
El medio en el cual se lleva a cabo el grabado puede ser *húmedo* o *seco*. El grabado *húmedo* tiene la ventaja de tener un bajo costo de fabricación por lote (se pueden grabar de 20 a 25 obleas simultáneamente) y puede ser isotrópico o anisotrópico. El grabado en *seco* se lleva a cabo mediante el uso de gases reactantes en un ambiente de plasma a baja presión. El equipo necesario para realizarlo es especializado, ya que requiere de una instalación con tubos ultra limpios para transportar y mantener la alta pureza de los gases reactantes hacia una cámara al vacío [1].

2.4. Conclusiones

Se obtuvieron los conocimientos necesarios para entender en que consiste el conjunto de técnicas para diseñar y fabricar los Microsistemas Electromecánicos, llamado micromaquinado.

Se hizo un resumen general de las características de los materiales que son utilizados cuando se trabaja con los Microsistemas Electromecánicos además de

una descripción de las técnicas más utilizadas actualmente en la deposición de estos materiales para la fabricación de los Microsistemas Electromecánicos.



Capítulo 3

Estado del arte de los Interruptores MEMS para RF

3.1. Interruptores MEMS para RF

Los interruptores son componentes simples pero vitales en todos los sistemas automatizados. *Los interruptores MEMS para RF son dispositivos mediante los cuales se obtiene un circuito corto o abierto en una línea de transmisión mediante movimiento mecánico controlado por una fuerza externa; es decir, permiten que una señal viaje libremente o que ésta sea bloqueada.* Son especialmente diseñados para frecuencias de 0.1 - 100 GHz. Un buen diseño puede hacer la diferencia entre un rendimiento bueno o malo del sistema de comunicaciones para el cual se requiere. Este diseño y optimización se hace tomando en cuenta los parámetros del interruptor que más influyen en la aplicación dada.

Los parámetros a considerar en el diseño del interruptor son los siguientes:

✓ PÉRDIDAS DE INSERCIÓN

Las pérdidas de inserción se usan para medir la eficiencia de la transmisión de la señal en el interruptor. Las pérdidas de inserción en un interruptor se especifican solamente cuando el interruptor se encuentra en estado encendido, en términos del coeficiente de transmisión S_{21} en dB. Las pérdidas resistivas y el efecto piel a altas frecuencias conforman estas pérdidas de inserción.

✓ AISLAMIENTO

El aislamiento también se mide con el parámetro S_{21} cuando el interruptor se encuentra en estado apagado. Un valor grande de este parámetro es indicación de que no existe acoplamiento entre la entrada y la salida del

interruptor, este valor disminuye debido a la proximidad de las partes móviles que llevan a cabo el proceso de conmutación y la línea de transmisión, ya que se inducen corrientes eléctricas entre estas partes.

⇒ VOLTAJE DE ACTUACIÓN

El voltaje de actuación es una señal de control para que el interruptor realice la conmutación. El estado del arte de los interruptores se preocupa por disminuir el valor de este parámetro y adecuarlo a sistemas que requieran bajos voltajes para su funcionamiento.

⇒ TIEMPO DE TRANSICIÓN

Es el tiempo que tarda el interruptor en ser conmutado. Se define como el tiempo necesario para que la señal de salida de RF pase de un 10% a un 90% de su valor final para conmutar de un estado apagado a un estado encendido y de un 90% a un 10% para la transición de un estado encendido a un estado apagado.

⇒ VELOCIDAD DE CONMUTACIÓN

Es el tiempo requerido para que el interruptor responda cuando la señal de control cambia. La velocidad de conmutación incluye el retraso en la propagación de la señal de control y el tiempo de transición; la velocidad de conmutación es medida del 50% del valor de la señal de control al 90% (para conmutar de un estado apagado a un estado encendido) o al 10% (para conmutar de un estado encendido a un estado apagado) del valor de la señal de RF.

⇒ FRECUENCIA NATURAL DE RESONANCIA

Es la frecuencia a la cual un sistema mecánico entra en una alta condición vibratoria generada cuando coinciden la frecuencia natural del sistema y la frecuencia de la fuerza aplicada. Esta alta condición vibratoria conocida como resonancia puede llegar a niveles que pueden provocar daños. Esta frecuencia limita la máxima velocidad en la cual el interruptor puede conmutar, pero no afecta la frecuencia de las señales que pasan a través del interruptor. En los interruptores MEMS esta frecuencia puede ser modelada en términos de su constante de rigidez y su masa.

⇒ TIEMPO DE VIDA

Este parámetro nos indica el tiempo de vida de las partes móviles del interruptor antes de que sufran rupturas debidas a la fatiga y a los efectos ambientales a que se somete el dispositivo.

3.1.1. Clasificación de los interruptores MEMS

Los interruptores MEMS se clasifican de diferentes maneras: por su principio de actuación, configuración eléctrica, tecnología de fabricación o por la aplicación deseada (tabla 3.1).

Existen dos partes distintivas en la configuración de los interruptores MEMS:

- ➔ **PARTE MECÁNICA.** Tipo de fuerzas con las que se logra el movimiento mecánico (tabla 3.1).
- ➔ **PARTE ELÉCTRICA.** Posición de los interruptores con respecto a la trayectoria que sigue la señal en la línea de transmisión (figura 3.1).

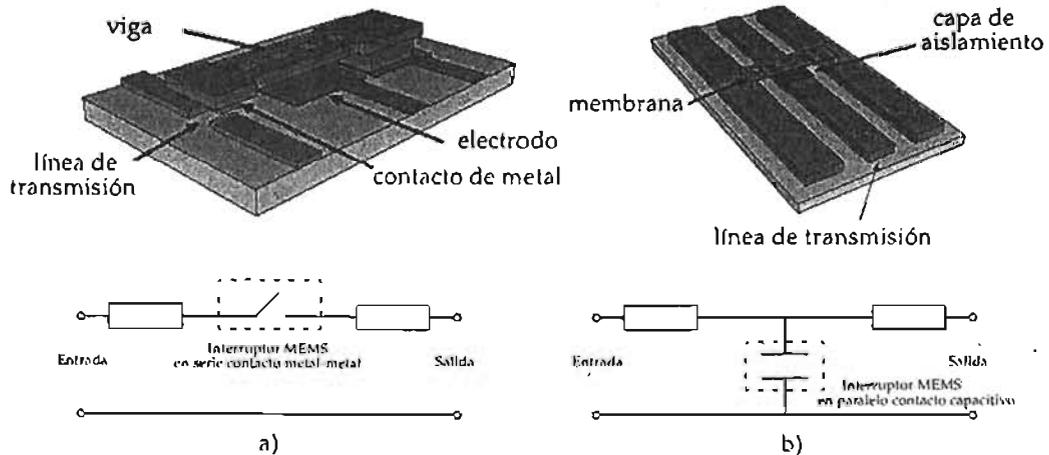


Figura 3.1: a) Configuración de un interruptor en serie con contacto metal-metal. b) Configuración de un interruptor capacitivo en paralelo.

TABLA 3.1: Clasificación de los interruptores MEMS [3].

| Clasificación | Tipos | Comentarios | | | | | | |
|---------------------------|---|--|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Configuración eléctrica | Serie | Contacto metal-metal (DC - 50 GHz) o capacitivo (10 - 50 GHz) | | | | | | |
| | Paralelo | Contacto metal-metal (DC - 60 GHz) o capacitivo (10 - 120 GHz) | | | | | | |
| Tipo de contacto | Metal-metal | Desde DC a unas decenas de GHz | | | | | | |
| | Capacitivo | Desde frecuencias RF a frecuencias > 100 GHz | | | | | | |
| Configuración ES | SFST | Un polo - una trayectoria | | | | | | |
| | SPDT, etc. | Un polo - dos trayectorias | | | | | | |
| Mecanismo de actuación | Electrostático | Rápido, consumo bajo de potencia, sencillo, altos voltajes de actuación | | | | | | |
| | | Voltage [V] | Corriente [mA] | Potencia Consumida [mW] | Tamaño | Velocidad de conmutación [µs] | Fuerza de contacto [µN] | |
| | | 20-80 | 0 | 0 | pequeño | 1-200 | 50-1000 | |
| | | Magnetostático | Fuerzas de actuación grandes, consumo alto de potencia, fabricación compleja, tamaño mediano | | | | | |
| | | | Voltage [V] | Corriente [mA] | Potencia Consumida [mW] | Tamaño | Velocidad de conmutación [µs] | Fuerza de contacto [µN] |
| | | | 3-5 | 20-150 | 0-100 | mediano | 300-10000 | 50-200 |
| | Electrotérmico | Lento, consumo alto de potencia, bajos voltajes de actuación, tamaño grande | | | | | | |
| | | Voltage [V] | Corriente [mA] | Potencia Consumida [mW] | Tamaño | Velocidad de conmutación [µs] | Fuerza de contacto [µN] | |
| | 3-5 | 5-100 | 0-200 | grande | 300-10000 | 500-4000 | | |
| | Piezoeléctrico | Fabricación complicada | | | | | | |
| | | Voltage [V] | Corriente [mA] | Potencia Consumida [mW] | Tamaño | Velocidad de conmutación [µs] | Fuerza de contacto [µN] | |
| | | 3-20 | 0 | 0 | mediano | 50-500 | 50-500 | |
| | Gota de mercurio | Aplicaciones muy limitadas | | | | | | |
| | Combinación de mecanismos | Fabricación complicada, comportamiento bueno | | | | | | |
| Movimiento | Lateral | Tamaño grande, fabricación de contactos difícil | | | | | | |
| | Vertical | Tamaño pequeño, es el más común y adecuado para microempujado de superficie | | | | | | |
| | Torsional | Voltaje bajo, concepto de empuje-jala, sencillo, distancia entre contactos grande | | | | | | |
| | Rotatorio | Complicado, no se usa | | | | | | |
| Estructura de movimiento | Membrana | Electrodos de actuación grandes | | | | | | |
| | Cantiliver | Viga sujeta en un extremo, es el más utilizado | | | | | | |
| Tecnología de fabricación | Vanguardia en circuitos para RF | Integración SOC (Sistema en un solo CI), compatible sólo con procesos CMOS/GAA s | | | | | | |
| | Tecnología CMOS | Uso en cadena de procesos estándar CMOS, muy limitados, bajo costo | | | | | | |
| | Técnicas de unión | Integración SOC, complicado, diseños muy ilimitados | | | | | | |
| | Sin limitaciones | Integración en un empaquetado sencillo | | | | | | |
| | Procesos multiusuario (ej. MetalUMPs, ver apéndice A) | Bajo costo de fabricación debido a que se pueden fabricar en grandes cantidades por lote | | | | | | |
| Aplicación | Microondas | Para aplicaciones que requieren corrientes > 10 mA | | | | | | |
| | Manejo de señales de DC a RF | Por ejemplo para equipo de prueba automatizado | | | | | | |
| | Manejo de señales de RF | Señales de RF de baja potencia y bajo corriente (< 1 mA) | | | | | | |
| | Manejo de potencia en RF | Commutación de señales de RF > 10 dBm | | | | | | |

Cerca del 80 % de los interruptores se encuentran entre los dos tipos de configuraciones siguientes:

⊗ INTERRUPTORES EN SERIE METAL-METAL ELECTROSTÁTICOS.

Un cantiliver con un contacto de metal abre (normalmente una posición alta) o cierra (normalmente una posición baja) verticalmente la línea de transmisión. La señal es reflejada cuando el interruptor se encuentra en la posición abierta, mientras que en la posición cerrada la señal puede propagarse a través del contacto de metal. Este tipo de interruptor puede conmutar desde señales de DC hasta señales de RF, su fabricación es más complicada y son menos confiables que los interruptores capacitivos, debido a la fabricación de sus contactos de metal (figura 3.1 a).

⊗ INTERRUPTORES EN PARALELO CAPACITIVOS ELECTROSTÁTICOS.

Consiste de una membrana con movimiento vertical que se encuentra arriba de una sección aislada de la línea de transmisión. El interruptor se encuentra generalmente cerrado en una posición baja, en la cual la membrana corto circuita capacitivamente la línea de transmisión, permitiendo que la señal se propague a través de la membrana hacia alguna trayectoria de tierra y el aislamiento depende de la inductancia parásita de éstas trayectorias (para una línea de transmisión CPW). Este tipo de interruptor no es usado para trabajar con señales de baja frecuencia. Su fabricación es sencilla; sin embargo, es rápido con una velocidad de conmutación de solo unos pocos microsegundos y es pequeño en comparación a los interruptores con contactos de metal, los cuales necesitan de un actuador grande para lograr las fuerzas de contacto y de liberación necesarias (figura 3.1 b)).

3.2. ¿Por qué usar interruptores MEMS para RF?

El desarrollo de interruptores de estado sólido (aquellos implementados con diodos pin o FET's) para dispositivos lógicos, en las últimas décadas, permitió una velocidad de crecimiento increíble en términos de: cantidad de componentes por circuito integrado, realización de funciones con un menor costo, mayores velocidades de conmutación, menor consumo de potencia, mejor funcionamiento y un tamaño más pequeño. Sin embargo, las limitaciones de estos interruptores no han mejorado, por lo cual los interruptores hechos con diodos PIN o con transistores de efecto de campo (FET's) no pueden satisfacer las necesidades de los sistemas de comunicación actuales, especialmente en lo que se refiere a pérdidas de inserción, aislamiento y linealidad de la señal. Estos interruptores presentan un decremento en su comportamiento cuando trabajan con señales para RF de frecuencias superiores a 1 GHz, presentando distorsión de la señal, pérdidas de inserción grandes, aislamiento bajo y un manejo de potencia limitado. Sin embargo los interruptores MEMS para RF presentan un comportamiento excelente con características uniformes en un mayor ancho de banda, aún a frecuencias mayores a 100 GHz. Esta es la ventaja de tener elementos mecánicos puros abriendo y cerrando o cortocircuitando una línea de transmisión. En la tabla 3.2 se compara el comportamiento de los interruptores basados en diodos PIN y FET's con interruptores MEMS para RF.

Desafortunadamente, los interruptores MEMS tienen desventajas, las cuales son comparadas contra sus ventajas en la tabla 3.3. Estos problemas han dificultado su paso de un laboratorio a una fábrica, debido a que nadie se arriesga a producir en gran volumen dispositivos con confiabilidad y tiempo de vida inciertas.

TABLA 3.2: Comparación entre interruptores MEMS, diodos PIN e interruptores a FET's para RF (3).

| Parámetro | Unidad | Interruptor con diodos PIN | Interruptor con FET's | Interruptor MEMS |
|--------------------------------------|----------|----------------------------|-----------------------|-------------------|
| Voltaje de actuación | V | ± 3-5 | 3-5 | 20-80 |
| Corriente de actuación | mA | 3-20 | 0 | 0 |
| Potencia requerida | mW | 5-100 | 0.05-0.1 | 0.05-0.1 |
| Velocidad de conmutación | μs | 0.01-0.1 | 0.001-0.1 | 1-300 |
| Capacitancia en estado cerrado C_d | fF | 18-80 | 70-140 | 1-6 |
| Resistencia en serie | Ω | 2-4 | 4-6 | 0.5-2 |
| Frecuencia de corte | THz | 1-4 | 0.5-2 | 20-80 |
| Aislamiento (1-10 GHz) | dB | > 35 | 15-25 | > 40 |
| Aislamiento (> 10 GHz) | dB | 20-35 | < 20 | 25-40 |
| Pérdidas de inserción (1-10 GHz) | dB | 0.3-0.7 | 0.4-2 | 0.05-0.2 |
| Pérdidas de inserción (> 10 GHz) | dB | 0.7-2 | > 2 | 0.1-0.2 |
| Manejo de potencia (1 GHz) | W_{cw} | < 10 | < 5 | < 0.5 |
| Linealidad de la señal (IP3) | dBm | 27-45 | 27-53 | 66-80 |
| Tamaño | - | pequeño | pequeño | muy pequeño |
| Costo para el tipo SPDT por volumen | pesos | ≈ 15 | ≈ 8 | ≈ 120-300 |
| Tiempo de vida | ciclos | > 10 ⁹ | > 10 ⁹ | > 10 ⁸ |

Abreviaturas: SPDT Un.Polo Dos Trayectorias

TABLA 3.3: Ventajas y desventajas de interruptores MEMS para RF (3).

| Ventajas | Desventajas |
|---|--|
| Aislamiento alto para DC y RF Muy bajas pérdidas de inserción Alta linealidad de la señal Consumo de potencia casi nulo (para interruptores electrostáticos) Ancho de banda muy grande Miniaturización Circuitos de control sencillos Es posible producirlos en un volumen alto Gran resistencia ante parámetros externos: temperatura, radiación, impactos mecánicos | Altos voltajes de actuación Baja velocidad de conmutación Manejo de potencia limitado Tiempo de vida incierto Problemas de integración con circuitos para RF planares Necesidad de un empaquetamiento especial Confiabilidad incierta Precio incierto |

3.3. Estado del arte de los interruptores MEMS

Una variedad de artículos acerca de las características y comportamiento de interruptores MEMS han sido publicados en la última década. En esta sección se muestra un panorama de algunos interruptores, comentando sus principales características y comportamiento. El criterio de selección de los interruptores se basó en: la actualidad del interruptor al tiempo de ser seleccionado, su funcionamiento y comportamiento destacados, las características especiales de diseño, los procesos de fabricación o la selección de materiales estructurales.

El primer interruptor MEMS para RF fue desarrollado por los laboratorios Hughes en 1991 [6], el cual consistía de un trozo giratorio de línea de transmisión que actuaba electrostáticamente con voltajes de 100-200 [V] presentando un buen comportamiento en frecuencia hasta 45 GHz. Sus pérdidas de inserción fueron de 0.5 dB y su aislamiento fue de 35dB. Actualmente existen interruptores MEMS para RF que presentan mejores características tanto en frecuencia como en voltajes de actuación.

3.3.1. Interruptor capacitivo RAYTHEON

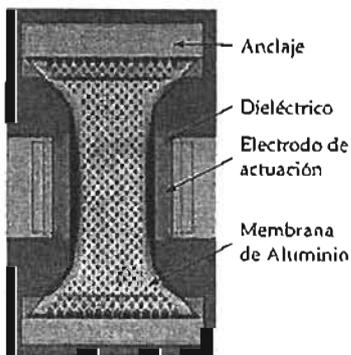


Figura 3.2: Interruptor capacitivo RAYTHEON.

Este interruptor en paralelo capacitivo fue desarrollado por TEXAS INSTRUMENTS [7, 8] de 1995-2000. El diseño del interruptor está basado en una membrana fija en ambos extremos de Al o Au suspendida sobre una guía de onda coplanar. Los anclajes están conectados al plano de tierra de una guía de onda. Se utiliza un electrodo central para accionar el interruptor y una capa de nitruro de silicio de 0.1-0.2 μm de espesor para aislar la membrana de dicho electrodo. La membrana tiene una longitud de 250-350 μm , un espesor de 0.5-1.2 μm y un ancho de 40-140 μm , dependiendo de la capacitancia (C_d) requerida en el estado cerrado (figura 3.2).

La membrana se encuentra suspendida por encima de la trayectoria de RF de la línea de transmisión, en la posición abierta, mientras no exista un potencial aplicado entre ésta y el electrodo que se encuentra debajo. La capacitancia en este estado (C_u) es de 20-50 fF y no afecta la señal de microondas que pasa por el conductor central de la línea de transmisión. En el estado cerrado la capacitancia (C_d) es de 1.2-3.6 pF. Las mediciones de los parámetros S del interruptor, reportados en [8], indican que tiene *pérdidas de inserción* de 0.15 dB a 10 GHz y 0.28 dB a 35 GHz y *aislamiento* promedio de 15 dB a 10 GHz y mejora a 35 dB a 35 GHz. Este interruptor ha sido utilizado en desplazadores de fase en las bandas X y K.

Sus principales características se resumen en la tabla 3.4.

TABLA 3.4: Parámetros del interruptor capacitivo RAYTHEON.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|-------------------------------|---------------------------------|--|--------------------------------------|
| Longitud [μm] | 270-350 | Área de actuación [μm^2] | 80x100 |
| Ancho [μm] | 50-200 | Voltaje de actuación [V] | 30-50 |
| Altura [μm] | 3-5 | Velocidad de conmutación [μs] | ≈ 5 |
| Material | Aluminio | C_d [pF] | 1-6 |
| Espesor [μm] | 0.5 | C_d/C_{it} | 80-120 |
| Esfuerzo residual [MPa] | 10-20 | Inductancia [pH] | 5-10 |
| Constante de rigidez [N/m] | 6-20 | Resistencia [Ω] | 0.25-0.35 |
| Huecos [μm] | 3-5 | Aislamiento [dB] | -15 (10 GHz) |
| Capa de sacrificio | Polymide | Aislamiento [dB] | -35 (35 GHz) |
| Dieléctrico [μm] | 0.1 (Si_3N_4) | Pérdidas de inserción [dB] | 0.15 (10 GHz) |
| Tiempo de vida | 10^8 ciclos | Sustrato | > 10000 [$\Omega\cdot\text{cm}$] |

3.3.2. Interruptor en paralelo desarrollado por la Universidad de Illinois

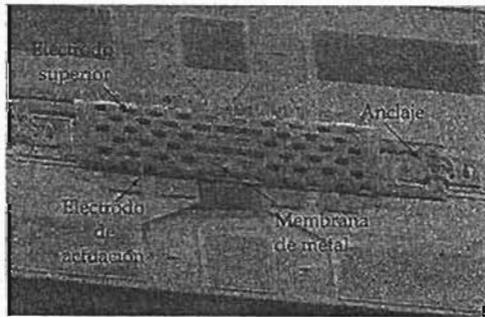


Figura 3.3: Interruptor en paralelo con contacto metal-metal.

La Universidad de Illinois desarrolló este interruptor en paralelo de bajo voltaje de actuación de 1999-2000 [9]. En este diseño el bajo voltaje de actuación se logra mediante el uso de vigas delgadas que soportan la membrana. El interruptor tiene dos electrodos de actuación en ambos lados del conductor central de la línea y otros dos electrodos superiores para mantener la membrana en la posición abierta cuando el interruptor no está actuando (figura 3.3).

Los electrodos y la membrana están fabricados de oro y se utiliza una capa de nitruro de silicio entre cada electrodo y la membrana pero no entre ésta y el conductor central de la línea, por lo que entre éstos existe un contacto metal-metal. Este interruptor se fabricó sobre un sustrato de GaAs, las mediciones obtenidas mostraron un aislamiento de -25 dB de DC-40 GHz y pérdidas de inserción de 0.1 dB hasta 40 GHz (tabla 3.5).

TABLA 3.5: Parámetros del interruptor en paralelo desarrollado por la Universidad de Illinois con contacto metal-metal.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|----------------------------|---------------------|--|----------------------------------|
| Longitud [μm] | 300-400 | Área de actuación [μm^2] | 80x100 (x2) |
| Ancho [μm] | 100 | Voltaje de actuación [V] | 9-16 |
| Altura [μm] | 4 | Velocidad de conmutación [μs] | N/A |
| Material | Au | Resistencia de contacto [Ω] | 1-1.5 |
| Espesor [μm] | 0.6 | C_{ii} [fF] | 40 |
| Esfuerzo residual [MPa] | 20-40 | Inductancia [pH] | 1-2 |
| Constante de rigidez [N/m] | 2-6 | Aislamiento [dB] | -25 (0.1 - 40 GHz) |
| Huecos | 8 [μm] | Pérdidas [dB] | 0.1 (0.1 - 40 GHz) |
| Capa de sacrificio | Polymide | Dieléctrico [μm] | 0.15 (Si_3N_4) |
| Sustrato | GaAs | | |

3.3.3. Interruptor capacitivo en línea

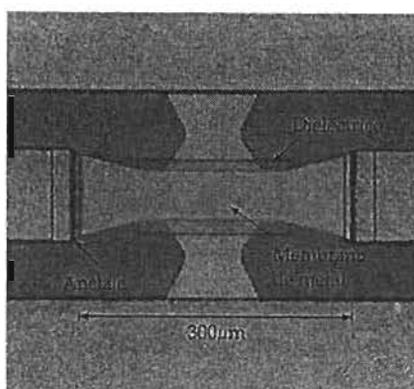


Figura 3.4: Interruptor en línea.

Este interruptor fue desarrollado por la Universidad de Michigan de 1999-2001. Está implementado sobre el conductor central de una guía de onda coplanar estándar y está suspendido sobre otro conductor que conecta las dos tierras de la línea. Hay una capa dieléctrica de nitruro de silicio entre la membrana y la tierra de la línea (figura 3.4).

El interruptor se basa en una membrana de Ti/Au de resistencia baja (0.1Ω), con un espesor que varía de $0.8-1.0 \mu\text{m}$, y está suspendida $1.5-2.2 \mu\text{m}$ por encima de la línea de transmisión, esta altura permite tener voltajes de actuación de $12-24 \text{ V}$ manteniendo una constante de rigidez alta; aunque su desventaja es que tiene una relación de capacitancias (C_d/C_{ii}) de $20-40$ [10].

Las principales características de este interruptor se muestran en la tabla 3.6.

TABLA 3.6: Parámetros del interruptor capacitivo *en línea* desarrollado por la Universidad de Michigan.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|-------------------------------|--|--|---------------|
| Longitud [μm] | 250-350 | Área de actuación [μm^2] | 60x140 |
| Ancho [μm] | 40-140 | Voltaje de actuación [V] | 12-25 |
| Altura [μm] | 1.5-2 | Velocidad de conmutación [μs] | 6-15 |
| Material | Ti/Au | C_{II} [pF] | 0.5-3 |
| Espesor [μm] | 0.8-1.0 | C_d/C_{II} | 20-40 |
| Esfuerzo residual [MPa] | 20-40 | Inductancia [pH] | 5-15 |
| Constante de rigidez [N/m] | 20-60 | Resistencia [Ω] | 0.08-0.15 |
| Huecos | Si/No | Aislamiento [dB] | -30 (30 GHz) |
| Capa de sacrificio | Fotorresist/SiO ₂ | Pérdidas [dB] | 0.03 (10 GHz) |
| Dieléctrico [μm] | 0.1-0.15 (Si ₃ N ₄) | Pérdidas [dB] | 0.05 (30 GHz) |
| Sustrato | Si (3000 [$\Omega\cdot\text{cm}$)] [11] | | |

3.3.4. Interruptor de bajo voltaje de actuación

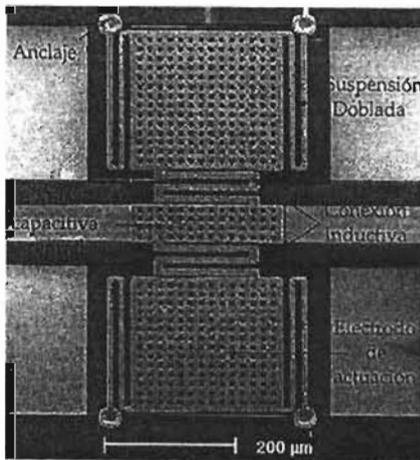


Figura 3.5: Interruptor de bajo voltaje de actuación.

Fue desarrollado de 1997-2000 [12] por la Universidad de Michigan. La membrana de níquel está suspendida por suspensiones dobladas que presentan una constante de rigidez baja, las cuales están unidas a los electrodos que proveen el área de actuación del interruptor. El plato central que está unido a estos electrodos es el que hace el corto circuito una vez que el interruptor se cierra. El voltaje de actuación depende del número de dobleces de la suspensión y del espesor de la membrana. Con este diseño es posible obtener un voltaje de actuación de 6-12 V con una altura de 4-5 μm entre la membrana y el conductor central de la línea de transmisión (figura 3.5).

Este interruptor ha mostrado excelentes características en altas frecuencias con pérdidas de inserción de 0.1 dB y aislamiento de -25 dB ambas a 30 GHz. Sus características se presentan en la tabla 3.7.

TABLA 3.7: Parámetros del interruptor de bajo voltaje de actuación desarrollado por la Universidad de Michigan.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|-------------------------------|--------------------------------------|--|------------------|
| Longitud [μm] | 500-700 | Área de actuación [μm^2] | 200x200 (x2) |
| Ancho [μm] | 200-250 | Voltaje de actuación [V] | 6-20 |
| Altura [μm] | 4-5 | Velocidad de conmutación [μs] | 20-40 |
| Material | Níquel | C_d [pF] | 1-3 |
| Espesor [μm] | 2-2.5 | C_d/C_u | 30-50 |
| Esfuerzo residual [MPa] | 20-100 | Inductancia [pH] | 1-2 |
| Constante de rigidez [N/m] | 1-10 | Resistencia [Ω] | 0.2-0.3 |
| Huecos [μm] | 10 | Aislamiento [dB] | -25 (30 GHz) |
| Capa de sacrificio | Polymide | Pérdidas de inserción [dB] | 0.1 (1 - 40 GHz) |
| Dieléctrico [μm] | 0.1-0.15 (Si_3N_4) | Sustrato | Silicio |

3.3.5. Interruptor capacitivo en serie desarrollado por los laboratorios LINCOLN

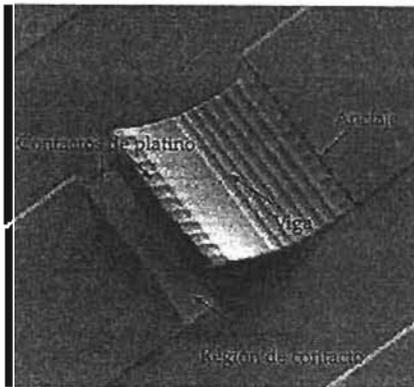


Figura 3.6: Interruptor en serie desarrollado por los laboratorios Lincoln [13].

Fue desarrollado por los Laboratorios Lincoln de 1999-2000 sobre sustratos de silicio. El interruptor está basado en una viga que está *ondulada* en la posición abierta con una separación de 10-15 μm , por lo que su capacitancia en este estado (C_u) es de 4-8 fF. Este interruptor es muy compacto, tiene una longitud de menos de 50 μm de largo, y está fabricado por tres capas: 0.2 μm de SiO_2 , 0.5 μm de Al y una cubierta final de 0.2 μm de SiO_2 (figura 3.6). El voltaje de actuación para este interruptor es de 50-60 V.

Existen dos versiones de éste interruptor, la primera tiene una área de contacto metal-metal de 8 x 45 [μm^2] (figura 3.7 (a)) y la segunda es una configuración capacitiva con una área de contacto de 50 x 150 [μm^2] con una capacitancia C_d de 1-1.5 pF (figura 3.7 (b)). Las principales características de este interruptor se muestran en la tabla 3.8.

TABLA 3.8: Parámetros del interruptor en serie desarrollado por los laboratorios Lincoln.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|-------------------------------|------------------------|--|----------------------------------|
| Longitud [μm] | 55-200 | Área de actuación [μm^2] | 45x50 |
| Ancho [μm] | 50 | Voltaje de actuación [V] | 30-80 |
| Altura [μm] | 2-15 | Velocidad de conmutación [μs] | 1-20 |
| Material | Óxido/Al/Óxido | C_{ii} [fF] | 4-6 |
| Espesor [μm] | 0.2/0.5/0.2 | Resistencia, R_s [Ω] | 1-2 |
| Esfuerzo residual | Muy alto | Inductancia | Despreciable |
| Huecos | No | Aislamiento [dB] | -40 (4 GHz) |
| Capa de sacrificio | Polymide | Aislamiento [dB] | -22 (30 GHz) |
| Dieléctrico [μm] | 0.1 (SiO_2) | Sustrato | Si (3000 [$\Omega\text{-cm}$]) |

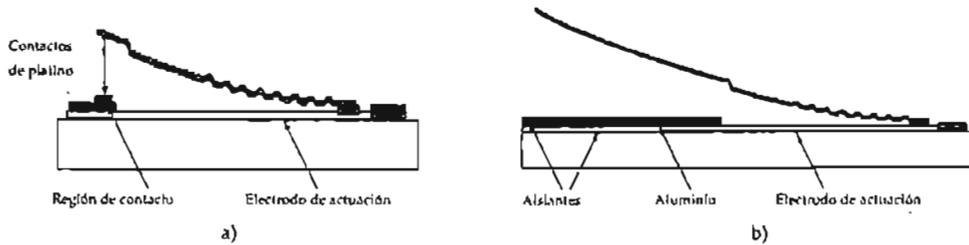


Figura 3.7: a) Vista transversal del interruptor con contacto metal-metal b) Vista transversal del interruptor tipo capacitivo.

3.3.6. Interruptor en serie desarrollado por la Compañía ROCKWELL SCIENTIFIC

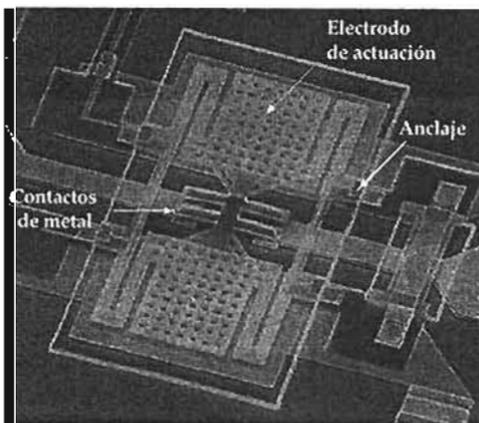


Figura 3.8: Interruptor en serie desarrollado por la compañía ROCKWELL SCIENTIFIC.

Este interruptor ha sido desarrollado de 1995-2001 [14, 15] y ha sido fabricado sobre sustratos de GaAs. La membrana está conectada a la superficie por cuatro anclajes utilizando una suspensión doblada (figura 3.8). Los electrodos del interruptor tienen dimensiones de $75 \times 75 [\mu\text{m}^2]$, y están fabricados por una capa delgada de oro de $0.25 [\mu\text{m}]$ sobre una capa de dióxido de silicio de $1-2 [\mu\text{m}]$ de espesor. La membrana de dióxido de silicio tiene un arreglo de huecos que reducen la velocidad de conmutación.

El interruptor está suspendido $2-2.5 [\mu\text{m}]$ por encima del sustrato y su voltaje de actuación es de 60V. El área de contacto metal-metal está formada por dos

pares de "puntos de contacto" y la capa de contacto sobre la línea de transmisión está fabricada de Au. Debido a el área de contacto tan pequeña y la altura de la membrana, es posible obtener una capacitancia en el estado abierto, C_{in} , de 1.75-2 [fF]. Ha sido incorporado en el diseño y fabricación de una red de conmutación en tiempo real sobre un sustrato de GaAs con un ancho de banda de DC - 40 GHz [16]. Sus características se presentan en la tabla 3.9.

TABLA 3.9: Parámetros del interruptor desarrollado por la compañía ROCKWELL SCIENTIFIC.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|----------------------------|--------------------------|--|----------------|
| Longitud [μm] | 250 | Área de actuación [μm^2] | 75 x 75 (x2) |
| Ancho [μm] | 150 | Voltaje de actuación [V] | 50-60 |
| Altura [μm] | 2-2.5 | Velocidad de conmutación [μs] | 8-10 |
| Material | SiO ₂ /Au | Resistencia [Ω] | 0.8-2 |
| Espesor [μm] | 2/0.25 | C_{in} [fF] | 1.75-2 |
| Esfuerzo residual [MPa] | Bajo | Inductancia [pH] | 40-60 |
| Constante de rigidez [N/m] | 15 | Aislamiento [dB] | -50 (4GHz) |
| Huecos | Si | Aislamiento [dB] | -30 (40 GHz) |
| Capa de sacrificio | Polymide | Pérdidas de inserción [dB] | 0.1 (1-50 GHz) |
| Tiempo de vida | 1.2×10^8 ciclos | Sustrato | GaAs |

3.3.7. Interruptor en forma de S de bajo voltaje de actuación

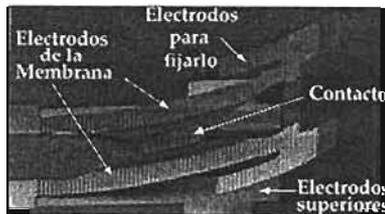


Figura 3.9: Parte superior del interruptor en forma de S.

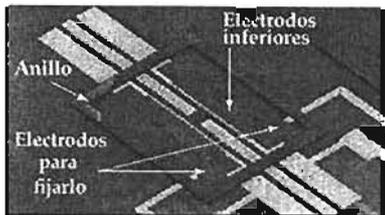


Figura 3.10: Parte inferior del interruptor en forma de S.

El interruptor en forma de S en serie y de bajo voltaje de actuación diseñado de 2003-2004 [17] se basa en la versión del interruptor que fue desarrollado por Shikida M. [18] en 1997.

El interruptor está formado por dos partes, la primera es una membrana delgada y flexible que presenta una curvatura, fabricada de dos capas: la primera es de nitruro de silicio, seguida de una capa delgada de oro (figura 3.9). La segunda parte es una guía de onda coplanar la cual presenta una discontinuidad en su conductor central y un anillo que define la distancia entre las dos partes al momento de ser ensambladas (figura 3.10). Sus características se resumen en la tabla 3.10.

TABLA 3.10: Parámetros del interruptor en forma de S en serie con contacto metal-metal

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| Longitud [μm] | 950 | Área de actuación [μm^2] | 82500×2 |
| Altura [μm] | 14.2 | Área de contacto [μm^2] | 3500×2 |
| Ancho [μm] | 900 | Voltaje para abrirlo [V] | 12 |
| Material de los contactos | Au | Voltaje para cerrarlo [V] | 15.8 |
| Material de la membrana | SiN/Au/Cr | Resistencia de contacto [Ω] | 0.65 |
| Espesor [μm] | 1/0.19 | C_u [fF] | 4.2 |
| Aislamiento [dB] | -45 (<2GHz) | Aislamiento [dB] | -30 (15 GHz) |
| Capa de sacrificio | Polymide | Pérdidas de inserción [dB] | 2.5 (10 GHz) |
| Sustrato | Si (1500 [$\Omega\text{-cm}$]) | | |

Una vez ensambladas las dos partes del interruptor, la membrana queda sujeta por ambos extremos entre los electrodos inferior y superior, su extremo final está sujeto por medio de otro par de electrodos independientes (figura 3.11). Debido a que existen dos electrodos (inferior y superior) se pueden ejercer fuerzas de atracción muy grandes para abrir y cerrar el interruptor, logrando que el voltaje de actuación sea independiente de la separación entre la membrana y el electrodo inferior; además se puede utilizar una membrana flexible que baje el voltaje de actuación. La figura 3.12 muestra la transición del interruptor del estado abierto al cerrado.

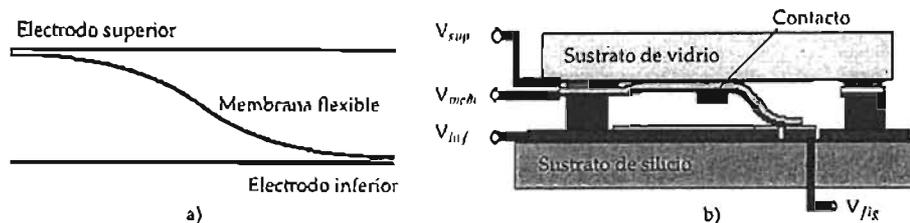


Figura 3.11: a) Concepto básico del interruptor en forma de S. b) Vista transversal del interruptor en forma de S.

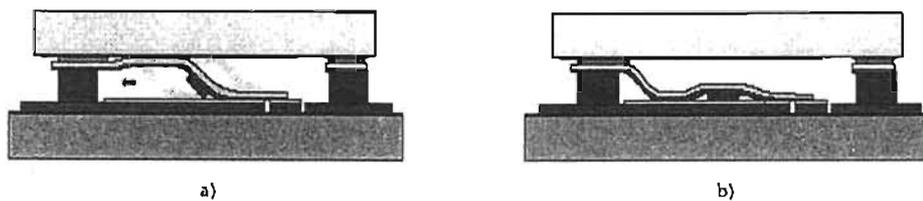


Figura 3.12: Interruptor en forma de S durante la transición del estado abierto al cerrado.

3.4. Aplicaciones de los interruptores MEMS

Los interruptores MEMS fueron desarrollados para conmutar la propagación de una señal y mantener una alta pureza de dicha señal. Esta función de conmutación tal vez sea usada para conectar o desconectar un potencial eléctrico o para la selección de señales, por ejemplo la selección de una señal de entrada o de salida de una antena o para la reconfiguración de un subsistema. Aplicaciones típicas para este último caso son bancos de filtros sintonizados a base de la conmutación de capacitores o inductores variables, conmutación de líneas de retardo en desplazadores de fase, acoplamiento de líneas de transmisión por medio de la conmutación de stubs o capacitores y configuración del patrón de radiación de una antena conmutando algunas partes de la antena.

Dependiendo de las especificaciones de frecuencia, para ciertas aplicaciones se prefieren interruptores del tipo capacitivo o con contactos metal-metal.

Para conmutar señales de DC a RF en equipos de prueba y medición de alta calidad se requiere un ancho de banda de DC a unas pocas decenas de GHz con muy buenas propiedades de la señal en todo este rango. La velocidad de conmutación y la potencia consumida no son de gran importancia. Por lo cual, los interruptores con contactos de metal-metal son buenos candidatos para estas aplicaciones. Los microrelays fueron diseñados para aplicaciones donde corrientes de DC o de bajas frecuencias tienen que ser conmutadas.

Los interruptores capacitivos son diseñados usualmente para trabajar con frecuencias mayores a 1 GHz y para pequeños anchos de banda. Especialmente cuando se maneja equipo inalámbrico, se requiere bajo consumo de potencia y un tamaño pequeño.

Aplicaciones militares y espaciales se favorecen de los componentes MEMS debido a la robustez en contra de influencias externas tales como radiación, cambios de temperatura, variedad de fuertes campos electromagnéticos y alta resistencia ante impactos mecánicos.

La confiabilidad del interruptor y su tiempo de vida del orden no menor a unas decenas de billones de ciclos son de igual manera importantes para muchas aplicaciones.

En la figura 3.13 se muestran las principales aplicaciones de los interruptores MEMS.

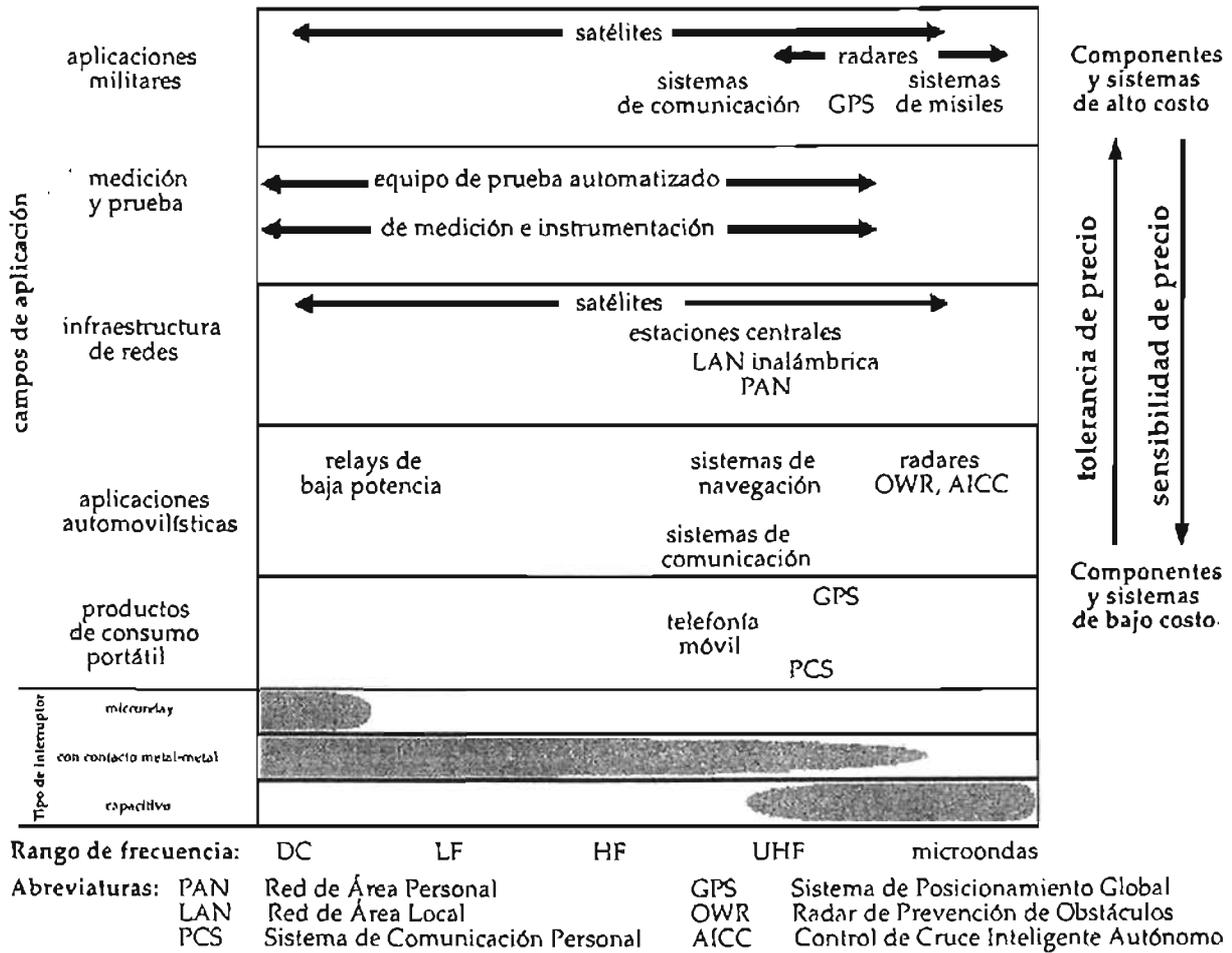


Figura 3.13: Principales aplicaciones de los interruptores MEMS

3.5. Conclusiones

Se obtuvo el concepto general de los interruptores MEMS para RF y se conocieron los parámetros de diseño más importantes que tienen que ser considerados para obtener un interruptor que posea un buen rendimiento dentro del sistema de comunicaciones en el cual se incorporará.

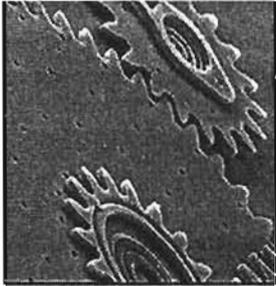
Se realizó una clasificación de dichos interruptores de acuerdo a su configuración, mecanismo de actuación, etc., y se les comparó con los interruptores de estado sólido PIN y a FET's llegando a la conclusión de que la eficiencia de los interruptores MEMS es superior a la de los interruptores de estado sólido.

Se obtuvo un panorama de los interruptores MEMS más sobresalientes durante los últimos diez años, además de una descripción sobre las configuraciones que presentan mejores características en alta frecuencia y sobre los materiales que son más utilizados en la fabricación de estos interruptores.

Se concluye que los voltajes de actuación para los interruptores MEMS más destacados en el estado del arte se encuentran entre un intervalo de 6 – 80 [V].

Se concluye que la velocidad de conmutación de los interruptores MEMS más destacados en el estado del arte se encuentran entre un intervalo de 2 – 40 [μ s].

Se concluye que los sustratos sobre los cuales se construyen los interruptores MEMS por lo general poseen resistividades de 1500 – 10000 [Ω ·cm].



Capítulo 4

Modelado Electromecánico del Interruptor

4.1. Especificaciones de diseño

Las especificaciones de los interruptores electrostáticos propuestos son:

- ❶ Aplicación en la banda Ka (26.5 [GHz] - 40 [GHz]).
- ❷ Factor de Calidad de Conmutación (K) > 5000.
- ❸ Bajo voltaje de actuación < 10 [V] .
- ❹ Dimensiones menores a 1000 [μm^2] .
- ❺ Diseño basado en el proceso MetalMUMPs.
- ❻ Velocidad de conmutación en el intervalo de 1 [μs] - 40 [μs] .

Una vez hecho el análisis del proceso de fabricación en el cual se basarán los diseños de los interruptores concluimos que un **interruptor capacitivo en serie** es una propuesta viable. En este trabajo se proponen dos interruptores de este tipo.

4.2. Análisis electromecánico del interruptor capacitivo

Los parámetros a considerar en el diseño electromecánico son:

- Constante de rigidez (K_z).
- Distancia entre electrodos (g_0).
- Área de los electrodos (A).

El objetivo del diseño electromecánico será obtener un balance de los parámetros mencionados para obtener una actuación mecánica confiable y cumplir con los objetivos planteados, en este caso, que sea de bajo voltaje de actuación. En seguida se presenta un análisis de la relación mutua que tienen éstos parámetros:

Cuando se aplica una diferencia de potencial entre una barra fija en uno ó ambos extremos y el electrodo para accionarlo, se induce una fuerza electrostática (F_e) en la barra, al mismo tiempo la barra ejerce una fuerza de restauración (F_s) en sentido contrario a esta última. Una vez que el interruptor se cierra existe otra fuerza llamada fuerza de contacto (F_c), también en dirección opuesta a la fuerza electrostática, ver la figura 4.1. Debido a que la masa del interruptor es muy pequeña, del orden de 10^{-10} a 10^{-11} [kg], éste no es sensible a la fuerza de aceleración gravitacional [5]

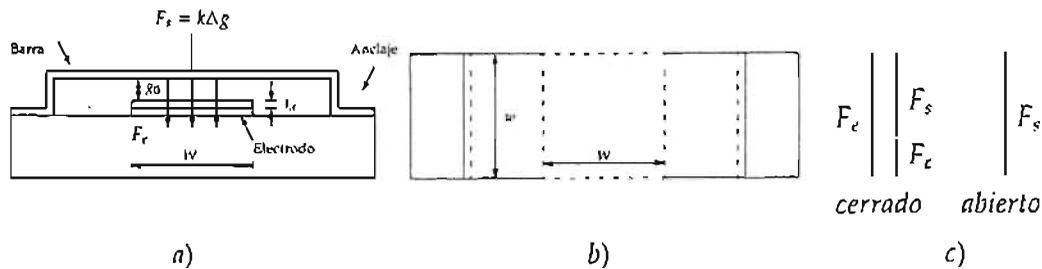


Figura 4.1: Barra sujeta en ambos extremos. a) Vista lateral. b) Vista superior. c) Fuerzas que actúan sobre el interruptor en el estado abierto y cerrado.

Debido a que la operación del interruptor está limitada a desplazamientos pequeños, su comportamiento mecánico puede ser modelado utilizando una constante de rigidez lineal en la dirección del movimiento, K_z [N/m], por lo tanto la fuerza de restauración (F_s) del interruptor está dada por:

$$F_s = K_z \Delta g \tag{4.1}$$

donde Δg es el desplazamiento de la viga.

La constante de rigidez del interruptor se puede modelar en dos partes. Una parte, k' , debida a la rigidez de la viga y que toma en cuenta las características del material con el que está fabricada como son su módulo de Young, E [Pa], y el momento de inercia I [m⁴]. La otra parte de la constante de rigidez, k'' , se debe a el esfuerzo residual, σ [Pa], dentro de la barra y es resultado del proceso de fabricación del mismo.

El interruptor se puede modelar como un capacitor de placas paralelas para aproximar la fuerza electrostática inducida sobre éste. Dado que el ancho de la barra es w y el ancho del electrodo para accionarlo es W ($A = Ww$)(figura 4.1), la

capacitancia entre ambos tomando en cuenta el espesor del dieléctrico es:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{g + \left(\frac{t_d}{\epsilon_r}\right)} = \frac{\epsilon_0 W t v}{g + \left(\frac{t_d}{\epsilon_r}\right)} \quad (4.2)$$

donde g es la distancia entre el interruptor y el electrodo para accionarlo (brecha ó gap), t_d es el espesor del dieléctrico y ϵ_r es la constante dieléctrica relativa del aislante. La fuerza electrostática aplicada a la barra se puede encontrar considerando la potencia entregada a una capacitancia dependiente de la distancia entre el interruptor y el electrodo [19], esta es:

$$F_e = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC(g)}{dg} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A V^2}{\left(g + \frac{t_d}{\epsilon_r}\right)^2} \quad (4.3)$$

donde V es la diferencia de potencial aplicada entre la barra y el electrodo. Nótese que la fuerza es independiente de la polaridad de la diferencia de potencial. Para $g \gg t_d$, la ecuación (4.3) se reduce a:

$$F_e = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A V^2}{g^2} \quad (4.4)$$

Si se toma como aproximación que la fuerza electrostática se distribuye uniformemente en la sección del interruptor que se encuentra encima del electrodo, entonces su constante de rigidez se puede utilizar para determinar la distancia que se mueve el interruptor debido a la fuerza aplicada dada por la ecuación (4.4).

A fin de encontrar la relación entre el voltaje de actuación del interruptor con la constante de rigidez del mismo, se iguala la fuerza electrostática aplicada con la fuerza mecánica de restauración del interruptor debida a su rigidez ($F_s = K_z x$), obteniendo:

$$\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 W w V^2}{g^2} = K_z (g_0 - g) \quad (4.5)$$

donde g_0 es la altura del interruptor cuando no tiene aplicada ninguna diferencia de potencial. Resolviendo ésta ecuación para el voltaje resulta:

$$V = \sqrt{\frac{2K_z}{\epsilon_0 W w} g^2 (g_0 - g)} \quad (4.6)$$

La figura 4.2 muestra el movimiento de un interruptor debido a la diferencia de potencial aplicada entre éste y su electrodo de actuación.

La gráfica de la figura 4.2 muestra que la posición del interruptor se vuelve inestable a $(2/3)g_0$, lo cual se debe a la realimentación positiva en la actuación electrostática. Esto se puede entender considerando la fuerza electrostática en

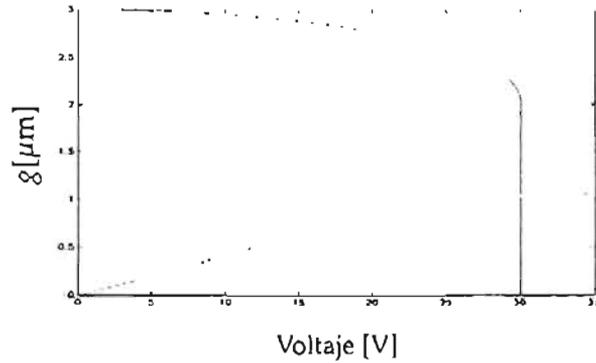


Figura 4.2: Distancia entre el interruptor y el electrodo contra voltaje aplicado con $W=100[\mu\text{m}]$, $w=100[\mu\text{m}]$, $g_0=3[\mu\text{m}]$, y $k=10[\text{N/m}]$. El voltaje de actuación es de 30 [V]. La línea punteada representa la región inestable de la distancia entre la barra y el electrodo.

términos del campo eléctrico aplicado a el interruptor [19, 20] y tomando en cuenta que se encuentra en un medio dieléctrico uniforme:

$$F_e = \frac{QE}{2} \tag{4.7}$$

donde Q es la carga en el interruptor y $E = V/g$ es el campo eléctrico debido a la diferencia de potencial aplicada. Cuando se incrementa la diferencia de potencial, la fuerza electrostática se incrementa debido a un incremento en la carga. Simultáneamente esta fuerza disminuye la distancia entre el interruptor y el electrodo, que a su vez, incrementa la capacitancia, la carga y el campo eléctrico. A una cierta distancia, el incremento en la fuerza electrostática es más grande que el incremento en la fuerza de restauración del interruptor, provocando que la posición del interruptor sea inestable y que finalmente se cierre [22].

Tomando la derivada de la ecuación (4.6) con respecto a la distancia entre el interruptor y el electrodo, g , e igualándola a cero, se obtiene la distancia a la cual la inestabilidad ocurre, la cual resulta ser dos tercios de la distancia entre el interruptor y el electrodo cuando no se le está aplicando ninguna diferencia de potencial, $(2/3)g_0$. Sustituyendo este valor en la ecuación (4.6), el voltaje de actuación del interruptor es:

$$V_p = V\left(\frac{2g_0}{3}\right) = \sqrt{\frac{8K_z g_0^3}{27\epsilon_0 W w}} = \sqrt{\frac{8K_z g_0^3}{27A\epsilon_0}} \tag{4.8}$$

4.3. Diseño mecánico

Para que el interruptor sea confiable es necesario que tenga la fuerza de restauración (F_s) necesaria para prevenir que el interruptor se quede pegado. Una fuerza de restauración alta se puede obtener con una estructura relativamente rígida y una distancia grande entre el interruptor y el electrodo, pero la estructura requeriría de una fuerza electrostática (F_e) muy grande para realizar la conmutación del interruptor. La fuerza electrostática se puede incrementar mediante la diferencia de potencial aplicada a la estructura o utilizando electrodos con una área (A) grande, pero el tamaño de la estructura también aumentaría (figura 4.3) [3].

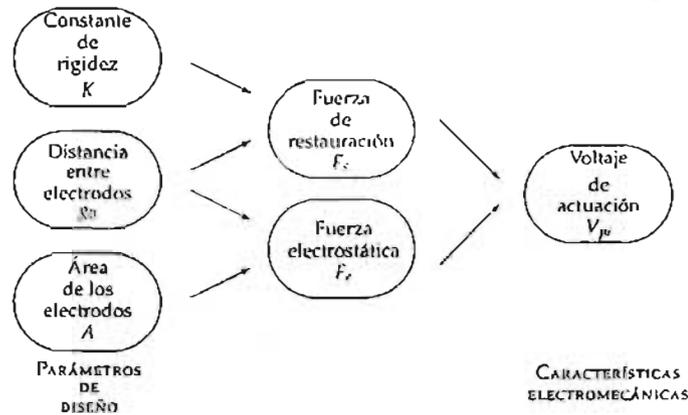


Figura 4.3: Conexión entre los parámetros de diseño y como afectan las características electromecánicas del interruptor.

A partir de la ecuación (4.8) observamos que existen dos formas de bajar el voltaje de actuación. La distancia entre la viga y el electrodo de actuación (g_0) no se considera como un parámetro variable debido a que el diseño se basa en el proceso MetalMUMPs y ésta depende del grosor de la segunda capa de sacrificio, el cual es fijo. La primer forma de disminuir el voltaje de actuación es aumentando el área A donde se aplica la fuerza electrostática, aunque dentro de ciertos límites, dado que es deseable que el dispositivo ocupe el menor espacio posible. La segunda alternativa es disminuir la rigidez mecánica de la viga, K_2 .

Es importante mencionar que existen dos límites que es necesario considerar al realizar las modificaciones mencionadas. El primero involucra la resistencia de los materiales que forman la viga; debido a que éstos tienen un punto crítico de resistencia al esfuerzo que ejercerá la fuerza electrostática del electrodo al accionar el interruptor, al hacer más larga y ancha la viga, el esfuerzo que ésta puede resistir es cada vez menor y se puede provocar una deformación o ruptura de la viga. El segundo límite es el valor de la fuerza de restauración de la viga, ya que éste puede llegar a ser tan pequeño que provocaría que el interruptor deje de funcionar (ver figura 4.1); es decir, el interruptor podría dejar de conmutar de un estado cerrado a un abierto debido a que no tendría la fuerza de restauración necesaria para regresar a su posición original (estado abierto).

4.4. Diseño de los interruptores

Se propusieron dos interruptores cuyos diseños se basan en dos combinaciones diferentes de capas que el proceso MetalMUMPs permite.

4.4.1. Diseño del primer interruptor

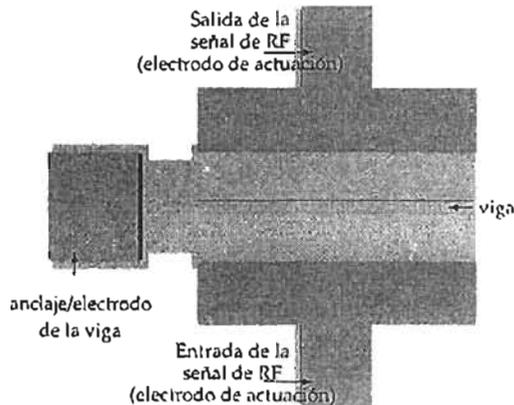


Figura 4.4: Primer interruptor.

La figura 4.4 muestra la vista superior del primer interruptor propuesto. Es un interruptor en serie que consiste en una viga de polisilicio flexible de $0.7 \mu\text{m}$ de espesor con una cubierta aislante de nitruro de silicio de $0.35 \mu\text{m}$ de espesor. La viga se encuentra debajo de dos contactos de níquel de $20 \mu\text{m}$ de espesor. La viga subirá debido a una fuerza electrostática resultado de la aplicación de una diferencia de potencial entre los contactos de níquel y la viga, provocando un corto circuito entre éstos.

4.4.2. Diseño mecánico del primer interruptor

Como se mencionó en las especificaciones su diseño se basó en el proceso MetalMUMPs (ver Apéndice A); a continuación se describe dicho diseño:

En la figura 4.5 se muestra el flujo del proceso y las diferentes capas utilizadas. Primero se deposita una capa aislante de $2 \mu\text{m}$ de óxido de silicio sobre el sustrato de silicio de $525 \mu\text{m}$ de espesor (figura 4.5 a). Se deposita una capa de $0.5 \mu\text{m}$ de fosfosilicato de vidrio (capa de sacrificio) y se graba (figura 4.5 b). Esta capa define el área donde se realizará la trinchera en el sustrato de silicio. Se deposita la primera capa de nitruro de silicio con un espesor de $0.35 \mu\text{m}$ y se graba (figura 4.5 c). Esta capa cubrirá la parte inferior de la viga de polisilicio. En la parte superior de la primera capa de nitruro de silicio, se deposita una capa de $0.7 \mu\text{m}$ de polisilicio y se graba para obtener la forma de la viga (figura 4.5 d). El paso final para construir la viga flexible es depositar la segunda capa de nitruro de silicio en la superficie del polisilicio para formar la capa aislante que impide que haya un contacto eléctrico entre la viga y los contactos de níquel, pero realizando el hueco mediante el cual habrá contacto eléctrico entre la viga y su electrodo/anclaje para poder polarizarla (figura 4.5 e).

Posteriormente se deposita la segunda capa de $1.1 \mu\text{m}$ de fosfosilicato de vidrio y se graba, como se ilustra en la figura 4.5 f). Esta capa se ataca para definir un patrón de tal manera que permita anclar los contactos de níquel en el segundo

nitruro de silicio y que haya contacto eléctrico entre la viga de polisilicio y su electrodo/anclaje para poder polarizarla. Se deposita una capa delgada de 35 [nm] de cromo y platino en las aberturas realizadas, que sirve como base para anclar la viga y los contactos de níquel (figura 4.5 g).

Enseguida se deposita una capa de metal compuesta por 20 [μm] de níquel y 3 [μm] de oro en su superficie y se graba para formar los contactos superiores de níquel y el electrodo/anclaje para polarizar la viga de polisilicio (figura 4.5 h). Se deposita una capa de oro de 3 [μm] de espesor en las paredes laterales de los contactos de níquel (figura 4.5 i) y finalmente se libera la estructura atacando las capas de sacrificio y se forma la trinchera de 25 [μm] de profundidad en el sustrato de silicio (figura 4.5 j). La distancia total entre la parte inferior de la viga y el fondo de la trinchera es de 27.5 [μm] (figura 4.6 a)).

La figura 4.6 muestra con más detalle la primera estructura propuesta y las capas que forman la viga de este interruptor.

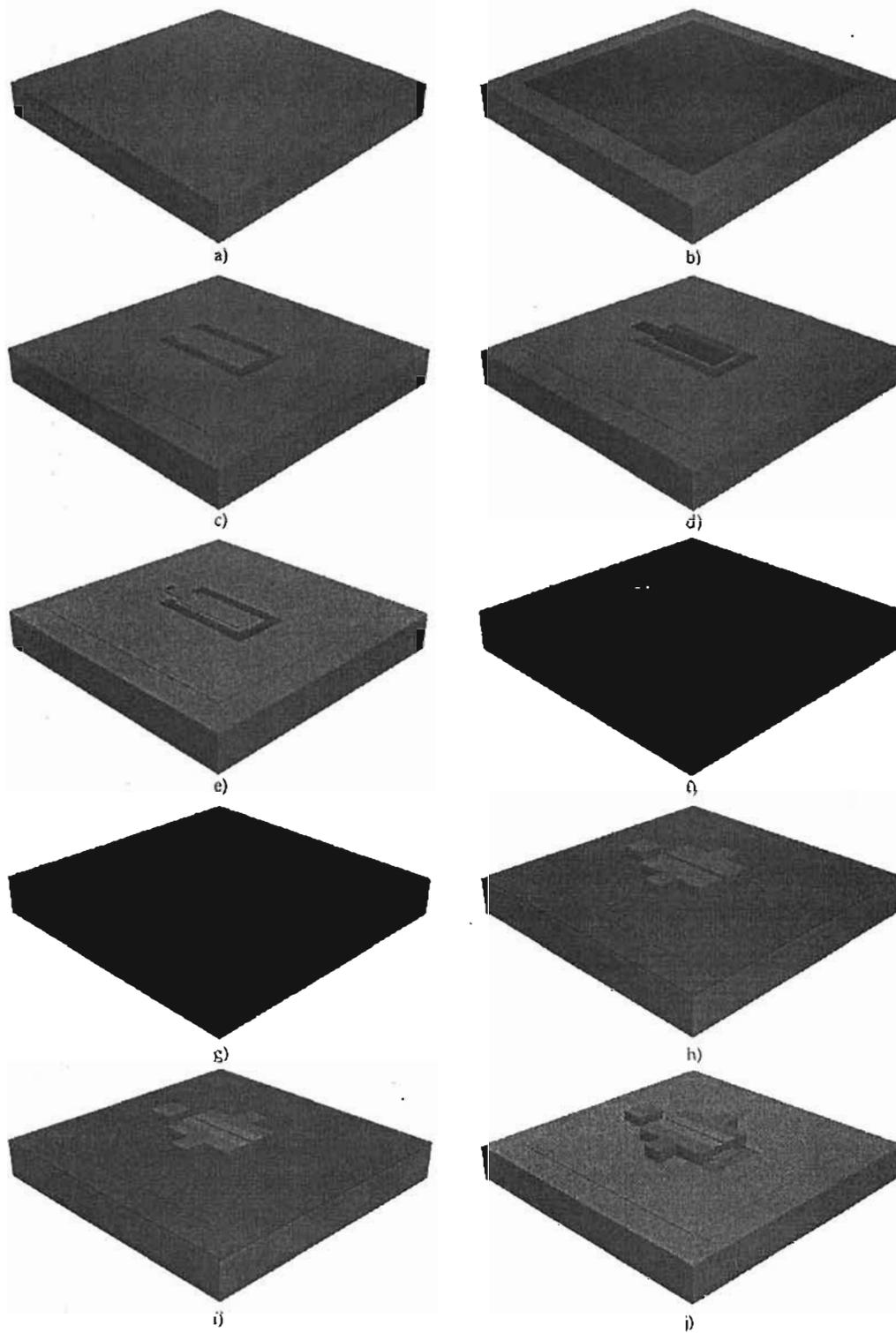


Figura 4.5: Flujo del proceso de fabricación del primer interruptor.

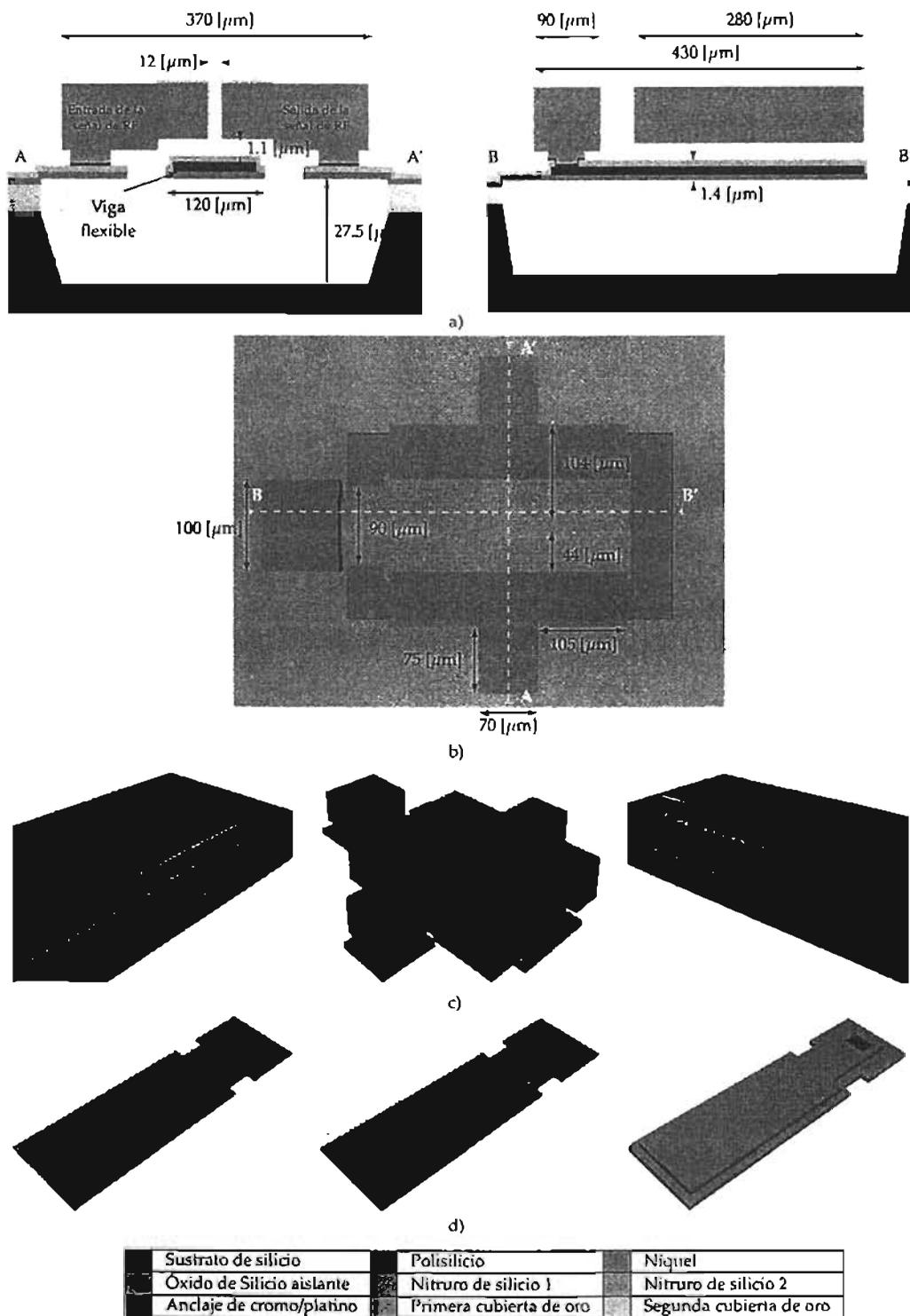
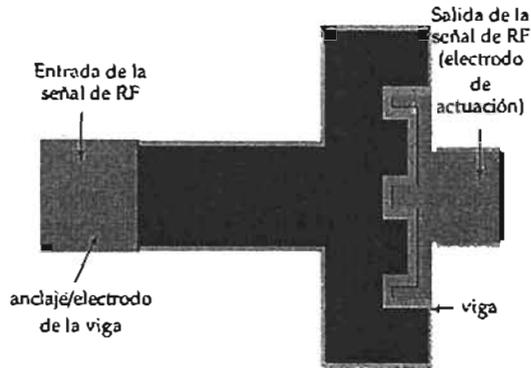


Figura 4.6: Dimensiones del primer interruptor. a) Cortes transversales en 2D. b) Vista superior. c) Cortes transversales en 3D. d) Capas que forman la viga del interruptor.

4.4.3. Diseño del segundo interruptor



La segunda estructura propuesta consiste en una viga flexible compuesta de polisilicio de $0.7\ \mu\text{m}$ de espesor rodeada por una capa de nitruro de silicio de $0.35\ \mu\text{m}$ de espesor y una capa de cromo/platino con un espesor de $35\ \text{nm}$ en la parte superior de éstas (figura 4.7).

Figura 4.7: Segundo interruptor.

4.4.4. Diseño mecánico del segundo interruptor

El flujo del proceso de fabricación del segundo interruptor se ilustra en la figura 4.8. Primero se deposita una capa de aislamiento de óxido de silicio de $2\ \mu\text{m}$ sobre el sustrato de silicio (figura 4.8 a). Se deposita la primer capa de sacrificio de fosfosilicato de vidrio con un espesor de $0.5\ \mu\text{m}$ y se graba con el patrón que define el área donde se realizará la trinchera (figura 4.8 b). Enseguida se deposita la primer capa de nitruro de silicio que tiene un espesor de $0.35\ \mu\text{m}$ y se graba para definir la forma de la viga flexible (figura 4.8 c). Esta es la primer capa que forma la viga flexible y además sirve como soporte de toda la estructura junto con la segunda capa de nitruro de silicio. Se deposita una capa de polisilicio con un espesor de $0.7\ \mu\text{m}$ y se graba para obtener la forma de la viga (figura 4.8 d). Se deposita la segunda capa de nitruro de silicio de $0.35\ \mu\text{m}$ de espesor y se graba, obteniendo el patrón de la viga y un hueco que permitirá conectar su electrodo/anclaje a ésta para polarizarla y como entrada de la señal de RF (figura 4.8 e). Posteriormente se deposita la segunda capa de sacrificio de $1.1\ \mu\text{m}$ de espesor de fosfosilicato de vidrio y se graba para obtener un patrón que permitirá depositar la última capa de la viga y los anclajes de la entrada y salida de la señal de RF (figura 4.8 f). En seguida se deposita la última capa de la viga que consiste en $35\ \text{nm}$ de Cromo/Platino; los anclajes de los electrodos de la entrada y salida de la señal de RF también están formados por esta capa (figura 4.8 g).

Finalmente se deposita una capa de níquel de $20\ \mu\text{m}$ (figura 4.8 h) con una cubierta de oro de $0.5\ \mu\text{m}$ de espesor (figura 4.8 i) y se graba para obtener los contactos de entrada y salida de la señal de RF. La estructura se libera atacando las capas de sacrificio y se forma la trinchera en el sustrato de silicio (figura 4.8 j). La figura 4.9 muestra con más detalle la estructura liberada y las capas que forman la viga de este interruptor.

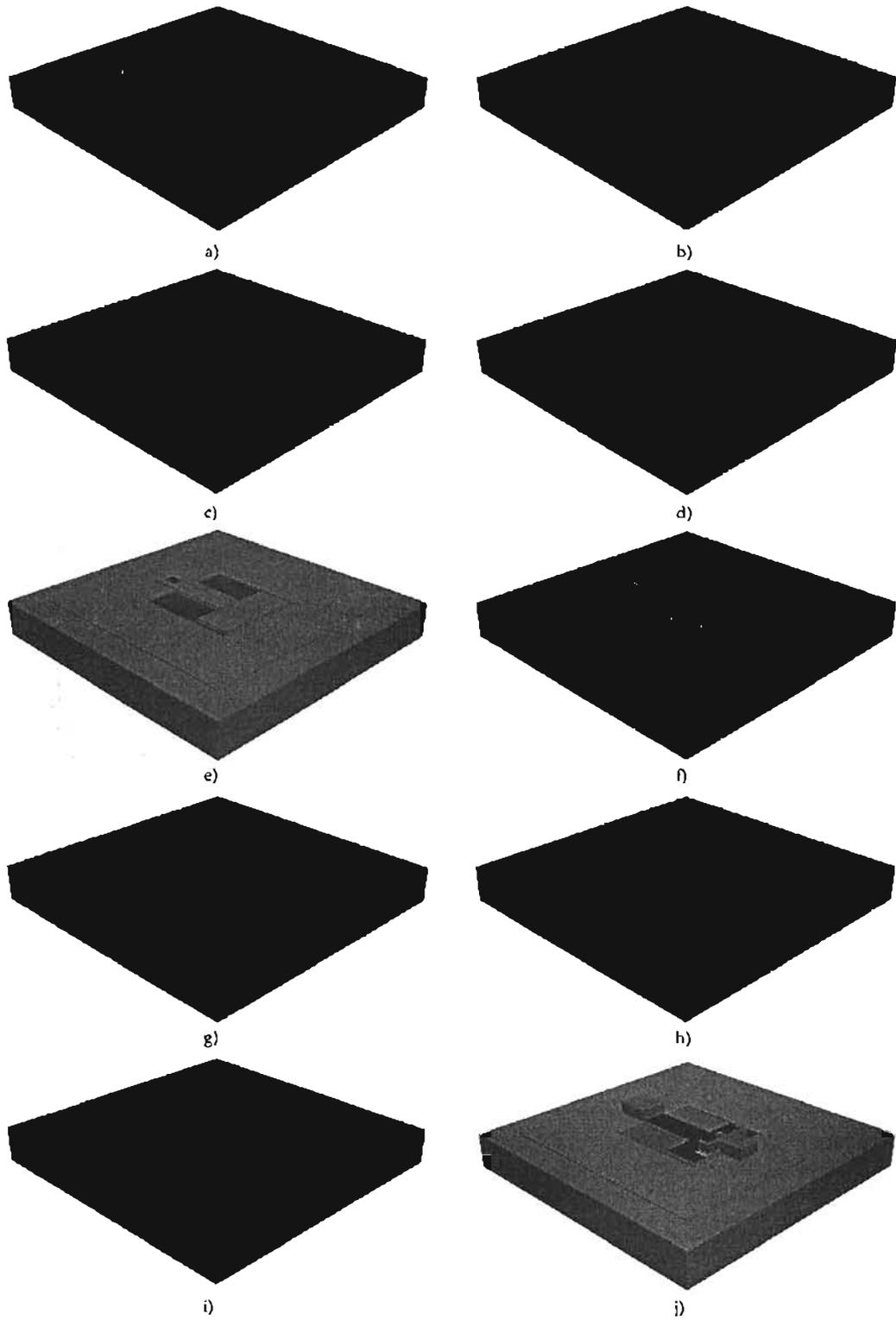


Figura 4.8: Flujo del proceso de fabricación del segundo interruptor.

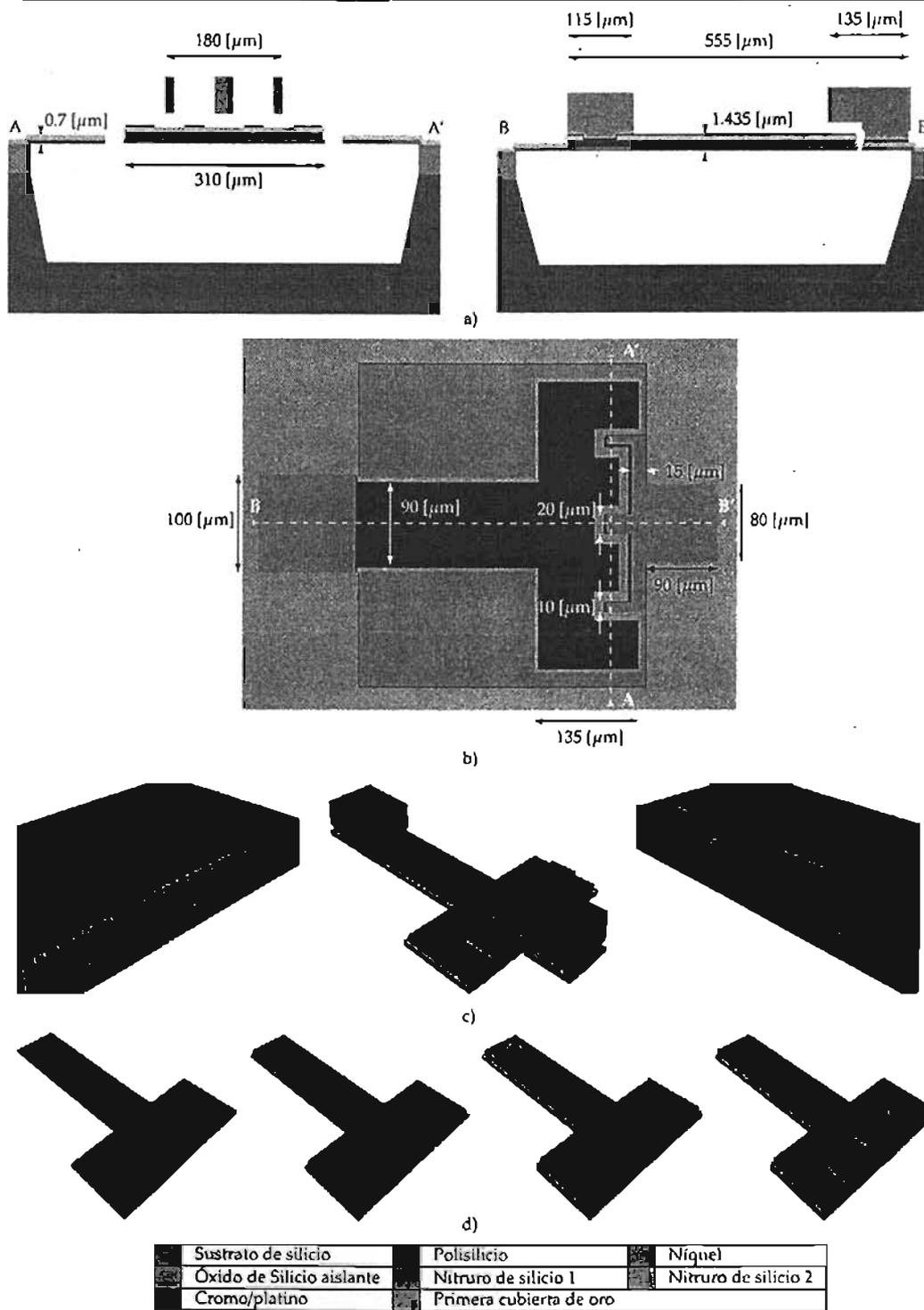


Figura 4.9: Dimensiones del segundo interruptor. a) Cortes transversales en 2D. b) Vista superior. c) Cortes transversales en 3D. d) Capas que forman la viga del interruptor.

4.5. Simulación mecánica

4.5.1. Constante de rigidez de la viga

Se utilizó CoventorWare [25] (ver Apéndice B) para simular el comportamiento mecánico de los interruptores descritos anteriormente. El comportamiento de la constante de rigidez de las vigas se obtuvo aplicándoles varios desplazamientos en la dirección z en el extremo de la viga de cada interruptor, obteniendo fuerzas de reacción en la misma dirección z (pero en sentido contrario) para cada desplazamiento aplicado. Con estos datos se aproximó su constante de rigidez para cada desplazamiento aplicado mediante la ecuación:

$$K_z = \frac{F_z}{\Delta_z} \quad (4.9)$$

Las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la simulación se muestran en la tabla 4.1.

TABLA 4.1: Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la simulación.

| Material | Constante de Young (E) [GPa] | Cociente de Poisson (ν) | Densidad [$\text{kg}/\mu\text{m}^3$] | Permitividad relativa ϵ_r | Esfuerzo residual [MPa] |
|--------------------|------------------------------|-------------------------------|--|------------------------------------|-------------------------|
| Nitruro de silicio | 222 | 0.27 | 2.70×10^{-15} | 8.0 | 90 |
| Polisilicio | 160 | 0.22 | 2.23×10^{-15} | 4.2 | N/A |
| Cromo | 140 | 0.30 | 7.19×10^{-15} | N/A | N/A |
| Platino | 145 | 0.35 | 21.4×10^{-15} | N/A | N/A |
| Níquel | 220 | 0.30 | 8.91×10^{-15} | N/A | 100 |
| Oro | 57 | 0.35 | 19.3×10^{-15} | N/A | 100 |

El tipo de mallado aplicado a las vigas, para que el software pueda aplicar el Método del Elemento Finito, fue el de tipo *Manhattan*, este tipo de mallado se crea dividiendo la geometría de la estructura en las intersecciones cóncavas de sus caras y posteriormente se sigue subdividiendo usando planos paralelos a las caras. Este tipo de modelo de mallado es recomendado para estructuras que tienen una geometría ortogonal, en donde todas sus caras son planas y están unidas en ángulos de 90° [25].

Las características de los mallados que se le aplicaron a cada una de las vigas se muestran en las figuras 4.10 y 4.11.

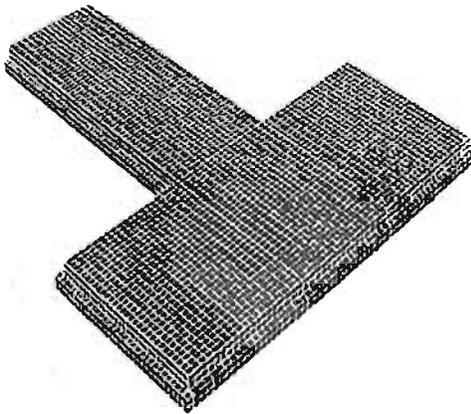
Resultados de la simulación de la constante de rigidez

Las tablas 4.2 y 4.3 muestran los desplazamientos aplicados, las fuerzas de reacción obtenidas y la constante de rigidez de la viga obtenida para cada desplazamiento aplicado en la simulación para cada interruptor. La figura 4.12 muestra



| Características del mallado | |
|---|-------------------------|
| Tipo de mallado | Manhattan |
| Número de elementos volumétricos | 14968 |
| Orden de los elementos | parabólicos |
| Tamaño de los elementos [μm] | x: 2 y: 5 z: 0.35 |

Figura 4.10: Mallado de la viga del primer interruptor.



| Características del mallado | |
|---|-------------------------|
| Tipo de mallado | Manhattan |
| Número de elementos volumétricos | 17912 |
| Orden de los elementos | parabólicos |
| Tamaño de los elementos [μm] | x: 4 y: 5 z: 0.35 |

Figura 4.11: Mallado de la viga del segundo interruptor.

el comportamiento de la constante de rigidez para cada interruptor obtenidas mediante el procedimiento descrito anteriormente.

TABLA 4.2: Resultados de la simulación de la constante de rigidez de la viga del primer interruptor obtenidos con COVENTORWARE.

| Desplazamiento Δ_z [μm] | Fuerza de reacción F_z [μN] | Constante de Rigidez K_z [N/m] |
|--|---|-------------------------------------|
| 0.25 | 1.2135 | 4.8540 |
| 0.50 | 4.0946 | 8.1892 |
| 0.75 | 7.0163 | 9.3550 |
| 1.00 | 10.0127 | 10.0127 |
| 1.25 | 13.1180 | 10.4944 |
| 1.50 | 16.3659 | 10.9106 |
| 1.75 | 19.7900 | 11.3086 |
| 2.00 | 23.4237 | 11.7118 |

TABLA 4.3: Resultados de la simulación de la constante de rigidez de la viga del segundo interruptor obtenidos con COVENTORWARE.

| Desplazamiento Δ_z [μm] | Fuerza de reacción F_z [μN] | Constante de Rigidez K_z [N/m] |
|--|---|-------------------------------------|
| 0.25 | 2.0713 | 8.2854 |
| 0.50 | 5.5495 | 11.0990 |
| 0.75 | 9.0799 | 12.1065 |
| 1.00 | 12.6999 | 12.6999 |
| 1.25 | 16.4496 | 13.1597 |
| 1.50 | 20.3645 | 13.5763 |
| 1.75 | 24.4826 | 13.9900 |
| 2.00 | 28.8405 | 14.4203 |

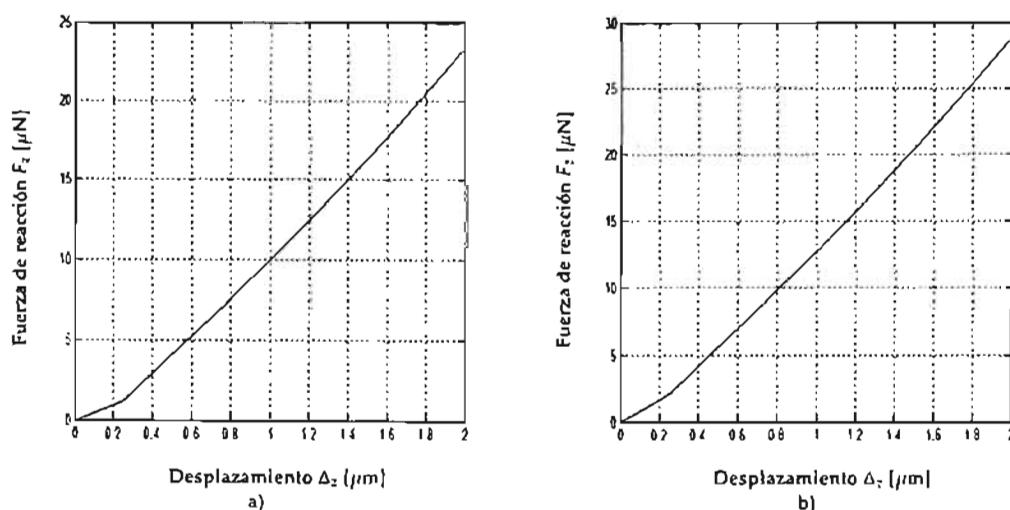


Figura 4.12: Fuerza de reacción, F_z , contra desplazamiento, Δ_z , para: a) primer interruptor b) segundo interruptor.

4.6. Simulación electromecánica

En esta sección se obtendrán los siguientes parámetros para los dos interruptores propuestos:

- ✓ Voltaje de actuación
- ✓ Voltaje de liberación

4.6.1. Voltaje de actuación

Cuando una viga en un interruptor electrostático se sujeta a una fuerza electrostática creciente, resultado de haberla polarizado con un voltaje de DC creciente, ésta se deforma hasta alcanzar un voltaje crítico denominado voltaje de actuación, en el cual la magnitud de la fuerza electrostática llega a ser mucho mayor que la fuerza de restauración mecánica de la viga provocando que ésta se

colapse hacia el electrodo de actuación.

Se utilizó COVENTORWARE para simular la deflexión mecánica de la viga de cada interruptor debido a la fuerza electrostática resultado de la diferencia de potencial aplicado entre la viga de polisilicio y los contactos superiores de níquel para obtener el voltaje de actuación. Las propiedades eléctricas de los materiales utilizados en la simulación se muestran en la tabla A.2.

Las figuras 4.13 y 4.14 muestran las características del mallado que se utilizaron para realizar esta simulación.

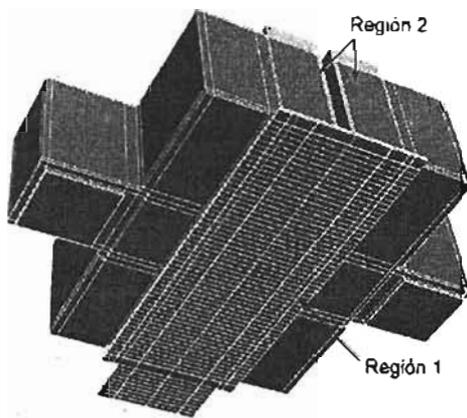


Figura 4.13: Mallado del primer interruptor.

| Características del mallado | |
|--|--------------------------|
| Región 1: Polisilicio y Si ₃ N ₄ | |
| Tipo de mallado | Manhattan parabólicos |
| Orden de los elementos | |
| Tamaño de los elementos [μm] | x: 5 y: 20 z: 0.7 |
| Región 2: Ni, Au | |
| Tipo de mallado | Manhattan parabólicos |
| Orden de los elementos | |
| Tamaño de los elementos [μm] | x: 80 y: 100 z: 60 |
| Número de elementos volumétricos | 1659 |

| Características del mallado | |
|---|-------------------------|
| Región 1: Polisilicio, Si ₃ N ₄ y Cr/Pt | |
| Tipo de mallado | Manhattan parabólicos |
| Orden de los elementos | |
| Tamaño de los elementos [μm] | x: 5 y: 20 z: 0.7 |
| Región 2: Ni, Au | |
| Tipo de mallado | Manhattan parabólicos |
| Orden de los elementos | |
| Tamaño de los elementos [μm] | x: 30 y: 60 z: 80 |
| Número de elementos volumétricos | 1905 |

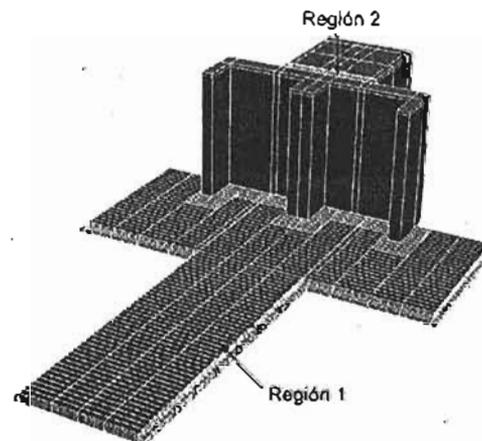


Figura 4.14: Mallado del segundo interruptor.

Cada estructura se dividió en dos regiones. A la primera región formada por las capas que forman las vigas de los interruptores se le aplicó un mallado fino dado que es la parte mecánica móvil que nos interesa analizar en esta sección. La segunda región está formada por los contactos de níquel superiores y se le

aplicó un mallado menos fino que al de la primera región para disminuir el tiempo de simulación. El procedimiento para realizar esta simulación consistió en generar un voltaje variable en forma de rampa y asignarlo a la viga de polisilicio y aplicar una diferencia de potencial de 0 [V] a el o los contactos de níquel superiores que servirán como electrodos para accionar la viga de cada interruptor.

Resultados de la simulación del voltaje de actuación

Para la obtención del voltaje de actuación se especificó una tolerancia de 0.1 para el primer interruptor y de 0.2 para el segundo interruptor, esto significa que el software dará un intervalo en el cual se encuentra el voltaje de actuación en el cual la diferencia de estos valores es menor que esta tolerancia.

TABLA 4.4: Resultados de la simulación del voltaje de actuación.

| Interruptor | Voltaje de actuación [V] |
|-------------|--------------------------|
| 1 | 1.625 - 1.725 |
| 2 | 2.375 - 2.500 |

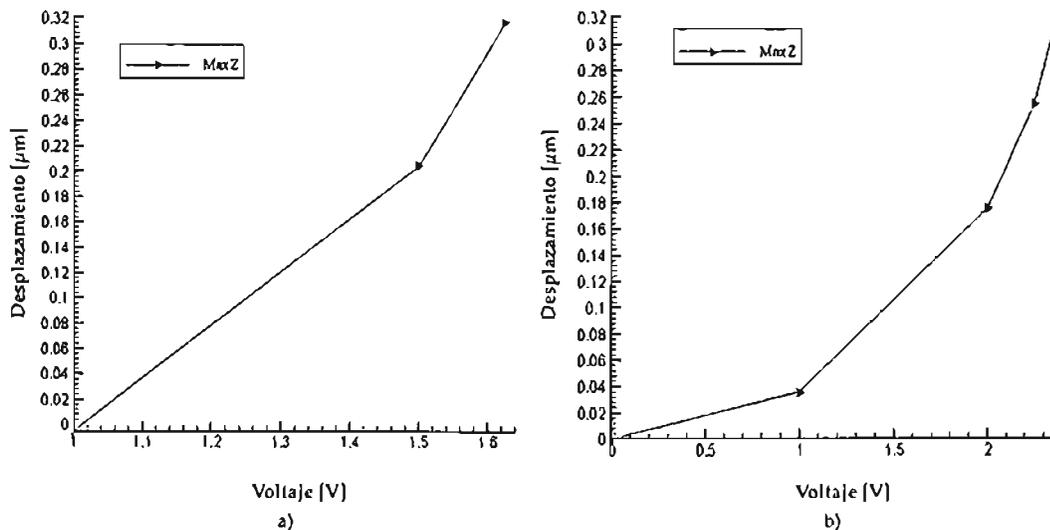


Figura 4.15: Voltaje de actuación del a) primer interruptor. b) segundo interruptor.

4.6.2. Voltaje de liberación

Es el voltaje en el cual la fuerza electrostática se iguala a la fuerza de restauración mecánica de la viga del interruptor, este voltaje indica el momento en el cual el interruptor pasa del estado cerrado a el estado abierto.

También se utilizó COVENTORWARE para realizar la simulación del fenómeno de histéresis, en el cual es posible aproximar el voltaje de liberación. Los parámetros de los materiales y las características de los mallados son los mismos que

los utilizados en la simulación del voltaje de actuación. Mientras que el voltaje de actuación se determinó aplicándole un voltaje variable en forma de rampa creciente a la viga de polisilicio, el voltaje de liberación se calculó aplicándole el mismo voltaje variable y especificando un plano a la altura donde comienzan los electrodos de níquel para simular el contacto físico (figura 4.16). Dicho voltaje se obtuvo cuando la rampa de voltaje se decrementó desde un valor en el cual el interruptor ya hizo contacto con los contactos superiores de níquel (figura 4.17).

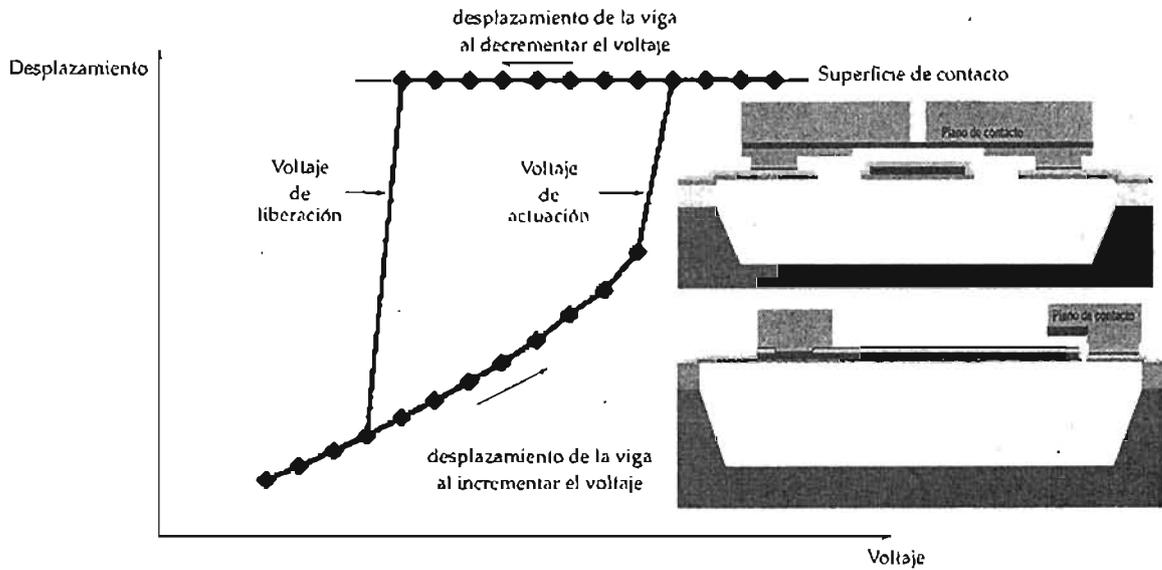


Figura 4.16: Fenómeno de histéresis en un interruptor electrostático.

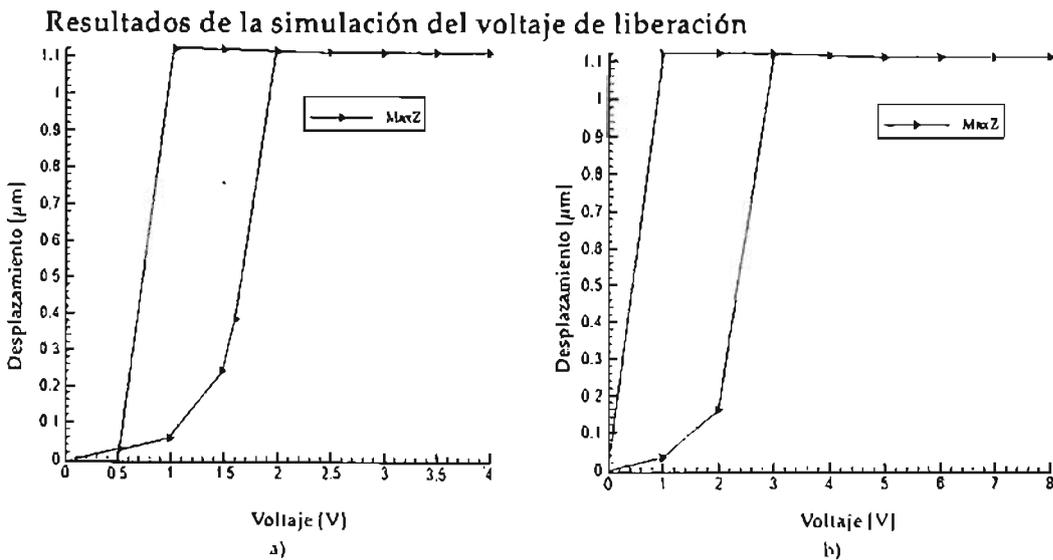


Figura 4.17: Fenómeno de histéresis en el a) primer interruptor. b) segundo interruptor.

TABLA 4.5: Resultados de la simulación del voltaje de liberación.

| Interrupción | Voltaje de liberación [V] |
|--------------|---------------------------|
| 1 | 0.6 - 0.8 |
| 2 | 0.7 - 0.85 |

4.7. Simulación dinámica

La respuesta en frecuencia de la viga de los interruptores propuestos es útil para determinar la **velocidad de conmutación**. La respuesta dinámica de los interruptores está dada por el principio de d'Alambert y es [21]:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = f_{ext} \quad (4.10)$$

donde x es el desplazamiento de la viga, m es la masa de la viga, b es el coeficiente de amortiguamiento, k es la constante de rigidez de la viga, y f_{ext} es una fuerza externa. Utilizando la transformada de Laplace, se encuentra que la respuesta en frecuencia es:

$$\frac{X(j\omega)}{F(j\omega)} = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{1 - (\omega/\omega_0)^2 + j\omega/(Q\omega_0)} \quad (4.11)$$

donde $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ es la frecuencia de resonancia y $Q = k/(\omega_0 b)$ es el factor de calidad de la viga resonante.

4.7.1. Velocidad de conmutación

La velocidad de conmutación puede ser aproximada por la ecuación 4.12, la cual es la solución de la ecuación 4.10 cuando la viga de un interruptor tiene un coeficiente de amortiguamiento despreciable ($b \approx 0$) y un factor de calidad $Q \geq 2$ [22].

$$t_s \approx 3.67 \frac{V_p}{V_s \omega_0} \quad \text{para } V_s \geq 1.3V_p \quad (4.12)$$

donde V_s es la diferencia de potencia aplicada y V_p es el voltaje actuación.

Resultados de la simulación de la velocidad de conmutación

Para obtener una aproximación de la velocidad de conmutación se realizó un análisis modal de las vigas de los interruptores en COVENTORWARE para obtener su frecuencia de resonancia mecánica, f_0 .

En la tabla 4.6 se muestran los resultados de las frecuencias de resonancia mecánica, f_0 , obtenidas y los valores utilizados para aproximar la velocidad de conmutación de ambos interruptores mediante la ecuación 4.12.

TABLA 4.6: Resultados de la simulación de la frecuencia de resonancia mecánica y velocidad de conmutación.

| Interruptor | f_0 [KHz] | V_p [V] | V_s [V] | t_s [μ s] |
|-------------|----------------|--------------|--------------|---------------------|
| 1 | 16.161 | 1.7 | $1.3V_p$ | 27.801 |
| 2 | 11.808 | 2.4 | $1.3V_p$ | 38.051 |

TABLA 4.7: Parámetros y resultados del primer interruptor.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|--|---|---|---------------|
| Longitud [μ m] | 430 | Distancia entre viga y contactos [μ m] | 1.1 |
| Ancho [μ m] | 370 | Conductividad del polisilicio [S/m] | 64935 |
| Espesor de la viga [μ m] | 0.35/0.7/0.35 | Constante de rigidez [N/m] | 5-12 |
| Área de actuación [μ m ²] | 26320 | Voltaje de actuación [V] | 1.625 - 1.725 |
| Material de la viga | Si ₃ N ₄ /Poly/Si ₃ N ₄ | Voltaje de liberación [V] | 0.6 - 0.8 |
| Material de los contactos | Ni/Au | Velocidad de conmutación [μ s] | \approx 28 |
| Capa de sacrificio | PSC | | |

Resultados del voltaje de actuación y de liberación cuando se altera el proceso MetalMUMPs

| Distancia entre viga y contactos = 2 [μ m] | |
|---|-------------|
| Voltaje de actuación [V] | 6.375 - 6.5 |
| Voltaje de liberación [V] | 5.625 - 6 |

TABLA 4.8: Parámetros y resultados del segundo interruptor.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|--|--|---|--------------|
| Longitud [μ m] | 555 | Distancia entre viga y contactos [μ m] | 1.1 |
| Ancho [μ m] | 310 | Conductividad del polisilicio [S/m] | 64935 |
| Espesor de la viga [μ m] | 0.35/0.7/0.35/ 0.010/0.025 | Constante de rigidez [N/m] | 8-14 |
| Área de actuación [μ m ²] | 3900 | Voltaje de actuación [V] | 2.375 - 2.5 |
| Material de la viga | Si ₃ N ₄ /Poly/Si ₃ N ₄ / Cr/Pt | Voltaje de liberación [V] | 0.7 - 0.85 |
| Material de los contactos | Ni/Au | Velocidad de conmutación [μ s] | \approx 38 |
| Capa de sacrificio | PSC | | |

Resultados del voltaje de actuación y de liberación cuando se altera el proceso MetalMUMPs

| Distancia entre viga y contactos = 2 [μ m] | |
|---|--------------|
| Voltaje de actuación [V] | 7.125 - 7.25 |
| Voltaje de liberación [V] | 6.75 - 7.125 |

4.8. Resultados finales y conclusiones

En las tablas 4.7 y 4.8 se hace un resumen de las características generales y resultados obtenidos de los dos interruptores propuestos. Además se presentan los resultados obtenidos para el voltaje de actuación y liberación debidos a una alteración de las características de los materiales del proceso de fabricación basada en las reportadas en el estado del arte para obtener un mejor comportamiento en alta frecuencia.

De acuerdo al estado del arte y a los resultados obtenidos concluimos que las especificaciones 3 (bajo voltaje de actuación), 4 (dimensiones menores a $1000 \mu\text{m}^2$) y 5 (diseño basado en el proceso de fabricación MetalMUMPs) se cumplieron de manera satisfactoria. Adicionalmente, se obtuvieron buenos resultados al aproximar la velocidad de conmutación de ambos interruptores dado que los resultados obtenidos se encuentran dentro del intervalo de $2 - 40 \mu\text{s}$, el cual es el intervalo que menciona el estado del arte de los interruptores MEMS para RF.

El primer paso en la propuesta de los interruptores descritos en este capítulo fue analizar las posibilidades que ofrece el proceso de fabricación MetalMUMPs para poder construir un interruptor. A partir del análisis realizado a las reglas de diseño de dicho proceso se llegó a las siguientes conclusiones:

- ✓ El tipo de configuración eléctrica del interruptor tenía que ser capacitivo en serie.

Es importante resaltar que las dos estructuras descritas en este capítulo están formadas por dos combinaciones diferentes de capas permitidas por las reglas de diseño del proceso de fabricación.

Los resultados de las simulaciones obtenidas en este capítulo de las dos estructuras fueron resultado de la optimización de la geometría de las mismas. Ajustar las dimensiones de las vigas de los interruptores fue el procedimiento seguido para obtener una constante de rigidez baja, K_2 , y así obtener un bajo voltaje de actuación. A pesar de que el área, A , donde se aplica la fuerza electrostática era el otro parámetro variable para poder ajustar el voltaje de actuación su variación quedó restringida a su efecto en la respuesta en frecuencia de los interruptores, el cual se analizará en el siguiente capítulo.

Capítulo 5

Modelado Electrodinámico del Interruptor

En este capítulo se presenta la optimización de los interruptores, descritos en el capítulo 4, realizada mediante el uso del *Factor de Calidad de Conmutación* el cual es una herramienta que permite optimizar en frecuencia el diseño de un dispositivo de conmutación para microondas.

5.1. Factor de Calidad de Conmutación (FCC)

Este factor es una figura de mérito utilizada en la optimización de dispositivos de conmutación de un puerto caracterizados por sus propiedades en dos estados diferentes (para los interruptores MEMS: el estado abierto y cerrado). El FCC puede aplicarse a diferentes tipos de dispositivos de conmutación (semiconductores, ferroeléctricos, superconductores, etc), ya que no depende de la naturaleza física del dispositivo.

Una ventaja importante de caracterizar el interruptor con este factor es que también se puede optimizar el circuito de conmutación del que formará parte (desplazador de fase, etc), ya que la figura de mérito de éste es función del FCC de los dispositivos de conmutación que contiene dicho circuito. Por lo tanto, conociendo el FCC del dispositivo de conmutación y otros parámetros del circuito de conmutación se puede optimizar el diseño de dichos circuitos para microondas.

Los dos estados de un dispositivo conmutable (encendido y apagado) de un puerto se pueden caracterizar por el par de impedancias:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad \text{y} \quad Z_2 = R_2 + jX_2 \quad (5.1)$$

La ecuación general del FCC de un dispositivo de conmutación es [24] :

$$K + \frac{1}{K} = \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2}{R_1} + \frac{(X_2 - X_1)^2}{R_1 R_2} \quad (5.2)$$

Para aplicaciones prácticas un dispositivo de conmutación adecuado debe de tener un FCC mayor a 5000, en este caso la ecuación 5.2 se puede simplificar de la siguiente manera:

a) Para el caso cuando cambia la parte real del dispositivo de conmutación ($R_2 > R_1, X_2 \cong X_1$)

$$K \cong \frac{R_2}{R_1} \quad (5.3)$$

b) Para el caso cuando cambia la parte imaginaria del dispositivo de conmutación ($R_2 \cong R_1, X_2 > X_1$)

$$K \cong \frac{(X_1 - X_2)^2}{R_1 R_2} \quad (5.4)$$

La ecuación 5.4 es válida para $K > 200$.

5.2. FCC de los interruptores propuestos

Para poder obtener el FCC de los interruptores propuestos es necesario identificar los parámetros con los cuales se puede describir los estados abierto (apagado) y cerrado (encendido) de éstos, idealmente dichos parámetros son: una resistencia r_{ab} y una capacitancia C_{ab} conectados en serie en el estado abierto y una resistencia r_{ce} y una capacitancia también conectados en serie C_{ce} en el estado cerrado (figura 5.1).

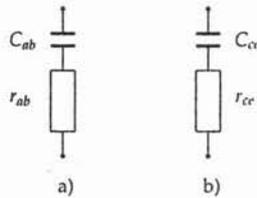


Figura 5.1: Circuito ideal equivalente de un interruptor MEMS en serie en el estado: a) abierto b) cerrado.

Por lo tanto los valores de las impedancias de la ecuación 5.1 para los interruptores propuestos son:

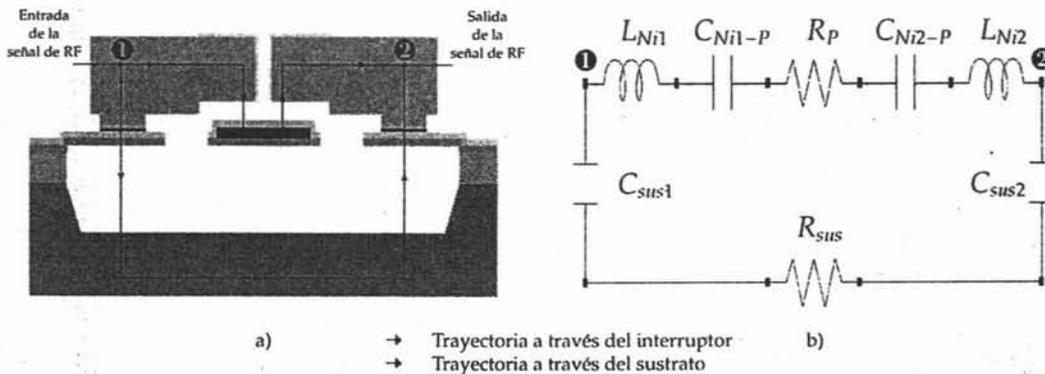
$$\begin{aligned} R_1 &= r_{ab} \\ R_2 &= r_{ce} \\ X_1 &= \frac{1}{\omega C_{ab}} \\ X_2 &= \frac{1}{\omega C_{ce}} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Considerando que $R_2 \cong R_1$ y $X_2 > X_1$ para los interruptores propuestos, se puede utilizar la ecuación 5.4 para determinar su factor de calidad de conmutación. Sustituyendo la ecuación 5.5 en 5.4 obtenemos

$$K = \frac{\left(\frac{C_{ce}}{C_{ab}} - 1\right)}{(\omega C_{ce})^2 r_{ab} r_{ce}} \quad (5.6)$$

5.2.1. Modelo eléctrico de los interruptores propuestos

La figura 5.1 muestra las impedancias equivalentes ideales para los estados abierto y cerrado de los interruptores propuestos, aunque en realidad estos circuitos equivalentes dependen de las características finales de los interruptores, los cuales varían dependiendo del proceso de fabricación utilizado. Enseguida se presenta el análisis realizado para obtener los circuitos equivalentes de los interruptores en los estados abierto y cerrado tomando en cuenta los factores derivados de la utilización del proceso de fabricación MetalMUMPs.

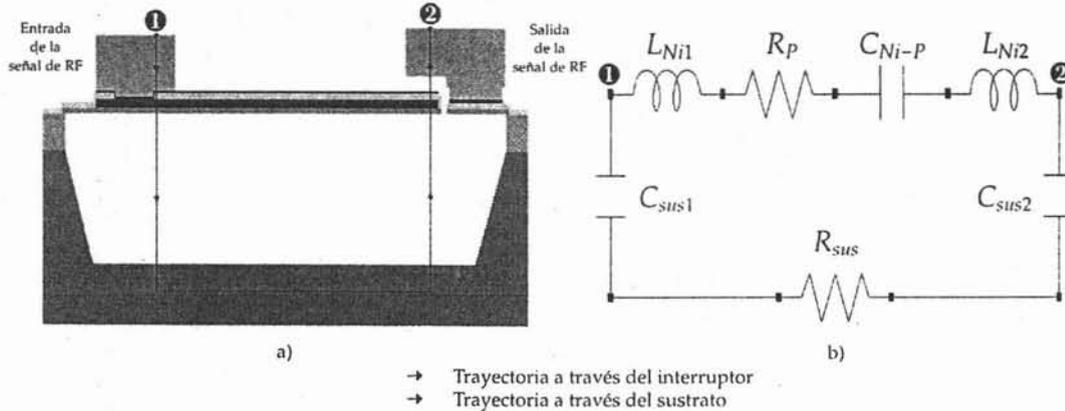


- L_{Ni1} : es la inductancia del contacto de entrada de Ni/Au.
 L_{Ni2} : es la inductancia del contacto de salida de Ni/Au.
 C_{Ni1-P} : es la capacitancia entre el contacto de entrada de Ni/Au y la viga de polisilicio.
 C_{Ni2-P} : es la capacitancia entre el contacto de salida de Ni/Au y la viga de polisilicio.
 R_P : es la resistencia de la viga de polisilicio.
 C_{sus1} : es la capacitancia entre el contacto de entrada de Ni/Au y el sustrato.
 C_{sus2} : es la capacitancia entre el contacto de salida de Ni/Au y el sustrato.
 R_{sus} : es la resistencia del sustrato.

| | | |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Sustrato de silicio | Polisilicio | Niquel |
| Óxido de Silicio aislante | Nitruro de silicio 1 | Nitruro de silicio 2 |
| Anclaje de cromo/platino | Primera cubierta de oro | Segunda cubierta de oro |

Figura 5.2: a) Trayectoria que sigue la señal en el primer interruptor. b) Circuito equivalente.

Las figuras (5.2 a) y (5.3 a)) muestran las posibles trayectorias que seguiría una señal de microondas al pasar de la entrada a la salida por cada interruptor. A partir de estas trayectorias se obtuvieron los circuitos eléctricos (figuras 5.2 b) y 5.3 b)) que se utilizarán para obtener el FCC de cada interruptor. Es posible observar que existe una trayectoria indeseable a través del sustrato de silicio, la cual se debe a que éste posee una conductividad eléctrica relativamente alta.



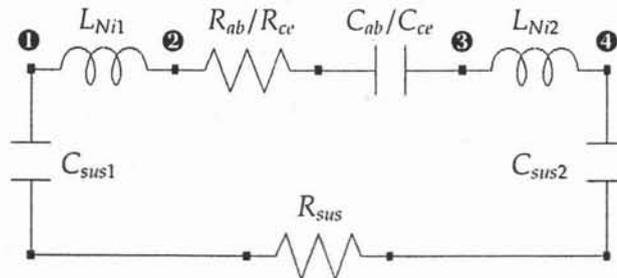
- L_{Ni1} : es la inductancia del contacto de entrada de Ni/Au.
- L_{Ni2} : es la inductancia del contacto de salida de Ni/Au.
- R_p : es la resistencia de la viga de polisilicio.
- C_{Ni-P} : es la capacitancia entre el contacto de salida de Ni/Au y la viga de polisilicio.
- C_{sus1} : es la capacitancia entre el contacto de entrada de Ni/Au y el sustrato.
- C_{sus2} : es la capacitancia entre el contacto de salida de Ni/Au y el sustrato.
- R_{sus} : es la resistencia del sustrato.

| | | |
|---------------------------|-------------------------|----------------------|
| Sustrato de silicio | Polisilicio | Níquel |
| Óxido de Silicio aislante | Nitruro de silicio 1 | Nitruro de silicio 2 |
| Cromo/platino | Primera cubierta de oro | |

Figura 5.3: a) Trayectoria que sigue la señal en el segundo interruptor. b) Circuito equivalente.

5.3. Simulación electrodinámica

Los valores de los elementos de los circuitos eléctricos equivalentes utilizados en la sección anterior se obtendrán utilizando MICROWAVE 1. Los dos modelos eléctricos obtenidos se pueden reducir a un circuito eléctrico general para el estado abierto y cerrado de cada interruptor (figura 5.4).



- L_{Ni1} : es la inductancia del contacto de entrada de Ni/Au.
- L_{Ni2} : es la inductancia del contacto de salida de Ni/Au.
- R_{ab} : es la resistencia total de la trayectoria de 1 a 3 en el estado abierto.
- R_{ce} : es la resistencia total de la trayectoria de 1 a 4 en el estado cerrado.
- C_{ab} : es la capacitancia total entre el o los contactos de Ni/Au y la viga de polisilicio en el estado abierto.
- C_{ce} : es la capacitancia total entre el o los contactos de Ni/Au y la viga de polisilicio en el estado cerrado.
- C_{sus1} : es la capacitancia entre el contacto de entrada de Ni/Au y el sustrato.
- C_{sus2} : es la capacitancia entre el contacto de salida de Ni/Au y el sustrato.
- R_{sus} : es la resistencia del sustrato.

Figura 5.4: Modelo eléctrico general de los interruptores.

5.3.1. Parámetros del modelo eléctrico

La figura 5.4 muestra el modelo eléctrico de los interruptores en los estados abierto y cerrado; en ella se observa que ambos modelos solo difieren en la impedancia entre los puntos ② y ③ para cada interruptor. Para obtener el valor de cada elemento de los modelos de los interruptores se dividieron las estructuras en secciones y se simuló cada parte por separado.

Parámetros del modelo eléctrico del primer interruptor

A partir del modelo general de la figura 5.4, para el modelo eléctrico del primer interruptor, se hacen las siguientes consideraciones debido a su geometría:

○ La inductancia del contacto de entrada, L_{Ni1} , es igual a la inductancia del contacto de salida, L_{Ni2} .

$$L_{Ni1} = L_{Ni2} = L_{Ni}$$

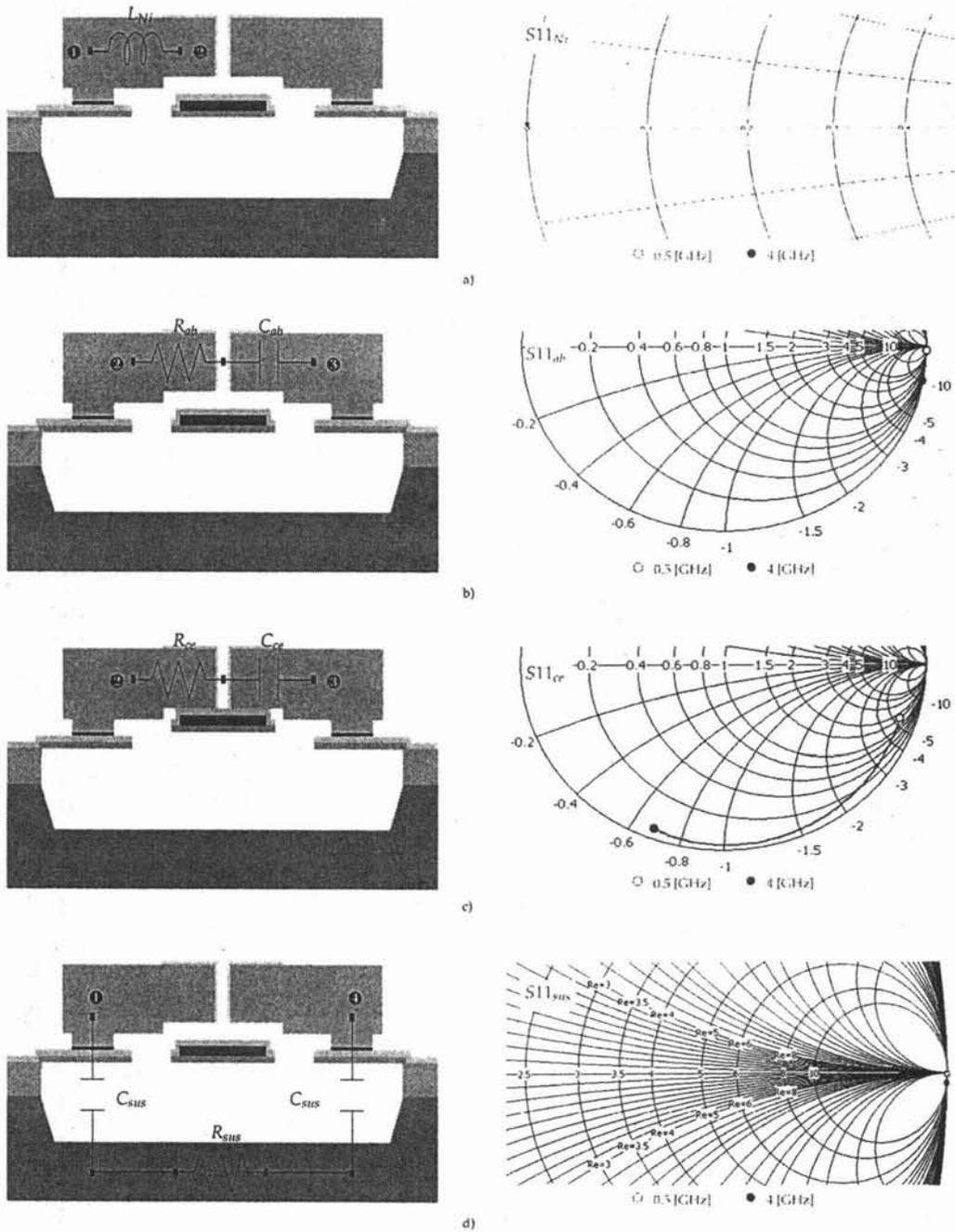
○ La capacitancia entre el contacto de entrada y el sustrato, C_{sus1} , es igual a la capacitancia entre el contacto de salida y el sustrato, C_{sus2} .

$$C_{sus1} = C_{sus2} = C_{sus}$$

Por lo tanto, para obtener los valores de los elementos del modelo eléctrico del primer interruptor en el estado abierto y cerrado, se dividió su estructura y se realizaron simulaciones incluyendo solamente las partes de interés; la figura 5.5 muestra cada una de las partes del interruptor, la parte de su circuito eléctrico equivalente que modela y el comportamiento en frecuencia de dicha impedancia en el rango de 0.5 - 4 [GHz].

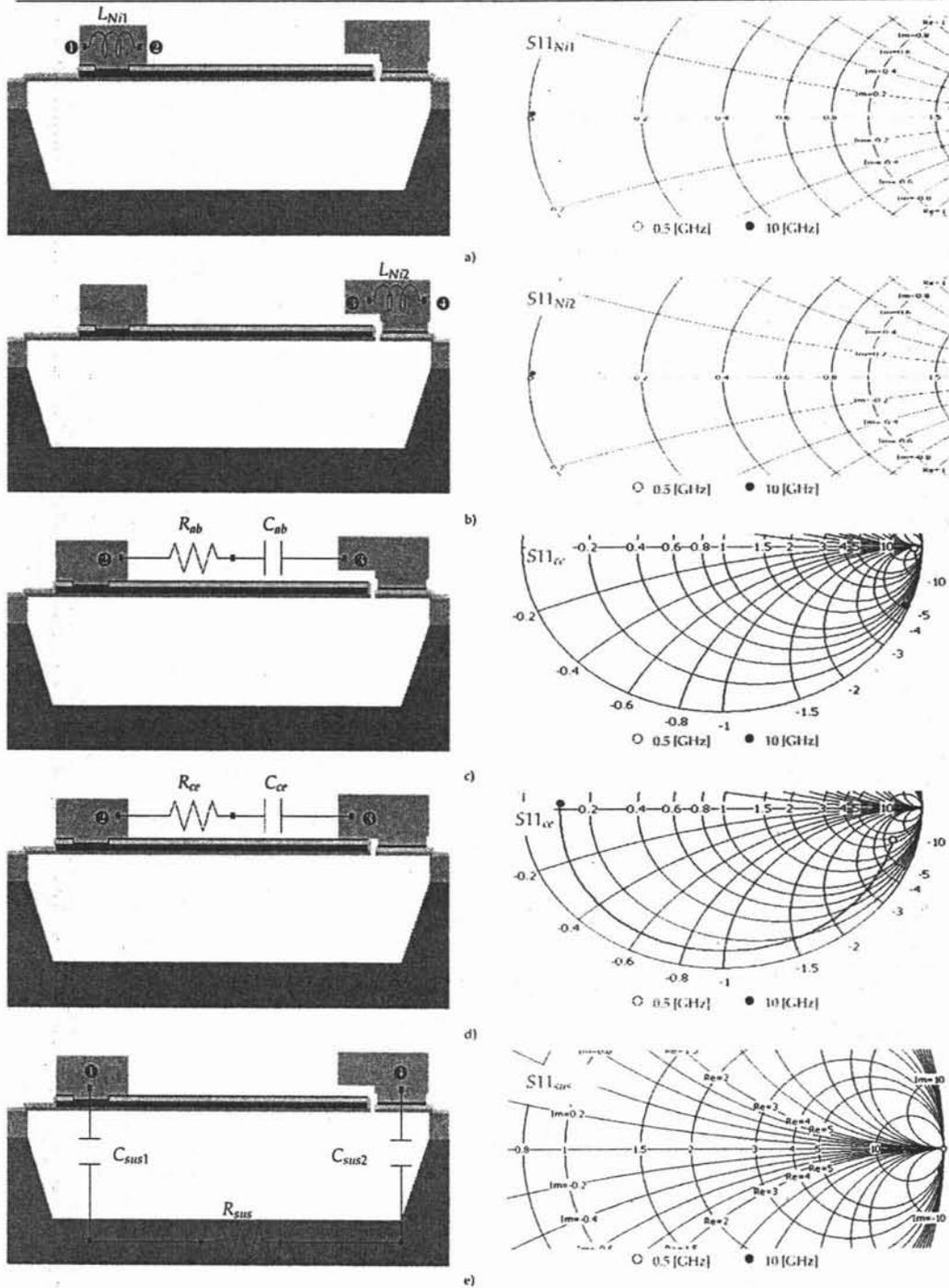
Para obtener L_{Ni} se simuló la impedancia de un contacto de Ni/Au por separado (figura 5.5 a). Esta impedancia corresponde a la sección del modelo eléctrico del punto ① al ② de la figura 5.4, es posible observar que su parte real es despreciable (ver tabla 5.3). Para obtener R_{ab} y C_{ab} se simularon los contactos de Ni/Au junto con la viga de Si_3N_4 /polisilicio/ Si_3N_4 , es decir, el interruptor en el estado abierto (figura 5.5 b). La impedancia obtenida corresponde a la impedancia entre los puntos ② a ③ del modelo eléctrico de la figura 5.4. La impedancia en el estado cerrado, Z_{ce} , se obtuvo simulando ambos contactos de Ni/Au con la viga haciendo un contacto ideal con éstos (figura 5.5 c). Algunos valores representativos de estas impedancias se muestran en la tabla 5.1.

Finalmente, se obtuvo el comportamiento de la impedancia de la trayectoria del punto ① al ④ (figura 5.4) a través del sustrato de silicio, Z_{sus} , incluyendo solamente los anclajes de los contactos de Ni/Au del interruptor apoyados sobre las capas de nitruro de silicio. La impedancia que se obtuvo toma en cuenta el efecto capacitivo total de dicha trayectoria por lo que la capacitancia obtenida de dicha simulación corresponde a $2C_{sus}$ en el modelo eléctrico del interruptor (figura 5.5 d)(ver tabla 5.3). El espesor del sustrato utilizado fue de 525 [μm].



| | | |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Sustrato de silicio | Polisilicio | Níquel |
| Oxido de Silicio aislante | Nitruro de silicio 1 | Nitruro de silicio 2 |
| Anclaje de cromo/platino | Primera cubierta de oro | Segunda cubierta de oro |

Figura 5.5: Comportamiento de los elementos del modelo eléctrico del primer interruptor de 0.5 - 4 [GHz] en la carta de Smith.



| | | |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Sustrato de silicio | Polisilicio | Niquel |
| Óxido de Silicio aislante | Nitruro de silicio 1 | Nitruro de silicio 2 |
| Anclaje de cromo/platino | Primera cubierta de oro | Segunda cubierta de oro |

Figura 5.6: Comportamiento de los elementos del modelo eléctrico del segundo interruptor de 0.5 - 10 [GHz] en la carta de Smith.

Parámetros del modelo eléctrico del segundo interruptor

Al igual que para la primera estructura, los valores de los elementos de su modelo eléctrico se obtuvieron a partir de las simulaciones de las partes del interruptor que determinan dichos elementos.

A partir de la figura 5.4 los elementos se obtuvieron de la siguiente forma:

Para obtener la inductancia, L_{Ni1} , del contacto de entrada se incluyó solo esta parte obteniendo el resultado mostrado en la figura 5.6 a). La inductancia del contacto de salida, L_{Ni2} , se obtuvo de la misma forma (figura 5.6 b)). Es posible observar en esta figura que la parte real de esta impedancia es más grande que la del primer interruptor, la cual se aprecia con más claridad en las tablas 5.3 y 5.4.

La impedancia de los puntos ② a ③ (figura 5.4) para el estado abierto se obtuvo incluyendo el interruptor y sus contactos en dicho estado. Su comportamiento se muestra en la figura 5.6 c). La impedancia del modelo en el estado cerrado, se obtuvo simulando el interruptor en estado cerrado ideal (figura 5.6 d)); es decir, cuando toda el área de contacto de la viga del interruptor hace contacto físico con el electrodo de actuación. Los valores obtenidos de estas impedancias se muestran en la tabla 5.2.

El efecto de la trayectoria a través del sustrato de silicio se analizó con la configuración mostrada en la figura 5.6 e). En dicha trayectoria se obtuvo una impedancia capacitiva la cual toma en cuenta C_{sus1} y C_{sus2} (figura 5.3). A pesar de que idealmente los valores de dichas capacitancias no son iguales, el efecto capacitivo total se modela mediante la capacitancia C_{sus} de dicha impedancia, la cual se utiliza en la rama del circuito de la figura 5.3. Algunos valores representativos de esta impedancia se muestran en la tabla 5.4. El espesor del sustrato que se utilizó en esta simulación fue de 525 [μm].

5.4. Optimización

Dado que el proceso de optimización de los interruptores propuestos se realizó mediante el uso del Factor de Calidad de Conmutación y éste último está dado por la ecuación 5.6 para los interruptores propuestos, las acciones realizadas para maximizar dicha función fueron las siguientes:

- ✓ **Disminuir las resistencias en los estados abierto y cerrado (R_{ab} y R_{ce}).** Se ajustaron las dimensiones de los contactos de níquel y la viga de polisilicio de cada interruptor para disminuir las pérdidas resistivas en éstos. Las menores pérdidas se obtuvieron cuando las dimensiones de los contactos fueron máximas y cuando el área de polisilicio que atravesaba la señal fue mínima.

- ✓ **Aumentar la capacitancia C_{ab} .** Para ajustar su valor se modificó el área de actuación, A , que es el área efectiva entre los contactos de níquel y la viga de polisilicio. Dado que el diseño de los interruptores se basó en el proceso de fabricación MetalMUMPs la relación de las capacitancias C_{ce}/C_{ab} es fija dado que la distancia entre los contactos y la viga de polisilicio está definida por el espesor de la segunda capa de sacrificio de dicho proceso, pero se comprobó que entre más pequeña sea la capacitancia en el estado abierto, C_{ab} , se incrementa el Factor de Calidad de Conmutación del interruptor; sin embargo, dicho factor no se altera significativamente al variar el valor de C_{ce} .

Con respecto a la trayectoria indeseable hacia el sustrato de silicio se procedió a realizar lo siguiente:

- ✓ **Disminuir la capacitancia hacia el sustrato C_{sus} .** Esta capacitancia debe de ser muy pequeña para que no exista un acoplamiento de la señal de microondas hacia el sustrato. La forma de minimizar este valor fue disminuir las dimensiones de los anclajes hasta el valor mínimo permitido por las reglas de diseño del proceso de fabricación y colocar todo el interruptor anclado sobre las capas de nitruro de silicio encima del área donde se realiza la trinchera.

5.5. Resultados

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas presentadas en este capítulo fueron resultado del proceso de optimización descrito en la sección 5.4.

5.5.1. Valores del modelo eléctrico

En esta sección presentamos los valores obtenidos en las simulaciones realizadas de las impedancias del modelo eléctrico general (figura 5.4) de los interruptores propuestos. Los valores de dichas impedancias presentados en esta sección corresponden a el intervalo de frecuencias en el que mejor se comportó cada interruptor.

Las tablas 5.1, 5.2 muestran el comportamiento de la impedancia entre los puntos ② y ③ de los interruptores en el estado abierto y cerrado. Se observa que la parte resistiva del segundo interruptor en el estado cerrado es más de dos veces mayor que para el primero y que la relación C_{ce}/C_{ab} es de alrededor de 15 y 25 para los interruptores primero y segundo respectivamente.

Por otra parte, a partir de los resultados obtenidos de las impedancias de la trayectoria a través del sustrato entre los puntos ① y ④ de ambas estructuras (tablas 5.3 y 5.4), podemos observar que la capacitancia de la segunda es casi el doble que para la primera, este hecho provoca que exista un mejor acoplamiento

de la señal hacia el sustrato y que este interruptor tenga mayores pérdidas.

Analizando las impedancias de los contactos de níquel se observa que la parte real de la impedancia de los contactos de níquel del segundo interruptor es 2000 veces más grande que para la primera estructura. Las diferencias mencionadas anteriormente definitivamente determinan la diferencia en los resultados del FCC para ambos interruptores mostrados en la siguiente sección.

TABLA 5.1: Impedancia del primer interruptor en el estado abierto y cerrado.

| f [GHz] | $Z_{ab} = R_{ab} - j/\omega C_{ab}$ [Ω] | C_{ab} [fF] | $Z_{cc} = R_{cc} - j/\omega C_{cc}$ [Ω] | C_{cc} [pF] |
|---------|--|---------------|--|---------------|
| 2.25 | 33.7960 - j894.3904 | 77.9948 | 2.1223 - j63.4568 | 1.0990 |
| 2.50 | 30.2681 - j823.6258 | 77.9181 | 1.7689 - j57.9180 | 1.1080 |
| 2.75 | 26.3663 - j736.3442 | 77.8329 | 1.5155 - j51.0642 | 1.1223 |
| 3.00 | 23.9777 - j676.6687 | 77.7661 | 1.4832 - j46.3789 | 1.1346 |
| 3.25 | 22.1195 - j625.9998 | 77.7021 | 1.5640 - j42.4192 | 1.1466 |

TABLA 5.2: Impedancia del segundo interruptor en el estado abierto y cerrado.

| f [GHz] | $Z_{ab} = R_{ab} - j/\omega C_{ab}$ [Ω] | C_{ab} [fF] | $Z_{cc} = R_{cc} - j/\omega C_{cc}$ [Ω] | C_{cc} [pF] |
|---------|--|---------------|--|---------------|
| 5.5 | 32.11041 - j535.6645 | 54.0262 | 4.3193 - j25.2329 | 1.1469 |
| 6.0 | 21.75395 - j481.0241 | 54.7430 | 4.3456 - j20.4316 | 1.2888 |
| 6.5 | 16.42006 - j442.7713 | 55.3898 | 4.4308 - j16.9864 | 1.4438 |
| 7.0 | 12.45187 - j402.5010 | 56.2148 | 4.5794 - j13.2536 | 1.7071 |
| 7.5 | 10.62749 - j373.9784 | 56.8985 | 4.7158 - j10.5248 | 2.0217 |

TABLA 5.3: Impedancia de los anclajes y contactos del primer interruptor.

| f [GHz] | $Z_{sus} = R_{sus} - j/\omega C_{sus}$ [Ω] | $2C_{sus}$ [fF] | $Z_{L_{Ni}} = R_{L_{Ni}} + j\omega L_{Ni}$ [Ω] | L_{Ni} [pH] |
|---------|---|-----------------|---|---------------|
| 2.25 | 725.0902 - j12822.49 | 11.1195 | 8.25E-05 + j0.1566 | 10.9219 |
| 2.50 | 647.3843 - j11558.88 | 11.1041 | 9.00E-05 + j0.1702 | 10.9235 |
| 2.75 | 580.5660 - j10339.50 | 11.0860 | 10.5E-05 + j0.1905 | 10.9231 |
| 3.00 | 539.2891 - j9505.906 | 11.0714 | 12.0E-05 + j0.2075 | 10.9224 |
| 3.25 | 506.9130 - j8798.576 | 11.0567 | 13.5E-05 + j0.2245 | 10.9219 |

TABLA 5.4: Impedancia de los anclajes y contactos del segundo interruptor.

| f [GHz] | $Z_{sus} = R_{sus} - j/\omega C_{sus}$ [Ω] | $2C_{sus}$ [fF] | $Z_{L_{Ni}} = R_{L_{Ni}} + j\omega L_{Ni}$ [Ω] | L_{Ni} [pH] |
|---------|---|-----------------|---|---------------|
| 5.5 | 307.6181 - j2868.313 | 20.1790 | 0.1822 + j0.3728 | 10.7914 |
| 6.0 | 286.1890 - j2619.965 | 20.1016 | 0.1937 + j0.4024 | 10.5983 |
| 6.5 | 271.6086 - j2447.608 | 20.0400 | 0.2032 + j0.4258 | 10.4432 |
| 7.0 | 256.3759 - j2266.397 | 19.9670 | 0.2149 + j0.4533 | 10.2568 |
| 7.5 | 245.5076 - j2137.591 | 19.9092 | 0.2243 + j0.4750 | 10.1083 |

5.5.2. Estudio paramétrico para obtener el Factor de Calidad de Conmutación

A fin de poder caracterizar el interruptor en frecuencia se exportaron los datos obtenidos de las impedancias de cada sección del modelo eléctrico obtenidas a partir de los coeficientes S_{11} obtenidos en MICROWAVE 1 (figuras 5.5 y 5.6) a Microwave 2.

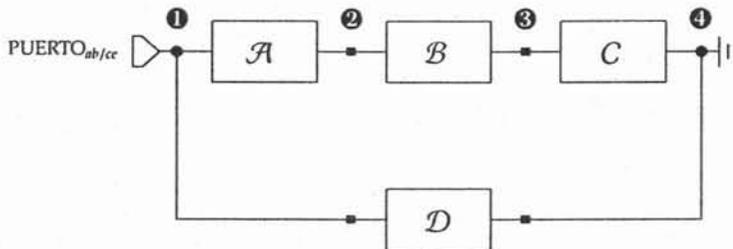


Figura 5.7: Modelo eléctrico utilizado en la obtención de las impedancias de los interruptores en los estados abierto y cerrado.

Para poder calcular el FCC de los interruptores a una frecuencia dada es necesario conocer las impedancias que modelan los estados abierto y cerrado de éstos a esa frecuencia. Estas impedancias son las impedancias de entrada del circuito de la figura 5.7 para cada estado.

De acuerdo a las figuras 5.5 y 5.6 se puede observar que los valores para cada uno de los elementos que constituyen el modelo eléctrico general de la figura 5.4 varían con la frecuencia. Debido a lo anterior podemos decir que el factor de calidad de conmutación es único para cada frecuencia y para obtener su comportamiento para el rango de frecuencias de interés se procedió a sustituir cada uno de los elementos del circuito de la figura 5.4 por bloques para llevar a cabo un estudio paramétrico.

Los bloques \mathcal{A} , \mathcal{B} , \mathcal{C} y \mathcal{D} del circuito de la figura 5.7 modelan las mismas impedancias que las del circuito de la figura 5.4 pero dependientes de la frecuencia. Comparando los circuitos de las figuras 5.4 y 5.7 se tiene: que los bloques \mathcal{A} y \mathcal{C} modelan una impedancia inductiva debida a los contactos de entrada y salida, el bloque \mathcal{B} modela una impedancia capacitiva ya sea en el estado abierto o cerrado del interruptor y finalmente el bloque \mathcal{D} modela una impedancia capacitiva entre el sustrato y el contacto de entrada o salida. El rango de frecuencias para las impedancias de los bloques de la figura 5.7 para el primer interruptor es de 0.5 - 4 [GHz] y para el segundo interruptor este rango es de 0.5 - 10 [GHz].

5.5.3. FCC del primer interruptor

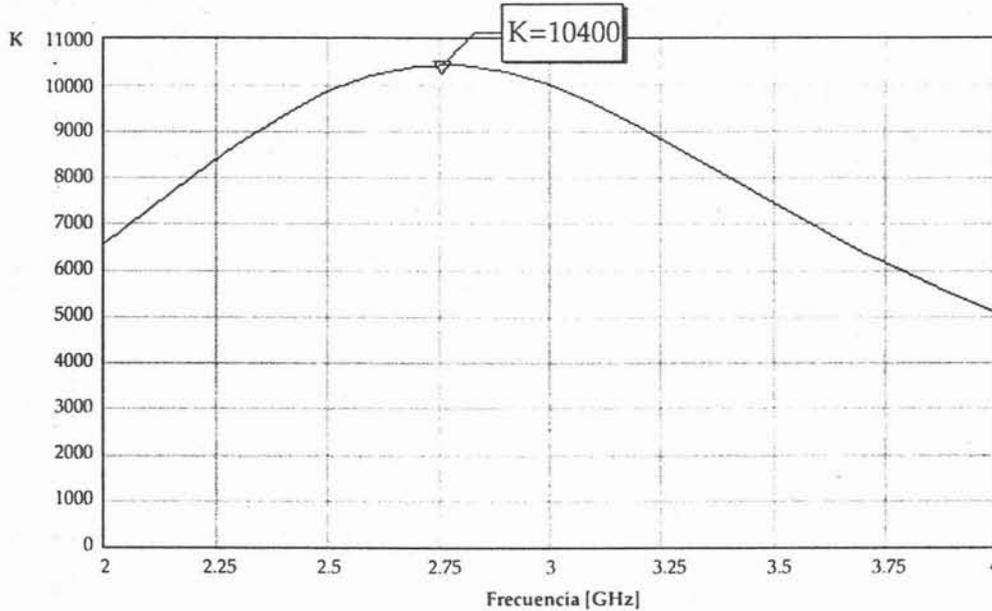


Figura 5.8: Factor de calidad de conmutación del primer interruptor.

La figura 5.8 muestra el FCC del primer interruptor, se observa que el máximo de la curva ocurre a una frecuencia de 2.75 [GHz] en la que el interruptor tiene un factor de calidad de conmutación (K) de 10400.

5.5.4. FCC del segundo interruptor

La curva del FCC del segundo interruptor se muestra en la figura 5.9. Esta figura muestra que el segundo interruptor tiene un factor de calidad de conmutación $K > 1000$ en la banda C, logrando el máximo valor de K a la frecuencia de 6.7 [GHz].

En comparación con el primer interruptor el segundo tiene un factor de calidad de conmutación 7 veces menor, esto se atribuye principalmente a las diferencias discutidas en la sección 5.5.1.

En la figura 5.10 se compara el FCC de los dos interruptores propuestos, es posible observar que el primer interruptor tiene un mejor desempeño que el segundo en todo el intervalo de frecuencias mostrado.

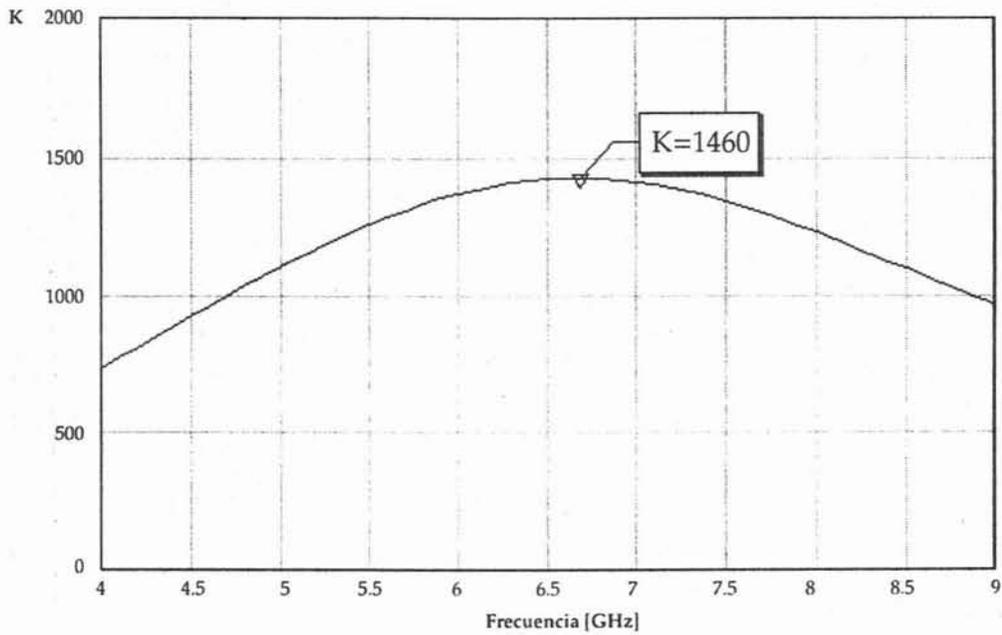


Figura 5.9: Factor de calidad de conmutación del segundo interruptor.

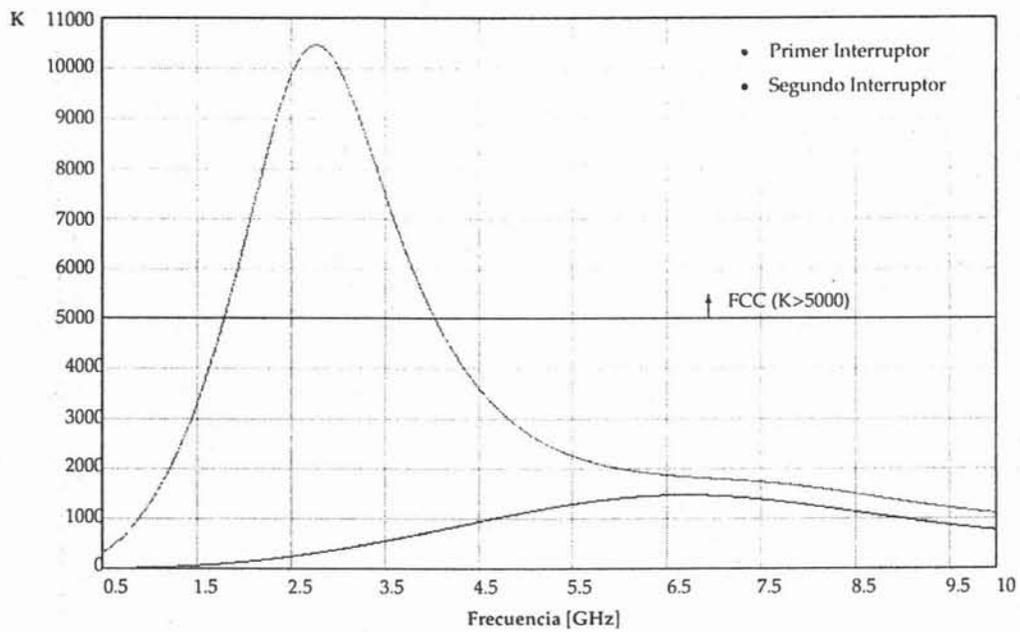


Figura 5.10: Comparación entre los factores de conmutación de los dos interruptores propuestos.

5.5.5. Modificaciones al proceso MetalMUMPs

A fin de estudiar la variación del FCC de los interruptores propuestos con respecto a las propiedades eléctricas y geométricas de los materiales del proceso MetalMUMPs se hicieron las siguientes propuestas que incluyen mejoras al proceso:

- ⊗ **Aumentar el espesor de la capa de Cr/Pt.** Esta modificación se consideró conveniente realizarla en el segundo interruptor para disminuir las pérdidas resistivas a través de la viga de polisilicio (figura 5.11).

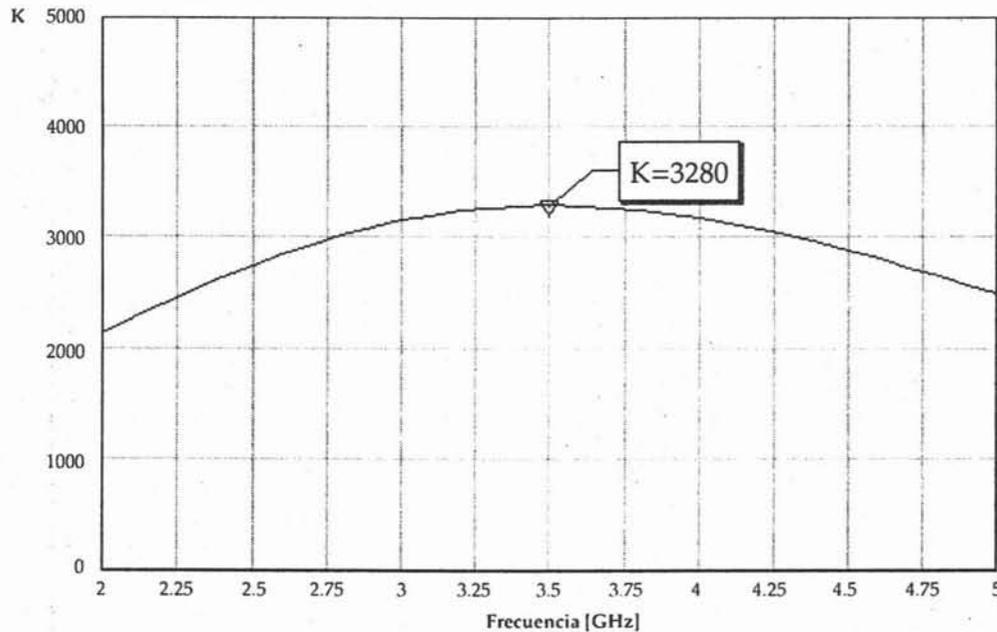


Figura 5.11: Factor de calidad de conmutación del segundo interruptor con una capa de 500 [nm] de Pt.

- ⊗ **Reducir la resistividad de la capa de Polisilicio.** A fin de disminuir las pérdidas resistivas debidas al polisilicio, el cual tiene una conductividad muy baja, ya que por ejemplo ésta es 192 veces menor comparada con la del níquel, se propuso aumentar la conductividad de dicho material para el segundo interruptor, dados los resultados presentados en la figura 5.10, con base a las propiedades del mejor polisilicio utilizado en el proceso de fabricación PolyMUMPs [26] (figura 5.12).
- ⊗ **Aumentar el espesor de la segunda capa de sacrificio.** Tomando en cuenta el estado del arte se observó que la distancia entre las membranas móviles y los electrodos (Brecha) tiene un promedio de 3-4 [μm] y el mínimo utilizado es de 1.5 [μm]. El valor utilizado en los interruptores propuestos es de 1.1 [μm] el cual es fijado por el grosor de la segunda capa de sacrificio del proceso. Se realizó la simulación para obtener el FCC del primer interruptor utilizando una distancia entre la viga y los electrodos de 2 [μm] (figura 5.13).

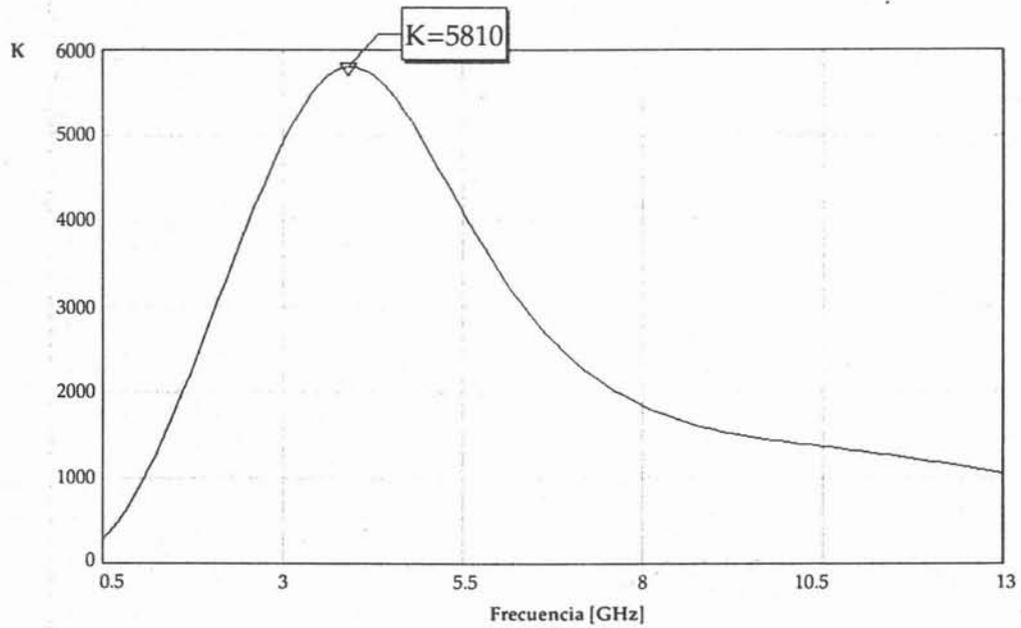


Figura 5.12: Factor de calidad de conmutación del segundo interruptor con una conductividad de la capa de polisilicio de 142857 [S/m] y una capa de 500 [nm] de platino.

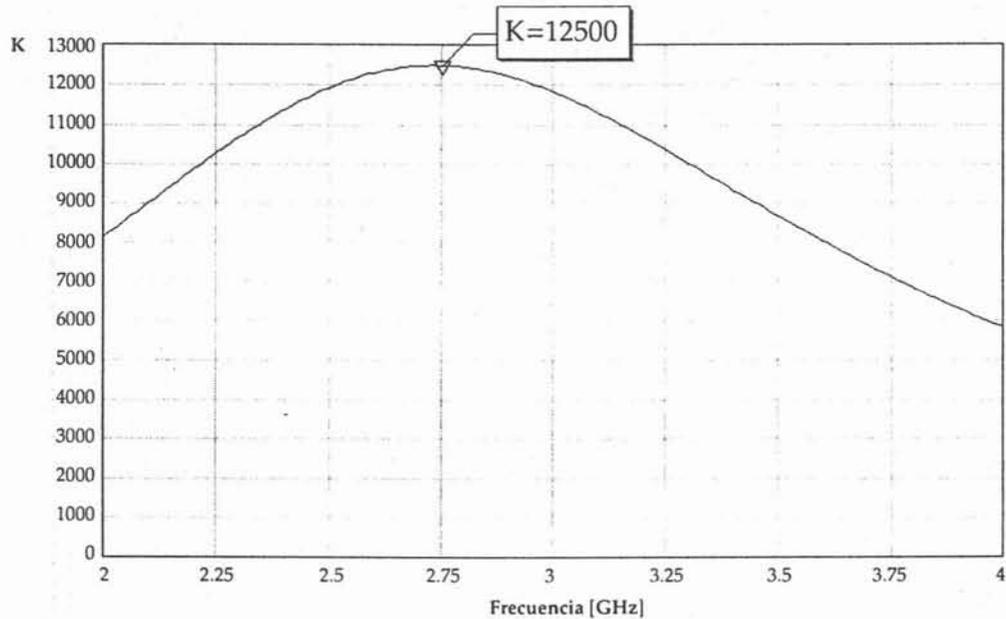


Figura 5.13: Factor de calidad de conmutación del primer interruptor con la segunda capa de sacrificio de 2 [μm].

5.6. Conclusiones

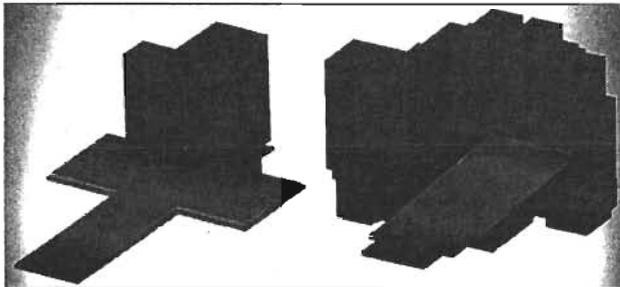
Se concluye que una ventaja importante de caracterizar en frecuencia los interruptores propuestos mediante el *Factor de Calidad de Conmutación* también se puede optimizar el circuito de conmutación del que formará parte (desplazador de fase, etc), ya que la figura de mérito de este último es función del FCC de los dispositivos de conmutación que contiene dicho circuito. La utilización de esta herramienta para caracterizar dispositivos de conmutación no se reporta en el estado del arte.

Con base en los resultados obtenidos podemos concluir que los materiales del proceso MetalMUMPs que influyeron en mayor medida en la respuesta en frecuencia de los interruptores propuestos son:

1. **El sustrato sobre en el cual se construye la estructura.** De acuerdo en el estado del arte, la resistividad de los sustratos utilizados es mucho mayor a la del sustrato que maneja el proceso MetalMUMPs. Mientras que la resistividad del sustrato de silicio del proceso MetalMUMPs es de 1 - 2 [$\Omega\cdot\text{cm}$], los interruptores reportados en el estado del arte están contruidos sobre sustratos con resistividades de 1500 - 10000 [$\Omega\cdot\text{cm}$].
2. **El polisilicio que forma la viga.** En los interruptores propuestos se utilizó una viga de polisilicio para realizar la conmutación de la señal, este material posee una conductividad eléctrica muy baja comparada con un metal (aproximadamente 200 veces menor), que es el material utilizado por los interruptores reportados en el estado del arte para construir las vigas o membranas de dichos interruptores.
3. **Las capas de sacrificio.** El espesor de la capa de sacrificio que define la brecha de los dos interruptores propuestos (1.1 [μm]) es menor al promedio utilizado en los interruptores reportados en el estado del arte (3 - 5 [μm]). Dicho espesor es uno de los factores que define la capacitancia en el estado abierto del interruptor, el cual es un parámetro importante en el Factor de Calidad de Conmutación del mismo.

Se concluye que los interruptores presentan su mejor desempeño en la banda S (2[GHz] - 4[GHz]).

Finalmente, se concluye que el proceso MetalMUMPs no permite el desarrollo de interruptores con un FCC >5000 en la banda Ka, el proceso se limita al desarrollo de interruptores para aplicaciones hasta 3 [GHz] .



Capítulo 6

Conclusiones Generales

Esta tesis presenta el análisis, diseño y simulación de dos interruptores MEMS para RF basados en el proceso MetalMUMPs, para el intervalo de 2 [GHz] a 10 [GHz]. Estos dos interruptores son el resultado de la optimización basada en una figura de mérito denominada **Factor de Calidad de Conmutación (FCC)** de un dispositivo de conmutación.

Al caracterizar el interruptor mediante el FCC se puede optimizar el circuito de conmutación del que formará parte (desplazador de fase, etc), ya que la figura de mérito de este último es función del FCC de los dispositivos de conmutación que contiene dicho circuito. La utilización de esta herramienta para caracterizar dispositivos de conmutación no se reporta en el estado del arte de los interruptores MEMS para RF.

En este trabajo se analizaron los factores de los cuales depende el voltaje de actuación y el factor de calidad de conmutación (respuesta en frecuencia) de un interruptor electrostático MEMS.

Los dos interruptores propuestos están formados por las dos únicas combinaciones diferentes de capas de materiales permitidas por las reglas de diseño del proceso MetalMUMPs para realizar un dispositivo de conmutación.

El flujo de diseño de los dos interruptores propuestos utilizado en este trabajo se presenta en la figura 6.1. Los tres primeros pasos del diseño se realizaron utilizando COVENTORWARE, los cuatro pasos restantes se realizaron utilizando el mismo software para obtener el comportamiento mecánico de los interruptores y MICROWAVE 1 para obtener su comportamiento electrodinámico. Finalmente se utilizó Microwave 2 para caracterizar los interruptores mediante el FCC a partir de los resultados obtenidos en MICROWAVE 1.

Por otra parte, como ya se mencionó, la optimización en frecuencia de los

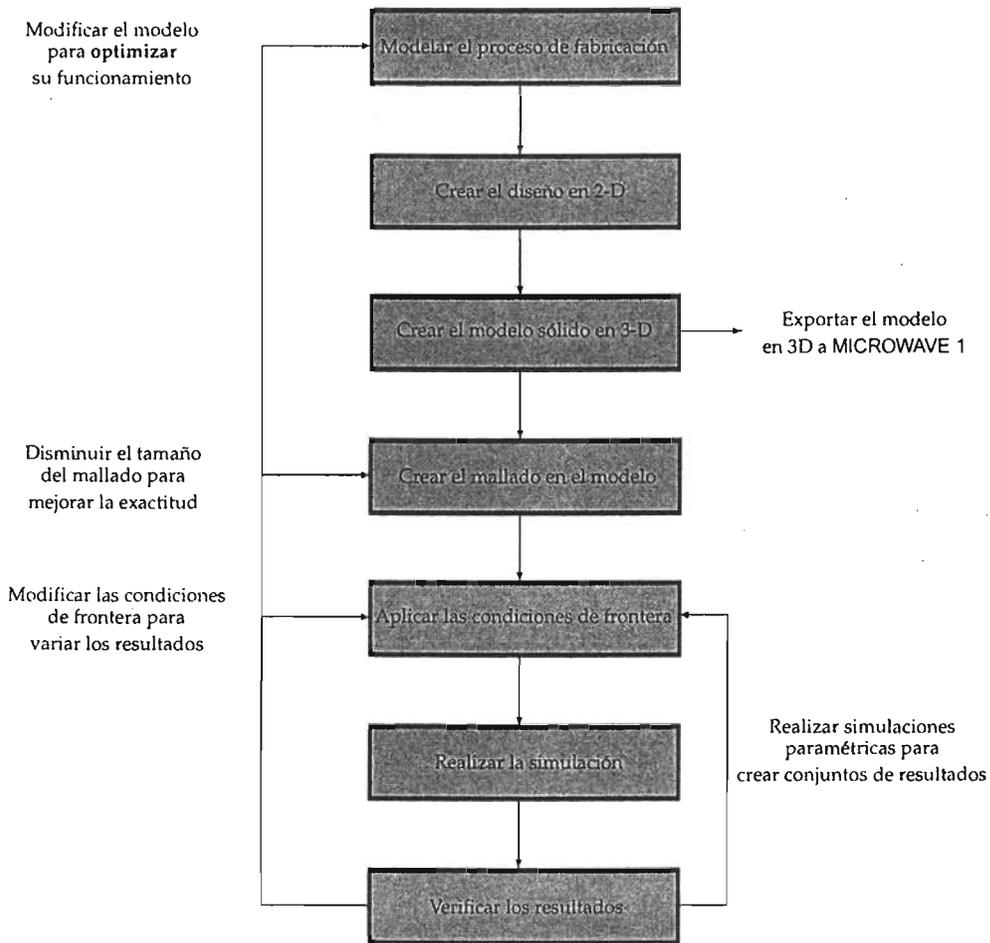


Figura 6.1: Flujo de diseño utilizado.

interruptores se realizó en base al Factor de Calidad de Conmutación. Las herramientas de análisis utilizadas fueron MICROWAVE 1 y Microwave 2; las estructuras modeladas en 3D a partir del proceso de fabricación se exportaron de COVENTORWARE hacia el MICROWAVE 1 (figura 6.1) para obtener los valores de los elementos de su modelo eléctrico y poder obtener su FCC con ayuda de Microwave 2.

El proceso de optimización consistió en variar las características mecánicas y eléctricas de los interruptores variando únicamente las dimensiones físicas de las partes que conforman dichas estructuras, debido a que su diseño está restringido a el proceso MetalMUMPs.

Se concluye que existen dos formas de obtener un bajo voltaje de actuación. La

primera forma es aumentando el área A donde se aplica la fuerza electrostática y la segunda es disminuir la rigidez mecánica de la viga K_z . Como se requiere que el dispositivo ocupe el menor espacio posible y además tenga una buena respuesta en frecuencia, la variación del área A quedó restringida a el espacio máximo que puede ocupar el interruptor y a la capacitancia en el estado abierto, C_{ab} , necesaria para obtener una buena respuesta en frecuencia.

En general se obtuvo una baja constante de rigidez, K_z , y un bajo voltaje de actuación y de liberación para ambos interruptores. Después de optimizar los interruptores para que tuvieran un buen comportamiento en frecuencia, los valores finales de sus principales parámetros y características se muestran en las tablas 6.1 y 6.2.

Con base en los resultados obtenidos podemos concluir que los materiales del proceso **MetalMUMPs** que influyeron en mayor medida en la respuesta en frecuencia de los interruptores propuestos son:

1. **El sustrato sobre el cual se construye la estructura.** De acuerdo con el estado del arte, la resistividad de los sustratos utilizados es mucho mayor a la del sustrato que maneja el proceso MetalMUMPs. Mientras que la resistividad del sustrato de silicio del proceso MetalMUMPs es de 1 - 2 [$\Omega \cdot \text{cm}$], los interruptores reportados en el estado del arte están contruidos sobre sustratos con resistividades de 1500 - 10000 [$\Omega \cdot \text{cm}$].
2. **El polisilicio que forma la viga.** En los interruptores propuestos se utilizó una viga de polisilicio para realizar la conmutación de la señal, este material posee una conductividad eléctrica muy baja comparada con un metal (aproximadamente 200 veces menor), que es el material utilizado por los interruptores reportados en el estado del arte para construir las vigas o membranas de dichos interruptores.
3. **Las capas de sacrificio.** El espesor de la capa de sacrificio que define la brecha de los dos interruptores propuestos (1.1 [μm]) es menor al promedio utilizado en los interruptores reportados en el estado del arte (3 - 5 [μm]). Dicho espesor es uno de los factores que define la capacitancia en el estado abierto del interruptor, el cual es un parámetro importante en el Factor de Calidad de Conmutación del mismo.

A partir de los resultados finales obtenidos en este trabajo concluimos que el proceso **MetalMUMPs** es adecuado para fabricar interruptores para aplicaciones hasta 3 [GHz], debido a los materiales que utiliza, sus características eléctricas y las reglas de diseño propias del proceso.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos, concluimos que los interruptores no cumplieron con la respuesta en frecuencia esperada; es decir, no se pueden utilizar para aplicaciones en la banda Ka, sin embargo presentan una

buena respuesta en frecuencia en la banda S.

Las tablas 6.1 y 6.2 presentan un resumen con los resultados finales de ambos interruptores.

TABLA 6.1: Parámetros y resultados finales del primer interruptor.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|---------------------------------------|---|--|--------------|
| Longitud [μm] | 430 | Distancia entre viga y contactos [μm] | 1.1 |
| Ancho [μm] | 370 | Conductividad del polisilicio [S/m] | 64935 |
| Espesor de la viga [μm] | 0.35/0.7/0.35 | Constante de rigidez [N/m] | 5-12 |
| Área de actuación [μm^2] | 26320 | Voltaje de actuación [V] | 1.625 - 1.75 |
| Material de la viga | $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Poly}/\text{Si}_3\text{N}_4$ | Voltaje de liberación [V] | 0.35 - 0.5 |
| Material de los contactos | Ni/Au | C_{ce}/C_{cb} | ~ 15 |
| Capa de sacrificio | PSG | R_{ce} [Ω] | 1.5 - 2 |
| | | K (@ 2.75[GHz]) | 10400 |
| | | Velocidad de conmutación [μs] | ≈ 28 |

Resultados cuando se altera el proceso MetalMUMPs

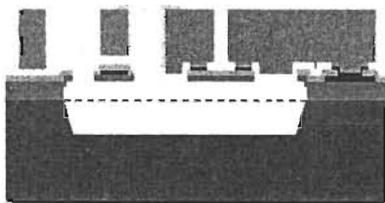
| Distancia entre viga y contactos = 2 [μm] | | | |
|--|--|---|-------------|
| | | Voltaje de actuación [V] | 6.375 - 6.5 |
| | | Voltaje de liberación [V] | 5.625 - 6 |
| | | Factor de Calidad de Conmutación (K @ 2.75 [GHz]) | 12500 |

TABLA 6.2: Parámetros y resultados finales del segundo interruptor.

| Parámetro | Valor | Parámetro | Valor |
|---------------------------------------|--|--|--------------|
| Longitud [μm] | 555 | Distancia entre viga y contactos [μm] | 1.1 |
| Ancho [μm] | 310 | Conductividad del polisilicio [S/m] | 64935 |
| Espesor de la viga [μm] | 0.35/0.7/0.35/ 0.010/0.025 | Constante de rigidez [N/m] | 8-14 |
| Área de actuación [μm^2] | 3900 | Voltaje de actuación [V] | 2.375 - 2.5 |
| Material de la viga | $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Poly}/\text{Si}_3\text{N}_4/$ | Voltaje de liberación [V] | 0.7 - 0.85 |
| | Cr/Pt | C_{ce}/C_{cb} | ~ 25 |
| Material de los contactos | Ni/Au | R_{ce} [Ω] | 4.3 - 4.7 |
| Capa de sacrificio | PSG | K (@ 6.7[GHz]) | 1460 |
| | | Velocidad de conmutación [μs] | ≈ 38 |

Resultados cuando se altera el proceso MetalMUMPs

| Distancia entre viga y contactos = 2 [μm] | | | |
|--|--|--|--------------|
| | | Voltaje de actuación [V] | 7.125 - 7.25 |
| | | Voltaje de liberación [V] | 6.75 - 7.125 |
| | | Factor de Calidad de Conmutación (K @ 3.9 [GHz]) | 5810 |



Apéndice A

Proceso MetalMUMPs

A.1. Introducción

El Proceso Multi-Usuario MEMS, o MUMPs es un programa de fabricación de MEMS para la industria, universidades y el gobierno en todo el mundo. MEMSCAP ofrece un proceso estándar denominado **MetalMUMPs**, que es un proceso de níquel electroplateado.

El proceso tiene las siguientes características generales:

- ⇒ El níquel electroplateado se utiliza como material estructural primario y como capa de interconexión eléctrica.
- ⇒ El polisilicio dopado puede ser utilizado para fabricar resistencias, estructuras mecánicas adicionales, y/o realizar interconexiones eléctricas.
- ⇒ El nitruro de silicio se utiliza como capa de aislamiento eléctrico.
- ⇒ El fosfosilicato de vidrio (PSG) se utiliza para realizar capas de sacrificio.
- ⇒ Se puede realizar una trinchera en el sustrato de silicio para obtener aislamiento térmico y eléctrico adicional.
- ⇒ Se puede utilizar una capa de oro, que es un material de baja resistencia, para cubrir las paredes de las estructuras fabricadas con níquel.

El proceso está diseñado en una forma lo más general posible para soportar diferentes diseños en una misma oblea de silicio. Dado que el proceso no fue optimizado con el propósito de fabricar un dispositivo en específico, los espesores de las capas estructurales y de sacrificio fueron seleccionadas para adaptarse a la mayoría de los usuarios, y las reglas de diseño fueron desarrolladas con el objetivo de garantizar la realización de diferentes diseños.

A.2. Pasos del proceso MetalMUMPs

El proceso tiene la siguiente convención para nombrar los niveles del proceso: los niveles que corresponden a las máscaras para el proceso de litografía están escritos con letras mayúsculas. Los nombres de capas específicas de materiales, como por ejemplo el polisilicio, ó una capa de metal, están escritas con letras minúsculas con la primera letra mayúscula. Por ejemplo POLY se refiere a la máscara para definir la forma de la capa de polisilicio, denominada Polisilicio.

La tabla A.2 muestra los nombres de las capas, los espesores de cada una de ellas, y los nombres de las máscaras usadas en los procesos de Litografía asociados con cada capa.

Nótese que en la siguiente descripción no todas las palabras escritas con letras mayúsculas son necesariamente un nivel de litografía. Comúnmente se utilizan acrónimos como PSG (Fosfosilicato de Vidrio) o símbolos químicos tal como KOH (hidróxido de potasio) que están escritos con letras mayúsculas.

A continuación se describe los pasos del proceso MetalMUMPs utilizando la convención para los nombres de las diferentes capas del proceso.

1. Una oblea de silicio tipo N (100), con una resistividad de 1-2 [$\Omega\cdot\text{cm}$]. Previamente la superficie de la oblea es altamente dopada con fósforo utilizando un proceso de fusión estándar con POCl_3 como fuente dopante.
2. **Óxido de silicio aislante** - Una capa de 2 [μm] de óxido de silicio es depositada en la superficie de la oblea para proporcionar aislamiento eléctrico del sustrato.
3. **Oxido 1** - Es una capa de 0.5 [μm] de espesor de PSG que sirve de capa de sacrificio. Al remover la capa Oxido 1 al final del proceso libera la capa Nitruro 1 (paso 4.). La capa Oxido 1 se graba por medio de litografía con la máscara denominada OXIDO 1. Esta capa también define las regiones en las cuales será realizada la trinchera en el sustrato.
4. **Nitruro 1** - Esta es una capa de nitruro de silicio de 0.35 [μm] de bajo esfuerzo. Se utiliza en combinación con la capa Nitruro 2 subsiguiente con diferentes propósitos. Las capas de nitruro proveen un encapsulado de protección para el polisilicio. El patrón de nitruro también define una capa de protección en el sustrato que determina donde se realizará el ataque para hacer la trinchera en el sustrato (paso 12.). Tercero, una área de nitruro grabada y liberada se puede utilizar para unir mecánicamente estructuras de Metal que deben estar aisladas eléctricamente.
5. **Polisilicio** - Esta capa tiene un espesor de 0.7 [μm] , la cual es sometida a un proceso de dopado y recocido para conseguir que tenga propiedades

eléctricas consistentes. Esta capa es grabada con la segunda máscara, denominada POLY. Esta capa se puede utilizar para formar elementos resistivos, estructuras mecánicas, ó para realizar interconexiones eléctricas.

6. **Nitruro 2** - Esta es una segunda capa de 0.35 [μm] de espesor de nitruro de silicio de bajo esfuerzo. La combinación de las capas Nitruro 1 y Nitruro 2 se graban por medio de un proceso de litografía con la tercera máscara, denominada NITRHOLE.
7. **Oxido 2** - Esta segunda capa de sacrificio de óxido tiene 1.1 [μm] de PSG. Esta capa es removida en el último paso para liberar la capa mecánica de Metal (paso 10.). Esta capa es grabada con la cuarta máscara, denominada METANCH.
8. **Anclaje de Metal** - El grabado de la capa Oxido 2 también genera el patrón para los anclajes de metal. Posteriormente se utiliza un proceso denominado *liftoff*¹ para depositar capas delgadas de Cr y Pt (Anclaje de Metal) solamente en el fondo de la capa Oxido 2, es decir, en las partes que fueron atacadas utilizando la máscara METANCH.
9. **Base Plateada** - Esta es una capa general de 500 [nm] de Cu protegida con una capa delgada de Ti. Esta Base Plateada provee continuidad eléctrica a lo largo de la oblea para el paso de electroplateado de Metal.
10. **Metal** - La oblea es cubierta con una capa gruesa de material fotorresistivo y grabado con la quinta máscara, METAL, el patrón obtenido forma el molde para el depósito de Ni. Posteriormente es electroplateada una capa de 20 [μm] de Níquel dentro del patrón de material fotorresistivo. Posteriormente se realiza un electroplateado de 0.5 [μm] de oro en la superficie del níquel para obtener material apropiado para realizar interconexiones eléctricas externas. Esta combinación de 20 [μm] de níquel y 0.5 [μm] de oro forma la capa Metal. La capa Metal sirve como capa mecánica primaria y de interconexión eléctrica.
11. **Metal en las paredes laterales** - Esta es una capa final de metal electroplateado, que tiene un espesor de 1-3 [μm] de oro, depositada en áreas seleccionadas de las paredes de la capa Metal. Esta capa provee un contacto eléctrico de baja resistencia muy confiable y tiene el efecto de reducir los espacios con estructuras de níquel electroplateado adyacentes.
12. Los pasos finales son liberar la estructura y realizar la trinchera en la oblea de silicio. La liberación es una serie de ataques químicos húmedos para

¹Este proceso se utiliza para depositar capas de metal que son difíciles de remover sobre una oblea en determinadas regiones, el procedimiento es el siguiente: primero se deposita un material fotorresistivo y se graba un patrón utilizando un proceso de litografía estándar. El siguiente paso es cubrir la oblea entera con metal, de esta manera el metal solo hace contacto con la oblea en las regiones donde se quiere depositar. Finalmente se remueve el material fotorresistivo junto con el metal de las regiones donde no se desea.

remover primero la Base Plateada y después las capas de sacrificio y la capa de óxido de silicio de aislamiento que se encuentra encima de las áreas donde se formará la trinchera. Finalmente, se ataca la oblea de silicio utilizando un ataque químico húmedo, con KOH, para formar una trinchera de 25 [μm] de profundidad. Esto ocurre en las áreas definidas por las máscaras OXIDO 1 y NITRHOLE. Esta trinchera provee aislamiento térmico y eléctrico adicional.

13. Las obleas son cortadas, clasificadas y enviadas al usuario.

La siguiente tabla resume los nombres de las capas, espesores y los procesos de litografía asociados con éstas capas:

TABLA A.1: Nombres de las capas, espesores y máscaras usadas en el proceso de litografía.

| Capa de Material | Espesor (μm) | Máscara usada en el proceso de Litografía | Propósito | Comentarios |
|--------------------------------|---------------------------|---|---|---|
| Oxido de aislamiento | 2.0 | | | 2 [μm] de óxido térmico |
| Oxido 1 | 0.5 | OXIDE 1 | Define la trinchera; libera el Nitruro | 0.5 [μm] de PSC |
| Nitruro 1 | 0.35 | | | 0.35 [μm] de Nitruro de silicio de bajo esfuerzo |
| Polisilicio | 0.7 | POLY (HOLP) | Define el patrón del polisilicio | 0.7 [μm] de polisilicio dopado |
| Nitruro 2 | 0.35 | NITRHOLE | Define las áreas donde se removerá el Nitruro. Define la trinchera. Abre espacios para que haya contacto eléctrico entre el Metal y el Polisilicio. | Hace el patrón de el Nitruro 1 y Nitruro 2. |
| Oxido 2 | 1.1 | METANCH | Abre espacios para pequeñas capas de Anclaje de Metal sobre Nitruro o Polisilicio. | 1.1 [μm] de PSC |
| Anclaje de Metal | 0.035 | METANCH | | 10nm de Cr + 25 [nm] de Pt |
| Base Plateada | 0.55 | | | 500 [nm] de Cu + 50 [nm] de Ti |
| Metal | 20.5 | METAL (HOLM) | Define el patrón del Metal | 20 [μm] de Ni + 0.5 [μm] de Au |
| Metal en las paredes laterales | 1.0 - 3.0 | GOLDOVP | Define las áreas para el Metal en las paredes laterales y el patrón para el Metal en las paredes laterales | 1-3 [μm] de Au |

TABLA A.2: Parámetros mecánicos y eléctricos de los materiales del proceso MetalMUMPs.

| Capa | Espesor [μm] | | | Esfuerzo residual [MPa] | | | Resistencia [C/sq] | | | Conductividad [S/cm] | | |
|--------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------------------------|------|------|--------------------|------|------|---------------------------------|-------|-------|
| | Mín. | Tip. | Max. | Mín. | Tip. | Max. | Mín. | Tip. | Max. | Mín. | Tip. | Max. |
| Oxido de aislamiento | 1900 | 2000 | 2100 | N/A | | | N/A | | | N/A | | |
| Oxido 1 | 450 | 500 | 550 | N/A | | | N/A | | | N/A | | |
| Nitruro 1 | 315 | 350 | 365 | 0 | 90 | 180 | N/A | | | N/A | | |
| Poly | 630 | 700 | 770 | N/A | | | 19 | 22 | 25 | 51948 | 64935 | 83542 |
| Nitruro 2 | 315 | 350 | 365 | 0 | 90 | 180 | N/A | | | N/A | | |
| Oxido 2 | 990 | 1100 | 1210 | N/A | | | N/A | | | N/A | | |
| Anclaje de Metal | 32 | 35 | 38 | N/A | | | N/A | | | 4081632 | | |
| Base Plateada | 495 | 550 | 605 | N/A | | | N/A | | | N/A | | |
| Metal | 17000 | 20000 | 23000 | 100 | | | 4E-3 | | | 12500000 | | |
| Metal en las paredes laterales | 1000 | 2000 | 3000 | N/A | | | N/A | | | N/A | | |
| Trinchera | N/A | 25000 | N/A | N/A | | | N/A | | | N/A | | |

A.2.1. Flujo del proceso MetalMUMPs



Se deposita una capa de $2\mu\text{m}$ de óxido de silicio aislante sobre el sustrato. En seguida se deposita $0.5\mu\text{m}$ de fosfosilicato de vidrio (PSG) que sirve como capa de sacrificio.



La oblea se cubre con fotorresist sensible a la luz UV y se graba por medio de litografía exponiendo el fotorresist a la luz UV a través de la máscara OXIDO1. Las áreas de fotorresist expuesto son removidas dejando un patrón de fotorresist para realizar un ataque químico húmedo para remover la capa de sacrificio de PSG. Después del ataque se remueve el fotorresist químicamente.



Se deposita una capa de $0.35\mu\text{m}$ de nitruro de silicio (Nitruo 1) seguida de una capa de $0.7\mu\text{m}$ de polisilicio.



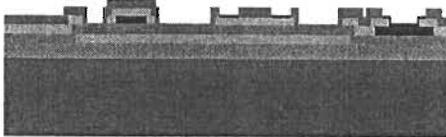
Se cubre la oblea con fotorresist y se graba el polisilicio usando la máscara POLY por medio de litografía. Se utiliza RIE para remover el polisilicio. Finalmente se remueve el fotorresist.



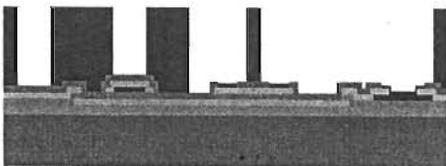
Se deposita una segunda capa de nitruro de silicio (Nitruo 2) con un espesor de $0.35\mu\text{m}$.



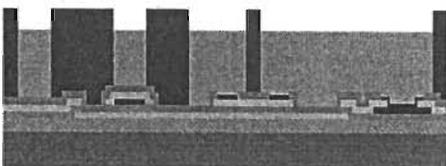
Se cubre la oblea con fotorresist y se graban los nitruros de silicio usando litografía y la máscara NITRHOLE. El tipo de ataque utilizado es RIE. Nota: Las áreas de Nitruo 1 permanecerán si se encuentran debajo del polisilicio.



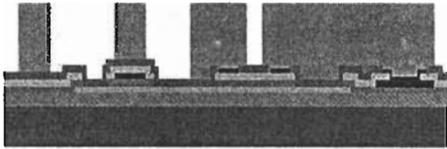
La oblea se cubre con fotorresist y se graba el Óxido 2 utilizando litografía y la máscara METANCH. El tipo de ataque utilizado es húmedo. Posteriormente se deposita una capa de metal delgada que consiste en 10 [nm] de Cromo + 25 [nm] de Platino en las regiones donde se removió el Óxido 2 y finalmente se remueve el fotorresist.



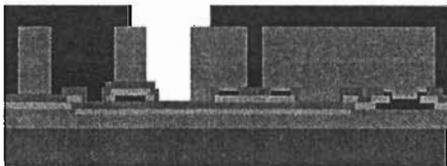
Se deposita una capa de 500 [nm] de Cobre + 50 [nm] de Titanio denominada *Base Plateada*. La oblea se recubre con una capa gruesa de fotorresist y se graba utilizando la máscara METAL. Este proceso forma el patrón para la capa de Metal electroplateado.



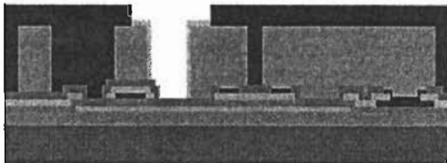
Se electroplatea el Níquel con un espesor de $20\mu\text{m}$ dentro del patrón de fotorresist. Inmediatamente se electroplatea una capa de Oro de $0.5\mu\text{m}$ de espesor en la superficie del Níquel. Estas capas forman la capa denominada Metal.



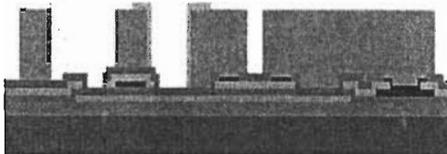
El patrón de fotorresist se remueve químicamente.



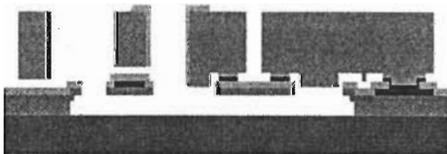
La oblea se cubre con fotorresist y se graba utilizando una versión "ampliada" de la máscara GOLDOVP para remover la *Base Plateada* en las regiones donde se desea la capa de *Metal en las Paredes Laterales*. La *Base Plateada* se remueve químicamente así como el fotorresist. Posteriormente se vuelve a cubrir la oblea con fotorresist y se graba el patrón para electroplatear el *Metal en las Paredes Laterales* utilizando una versión normal de la máscara GOLDOVP.



Se electroplatea una capa de Oro de 1-3 [μm] de espesor usando el patrón hecho en el fotorresist mediante la máscara GOLDOVP.



Se remueve el fotorresist.



Como primer paso en el proceso de liberación de la estructura, se remueve la *Base Plateada* químicamente. El segundo paso consiste en remover las capas de sacrificio de PSG (Óxido 1 y Óxido 2) y el óxido de silicio que se encuentra por arriba del área que abarcará la Trinchera mediante una solución de HF al 49%.



El paso final del proceso de liberación consiste en atacar el sustrato de silicio con KOH para hacer una trinchera de 25 [μm] de profundidad en las áreas definidas por las máscaras OXIDO1 y NITRHOLE.

| | | | | |
|----------------|-----------|-------------|------------------|--------------------------------|
| Sustrato | Óxido 1 | Polisilicio | Óxido 2 | Níquel |
| Óxido aislante | Nitruro 1 | Nitruro 2 | Anclaje de Metal | Metal en las Paredes Laterales |
| Fotorresist | | | | |

Figura A.1: Flujo del proceso MetalMUMPs.



Apéndice B Introducción a COVENTORWARE

B.1. Descripción general

La figura B.1 muestra el flujo interactivo entre los módulos que conforman COVENTORWARE.

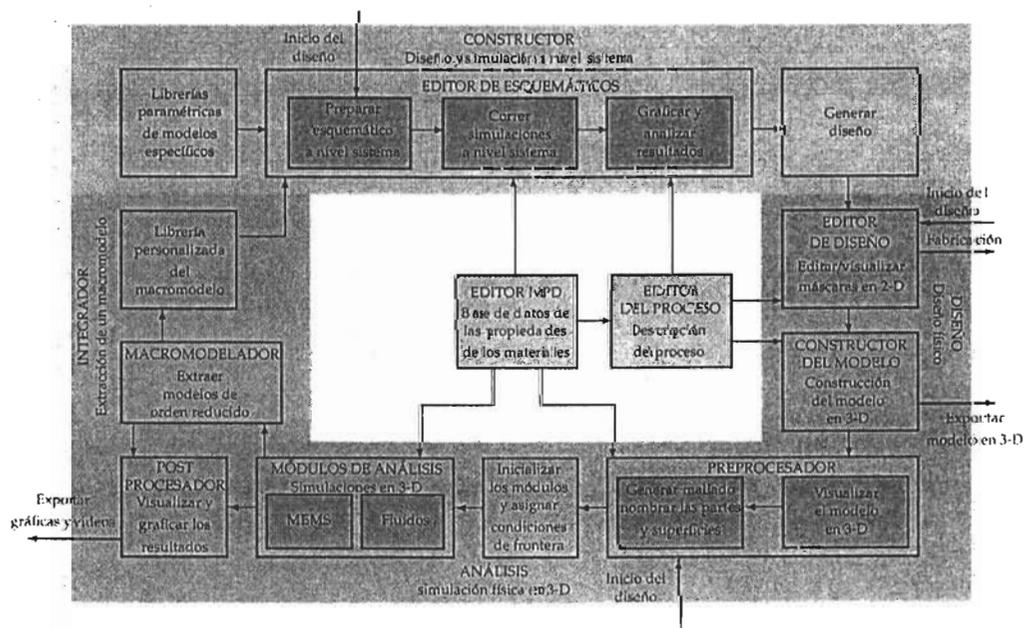


Figura B.1: Flujo de diseño utilizado en COVENTORWARE.

B.1.1. Principales componentes de COVENTORWARE

COVENTORWARE está compuesto por los siguientes componentes:

- ◆ **Base de datos de las propiedades de los materiales:** es una base de datos que contiene las propiedades de los materiales utilizados por el programa.
- ◆ **Editor del proceso:** Simula el flujo del proceso de fabricación de los dispositivos MEMS.
- ◆ **Constructor:** Simula el diseño de MEMS a nivel de sistema. En esta sección se pueden incorporar modelos paramétricos incluidos en COVENTORWARE así como modelos generados por el usuario (utilizando los módulos del macromodelador: *SpringMM*, *InertiaMM*, *DampingMM*, y *FlowMM*).
- ◆ **Diseño:** Este módulo utiliza herramientas de diseño en 2-D y la generación automática de modelos sólidos en 3-D para diseñar los dispositivos MEMS.
- ◆ **Mallado:** Crea estructuras malladas en 3-D basadas en el modelo sólido del dispositivo. COVENTORWARE tiene diferentes opciones de mallado incluyendo: *superficial*, *tetraédrica*, *extruded* y *cuadriculado*. El mallado prepara el modelo para el análisis del dispositivo utilizando el Método del Elemento Finito.
- ◆ **Módulos de análisis:** En estos módulos se asignan las condiciones de frontera necesarias para realizar el análisis por medio del Método del Elemento Finito.
- ◆ **Integrador:** Esta conformado por diferentes módulos que están disponibles en el menú de *ANÁLISIS* para extraer macromodelos de orden reducido para realizar simulaciones a nivel sistema. Estos módulos permiten crear macromodelos que representan la rigidez de un sistema, efectos de amortiguamiento, inercia y flujo de fluidos.
- ◆ **Visualizador:** Es una interfaz que le permite al usuario analizar y visualizar en 3-D los resultados de las simulaciones. Permite crear animaciones en formato MPEG del comportamiento del dispositivo.

B.2. Diseño de MEMS utilizando COVENTORWARE

El primer paso en el diseño de MEMS utilizando este software, ya sea que el usuario realice simulaciones a nivel sistema con el módulo *Constructor* o simulaciones utilizando el Método del Elemento Finito (MEF) en el módulo de *Análisis*, es declarar una base de datos con las propiedades de los materiales. En CoventorWare esta base de datos almacena las propiedades de los materiales que se utilizarán en el diseño.

El *Editor del Proceso* permite al usuario simular el proceso de fabricación de los dispositivos MEMS. El flujo de fabricación se especifica mediante una secuencia de pasos de depósito y grabado definiendo los nombres de las máscaras que se utilizarán para definir los patrones en las diferentes capas depositadas. La elección de los materiales utilizados en la simulación del proceso de fabricación depende de la base de datos que contiene las propiedades de los materiales.

B.2.1. Diseño y simulación a nivel sistema

El tipo de diseño que utiliza el módulo Constructor es "top-down", el usuario tiene que emplear técnicas de diseño de alto nivel para crear el modelo a nivel sistema de un dispositivo MEMS para posteriormente simular su comportamiento utilizando una herramienta denominada *Saber*. El diseño de alto nivel comienza mediante la realización de un diagrama esquemático, posteriormente el módulo cuenta con herramientas que permiten realizar simulaciones al sistema bajo diferentes condiciones definidas por el usuario, también cuenta con herramientas de graficación para visualizar y medir los resultados en diferentes formatos. El usuario puede construir el esquemático utilizando librerías que contienen partes genéricas electromecánicas, ópticas, de fluidos, macro modelos creados por el mismo usuario o la combinación de cualquiera de estos modelos.

Utilizando este módulo, el usuario puede simular su diseño más rápidamente que utilizando el módulo de *análisis* (que emplea el Método del Elemento Finito). Después de refinar y finalizar el diseño, el usuario puede extraer el modelo hacia el *editor de diseño en 2-D* y verificar sus resultados utilizando el módulo de *análisis*.

B.2.2. Diseño y simulación física

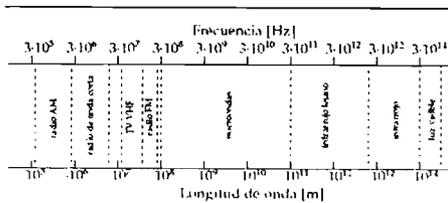
Para diseñar y simular dispositivos MEMS a nivel físico primero se utiliza el módulo de *diseño* para extraer un modelo de un esquemático construido en el módulo *constructor* o puede utilizarse para construir un dispositivo MEMS a partir de un archivo que defina su proceso de fabricación y su correspondiente diseño en 2-D. Si se utiliza esta última opción, el usuario define las máscaras en el *editor del proceso*, que después serán utilizadas en el *editor de diseño en 2-D*.

La descripción completa de proceso y máscaras se utiliza para construir un modelo en 3-D que se puede visualizar mediante el módulo llamado *Preprocesador*. El módulo *Preprocesador* también tiene la función de "mallar" o particionar el modelo sólido. El modelo mallado resultante puede ser analizado por una gran variedad de herramientas de análisis que utilizan el Método del Elemento Finito.

Los componentes de análisis incluidos en este módulo son: electrostáticos, mecánicos, térmicos y de fluidos, así como componentes acoplados como el electromecánico. Cada uno de estos componentes tiene acceso a una serie de ventanas para ingresar los parámetros de configuración del método aplicado en la simu-

lación y las condiciones de frontera en las estructuras que se desean analizar.

Los cálculos de las simulaciones terminadas se presentan en forma de tablas o en gráficas en 2-D. El módulo denominado *visualizador* muestra la solución directamente en el modelo en 3-D mediante un mapeo a color de diferentes parámetros, permitiendo a los usuarios visualizar las áreas donde se generan esfuerzos, gradientes térmicos a través del modelo sólido o deformaciones debidas a condiciones de frontera aplicadas.

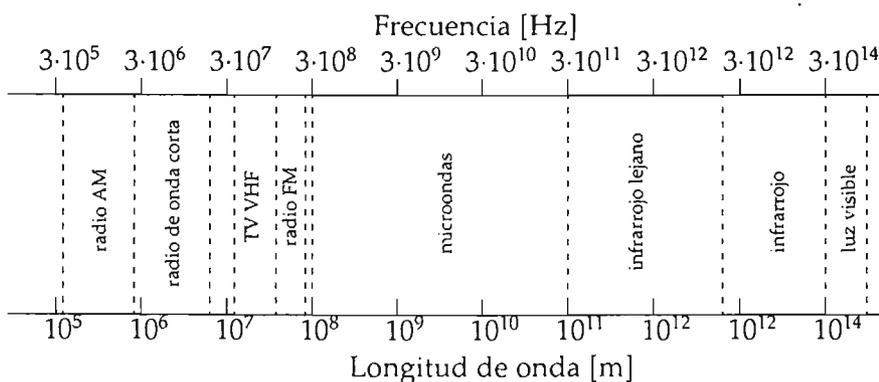


Apéndice C Bandas de frecuencia

TABLA C.1: Bandas de Frecuencia [23].

| De 30 Hz a 300 GHz | | | |
|----------------------------------|-------------|-------------------|------------------|
| Nombre | Abreviatura | Frecuencia | Longitud de onda |
| Frecuencias extremadamente bajas | ELF | 30 Hz... 300 Hz | 10 Mm... 1 Mm |
| Frecuencias de voz | VF | 300 Hz... 3 kHz | 1 Mm... 100 km |
| Frecuencias muy bajas | VLF | 3 kHz... 30 kHz | 100 km... 10 km |
| Frecuencias bajas | LF | 30 kHz... 300 kHz | 10 km... 1 km |
| Frecuencias medias | MF | 300 kHz... 3 MHz | 1 km... 100 m |
| Frecuencias altas | HF | 3 MHz... 30 MHz | 100 m... 10 m |
| Frecuencias muy altas | VHF | 30 MHz... 300 MHz | 10 m... 1 m |
| Frecuencias ultra altas | UHF | 300 MHz... 3 GHz | 1 m... 10 cm |
| Frecuencias super altas | SHF | 3 GHz... 30 GHz | 10 cm... 1 cm |
| Frecuencias extremadamente altas | EHF | 30 GHz... 300 GHz | 1 cm... 1 mm |

| > 1 GHz | | |
|----------|--------------------|--------------------|
| Nombre | Frecuencia | Longitud de onda |
| Banda L | 1 GHz... 2 GHz | 30 cm... 15 cm |
| Banda S | 2 GHz... 4 GHz | 15 cm... 7.5 cm |
| Banda C | 4 GHz... 8 GHz | 7.5 cm... 3.75 cm |
| Banda X | 8 GHz... 12 GHz | 3.75 cm... 2.5 cm |
| Banda Ku | 12 GHz... 18 GHz | 2.5 cm... 1.67 cm |
| Banda K | 18 GHz... 26.5 GHz | 1.67 cm... 1.13 cm |
| Banda Ka | 26.5 GHz... 40 GHz | 1.13 cm... 7.5 mm |
| Banda Q | 32 GHz... 50 GHz | 9.38 mm... 6 mm |
| Banda U | 40 GHz... 60 GHz | 7.5 mm... 5 mm |
| Banda V | 50 GHz... 75 GHz | 6 mm... 4 mm |
| Banda W | 75 GHz... 100 GHz | 4 mm... 3.33 mm |



Bibliografía

- [1] MALUF, NADIM I.: *"An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering,"* London, Artech House, 2000.
- [2] PELESKO, J. A.; BERNSTEIN, D.A.: *"Modeling MEMS and NEMS,"* Chapman & Hall/CRC, 2003.
- [3] OBERHAMMER, J.: *"Novel RF MEMS Switch and Packaging Concepts,"* Microsystem technology department of signals, sensors and systems royal institute of technology, Stockholm, 2004.
- [4] VARADAN, V. K.; VINOY, K.J.: *"RF MEMS and their applications,"* England, John Wiley & Sons, 2003.
- [5] REBEIZ, G. M.; MULDAVIN, J. B.: *"RF MEMS Switches and Switch Circuits,"* IEEE Microwave magazine, Diciembre 2001.
- [6] LARSON, L. E.; HACKETT, R. H. y LOHR, R. F.: *"Microactuators for GaAs based microwave integrated circuits,"* Proc. Transducers, pp.743-746, Junio 24-27, 1991.
- [7] GOLDSMITH, C. L.; RANDALL, J.; ESHELMAN S.; LIN T.H.; DENNISTON, D.; CHEN, S. y NORVELL, B.: *"Characteristics of micromachined switches at microwave frequencies,"* IEEE Int. Microwave Sympn. Dig., pp. 114-1144, Junio 1996.
- [8] GOLDSMITH, C.L.; YAO, Z.; ESHELMAN, S. y DENNISTON, D.: *"Performance of low-loss RF MEMS capacitive switches,"* IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 8, pp. 269-271, Agosto 1998.
- [9] SHEN, S. C.; CARUTH, D. y FENG, M.: *"Broadband low actuation voltage RF MEM switches,"* in Proceedings, IEEE GaAs IC Symposium, Seattle, WA, pp. 161-164, Noviembre 2000.
- [10] MULDAVIN, J. B. y REBEIZ, G.M.: *"Inline capacitive and DC-contact MEMS shunt switches,"* IEEE Microwave Wireless Comp. Lett., Vol. 11, No. 8, pp. 334-336, Agosto 2001.

- [11] MULDAVIN, J. B. y REBEIZ, G.M.: "*High-isolation CPW MEMS shunt switches-part 1: Modeling*," *IEEE Transactions on Microwave Theory and techniques*, Vol. 48, No. 6, Junio 2003.
- [12] PACHECO, S.; NGUYEN, C.T. y KATEHI, P.B.: "*Design of low actuation voltage RF MEMS switch*," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Boston, Ma, pp. 1217-1220, Junio 2000.
- [13] DUFFY, S.; BOZLER, C.; RABE, S.; KNECHT, J.; TRAVIS, L.; WYATT, P.; KEAST, C. y GOUKER, M.: "*MEMS microswitches for reconfigurable microwave circuitry*," *Microwave and wireless Comp. Lett.*, Vol. 11, No. 3, pp. 106-108, Marzo 2001.
- [14] YAO, J. J. y CHANG, M. F.: "*A surface micromachined miniature switch for telecommunications applications with signal frequencies from DC up to 4 GHz*," *International Conference on Solide-State Sensors and Actuators Digest*, Estocolmo, Suecia, Junio 1995, pp. 384-387.
- [15] MIHAILOVICH, R. E.; KIM, M.; HACKER, J. B.; SOVERO, E. A.; STUDER, J.; HIGGINS, J. A. y DeNATALE, J. F.: "*MEM relay for reconfigurable RF circuits*," *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, Vol. 11, No. 2, pp. 53-55, Febrero 2001.
- [16] HACKER, J. B.; MIHAILOVICH, R. E.; KIM, M. y DeNATALE, J. F.: "*A Ka-Band 3-bit RF MEMS True-Time-Delay Network*," *IEEE Transactions on Microwave Theory and techniques*, Vol. 51, No. 1, Enero 2003.
- [17] OBERHAMMER, J. y STEMME, G.: "*Low-voltage high-isolation DC-to-RF MEMS switch based on an S-shaped film actuator*," *IEEE Transactions on electron devices*, Vol. 51, No. 1, Enero 2004.
- [18] SHIKIDA, M.; SATO, K. y HARADA, T.: "*Fabrication of an S-shaped microactuator*," *IEEE J. Microelectromechanical systems*, Vol. 6, No. 18, Marzo 1997.
- [19] ZAHN, M.: "*Electromagnetic Field Theory: A Problem Solving Approach*," John Wiley & Sons, Nueva York, 1979.
- [20] FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B. y SANDS, M.: "*The Feynman Lectures on Physics*," Vol. 2, Addison-Wesley, 1964.
- [21] WEAVER, JR. W.; TIMOSHENKO, S. P. y YOUNG, D.H.: "*Vivration Problems in Engineering*," 5a edición, John Wiley & Sons, Nueva York, 1990.
- [22] REBEIZ, G.M.: "*RF MEMS Theory, Design and Technology*," John Wiley & Sons, New Jersey, 2003.
- [23] WHITAKER, J. C.: "*The Electronics Handbook*," Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1996.
- [24] VENDIK, I.B.; VENDIK, O.G.: "*Commutation Quality Factor of Two-State Switchable Devices*," *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, Vol.48, No. 5, Mayo 2000.

[25] COVENTOR INC., CARY, NC, www.coventor.com.

[26] MEMSCAP www.memscap.com.

Índice alfabético

- Aislamiento, 21
- CoventorWare, 87
 - componentes, 87
 - diseño de MEMS, 88
 - flujo del diseño, 90
- Crecimiento epitaxial, 13
 - definición, 13
- Deposición química en fase vapor, 16
 - CVD, 16
 - HDP-CVD, 16
 - LCVD, 16
 - PECVD, 16
- Dióxido de Silicio, 12
 - deposición de, 17
 - formas, 12
- Diseño de los interruptores MEMS, 39, 44
 - análisis mecánico, 39
 - diseño mecánico, 43
 - especificaciones de diseño, 39
- Evaporación, 15
- Factor de Calidad de Conmutación, 61
 - circuito equivalente, 62
 - modelo eléctrico, 63
 - parámetros, 65
- Fotorresist, 18
- Frecuencia natural de resonancia, 22
- Grabado, 19
 - anisotrópico, 19
 - humedo, 19
 - isotrópico, 19
 - seco, 19
- Interruptor, 1, 21
 - Configuraciones, 23
 - En forma de S, 33
- Illinois, 28
- Lincoln, 31
- Michigan, 29
- Parámetros de diseño, 21
- Raytheon, 27
- Rockweel Scientific, 32
- voltaje de actuación, 41
- Litografía, 18
 - pasos, 18
- Métodos de giro, 18
 - definición, 18
 - materiales, 18
- Materiales, 9
 - silicio, 9
- MEMS, 1–5
 - definición, 3
 - reseña histórica, 4
 - técnicas de fabricación, 13
- MetalMUMPs, 81
 - introducción, 81
 - modificaciones propuestas, 74
 - pasos del proceso, 82
- Micromaquinado, 7
 - definición, 7
 - proceso, 7
 - flujo del, 8
 - superficie, 8
 - volumen, 8
- Modelado electromecánico, 39–42
 - Resultados y conclusiones, 59
- Nitruro de Silicio, 12
 - deposición de, 17
- Optimización, 68
- Oxidación térmica, 13
- Pérdidas de inserción, 21

-
- Polisilicio, 12
 - deposición de, 16
 - Pulverización catódica (Sputtering), 14
 - Silicio, 9
 - amorfo, 12
 - cristalino, 11
 - estructura, 9
 - formas, 11
 - planos de corte, 11
 - polisilicio, 12
 - Simulación, 51
 - constante de rigidez, 51
 - dinámica, 57
 - electrodinámica, 64
 - electromecánica, 53
 - simulación mecánica, 51
 - velocidad de conmutación, 57
 - voltaje de actuación, 53
 - voltaje de liberación, 55
 - Tiempo de transición, 22
 - Tiempo de vida, 22
 - Velocidad de conmutación, 22
 - Voltaje de actuación, 22