



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN INTERRUPTOR MEMS APLICADO A
TELÉFONOS CELULARES**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
P R E S E N T A N:

**JACQUELYN MARTINEZ ALAVEZ
OSWALDO ARMANDO ORTIZ MEDINA**

DIRECTOR DE TESIS: DR. VOLOYMYR SVYRYD



CD. UNIVERSITARIA MÉXICO DF

2005



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

AGRADECIMIENTOS

JACQUELYN MARTINEZ ALAVEZ

A Dios y a la Virgen de Guadalupe:

Por darme la vida y la oportunidad de poder realizar lo que hasta este momento he logrado.

A mi mami:

Por tu apoyo en todo momento, paciencia, amor y ayuda incondicional, gracias mamita.

A mi papá:

Por animarme a seguir adelante, por tu apoyo a lo largo de mi carrera y en todo momento, muchas gracias.

A mi hermana:

Por tu ayuda, amor, consejos, regaños y compañía, mil gracias.

A mis abuelitos:

Por su amor, cariño y por estar pendientes de mí, aunque 3 de ustedes ya estén en el cielo se que desde ahí me siguen apoyando.

A Willy, Nieves, Chepi, Cane, y compañía (25):

Por darme su amor, alegría y momentos muy especiales desde que nos conocemos.

A Oswaldo:

Por tu apoyo incondicional y en todo momento, por tu amor y paciencia gracias, pues fuiste un pilar importante para que el paso por la Facultad fuera más sencillo y agradable.

Al Dr. Volodymyr Svyryd:

Por su apoyo, consejos y e interés a lo largo de todo este proyecto. Muchas gracias

A nuestros sinodales:

Por su ayuda e interés en este trabajo, gracias por ayudarme a que saliera bien

A todos los que de alguna forma me ayudaron a lo largo de mi carrera.

OSWALDO ARMANDO ORTIZ MEDINA

A mi madre, abuelitos y mi hermano Alfonso. A quienes la ilusión de su vida ha sido convertirme en una persona de provecho. A quienes nunca podré pagar todos sus desvelos, ni aún con las riquezas más grandes del mundo. Por esto y más. Gracias

A Jacquelyn, por estar siempre conmigo con tu amor incondicional, porque juntos subimos a la cuesta de la vida y llegamos a la cumbre y permaneceremos ahí, hasta lograr nuestros sueños y metas.

Para mis amigos que han demostrado que la amistad es un lazo estrecho, desinteresado y recíproco que es capaz de cualquier sacrificio y heroísmo.

Para todos mis maestros que me enseñaron en el aula lo que es la vida, brindándome sus conocimientos día tras día, inculcándome además valores para convertirme en un gran hombre.

**GRACIAS
OSWALDO**

DEDICATORIAS

JACQUELYN MARTINEZ ALAVEZ

A Dios y a la Virgen de Guadalupe:

Por darme la oportunidad de vivir y estudiar.

A mis padres:

Por que éste, como todos mis logros, es dedicado a ustedes, gran parte de este proyecto es gracias a ustedes, a su apoyo y amor, por confiar en mí y animarme a seguir adelante.

A mi hermana:

Ya que sin tu apoyo nada hubiera sido igual, tu ejemplo y compañía me animaron a seguir adelante.

A mis abuelitos:

Por que ustedes son un gran ejemplo para mí.

A Oswaldo:

Por ser sin duda una gran persona y estar a mi lado incondicionalmente, además de que pusiste un enorme interés y esfuerzo en este trabajo.

A Willy, Nieves, Chepi, Cane, y compañía (25):

Por que ustedes son parte de éste periodo de mi vida y me inspiraron a seguir adelante.

OSWALDO ARMANDO ORTIZ MEDINA

Dedico este trabajo a mi madre que me dio la vida, que con el amor que me ha brindado he llegado hasta aquí, que trabajó muy duro durante años para brindarme la educación que recibí y que enfrenta en este momento a un enemigo terrible, el cuál superara y vivirá muchos años más con nosotros, dando satisfacciones y alegrías a sus seres queridos.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1. Microsistemas Electromecánicos	4
1.1 ¿Qué son MEMS ó MST?	5
1.2 ¿Qué es una micromáquina?.....	7
1.3 Procesos de Fabricación MEMS	7
1.3.1 Micromaquinado en volumen.....	8
1.3.2 Micromaquinado en superficie	8
1.3.3 Proceso LIGA.....	10
1.4 Técnicas de micromaquinado	11
1.4.1 Deposición.....	12
1.4.2 Atacado.....	19
1.4.3 Litografía	22
1.5 Fabricación de CI.....	32
1.6 Métodos de Actuación	33
1.6.1 Actuación Electrostática.....	33
1.6.2 Actuación Piezoeléctrica	33
1.6.3 Actuación Térmica	34
1.7 Propiedades de los materiales para la fabricación de MEMS	34
1.7.1 El silicio.....	35
1.7.1.1 Silicio monocristalino.....	39
1.7.1. 2 Silicio Policristalino	40
1.7.1.3 Nitruro de Silicio	41
1.7.2 Metales	41
1.7.2.1 Oro	42
1.7.2.2 Cobre	43
1.7.2.3 Niquel	43
1.8 ¿Porqué utilizar tecnología MEMS?.....	44
Conclusiones.....	44
Bibliografía.....	45
Capítulo 2. Aplicación de los MEMS en Radiofrecuencias	47
2.1 ¿Qué son los RF MEMS?.....	48
2.2 RF MEMS para comunicaciones inalámbricas	48
2.3 Mercado de RF MEMS	49
2.3.1 Participantes del Mercado de RF MEMS	49
2.3.2 Un inmenso potencial del mercado	49
2.3.3 Desafíos y factores clave para el éxito	51
2.3.4 Oportunidades de Negocio en RF MEMS.....	52
2.4 Áreas de aplicación de los MEMS en dispositivos RF.....	52
2.5 Ventajas de RF MEMS.....	53
2.6 Mercado de RF MEMS en telefonía celular.....	53
2.7 Importancia de la telefonía celular.	55
2.8 Sistema de telefonía celular.....	55
2.8.1 Historia del teléfono celular.	55
2.8.2 Generaciones de la telefonía celular.....	56

Índice

2.9 Telefonías celulares actuales	57
2.9.1 Transmisión analógica.....	57
2.9.2 Transmisión digital.....	58
2.10 Tecnologías de acceso celular.	58
2.10.1 Sistema Celular Analógico	58
2.10.2. Sistema Celular Digital.....	59
2.11 Funcionamiento de un teléfono celular.	60
2.12 Beneficios de aplicar la Tecnología MEMS a los teléfonos celulares.	64
2.13 Elementos de RF MEMS aplicados a teléfonos celulares	65
2.13.1 Resonador	66
2.13.2 Interruptor	67
2.13.3 Inductor.....	68
2.13.4 Capacitor.....	68
2.13.5 Antenas	69
Conclusiones.....	70
Bibliografía.....	71
Capítulo 3. Interruptores de Radiofrecuencia.....	73
3.1 Comparación de Interruptores PIN, FET y MEMS.....	73
3.1.1 Ventajas de los MEMS sobre PIN y FET.....	74
3.1.2 Desventajas de los MEMS sobre PIN y FET	75
3.2 Tipos de interruptores MEMS	76
3.2.1 Clasificación de interruptores MEMS según el tipo de contacto	76
3.2.2 Clasificación de interruptores MEMS según la configuración eléctrica.	79
3.3 Principios del diseño y análisis de interruptores RF MEMS.....	80
Conclusiones.....	88
Bibliografía.....	89
Capítulo 4. Fabricación en el proceso MetalMUMPs.	91
4.1 Descripción del proceso MetalMUMPs.	91
4.1.1 Características generales del proceso MetalMUMPs.	92
4.1.2 Pasos a seguir en el proceso.	92
4.1.3 Representación gráfica del Proceso.....	94
4.2 Aplicación de la Tecnología MetalMUMPs para la fabricación de dispositivos en la telefonía celular.	99
4.2.1 Interruptor.....	99
4.2.2 Capacitor.....	100
4.2.3 Resonador	102
Conclusiones.....	106
Bibliografía.....	107
Capítulo 5. Modelado del Interruptor	108
5.1 Análisis previo sobre el diseño del interruptor.....	108
5.1.1 Aspectos relacionados con la elección del dispositivo RF.....	108
5.1.2 Requerimientos considerados para teléfonos celulares	109
5.1.3 Metas del dispositivo a diseñar.....	109

Índice

5.2 Elección del interruptor	110
5.3 Análisis electromecánico del interruptor	113
5.4 Diseño mecánico	117
5.4.1 Partes que integran al interruptor	117
5.4.2 Dimensiones del interruptor base.	118
5.4.3 Evolución de la estructura del interruptor	119
5.4.4 Diseño del Interruptor tipo T.	121
5.4.5 Diseño del Interruptor tipo Resorte	125
5.5. Simulación del interruptor por medio del software especializado	128
5.5.1 Constante de rigidez	128
5.5.2 Voltaje de actuación	131
5.5.3 Factor de calidad de conmutación FCC.....	133
5.5.4 FCC de los interruptores propuestos	135
5.5.5 Tiempo de conmutación	152
5.6 Acoplamiento con la línea de transmisión.....	154
5.7 Aplicaciones en las frecuencias de operación.	157
5.8 Análisis económico del proceso MetalMUMPs	157
Conclusiones.....	159
Bibliografía.....	160
Capítulo 6. Análisis de Resultados, Propuestas y Conclusiones.....	162
6.1 Consideraciones de los MEMS en las versiones del interruptor.	162
6.2 Elección del interruptor	163
6.3 Análisis y simulación	163
6.4 Resultados obtenidos	165
6.5 Análisis de resultados	166
Conclusiones generales	169
Bibliografía.....	171
Apéndice A. Introducción a CoventorWare	173
Apéndice B. Análisis de las posibilidades de realización de un resonador con el proceso MetalMUMPs	175

INTRODUCCIÓN

La demanda actual de sistemas inalámbricos ha generado la necesidad de una tecnología que pueda reducir drásticamente costos, tamaño y peso así como mejorar el desarrollo y vida de las baterías. Ejemplos familiares de aplicaciones actuales y futuras que exigen estas cualidades son redes inalámbricas portátiles para mensajes, servicios de Internet inalámbrico para el comercio electrónico, bluetooth y servicios de localización como GPS o sistema de posicionamiento global.

Con el potencial para habilitar mayores anchos de banda, hacer interconexiones con pérdidas insignificantes y producir interruptores y resonadores casi ideales en el contexto de un proceso de fabricación planar compatible con los circuitos integrados existentes, los microsistemas electromecánicos de radiofrecuencia (RF MEMS) son justamente la tecnología que ofrece éstas características.

Los MEMS son un acrónimo que describe un área de investigación multidisciplinaria de crecimiento acelerado en 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 el mismo sustrato de silicio, permitiendo la posibilidad de desarrollar etapas de sensado, actuación, procesamiento y comunicación en un mismo circuito integrado.

Una vez que madure esta nueva tecnología promete habilitar interruptores con baja potencia de consumo y voltaje de actuación menor a 5 V, inductores de alta calidad, capacitores y varactores, osciladores altamente estables y filtros de alto desempeño.

Por lo que se refiere a los sistemas inalámbricos, la telefonía celular es una de las áreas en Telecomunicaciones que más desarrollo ha tenido en los últimos tiempos, ya que poder hablar mientras se viaja siempre ha sido un lujo codiciado para muchos usuarios, y es que en vez de establecer una sola trayectoria de comunicación de alta potencia entre dos puntos, el sistema celular divide una región geográfica en áreas relativamente pequeñas (o celdas). Cada celda cuenta con una estación que está equipada con un sistema de radio de baja potencia y equipo controlado por computadora para enlazar cada celda con una oficina móvil de conmutación telefónica centralizada (OMCT). Los usuarios finales no se comunican directamente con la OMCT sino con su estación de celda más cercana, posteriormente cada estación de celda se comunica con la OMCT regional. De esta manera se puede crear una red de muchas estaciones de radio independientes en un área muy grande.

Además un teléfono celular está asociado con voz, cámara digital con video, computadora portátil con datos e Internet, etc. Sin embargo, ante el crecimiento de las demandas de los consumidores, las expectativas para los dispositivos inalámbricos se han hecho más exigentes. Por ejemplo, mientras los dispositivos de primera generación (1G) proveen capacidades de conectividad analógica en una banda, los de la segunda generación (2G) proveen modo dual, voz digital, en doble banda y datos, y ahora la tercera generación (3G) y la cuarta generación (4G) están proveyendo capacidades para multimodos, multibandas y multiestándares para voz, multimedia y datos de alta velocidad.

Por otro lado, en lo que se refiere al interior del teléfono celular existe una infinidad de circuitos que se encargan de diversas tareas de acuerdo a la función de cada uno de los dispositivos de RF, tal es el caso de interruptores, capacitores, inductores y resonadores por mencionar algunos, cuyo desempeño es de vital importancia para la funcionalidad y desempeño de los sistemas del cual forman parte.

La tecnología MEMS o de microsistemas electromecánicos es una plataforma importante para la miniaturización de dispositivos y más aún si hablamos sobre dispositivos de radiofrecuencia puesto que con ello se ofrecen muchas ventajas a nivel de circuitería ya que se pueden reemplazar varias etapas de circuitos convencionales por etapas de dispositivos hechos con tecnología MEMS con la finalidad de hacerlos más eficientes. Por lo cual al tener claro que un teléfono celular trabaja tanto en el régimen de recepción como en el de transmisión, se investigó sobre el impacto que tendría el implementar interruptores MEMS dentro del teléfono celular y así se lograrían reducir costos de fabricación y tamaño, para con ello introducir más funciones dentro de un mismo dispositivo.

El objetivo de este trabajo es diseñar un interruptor para teléfonos celulares que cuente con algunas características superiores o equivalentes a los actuales, mediante su análisis y simulación usando la tecnología MEMS realizada con el proceso de fabricación MetalMUMPs.

El trabajo propuesto servirá para contribuir al análisis de diferentes estructuras para la realización de interruptores electrostáticos, también se podrá obtener un vistazo del proceso de fabricación MetalMUMPs, el cual es un proceso MEMS multiusuarios que provee un costo bajo, y está probado en la fabricación de MEMS para la industria, universidades y el gobierno mundial. El cual se eligió ya que permite diseñar diversos tipos de estructuras y se piensa que es un buen proceso de fabricación para principiantes en el estudio de los MEMS.

Para lograr el objetivo antes mencionado se investigó en libros especializados sobre el área de interés, artículos de investigación, revistas especializadas, conferencias de la IEEE (Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos) e Internet, además de aplicar conocimientos sobre las asignaturas ligadas para comprender la tecnología analizada, identificar las aplicaciones potenciales de los microsistemas electromecánicos dentro del teléfono celular e investigar sobre la evolución de la telefonía celular, las técnicas de transmisión y su funcionamiento.

Además se realizó una investigación sobre dispositivos actuales para conocer las características con las que se cuentan y así poder guiarnos sobre qué metas proponernos, también se analizó a fondo un dispositivo micromecánico (un interruptor RF MEMS en particular) para su posible diseño y análisis con ayuda del software especializado.

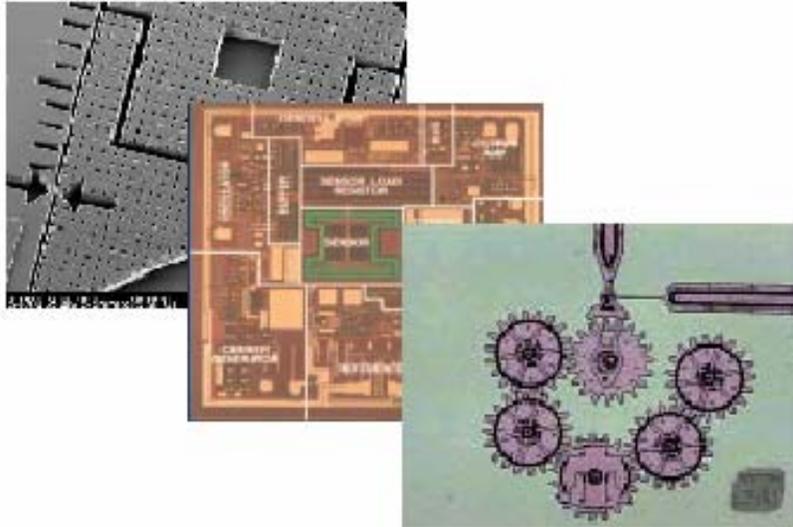
Recientemente la UNAM ha otorgado a la Facultad de Ingeniería recursos técnicos y financieros para apoyar el Centro de diseño de Microsistemas Electromecánicos para el desarrollo de dispositivos MEMS. Actualmente el centro de diseño MEMS cuenta con 10 computadoras personales con diferentes configuraciones de software especializado, comunicadas entre sí por medio de una red inalámbrica. Por medio del software

Introducción

especializado instalado en las computadoras es posible diseñar diferentes dispositivos, y analizar algunas de las características que estos tendrán cuando se realicen físicamente.

Se utilizó el software Coventor para diseñar un interruptor fabricado en el proceso MetalMUMPs. Con ayuda del software se obtuvieron las características electromecánicas que el dispositivo posee, ya teniendo una buena característica, se procedió el análisis de los circuitos eléctricos equivalentes del dispositivo en radiofrecuencia para optimizar sus características electrodinámicas.

Capítulo 1. Microsistema Electromecánicos.



Hoy en día la tecnología permite contar con infinidad de ventajas en diversos campos de aplicación con los que anteriormente no se contaba, por ejemplo, antes del uso de las computadoras, era más elaborado realizar informes de inventario en una empresa o realizar planos arquitectónicos; por otro lado, antes de la invención del teléfono, las personas no se podían comunicar al instante. Con tan solo estos dos ejemplos es notorio que cada avance de la tecnología beneficia enormemente a quienes hacen uso de ella. Más aún, ¿qué pasaría por ejemplo, si en lugar de que nuestra computadora fuera del tamaño actual pudiéramos llevarla como actualmente llevamos el teléfono celular, y así mismo, el celular pudiese ser del tamaño de un arete? Sería un gran avance tecnológico ya que nos beneficiaríamos por una parte, en la comodidad de poder llevar los aparatos más pequeños, y por otra parte se reducirían los costos puesto que se reduciría la cantidad de materia prima que es usada en la fabricación de estos dispositivos.

La tecnología de microsistemas electromecánicos o MEMS nos permite realizar lo antes mencionado, por ello se considera que su estudio y aplicación es de gran importancia.



Figura1.1 Con el uso de dispositivos MEMS se optimizará el diseño de la tecnología como es el caso de la telefonía celular.

1.1 ¿Qué son MEMS ó MST?

Los microsistemas electromecánicos o MEMS por sus siglas en inglés (microelectromechanical systems) son la integración de elementos mecánicos, sensores, actuadores, y electrónica sobre un sustrato de silicio a través de tecnología de fabricación [1] cuyas dimensiones son menores que 1 mm pero mayores que 1 μm [2].

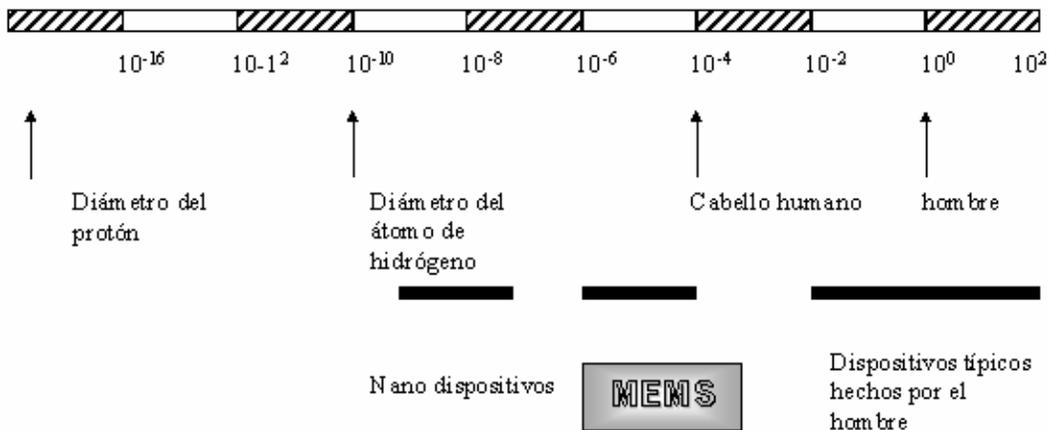


Figura1.2 Escala de medición donde se aprecia la escala de los dispositivos MEMS.

Mientras la electrónica es fabricada usando secuencia de procesos de circuitos integrados (CI), los componentes micromecánicos son fabricados usando procesos de micromaquinado compatible que selecciona cada parte de la oblea de silicio o adhiriendo nuevas capas de estructura a los dispositivos mecánicos y electromecánicos.

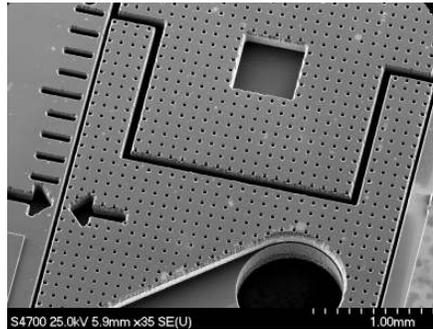


Figura 1.3 Dispositivo MEMS

Los MEMS prometen revolucionar cada producto para poder unir varios de ellos con tecnología de micromaquinado, haciendo posible la realización de sistemas completos en un solo chip. Así mismo, MEMS es una tecnología capaz de permitir el desarrollo de productos inteligentes, aumentando la habilidad computacional de la microelectrónica con la percepción y capacidades de control de microsensores y microactuadores y expandiendo el espacio para posibles aplicaciones y diseños.

Los circuitos de microelectrónica pueden ser imaginados como “el cerebro del sistema” y los MEMS aumentan las capacidades mediante “ojos y manos” que permiten sentir y controlar el ambiente de microsistemas.

Los sensores reúnen información del ambiente a través de mediciones mecánicas, térmicas, biológicas, químicas, ópticas y fenómenos magnéticos. La electrónica entonces, procesa la información derivada de los sensores y a través de algunas decisiones capacitan directamente a los actuadores para responder por movimiento, posicionamiento, regulación, bombeando y filtrando, por ello controlan el ambiente de algún resultado propuesto o deseado.

Debido a que los MEMS son manufacturados usando técnicas similares a los que usan los circuitos integrados, tales como niveles de funcionalidad, fiabilidad y sofisticación pueden ser puestos sobre un chip pequeño de silicio a un costo relativamente bajo.

En E.U.A la tecnología es conocida como microsistemas electromecánicos (MEMS); en Europa es llamada tecnología de microsistemas (MST) [3], sin embargo una característica común es que son dispositivos llamados miniatura. Existen muchas aplicaciones en donde esta tecnología es útil ya que es una metodología de todo en uno, puesto que:

- Es un conjunto de técnicas y procesos para diseñar y crear sistemas miniatura.
- Es un producto físico frecuentemente especializado y único para una final aplicación
- Los MEMS son un medio para realizar cosas, mediante un control de parámetros físicos a microescala los cuales causan efectos a gran escala.

Los productos MEMS poseen un número de características que los distinguen, son sistemas miniatura fijos o incrustados que envuelven uno o muchos componentes micromáquina o estructuras, además pueden brindarnos beneficios directamente ocasionando bajo costo o bien indirectamente bajando los costos debido al recorte de servicios y mantenimiento.

Verdaderos microsistemas pueden existir en pocos años, pero su desarrollo y evolución depende del éxito de los componentes de hoy en día. Construir microsistemas es una tecnología en evolución. En los últimos 30 años se ha aprendido como construir componentes micromáquina, sin embargo, solo recientemente se ha empezado a aprender sobre la integración de los microsistemas completos

Algunos ejemplos de las aplicaciones presentes y futuras de los MEMS se muestran en la tabla 1.1 [3].

APLICACIONES COMERCIALES
Sensores biomédicos
Instrumentos biomédicos analíticos miniatura
Telecomunicaciones por fibra óptica, componentes e interruptores
Procesamiento de señales electromecánicas
Sistemas miniatura cardiacos como los catéteres
Seguridad automovilística

Tabla 1.1 Campos de aplicación de los MEMS

1.2 ¿Qué es una micromáquina?

Una micromáquina es el diseño y fabricación de herramientas que sean máquinas y formen estructuras y elementos a una buena escala bajo los límites de nuestra perspectiva de facultades humanas, la micro escala [3], y están capacitados para operar sistemas complejos. Su potencial para la penetración en el futuro es en un amplio rango de aplicaciones soportado por fuertes actividades desarrolladas por muchas compañías e instituciones.

1.3 Procesos de Fabricación MEMS

Uno de los aspectos más importantes a considerar en la tecnología MEMS es el micromaquinado que ha sido un factor clave para el progreso de los MEMS ya que describe las técnicas de precisión para construir pequeñas estructuras [4, 5].

El micromaquinado sobre silicio se basa en el modelado de partes microscópicas mecánicas sobre el sustrato de silicio, comprende dos tecnologías, el micromaquinado de volumen en el cual las estructuras son grabadas en el sustrato de silicio, y el micromaquinado de superficie en el cual las capas microelectromecánicas son formadas por medio de capas y películas depositadas en una superficie.

1.3.1 Micromaquinado en volumen

La técnica de micromaquinado en volumen fue desarrollada en los sesentas y es usado para realizar estructuras micromecánicas dentro del volumen de una oblea monocristalina de silicio removiendo selectivamente ('grabar o atacar') el material de la oblea [5]. Las microestructuras fabricadas utilizando micromaquinado en volumen pueden cubrir el rango de espesor desde los submicrometros a todo el espesor de la oblea (200 a 500 μm) y el rango de tamaño lateral desde los submicrometros a las dimensiones totales laterales de una oblea completa.

Además el micromaquinado de volumen permite la eliminación selectiva de cantidades significativas de silicio de un sustrato para formar membranas en un lado de la oblea, una variedad de zanjas, hoyos, o de otras estructuras, como se observa en la Figura 1.4

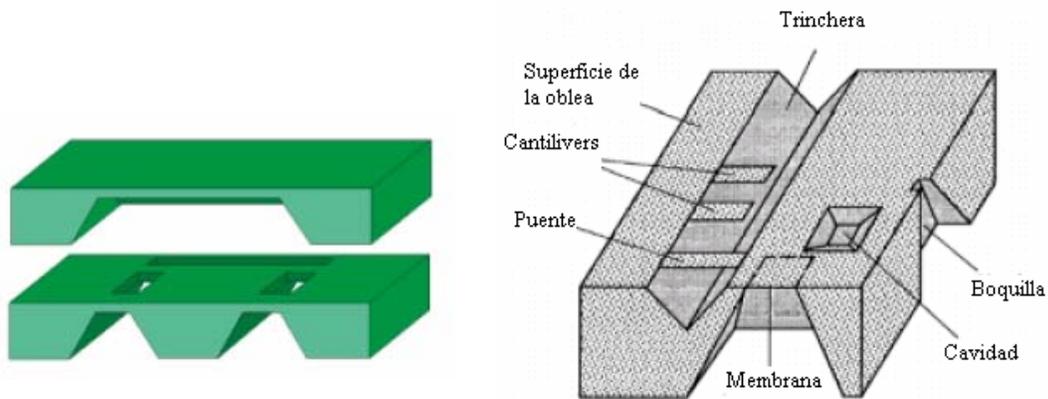


Figura 1.4. Diversas estructuras de micromaquinado en volumen

1.3.2 Micromaquinado en superficie.

El micromaquinado en superficie es un proceso aditivo que combina los depósitos de capas delgadas estructurales y de sacrificio, donde las capas de sacrificio son subsecuentemente removidas para formar estructuras levantadas que pueden incluir engranes, cantilivers y membranas [4].

El micromaquinado de superficie se basa en encerrar las partes estructurales específicas de un dispositivo en capas de un material de sacrificio durante el proceso de fabricación. El material de sacrificio entonces se disuelve en un atacante químico que no ataca las partes estructurales. En el micromaquinado de superficie, la oblea del sustrato se utiliza principalmente como un apoyo mecánico, alternado varias capas del material estructural y de sacrificio, que son depositadas y modeladas para realizar estructuras micromecánicas. El micromaquinado de superficie permite la fabricación de estructuras integradas micromecánicas complejas, con multicomponentes, que serían imposibles realizar con el micromaquinado tradicional de volumen.

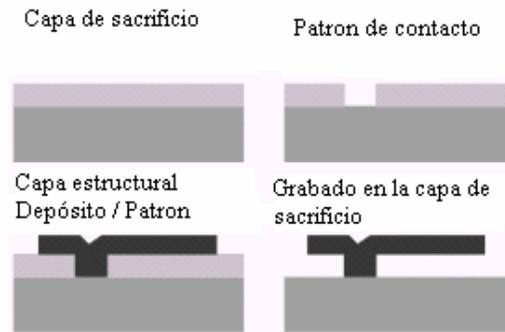


Figura 1.5 Pasos de un proceso típico de micromaquinado de superficie

Un proceso típico de micromaquinado en superficie, se muestra en la figura 1.6 donde se presenta un microsensar fabricado en micromaquinado en superficie utilizando una sola capa estructural de polisilicio.

Comienza con la deposición de una capa de sacrificio, la cual es grabada para crear aberturas al sustrato fundamental. Posteriormente, la capa estructural se deposita y se moldea en la geometría deseada. Finalmente, los componentes estructurales son liberados por la eliminación del material fundamental y el circundante material de sacrificio. Los componentes estructurales son conectados al sustrato fundamental en las regiones de anclaje.

El micromaquinado de superficie es una tecnología versátil por las siguientes razones:

- El micromaquinado de superficie permite utilizar las estructuras integradas de varios niveles que utilicen múltiples capas de material estructural y de sacrificio.
- No hay una restricción expresa en el sistema del material estructural - sacrificio, solo hay que considerar la compatibilidad entre los materiales estructurales y de sacrificio. Por lo tanto, diferentes capas estructurales de aplicación específica se pueden utilizar en conjunto con las convenientes capas de sacrificio.

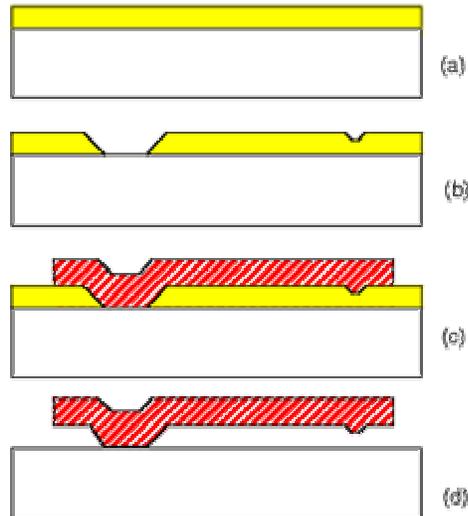


Figura 1.6 Demostración esquemática en corte seccional del micromaquinado en superficie (a) Deposición de la capa de sacrificio. (b) Definición de las regiones de anclaje y contacto. (c) modelado de la capa estructural, y (d) microestructura libre después de remover la capa de sacrificio.

Sin embargo, existen las limitaciones del proceso debidas a la tasa de deposición lenta de películas en los métodos tradicionales tales como CVD, sputtering y evaporación.

Las dimensiones de estas estructuras micromaquinadas pueden ser de varias magnitudes más pequeñas que las estructuras de volumen. La principal ventaja de las estructuras fabricadas sobre micromaquinado de superficie es su fácil integración con los componentes de circuitos integrados.

El micromaquinado de superficie requiere un conjunto compatible de materiales estructurales, materiales para sacrificio y grabados químicos. Los materiales estructurales deben poseer propiedades físicas y químicas que sean convenientes para las aplicaciones deseadas. Además deben tener propiedades mecánicas satisfactorias como por ejemplo alto rendimiento. Los materiales de sacrificio deben tener buenas propiedades mecánicas para evitar una falla del dispositivo durante la fabricación. Estas propiedades incluyen por ejemplo buena adhesión y baja tensión residual para eliminar fallas del dispositivo por fractura. Los grabados para remover los materiales de sacrificio deben tener una excelente selectividad de grabado. Además los atacantes deben tener una viscosidad apropiada y una tensión superficial característica.

1.3.3 Proceso LIGA.

El término LIGA es un acrónimo de la nomenclatura alemana *Lithographie Galvanoformung Abformung*. Se trata de una técnica de obtención de microestructuras a partir de moldes creados mediante litografía de rayos X [7].

Fue desarrollado a finales de los años 70 como método alternativo de producción de dispositivos con ranuras muy pequeñas y obtención de estructuras con alturas muy grandes.

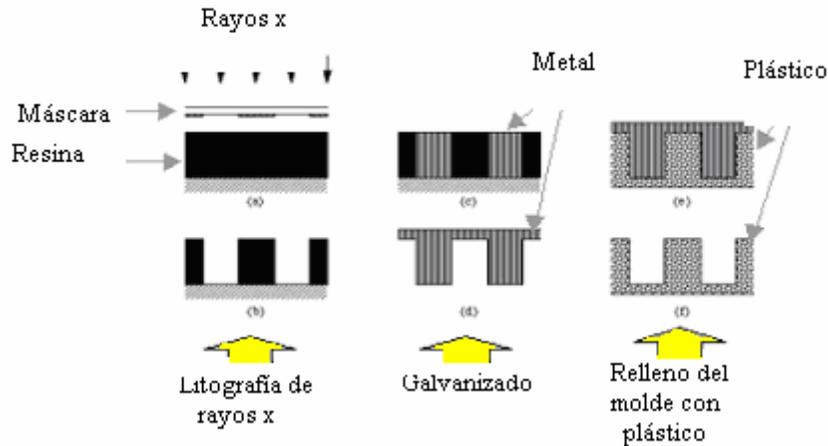


Figura 1.7 Proceso LIGA

Las microestructuras obtenidas en polímeros tras la litografía de rayos X, son usadas como molde de deposiciones de distintos metales (Ni, Cu, Au o distintos tipos de aleación). Una vez realizado el molde metálico, éste puede utilizarse para replicar la pieza en plástico o para crear nuevos moldes que permitan replicar la pieza en metales o cerámicas, con un costo muy bajo.

El uso del proceso LIGA tiene las siguientes ventajas: mayor resolución lateral, ausencia de efectos difractivos e inmunidad a las partículas de polvo. Sin embargo, presenta la desventaja del alto costo de inversión inicial requerido para la implantación de un sistema LIGA, al ser necesaria una fuente de rayos X de elevada energía y altamente colimados, se requiere el uso de un sincrotrón. [1]

Además del costo de dicho sistema, unos 25 millones de dólares, deben preverse también sus costos de operación.

1.4 Técnicas de micromaquinado

Para cada uno de los procesos de micromaquinado existen diferentes técnicas que incluso son los procesos tradicionales que se usan para la fabricación de circuitos integrados (CI), los cuales son: deposición de películas delgadas, litografía, atacado y liberación de capas de sacrificio [8].

[1] **Radiación de sincrotrón.** Radiación electromagnética, cuya longitud de onda va desde el infrarrojo hasta los rayos X, que se produce cuando haces de electrones de alta energía se desvían de una línea recta, como ocurre en las cámaras de vacío anulares de los sincrotrones. Algunas propiedades de la radiación de sincrotrón la convierten en una valiosa herramienta para realizar estudios con rayos X de la disposición atómica en moléculas y cristales. La radiación está colimada naturalmente, es decir, las ondas del haz son casi paralelas y no se dispersan, como ocurre con las ondas procedentes de tubos de rayos X, por lo que no necesitan ser enfocadas. Esta radiación presenta una intensidad muy elevada, un espectro con amplio ancho de banda y con un contorno suave y homogéneo (al contrario que otras fuentes, que presentan picos o líneas de emisión a determinadas frecuencias), una alta polarización y una dimensión de haz reducida

1.4.1 Deposición.

La deposición es un proceso clave, en donde se depositan películas delgadas de material (asumiendo que una película delgada tiene un grosor de entre unos pocos nanómetros a cerca de 100 micrómetros) para su subsecuente atacado local, usando los procesos de litografía y atacado [9].

La tecnología de deposición en MEMS se clasifica en dos grupos:

Deposiciones que resultan de reacciones químicas:

- Deposición química por vapor [*Chemical Vapor Deposition (CVD)*].
- Electrodeposición.
- Crecimiento epitaxial (*Epitaxy*).
- Oxidación térmica.

Estos procesos aprovechan la creación de materiales sólidos directamente de reacciones químicas en composiciones de gas y/o líquido o con el material del sustrato. El material sólido no es el único producto formado por la reacción. Los subproductos pueden incluir gases, líquidos e incluso otros sólidos.

Deposiciones que resultan de la reacción física:

- Deposición física de vapor [*Physical Vapor Deposition (PVD)*].
- Moldeado (*Casting*).

El material depositado es físicamente colocado sobre el sustrato (un subproducto químico no se crea). En otras palabras, no se lleva a cabo una reacción química la cual forma el material sobre el sustrato. A continuación veremos cada una de las tecnologías de forma independientemente:

Deposiciones que resultan de reacciones químicas

Deposición química por vapor [*Chemical Vapor Deposition (CVD)*].

En este proceso, el sustrato se coloca dentro de un reactor en el cual varios gases se suministran. El principio fundamental del proceso es que una reacción química tiene lugar entre los gases suministrados. El producto de esa reacción es un material sólido que se condensa en toda la superficie dentro del reactor.

Las dos tecnologías CVD más importantes en MEMS son la deposición química de vapor a baja presión (LPCVD) y deposición química de vapor por aumento de plasma (PECVD). El proceso LPCVD produce capas con una uniformidad excelente de espesor y las

características del material. Los problemas principales con el proceso son la alta temperatura de deposición (mayor de 600° C) y la tasa relativamente lenta de deposición.

El proceso PECVD puede operar en temperaturas más bajas (abajo de 300° C) gracias a la energía extra suministrada a las moléculas del gas por el plasma ^[2] en el reactor. Sin embargo, la calidad de las películas tiende a ser inferior que en procesos que corren a mayores temperaturas. Un diagrama esquemático de un reactor típico de LPCVD se muestra en la figura 1.8.

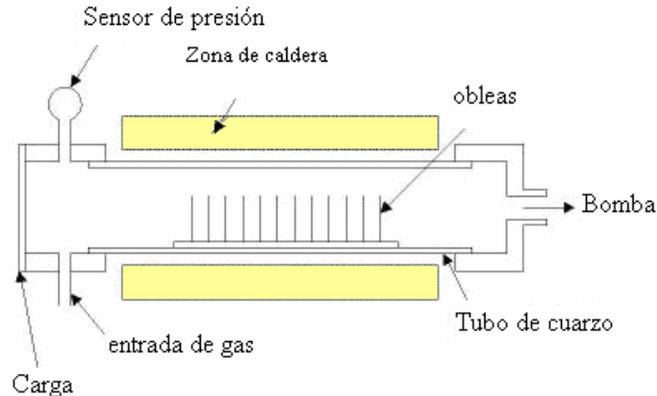


Figura 1.8 Reactor típico de pared caliente para LPCVD

¿Cuándo es conveniente utilizar CVD?

Los procesos CVD son ideales para usarse cuando se quiere una película delgada. Una variedad de materiales puede ser depositada con esta tecnología, sin embargo, algunos de ellos son menos populares a causa de subproductos peligrosos formados durante el proceso. La calidad del material varía de proceso a proceso, sin embargo una buena regla empírica es que un proceso de alta temperatura brinda un material con alta calidad y pocos defectos.

Electrodeposición.

Este proceso también es conocido como "electroplateado o galvanizado" (electroplating) y es típicamente restringido a materiales eléctricamente conductivos. Hay básicamente dos tecnologías para platear: electroplateado y plateado sin electricidad (plating electroless).

En el proceso de electroplateado el sustrato se coloca en una solución líquida (electrolito). Cuando un potencial eléctrico se aplica entre un área conductora en el sustrato y un electrodo contrario (generalmente platino) en el líquido, un proceso químico Redox sucede

[2] **Plasma.** Estado de la materia, generalmente gaseoso, en el que algunos o todos los átomos o moléculas están disociados en forma de iones. Los plasmas están constituidos por una mezcla de partículas neutras, iones positivos (átomos o moléculas que han perdido uno o más electrones) y electrones negativos.

teniendo como resultado la formación de una capa de material en el sustrato y generalmente alguna generación de gas en el electrodo contrario.

En el proceso de plateado sin electricidad (plating electroless) se utiliza una solución química más compleja, en la cuál la deposición sucede espontáneamente en cualquier superficie, la cual forma un potencial electroquímico suficientemente alto con la solución. Este proceso es útil cuando no se requiere ningún potencial eléctrico externo y contacto al sustrato durante el proceso. Desgraciadamente, es más difícil de controlar el espesor y la uniformidad del material depositado. Un diagrama esquemático de un arreglo típico para galvanizar se muestra en la figura 1.9.

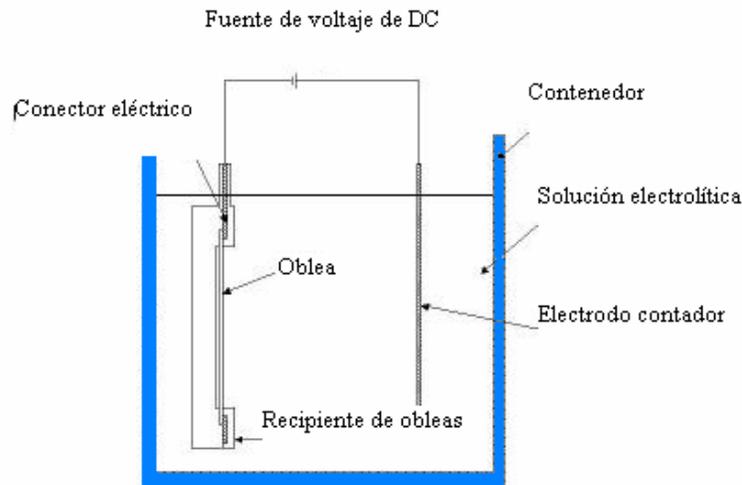


Figura 1.9 Arreglo típico para electrodeposición.

¿Cuándo es conveniente utilizar electrodeposición?

El proceso de electrodeposición conviene usarse para hacer películas delgadas de metales tales como cobre, oro y níquel. Las películas se pueden hacer en cualquier espesor desde $1\mu\text{m}$ a $> 100\mu\text{m}$. La deposición se controla mejor cuando se usa con un potencial eléctrico externo, sin embargo, requiere un contacto eléctrico al sustrato cuando es sumergido en el baño líquido. En cualquier proceso, la superficie del sustrato debe tener un revestimiento eléctricamente conductor antes que la deposición se realice.

Crecimiento epitaxial.

Esta tecnología es muy similar a los procesos CVD, sin embargo, si el sustrato es un cristal semiconductor ordenado (por ejemplo silicio o arsenuro de galio), es posible que con este proceso se siga construyendo en el sustrato con la misma orientación cristalográfica del

sustrato. Si una superficie del sustrato amorfa / policristalina se utiliza, la película será también amorfa o policristalina.

Hay varias tecnologías para crear las condiciones necesarias dentro de un reactor para realizar el crecimiento epitaxial, de las cuales la más importante es el crecimiento epitaxial en fase de Vapor [Vapor Phase Epitaxy (VPE)]. En este proceso, varios gases se introducen en un reactor calentado por inducción donde sólo el sustrato se calienta. La temperatura del sustrato debe ser típicamente, por lo menos 50% del punto de fusión del material a ser depositado.

Una ventaja de la epitaxia es la alta tasa de crecimiento del material, que permite la formación de películas con un espesor considerable ($>100\mu\text{m}$), además es una tecnología extensamente utilizada para producir silicio en sustratos de aislante (SOI) [3]. La tecnología se utiliza principalmente para la deposición de silicio. Un diagrama esquemático de un reactor típico para el crecimiento epitaxial en fase de vapor se muestra en la figura 1.10.

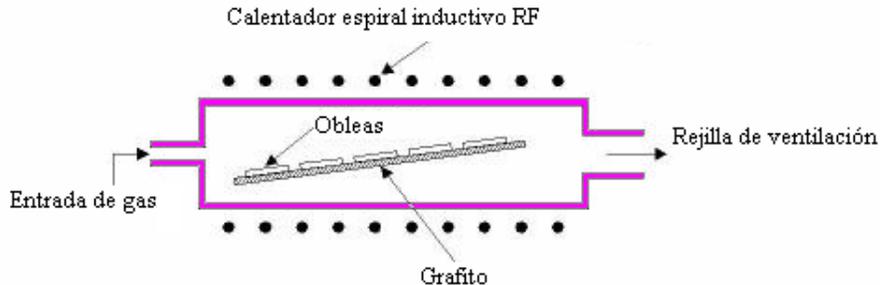


Figura 1.10 Reactor típico de paredes frías para el crecimiento epitaxial en fase de vapor.

¿Cuándo es conveniente utilizar crecimiento epitaxial?

Es una tecnología que ha sido y continúa siendo un proceso emergente en MEMS. El proceso se puede utilizar para formar películas de silicio con espesores de $1\mu\text{m}$ a $>100\mu\text{m}$. Algunos procesos requieren la exposición a altas temperaturas del sustrato, mientras otros no requieren un calentamiento significativo. Algunos procesos pueden incluso ser usados para realizar deposición selectiva, dependiendo de la superficie del sustrato.

[3] **SOI. (Silicio sobre aislante).** Es un sustrato que hace referencia a una capa delgada de silicio sobre un aislante como el óxido de silicio o el vidrio (de aquí el nombre de silicio sobre aislante). Es un material que funciona como aislante entre la base de silicio del chip y la próxima capa del dispositivo donde se ubican los transistores. Los transistores SOI actuales se fabrican sobre una fina capa de silicio puro que se asienta sobre un sustrato de óxido aislante. La capa aislante se encarga de que la corriente eléctrica fluya sólo a través de la fina capa de silicio, y que no hay pérdidas a través del material que forma la oblea en sí.

Oxidación térmica

Es una de las tecnologías de deposición básicas. Es simplemente la oxidación de la superficie del sustrato en una atmósfera rica en oxígeno. La temperatura es incrementada a $800^{\circ}\text{C} - 1100^{\circ}\text{C}$ para acelerar el proceso. También es la única tecnología de deposición la cual consume parte del sustrato mientras avanza. Cuando el espesor de la capa oxidada se incrementa, la difusión^[4] de oxígeno al sustrato llega a ser más difícil, llevando a una relación parabólica entre el grosor de la película y el tiempo de oxidación para películas más gruesas que 100nm. Este proceso es limitado naturalmente a materiales que pueden ser oxidados, y sólo pueden formar películas que son óxidos de este material. Este es el proceso clásico usado para formar dióxido de silicio en un sustrato de silicio. Un diagrama esquemático de un horno típico para la oxidación de una oblea se muestra en la figura 1.11.

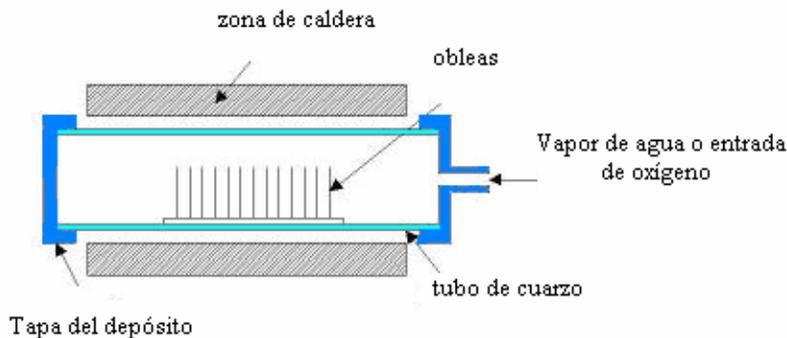


Figura 1.11 Horno típico para la oxidación de la oblea.

¿Cuándo es conveniente utilizar oxidación térmica?

Este proceso se recomienda utilizar siempre que se pueda ya que es sencillo, sin embargo solo produce películas con uso limitado en componentes MEMS. Se utiliza típicamente para formar películas que se utilizan para aislamiento eléctrico.

Deposiciones que resultan de las reacciones físicas.

Deposición física por vapor [*Physical Vapor Deposition (PVD)*].

PVD cubre varias tecnologías de deposición en las que el material se libera de una fuente y es transferida al sustrato. Las dos tecnologías más importantes son la evaporación y sputtering.

[4] **Difusión** Flujo de energía o materia desde una zona de mayor concentración a otra de menor concentración, tendente a producir una distribución homogénea.

¿Cuándo es conveniente utilizar PVD?

PVD comprende las tecnologías estándar para la deposición de metales, es mucho más común que CVD para metales ya que se puede realizar con un riesgo más bajo del proceso y más barato con respecto al costo de materiales. Sin embargo, la calidad de las películas es inferior a CVD, lo cual hace que los metales tengan mayor resistividad y los aislantes más defectos.

La elección del método de deposición (por ejemplo evaporación vs. sputtering) puede ser arbitrario en muchos casos, y depende más en qué tecnología está disponible para el material específico.

Evaporación.

En la evaporación el sustrato se coloca dentro de una cámara al vacío, en el que un bloque (fuente) del material a ser depositado está también localizado. El material fuente o de referencia se calienta al punto donde empieza a hervir y evaporarse. El vacío es requerido para permitirle a las moléculas evaporarse libremente en la cámara, y subsecuentemente condensarse en todas las superficies. Este principio es el mismo para todas las tecnologías de evaporación, sólo el método utilizado para el calentamiento (evaporación) del material de referencia difiere. Hay dos tecnologías populares de evaporación, que son la evaporación por rayo-e y la evaporación resistiva, cada una refiriéndose al método de calentamiento. En la evaporación rayo-e, un rayo de electrones se apunta al material de referencia que causa el calentamiento y la evaporación local. En la evaporación resistiva, un barco de tungsteno, que contiene el material de referencia, se calienta eléctricamente con una corriente alta para hacer que el material se evapore. Muchos materiales son restrictivos en términos de qué método de evaporación puede ser utilizado (por ejemplo: el aluminio es bastante difícil de evaporar utilizando el calentamiento resistivo). Un diagrama esquemático de un sistema típico para la evaporación por rayo-e se muestra en la figura 1.12.

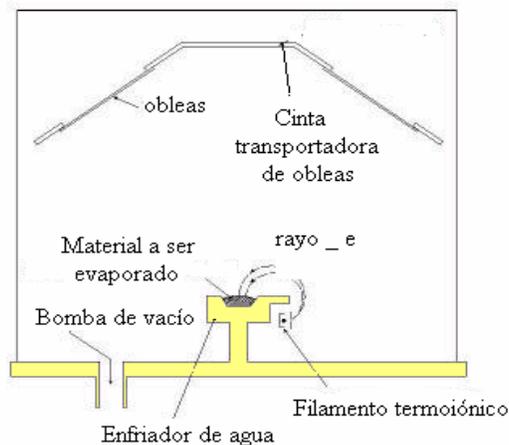


Figura 1.12 Sistema típico de evaporación por rayo_e

Sputtering

Sputtering es una tecnología en la que el material se libera de la fuente en una temperatura mucho mas baja que la de evaporación. El sustrato se coloca en una cámara al vacío con el material de referencia, llamado objetivo, y un gas inerte ^[5] (tal como argón) es introducido a baja presión. Un gas de plasma se ataca utilizando una fuente de poder de RF, causando que el gas se ionice. Los iones se aceleran hacia la superficie del objetivo, causando que átomos del material de referencia se desprendan del objetivo en forma de vapor y se condensen en todas las superficies inclusive en el sustrato. Un diagrama esquemático de un típico sistema sputtering RF se muestra en la figura 1.13

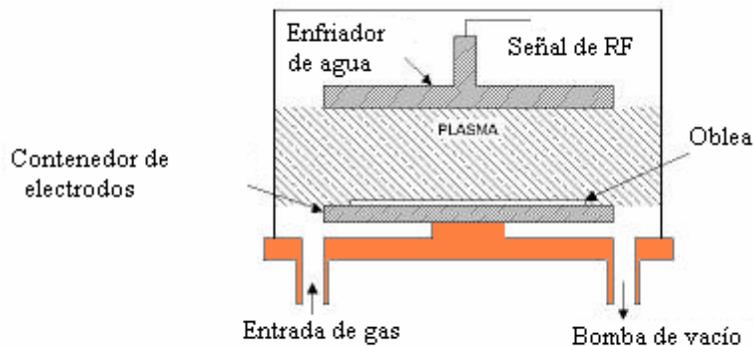


Figura 1.13 Sistema típico sputtering RF

Moldeado

En este proceso el material a ser depositado se disuelve en forma líquida en un solvente. El material puede ser aplicado al sustrato rociándolo o girándolo. Una vez que el solvente es evaporado, una película delgada del material se queda en el sustrato. Esto es especialmente útil para los materiales polímeros ^[6], los cuales se pueden disolver fácilmente en solventes orgánicos, y es el método más común para aplicar fotoresist a sustratos (en la fotolitografía). Los espesores que se pueden moldear en el rango del sustrato recorren todo el camino de una sola capa de moléculas (la adhesión) a decenas de micrómetros. En los últimos años, la tecnología de moldeado se ha aplicado también para formar películas de

[5] **Gas inerte.** Sustancia gaseosa que no reacciona químicamente con otra. Un primer grupo de gases inertes está formado por los gases nobles, los cuales no experimentan ninguna reacción química con ninguna otra sustancia, salvo los más pesados, y sólo en circunstancias muy especiales. Un segundo grupo de gases inertes corresponden a aquellos que, como el nitrógeno o el anhídrido carbónico, sí son susceptibles de reaccionar químicamente, pero no lo hacen en las condiciones en las que tiene lugar determinado proceso. Por ejemplo, el nitrógeno es un gas inerte respecto a la respiración, pero en otras

[6] **Polímeros.** Proviene de las palabras griegas Poly y Mers, que significa muchas partes, son grandes moléculas o macromoléculas formadas por la unión de muchas pequeñas moléculas

materiales de vidrio en sustratos. El proceso de moldeo por giro se ilustra en la figura 1.14

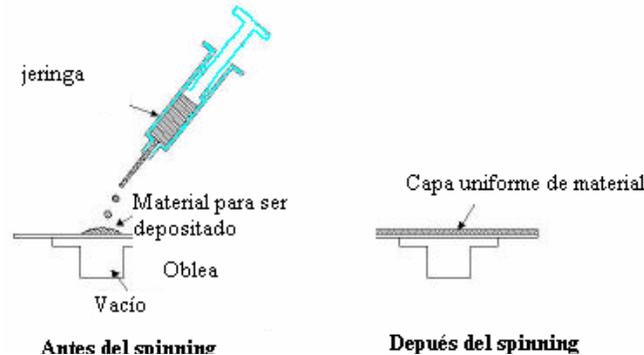


Figura 1.14 El proceso de moldeo por giro usado para colocar el fotoresist en la fotolitografía.

¿Cuándo es conveniente utilizar moldeo?

Moldeo es una tecnología sencilla que se puede utilizar para una variedad de materiales (en su mayor parte polímeros). El control sobre el espesor de la película depende de las condiciones de exactitud, pero se puede mantener dentro de $\pm 10\%$ en una gran variedad de casos. Si se planea utilizar la fotolitografía se estará utilizando el moldeo, que es una parte esencial de esa tecnología.

1.4.2 Atacado

Para formar una estructura funcional en MEMS en un sustrato es necesario atacar las películas delgadas previamente depositadas y/o el sustrato en sí mismo [10]. En general, hay dos clases de procesos de atacado:

Atacado húmedo: El material se disuelve cuando es sumergido en una solución química.
Atacado en seco: El material es dispersado o disuelto usando iones reactivos o una atacante en fase de vapor.

A continuación, se hablará brevemente de las tecnologías más populares para el atacado húmedo y en seco.

Atacado Húmedo

Esta es la tecnología más sencilla de atacado. Todo lo que requiere es un contenedor con una solución líquida que disolverá el material en cuestión. Desgraciadamente, existen complicaciones ya que generalmente se usa una máscara para atacar selectivamente el

material por lo que se debe encontrar una máscara que no se disuelva o por lo menos que el atacado sea más lento que en el material a ser modelado. En segundo lugar, algunos materiales monocristalinos, tal como silicio, exhiben un atacado anisotrópico en ciertas sustancias químicas. El atacado anisotrópico en contraste con el atacado isotrópico significa tener diferentes tasas de atacado en diferentes direcciones en el material, un ejemplo clásico es el plano de pared del cristal $\langle 111 \rangle$ que aparece cuando atacamos un hoyo en una oblea $\langle 100 \rangle$ de silicio en un químico tal como hidróxido de potasio (KOH). El resultado es un hoyo en forma de pirámide en vez de un hoyo con paredes redondeadas con un atacante isotrópico. El principio de atacado anisotrópico e isotrópico húmedo se ilustra en la figura 1.15

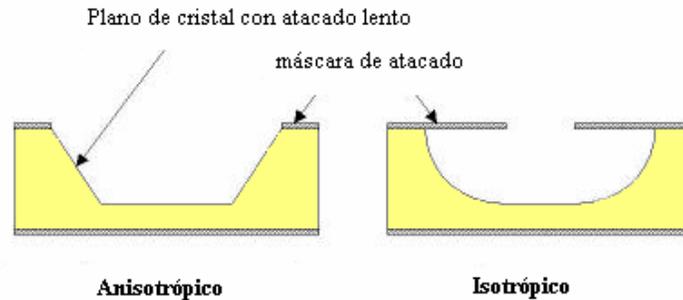


Figura 1.15 Diferencia entre el atacado húmedo isotrópico y el anisotrópico.

¿Cuándo es conveniente utilizar el atacado húmedo?

Esta es una tecnología sencilla, que dará buenos resultados si se logra encontrar la combinación entre el atacante y el material de la máscara conveniente para cada aplicación. El atacado húmedo trabaja muy bien para atacar películas delgadas en sustratos, y se puede utilizar también para atacar el mismo sustrato. Los procesos anisotrópicos permiten que el atacado pare en ciertos planos cristalinos del sustrato, pero resulta en una pérdida de espacio, ya que estos planos no pueden ser verticales a la superficie en los hoyos atacados o cavidades. Si esto es una limitante para ciertas aplicaciones, se debe considerar utilizar el atacado en seco en su lugar, sin embargo, se debe tener presente que el costo por oblea será 1-2 veces mayores para realizarlo.

Atacado en seco.

La tecnología de atacado en seco se puede dividir en tres clases distintas llamadas atacado con ion reactivo (*reactive ion etching* (RIE)), atacado por sputtering, y atacado en fase de vapor.

En el RIE, el sustrato se coloca dentro de un reactor en el que varios gases se introducen. Un plasma ataca la mezcla de gas usando una fuente de poder de RF, rompiendo las moléculas de gas en iones. Los iones se aceleran, y reaccionan en la superficie del material

a ser atacado, formando otro material gaseoso. Esto es conocido como la parte química de atacado con ion reactivo.

Hay también una parte física que es semejante en naturaleza al proceso de deposición sputtering. Si los iones tienen energía suficientemente alta, pueden golpear átomos hacia afuera del material a ser atacado sin una reacción química. Es una tarea muy compleja para desarrollar los procesos de atacado en seco que balanceen el atacado químico y físico, ya que hay muchos parámetros por ajustar. Cambiando el balance es posible influir en la anisotropía del atacado, ya que la parte química es isotrópica y la parte física altamente anisotrópica, la combinación puede formar paredes laterales que tiene formas desde redondeadas a verticales. Un esquema de un sistema típico reactivo de atacado con ion reactivo es mostrado en la figura 1.16.

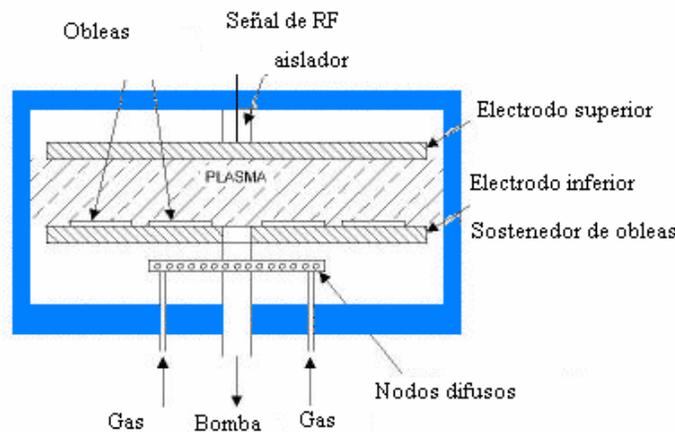


Figura 1.16 Típico sistema de atacado de ion reactivo de platos paralelos.

Una subclase especial de RIE que continúa creciendo rápidamente en popularidad es el atacado profundo por ion reactivo (DRIE). En este proceso, las profundidades de atacado de cientos de micras se pueden lograr con casi paredes verticales. La tecnología básica se basa en el proceso llamado "Proceso Bosch", debido a que la compañía alemana Robert Bosch adquirió la patente original, donde dos composiciones diferentes de gas se alternan en el reactor. La primera composición del gas crea un polímero en la superficie del sustrato, y la segunda composición de gas ataca el sustrato. El polímero inmediatamente pasa por el proceso de "sputtering" pero sólo en las superficies horizontales y no en las paredes laterales.

Debido a que el polímero se disuelve muy lentamente en la parte química del atacado, éste se acumula en las paredes laterales y las protege del atacado. El proceso se puede utilizar fácilmente para atacar completamente un sustrato de silicio, y atacar las tasas que son de 3-4 veces mayores que el atacado húmedo.

El atacado sputtering es esencialmente RIE pero sin iones reactivos, los sistemas utilizados son semejantes en principio a los sistemas de deposición sputtering, sin embargo, la gran

diferencia es que el sustrato es sujeto al bombardeo de ion en vez del material objetivo utilizado en la deposición sputtering.

¿Cuándo es conveniente usar el atacado seco?

La primera cosa que hay que tener presente sobre esta tecnología es que es más costosa comparada con el atacado húmedo.

Si se está interesado en características de resolución en estructuras de películas delgadas o se necesitan paredes laterales para atacado profundo en el sustrato, se debe considerar atacado seco. Sin embargo, si se está interesado en el precio del proceso y dispositivos se debe minimizar el uso de este tipo de atacado.

1.4.3 Litografía

Patrón de transferencia

La litografía en el contexto de MEMS es típicamente la transferencia de un patrón a un material fotosensible por la exposición selectiva de una fuente de radiación como la luz [11]. Un material fotosensible es un material que experimenta un cambio en sus propiedades físicas cuando es expuesto a una fuente de radiación. Cuando un material fotosensible es expuesto selectivamente a la radiación, el patrón de radiación sobre el material es transferido al material expuesto en donde las propiedades de las regiones expuestas y no expuestas difieren, como se observa en la figura 1.17.

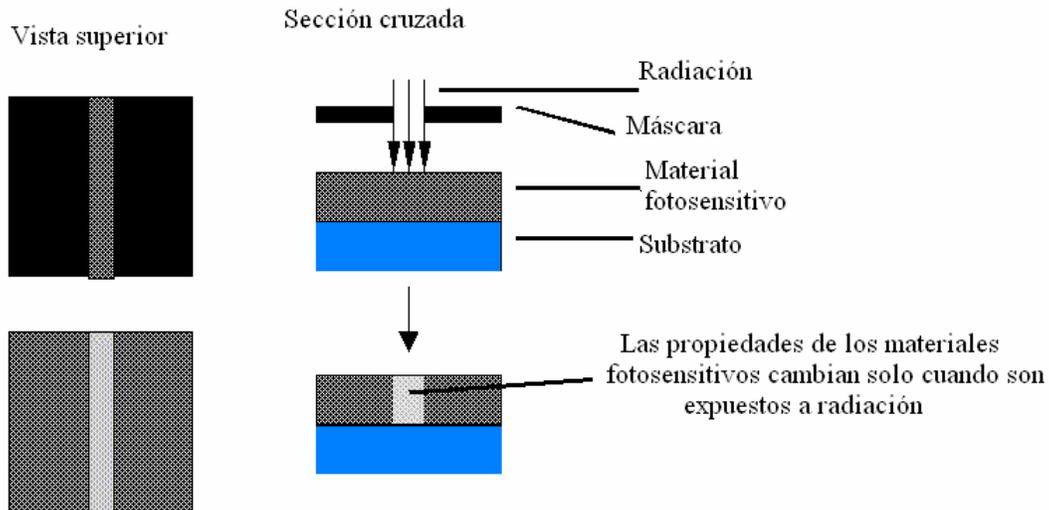


Figura 1.17 Transferencia de un patrón a un material fotosensible.

En la litografía para el micromaquinado, el material fotosensible utilizado es típicamente un fotore Resist (también llamado resist, otros polímeros fotosensibles se utilizan también). Cuando el fotore Resist es expuesto a una fuente de radiación de una específica longitud de onda, la resistencia química del fotore Resist en una solución reveladora cambia. Si el fotore Resist es colocado en una solución reveladora después de la exposición selectiva a una fuente de luz, la solución atacará una de las dos regiones (expuesta o no expuesta). Si el material expuesto es atacado por el revelador y la región no expuesta está completa, el material es considerado como un fotore Resist positivo (mostrado en la figura 1.18a). Si el material expuesto es fuerte al revelador y la región no expuesta es atacada, se considera como un fotore Resist negativo (mostrado en la figura 1.18b).

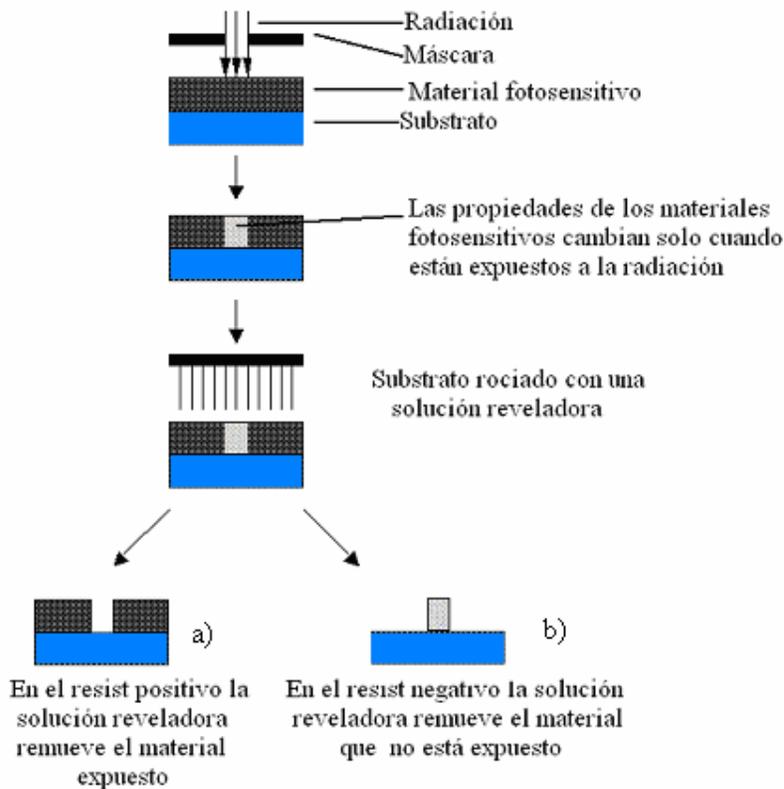


Figura 1.18 a) Definición del patrón en un fotore Resist positivo, b) Definición del patrón en un fotore Resist

La litografía es el principal mecanismo para la definición de patrones en el micromaquinado. Los compuestos fotosensibles son principalmente orgánicos, y no abarcan el espectro de propiedades de materiales de interés para micro-mecánicos. Sin embargo, como la técnica es capaz de producir características finas en un aspecto económico, una capa fotosensible a menudo se utiliza como una máscara temporal cuando se ataca una capa fundamental, tal que el patrón pueda ser transferido a la capa fundamental (mostrado en la figura 1.19 a). El fotore Resist se puede utilizar también como una plantilla

para modelar el material depositado después de la litografía (mostrado en la figura 1.19b). El fotoresist es subsecuentemente atacado, y el material depositado en el fotoresist pasa por el proceso de lift off^[7].

El enfoque de la plantilla (de despegue) de deposición para transferir un patrón del fotoresist a otra capa es menos común que usar el patrón del fotoresist como una máscara de atacado. La razón de esto es que el fotoresist es incompatible con la mayoría de los procesos de deposición de MEMS, generalmente porque no puede resistir altas temperaturas y puede actuar como una fuente de contaminación.

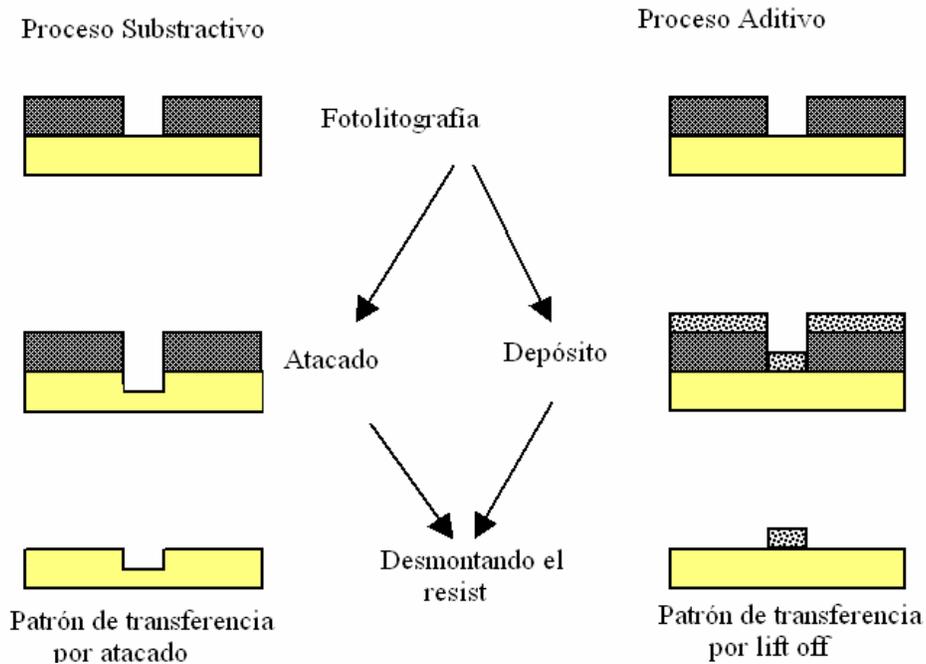


Figura 1.19 a) Transferencia del patrón de un patrón de fotoresist a una capa fundamental por atacado, b) Transferencia del patrón de un patrón de fotoresist a una capa superior por despegue.

Una vez que el patrón ha sido transferido a otra capa, el fotoresist es generalmente removido, esto es necesario a menudo cuando el fotoresist es incompatible con pasos adicionales del micromaquinado. Esto también hace a la topografía un proceso más dramático, que puede estorbar los pasos adicionales de litografía.

[7] **Liftoff.** Proceso utilizado 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 fotoresistivo 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 en donde se requiere depositar. Finalmente se remueve el material fotoresistivo junto con el metal de las regiones donde no se desea.

Alineación

Para hacer dispositivos útiles, los patrones que sean necesarios para los pasos diferentes de litografía pertenecientes a una sola estructura se deben alinear. El primer patrón transferido a una oblea generalmente incluye un conjunto de marcas de alineación, que son las características de alta precisión que se utilizan como referencia al posicionar los patrones siguientes al primer patrón (como se muestra en la figura 1.20). A menudo, las marcas de alineación se incluyen en otros patrones, cuando las marcas originales de alineación se puedan destruir mientras el proceso avanza. Es importante que cada marca de alineación en la oblea sea etiquetada para poder identificarla, y para cada patrón para especificar la marca de alineación (y la ubicación del mismo) para que éste se deba alinear. Proporcionando la ubicación de la marca de alineación es fácil para el operador localizar la característica correcta en un tiempo corto. Cabe señalar que cada capa de patrón debe tener una característica de alineación para que pueda ser registrado con el resto de las capas.

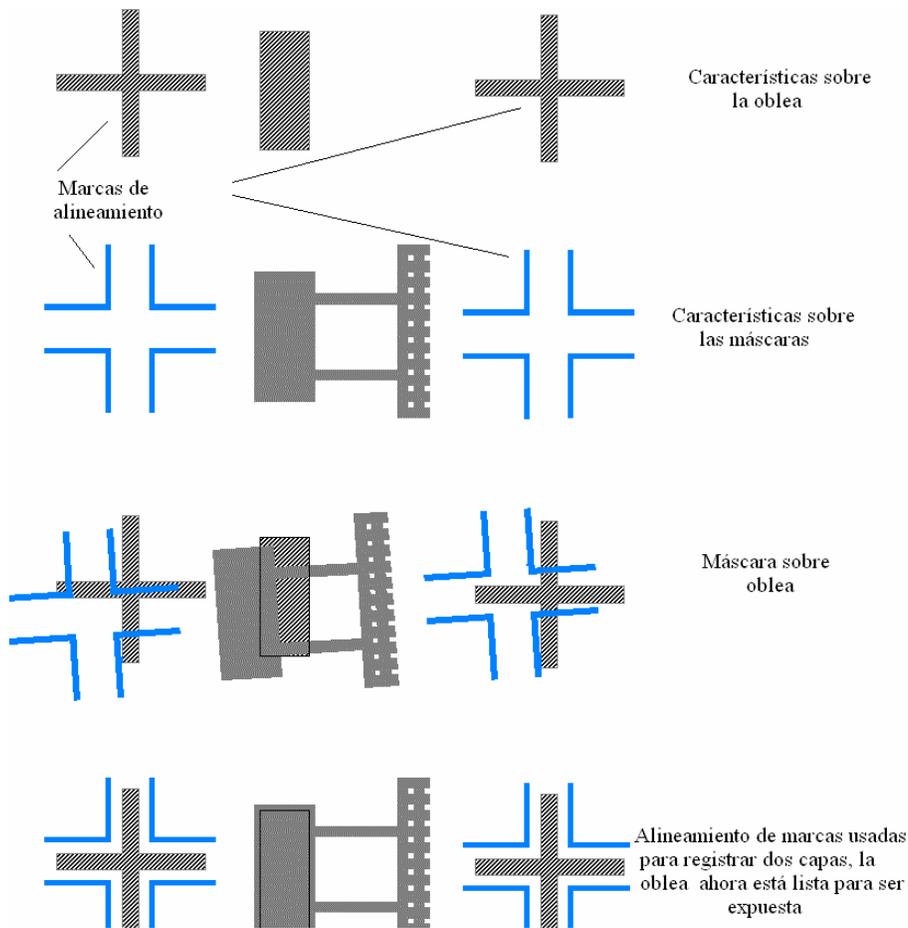


Figura 1.20 Uso de las marcas de alineación para registrar las capas siguientes.

Dependiendo del equipo litográfico utilizado, la característica en la máscara utilizada para la matrícula de la máscara puede ser transferida a la oblea (como se muestra en la figura 1.21). En este caso, puede ser importante localizar las marcas de alineación para que no afecten el proceso siguiente de la oblea ni el desarrollo del dispositivo. Por ejemplo, la marca de alineación mostrada en la figura 1.22 dejará de existir después de que la oblea sea atacada por DRIE. El patrón de transferencia de las características de alineación de la máscara a la oblea puede desaparecer las características de alineación en la oblea. En este caso las marcas de la alineación se deben diseñar para aminorar este efecto, o debe haber alternamente múltiples copias de las marcas de alineación en la oblea, para que existan marcas de alineación que queden para otras máscaras para ser registradas.

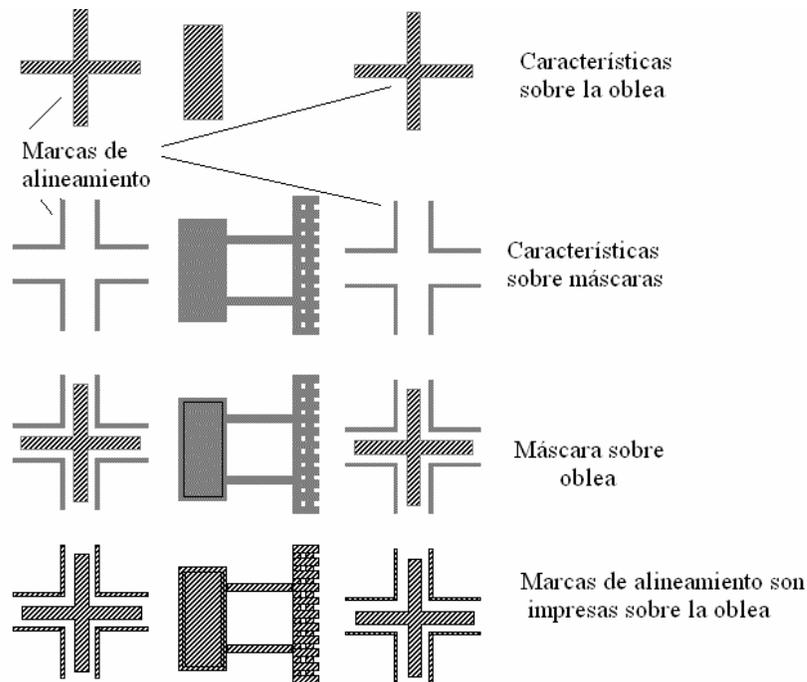


Figura 1.21 Transferencia de la característica de registro del a máscara al sustrato durante la litografía.

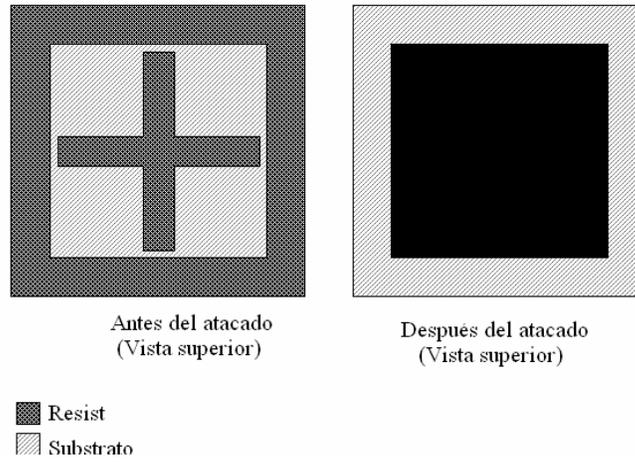


Figura 1.22 Pobre diseño de la marca de alineación para un DRIE cuando es atacada la oblea (marca de cruz se libera y es perdida)

Las marcas de alineación no necesariamente pueden localizarse arbitrariamente en la oblea, pues el equipo usado para realizar la alineación puede estar limitado a viajar y por lo tanto sólo es capaz de alinear características localizadas dentro de una cierta región en la oblea (como el mostrado en la figura 1.23). La geometría de la región de ubicación y el tamaño pueden variar también con el tipo de alineación, así que el equipo litográfico y el tipo de alineación a ser utilizados deben ser considerados antes de localizar las marcas de alineación. Típicamente dos marcas de alineación se utilizan para alinear la máscara y la oblea, una marca de alineación es suficiente para alinear la máscara y la oblea en X y Y, pero requiere dos marcas (preferiblemente lejanamente espaciadas) para corregir la desviación de offset en la rotación.

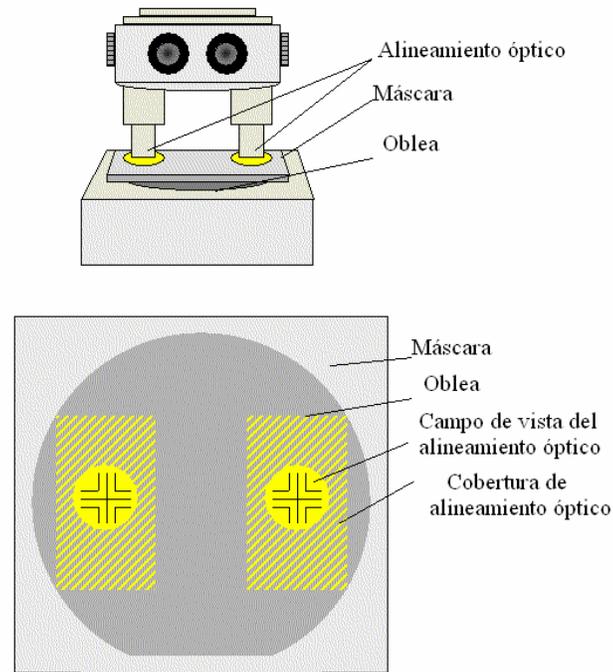


Figura 1.23 Restricción de la localización de las marcas de alineación basadas en el equipo usado.

Cuando no hay patrón en la oblea en el primer patrón para alinear, el primer patrón es alineado típicamente al plano primario de la oblea (como se muestra en la figura 1.24). Dependiendo del equipo litográfico utilizado, esto se puede hacer automáticamente, o por la alineación manual a una característica explícita de registro de la oblea en la máscara.

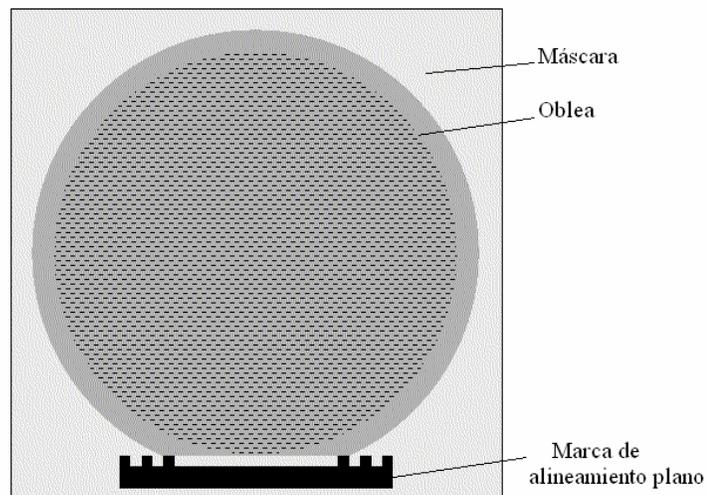


Figura 1.24 Alineamiento de la máscara por el plano de la oblea.

Exposición

Los parámetros de exposición requeridos para lograr la transferencia exacta del patrón desde la máscara a la capa fotosensible dependen principalmente de la longitud de onda de la fuente de radiación y de la dosis requerida para lograr el cambio deseado de las propiedades del fotoresist. Diferentes fotoresists exhiben diferentes sensibilidades a diferentes longitudes de onda. La dosis requerida por unidad de volumen de fotoresist para lograr un buen patrón de transferencia es algo constante, sin embargo, la física del proceso de exposición puede afectar la dosis realmente recibida. Por ejemplo una capa sumamente reflectora bajo el fotoresist puede tener como resultado que el material experimente una dosis más alta si la capa fundamental fuera absorbente, ya que el fotoresist se expone tanto a la radiación incidente así como a la radiación reflejada, además la dosis variará también con el espesor del fotoresist. Hay también efectos de patrones de interferencia en películas gruesas de fotoresist en sustratos reflectores, que pueden afectar la calidad del patrón de transferencia y las propiedades de la pared lateral.

En las esquinas del patrón, la luz es dispersada y difractada, como si una imagen se sobreexpusiera, por lo que la dosis recibida por el fotoresist en la esquina que no se debía exponer puede llegar a ser significativa. Si utilizamos fotoresist positivo, esto tendrá como resultado la imagen de fotoresist siendo erosionada alrededor de las esquinas, teniendo como resultado una disminución en el tamaño de la característica y una pérdida del afilado de los rincones (como se muestra en la figura 1.25). Si utilizamos un fotoresist negativo, la imagen del fotoresist se dilata, causando características más grandes que las deseadas, otra vez acompañado de una pérdida del afilado de los rincones. Si una imagen se subexpone severamente, todo el patrón no se puede transferir, y en casos menores los resultados serán semejantes a los de la exposición excesiva con los resultados invertidos para las diferentes polaridades de fotoresist.

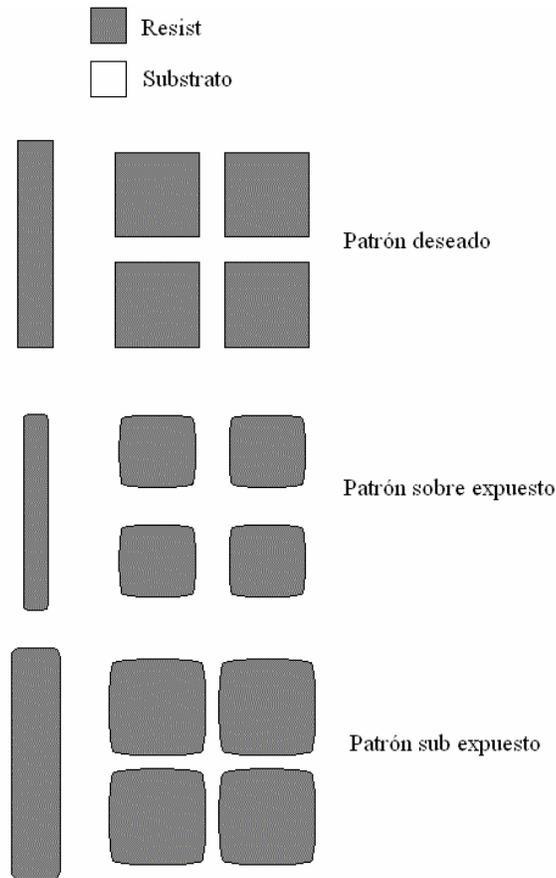


Figura 1.25 Sobre y sub.-exposición de un fotoresist positivo.

Si la superficie a ser expuesta no es plana, la imagen de alta resolución de la máscara en la oblea puede ser retorcida por la pérdida de foco de la imagen a través de la topografía que varía.

El modulo litográfico

Típicamente la litografía se realiza como parte de un módulo bien caracterizado, que incluye la preparación de la superficie de la oblea, deposición del fotoresist, alineación de la máscara y la oblea, la exposición, desarrollo y acondicionamiento apropiado del fotoresist. Los pasos del proceso de litografía necesitan ser caracterizados como una secuencia para asegurar que el fotoresist que se queda al final de los módulos es una imagen óptima de la máscara, y tiene el perfil deseado de pared lateral.

Los pasos básicos encontrados en un módulo litográfico son: deshidratación en el horno, HMDS principal, vuelta / rocío del fotoresist, horneado suave, alineación, exposición, exposición del horno, desarrollo y horneado fuerte. No todos los módulos litográficos

contienen todos los pasos del proceso. Una explicación breve de los pasos del proceso se incluye a continuación:

- 1 Deshidratación en el horno.- Se deshidrata la oblea para ayudar al fotoresist a la adhesión.
- 2 HDMS principal.- Revistiendo la superficie de la oblea con un promotor de adhesión. No necesariamente para todas las superficies.
- 3 Vuelta / rocío del fotoresist.- Revistiendo a la oblea con fotoresist por giro o rocío. Típicamente deseando una capa uniforme.
- 4 Horneado suave.- Se repele parte del solvente en el fotoresist, puede tener como resultado una pérdida significativa de masa del fotoresist (y el espesor). Hace al fotoresist más viscoso.
- 5 Alineación.- Se alinea el patrón en la máscara para caracterizar las obleas.
- 6 La exposición.- La proyección de la imagen de la máscara en el fotoresist para causar el cambio químico selectivo de las propiedades.
- 7 La exposición del horno – Se hornea el fotoresist para quitar el contenido del solvente adicional. Hace al fotoresist más resistente a los atacantes.
- 8 Desarrollo – Es la eliminación selectiva del fotoresist después de la exposición (el fotoresist expuesto si el fotoresist es positivo). Generalmente un proceso húmedo (aunque los procesos en seco existen).
- 9 Horneado duro - Se aleja la mayor parte del solvente restante para formar el fotoresist.
- 10 Limpieza. Se remueve una pequeña capa de suciedad del fotoresist que podría bloquear regiones abiertas en el patrón, ayuda a abrir esquinas.

Asumiendo que un módulo bien caracterizado existe: se prepara la superficie de la oblea, se deposita el grosor del fotoresist, se alinea perfectamente la máscara, se expone la oblea con una dosificación óptima, se desarrolla el fotoresist bajo condiciones óptimas, y se hornea el fotoresist en un tiempo y ubicación apropiados. Desafortunadamente, incluso si el módulo es ejecutado perfectamente, las propiedades de la fotolitografía son muy dependientes de la topografía, por eso es necesario que el diseñador esté conciente de ciertas limitaciones de la litografía, así como de la información que se tenga sobre el desarrollo técnico de ésta.

El diseñador influye en el proceso litográfico a través de la selección de los materiales, topografía y geometría. El material o materiales sobre el cual el fotoresist es depositado es tan importante como la adhesión del fotoresist.

La reflectividad y aspereza de la capa debajo del fotoresist determina la cantidad de luz reflejada y dispersada presente durante la exposición. Es difícil obtener que un buen fotoresist uniforme cubra una superficie con alta topografía, la cual complica la exposición y desarrollo. También se debe tener presente que el fotoresist tiene diferentes grosores en diferentes ubicaciones. Si la superficie de una oblea tiene características muy diferentes de

altura, la profundidad limitada del foco de la mayoría de las herramientas de exposición litográfica será un problema, como se muestra en la figura 1.26.

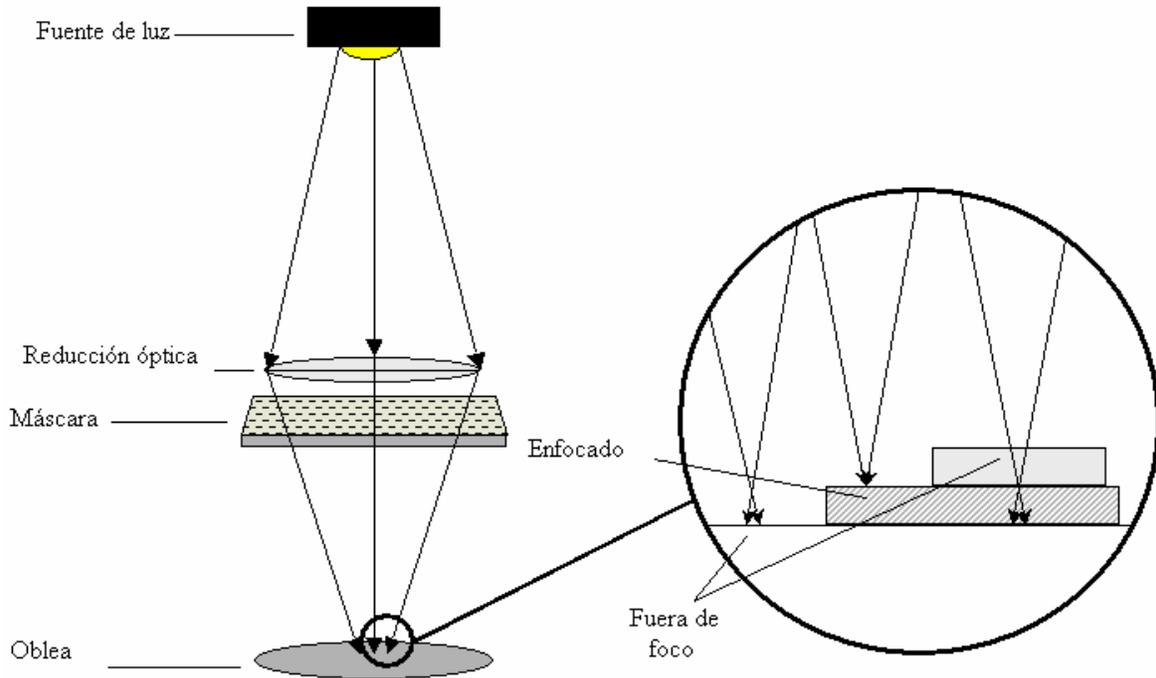


Figura 1.26 Topología de superficie y enfoque en la litografía

Un diseñador deberá mantener todas estas limitaciones en mente y diseñar acorde a ellas.

1.5 Fabricación de CI.

Cualquier discusión de MEMS requiere primero una comprensión básica de la tecnología de fabricación de los CI. Los principales pasos en esta tecnología incluyen el crecimiento de película del material, dopaje, litografía, atacado, cortado de cuadros o en chips, y empaquetado. Los dispositivos se fabrican generalmente en sustratos de silicio, los cuales son crecidos, se cortan en obleas, y se pulen. Las películas delgadas de material crecen en estos sustratos y son utilizadas para construir los componentes activos, pasivos, y las interconexiones entre circuitos. Estas películas incluyen: silicio epitaxial, SiO_2 , nitruro de silicio (Si_3N_4), silicio policristalino (polisilicio) y películas de metal. Para modificar las propiedades eléctricas o mecánicas, las películas son dopadas con impurezas por difusión térmica de implantación de iones. La litografía se utiliza para transferir un patrón de una máscara a una película por vía de una sustancia química fotosensible llamado fotoresist. La película entonces es grabada por el atacado selectivamente, dejando el patrón deseado en la película. Este ciclo es repetido hasta que la fabricación es completada. Las obleas entonces son probadas para observar su rendimiento, cortadas en chips, y empaquetadas como dispositivos finales. Debido a que existe un mercado para obleas de silicio de alta calidad y

económicas, a la mayoría de los fabricantes de MEMS se les facilita enfocarse en el crecimiento de películas delgadas, dopaje, litografía, y en los procesos de atacado [4].

1.6 Métodos de Actuación

Cuando se trata de diseñar un dispositivo a escala miniatura, es importante pensar en el tipo de actuación que se utilizará puesto que se refiere al acto de efectuar o transmitir movimiento mecánico, fuerza y trabajo por un dispositivo o sistema a su alrededor en respuesta a la aplicación de un voltaje o corriente de alimentación.

La elección del tipo de actuación depende de la naturaleza de la aplicación, la facilidad de integración con el proceso de fabricación, y de la justificación económica. A continuación se explican los métodos de actuación electrostática, piezoeléctrica y térmica [12, 13].

1.6.1 Actuación Electrostática

La actuación electrostática se basa en la fuerza de atracción entre dos platos o elementos portando cargas opuestas. Proponiendo que las cargas en dos objetos que se les aplica un potencial externo entre ellos, solo pueden ser de polaridades opuestas, un voltaje aplicado, a pesar de su polaridad, siempre resulta en una fuerza electrostática atractiva.

El interruptor MEMS se diseña como se muestra en la figura 1.27 y 1.28 como el típico plato paralelo, pero debido a la fuerza electrostática el interruptor se abre o se cierra por esta misma atracción, físicamente lo que sucede lo podemos representar con un desarrollo matemático que se verá más a detalle en el capítulo 3 el cual describe la energía que está almacenada en el plato paralelo y que hace que éste se deflecte.

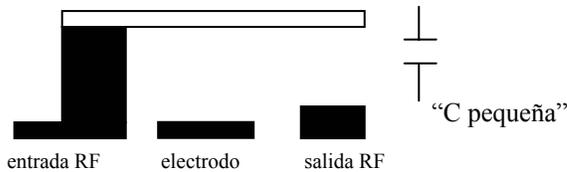


Figura 1.27 Microinterruptor abierto

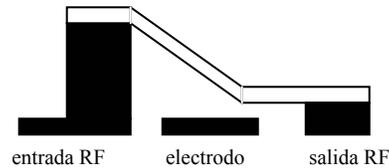


Figura 1.28 Microinterruptor cerrado

1.6.2 Actuación Piezoeléctrica

La actuación piezoeléctrica puede proveer grandes fuerzas, especialmente si son usadas películas piezoeléctricas gruesas. Comercialmente están disponibles cilindros de material piezocerámico que pueden proveer unos cuantos Newtons de fuerza con potenciales aplicados en el orden de unos pocos cientos de Volts. Sin embargo, actuadores piezoeléctricos de películas delgadas ($<5 \mu\text{m}$) pueden solo proveer unos pocos miliNewtons.

Ambos métodos piezoeléctrico y electrostático ofrecen la ventaja de un consumo de potencia bajo ya que la corriente eléctrica es muy pequeña.

1.6.3 Actuación Térmica.

La actuación térmica consume más potencia que la actuación electrostática o la piezoeléctrica, pero puede proveer, fuerzas de actuación en el orden de cientos de miliNewtons o mayores. Existen tres métodos de actuación térmica en el ámbito de los MEMS. La primera toma en cuenta la diferencia de los coeficientes de expansión térmica entre dos capas unidas de materiales distintos para causar dobleces con la temperatura. El caso clásico de un termostato bimetalico estudiado por S. Timoshenko en 1925 [14], en donde una capa se expande más que la otra conforme la temperatura crece. Esto resulta en tensiones en la interfase y consecuentemente en la curvatura del conjunto. El incremento de la curvatura depende en la diferencia de los coeficientes de expansión térmica y la temperatura absoluta. Desafortunadamente, la última dependencia limita severamente el rango de temperatura de operación, por otra parte, el dispositivo puede actuar prematuramente en un día caluroso.

En el otro enfoque conocido como actuación termoneumática, un líquido es calentado dentro de una cavidad sellada. La presión debida a la expansión o la evaporación ejerce una fuerza en las paredes de la cavidad, la cual puede doblar un objeto, por ejemplo un cantilever. Este método también depende de la temperatura absoluta del actuador.

Un tercer método distinto utiliza una viga suspendida de un mismo material homogéneo con un extremo anclado a una estructura de soporte del mismo material [15]. Calentando la viga a una temperatura arriba que la de la estructura, causa una diferencia de elongación del extremo libre de la viga, con respecto a la estructura. Manteniendo este extremo libre estacionario se produce un incremento en una fuerza proporcional a la longitud de la viga y la diferencia de temperatura. Como un actuador entrega una fuerza máxima con un desplazamiento de cero, y en cambio, ninguna fuerza cuando el desplazamiento es máximo. Los diseños que operan entre estos dos extremos pueden proveer fuerzas y desplazamientos. Un sistema de enlaces mecánicos puede optimizar la salida del actuador intercambiando la fuerza por el desplazamiento, o viceversa. La actuación en este caso es independiente de las fluctuaciones en la temperatura ambiente porque este depende de la diferencia en temperatura entre la viga y la estructura de soporte

1.7 Propiedades de los materiales para la fabricación de MEMS

Uno de los puntos que se deben considerar para la fabricación de MEMS es el tipo de materiales que se utilizan [16].

Los MEMS son fabricados con multitud de materiales, cada uno de los cuales presenta características únicas de confiabilidad. Además, los diferentes materiales tienen diferentes respuestas a la falla de mecanismos los cuales necesitan ser bien comprendidos para conocer la confiabilidad del dispositivo fabricado.

Es necesario conocer de manera general los materiales usados en la fabricación de MEMS y proveer una lista de sus propiedades con la finalidad de comprender el porqué de su uso.

Uno de los grandes debates dentro de la comunidad de los MEMS se ha enfocado sobre si se usa una película delgada del material o bien propiedades de volumen en el desarrollo del análisis estructural. El problema con el trato de muchos de estos materiales como materiales

de volumen es que, cuando las muestras llegan a ser tan pequeñas como lo son los MEMS, los defectos en el cristal ya no son tan pequeños en comparación al tamaño de la estructura a ser analizada.

A medida que pruebas son desarrolladas sobre muestras macroscópicas, se nota que estas propiedades no están a una adecuada escala para ser usadas en MEMS, sin embargo son frecuentemente usadas por falta de mejores cifras y las aproximaciones pueden ser hechas con datos disponibles. Enseguida se explicarán las propiedades más comunes de los materiales de volumen que son generalmente aceptadas. Para capas delgadas, la aplicación de estas propiedades está todavía un tanto en duda.

1.7.1 El silicio

Debido a que los MEMS son fabricados en obleas de silicio no podía faltar un análisis sobre las características de este elemento, por lo que a continuación se mencionarán las ventajas y desventajas de su uso.

Ventajas:

- El silicio es un metaloide el cual tiene propiedades intermedias entre los metales y los no metales.
- Las propiedades eléctricas del silicio tienen la ventaja que es sensible a presión, temperatura, campos magnéticos y radiación, la cual es una característica que ha sido tomada como ventaja en un número de sensores de estado sólido.
- Es uno de los metaloides más económicos dentro de la industria.
- Tiene ventajas tanto eléctricas como mecánicas.
- Es un material muy estudiado y documentado.
- Es material primordial para la construcción de todo tipo de componentes como son: electrónicos, mecánicos, térmicos, ópticos, entre otras aplicaciones.
- Es un buen conductor de calor (cien veces mas que el cristal)
- Tiene buena interacción con procesos químicos, biológicos, mecánicos, etc.
- Es abundante en la tierra.

Desventajas:

- El silicio tiene más baja movilidad de electrones que algunos otros semiconductores comunes, los cuales impiden la operación en alta frecuencia. Mientras ésta es una preocupación para diseñadores digitales, esto es poco importante para diseñadores MEMS, como relativamente hay pocas aplicaciones que necesitan estructuras mecánicas para correr a una frecuencia límite del silicio.
- No es buen conductor óptico
- Posibles complicaciones en procesos biológicos con el ADN en aplicaciones médicas
- Deformaciones en temperaturas muy elevadas, etc.

Enseguida se mencionan algunas características del silicio en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	SILICIO
Fuerza de cedencia (GPa)	7
Modulo de young (GPa)	160
Razón de Poisson	0.22
Densidad (g/cm ³)	2.4
Conductividad térmica (W/ cm. K)	1.57
Coefficiente de expansión térmica (10 ⁶ /K)	2.6

Tabla 1.2 Características del Silicón

Además, la apropiada visualización de los planos cristalográficos es una llave para entender la dependencia de las propiedades del material sobre la orientación del cristal y los efectos de las soluciones atacantes en los planos. El silicio tiene una estructura del cristal parecida a la del diamante que puede ser referida como un simple cubo. En otras palabras, la unidad primitiva – el bloque más pequeño que se repite – de un enrejado del cristal se asemeja a un cubo. Los tres principales ejes de coordenadas de un cubo son llamados los “ejes principales”. Las direcciones específicas y planos dentro del cristal son designados en referencia a los ejes principales usando los “índices de Miller” [3], una notación especial que incluye tres enteros encerrados en llaves, corchetes, paréntesis y entre signos de intercalación. 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 <1 0 0> 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)

El álgebra de vectores puede mostrar 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 muchas soluciones acuosas alcalinas, tal como el hidróxido de potasio (KOH), atacan selectivamente los planos {1 0 0} y no los {1 1 1} del silicio [1] (ver Figura 1.29).

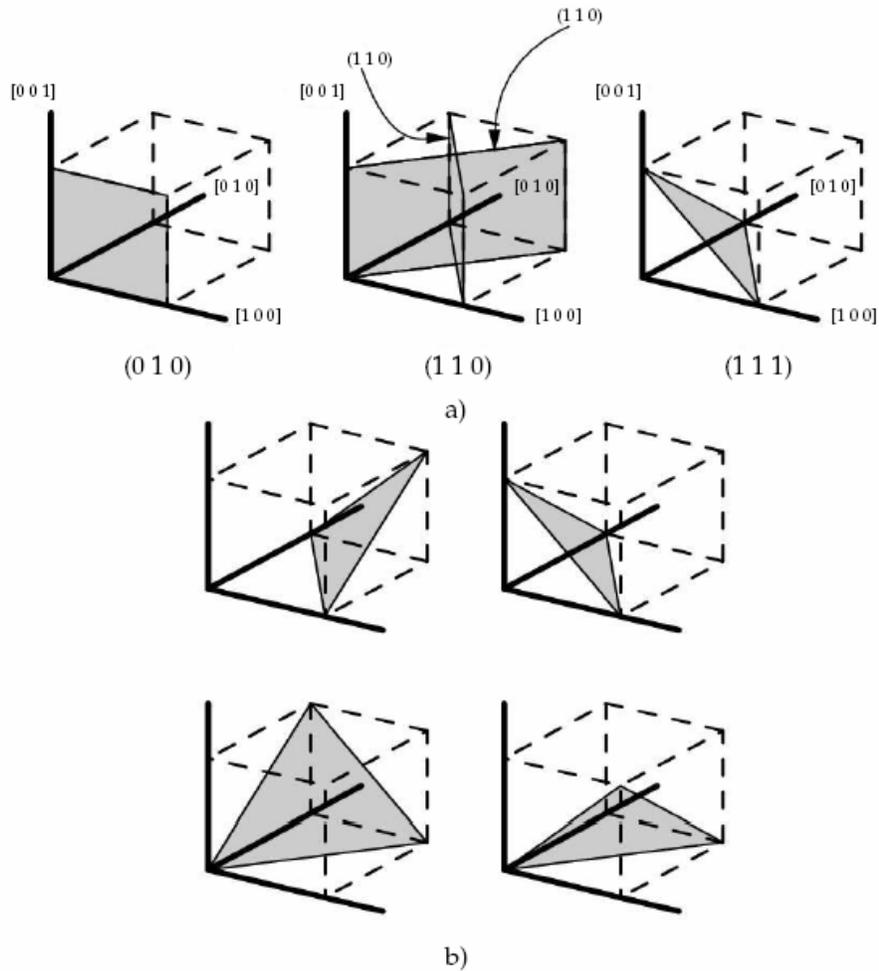


Figura 1.29. a) Tres planos cristalográficos y su notación en índices de Miller para un simple cristal cúbico. Se observan dos planos (1 0 0) equivalentes de la familia {1 1 0}. b) Cuatro de los ocho planos (1 1 1) equivalentes de la familia {1 1 1}.

Los fabricantes de materiales cortan obleas circulares de silicio delgadas de trozos más grandes a lo largo de planos específicos. El plano de corte – cara superior de la oblea – es conocido como la orientación del corte, y se identifica sobre la oblea en la forma de un plano primario y un secundario localizados en los lados de la oblea (figura 1.30). 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 de {1 0 0}, que es la orientación del corte preferida en la tecnología CMOS. Adicionalmente a la orientación del corte, el tipo de impurezas dopantes (*n* o *p*) y la resistividad eléctrica (sus unidades son $\Omega \cdot \text{cm}$) también son especificadas por el fabricante.

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

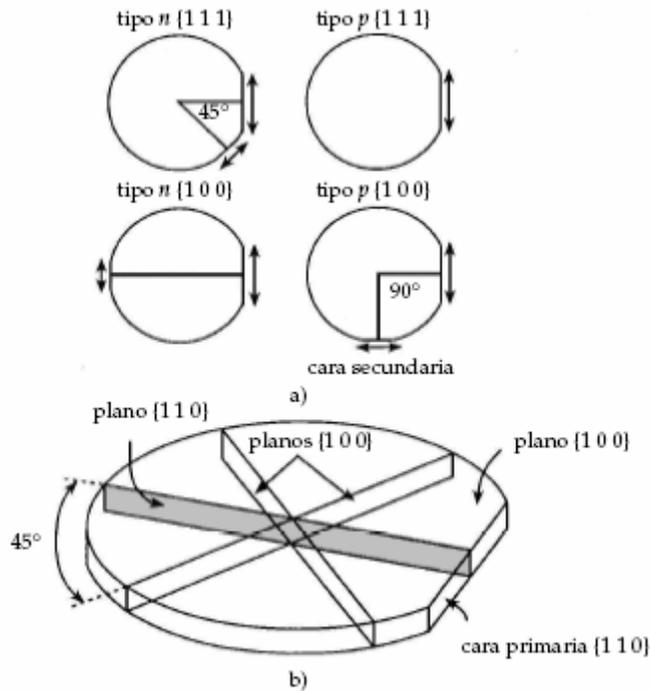


Figura 1.30 a) Ilustración que muestra las caras primarias y secundarias de las obleas {1 0 0} y {1 1 1}, para un dopado tipo n y p. b) Ilustración de los diferentes planos en una oblea con orientación {1 0 0}.

El silicio 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. Las propiedades mecánicas del silicio cristalino son en gran medida independientes del dopado de impurezas, pero la tensión tiende a aumentar cuando las concentraciones de dopado alcanzan niveles de ($\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) [3].

El polisilicio es un material importante en la industria de circuitos integrados y ha sido muy estudiado. El polisilicio también es un material 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 muchos otros dispositivos eléctricos con estructuras micromecánicas.

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 normalmente sufren de altos niveles de tensión intrínseca (cientos 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.

1.7.1.1 Silicio monocristalino.

El silicio es un material comúnmente usado en dispositivos semiconductores. En forma cristalina el silicio tiene estructura de diamante, la cual consiste en una cara cúbica centrada con una base de dos átomos, como se muestra en la figura siguiente:

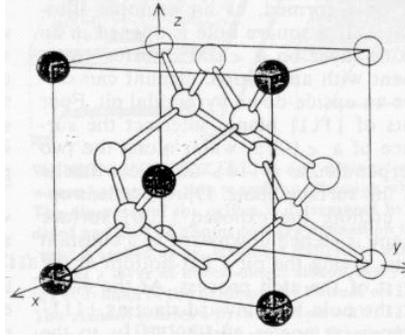


Figura 1.31 Estructura de cristal del silicio

La estructura atómica del silicio determina muchas de sus propiedades físicas, las cuales son listadas en la tabla siguiente:

PROPIEDAD	VALOR
Estructura del cristal	Diamante
Átomos / cm ³	5.0 x 10 ²²
Densidad	2.32 g/ cm ³
Punto de fusión	1412 °C
Calor específico	.7 J/g-°C
Modulo de Young <100>	130Gpa
E ₁₁	165.6 GPa
E ₁₂	63.98 GPa
E ₄₄	79.51 Gpa
Razón de Poisson, orientación <100>	0.28
Resistencia a la tensión	3790 MPa
Resistencia a la fractura	0.9 Mpa a m ⊥ .5
Conductividad térmica	1.5 W/ cm – °C
Coefficiente de expansión térmica	4.2 x 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Capacidad calorífica	20.07 (Jmol- K)
Campo de ruptura	~ 3 x 10 ⁵ V/ cm
Tipo n: π ₁₁	6.6 x 10 ⁻¹¹ Pa ⁻¹
π ₁₂	-1.1 x 10 ⁻¹¹ Pa ⁻¹
π ₄₄	138 x 10 ⁻¹¹ Pa ⁻¹
Tipo p π ₁₁	-102 x 10 ⁻¹¹ Pa ⁻¹
π ₁₂	53.4 x 10 ⁻¹¹ Pa ⁻¹
π ₄₄	-13.6 x 10 ⁻¹¹ Pa ⁻¹
Constante dieléctrica de DC	11.7
Constante dieléctrica a alta frecuencia	11.7
Resistividad	2.3 x 10 ⁵ Ω- cm
Hueco de energía	1.12 eV

Movilidad de electrones	1500 cm ² / V- s
Índice de refracción	3.42

Tabla 1.3 Propiedades del silicón de un solo cristal

Como sus similitudes atómicas al diamante se debería implicar, que el silicio de un solo cristal es una sustancia muy dura. Su fuerza mecánica excede a la del acero, sin embargo es más quebradizo. Esta fuerza hace que el silicio sea ideal para muchas estructuras MEMS, ya que tiene la fuerza de fractura más alta de cualquier material comúnmente usado en MEMS. Debido a que el proceso es bien controlado para el rendimiento de estructuras cristalinas altamente puras, el silicio tiene una calidad deseable y sus propiedades mecánicas son muy reproducibles. Por estas razones el silicio es frecuentemente usado para micro estructuras de alta calidad.

1.7.1. 2 Silicio Policristalino.

Para aplicaciones en donde se utiliza el micromaquinado de superficie en películas delgadas de silicio es necesario utilizar silicio policristalino o también llamado polisilicio [16] como material estructural debido a que es difícil el crecimiento de películas delgadas de silicio de un solo cristal, en su lugar se utilizan películas delgadas de silicio policristalino.



Figura 1.32. Polisilicio

Las propiedades mecánicas de las películas de polisilicio dependen enormemente del proceso de deposición mientras que sus características eléctricas dependen de su dopado. Como en el silicio de un solo cristal, un gran dopado resulta en baja resistividad [17]. Además el silicio policristalino es uno de los materiales mas estudiados en la industria ya que tiene varias ventajas para la fabricación de MEMS, así como para los circuitos electrónicos tales como:

- Interconectores de dispositivos
- Termopares
- Diodos
- Dispositivos y estructuras micro mecánicas

1.7.1.3 Nitruro de silicio

El nitruro de silicio es un material que es usado en una variedad de aplicaciones. Ya que no reacciona bien con muchas soluciones de atacado, el nitruro de silicio es frecuentemente usado para prevenir difusión de impurezas y contaminación iónica. Sus propiedades básicas son enlistadas en la tabla siguiente

PROPIEDAD	VALOR
Densidad	3.1
Punto de fusión	1900 °C
Modulo de Young	7.3 GPa
Fuerza de fractura	460 MPa
Coefficiente de expansión térmica	$3 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Conductividad térmica	0.28 W/ cm $^\circ\text{C}$
Resistividad	$10^{15} \text{ } \Omega\text{-cm}$
Constante dieléctrica	9.4
Campo de ruptura	$1 \times 10^7 \text{ V / cm}$
Índice de refracción	2.1

Tabla 1. 4 Propiedades espaciales de temperatura del nitruro de Silicio

Las películas de nitruro de silicio usadas en la mayoría de los dispositivos MEMS son amorfas y son ya sea esparcidas o depositadas por CVD.

Para mantener la integridad de las películas, ellas usualmente son crecidas en pocos cientos de nanómetros como espesor.

Para evitar esta limitación, películas de nitruro ricas en silicio frecuentemente son usadas.

La tensión de la película de nitruro de silicio puede ser controlada simplemente ajustando la temperatura de deposición.

Es mejor aislador térmico que el polisilicio, el cual puede ser importante para aislar superficies de estructuras micromaquinadas.

Además, su alta fuerza mecánica hace de éste una película ideal para fricción y barreras de polvo.

Una de las desafortunadas propiedades del nitruro de silicio es que no es un buen aislante como el dióxido de silicio.

1.7.2 Metales.

Los metales son usados en microsistemas electromecánicos como conductores eléctricos y ocasionalmente como material estructural, ejemplo de ellos son el oro y el cobre.

Capas delgadas de metal.

La elección de una delgada capa de metal depende grandemente de la naturaleza de la aplicación final. Capas delgadas de metal normalmente son depositadas ya sea por

sputtering, evaporación o por deposición química en fase vapor; oro, níquel y Permalloy™ (NixFey) también pueden ser electroplateados.

Para interconexiones básicas eléctricas, el aluminio es el más común y es relativamente fácil de depositar por sputtering, sin embargo su operación es limitada a ambientes no corrosivos y a temperaturas bajo 300 °C.

Oro, platino e iridio son buenas opciones para realizar microelectrodos en aplicaciones biológicas y químicas.

Cromo, titanio y la aleación titanio- tungsteno son frecuentemente usados como capas muy delgadas (10-100 nm) que se utilizan para adherir metales que tienen tendencia a desprenderse, tales como tungsteno, níquel, platino o paladio depositados por evaporación o sputtering.

1.7.2.1 Oro

El oro es una sustancia que va en incremento en el uso de los MEMS. No es tan común como el aluminio, sin embargo tiene muchas características similares con algunas ventajas más. Estas propiedades son citadas en la siguiente tabla:

PROPIEDAD	VALOR
Densidad	19.3 g / m ³
Punto de fusión	1063 °C
Calor específico	0.13 J/ g-°C
Módulo de Young	75 GPa
Razón de Poisson	.42
Conductividad térmica	3.15 W/ cm -°C
Coefficiente de expansión térmica	14.2 x 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Resistividad	2.44 x 10 ⁻⁶ Ω- cm

Tabla 1.5 Propiedades del oro

El oro no es un material conocido por sus fuertes propiedades mecánicas. Es suave, dúctil, y fácilmente puede ser deformado. Como resultado, no es usado como material estructural, en lugar de eso, estará como una capa en el tope de un material rígido o será usado en aplicaciones que no requieran movimiento mecánico.

El oro tiene problemas si se adhiere al SiO₂ pero tiene algunos métodos establecidos para evitarlo. Un método empleado es usar una capa intermedia de cromo como un adhesivo, ya que éste forma Cr₂O₃ con SiO₂ o bien se utilizan ataduras de oro.

Una de las principales aplicaciones del uso del oro en MEMS es debido a que es mejor conductor que el aluminio. En aplicaciones donde la alta conductividad es de suma importancia, el oro es el material frecuentemente escogido. Una de las propiedades atractivas del oro es que es un material inerte. Esto significa que su superficie no se oxida rápidamente en la atmósfera, lo cual lo ayuda a mantener su conductividad en aplicaciones atmosféricas.

1.7.2.2 Cobre.

Con la reciente integración del cobre dentro de los circuitos integrados, se ha considerado que pueda comenzar a integrarse en los MEMS. Ya que muchos diseñadores esperan en el futuro poner MEMS en los dispositivos del sistema, este es un parámetro de importancia en sistemas de baja potencia. El cobre tiene algunas propiedades únicas que hacen que valga la pena la integración del cobre a los MEMS, como se puede ver en la siguiente tabla:

PROPIEDAD	VALOR
Densidad	8.89 g / cm ³
Punto de fusión	1083 °C
Módulo de Young	115 GPa
Razón de Poisson	0.36
Conductividad térmica	3.98 W / cm · °C
Coefficiente de expansión térmica	16.6 x 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Resistividad	1.72 x 10 ⁻⁶ Ω · cm

Tabla 1.6 Propiedades del cobre

El cobre es un material ligeramente más fuerte que el aluminio puro pero no se adhiere muy bien al silicio, lo cual hace que se delimite su aplicación.

El cobre es un excelente conductor térmico por lo cual puede ser útil en muchas aplicaciones.

La principal razón por la cual se han realizado grandes investigaciones sobre el cobre en MEMS y circuitos integrados es debido a que tiene más conductividad que el aluminio. Esto significa que disipará baja cantidad de calor y menor potencia de pérdida. Así es un gran incentivo para integrar cobre dentro de la industria de MEMS de manera general y particular.

1.7.2.3 Níquel.

Es un elemento metálico magnético, de aspecto blanco plateado, utilizado principalmente en aleaciones, es un metal duro, maleable y dúctil, que puede presentar un intenso brillo. El níquel metálico no es muy activo químicamente, es soluble en ácido nítrico diluido, y se convierte en pasivo (no reactivo) en ácido nítrico concentrado. Además se emplea como protector y como revestimiento ornamental de los metales; en especial de los que son susceptibles de corrosión como el hierro y el acero. La placa de níquel se deposita por electrólisis de una solución de níquel.

Se usa principalmente en aleaciones, y aporta dureza y resistencia a la corrosión en el acero.

1.8 ¿Porqué utilizar tecnología MEMS?

En los últimos años esta tecnología se ha aplicado en muchos campos, como la medicina, la industria y las telecomunicaciones, que es nuestro tema de interés, en específico la telefonía celular, en donde se mejoran algunas de las características, ya que ofrece las siguientes ventajas:

- Reducción de las dimensiones de los dispositivos electromecánicos.
- Reducción del consumo de energía.
- Posibilidad de hacer sistemas de mayor complejidad.
- Posibilidad de incorporar funciones inteligentes.

Por todo lo anterior, MEMS puede ser la única solución. Además, MEMS provee beneficios en los siguientes dispositivos en el área RF [1]:

- Capacitores
- Inductores
- Resonadores
- Interruptores

Todo ello con las siguientes características:

- Bajo peso
- Bajas pérdidas de inserción
- Alta precisión
- Bajo consumo de potencia
- Alta confiabilidad

Conclusiones

En este capítulo se comprendió que la tecnología MEMS es una plataforma de diseño con la cual se puede reducir espacio y costo, además es posible integrar en un solo chip gran cantidad de dispositivos, en donde el silicio es un excelente material con el que se puede trabajar debido a sus características de ser un material primordial en todo tipo de componentes electrónicos, mecánicos, etc.

Además se observa que con el micromaquinado de superficie se puede lograr la fabricación de estructuras más complejas que con el micromaquinado en volumen.

Se analizaron los diferentes tipos de actuación que podemos usar en los dispositivos MEMS, de entre los cuales resalto el tipo electrostático, el cuál es el más usado para la fabricación de interruptores por las ventajas que posee en relación con los demás, tales como bajos consumos de potencia debido a que la corriente eléctrica es muy pequeña, así como un tiempo de respuesta mayor.

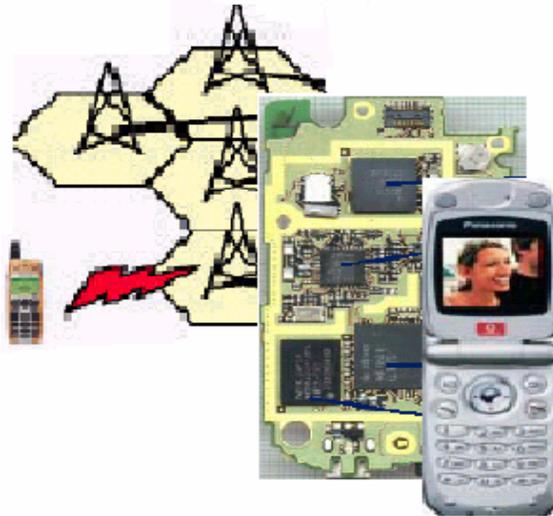
Cabe mencionar que es de gran importancia conocer las características de diferentes materiales ya que de su elección depende el adecuado funcionamiento de los dispositivos a los que constituyen. Además los procesos de deposición, litografía y atacado son muy importantes para elegir la técnica apropiada según las necesidades requeridas en el proceso de fabricación de los MEMS.

Bibliografía

- [1] “What is MEMS Technology?”,
<http://www.memsnet.org/mems/what-is.html>, 2005.
 - [2] Mohamed Gal-el-Hak, “The MEMS handbook”, 2002, ISBN 0849300770. pp. 1-3.
 - [3] Nadim, Maluf, “An introduction to Microelectromechanical systems Engineering”, Editorial: Artech House. pp. 3 –7, 17-13.
 - [4] M. Mehregany and S. Roy ,“Chapter 1: Introduction to MEMS (cont.) 1.2 Fabrication Technologies ”,
<http://www.aero.org/publications/helvajian/helvajian-2.html>.
 - [5] Aeidel, H, “Microelectromechanical systems (MEMS) and radio frequency MEMS”, 1994, A, 40, pp. 63–70.
 - [6] C.L. Goldsmith, S. Eshelman and D. Dennston , “Performance of low loss RF MEMS capacitive switches”, 1998, .IEEE Microwave and Guided Wave. Letters 8,pp. 269–271.
 - [7] “Microsistemas / microtecnologías”,
http://revista.robotiker.com/revista_estudios/microsistemas.html, 2003 pp 8-9 .
 - [8] "The Beginner's Guide to MEMS Processing",
<http://www.memsnet.org/mems/beginner/>.
 - [9] “Deposition Processes”,
<http://www.memsnet.org/mems/beginner/deposition.html>.
 - [10] "Etching Processes",
<http://www.memsnet.org/mems/beginner/etch.html>.
 - [11] "Lithography”,
<http://www.memsnet.org/mems/beginner/lithography.html>.
 - [12] Héctor J. de los Santos, “Introduction to Microelectromechanical (MEM) Microwave Systems”, 1999 ISBN 0-89006-282-X. pp 25-35.
-

- [13] Nadim, Maluf, “An introduction to Microelectromechanical systems Engineering”, 2000 Editorial: Artech House. pp. 87-95.
- [14] Timoshenko. S, “ Analysis of Bi-Meyal Thermostats”, Journal of the optical Society of America, Vol. 11, 1925 p.233.
- [15] Stockholm, Sweden . Klaassen, E.H, Silicon. “Fusion Bonding and Deep Reactive ion Etching; A New Technology for Microstructures” Proc. 8th Int. Conf on Solid-State Sensors and Actuators, June 25-29, 1995 pp. 556-559.
- [16] “Material Propieties. B. Stark Chapter 4”,
<http://parts.jpl.nasa.gov/docs/JPL%20PUB%2099-1D.pdf>.
- [17] “Wafer Fab: Polysilicon”,
<http://www.semiconfareast.com/polysilicon.htm>.

Capítulo 2. Aplicación de los MEMS en Radiofrecuencias



Los dispositivos aplicados en el área de radiofrecuencia han venido evolucionando rápidamente en sistemas que actualmente conocemos, tal es el caso de las telecomunicaciones.

Ejemplos de aplicaciones en donde estos dispositivos son útiles incluyen filtrado, mezcla, conmutación, transreceptores inalámbricos, receptores, etc.

Por todo ello enseguida analizaremos la aplicación de la tecnología MEMS como una opción para el diseño de estos dispositivos.

2.1 ¿Qué son los RF MEMS?

Los RF MEMS son microsistemas para radiofrecuencia y aplicaciones de ondas milimétricas [1]. Ejemplos de estos dispositivos son: microinterruptores, capacitores sintonizables a microescala, inductores micromaquinados, antenas micromaquinadas, microlíneas de transmisión y resonadores incluyendo resonadores micromecánicos, resonadores BAW (Bulk Acoustic Wave)^[8] y resonadores de cavidad. Los RF MEMS son manufacturados usando tecnologías convencionales de estructuras 3D, como lo es el micromaquinado en volumen, micromaquinado en superficie, proceso LIGA (litografía por rayos X). Los materiales usados incluyen silicio (Si), Arsenuro de Galio (GaAs), SiC o substratos SOI.

Además de su potencial para la integración y miniaturización, los RF MEMS ofrecen un consumo bajo de energía, bajas pérdidas, alta linealidad y altos factores de calidad (Q) en comparación con los componentes convencionales en comunicaciones. Los RF MEMS también permiten nuevas arquitecturas para las próximas generaciones de sistemas de telecomunicaciones, ya que es fácil y rápido reconfigurarlos además de que operan sobre un gran rango de frecuencias.

Los productos en serie comercialmente disponibles hoy en día incluyen inductores de Memscap y Resonadores BAW (Bulk Acoustic Wave) que ya han sido fabricados en millones de unidades en Agilent (USA) e Infineon . Además, los primeros interruptores RF, están disponibles en kits de evaluación de Teravicta y Magfusion (USA).

2.2 RF MEMS para comunicaciones inalámbricas

Impacto que han causado los MEMS en tecnología de Radiofrecuencia

Los circuitos micromecánicos para comunicaciones fabricados en tecnologías MEMS compatibles con los circuitos integrados y capaces de tener bajas pérdidas de filtrado, mezcla, conmutación y generación de frecuencia, son descritos con el intento de miniaturizar los transreceptores inalámbricos. Los receptores basados en tecnología MEMS en los cuales se usan estos circuitos han mejorado sus características de robustez y han reducido sustancialmente la potencia de consumo.

Investigaciones recientes de componentes pasivos a micro escala han demostrado que con altas Q's que se utilizan en los sistemas micromecánicos (MEMS) se permite la integración en un chip a lado de circuitos transistores por ello se ha disparado el interés en desarrollar arquitecturas de comunicación para acoplar el uso de dispositivos pasivos con alta Q. Dentro de estos, los mas usados son los circuitos resonadores micromecánicos con frecuencias cercanas a UHF y Q's en decenas de miles, capacitores sintonizables con Q's arriba de 300 a 1GHz, inductores micromaquinados con Q's arriba de 30 a 1GHz e interruptores micromecánicos con pérdidas de inserción de 0.1dB.

[8] **BAW.** (Bulk Acoustic Wave). Ondas Acústicas volumétricas, vibraciones mecánicas que se producen al excitar un cristal cuando se le aplica un voltaje alterno en o cerca de su frecuencia de resonancia natural y el cristal se rompe en estas oscilaciones mecánicas

Aunque la mayoría del interés en los dispositivos RF MEMS es derivado de su posibilidad de integración en un chip, actualmente su potencial por disminuir su robustez y disminución de potencia de consumo como alternativa de los circuitos actuales hacen que ellos se usen forzosamente [2], [3].

2.3 Mercado de RF MEMS

2.3.1 Participantes del Mercado de RF MEMS

La cadena industrial de RF MEMS se muestra en la figura 2.1. Más de 120 industrias y organizaciones de investigación trabajan sobre RF MEMS en todo el mundo. Los participantes del mercado de RF MEMS se pueden dividir en cinco grupos [1]:

- Instituciones Académicas de investigación: más de 60 universidades en todo el mundo participan en los descubrimientos de los RF MEMS.
- Fabricantes de RF MEMS incluyendo:
 - Iniciadores de RF MEMS que se enfocan en desarrollar RF MEMS.
 - Compañías iniciadoras de MEMS que se especializan en el desarrollo en MEMS y RF MEMS.
 - Grandes fabricantes e integradores de Circuitos integrados (CI) y MEMS los cuáles desarrollan RF MEMS para sus necesidades específicas.
 - Fabricantes de dispositivos RF los cuáles no están tradicionalmente envueltos en el desarrollo de MEMS.
- Compañías que ofrecen un diverso rango de servicios para la cadena industrial de los RF MEMS incluyendo MEMS CAD e IP, servicios de fundición, empaquetamiento, RF CAD y EDA (Electronic Design Automation).
- Integradores e usuarios que cooperan con las organizaciones de investigaciones académicas, fabricantes de RF MEMS y proveedores de servicios desarrollando las especificaciones de los dispositivos y la integración de los RF MEMS en sus productos futuros.
- Autoridades Nacionales e Internacionales los cuales están en medio de la promoción y financiamiento de programas de investigación y desarrollo de RF MEMS.

2.3.2 Un inmenso potencial del mercado

El potencial del Mercado es tremendo. Algunas aplicaciones significativas son mencionadas como:

- Microinterruptores para construir redes de impedancia en amplificadores de potencia para la disminución del número de componentes en teléfonos móviles multiestándar.
 - Resonadores BAW para reemplazar los voluminosos duplexores cerámicos en los teléfonos móviles de la tercera generación.
 - Inductores MEMS y capacitores sintonizables para VCOs integrados en GPS.
-

- Interruptores, capacitores sintonizables e inductores para construir estaciones base y multiestándar las cuales pueden ser reconfiguradas.
- Redes densas de microantenas para radares militares.

Se estima que el mercado total para RF MEMS excederá 1 billón de dólares en el 2007 como lo muestra la figura 2.1

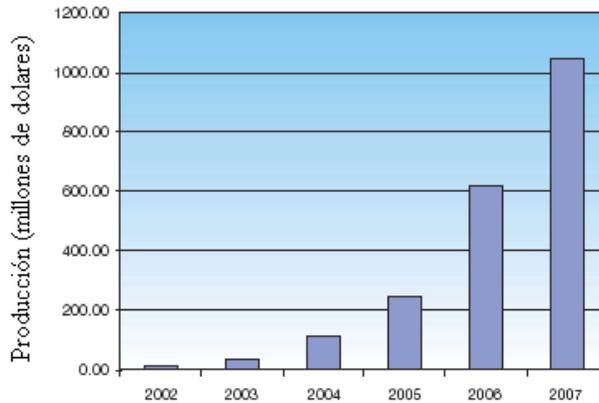


Figura 2.1 Predicción del mercado RF MEMS.

Desde el 2002 hasta el 2005 el mercado de RF MEMS ha comenzado a crecer, con actividades enfocadas en prototipos y procesos de calificación.

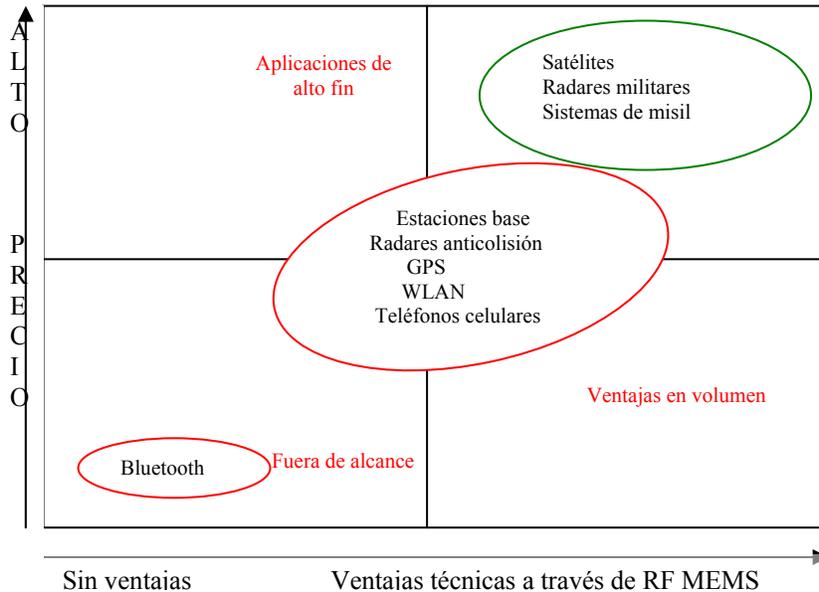


Figura 2.2 Ventajas técnicas y aceptación del precio en los diferentes mercados de RF MEMS

Se estima que una producción a gran escala empezará en este año. Para identificar los segmentos más interesantes del mercado, se compararan todas las aplicaciones potenciales con los beneficios al usuario, expresados como ventajas técnicas y aceptación del precio como se muestra en la figura 2.2

Como resultado se distinguen tres tipos de segmentos del mercado:

- **Aplicaciones de Alto fin:** Aplicaciones militares, aplicaciones espaciales y de instrumentación están listas para usar RF MEMS. Entre las principales ventajas se encuentra la significativa mejoría en la implementación técnica y confiabilidad comparada con las técnicas existentes. El volumen de mercado es pequeño en comparación con la telefonía móvil, además, las compañías están preparadas para pagar altos precios por componentes si las implementaciones técnicas ya han sido probadas.
- **Ventajas en Volumen:** El segundo grupo incluye aplicaciones industriales y comerciales, interesadas en la implementación y funcionalidad. La telefonía móvil, GPS y WLAN planean usar RF MEMS. Además, los objetivos en el precio ya han sido alcanzados, debido a que MEMS está en competencia con las técnicas existentes. Estas aplicaciones darán un gran volumen de mercado necesario para la producción eficiente de MEMS.
- **Fuera de alcance:** En algunos casos los MEMS pueden ser usados desde un punto de vista técnico. Además, el uso de RF MEMS está fuera de alcance, debido a que los precios son muy bajos y no hay necesidad de incrementar la implementación. Este es el caso de redes de área personal, como lo son Bluetooth^[9], donde RF MEMS no puede ofrecer alguna ventaja particular.

2.3.3 Desafíos y factores clave para el éxito

Los dispositivos RF MEMS ofrecen ciertas ventajas sobre los componentes convencionales.

Sin embargo existen algunos desafíos que necesitan ser resueltos entre los cuales se pueden mencionar los siguientes [2]:

- **Probar su confiabilidad:** Este es su mayor problema. Acerca de algunos interruptores MEMS se conoce poco acerca del envejecimiento de los materiales en

[9] **Bluetooth.** Es la norma que define un Standard global de comunicación inalámbrica, que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes equipos mediante un enlace por radiofrecuencia. Los principales objetivos que se pretende conseguir con esta norma son:

- Facilitar las comunicaciones entre equipos móviles y fijos
- Eliminar cables y conectores entre éstos.
- Ofrecer la posibilidad de crear pequeñas redes inalámbricas y facilitar la sincronización de datos entre nuestros equipos personales

el rango micrométrico. Por ello se tiene la dificultad de llevar a cabo una acelerada prueba de envejecimiento. Los problemas técnicos sin resolver incluyen la extinción de las partes móviles en los capacitores sintonizables e interruptores.

- **Empaquetamiento:** Este es un gran problema, ya que causa impacto en el aumento del tiempo de confiabilidad, implementación y precio de los RF MEMS. Para la producción en masa, el empaquetamiento a nivel de oblea emerge como la solución más prometedora, comparado con el empaquetamiento discreto indicando que el precio de los RF MEMS pueda reducirse a la mitad.
- **Cotización:** Producir RF MEMS a un precio aceptable es el reto más significativo para los fabricantes. Para ello se inicia con la cotización de los futuros costos de fabricación para así poder saber si los objetivos serán alcanzados.

2.3.4 Oportunidades de Negocio en RF MEMS

El potencial del mercado de RF MEMS es inmenso, los acelerómetros micromaquinados fueron los primeros componentes que ofrecían un avance en la implementación, miniaturización e integración que fueron requeridos en cientos de millones de unidades. Incluso se anticipa que en el 2007, las aplicaciones en comunicaciones, incluyendo telefonía móvil, GPS y WLAN ocuparan la mayor parte del mercado. Así que estos mercados estarán en su mayor parte cubiertos por los grandes fabricantes de CI y MEMS. Además, las aplicaciones en volúmenes medianos, y de alto presupuesto, como los radares automotrices, estaciones base e instrumentación son muy prometedores para las compañías pequeñas y las que están comenzando. De nuevo, los desarrollos y programas de seguimiento para las aplicaciones espaciales y militares dan nichos muy interesantes para las pequeñas y medianas empresas [2]

2.4 Áreas de aplicación de los MEMS en dispositivos RF

Enseguida se muestra una tabla en donde se mencionan las áreas de aplicación de los MEMS en dispositivos de radiofrecuencia, así como su utilidad en cada una de ellas [4].

Área de Aplicación	Rango de frecuencias	Utilidad	Ciclos requeridos
Defensa	5-94GHz	• Radares basados en satélites	20 billones
		• Sistemas radares para misiles	0.1-1 billón
		• Radares de larga longitud	20-100 billones
Automotor	24,60 y 77 GHz	Radares	1-2 billones
Sistemas de Comunicación por	12-35 GHz	Redes	0.1 millones

satélite			
Sistemas de comunicaciones inalámbricas	0.8-6GHz	<ul style="list-style-type: none"> • Antenas • Interruptores receptores y transmisores • Filtros 	10-100 millones 2-4 billones 0.1-10 billones
Sistemas de instrumentación	0.01-50GHz	Atenuadores	20-40 billones

Tabla 2.1 Áreas de aplicación de los MEMS en dispositivos RF

2.5 Ventajas de RF MEMS

Una de las razones por las cuales los RF MEMS son una excelente plataforma de trabajo en el área de comunicaciones inalámbricas es que ofrecen muchas ventajas en cuanto a desarrollo, tamaño y costo, las cuales se mencionan a continuación [4].

Desarrollo

- Bajas pérdidas de RF: Lo cual resulta útil en cualquier tecnología de electrónica como interruptores y señales sintonizables de radiofrecuencia.
- Esencialmente ningún consumo de potencia de DC: Perfecto para la batería y aplicaciones de baja potencia.
- Linealidad sumamente alta: Por lo que se logra no tener armónicos o distorsión, excelente para las comunicaciones de banda ancha.

Tamaño

- Microminiatura: Tamaño Reducido, capaz de trabajar a frecuencias muy altas (> 50 GHz).
- Sintonización: Se reducen el número de componentes pasivos.

El costo

- Reducción de costos en la fabricación por lote: Resulta mucho menos caro que las tecnologías de semiconductores.
- Capaz de combinarse con otra tecnología en electrónica.

2.6 Mercado de RF MEMS en telefonía celular

Hay que tener presente que el mercado de la telefonía celular ha crecido rápidamente, por lo que si se considera que es una de las tecnologías en la cual una mayor cantidad de usuarios ingresan, se puede decir que cualquier avance obtenido gracias a los microsistemas electromecánicos, será de gran utilidad para los posteriores avances de la telefonía celular [1,4].

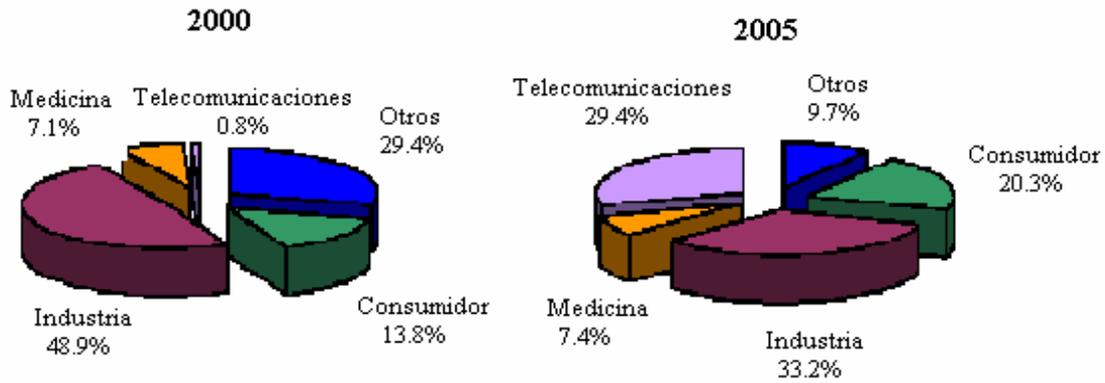


Figura 2.3 En esta gráfica se observa como en el 2000 se contaba con una pequeña zona de aplicación (0.8 %) en el área de Telecomunicaciones, pero en éste año, el sector creció enormemente a un 29.4 % ocupando una gran parte de desarrollo en MEMS.

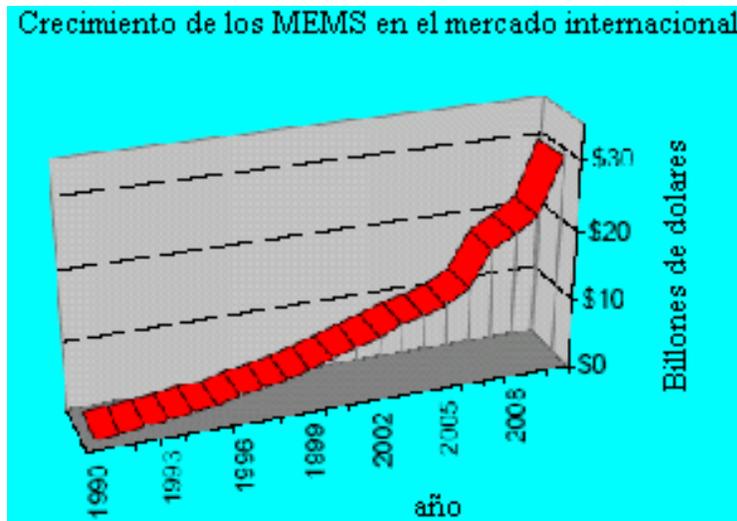


Figura 2.4 En este esquema observamos el crecimiento del mercado de MEMS a nivel internacional.

Como se mencionó anteriormente la telefonía celular es un área muy importante dentro de las comunicaciones inalámbricas y una de las tecnologías en Telecomunicaciones que se ven más beneficiadas al realizar dispositivos a microescala y que ha experimentado mayor desarrollo para contribuir a cambiar la forma de vida del hombre, por ello en este trabajo se realiza una investigación general acerca de los teléfonos celulares para comprender como es que operan así como su importancia. Además se mencionan los elementos RF MEMS aplicados a la telefonía celular.

2.7 Importancia de la telefonía celular.

El teléfono es un elemento indispensable en la vida moderna. Esta herramienta enlaza al mundo desde hace más de 100 años, convirtiéndose en uno de los principales canales de comunicación del ser humano, que permite acercar en tiempo y espacio a las diferentes personas sin importar distancias.

Aún más, la evolución tecnológica de los sistemas celulares permite una capacidad de abonados muy elevada, y con ello ha dado pie a que la telefonía móvil se convierta en una aplicación de consumo a la que pueden acceder no solamente las personas que necesitan específicamente este tipo de aplicación, sino también otras que lo consideran una comodidad más de las proporcionadas por los avances de la tecnología.

Como consecuencia, las terminales son cada vez más pequeñas, más baratas y con más autonomía, y los sistemas ofrecen cada día más servicios. Esto ha provocado que este tipo de servicio esté alcanzando índices de crecimiento increíbles, hasta el punto de que el teléfono móvil es un bien más de consumo, como la computadora o la cámara de vídeo, un dato importante, es que, por ejemplo, a menos de 15 años de haberse efectuado la primera llamada por teléfono celular en México, el número de aparatos móviles de comunicación ha rebasado ya la cantidad total de teléfonos convencionales instalados en el país [5].



Figura 2.5 Teléfonos celulares actuales

2.8 Sistema de telefonía celular.

La intención de esta parte de la investigación es recopilar una breve información de lo que realiza y ofrece un sistema de telefonía celular, tanto en sus tecnologías TDMA, CDMA, GSM, modo de operación, características de uso, un poco de la historia de los celulares, nuevas tendencias, así como demás características del sistema de telefonía celular, sin embargo no se profundizará puesto que no es el objetivo del trabajo.

2.8.1 Historia del teléfono celular.

El teléfono fue inventado por Alejandro Graham Bell en 1876, y la comunicación inalámbrica tiene sus raíces en la invención del radio por Nicolás Tesla en la década de 1880 (formalmente presentado en 1894 por un joven italiano llamado Guillermo Marconi). Era de esperarse que un día ambas tecnologías fueran combinadas en un mismo aparato, así que Martín Cooper unió estas dos tecnologías al inventar el primer radioteléfono en 1973. y es considerado “Padre de la telefonía celular”.

El primer sistema de telefonía celular nació en 1979 en Suecia, y fue puesto en marcha por la empresa Ericsson y su comercialización se expandió en los años ochenta [6].

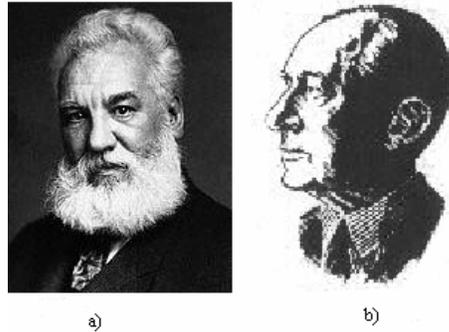


Figura 2.6 a) Alejandro Graham Bell, inventor del teléfono
b) Guillermo Marconi, inventor de la radio

2.8.2 Generaciones de la telefonía celular.

Primera generación (1G)

La 1G de la telefonía móvil hizo su aparición en 1979 y se caracterizó por ser analógica y estrictamente para voz. La calidad de los enlaces era muy baja, tenían baja velocidad. En cuanto a la transferencia entre celdas, era muy imprecisa ya que contaban con una baja capacidad (Basadas en FDMA, Frequency Division Multiple Access) y, además, la seguridad no existía. La tecnología predominante de esta generación es AMPS (Advanced Mobile Phone System) [7], la cual empieza ofreciendo un servicio que tiene, desde el punto de vista de usuario, las características del servicio actual:

1. Posibilidad de realizar y recibir llamadas en cualquier punto del área de cobertura del sistema.
2. Continuidad de la comunicación al pasar del radio de acción de una estación de base al de la estación contigua

Segunda generación (2G)

La 2G arribó hasta 1990 y a diferencia de la primera se caracterizó por ser digital. El sistema 2G utiliza protocolos de codificación más sofisticados. Las tecnologías predominantes son: GSM (Global System for Mobile Communications); IS-136 (conocido también como TIA/EIA136 o ANSI-136), CDMA (Code Division Multiple Access) y PDC (Personal Digital Communications), éste último utilizado en Japón.

La principal ventaja de los teléfonos de segunda generación sobre sus predecesores analógicos son su gran capacidad y menor necesidad de carga de batería. En otras palabras, ellos satisfacen a los usuarios asignando una frecuencia consumiendo menos potencia.

Cabe mencionar que existe una generación llamada generación 2.5 G que ofrece capacidades adicionales que los sistemas segunda generación la cual es más rápida y más económica para actualizarse a los sistemas de tercera generación.

Tercera generación (3G)

La 3G se caracteriza por contener a la convergencia de voz y datos con acceso inalámbrico a Internet; en otras palabras, es apta para aplicaciones multimedia y altas transmisiones de datos.

Los protocolos empleados en los sistemas 3G soportan altas velocidades de información y están enfocados para aplicaciones más allá de la voz como audio (mp3), video en movimiento, videoconferencia y acceso rápido a Internet, sólo por nombrar algunos. Las redes 3G comenzaron a operar en el 2001 en Japón, en Europa y parte de Asia en el 2002, posteriormente en Estados Unidos y otros países.

Asimismo, en un futuro próximo los sistemas 3G alcanzarán velocidades mayores.

Lo ideal es que los sistemas de tercera generación provean servicios en cualquier lugar y a cualquier hora. Mientras que los servicios analógicos y los primeros servicios digitales fueron diseñados solo para resolver problemas de sistemas analógicos, como seguridad, bloqueo e incompatibilidad regional; iniciándose así, una nueva visión a la migración a 3G y por lo tanto hacia nuevos servicios.

Con relación a la cantidad de usuarios que podría albergar 3G, The Yankee Group mostró que en el 2004 había más de 1,150 millones en el mundo, comparados con los 700 millones que hubo en el 2000. Dichas cifras nos anticipan un gran número de capital involucrado en la telefonía inalámbrica.

2.9 Telefonías celulares actuales

Los datos a intercambiar siempre están disponibles en forma de señal digital. No obstante, para su transmisión podemos optar por la utilización de señales digitales o analógicas. La elección no será, casi nunca, una decisión del usuario, sino que vendrá determinada por el medio de transmisión a emplear.

No todos los medios de transmisión permiten señales analógicas ni todos permiten señales digitales. Como la naturaleza de los datos será siempre digital, es necesario un proceso previo que adecue estos datos a la señal a transmitir. A continuación examinaremos los 2 casos posibles [8, 9]:

2.9.1 Transmisión analógica.

La transmisión se lleva a cabo por medio de una onda radial por la cual se transmite, es una señal frágil, transmitida a baja potencia. La llamada es convertida en impulsos eléctricos que viajan en forma de ondas de radio "Análogos" al sonido de la voz original.

2.9.2 Transmisión digital.

En este tipo de transmisión se toman las señales análogas (sonidos), y las traduce a códigos binarios que pueden ser transmitidos a alta velocidad, para después ser reconvertidos en el sonido de la voz original.

Enseguida tenemos un cuadro comparativo de ambas transmisiones.

TRANSMISION DIGITAL	TRANSMISION ANALOGICA
Traduce los sonidos a códigos binarios	Imita la onda de la voz humana
Transporta varias llamadas simultáneas por canal	Una llamada por canal
Mayor privacidad y menor riesgos de interceptación de sus llamadas	Posibilidad de interceptación de llamadas
La tecnología de hoy y del futuro	La tecnología del ayer

Tabla 2.2 Comparación entre transmisión analógica y digital

2.10 Tecnologías de acceso celular.

Las tecnologías de acceso celular están divididas en 2 grandes grupos: el sistema celular analógico y el sistema celular digital [10].

2.10.1 Sistema Celular Analógico

Este tipo de acceso a su vez puede ser de dos tipos:
AMPS (Servicio avanzado de telefonía móvil)
FDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia)

Servicio avanzado de telefonía móvil (AMPS)

Introducido por AT&T liberado en 1983 usando frecuencias de 800-900 MHz y con un ancho de banda de 30 KHz para cada canal

Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA)

Separa el espectro en distintos canales de voz, al separar el ancho de banda en pedazos de frecuencia uniformes.

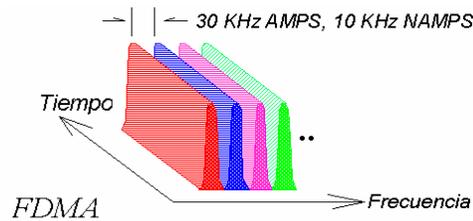


Figura 2.7 Acceso múltiple por división de frecuencia

2.10.2. Sistema Celular Digital.

Comprime las conversaciones (digitales), y las envía cada una utilizando la señal de radio. Emplea intervalos de frecuencia entre los 800 y los 1900 MHz por división de tiempo.

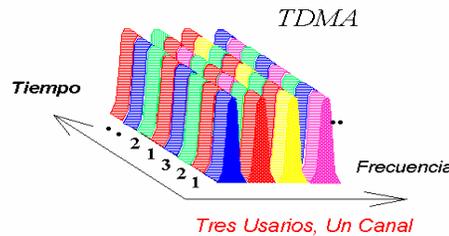


Figura 2.8 Sistema TDMA

El sistema TDMA como su traducción dice, es multiplexación por tiempo; esto es, si queremos enviar 3 canales por un mismo medio físico haciendo uso de TDMA, simplemente le asignaremos una duración temporal a cada canal, y se les cederá el medio físico a cada canal durante un espacio de tiempo determinado. Muy usado en transmisiones digitales por cable, como en redes de computadoras. Requiere métodos de sincronismo eficaces.

Acceso múltiple por división de códigos (CDMA)

Después de digitalizar la información, la transmite a través de todo el ancho de banda disponible. Varias llamadas son sobrepuestas en el canal, y cada una tiene un código de secuencia único. Posee un ancho de banda de 1.25 MHz con intervalos de frecuencia de 800 y 1900 MHz por división de códigos.

Usando la tecnología CDMA, es posible comprimir entre 8 y 10 llamadas digitales para que estas ocupen el mismo espacio que ocuparía una llamada en el sistema analógico.

Es un tipo de multiplexación bastante compleja, basada en el uso de distintas codificaciones para cada canal, que pueden ser transmitidos compartiendo tiempo y frecuencia simultáneamente.

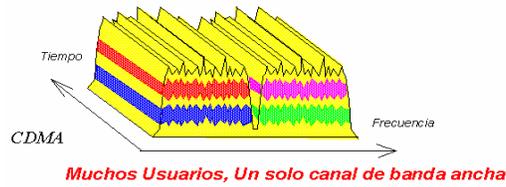


Figura 2.9 Sistema CDMA

Sistema global para comunicaciones móviles (GSM)

La tecnología GSM es el sistema de comunicación más seguro puesto que toda la información que se transmite viaja encriptada por el aire, con nuevos códigos en cada llamada, y no se han dado nunca casos de ser interceptada y/o reconstruida. Posee un ancho de banda de 200 KHz.

El GSM es la tecnología líder a nivel mundial, con más de 380 millones de usuarios en más de 150 países. Cada vez avanza más en camino de convertirse en el estándar mundial.

2.11 Funcionamiento de un teléfono celular.

La gran idea del sistema celular es la división de la ciudad en pequeñas células o celdas. Esta idea permite la reutilización de frecuencias a través de la ciudad, con lo que miles de personas pueden usar los teléfonos al mismo tiempo. Las celdas son normalmente diseñadas como hexágonos [7].

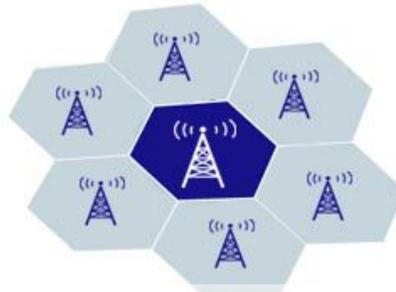


Figura 2.10 Células en las que se dividen las regiones

Cada celda tiene una estación base que consiste de una torre y un pequeño edificio que contiene el equipo de radio.

La tecnología celular requiere un gran número de bases o estaciones en una ciudad de cualquier tamaño. Una ciudad grande puede llegar a tener cientos de torres. Cada ciudad necesita tener una oficina central la cual maneja todas las conexiones telefónicas a los teléfonos convencionales, y controla todas las estaciones de la región.

Módulos que componen a un teléfono celular

A manera de dispositivo, los teléfonos celulares pueden descomponerse en tres módulos bien definidos como se muestra en la figura 2.11 que son: el módulo de radio (RF radio frecuencia), el módulo de audio (AF audiofrecuencias) y el módulo lógico de control (CPU) [13].

Con la finalidad de conocer los dispositivos que se pueden realizar en tecnología MEMS, a continuación se dará una breve explicación de los módulos que componen a un teléfono celular a nivel de circuitería.

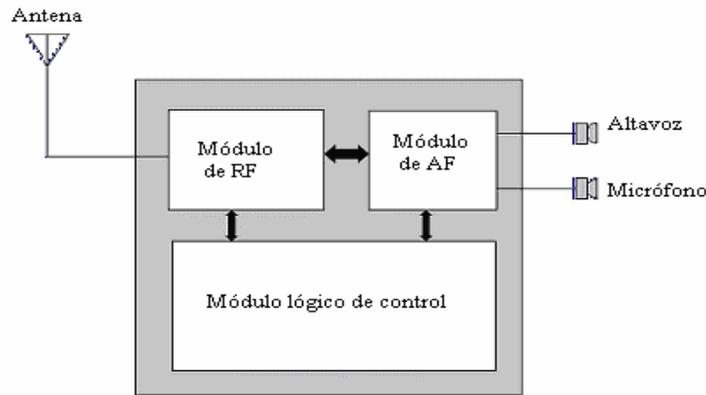


Figura 2.11 Módulos dentro de un teléfono celular

Módulo de RF

El módulo de RF tiene a su cargo todas las señales que entran o salen del teléfono celular, como se muestra en la figura 2.12.

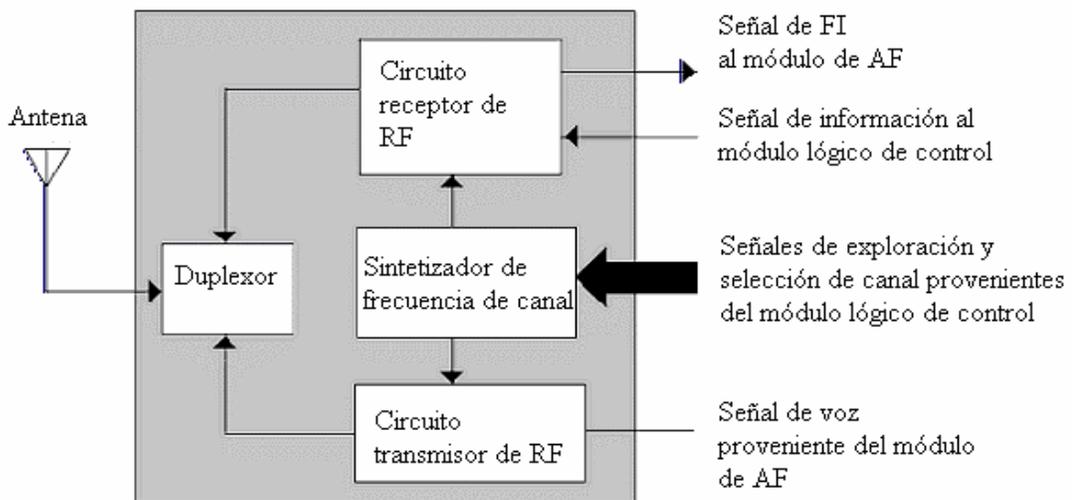


Figura 2.12 Módulo de RF

El circuito receptor de RF filtra y demodula las señales recibidas. La salida del módulo de RF se aplica al módulo de AF. A diferencia de los radiorreceptores tradicionales en los que se usa sintonización manual para definir el canal deseado, el teléfono celular usa un circuito sintetizador de frecuencia de precisión que puede ajustarse a cualquiera de los canales celulares asignados. El canal seleccionado en un momento dado está determinado por el módulo lógico de control. Conforme el teléfono celular se mueve de una celda a otra, las frecuencias de transmisión y recepción se cambian tomando en cuenta los canales disponibles de la nueva celda. Las instrucciones que indican qué frecuencias cambiar son recibidas como señales de información y son procesados por un módem en el módulo lógico de control del teléfono celular.

Las señales de voz provienen del módulo de AF y las señales de información provenientes de la unidad lógica de control se envían al circuito transmisor de RF que las coloca sobre la portadora de RF apropiada, las filtra, las amplifica y las aplica a la antena. La frecuencia portadora de RF está determinada por la celda particular en que se encuentre.

El circuito sintetizador de frecuencia de canal por lo general consta de un oscilador de base que trabaja conjuntamente con un sintetizador de frecuencia de recepción y un oscilador de frecuencia de transmisión. El sintetizador de frecuencia de recepción recibe una señal digital de control del módulo lógico de control y produce un voltaje proporcional a la frecuencia deseada. Un oscilador controlado por voltaje, o VCO, convierte el voltaje proporcional en la señal del oscilador. El circuito de portadora de transmisión es similar. Las señales digitales de control del módulo lógico de control establecen un voltaje que es proporcional a la frecuencia deseada. El voltaje proporcional excita a un VCO que produce la frecuencia del oscilador.

Módulo de AF

El módulo de AF es responsable de la conversión de las señales de FI (frecuencia intermedia) provenientes del módulo de RF en señales de voz que se puedan oír en el receptor del teléfono celular, como se muestra en la figura 2.13.

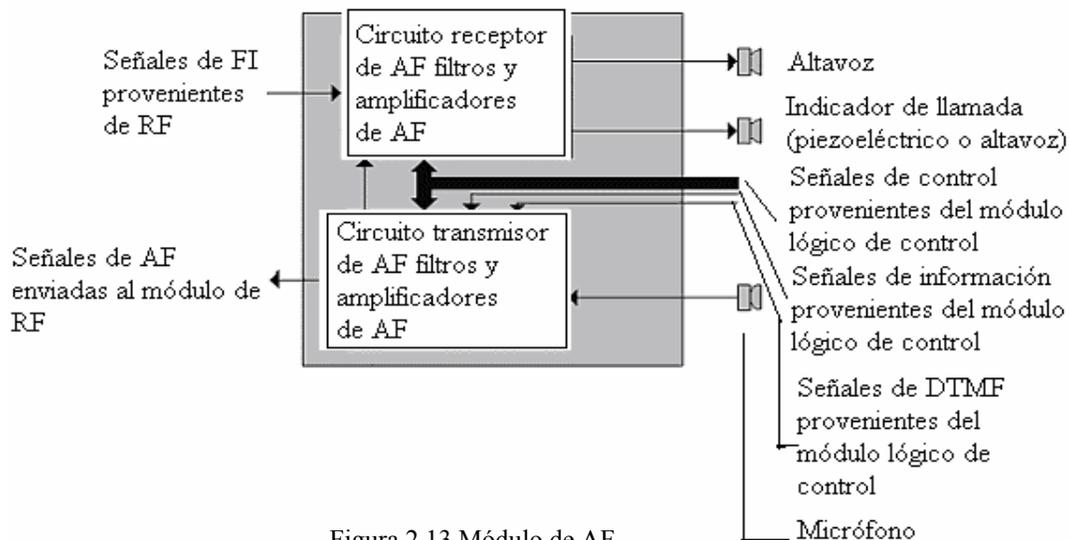


Figura 2.13 Módulo de AF

Generalmente se incluye un segundo elemento receptor para producir señales de advertencia, tales como las señales de llamada. Los tonos de DTMF^[10] y la voz provenientes de un micrófono se filtran, se mezclan y se aplican al módulo de RF para ser modulados, junto con las señales de control provenientes de un módem en el módulo lógico de control. Una porción de la voz transmitida regresa al receptor como tono local. Las funciones de transmisión y recepción de AF están bajo control directo del módulo lógico de control.

Módulo lógico de control

Como puede verse en el diagrama de bloques de la figura 2.14, el módulo lógico de control es base de un teléfono celular.

El módulo lógico de control tiene una estructura similar a la de una computadora personal. El CPU principal controla el teléfono celular con base en un conjunto de instrucciones permanentes (su programa) grabadas en una memoria permanente (ROM). Se incluye una memoria temporal (RAM) que almacena variables tales como el canal de uso, el valor seleccionado de potencia del transmisor, etc, así como los resultados de cualquier comparación lógica u operación matemática requeridos cuando el programa del teléfono no esté corriendo.

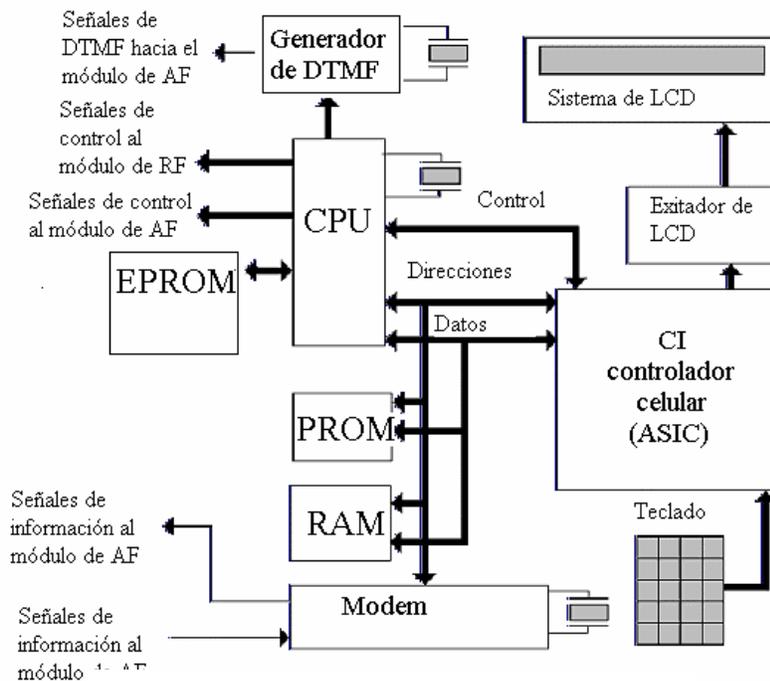


Figura 2.14 Módulo lógico de control

[10] **DTMF.** Proviene de las palabras en inglés Dual Tone Multi Frequency, que significa dos tonos de múltiples frecuencias, y que en español más común denominamos señalización DTMF o marcación por Tonos. Se eligió un conjunto de frecuencias bajas y un conjunto de frecuencias altas o tonos bajos y tonos altos, y para cada dígito del 1 al 0, se enviará la suma algebraica de dos señales senoidales una del conjunto de tonos bajos y otra del conjunto de tonos altos

Se usa una memoria borrable (EPROM) para almacenar información que es exclusiva de cada teléfono, tal como el número asignado al teléfono celular. A este tipo de memoria algunas veces se le denomina MAN, o módulo de asignación de número. El CPU tiene el control directo de los módulos AF y de RF, así como el generador de DTMF.

Puesto que un teléfono celular es una parte activa de la red celular, debe estar en contacto constante con la red. Además de las señales de voz y de DTMF, el teléfono celular debe transmitir y recibir información de la estación de celda en uso. Un CI de módem se usa para añadir información a la señal transmitida e interpretar las órdenes e información provenientes de la red celular.

El CPU también se hace cargo del funcionamiento del CI del controlador celular. El controlador celular es responsable de interconexión con el sistema de presentación visual y de teclado del teléfono celular. El controlador celular realiza los ajustes de los sintetizadores de frecuencia de transmisión y recepción en el módulo de RF.

2.12 Beneficios de aplicar la Tecnología MEMS a los teléfonos celulares.

Como se ha mencionado ya, un teléfono celular es más que unos pocos chips y una batería, dentro de éste existen filtros, duplexores, resonadores y componentes pasivos, sin embargo actualmente no están hechos de silicio y esto presenta un obstáculo en la reducción de su tamaño. Estos componentes pasivos pueden ser reemplazados por dispositivos MEMS y con ello se lograrían conseguir muchos beneficios, tales como ahorro en espacio y costo, así como mejoras en la calidad de la señal recibida ya que algunos parámetros que caracterizan a los dispositivos mejorarían [11].

El avance de la tecnología prevee que la miniaturización de los teléfonos celulares es inevitable y con ello los MEMS son una alternativa para una excelente plataforma de diseño.

Ejemplo de lo antes mencionado es que hoy en día se estima que se tendrán 10 GB en un teléfono celular, y se podrán dictar y enviar mensajes o grabar y almacenar lo que se habla en un mes ya que con MEMS se logra crear gran almacenamiento a muy bajo precio.

Un ejemplo del empleo de MEMS en telefonía celular lo constituye HP [12] en donde se cuenta con un laboratorio que trabaja en microcircuitos que literalmente “mueven” al silicio para que almacene y accese datos. El silicio puede prenderse y apagarse en un milisegundo, con muy poco consumo de energía en donde se habla de un gigabit en un chip del tamaño de una uña. El resultado constituirá un salto mayúsculo en la miniaturización del almacenamiento, y en HP piensan que esto se conseguirá en un futuro no muy distante.

El proyecto de almacenamiento MEMS de IBM, con nombre de código Millipede, va a operar como la aguja de un tocadiscos; se trata de una aguja que se calienta y su radio es de 40 átomos de largo. Mil de estas agujas quedarán almacenadas en solo 3 milímetros cuadrados. La escritura y lectura de los datos tendrá lugar entre el calentado y enfriado de las puntas de las agujas.

IBM estima que tales sistemas tendrían una densidad para datos de entre 25 y 100 veces la de los discos duros actuales, ya que estos discos al girar alcanzan límites físicos, aunque su densidad aumente. Por lo que se afirma con ello que se almacenaría más a menor costo.

Los grandes pasos hacia la miniaturización de los teléfonos celulares serán gracias a la combinación de dispositivos MEMS con la electrónica del mismo teléfono en una sola

unidad, debido a que los MEMS son diseñados con silicio, usando técnicas similares al manufacturado de microchips, es posible, por lo menos en teoría, tener un teléfono celular muy pequeño.

2.13 Elementos de RF MEMS aplicados a teléfonos celulares

Enseguida se muestra un esquema en el cual se puede ver algunos de los elementos RF MEMS aplicado a teléfonos celulares.

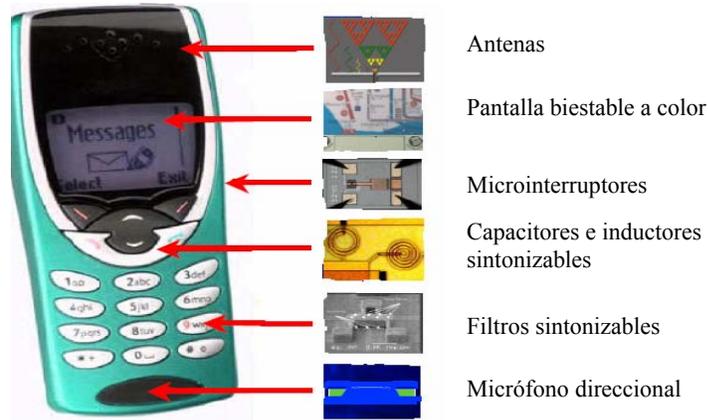


Figura 2.15 Elementos en donde se utilizarán los dispositivos *MEMS* al interior de un teléfono celular

El siguiente diagrama muestra a que parte del teléfono celular se le implementan los elementos RF MEMS:

1. Pantalla
2. Bocina auricular
3. Micrófono
4. Discos duros
5. Elementos de RF (interruptores, antenas, filtros electromecánicos, etc.)
6. Batería
7. Circuitos y componentes integrados a un chip



Figura 2.16 Teléfono celular al ser abierto

Como se puede apreciar anteriormente, existen muchos procesos que se necesitan realizar para que se lleve a cabo una llamada telefónica, sin embargo dichos procesos no se lograrían realizar sin la presencia de los elementos RF básicos tales como inductores, capacitores variables, antenas, interruptores y resonadores.

A continuación se dará una breve explicación de cada uno de ellos con la finalidad de conocer los beneficios que se tienen al utilizar la tecnología MEMS en cada uno de estos dispositivos en el área de telefonía celular.

2.13.1 Resonador

Una de las principales funciones de los componentes pasivos en teléfonos celulares es filtrar las frecuencias para seleccionar solo las requeridas, por lo que los filtros aíslan una parte específica de la banda de frecuencias o canales asignados para la conversación del usuario, sin embargo la presencia de ruido puede ser signo de falla en la etapa de filtrado.[11]

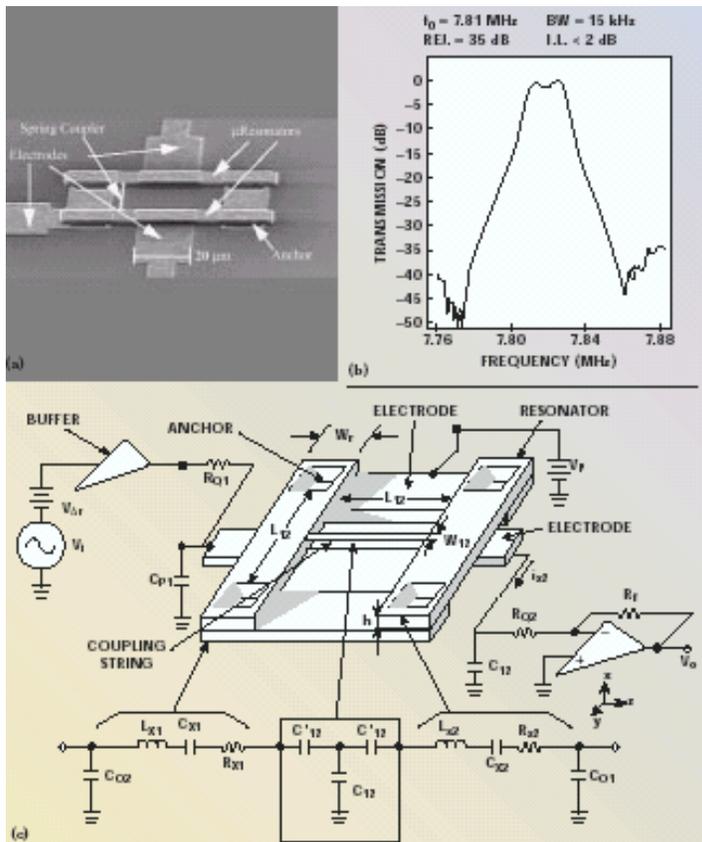


Figura 2.17 Resonador MEMS. Desempeño y modelo eléctrico

Además también de manera indirecta, mejores filtros ayudan a reducir el tamaño del teléfono celular ya que una baja calidad de filtrado resulta en pérdidas de la señal que es corregida con amplificadores que drenan potencia. Más potencia significa mayores baterías y electrónica extra dentro del teléfono [11].

Para lograr aplicaciones de buena calidad, los filtros necesitan ser diseñados con altos factores de calidad en los resonadores.

Actualmente las frecuencias son clasificadas con dispositivos SAW^[11] (surface acoustic wave). Para medir la selectividad de los filtros se utiliza el factor de calidad o Q, a mayor Q mayor es la selectividad del filtro. En los circuitos integrados se tienen

[11] SAW. (Onda acústica de superficie). Onda sonora de alta frecuencia que viaja a través de la superficie pulida de un sustrato cristalino piezoeléctrico.

Q's de alrededor de 20, los filtros SAW tienen alrededor de 2000 y los dispositivos MEMS aun tienen mayores [11].

Los resonadores pueden ser de muchos tipos: de dos vigas con anclaje, suspendido o modo disco, cada uno de ellos tiene ventajas particulares pero en forma general se observa que: tienen una Q muy elevada de 300-10, 000, además pueden trabajar en frecuencias altas, las aplicaciones de los resonadores son diversas entre ellas están: Osciladores, distintos tipos de filtros (HF-VHF-UHF), filtros-mezcladores para HF-VHF-UHF y banda L. En el diseño de los resonadores RF MEMS se puede mejorar las características de sintonización y sus dimensiones[14].

2.13.2 Interruptor

El interés en diseñar interruptores MEMS es debido a su potencial de tener bajas pérdidas de inserción, alto aislamiento y alta linealidad.

Actualmente se trabaja para lograr alta velocidad de switcheo y bajo voltaje de actuación.

Muchos interruptores basados en un número de mecanismos de actuación y topologías han sido demostrados. Estos incluyen el tipo cantiliver, membrana y bimetalico [14].

Algunas ventajas que se tiene al implementar este dispositivo en tecnología MEMS son:

- Las bajas pérdidas de inserción (< 0.1 dB) que conllevan a una baja atenuación de la señal y con ello se logra aumentar el tiempo de vida de las baterías.

- Alta linealidad con lo que se obtiene una distorsión baja de la señal.

- Alto aislamiento (50 dB o más a 3 GHz) y con ello baja interferencia de canales.

- Buena velocidad de switcheo menor a $10 \mu s$, que es disponible para aplicaciones a teléfonos celulares [15].

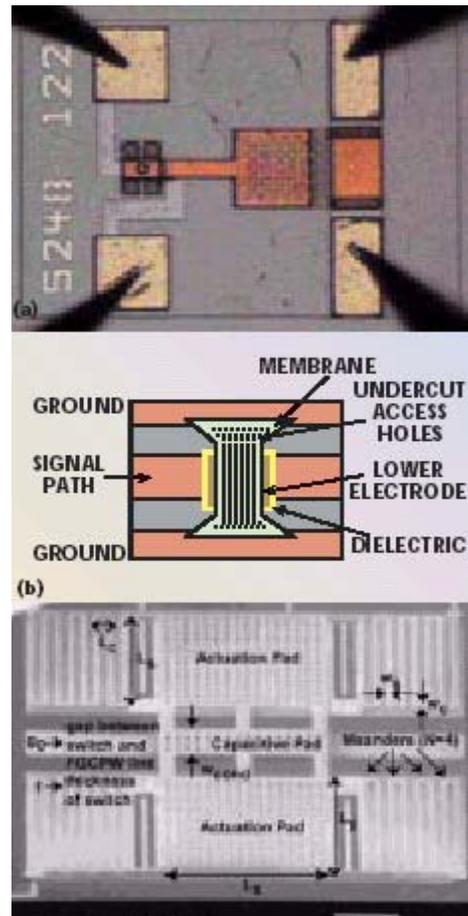


Figura 2.18 Implementaciones de interruptores MEMS

2.13.3 Inductor

Los inductores son elementos claves para determinar el desempeño de circuitos sintonizados en particular uniendo redes de impedancia, amplificadores de bajo ruido y osciladores controlados por voltaje. Mejoran la ganancia, la disipación de potencia o el ruido de fase de los circuitos.[14]

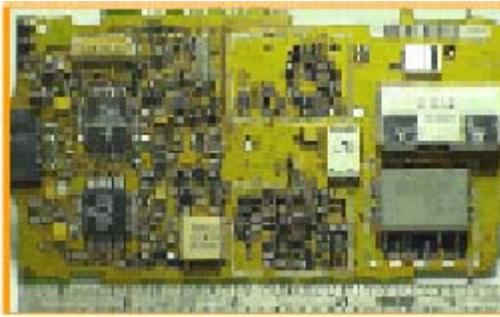


Figura 2.19 Circuito Actual de un teléfono de filtrado. [11].

Este dispositivo es diseñado con las tecnologías que se usan actualmente, sin embargo existen muchas deficiencias tales como problemas en el desempeño de los inductores debido al sustrato el cual si cuenta con baja resistividad resulta en pérdidas y si estas pérdidas se desean reducir entonces se debe disminuir la Q y con ello estamos limitados en un rango de frecuencias.

Al trabajar con los inductores en tecnología MEMS se logra tener pérdidas pequeñas, una Q arriba de 30, posibilidad de trabajar cerca de los 10 GHz, disminución de las capacitancias parásitas entre el sustrato y los dispositivos (esto debido a que se puede dejar levantado al inductor y alejarlo del sustrato).

En la actualidad se han llegado a tener inductores de Q de 6 a 28 con frecuencias de 6 a 18 GHz y con un valor de inductancia de 1nH.

2.13.4 Capacitor

Los capacitores sintonizables son elementos clave en los circuitos de comunicaciones tales como osciladores controlados por voltaje y filtros. Los capacitores variables manufacturados con tecnología de micromaquinado pueden conceder gran balance de voltaje para el ruido de fase y pueden mejorarlo permitiendo un balance de voltaje en un circuito LC lo cual normalmente no es posible con capacitores de unión PN [17].

Como sucede con los inductores, se están fabricando capacitores variables usando un grosor de cobre sobre procesos de aislamiento para minimizar pérdidas óhmicas.

Los inductores MEMS se fabrican usando un grosor de cobre sobre un proceso de aislamiento para lograr altos factores de calidad y altas frecuencias de resonancia. Para algunas aplicaciones específicas se usa geometría de bobina con materiales magnéticos para mejorar aun más el desempeño del inductor [16]. Dentro de un teléfono celular existen varias etapas de sintonización, mezcla, oscilación y filtrado, en presencia de los inductores, por ejemplo en la etapa

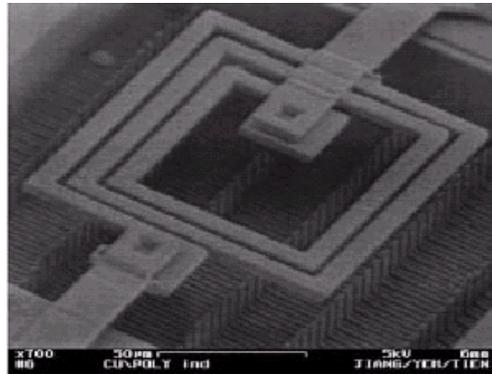


Figura 2.20 Inductor MEMS de tipo espiral rectangular

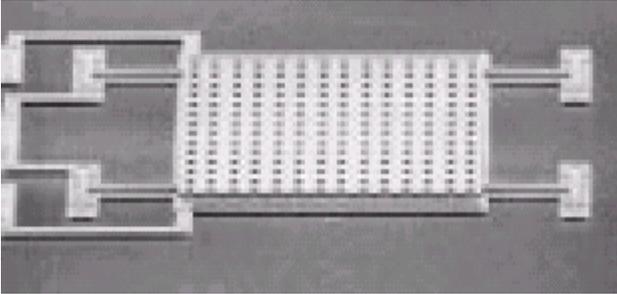


Figura 2.21 Capacitor variable MEMS

Se ha logrado sintonizarlos usando estructuras móviles metálicas con un proceso de actuación similar a los usados para interruptores. El objetivo es mejorar la calidad de los dispositivos. La combinación de inductores y capacitores optimizados para trabajar con pérdidas bajas es importante para el diseño de filtros y VCO's. [16]

En la actualidad, no se cuentan con capacitores variables a pequeña escala,

que se pueden utilizar para las etapas de sintonización en los sistemas de comunicación celular, en su lugar se cuenta con inductores discretos y diodos varactores, teniendo la desventaja de que están fuera del circuito integrado, lo que nos limita en integración completa, costos, tamaño y complejidad de ensamble del circuito [18].

Además este tipo de capacitor es de gran ayuda en un teléfono celular ya que se requiere cubrir ciertas bandas y con este dispositivo es más fácil hacerlo.

Usando tecnología MEMS, podemos realizar satisfactoriamente los capacitores variables. Este dispositivo se rige por la fórmula: $C = \epsilon A/d$. Aquí el objetivo es poder modificar la distancia d , por medio de actuación a distancia, sea electrostática o térmica, y así modificar la capacitancia.

2.13.5 Antenas

Una antena es un dispositivo formado por un conjunto de conductores que, unido a un generador, sirve para transmitir y recibir ondas de radio, permite la emisión de ondas de radio frecuencia, convirtiendo la onda guiada por la línea de transmisión (el cable o guía de onda) en ondas electromagnéticas que se pueden transmitir por el espacio libre, o que, conectado a una impedancia, sirve para captar las ondas emitidas por una fuente lejana. La antena es un componente importante en cualquier sistema de comunicación inalámbrico tal es el caso de los teléfonos celulares, ya que es una eficiente interfase entre la electrónica en el interior del sistema y el mundo exterior. De acuerdo con la tendencia a utilizar frecuencias cada vez más altas, la tecnología de las antenas necesita tener nuevos requerimientos. Es obvio que el tamaño de las antenas se hace menor mientras la frecuencia se incrementa, ya que para que un conductor radie ondas electromagnéticas debe ser de dimensiones comparables a la longitud de onda (λ) de la frecuencia de la señal a transmitir o recibir [19].

Con la tecnología actual no se ha logrado modificar de forma rápida el patrón de radiación de la antena, además de que al hacerlo se consume mucha potencia, también tiene limitado su alcance en frecuencia, incluso tienen limitado su tiempo de uso debido a la limitada capacidad de carga de las baterías, etc.

Al usar la tecnología MEMS se tienen antenas que tengan una reconfiguración variable, es decir, que se pueda controlar su patrón de radiación dinámicamente, también con esto se puede cubrir diferentes bandas de frecuencia. Las antenas de arreglo de fase multibanda reconfigurables, han llamado mucho la atención últimamente debido al surgimiento del uso de interruptores RF MEMS. Una antena multibanda reconfigurables con interruptores MEMS es representada en la figura 2.22 y es una antena que puede ser dinámicamente reconfigurable en pocos microsegundos, útil en diferentes aplicaciones en diferentes bandas de frecuencia, tales como comunicaciones en la banda L (de 1 a 2 GHz), que precisamente es la banda para aplicación de los teléfonos celulares así como en radares de apertura sintética (SAR) en la banda X (8-12.5GHz) [20,21]

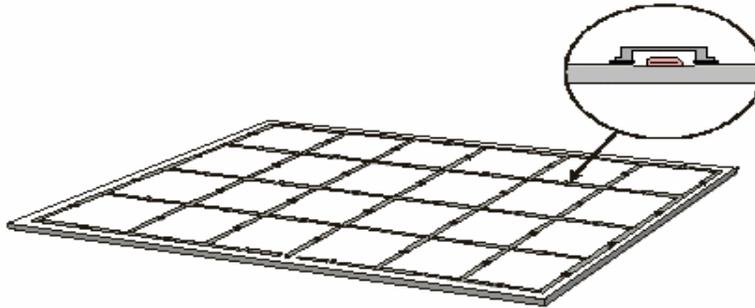


Figura 2.22 Esquema de una antena multibanda reconfigurables con interruptores MEMS

Con lo anterior se aprecia que la tecnología MEMS se puede incorporar a estructuras de antenas para resolver problemas dentro de ellas, además de que ofrece la posibilidad de integración de componentes en un solo chip.

Conclusiones

En este capítulo se habló del los MEMS en el mercado mundial y se concluye que en poco tiempo el desarrollo de está aplicación impactará enormemente en todos los campos de trabajo, sobre todo en una rama que recientemente esta tomando fuerza que son los RF MEMS en los sistemas de telecomunicaciones en específico en la telefonía celular en donde se han alcanzado mayores desarrollos en las últimos tiempos.

Se observó que la telefonía celular es un medio de comunicación que ha evolucionado rápidamente, por ello se han tenido que desarrollar teléfonos que ofrezcan varias funciones en un solo dispositivo. Por lo antes mencionado se concluye que el uso de dispositivos RF MEMS en los teléfonos celulares es muy importante ya que se reduciría espacio y costos en su fabricación y con ello serían cada vez más accesibles a las personas aun precio más bajo y ofreciendo cada vez más funciones.

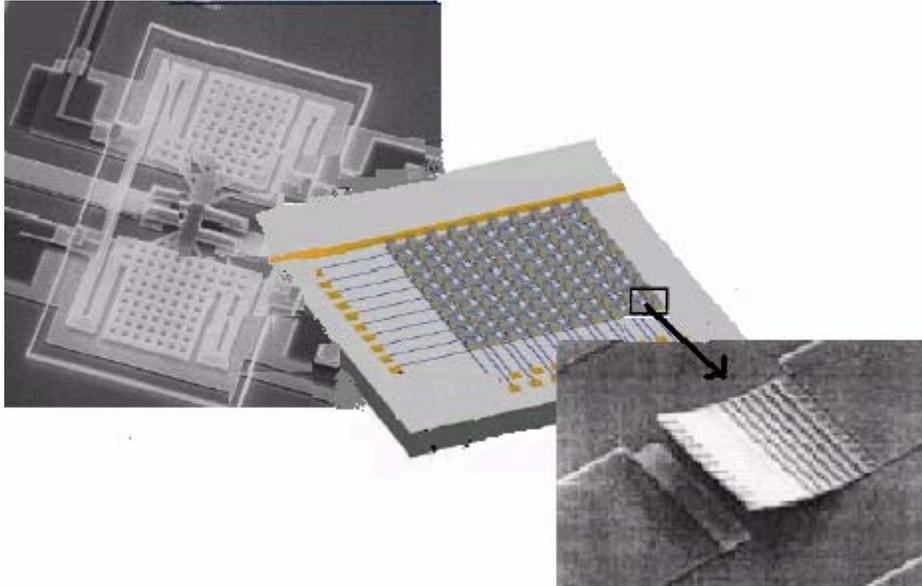
También se aprecia que existen muchos dispositivos RF MEMS que se pueden diseñar dentro de un teléfono celular y con ellos se puede hacer que este aparato sea de mayor calidad, uno de los dispositivos RF MEMS indispensables y de gran importancia en los teléfonos celulares es el interruptor ya que provee varias ventajas que los dispositivos de usados hoy en día no ofrecen y que ayudarían a mejorar la calidad de la comunicación como lo son: dimensiones en el rango micrométrico, bajo voltaje de actuación, alto factor de calidad y bajo consumo de potencia, aunque también existen varios retos que resolver tales como conocer más acerca del envejecimiento de los materiales así como seleccionar un empaquetamiento que ayude a reducir el precio de los dispositivos.

Bibliografía

- [1] Jeremy Bouchaud, Dr. Henning Wicht, WTC, “Witch Technologies Consulting RF MEMS Analysis, Forecasts and Technology Review”, Compound Semi & Microtechnology, p. 26- 29.
- [2] Nadim Maluf, “An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering”, 2000, Editorial Artech House, Norwood, MA, 2000. pp3 -13.
- [3] Nguyen, C.T.-C , “RFMEMS for wireless applications Device”, Junio 2002 Research Conference, 60th DRC. Conference Digest , 24-26 p. 9 -12.
- [4] “Microelectromechanical Systems (MEMS) based advanced high performance Radio Frequency (RF) systems”,
<http://www.intellisensesoftware.com/papers/Microelectromechanical.pdf>.
- [5] “Teléfonos celulares”,
<http://www.yucatan.com.mx/reportajes/reportaje.asp?rx=074>.
- [6] “Historia del teléfono celular”,
<http://www.yucatan.com.mx/especiales/celular/historia.asp>.
- [7] “Evolución e historia de la telefonía celular”,
<http://www.monografias.com/trabajos14/celularhist/celularhist.shtml>.
- [8] “La transmisión analógica y digital”,
<http://neo.lcc.uma.es/evirtual/cdd/tutorial/fisico/Transda.html>.
- [9] EL CODE. “Telefonía celular”, Universidad Inca Gracilazo de la Vega. Facultad de Ingeniería de sistemas y cómputo. Ingeniería en comunicación de datos.pp. 1-30.
- [10] “Tecnologías de acceso celular”,
<http://www.yucatan.com.mx/especiales/celular/tecnologiascelulares.asp>.

- [11] Nyugen. Ian Austen, “Cell pone materials. Tiny resonators may help cell phones shrink”, 31 de Enero del 2002, The New York Times.
- [12] “Pequeños pero con buen espacio”,
http://www.netmedia.info/informationweek/articulos.php?id_sec=13&id_art=3092.
- [13] “Telefonía Celular”,
“Funcionamiento del Teléfono Celular”.
<http://www.electronicanet.com.ar/info/comunic/celular.htm>.
- [14] Héctor J. de los Santos, “ MEMS for RF /Microwave wireless applications: the next wave”- Part I, Julio 2001, Microwave Journal. Horizon House Publications.
- [15] Valluri Rao. “Intel fellow MEMS for wireless integration, Analytical and Microsystems technologies”, 28 de Febrero 2002, Intel Labs. Intel Corporation.
- [16] Patrick Albert y John Costello, “Shrinking RF Circuits Using MEMS—Toward the Single-Chip RF Solution” MEMSCAP.
- [17] Zhixiong Xiao, “Micromachined variable capacitor with wide tuning range”, June 2-6, 2002, Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop Hilton Head Island, South Carolina.
- [18] Jund Zou, Chang Liu, “Development of a wide tuning ranged MEMS tunable capacitor for wireless communication systems”, IEEE 2000. pp 1721-1724.
- [19] Vigía K. Varadan, K.J. Vinoy, K.A. Jose, “RF MEMS and their Applications” Editorial John Wiley & sons, Abril 2003, Pennsylvania State University, USA, pp.343-363.
- [20] Brown, E.R., “ RF-MEMS switches for reconfigurable integrated circuits”. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1998. 46(11, pt.2): p. 1868-80.
- [21] Loo, R.Y., et al. “ Reconfigurable antenna elements using RF MEMS switches”. in Proceedings of the 2000 International Symposium on Antennas and Propagation, 2000.

Capítulo 3. Interruptores de Radiofrecuencia.



Como ya se ha mencionado anteriormente, los microsistemas electromecánicos (MEMS) se desarrollaron décadas atrás, en las cuales se han integrado en muchos diseños, tal es el caso de microinterruptores de radiofrecuencia (RF), cuyos primeros diseños se realizaron aproximadamente en 1971 [1].

En general se puede decir que un interruptor RF MEMS óptimo es aquel con bajas pérdidas de inserción, alto aislamiento, tiempo de switcheo corto, y vida operacional de millones de ciclos.

3.1 Comparación de Interruptores PIN, FET y MEMS

Actualmente los dispositivos de switcheo que se utilizan comúnmente son diodos PIN y FET sin embargo los interruptores MEMS ofrecen infinidad de ventajas en el área de radiofrecuencia, por lo que se considera una buena opción de trabajo para aplicarlos a los teléfonos celulares, a continuación se dará una breve explicación sobre las ventajas y desventajas de los interruptores diseñados con tecnología MEMS.

3.1.1 Ventajas de los interruptores MEMS sobre los PIN y FET

Enseguida se observa una tabla en donde se pueden apreciar las características para este tipo de dispositivos en tecnología MEMS en comparación con las tecnologías PIN y FET [4].

CARACTERÍSTICA	RF MEMS	PIN	FET
Voltaje [V]	30-80	+/- 3-5	3-5
Corriente [mA]	0	3-20	0
Potencia de consumo[mW]	0.05-0.1	20-200	0.05-0.02
Tiempo de switcheo [μ s]	1-30	0.01-0.1	0.01-0.1
C_{up} (Serie)[fF]	1-6	20-50	30-60
R_{on} (DC_Contact [Ω])	1-2	2-4	4-6
C_{up} (Capacitivo) [fF]	20-50	N/A	N/A
R_{sw} (Capacitivo,[Ω])	0.05-0.25	N/A	N/A
Frecuencia de corte[GHz]	20-80	1-4	3-5
Aislamiento[1-4 GHz]	Alta	Alta	Media
Aislamiento [30-40 GHz]	Alta	Media	Baja
Aislamiento[70-100 GHz]	Alta	Media	N/A
Pérdidas [dB]	0.05-0.3	0.4-1.2	0.4-1.6
Potencia de manejo [W]	0.01-0.1	0.1-10	0.1-3
Intermodulación [dBm]	+60-80	+27-45	+27-45

Tabla 3.1. Tabla comparativa entre las características de interruptores MEMS, PIN y FET

Los interruptores RF MEMS ofrecen un desempeño substancialmente más alto que los diodos PIN o los transistores de efecto campo FET ya que como se ve, usando esta tecnología se puede lograr la reducción de espacio, el consumo de baja potencia y además tener pérdidas muy bajas. Pero también se cuentan con ciertas desventajas que son: tiempo de respuesta relativamente baja (2 a 300 μ s), esta limitada la potencia de manejo (< 50mW), y el empaquetado debe ser especial.

En general las ventajas de los interruptores MEMS en comparación con el diodo PIN o bien con los interruptores FET son [2]:

- 1 **Bajo Consumo de Potencia:** La actuación electrostática requiere 20-80 V consumiendo cierta cantidad de corriente, disipando una potencia muy baja (10-100 NJ por ciclo de switcheo).
- 2 **Aislamiento muy Alto:** Los interruptores RF MEMS son fabricados con aberturas de aire, y por consiguiente, tienen una capacitancia de (2-4 fF) resultando excelente en el aislamiento a frecuencias de 0.1-40 GHz.

- 3 **Pérdidas de inserción muy bajas:** Tienen pérdidas de inserción de $-0.1 \text{ dB}^{[12]}$ a 40 GHz.
- 4 **Baja intermodulación:** Los interruptores MEMS son dispositivos lineales y presentan muy pocos productos de intermodulación. Su comportamiento es alrededor de 30 dB los cuales superan a los interruptores PIN y FET.
- 5 **Costo muy bajo:** Los interruptores RF MEMS se fabrican con técnicas de micromaquinado de superficie y pueden construirse en cuarzo o Pyrex^[13], a baja temperatura con procesos mecánicos de calidad y alta resistividad, fabricados especialmente de silicio o sustrato de GaAs.

3.1.2 Desventajas de los MEMS sobre PIN y FET

Sin embargo, los interruptores RF MEMS también tienen ciertas desventajas:

- 1 **Velocidad de switcheo relativamente baja:** En interruptores RF MEMS la velocidad de switcheo es alrededor de 2-40 μs . Ciertas comunicaciones y los sistemas del radar requieren velocidades mayores, por lo que se verían limitados a trabajar en estas aplicaciones.
- 2 **Potencia de manejo baja:** La mayoría de los interruptores de MEMS no pueden manejar más de 20-50 mW.
- 3 **Manejo de alto voltaje:** Los interruptores MEMS electrostáticos requieren 20-80 V para un funcionamiento adecuado, y esto hace necesario un voltaje de conversión cuando se usan sistemas de la telecomunicación portátiles.
- 4 **Fiabilidad:** Los interruptores MEMS trabajan en un rango de 0.1-10 mil millones de ciclos. Sin embargo, muchos sistemas requieren interruptores con 20-200 mil millones ciclos.
- 5 **Empaquetamiento:** Los interruptores MEMS necesitan ser empaquetados en las atmósferas inertes (nitrógeno, argón, etc.) y en humedad muy baja, así como con procesos herméticos. Los costos de empaquetado son actualmente altos, y la propia técnica del empaquetamiento puede que adversamente afecte la confiabilidad de los interruptores MEMS.

[12] **dB.** El decibel es una unidad de medida relativa. En audiofrecuencias un cambio de 1 decibel (dB) es apenas (si hay suerte) notado. Si se tiene dos valores de potencia diferentes: P1 y P2, y se desea saber cuales el cambio de una con respecto a la otra, se utiliza la siguiente fórmula

- $\text{dB} = 10 \text{ Log } P2 / P1$ (si lo que se comparan son potencias) ó

- $\text{dB} = 20 \text{ Log } V2 / V1$ (si lo que se comparan son voltajes)

Si V2 es el voltaje de salida de un amplificador y V1 es el voltaje de entrada. La ganancia de voltaje será $V2 / V1$.

Un incremento de 6 dB siempre indica una duplicación de las magnitudes. De la misma manera, un incremento de 20 dB representa un cambio en el nivel con un factor de diez.

[13] **Pyrex.** Vidrio resistente a los agentes químicos y a los choques térmicos.

3.2 Tipos de interruptores MEMS

Los interruptores RF MEMS se pueden clasificar de diversas formas, sin embargo de acuerdo a la investigación que se realizó consideramos que una buena forma de clasificarlos es de acuerdo al tipo de contacto y configuración eléctrica. [1].

3.2.1 Clasificación de interruptores MEMS según el tipo de contacto

De acuerdo al tipo de contacto existen dos tipos de diseños, que son el contacto metal-metal y el tipo metal-aislante-metal.

Interruptores de contacto metal-metal (óhmico o de contacto directo)

En los interruptores de tipo metal-metal, también llamado óhmicos o de contacto directo, la señal es propagada cuando los dos contactos de metal están juntos y la corriente eléctrica pasa a través de la interfase establecida, este tipo de interruptor conmuta señales de DC hasta señales de RF [6]. Uno de los tipos de interruptores de contacto directo es el

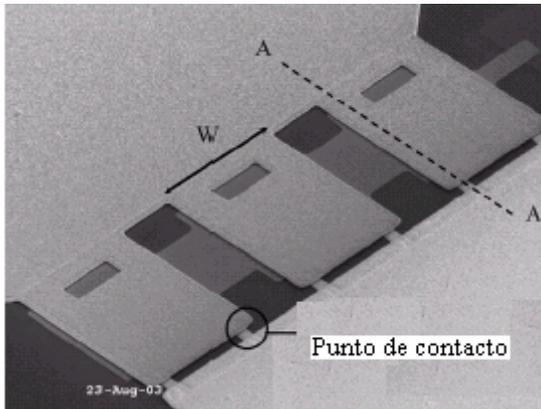


Figura 3.1 Interruptor de contacto directo

interruptor de tipo cantiliver (también el interruptor capacitivo puede usar esta estructura), donde la actuación se da en el mismo plano de la línea de transmisión.

Entre sus principales características se puede citar que tienen pequeñas capacitancias en circuito abierto y que pueden operar desde 0.01 hasta 40GHz.

En corto circuito el interruptor de contacto directo se convierte en un resistor en serie con una resistencia de $0.5-2\Omega$ dependiendo del metal de contacto usado. [7]

Para los interruptores de contacto directo se ha encontrado que trabajan con bajas pérdidas

por lo cual resulta útil su uso para filtros en un gran rango de sintonización.

Entre sus ventajas se encuentra que son compactos, fáciles de fabricar, confiables a bajas potencias, y tienen poca o nula sensibilidad a la carga dieléctrica. Entre sus desventajas se encuentra la limitada confiabilidad que tienen en la presencia de señales de alta potencia [8]. Además las fallas de estos dispositivos son de tipo resistivo [2]. Su confiabilidad es limitada por el daño, picaduras (pitting) y endurecimiento del área de contacto debido a la fuerza de impacto entre la viga y el fondo del metal. Otros mecanismos de falla son debidos a depósitos orgánicos y contaminación alrededor del área de contacto, pero estos pueden ser atenuados por un ambiente de empaquetamiento limpio. Estas fallas muestran un incremento en la resistencia de contacto de $1-2\Omega$ a $4-10\Omega$ o más. Las fallas resistivas ocurren repentinamente y de 100 millones de ciclos de switcheo la falla ocurre en los últimos 50, 000- 200, 000.

No existe una definición específica para la falla resistiva, pero una buena suposición es cuando la resistencia de contacto llaga a ser más grande que $4-5 \Omega$ (con resultados de pérdidas de inserción).

La confiabilidad de los interruptores de contacto puede mejorarse adaptando el voltaje de manejo del interruptor y reduciendo la energía de impacto en el área de contacto.

Para mejorar la capacidad de potencia de manejo de estos interruptores se requiere de un conocimiento sobre los contactos tales como el incremento de la temperatura en el contacto directo así como de los efectos eléctricos y térmicos de la resistencia de contacto. La máxima temperatura de la viga depende enormemente de la disipación de potencia en los contactos y de la casi nula contribución debido a corrientes en el resto del interruptor.

Además la temperatura máxima se encuentra excediendo los límites de suavidad (softening) del metal por un rango significativo de valores térmicos y eléctricos de la resistencia de contacto. [9]

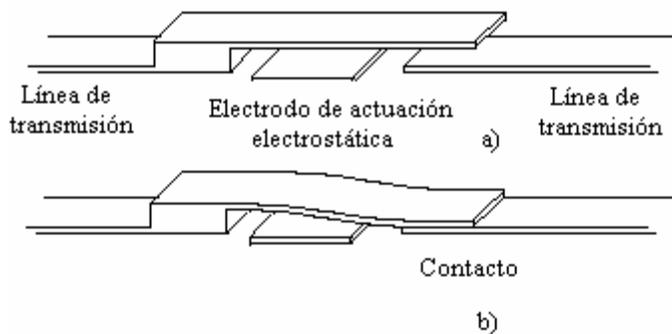


Figura 3.2 Interruptor tipo cantiliver a) estado abierto, b) estado cerrado

superficies de contacto. Cuando las superficies están en contacto, éste ocurre con asperezas dispersas en la superficie. Como resultado, las superficies tienen el contacto real encima de una porción pequeña de su aparente área de contacto. Así el calor y la corriente son restringidos a través del contacto creando una resistencia de contacto térmica y eléctrica.

La resistencia de contacto eléctrica es independiente del aparente área de contacto, está depende solo de la fuerza de contacto y en menor grado de la temperatura y la presencia de materiales absorbidos en la superficie de contacto.

Por otro lado, el calor puede fluir a través del contacto ya sea a través de las asperezas del contacto o a través del aire en el hueco entre las porciones de no contacto de la superficie. Así la resistencia de contacto térmica sí depende del aparente área de contacto y la resistencia de contacto eléctrica depende de la fuerza de contacto, de la presencia de materiales absorbidos y de la temperatura.

En la figura 3.2 se observa un interruptor de metal tipo cantiliver donde la viga hace contacto con la línea de transmisión, cuando la viga está en alto la línea está abierta y no existe propagación de la señal y cuando la línea está abajo entra en contacto con el electrodo, fluye corriente y la señal se propaga.

La resistencia de contacto es causada por la aspereza de las

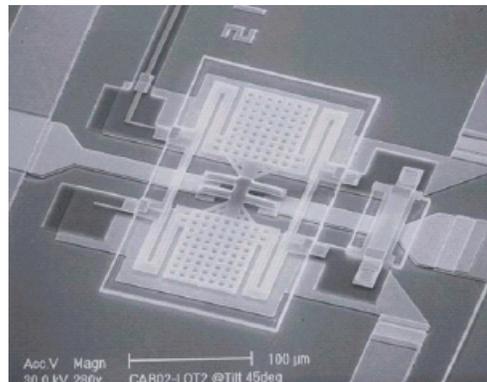


Figura 3.3. Interruptor de tipo contacto

Interruptores de tipo metal-aislante-metal, (capacitivos o de contacto indirecto)

Por otro lado entre los interruptores de tipo metal-aislante-metal, llamados también capacitivos o de contacto indirecto, se pueden encontrar los microinterruptores de membrana.

En el interruptor de membrana capacitivo, la actuación es en el plano perpendicular a la línea de transmisión.

En los microinterruptores de contacto directo se utiliza la conexión mecánica de dos superficies metálicas para actuar en conexión de baja resistencia. Sin embargo, en dichos interruptores microelectromecánicos existen fuerzas de pegosidades y microsoldaduras que son proporcionales con las fuerzas de restauración del interruptor. Como resultado, estos interruptores operan con poca confiabilidad o son sujetos a fallas prematuras.

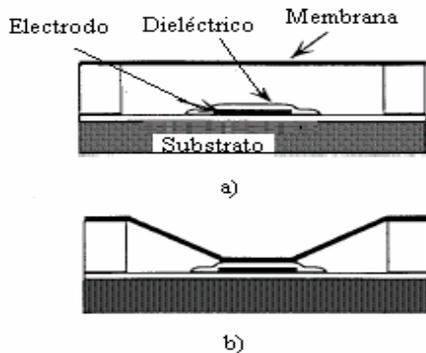


Figura 3.4 Interruptor de membrana capacitivo
a) estado abierto, b) estado cerrado

Por lo anterior, los microinterruptores de membrana capacitivos son diseñados para eliminar la resistencia de contacto asociado con contactos óhmicos y con ello se disminuyen significativamente las pérdidas resistivas en el dispositivo [3] y se reducen fenómenos de pegosidades.

El diseño y fabricación de un interruptor de membrana capacitivo [3] consiste en una membrana delgada metálica suspendida sobre un dieléctrico colocado en el centro del interruptor, encima de un electrodo, tiene dos estados, actuación y no-actuación, dependiendo de la aplicación de la fuente. Si se aplica una diferencia de potencial hay

una atracción entre la membrana y el electrodo y esto provoca que la membrana se deflece al centro acercándose cada vez más al dieléctrico.

El dieléctrico sirve para prevenir ciertas pegosidades entra ambas placas metálicas ya que este efecto disminuye el tiempo de vida de los dispositivos [3].

Estos interruptores tienen una velocidad de switcheo en estado alto de menos de 6 μ s y una velocidad de switcheo en estado bajo de menos de 4 μ s, el voltaje de switcheo es alrededor de 50V. Los valores de la capacitancia cuando el interruptor está en circuito abierto es de unos cuantos femtoFaradios, pero cuando se aplica un voltaje entonces el metal- dieléctrico metal se juntan y se incrementa la capacitancia entre ellas, los valores de capacitancia cuando el interruptor está en corto circuito son de alrededor de 3 a 4 pF.

Cuando la reactancia capacitiva es muy grande entonces el interruptor está en estado abierto debido a la alta impedancia y cuando es muy pequeña (casi un corto para altas frecuencias) el interruptor se encuentra cerrado, de esta forma es como se aseguran las condiciones de corto circuito y circuito abierto.

Su fabricación es sencilla, son pequeños en comparación con los interruptores de contacto directo, ya que estos últimos necesitan de un gran actuador para lograr fuerzas de contacto y de liberación necesarias.

A pesar de que no existen pegosidades entre metal-metal como en los interruptores de contacto directo, la confiabilidad de los interruptores capacitivos es dominada por las pegosidades entre la capa de dieléctrico y el metal debido al gran área de contacto de el interruptor (aproximadamente $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$). La mayor fuerza de pegosidades es debido a los efectos de carga en la capa del dieléctrico de nitruro de silicio y dependiendo de la polaridad de la carga inyectada, este puede causar que el interruptor se pegue en la posición de estado bajo o bien resulte en el incremento en el voltaje de actuación para que el interruptor no pueda ser utilizado más [2].

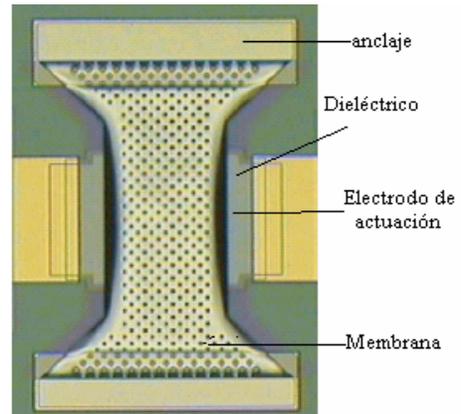


Figura 3.5 Interruptor MEMS de tipo capacitivo configuración en paralelo

El campo eléctrico puede ser tan grande como $3\text{-}5\text{ MV/cm}$ en la capa del dieléctrico, lo cual resulta en un mecanismo de inyección de carga.

La inyección de carga es exponencial con el voltaje, y una reducción en el voltaje de actuación por 6 V puede resultar en incremento de 10x del tiempo de vida del interruptor MEMS. Esto no conduce automáticamente a un diseño de interruptores de baja constante de elasticidad y de bajo voltaje ($5\text{-}10\text{ V}$), ya que los interruptores tienen bajas fuerzas de restauración.

Un voltaje de actuación de $25\text{-}30\text{V}$ debe ser el más adecuado. Además es bien conocido que el dióxido de silicio conserva una densidad mucho más baja que el nitruro de silicio y esto puede resultar en menor carga cuando se utiliza los interruptores MEMS de tipo capacitivo. La desventaja que se paga es una disminución de la capacitancia en estado bajo debido a la baja constante de dieléctrico del material óxido.

Una vez que la inyección de carga es resuelta, la confiabilidad es limitada por las pegosidades debidas a la humedad y a contaminantes orgánicos debajo y alrededor del interruptor MEMS.

En general para los interruptores de tipo metal-metal, las fallas son de tipo resistivo y para los interruptores capacitivos son debido a las pegosidades.

3.2.2 Clasificación de interruptores MEMS según la configuración eléctrica.

Tanto los interruptores de tipo membrana capacitivos como los de contacto metal-metal se pueden clasificar en serie o en paralelo de acuerdo al tipo de configuración eléctrica con el que son diseñados, a continuación se muestra una tabla en la cual se puede observar el rango de frecuencias de trabajo:

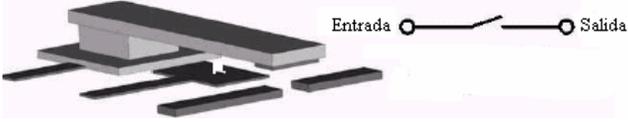
CONFIGURACIÓN ELÉCTRICA	TIPO DE CONTACTO	RANGO DE FRECUENCIAS DE TRABAJO
<p>Serie</p> 	metal- metal	DC- 50 GHz
	capacitivo	10- 50 GHz
<p>Paralelo</p> 	metal-metal	DC-60 GHz
	capacitivo	10-120 GHz

Tabla 3.2 Frecuencias de trabajo de los interruptores MEMS de acuerdo a su configuración eléctrica

En general las pegosidades no son un problema para interruptores en serie para bajas potencias, ya que, para la mayoría de los diseños, el electrodo de actuación, no necesita tocar la viga micromaquinada.

Finalmente cabe señalar que a diferencia de los interruptores con configuración en serie, en las configuraciones en paralelo, la estructura de actuación es la misma que la estructura de switcheo [9].

3.3 Principios del diseño y análisis de interruptores RF MEMS.

La energía eléctrica es fácilmente transportada por los conductores, los cuales pueden ser controlados por interruptores. En un circuito eléctrico simple, la principal parte es la fuente de energía eléctrica, una carga o un dispositivo de salida y una trayectoria para el flujo de corriente. Si alguno de los requerimientos no se satisfacen, la corriente no puede fluir en el circuito y la energía de la fuente no puede ser entregada al dispositivo de salida. Para el diseño y análisis de interruptores MEMS es necesario considerar los principales parámetros utilizados para el diseño de interruptores RF, los cuales son mencionados a continuación [15]:

Tiempo de transición:

El tiempo de transición es una medida de velocidad con la cual la posición de un interruptor puede ser accionada (togging). Este es definido como el tiempo requerido para que la señal RF de salida aumente de 10 a 90% de su valor para la transición de apagado a encendido y de 90 % al 10 % para la transición de encendido a apagado. En otras palabras, es el tiempo tomado por el voltaje de salida para cambiar dentro de 1 dB del estado final. En un

interruptor mecánico simple, el tiempo de transición es el tiempo requerido por el contacto móvil para dejar un contacto fijo y golpear el contacto fijo opuesto.

Velocidad de switcheo:

La velocidad de switcheo representa el tiempo para activación (toggling) de un estado del interruptor a otro. Sin embargo, en este caso, el tiempo es medido desde el 50 % sobre el voltaje de control al 90% del desarrollo de RF cuando el interruptor cambia del estado de apagado a encendido. Similarmente, cuando el interruptor cambia al estado de apagado, el tiempo es medido hasta que el voltaje de la señal de RF alcanza el 10 % del original. Por lo tanto la velocidad de switcheo es el tiempo requerido por el interruptor para responder en la salida debido al cambio en el voltaje de control.

Potencia de manejo de RF

La potencia de manejo de RF es una medida de cómo un interruptor pasa eficientemente la señal de RF. Este es comúnmente especificado en términos de un punto de compresión de 1 dB. Es comúnmente asumido que el nivel de potencia de salida sigue a la potencia de entrada a una razón lineal. Pero en muchos dispositivos existe una potencia máxima sobre la cual esta linealidad no se mantiene. El punto de compresión de 1 decibel es definido como el máximo nivel de potencia de entrada a la cual la potencia de salida difiere por 1 dB con respecto a la linealidad. El punto de compresión de 1 dB y la potencia de manejo de muchos dispositivos tales como los diodos PIN son funciones de la frecuencia.

Acoplamiento de Impedancia

El acoplamiento de impedancia es un elemento crítico en todos los diseños en alta frecuencia. El dispositivo conmutable debe ser acoplado en ambos extremos: entrada y salida y en ambos estados: encendido y apagado del interruptor. Un componente acoplado indebidamente resulta en reflexiones no deseadas dentro del circuito, las cuales pueden causar un daño mayor a los otros sistemas. Aunque un acoplamiento ideal es raramente alcanzado, se debe tomar cuidadosamente para disminuir las reflexiones dentro de los límites aceptables.

Ancho de banda disponible.

Aunque la mayoría de los sistemas de switcheo no tienen un límite en la frecuencia más baja de operación, tienen un límite en la frecuencia superior. Para dispositivos semiconductores esto es debido al tiempo finito en la movilidad de la portadora. Las pérdidas incurridas en las resistencias y reactancias parásitas son la principal causa que limita el desarrollo de interruptores electromecánicos en altas frecuencias.

Pérdidas de inserción y de retorno.

Las pérdidas de inserción de un dispositivo RF es una medida de su eficiencia para la transmisión de la señal. En el caso de un interruptor, estas pérdidas son especificadas solo cuando su estado es tal que la señal se está transmitiendo o cuando el interruptor está en estado de encendido y son especificadas en términos del coeficiente de transmisión S_{21} en decibeles, entre las terminales de entrada y salida del circuito del interruptor. Una de las metas del diseño para la mayoría de los interruptores de RF es minimizar las pérdidas de inserción, las cuales tienden a disminuir cuando se incrementa la frecuencia para la mayoría de los sistemas de conmutación de estado sólido. Comparado con esto, los interruptores RF MEMS pueden ser diseñados para operar con unas pérdidas de inserción pequeñas a algunos GigaHertz. Las pérdidas resistivas a bajas frecuencias y el efecto piel^[14] a altas frecuencias son las mayores causas de pérdidas.

Por otro lado, las pérdidas de retorno son las pérdidas debidas a la reflexión de las señales transmitidas que se produce en las discontinuidades existentes en cualquier lugar de un enlace o canal que contribuyen a crear una señal indeseada en el extremo cercano del sistema. Controlar las pérdidas de retorno resulta fundamental para el rendimiento del sistema.

Para el caso de un interruptor como un elemento empotrado en una línea de transmisión en estado abierto o cerrado (caracterizado por una impedancia compleja Z) tiene una efectividad en frecuencias de microondas parametrizada por pérdidas de retorno S_{11} y pérdidas de inserción S_{21} .

Aislamiento

El aislamiento de un sistema de conmutación esta especificado cuando no se está transmitiendo una señal. Este es también medido como S_{21} entre las terminales de entrada y salida del circuito conmutable, bajo un estado de no transmisión o cuando el interruptor está en estado apagado. Un gran valor (en decibeles) indica un muy pequeño enlace entre las terminales de entrada y salida, es decir no hay acoplamiento entre la entrada y la salida. Así la meta del diseño es maximizar el aislamiento. En los interruptores RF MEMS el aislamiento puede ser disminuido como un resultado de la proximidad de acoplamiento entre la parte movable y la línea de transmisión estacionaria, es decir, aproximando los elementos de conmutación y la línea de transmisión debido a que con ello se inducen corrientes eléctricas entre dichas partes.

Resistencia en serie.

En muchos casos, el interruptor es conectado en serie con una línea de transmisión. Algunas resistencias ofrecidas por el interruptor durante la señal de transmisión (estado abierto) resultarían en pérdidas del nivel de la señal. Una forma de representar esto, especialmente a bajas frecuencias es usando resistencias en serie con el interruptor mientras

[14] **Efecto piel.** Es la descripción dada al fenómeno donde campos electromagnéticos decaen rápidamente con la profundidad dentro de un buen conductor en altas frecuencias.

está conduciendo. A altas frecuencias, esta es frecuentemente representada por pérdidas de inserción

Voltaje de actuación.

Todos los sistemas automáticos requieren una señal de control para la actuación dependiendo del esquema y su eficiencia, estos voltajes varían significativamente.

En un interruptor es el voltaje necesario para efectuar la conmutación del interruptor.

Aunque este no es un gran problema con los sistemas de conmutación basados en semiconductores, uno de los objetivos del diseño del estado del arte de los sistemas de conmutación electromecánicos es disminuir estos voltajes a niveles compatibles con el resto del circuito.

Ciclo de vida.

Este no es un problema importante en los interruptores basados en semiconductores, pero en todos los esquemas que contienen partes móviles, el tiempo de vida debe ser considerado. El rompimiento de aquellos componentes móviles debidos a la fatiga y los efectos del ambiente limita la duración de los otros sistemas.

Frecuencia de resonancia.

Las partes móviles en los interruptores mecánicos tienen frecuencias de resonancia que pueden ser modeladas en términos de su constante de rigidez efectiva y su masa resonante. A esta frecuencia, la energía potencial y la energía cinética tienden a resonar. Esta frecuencia limita la máxima tasa a la cual el interruptor puede ser activado, pero esta virtualmente no se refiere a la frecuencia de las señales de RF que el interruptor soporta.

En los circuitos eléctricos, la resonancia ocurre cuando la reactancia de un inductor equivale a la reactancia de un capacitor para una frecuencia dada. En un circuito resonante en serie, la corriente va a estar a su máximo, ofreciendo una mínima impedancia y viceversa en la resonancia en paralelo.

En general para los dispositivos de alta frecuencia se define la frecuencia de resonancia mediante una expresión que relaciona una capacitancia y una inductancia, por ejemplo, existen diversos tipos de interruptores capacitivos MEMS en guía de onda coplanar (CPW), la cual es una línea de transmisión cuya característica de aislamiento usualmente solo depende de las capacitancias formadas entre el conductor central y la viga de posición baja (C_D). Sin embargo la geometría del interruptor introduce una inductancia parásita (L) la cual incrementa el aislamiento, por lo que la frecuencia de resonancia f_R está dada por [14]:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

(3.1)

Actuación electrostática

Como se menciona en el capítulo 1 la atracción con la que un interruptor se abre o se cierra debido a la actuación electrostática puede ser representada con una ecuación que nos describe la energía que está almacenada en el plato paralelo y que hace que éste se deflecte [12,13].

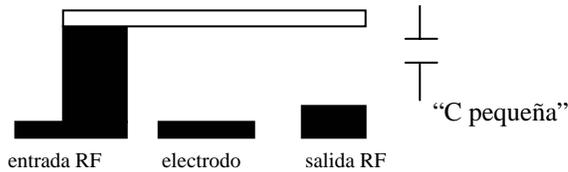


Figura 3.6 Microinterruptor abierto

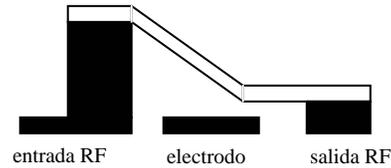


Figura 3.7 Microinterruptor cerrado

A continuación se mostrara como es que en este tipo de actuación la viga se restaura, se inicia con la capacitancia entre dos platos paralelos, su ecuación es la siguiente:

$$C = \frac{\epsilon A}{d}, \quad (3.2)$$

donde:

ϵ - es la permitividad del medio	[F/m]
A - área de las placas	[mm ²]
d - distancia entre las placas	[mm]

Utilizando una energía que es la electrostática potencial la cual está expresada como:

$$U = \frac{1}{2} CV^2. \quad (3.3)$$

Esta energía representa la energía requerida para evitar que las placas paralelas que se encuentran cargadas con signo contrario choquen debido a la fuerza de atracción de Coulomb que se expresa como:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{qTqB}{d^2}. \quad (3.4)$$

Teniendo en cuenta que qB y qT son masas iguales pero cargadas con signo contrario, la fuerza se puede representar como el gradiente negativo de la energía potencial que hay entre los platos paralelos, obteniendo así las expresiones:

$$F = -\nabla U. \quad (3.5)$$

$$U = \frac{\varepsilon AV^2}{2d} \quad (3.6)$$

Sustituyendo U en la ecuación (4), finalmente se obtiene:

$$F = \frac{\varepsilon AV^2}{2d^2}, \quad (3.7)$$

donde:

ε : permitividad	[F/m]
A : área del plato	[μm^2]
V : voltaje aplicado a las placas paralelas	[Volts]
d : distancia entre las dos placas	[μm]

La expresión obtenida anteriormente representa la fuerza que se debe aplicar en el plato paralelo para evitar así que los platos choquen en el centro, además se pueden observar algunos detalles, por ejemplo que la fuerza se incrementa linealmente con respecto al área, y también se incrementa cuadráticamente con el voltaje y se decrementa cuadráticamente con la distancia entre los dos platos paralelos. Con lo anterior se puede verificar que al aplicar un voltaje a los platos paralelos hace que se muevan o actúen sus placas paralelas.

Para el diseño del microinterruptor (cantilever) se podría suponer que al pasar el tiempo se puede presentar el efecto de pegosidades (Stiction), este efecto limitaría el tiempo de vida del dispositivo. Pero, para el caso actual esto no es así, ya que la estructura utiliza un puente de aire que hace que el interruptor se abra y se cierre evitando así este tipo de fallas.

Para comprender como es la actuación de deflexión que presenta el cantilever debido a la fuerza electrostática, la deflexión está en función de las propiedades de su estructura y material, también se presenta una ligera deflexión cuando la distribución de sus cargas no es de manera uniforme como se muestra en la Figura 3.8.

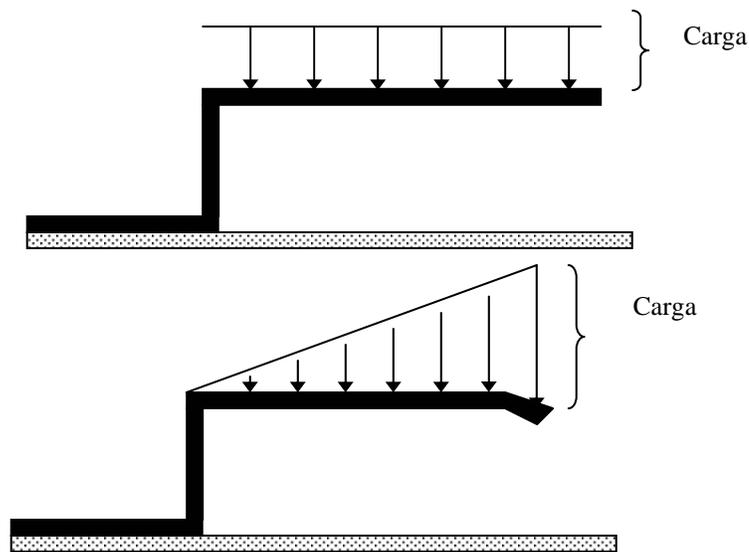


Figura 3.8 Comportamiento electrostático de un cantilever

Como se observa, la carga concentrada en el extremo de la viga es resultado de la deflexión y está dada por:

$$\delta_T = \left[\frac{x^2}{6EI} \right] (3L - x)bd(x)dx, \quad (3.8)$$

donde:

b es el ancho de la viga
 E es el módulo de Young^[15]
 I es la inercia
 X es la posición donde se aplica la fuerza
 L es la longitud de la viga.

$$q(x) = \frac{\varepsilon}{2} \left(\frac{V}{d - \delta(x)} \right)^2. \quad (3.9)$$

Las fuerzas están distribuidas a lo largo de la viga y la pequeña deflexión que sufre se puede representar como una integración desde $x = 0$ hasta $x = L$ (largo de la viga):

$$\delta_T = b \int_0^L \frac{3L - x}{6EI} x^2 q(x) dx, \quad (3.10)$$

donde la deflexión de la viga en cualquier punto de x , se puede representar como:

$$\delta(x) = \left(\frac{x}{L} \right)^2 \delta_T, \quad (3.11)$$

el resultado de la integral para darnos una carga normalizada está expresado como:

$$I = \frac{\varepsilon b L^4 V^2}{2EI d^3}. \quad (3.12)$$

La deflexión del cantilever puede expresarse de forma normalizada de la siguiente forma:

$$\Delta = \frac{\delta_T}{d}. \quad (3.13)$$

[15] **Módulo de Young.** Es el cociente entre el esfuerzo y la deformación. Es la fuerza necesaria, por unidad de superficie, para producir un estiramiento de una cuerda igual a su longitud inicial.

Expresando todo en términos de esta deflexión, la carga normalizada obtenida al evaluar la integral está dada por:

$$I = 4\Delta^2 \left[\left(\frac{2}{3(1-\Delta)} \right) - \frac{\tanh^{-1} \sqrt{\Delta}}{\sqrt{\Delta}} - \frac{\ln(1-\Delta)}{3\Delta} \right]^{-1}. \quad (3.14)$$

Cuando se estudia el comportamiento de la distribución de cargas del cantilever, se puede observar que la operación puede volverse inestable debido a la concentración de fuerzas cuando se aplica cierto voltaje y la deflexión puede ser más allá de la permitida por el mismo diseño.

Capacitancias en estado abierto y cerrado

En un interruptor de tipo capacitivo, cuando no se aplica voltaje, la membrana se encuentra sin actuar, por lo que la capacitancia en estado abierto es muy baja y se expresa como [3]:

$$C_{off} = \frac{1}{\frac{h_D}{\epsilon_D A} + \frac{h_a}{\epsilon_0 A}}, \quad (3.15)$$

donde:

C_{off} = Capacitancia en el interruptor en estado abierto

ϵ_D = Permitividad del dieléctrico

ϵ_0 = Permitividad del aire.

h_D = espesor del dieléctrico

h_a = espacio entre membrana y el dieléctrico en modo abierto

A = área de la membrana suspendida.

donde la capacitancia de estado abierto es de femtofarads.

Cuando se aplica un voltaje, el metal- dieléctrico-metal se juntan y aumenta la capacitancia entre ellas, por lo que la capacitancia en estado bajo es;

$$C_{on} = \frac{\epsilon_D A}{h_D},$$

(3.16)

donde:

C_{on} = Capacitancia en el modelo cerrado.

ϵ_D = Permitividad del dieléctrico.

A = área de la membrana suspendida.

h_D = espesor del dieléctrico.

Linealidad de los interruptores MEMS

Una ventaja importante de los interruptores MEMS es su linealidad, a diferencia de interruptores electrónicos hechos de semiconductor-metal o uniones tipo p-n, el área de contacto de los interruptores MEMS es perfectamente lineal. Esto significa que interruptores MEMS bien diseñados no crean no linealidades o distorsión tales como armónicas o intermodulaciones. En muchos casos, estas no linealidades no se pueden medir [16].

Conclusiones

En este capítulo se puede concluir que los interruptores RF MEMS son dispositivos que cuentan con grandes ventajas con respecto a los interruptores PIN y FET, entre ellas que casi no consumen corriente y por ello el consumo de potencia teóricamente es nulo, además tienen alto aislamiento, bajas pérdidas y alta linealidad, aunque también poseen desventajas que limitarían el uso de estos dispositivos, una de ellas es la lentitud ya que en algunas aplicaciones se requiere de una velocidad de respuesta muy rápida cerca de décimas o centésimas de microsegundo.

Se describió una clasificación de los interruptores RF MEMS según el tipo de contacto, y se concluye que si se desea conmutar señales desde DC hasta señales de RF se necesita utilizar interruptores de tipo contacto metal-metal de la misma manera que si se necesita trabajar con bajas potencias, sin embargo hay que tener presente que su confiabilidad es limitada principalmente por factores relacionadas con el daño en área de contacto pero que pueden ser disminuidos por un ambiente de empaquetamiento limpio.

Por otro lado, los interruptores de tipo metal-aislante-metal son una buena opción para disminuir algunas pegosidades con lo cual se incrementa su confiabilidad, además al no ser de contacto directo, eliminan la resistencia de contacto y con ello se disminuyen las pérdidas resistivas en el dispositivo.

También se mencionaron los principales factores que son necesarios para realizar un diseño óptimo de un interruptor MEMS.

Hay que tener presente la importancia de conocer la relación que existe entre los parámetros de diseño necesarios para obtener las características deseadas en el dispositivo a utilizar, por ejemplo se concluye que para un interruptor de tipo electrostático la capacitancia es directamente proporcional al área de las placas.

Además que el voltaje de actuación es inversamente proporcional al área y directamente proporcional a la constante de rigidez.

Por lo antes mencionado si se desea tener un voltaje de actuación bajo se debe considerar un área grande dentro de los límites de los MEMS (no tan grande para contar con un tiempo

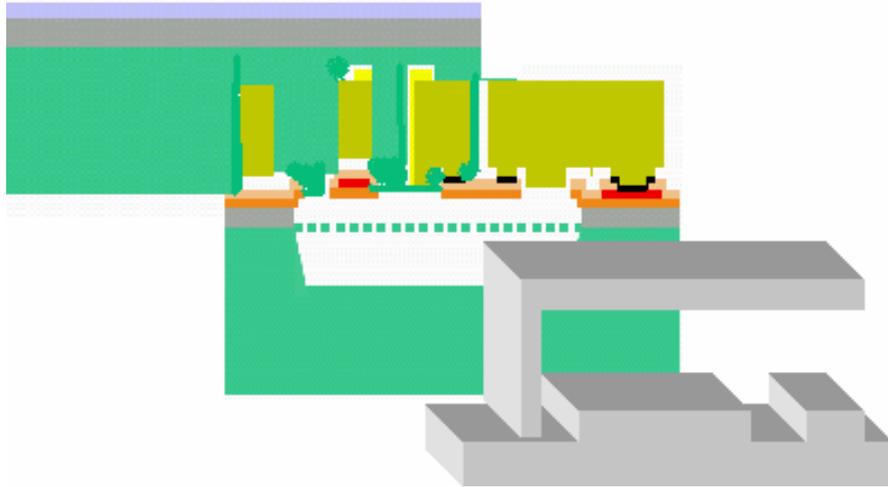
de conmutación bajo) y una baja constante de rigidez de la viga (limitada principalmente por la forma, el material y el proceso de fabricación).

Bibliografía

- [1] Bruce Liu , “High performance and Low performance and Low cost Capacitive Switches for RF Switches for RF Applications”, University of California at Santa Barbara Toyon Research Corporation DARPA Fame.
- [2] Gabriel M. Rebeiz, Jeremy B. Muldavin, “RF MEMS Switches and switch circuits”. Diciembre 2001, IEEE Microwave magazine, pp. 59-71.
- [3] Yao Jaime, Chen Shea, “Micromachined Low- Loss Microwave Switches”, Junio 1999, IEEE Journal of Microelectromechanical Systems. Vol 8. No2, pp.129-134.
- [4] “Microelectromechanical Systems (MEMS) based advanced high performance Radio Frequency (RF) systems”,
<http://www.intellisensesoftware.com/papers/Microelectromechanical.pdf>.
- [5] Goldsmith, C. et al. “ Lifetime characterization of capacitive RF MEMS switches”, 2001, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest.
- [6] Joachim Oberhammer and Göran Stemme ,”Low-Voltage High-Isolation DC-to-RF MEMS Switch Based on an S-shaped Film Actuator”, Enero 2004 , IEEE Transactions on electron devices, Vol. 51, No. 1, pp 149-155.
- [7] Gabriel M. Revéis, “RF MEMS switches: status of the technology ”, Junio del 2003, The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, pp. 8-12.
- [8] Arnaud Pothier, et al. “Low-Loss 2-Bit Tunable Bandpass Filters Using MEMS DC Contact Switches”, Enero 2005, IEEE Transactions on microwave theory and techniques, vol 53, No 1, pp 354 -360.
- [9] Brian Jensen et al, “Simultaneous Electrical and thermal modeling of a contact-type Washington”, Noviembre 2003, D.C. ASME International Mechanical Engineering Congress.
- [10] Elliot R. Brown, “RF MEMS switches for reconfigurable integrated circuits”. Noviembre 1998, IEEE Transactions on microwave theory and techniques. Vol. 46. No11. pp. 1868-1880.
- [11] “RF MEMS Switches and Applications (INVITED)”, 2002, IEEE 40th Annual International Reliability Physics Symposium, Dallas, Texas, pp. 111-115.

- [12] Héctor J. de los Santos, “Introduction to Microelectromechanical (MEM) Microwave Systems”, 1999 ISBN 0-89006-282-X. pp 25-35, 57-64.
- [13] Nadim, Maluf , “An introduction to Microelectromechanical systems Engineering”, 2000, Editorial: Artech House, pp. 87-95.
- [14] Dimitrios Peroulis, “MEMS Devices for High Isolation Switching and Tunable Filtering”, 2000, IEEE. Department of electrical engineering and computer science. University of Michigan, pp. 1217-1220.
- [15] Vigía K. Varadan, K. J. Vinoy, K. A. Jose, “RF MEMS and their Applications” Editorial John Wiley & sons, Abril 2003, Pennsylvania State University, USA, pp. 111-115.
- [16] RF MEMS Switches,
https://secure.voloper.net/memtronics/page.aspx?page_id=13.

Capítulo 4. Fabricación en el proceso MetalMUMPs.



4.1 Descripción del proceso MetalMUMPs.

Los procesos MEMS multiusuarios o llamados MUMPs por sus siglas en inglés (Multi-User MEMS Processes), son procesos comerciales que proveen un costo bajo, y están probados en concepto en la fabricación de MEMS para la industria, universidades y el gobierno mundial [1].

Una herramienta que ofrece estos procesos estándar es el software MEMS CAP como parte del programa MUMPS se encuentran: PolyMUMPs, es un proceso de micromaquinado de superficie sobre tres capas de polisilicio; MetalMUMPs, es un proceso de níquel electroplateado y SoiMUMPs, es un proceso de micromaquinado en silicio sobre aislante. En este trabajo se utiliza el proceso MetalMUMPs.

Antes de describir el proceso de MetalMUMPs es necesario hablar sobre las reglas de diseño cuyo propósito es asegurar una gran posibilidad de fabricación exitosa. Las reglas se relacionan a través de procesos desarrollados y experimentados en laboratorio, son requerimientos y consejos que son definidos por límites del proceso. Además definen el mínimo tamaño de las características y espacios de todos los niveles y el número de superposiciones así como los espacios entre niveles relevantes, el ancho mínimo de las líneas y espacios son reglas obligatorias.

Las reglas obligatorias están dadas para asegurar que todos los diseños sean compatibles con la tolerancia de los procesos litográficos en el software. La violación de las reglas sobre espacios mínimos y líneas dará como resultado pequeños y grandes tamaños o características fundidas.

Mínimas reglas de superposición requeridas reducen el efecto de grandes topografías y previenen un atacado innecesario de capas subyacentes. El mínimo espaciado entre niveles garantiza que las características de dos diferentes niveles puedan ser delineados por medio de la fotolitografía y el atacado.

4.1.1 Características generales del proceso MetalMUMPs.

En esta parte se verá de manera general la microfabricación, este punto contiene información útil para todos los usuarios de MetalMUMPs. Enseguida se muestran las características generales para realizar un diseño mediante MetalMUMPs:

- 1.- Níquel electroplateado es usado como material estructural primario y capa de interconexión.
- 2.- Polisilicio dopado puede ser usado para resistores, estructuras mecánicas adicionales, y/o ruta eléctrica.
- 3.- Nitruro de silicio es usado como una capa de aislamiento eléctrico.
- 4.- Depósitos de óxido (PSG) es usado para capas de sacrificio.
- 5.-Una trinchera en la capa del sustrato de silicio puede ser incorporada para un aislamiento adicional térmico y eléctrico.
- 6.- Oro sobreplateado puede ser usado para cubrir los extremos de las estructuras de Níquel para ofrecer una baja resistencia de contacto del material.

El proceso está diseñado para ser lo más general posible, y para ser capaz de soportar muchos diseños diferentes en una sola oblea de Silicio. Debido a que el proceso no fue optimizado con el proceso de fabricación de un solo dispositivo, los grosores de las capas estructurales y de sacrificio fueron escogidas para utilizarse por la mayoría de los usuarios y las reglas de diseño de capas fueron escogidas prudentemente para garantizar el mayor beneficio posible.

4.1.2 Pasos a seguir en el proceso.

MetalMUMPS es un proceso de micromaquinado derivado del Níquel electroplateado. Este proceso surgió originalmente para la fabricación de microinterruptores MEMS de tecnología de actuación térmica.

El flujo del proceso descrito a continuación está diseñado para introducir a usuarios inexpertos a este proceso de micromaquinado. El texto es suplementado por esquemas que muestran el flujo del proceso en el contexto de construir un microrelay patentado.

Nombramiento de convención: Los niveles litográficos (nombres para cada nivel de máscara) son escritos en mayúscula. Las capas específicas de material, tales como óxido,

polisilicio o capas de metal, son escritas en minúscula con la primera letra en mayúscula. Por ejemplo POLY se refiere al nivel de máscara para la capa de polisilicio, Poly. La tabla 4.1 resume los nombres del material de las capas, el grosor de cada capa y los niveles litográficos asociados con cada capa.

Sin embargo hay que estar consiente de que no cada palabra en mayúscula es un nivel litográfico. Comúnmente es usado acrónimos tales como PSG (PhosphoSilicate Glass) y LPCVD (Low pressure Chemical Vapour Deposition) que están en mayúsculas, y algunos símbolos químicos tales como KOH (símbolo químico para el hidróxido de potasio).

Los pasos del proceso MetalMUMPs están descritos en seguida usando la convención de nombramiento para varias capas.

1. Oblea base: Oblea de silicio tipo-N (100).
2. Óxido de aislamiento-Una capa de óxido de silicio de $2\mu\text{m}$ es crecida en la superficie de la oblea para proporcionar el aislamiento eléctrico del sustrato.
3. Oxido 1- Ésta es una capa de fosfosilicato de vidrio (PSG) de $0.5\mu\text{m}$ de espesor que actúa como una capa de sacrificio de liberación. La liberación (removimiento) de la capa de Óxido 1 al final del proceso libera la capa de Nitruro 1 (descrito en #4). Óxido 1 se modela (graba) litográficamente con el primer nivel de máscara, OXIDE1, y es atacado. Óxido 1 también define las regiones en que la trinchera de silicio se formará.
4. Nitruro 1-Ésta es una capa de revestimiento de baja rigidez de nitruro de silicio de $0.35\mu\text{m}$ de espesor. Nitruro 1 se usa en combinación con la capa subsecuente de Nitruro 2 para varios propósitos. Las capas de Nitruro proveen un encapsulado de protección para el Polisilicio. El patrón del Nitruro también define una capa protectora en el Substrato que determina donde el atacado de la trinchera de Si ocurre (paso #12). Un área liberada y grabada de Nitruro también puede usarse para proporcionar una unión mecánica entre las estructuras de Metal liberadas que deben aislarse eléctricamente.
5. Polisilicio - Esta capa es una película de $0.7\mu\text{m}$ de Polisilicio, la cual está dopada y recocida para proporcionar propiedades eléctricas consistentes. Esta capa es grabada por el segundo nivel de máscara, POLY. Esta capa puede usarse para formar elementos resistivos, estructuras mecánicas o para interconexiones eléctricas.
6. Nitruro 2 - Esta es una segunda capa de $0.35\mu\text{m}$ de espesor de baja tensión de Nitruro de silicio. La combinación de las dos capas Nitruro 1 y Nitruro 2 son grabadas litográficamente con el tercer nivel de máscara que es NITRHOLE.
7. Oxido 2 - Esta segunda capa de sacrificio de Óxido es de $1.1\mu\text{m}$ de PSG. Esta capa es removida en el paso final para liberar la capa mecánica de Metal (paso 10). Esta capa Óxido 2 es grabada con el cuarto nivel de máscara, METANCH.
8. Anclaje de Metal - El paso del atacado de la capa de Óxido 2 también proporciona el patrón de las estructuras de los anclajes de Metal. Un proceso de liftoff se usa para

proporcionar capas delgadas de Cr y Pt (Anclaje de Metal) sólo en el fondo de la capa de Óxido 2 (las partes que fueron atacadas con el nivel de máscara METANCH)

9. Base Plateada - Esta capa es una capa de metal de recubrimiento de 500 nm de Cu protegida con una capa de Ti delgada. La base Plateada mantiene la continuidad eléctrica a través de la oblea para el subsiguiente paso de Metal electroplateado.

10. Metal - El quinto nivel del enmascaramiento, METAL, es grabado usando una fotoresist grueso para formar una plantilla para la capa de Metal electroplateado. 20 μm de níquel es electroplateado dentro del patrón del fotoresist. Subsecuentemente una capa de unos 0.5 μm de oro es plateado encima del níquel para proveer una almohadilla de material conveniente para la vinculación con las conexiones eléctricas de alambrado externas. Esta combinación de 20 μm de Níquel y de 0.5 μm de oro forman la capa de Metal. La capa de Metal sirve como capa mecánica primaria y una capa de interconexión eléctrica.

11. Paredes lateral de Metal – Una capa final de metal plateado, las paredes laterales de Metal, de 1-3 μm de oro, recubre ciertas áreas seleccionadas en las paredes laterales de la capa de Metal. Esto proporciona una alta confiabilidad de un contacto eléctrico de baja resistencia y tiene el efecto de reducir los espacios entre las estructuras adyacentes de níquel.

12. Los pasos finales son la liberación y el atacado de la trinchera de Si. La liberación se realiza con una serie de atacados químicos húmedos, para primero quitar la base plateada y después las capas de sacrificio y la capa de óxido de Aislamiento que está encima de las áreas de la trinchera. Finalmente, se ataca la oblea de silicio con un atacado químico húmedo, usando KOH, para formar una trinchera de 25 μm en el substrato de silicio. Esto ocurre en las áreas definidas por las máscaras OXIDE1 y NITRHOLE. Esta trinchera proporciona un aislamiento térmico y eléctrico adicional.

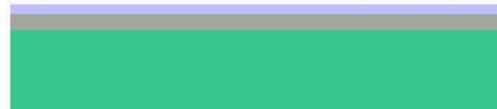
13. Las obleas se cortan, clasifican y envían al usuario de MetalMUMPs.

4.1.3 Representación gráfica del Proceso

Para entender mejor el proceso MetalMUMPs, las figuras siguientes proporcionan una representación gráfica de los pasos del proceso.

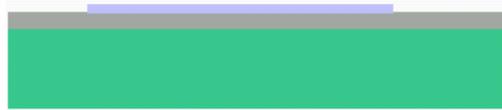
Paso 1 Deposición del óxido 1

Una capa de 2 μm de espesor de óxido (óxido de aislamiento) es depositada sobre la superficie de una oblea de silicio (100) tipo n. Esto es seguido por la deposición de 0.5 μm de fosfosilicato de vidrio (Oxido 1).



Paso 2 Grabado del Oxido 1

La oblea es cubierta con un fotore Resist sensible a los rayos UV y litográficamente grabada por la exposición a rayos UV a través del primer nivel de máscara (OXIDE1). El fotore Resist en las áreas expuestas es removido dejando detrás de él un patrón de máscara para el atacado. Un atacado químico húmedo es usado para remover el fosfosilicato no deseado. Después del atacado, el fotore Resist es químicamente removido. Este método de grabado de obleas con fotore Resist, atacado y removimiento del fotore Resist es usado repetidamente en el proceso MetalMUMPs.



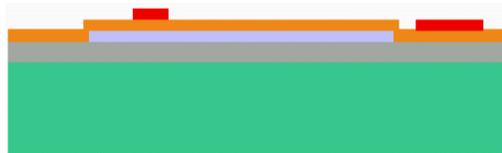
Paso 3 Deposición de Nitruro 1 y Poly

Una capa de 0.35µm de nitruro de silicio (Nitruro 1), es depositada, seguido inmediatamente por la deposición de una capa de 0.7µm de polisilicio (Poly).



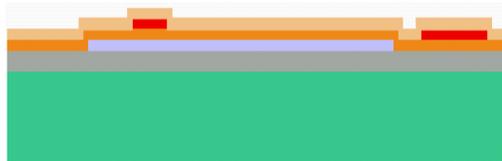
Paso 4 Grabado del Poly

La oblea es cubierta con fotore Resist y el segundo nivel de máscara (POLY) es litográficamente grabado, atacado con ion reactivo (RIE) es usado para remover el polisilicio no deseado. Después de que el atacado está completado, el fotore Resist es removido.



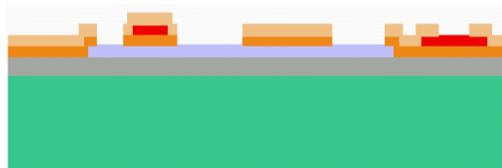
Paso 5 Deposición del Nitruro 2

Una segunda capa de 0.35µm de Nitruro de Silicio (Nitruro 2) es depositada.



Paso 6 Grabado de los Nitruros

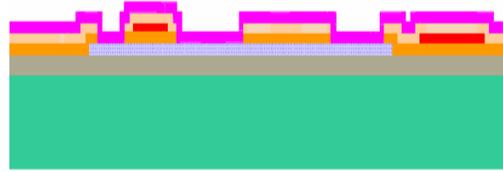
La oblea es cubierta con fotore Resist y el tercer nivel (NITRHOLE) es litográficamente grabado. El atacado RIE es desarrollado para remover ambos Nitruro 2 y Nitruro 1 de las áreas grabadas. Después del atacado, el fotore Resist es removido.



	Substrato		Oxido 1		Polisilicio		Oxido 2		Metal
	oxido (aislamiento)		Nitruro 1		Nitruro 2		Anclaje de Metal		Pared lateral Metal
	Photore Resist								

Paso 7 Deposición del Oxido 2

Se deposita una segunda capa de fosfosilicato de vidrio de 1.1µm de espesor



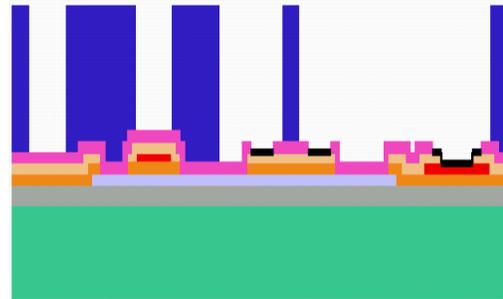
Paso 8 Grabado de Oxido 2 y Anclaje de Metal depositado

La oblea es cubierta con fotoresist y el cuarto nivel de máscara (METANCH) es litográficamente grabado. El Oxido 2 se ataca en húmedo y una delgada capa de metal (Anclaje de Metal) consistiendo de 10nm Cr +25nm Pt es depositada. Un proceso de despegue es usado para remover el fotoresist y dejando el anclaje metálico solo en el fondo de las entradas del Oxido 2 formadas de el nivel de mascara METANCH.



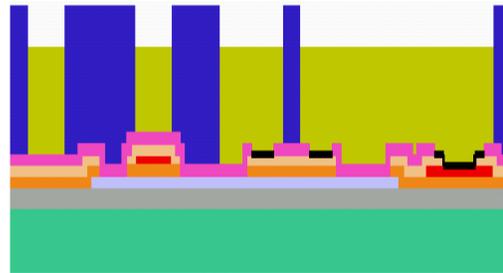
Paso 9 Deposición de la base Plateada y grabado de la plantilla plateada

La capa de base plateada, que consiste en 500nm Cu + 50nm Ti es depositada (No se muestra). La oblea es cubierta con una delgada capa de fotoresist y grabada con el quinto nivel de máscara (METAL). Este proceso forma una plantilla grabada para la capa de metal electroplateado.



Paso 10 Metal Plateado

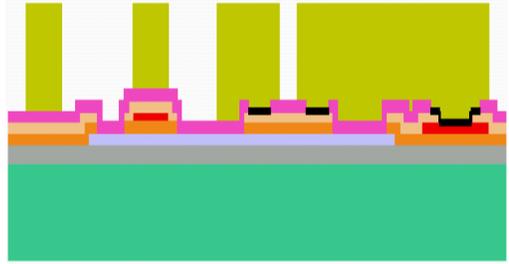
El Níquel es electroplateado a un grosor nominal de 20µm dentro de la plantilla moldeada. Una capa de oro de 0.5µm es inmediatamente electroplateado en la parte superior de la capa de níquel. Esto forma la capa de Metal.



	Substrato		Oxido 1		Polisilicio		Oxido 2		Metal
	oxido (aislamiento)		Nitruro 1		Nitruro 2		Anclaje de Metal		Pared lateral Metal
	Photoresist								

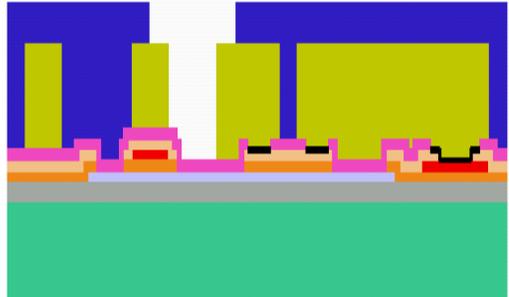
Paso 11 Removimiento de la Plantilla Plateada

La plantilla de fotoresist es químicamente removida.



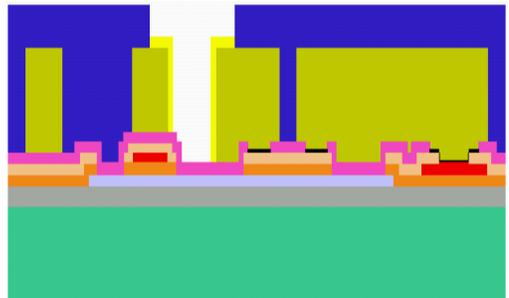
Paso 12 Oro sobre la plantilla plateada grabada

Las oblea es cubierta con fotoresist y grabadas con una versión “hinchada”(bloated) del sexto nivel de máscara (GOLDOVP) para remover la base plateada en las regiones donde las paredes laterales de metal son deseadas. La base plateada es químicamente removida de las regiones no grabadas, y el fotoresist se quita también. Las obleas son cubiertas con fotoresist y grabadas con una versión “sin hinchar”del sexto nivel de máscara (GOLDOVP) para definir una plantilla de resist en las regiones de metal donde las paredes laterales de metal electroplateado son deseadas.



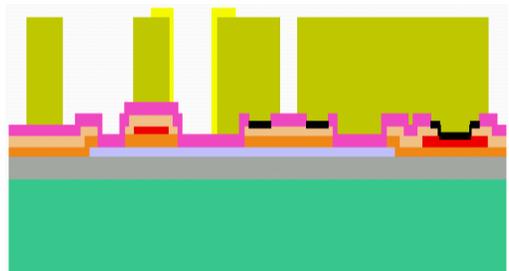
Paso 13 Oro sobreplateado

Una capa de oro de 1-3µm (Pared lateral de Metal) es electroplateada usando la máscara de fotoresist GOLDOVP como una plantilla.



Paso 14 removimiento de la plantilla del oro sobreplateado

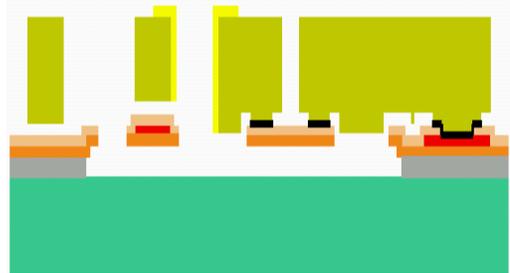
La plantilla de resist GOLDOVP es removida.



	Substrato		Oxido 1		Polisilicio		Oxido 2		Metal
	oxido (aislamiento)		Nitruro 1		Nitruro 2		Anclaje de Metal		Pared lateral Metal
	Photoresist								

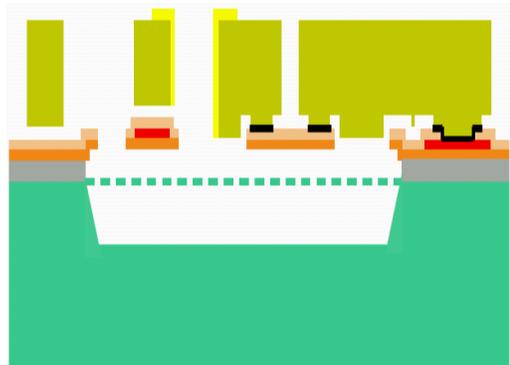
Paso 15 Base Plateada y Óxidos de Sacrificio removidos

La base plateada se quita químicamente en el primer paso del proceso de liberación. En el segundo paso del proceso de liberación, un 49% de solución HF es usado para remover las capas de sacrificio de fosfosilicato de vidrio. (Oxido 1 y Oxido 2) y la capa de Oxido de Aislamiento sobre las áreas de trinchera.



Paso 16 Formación de la Trinchera (Silicio grabado o atacado)

En el paso final del proceso de liberación, un atacado de silicio con KOH es usado para formar una trinchera con una profundidad en el sustrato de silicio en las áreas definidas por los niveles de máscara OXIDO 1 y NITRHOLE.



	Substrato		Oxido 1		Polisilicio		Oxido 2		Metal
	oxido (aislamiento)		Nitruro 1		Nitruro 2		Anclaje de Metal		Pared lateral Metal
	Photoresist								

Todos los pasos mencionados anteriormente se pueden resumir en la siguiente tabla:

Capa de Material	Espesor (µm)	Nombre del nivel litográfico	Objetivo del nivel litográfico	Comentarios
Oxido de aislamiento	2.0			2.0µm de oxido térmico
Oxido 1	0.5	OXIDO 1	Definir la trinchera Liberar al nitruro	0.5µm de fosfosilicato de vidrio
Nitruro 1	0.35			0.35µm de nitruro de silicio
Poly	0.7	POLY	Patrón del Poly	0.7µm de polisilicio dopado
Nitruro 2	0.35	NITRHOLE	Definir las áreas donde se remueve el Nitruro. Abrir agujeros para obtener contactos eléctricos entre Metal y Poly.	Ambos patrones de Nitruro 1 y Nitruro 2
Oxido 2	1.1	METANCH	Abrir agujeros para anclar el metal a el Nitruro o Poly.	1.1µm de fosfosilicato de vidrio
Anclaje de Metal	0.035	METANCH	Abrir agujeros para capas delgadas de metal del anclaje metálico	10nm Cr + 25nm Pt
Base plateada	0.55			500nm Cu + 50nm Ti
Metal	20.5	METAL	Patrón del Metal	20µm Ni + 0.5µm Au
Paredes de Metal	1.0-3.0	GOLDOVP	Define el área para las pared metálica y el patrón para la pared metálica	1-3µm Au

Tabla 4.1 Descripción resumida de pasos para el proceso MetalMUMPs

4.2 Aplicación de la Tecnología MetalMUMPs para la fabricación de dispositivos en la telefonía celular.

El proceso MetalMUMPs como se mencionó anteriormente, fue diseñado en un principio para la construcción de interruptores pero esta no es una limitante para poder diseñar otros dispositivos, por ejemplo es posible diseñar resonadores, capacitores variables, inductores y otros dispositivos en este tipo de tecnología, a continuación se comentará de manera breve cómo se pueden diseñar algunos de estos dispositivos y qué capas serían las utilizadas para realizar cada una de las partes.

En primer lugar se explicará uno de los más simples dispositivos: el interruptor.

4.2.1 Interruptor

Como se mencionó en el capítulo anterior, el interruptor es uno de los dispositivos más comunes que se encuentran dentro de un teléfono celular, cuyo funcionamiento es muy simple, puesto que solo funciona como circuito abierto o circuito cerrado (Figura 4.1), para realizar este tipo de función existen diversos tipos de actuación (ver capítulo 1), de entre todos estos tipos, analizando un poco como es el proceso de fabricación MetalMUMPs, el tipo de actuación que se podría realizar más fácilmente sería el tipo electrostático.

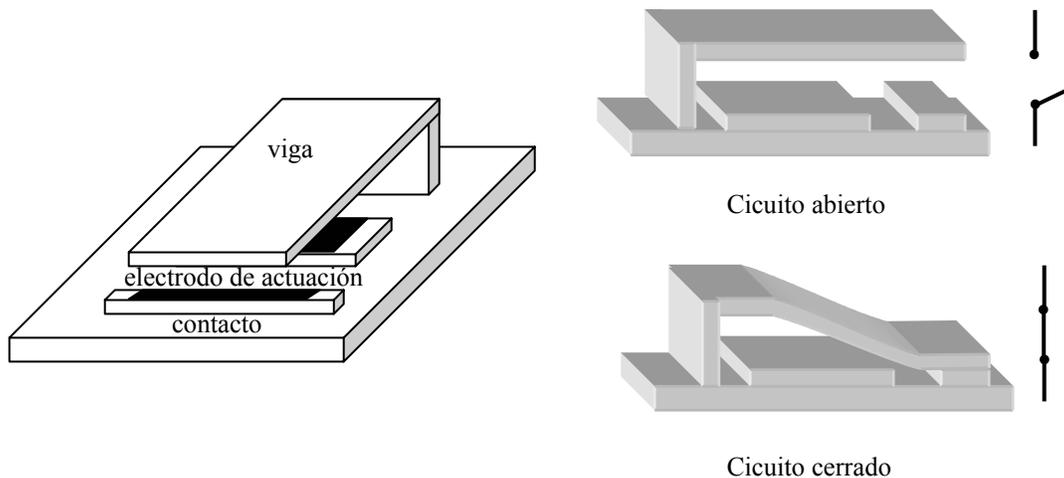


Figura 4.1 Esquema de un interruptor en sus dos estados: abierto y cerrado

Para realizar la actuación electrostática se necesitan dos platos paralelos conductores, analizando las capas que son materiales conductores, existen tres en el proceso: el polisilicio, el níquel y el oro, descartando el último debido a las funciones que tiene en MetalMUMPs. Las reglas de MetalMUMPs dicen que para realizar la parte estructural del dispositivo se debe de utilizar la capa de metal (níquel), si se quisiera hacer un interruptor con esta capa tendría que ser uno que fuera de actuación lateral, donde tanto la viga, el electrodo y los contactos fueran de níquel, el problema sería el grosor de la viga, ya que el grosor mínimo permitido en MetalMUMPs es de 8 [μm], además, la constante de rigidez

que tendría la viga sería muy alta, con lo anterior se podría concluir que para doblar o mover la viga de níquel se necesitaría de un voltaje de actuación muy alto, que para aplicaciones como en la telefonía celular no es recomendable ya que se cuenta con una fuente de poder limitada. En cambio, con la otra capa de material estructural conductor, que es el polisilicio, el interruptor tendría que ser de actuación vertical, y el movimiento sería de abajo hacia arriba, los dos platos paralelos serían uno de polisilicio y el otro de níquel, donde la viga estaría hecha de polisilicio con los nitruros, debido a los materiales, su constante de rigidez sería más baja que la viga hecha de níquel, además de que el grosor de la viga se reduciría, todos estos factores harían que el voltaje de actuación fuese bajo. La capa de níquel se usaría de otra forma, ahora se utilizaría para realizar los anclajes, los contactos y el electrodo (si se necesitará electrodo de actuación). Para conectar eléctricamente al sustrato, en todas las partes se utilizarían las capas de nitruro junto con la de los anclajes metálicos.

4.2.2 Capacitor

El capacitor es un elemento muy usado en cualquier circuito eléctrico, este tipo de dispositivo se encarga de almacenar voltaje, y se usa de diversas formas por ejemplo dentro de los filtros, si se tiene un capacitor variable es posible mover el pico de la grafica de frecuencia del filtro y así seleccionar las frecuencias que se quiere dejar pasar, esto se usa muy a menudo dentro de los radios y por supuesto en los teléfonos celulares

En MetalMUMPs existen diversas formas para obtener un capacitor variable, se explicará en forma breve cada uno de los dispositivos y que capas se usaron para fabricarlos:

Para realizar un capacitor variable diseñado [2] las capas que se usan son las de tipo conductoras, y a diferencia del dispositivo anterior, en este caso se usará la capa de níquel para realizar la estructura principal, para realizar la variación de capacitancia se usa la actuación térmica, la estructura del capacitor la podemos observar en la figura 4.2. Este dispositivo consiste de dos partes: una parte de RF (arriba de la línea punteada) y una parte de sintonización (debajo de la línea punteada). En la parte de RF el capacitor variable está diseñado como una red de un solo puerto. La señal de RF pasa a través de la red desde la línea de en medio y regresa por las otras dos líneas (RF ground). Todos los dientes etiquetados con “G” están conectados entre sí con polisilicio por debajo de la capa de metal. Como resultado, cada señal y diente componen una unidad capacitor, todas estas unidades capacitor están conectadas en paralelo. Cuando se alimenta el actuador térmico, los dientes de sintonización se deslizarán y alterarán el campo eléctrico entre los dientes de la señal y los dientes de ground. Esto dará como resultado un cambio en la capacitancia. Para reducir las pérdidas causadas por el sustrato, una trinchera es puesta debajo del capacitor variable, que tiene 25 μ m de profundidad y está llena de aire.

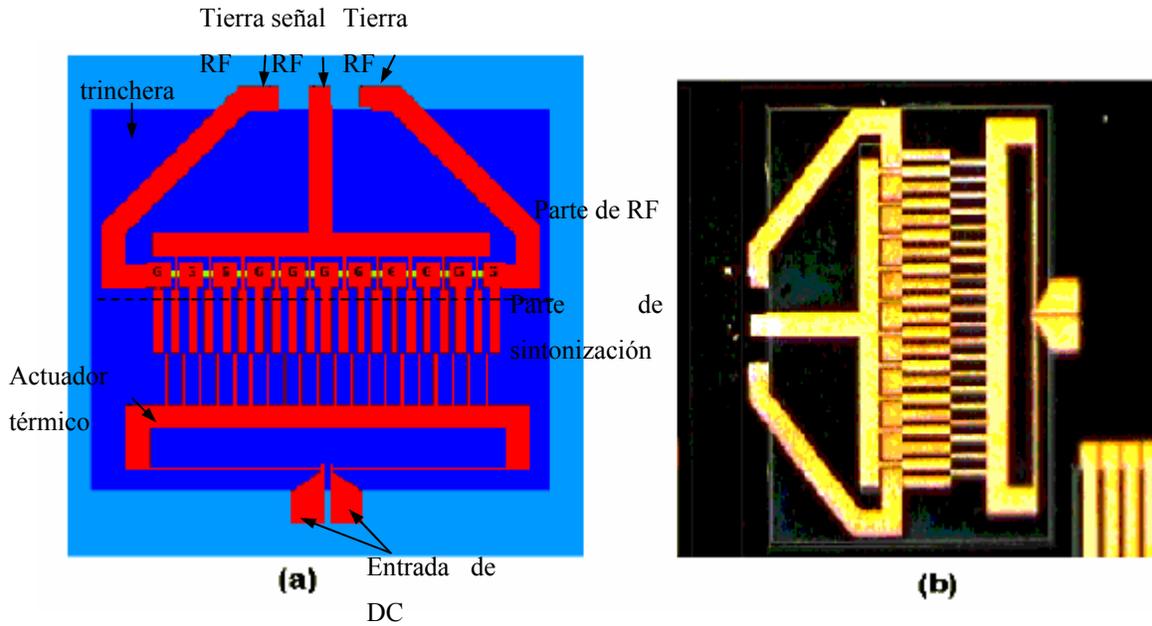


Figura 4.2 a) Esquema de un nuevo capacitor variable MetalMUMPs b) Microfotografía del nuevo capacitor variable fabricado.

El segundo tipo de capacitor diseñado [3] es de actuación electrostática, este tipo de capacitor variable actúa verticalmente, para realizarlo se usan dos platos paralelos flexibles, los cuales se atraerán entre sí para cambiar la distancia entre ellos y así cambiar su capacitancia. Para realizar este capacitor se necesitan de dos capas estructurales, dos capas de sacrificio y dos capas de aislante de nitruro. El plato superior esta hecho de níquel y cubierto por oro, mientras el plato inferior está hecho de polisilicio cubierto por una capa de nitruro de silicio.

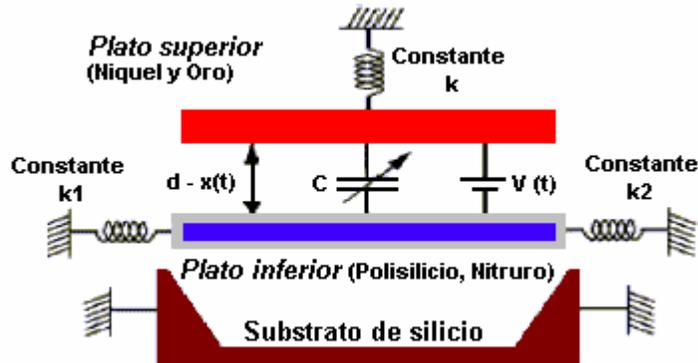


Figura 4.3 Modelo mecánico del segundo capacitor variable MetalMUMPs.

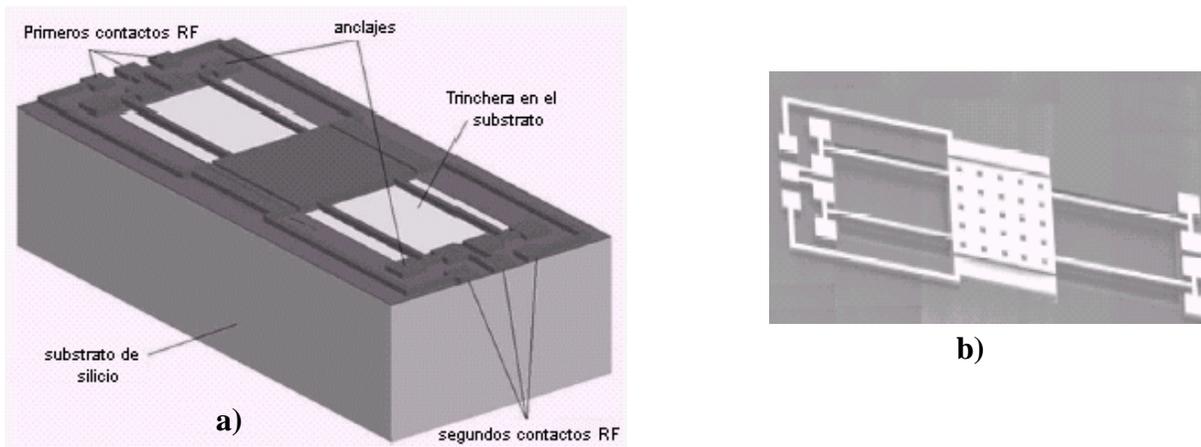


Figura 4.4 a) Esquema del segundo capacitor variable MetalMUMPs b) Microfotografía del segundo capacitor variable fabricado.

4.2.3 Resonador

Este dispositivo se usa frecuentemente en el teléfono celular y sin él, el teléfono no serviría, el celular no podría transmitir ni recibir ya que el resonador es indispensable para estas tareas, la función de este dispositivo es producir una señal que se encuentra en cierta frecuencia, donde esta señal se puede usar para diferentes propósitos, la frecuencia de la señal esta determinada por diferentes factores del resonador, por ejemplo: el tamaño de la viga, el tipo de material, la forma, etc. El resonador tiene diversas aplicaciones dentro del teléfono por ejemplo: para producir la señal portadora de transmisión, o para filtrar el mensaje en la recepción que se encuentra en una frecuencia específica.

Para diseñar un resonador se pueden utilizar varias estructuras o incluso se puede diseñar una propia, existen tres tipos principales:

- Resonador de viga doblemente anclada o Clamped-Clamped beam (CC beam).
- Resonador de viga libre – libre o Free – Free beam (FF beam).
- Resonador a modo disco.

Ahora que se sabe que estructuras se pueden utilizar, a continuación se mencionará cuál o cuáles se pueden realizar con el proceso MetalMUMPs, se comenzará describiendo cada uno de los tipos de resonadores y que capas se usaran para realizar cada parte:

Resonador de viga doblemente anclada (Clamped – Clamped beam Resonator)

Este resonador recibe su nombre debido a que su viga se encuentra anclada en los dos extremos y estos se encuentran conectados a una fuente de DC, debajo de la viga se encuentra un electrodo, y es por este por donde pasa la señal de entrada que debe ser una señal senoidal que hará que la viga comience a resonar (Figura 4.5). Con este tipo de resonador se pueden realizar diversos dispositivos tal es el caso de los filtros, en donde dos de estos resonadores se unen por medio de una viga (resorte) de acoplamiento para obtener un mejor filtrado [4].

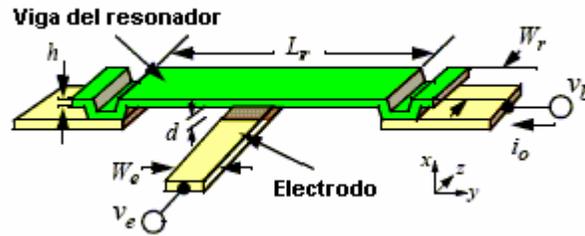


Figura 4.5 Esquema en perspectiva de un resonador micromecánico de viga doblemente anclada en configuración de excitación

Para poder realizar este dispositivo se necesitan al igual que en el interruptor dos capas conductoras, estas son la capa de níquel y la capa de polisilicio, como se mencionó en el interruptor la capa de níquel es muy gruesa y si se usará para realizar la viga del resonador se tendría que usar un alto voltaje de entrada para poder moverla, por esa razón se usa la capas de polisilicio y los nitruros para realizar la viga, y la capa de níquel se usará para realizar los anclajes eléctricos y el electrodo, y estos se conectarían a la capa de aislamiento, además se tendría que realizar una estructura en los anclajes de tal forma que la viga no estuviera directamente conectada con la capa de aislamiento. Finalmente es necesario analizar las reglas de diseño de MetalMUMPs para saber si se permiten las dimensiones de la viga del resonador, ya que se tiene un mínimo grosor para cada capa y espacio entre partes del mismo material.

Resonador de viga libre-libre (Free – Free beam Resonator)

Si tomamos en cuenta el nombre de este resonador creemos que la viga no se encuentra anclada y que esta se encuentra flotando en el aire, pero no es así, como se ve en la figura 4.6, se dice que esta libre debido a que las vigas de soporte tiene una longitud de $\lambda/4$ de la frecuencia de resonancia de la viga, con esta longitud al momento de que la viga comience a resonar parecería eléctricamente que tenemos un circuito abierto ya que a la distancia de $\lambda/4$ tenemos una impedancia ∞ , por lo tanto la señal no puede pasar por ahí y físicamente parece que no tenemos un anclaje, solo hay aire, por eso se dice que esta libre o en el aire, esto se hizo para disminuir las pérdidas por los anclajes que son un problema para los resonadores de viga doblemente anclada. La forma en que funciona este dispositivo es haciendo pasar por el electrodo una señal con la frecuencia de resonancia, y en los anclajes una señal de directa, para tener un diferencia de potencial, la salida la obtendremos por medio de los anclajes que están conectados a una línea de transmisión por donde saldrá la señal [5].

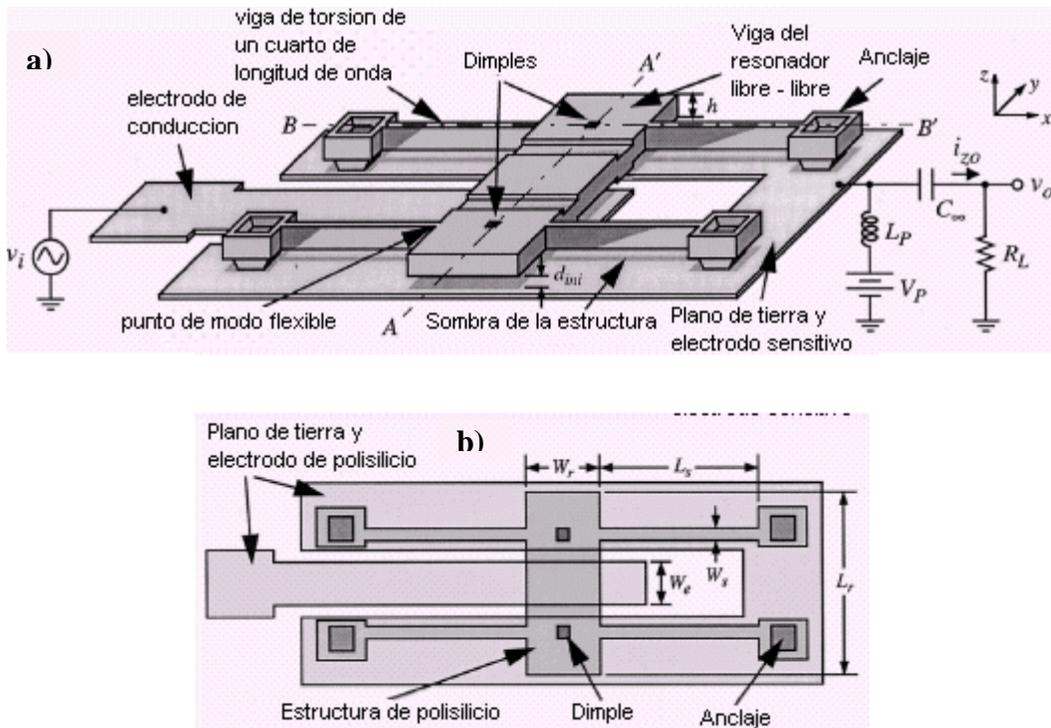


Figura 4.6 a) Resonador de viga libre – libre mostrando la alimentación del dispositivo para su funcionamiento b) Vista superior de un resonador de viga libre – libre.

Para poder realizar este dispositivo se necesitan, al igual que en el resonador anterior, dos capas conductoras, como se puede observar la estructura es similar al resonador anterior, solo cambia un poco debido a las vigas de soporte, se usará la capa de polisilicio con los dos nitruros para realizar la viga, la capa de níquel se usará para realizar los anclajes eléctricos, la línea de transmisión y el electrodo, y estos se conectarían a la capa de aislamiento, todo esto para visualizarlo mejor se puede ver con ayuda de la figura 4.6 También se tendrían que analizar las reglas de diseño de MetalMUMPs para conocer si son permitidas las dimensiones de la viga del resonador y las vigas de soporte, ya que se tiene un mínimo grosor para cada capa y espacio entre partes del mismo material. Si se hiciese este resonador en MetalMUMPs se estaría limitado por el grosor de las vigas de soporte ya que el mínimo espacio entre la máscara de nitruro y el polisilicio es de $5\mu\text{m}$ lo que hace que nuestra viga sea muy gruesa si comparamos con resonadores ya diseñados [6].

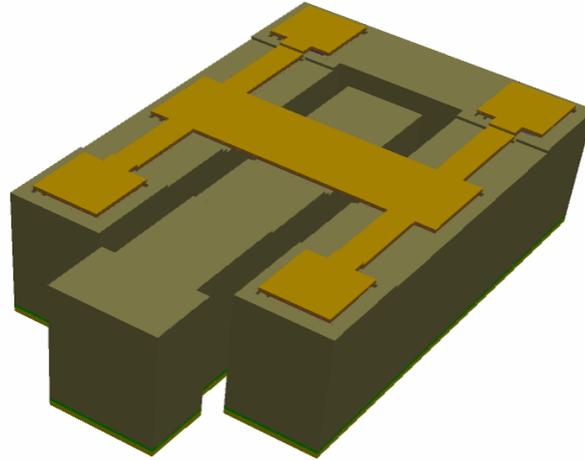


Figura 4.7 Resonador realizado en Coventor con MetalMUMPs

Recientemente se publicó otro tipo de resonador de viga libre – libre [7] el cual tiene una actuación vertical (figura 4.8), la diferencia sería que ahora el electrodo y la viga tendrían que ser del mismo material. Si fuese de polisilicio el voltaje de actuación sería alto ya que el polisilicio no tiene buena conductividad, el níquel se usaría para los anclajes de la estructura, si se fuese a usar níquel la viga sería más delgada mínimo 8 [μm] pero aun con este grosor el voltaje a usar en la señal sería muy alto, para una aplicación por ejemplo de teléfono celular.

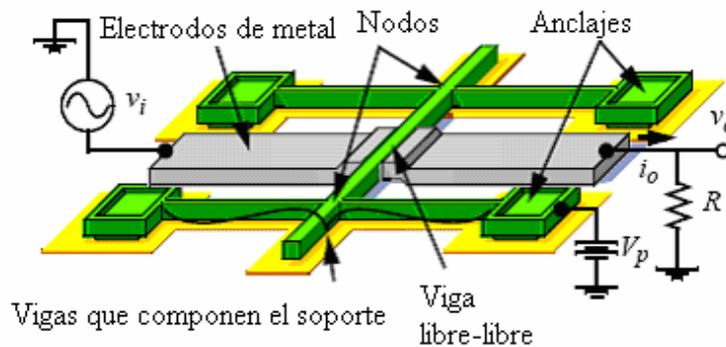


Figura 4.8 Esquema de un resonador de viga libre – libre de actuación vertical

Resonador a modo disco

Este tipo de resonador como su nombre lo indica, se trata de un resonador con la forma de un disco, el funcionamiento de este tipo de resonador es simple, donde la parte que tiene en forma de disco o anillo resuena, expandiéndose o comprimiéndose radialmente. En artículos recientes se mencionan tres dispositivos de este tipo [4] en donde varía

principalmente la forma y el material del que están hechos. En la figura 4.9 se puede observar la estructura básica de este tipo de resonador.

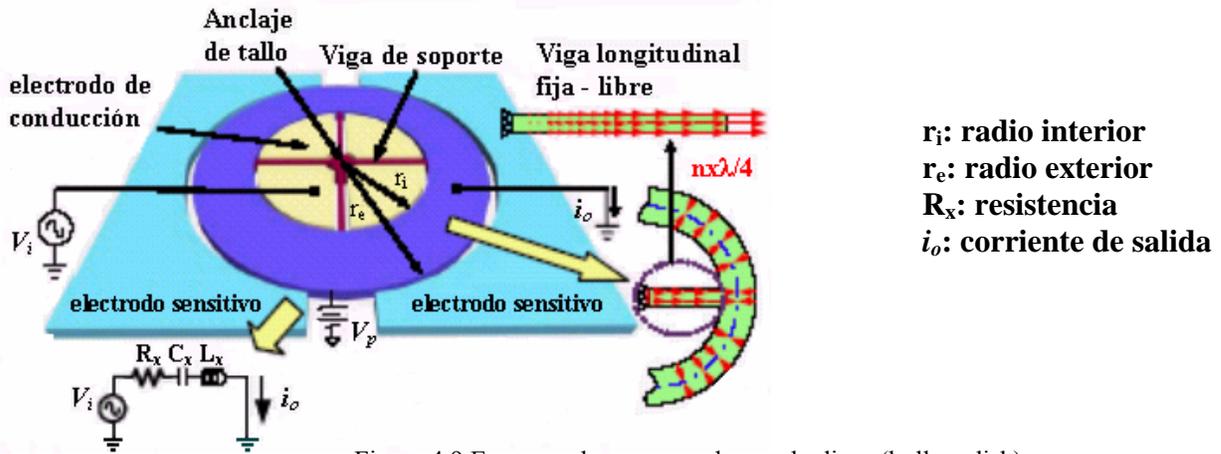


Figura 4.9 Esquema de un resonador modo disco (hollow disk)

Para poder realizar este tipo de resonador en MetalMUMPs tanto los electrodos como el propio disco deben estar hechos del mismo material, en el proceso usado podemos usar oro o si lo preferimos polisilicio, sin embargo está cubierto por los dos nitruros, en la fabricación de este tipo de resonador no existe ninguno construido de metal, generalmente están hechos de polisilicio y algunos de diamante, por lo que la opción para realizarlo es el polisilicio, y usar la capa de níquel con oro para realizar los contactos para la conexión eléctrica al exterior, y se usaría la capa de anclaje metálico (Cr+Pt) para conectar la capa de metal con el polisilicio los anclajes al sustrato se harían de nitruro. Se tendría que definir muy bien la región de la trinchera, para que el disco pueda moverse libremente. Sin embargo, si se realizara este dispositivo es necesario verificar su funcionamiento simulándolo utilizando el software Coventor.

Conclusiones

En este capítulo se pudo observar que el proceso MetalMUMPs a pesar de ser un proceso de fabricación que ya está probado, aun se puede mejorar sobre todo modificando las dimensiones que están fijas para las capas del proceso ya que esto limita a tener estructuras únicamente con espesores dados y con ello limita también la aplicación que se les da a los dispositivos.

Además debido a que el grosor de cada capa es fijo, es necesario tener presente varios aspectos mecánicos o eléctricos que estarían relacionados con dichas dimensiones tales como constante de rigidez y voltaje de actuación, por mencionar algunos.

Otro de los aspectos que es importante de considerar es la modificación de las propiedades de los materiales utilizados ya que por ejemplo la conductividad del sustrato hace que por

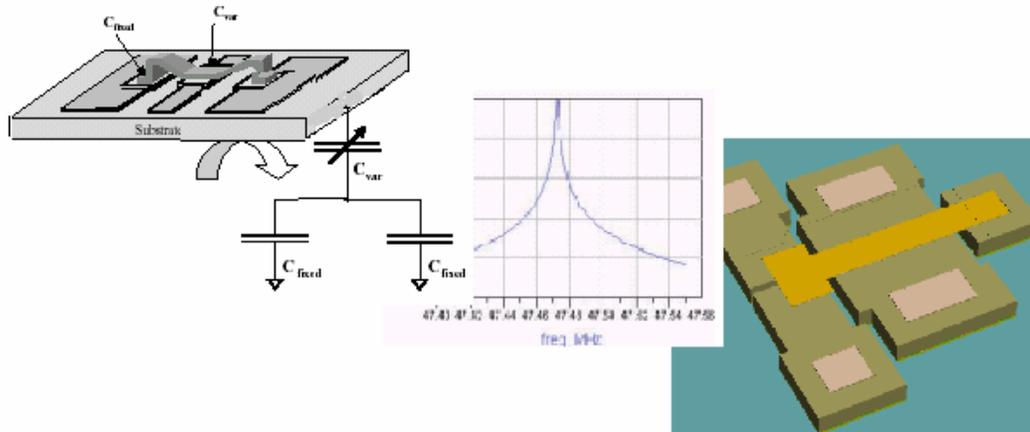
éste pudiese pasar una señal de RF la cual no necesariamente debería de ocurrir pero debido a las características del material sería inevitable.

Como se pudo ver, con el Proceso MetalMUMPs se pueden diseñar varias estructuras para aplicaciones en RF sin embargo su optimización depende de las modificaciones al proceso antes mencionadas que se pueden lograr por medio del proceso MetalMUMPs Plus el cual permite modificar las propiedades y grosores de los materiales usados en el proceso MetalMUMPs, con la desventaja de que existirá un aumento en el precio.

Bibliografía

- [1] A. Cowen, B. Dubley, E. Hill, M. Walters, R. Wood, S. Johnson, and H. Wynands, “*MetalMUMPS’s Design Handbook.*”, 2002, Durham NC: JDS Uniphase.
- [2] Dong Yan, Raafat Mansour, Amir Khajepour, “MetalMUMPs Tunable Capacitor”, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario N2L 3G1, CANADA.
- [3] Maher Bakri-Kassem and Raafat R. Mansour, “Two Movable-Plate Nitride-Loaded MEMS Variable Capacitor”, Marzo del 2004, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 52, NO. 3.
- [4] Clark T.-C. Nguyen, “Vibrating RF MEMS for Next Generation Wireless Applications”, Center for Wireless Integrated Micro Systems (WIMS) Dept. of EECS, University of Michigan Ann Arbor, Michigan 48109-2122, U.S.A.
- [5] Kun Wang, Clark T. C. Nguyen “VHF Free-Free Beam High-Q Micromechanical Resonators”, Septiembre 2000, JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 9, NO.3, pp. 347-360.
- [6] Clark T.-C. Nguyen, “Micromechanical Circuits for Communications Transceivers”, Center for Wireless Integrated Micro Systems (WIMS) Dept. of EECS, University of Michigan Ann Arbor, Michigan 48109-2122, U.S.A.
- [7] W. -T. Hsu, J. R. Clark, and C. T. -C. Nguyen, “*Q*-optimized lateral free-free beam micromechanical resonators,” Junio 10-14, 2001, *Digest of Technical Papers*, the 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors & Actuators (Transducers’01), Munich, Germany, , pp. 1110-1113.

Capítulo 5. Modelado del Interruptor



5.1 Análisis previo sobre el diseño del interruptor

En este trabajo se realiza el análisis y diseño de un interruptor para teléfonos celulares con tecnología MEMS, para ello en el capítulo 2 se investigaron los componentes que se pueden diseñar con este tipo de tecnología y se seleccionó uno de los que se consideró más convenientes para realizar en la tecnología MEMS: el interruptor.

El objetivo de este trabajo es diseñar un interruptor para teléfonos celulares que cuente con algunas características superiores o equivalentes a los usados actualmente, usando la tecnología MEMS y realizado con el proceso de fabricación MetalMUMPs.

5.1.1 Aspectos relacionados con la elección del dispositivo RF

Para elegir el dispositivo RF MEMS que diseñamos se consideraron varios aspectos basados en la aplicación seleccionada. Las razones de la elección son las siguientes:

1.- El interruptor es útil para seleccionar si se va a trabajar en el régimen de recepción o en el de transmisión.

Además de que los interruptores MEMS, y los dispositivos construidos de interruptores, pueden ser usados para reemplazar los dispositivos ya existentes en el excitador, el transmisor, el duplexor, la antena, el receptor de RF y el receptor de IF.

2.-En el caso de un receptor heterodino, que es el caso en el que trabaja un teléfono celular, se encuentran aproximadamente 10 interruptores, por lo que si se calcula que en un interruptor en tecnología MEMS se ahorra aproximadamente 1 dólar por cada uno de ellos, entonces las ganancias son millonarias ya que se fabrica un alto número de unidades por año [1].

3.- Sumado al punto anterior, debido a que la escala de integración mejora, al disminuir el tamaño del interruptor al trabajar a escala micrométrica, se disminuye el tamaño del sistema. Al disminuir el tamaño del sistema es posible integrarle más funciones [2].

5.1.2 Requerimientos considerados para teléfonos celulares

Para comenzar a diseñar el dispositivo se deben conocer los requerimientos pedidos por la aplicación. Los requerimientos clave que un interruptor debe cumplir dentro de un teléfono celular son los mostrados en la tabla 5.1 [1]:

Requerimiento técnico clave para Teléfonos Celulares	Valor
Voltaje	3.3 V
Manejo de potencia RF	100 mW en promedio 4 W pico
Velocidad de conmutación	20 ms
Confiabledad	100 millones de ciclos 5 años
Frecuencia	1 GHz a 18 GHz 0.4 GHz a 1.2 GHz
Costo de la unidad	< \$3por unidad

Tabla 5.1 Requerimientos de un interruptor para teléfonos celulares.

5.1.3 Metas del dispositivo a diseñar

Una vez que se conocen los requerimientos de un interruptor aplicado a teléfonos celulares, es necesario, establecer las metas o las especificaciones que nuestro interruptor deberá alcanzar. Las especificaciones que propusimos fueron las siguientes [1], [3]:

- Voltaje de actuación debajo de los 3.3 V.
- Bajo costo.
- Aplicación en la frecuencias otorgadas para la operación de telefonía celular. (0.8 – 2 GHz).
- Alto factor de calidad.
- Dimensiones menores a 1000 μm^2 .
- Realizado con el proceso MetalMUMPs.

5.2 Elección del interruptor

Enseguida se mencionan los factores que se tomaron en cuenta para realizar el diseño del interruptor requerido:

Tipo de actuación

Para lograr nuestras metas, se debe seleccionar el tipo de actuación que se usará. Como se investigó en el capítulo 1 existen varios tipos de actuación, sin embargo donde se han encontrado los mejores resultados de desempeño son en la actuación electrostática [3], con resultados confiables en el intervalo de 100 a 10 mil millones de ciclos de operación, a frecuencias en el intervalo de 0.1 a 100 GHz, por esa razón se escogió este tipo de actuación para nuestro diseño. Otra de las razones importantes cuando se utiliza la actuación electrostática, es que se requieren voltajes de 20 a 80 Volts, sin embargo prácticamente no se consume corriente, por lo que la potencia disipada es muy pequeña.

Proceso de fabricación

El proceso de fabricación usado es MetalMUMPs, puesto que como se menciona en el capítulo 4 cuenta con sus propias reglas de diseño con las cuales se asegura una gran posibilidad de fabricación exitosa, además de que se diseñó para ser lo más general posible, y ser capaz de soportar muchos diseños diferentes [6] en una sola oblea de silicio.

Tamaño

El tamaño es un factor importante a considerar, ya que precisamente los interruptores MEMS tienen la característica de ser de menor tamaño que los interruptores con tecnologías de fabricación actuales. En relación al tamaño que tiene un interruptor hecho en otras tecnologías, se encontraron dos interruptores que se usan para comunicaciones inalámbricas, estos fueron el HMC484MS8G [4] y el HMC226 [5] de Hittite Microwave Corporation que están realizados en la tecnología MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit)^[16], con un promedio de 3x3mm, el tamaño utilizado para el interruptor que diseñamos fue de 400 μ m x 400 μ m para que en el proceso de fabricación no existan errores, y el encapsulado se espera obtener menor a 1 mm², con esto se observa que el interruptor realizado ocupa 1/9 parte de los interruptores actuales comercialmente.

Tipo de estructura

Una vez elegido el tipo de actuación se debe seleccionar entre todas las estructuras existentes para realizar el interruptor tomando en cuenta la que mejor cumpla las

[16] **MMIC (Monolithic Microwave IC)**. Circuito integrado utilizado en aplicaciones de altas frecuencias como en teléfonos celulares. Combina transistores y dispositivos pasivos (resistores, capacitores, etc) sobre el mismo chip y son ampliamente usados como amplificadores y filtros en telecomunicaciones.

necesidades establecidas anteriormente, y que se pueda realizar con el proceso de fabricación.

Nuestro diseño está basado en una estructura simple, que es un cantiliver con un electrodo de actuación con algunas modificaciones. Este tipo de estructura consiste en una viga con un solo anclaje (Figura. 5.1), la viga esta conectada por medio del anclaje a una línea de transmisión, para realizar el corto circuito se aplica un voltaje al electrodo haciendo que la viga sea atraída y entre en contacto con el extremo de la otra línea de transmisión. Para hacer el circuito abierto simplemente se aplica un voltaje de cero al electrodo, haciendo que la viga se quede libre.

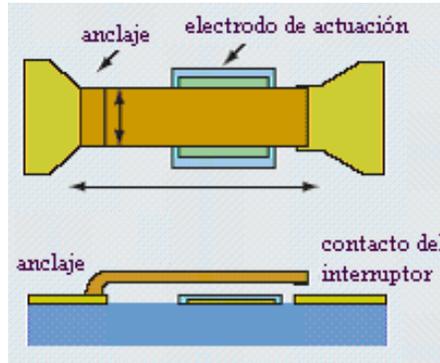


Figura 5.1 Cantiliver con electrodo de actuación.

En este trabajo el tipo de interruptor diseñado no es el típico cantiliver, en este dispositivo no tenemos al anclaje directamente conectado a la línea de transmisión, sino que ahora solo sirve como soporte para la viga, y la viga en sí sirve como un pedazo de línea de transmisión que une o no a dos contactos de línea de transmisión en donde viaja la señal de RF. La primera estructura del interruptor que se realizó en este trabajo es la siguiente:

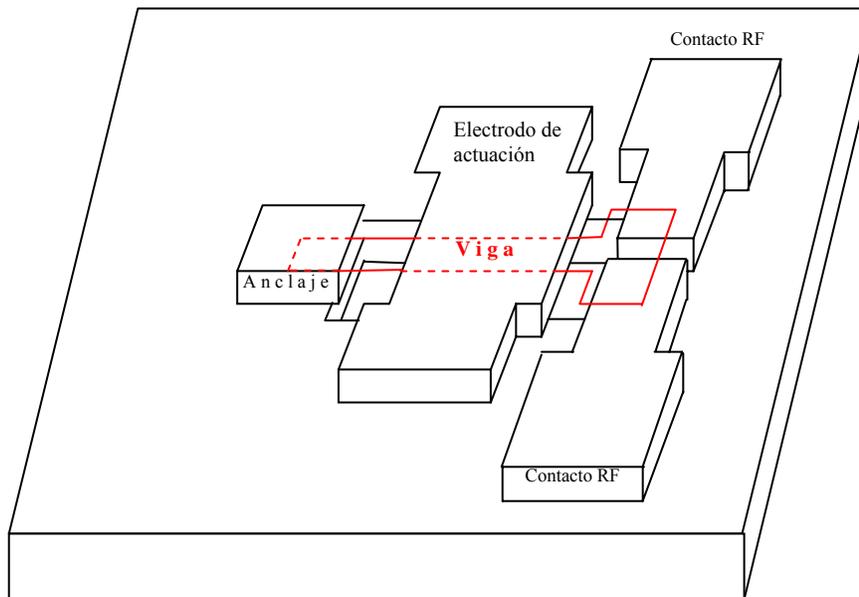


Figura 5.2 Primera estructura del interruptor.

Para diseñar el dispositivo, fue necesario conocer que capas sirven para realizar cada una de las partes del interruptor, en primer lugar para realizar la viga se debía de seleccionar la capa que mejor funcionara, una de las reglas de MetalMUMPs [2] indica que para realizar la parte mecánica principal se use la capa de níquel, pero al realizar la estructura, esta viga era muy gruesa (20 μm) y para moverla se necesitaría de un voltaje de actuación muy alto entonces se pensó en un interruptor de actuación lateral (Figura 5.3), en donde la viga sería mas delgada (alrededor de 8 μm , la anchura mínima) , se realizo un análisis por medio del software dándonos un voltaje de actuación de 1 kV, la cual resultó ser muy grande, para nuestra aplicación debido a que la fuente está limitada, ya que es un interruptor para teléfonos celulares.

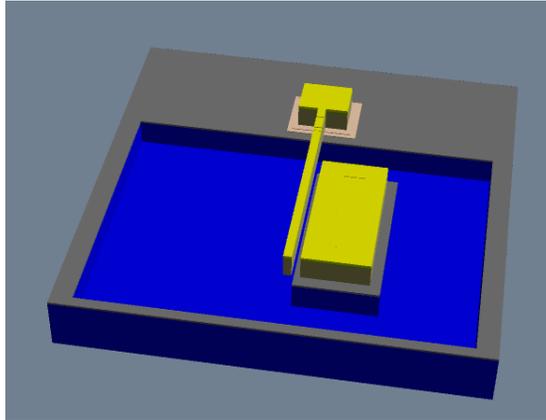


Figura 5.3 Interruptor MetalMUMPs de actuación lateral.

Por lo antes mencionado, se decidió utilizar como material estructural principal para la viga a la capa de Polisilicio, junto con las dos capas de Nitruro de silicio, y dejar como el material eléctrico al níquel, donde los anclajes eléctricos, el electrodo de actuación y las líneas de transmisión de RF estarán hechas de ese material, teniendo un buen material estructural debido a las propiedades mecánicas del Polisilicio (Modulo de Young 158 GPa y fuerza de ruptura 1.21-1.65 GPa) [1], [6], con todo esto no existirían problemas en el aspecto mecánico (por ejemplo, que se rompiese la viga), pero faltaba considerar lo que pasaría en el aspecto eléctrico, la capa que entraría en contacto con el níquel sería el Nitruro 2, sabemos el Nitruro es un dieléctrico y no conduce la electricidad, por lo tanto solo puede pasar una pequeña cantidad de ella por este material, teniendo muchas pérdidas de la señal. Sin embargo, de acuerdo a la estructura, el interruptor diseñado es un interruptor capacitivo (Figura 5.2) debido a que en el diseño existe un capacitor de dos placas paralelas el cual está formado con las capas de Polisilicio y Níquel, y como dieléctrico el Nitruro 2. El funcionamiento es el siguiente: el capacitor a altas frecuencias es un corto circuito (Figura. 5.4) por ello, como la línea de transmisión es de RF, la señal que atraviesa por está es de una frecuencia alta, y la señal pasa fácilmente del Níquel al Polisilicio y del Polisilicio al Níquel (Figura. 5.5), ignorando completamente las pérdidas del Nitruro, ya que a esa frecuencia parecería que las dos placas están en contacto.

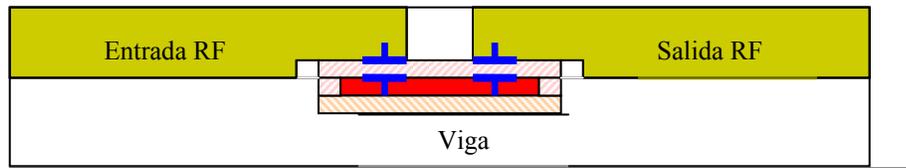


Figura 5.4 Capacitores que se forman en el interruptor RF MEMS capacitivo.

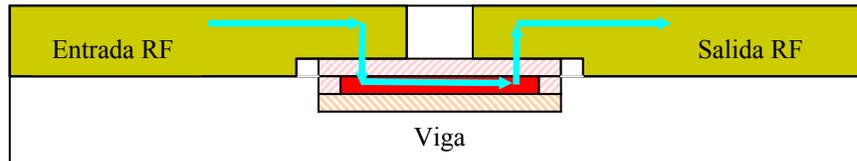


Figura 5.5 Trayectoria de la señal de RF en el interruptor RF MEMS capacitivo.

Las líneas de RF se colocaron de esta forma ya que la señal tiene que atravesar el Polisilicio de la entrada a la salida. Debido a que a medida que la señal de RF va viajando, la señal va atenuándose ya que recorre más distancia en el Polisilicio pues tiene pérdidas en alta frecuencia, se colocaron lo más cerca posible y que las reglas nos lo pudieran permitir (12 μm) para que estas sean mínimas.

5.3 Análisis electromecánico del interruptor

Para poder obtener un diseño electromecánico, se tienen que considerar los parámetros que influyen en el aspecto mecánico del interruptor, estos pueden ser:

- Distancia entre la viga y el electrodo (g_0)
- Constante de rigidez de la viga (k)
- Área del electrodo (A)
- Las características del medio entre el electrodo y la viga (ϵ)

De entre los parámetros mencionados anteriormente se deben seleccionar aquellos que se pueden manejar libremente en nuestro diseño para encontrar una óptima actuación mecánica del interruptor y cumplir con las metas propuestas, obteniendo tanto un voltaje de actuación bajo (menor de 3.3 V) como un tiempo de conmutación relativamente bajo, en seguida se encontrará la relación que existe entre los parámetros que influyen en la actuación electromecánica del interruptor a diseñar.

Comenzaremos con una viga anclada en los dos extremos y debajo de ella está un electrodo cubierto por un dieléctrico, cuando se aplica un voltaje entre el electrodo y la viga (que podría estar anclada en solo un extremo), se acumulan cargas eléctricas en la barra, induciéndose una fuerza electrostática (F_e), en sentido contrario la viga también ejerce una fuerza de restauración (F_r) o de elasticidad. Cuando el interruptor se cierra existe una tercera fuerza llamada fuerza de contacto (F_c), que está en dirección opuesta a la fuerza electrostática (ver Figura 5.6).

Ya que la operación del interruptor se limita a desplazamientos pequeños de la viga, el comportamiento mecánico se puede modelar usando la constante de rigidez de la viga que presenta un comportamiento lineal en la dirección del movimiento que es el eje z , por lo tanto se representará como k_z , si se relacionan la fuerza de restauración de la viga con su constante de rigidez se tiene:

$$F_r = k_z \Delta g, \quad (5.1)$$

donde Δg es el desplazamiento de la viga.

La constante de rigidez k_z del interruptor puede modelarse en dos partes. La primera parte, k_1 , debida a la rigidez de la viga y que toma en cuenta las propiedades del material con la cual está fabricada, por ejemplo el modulo de Young E [Pa] y el momento de inercia I [m⁴] ($12EI/L^3$, donde L es la longitud de la viga), la segunda parte, k_2 , se debe al esfuerzo residual, σ [Pa], dentro de la viga y es resultado del proceso del fabricación.

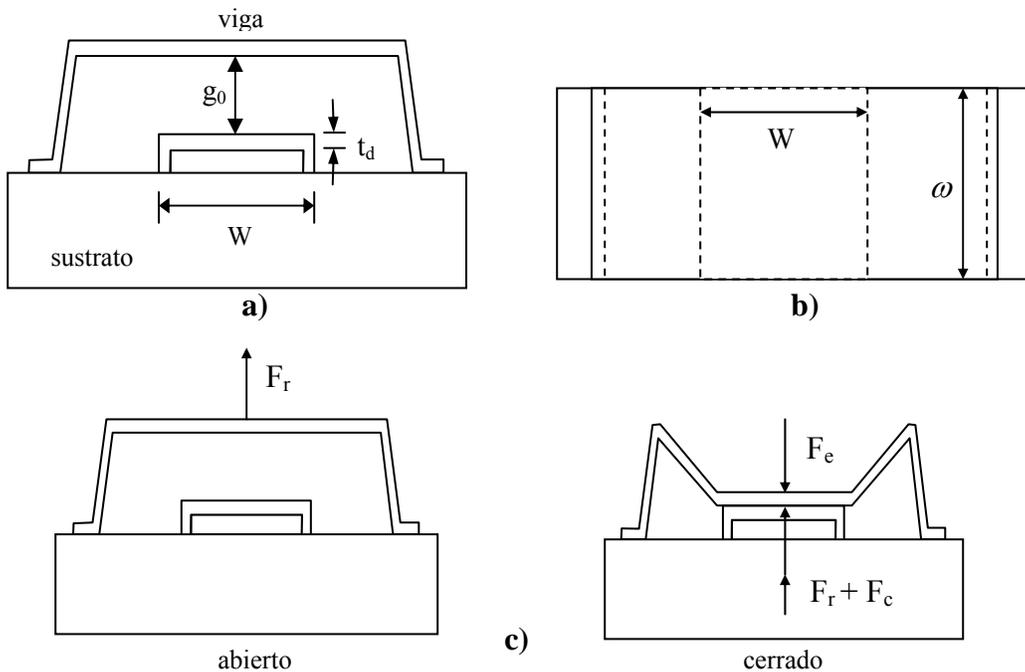


Figura 5.6: a) Dimensiones del interruptor anclado de los dos extremos vista lateral, b) vista superior, c) Fuerzas que actúan en el interruptor en sus dos estados: abierto y cerrado.

En el análisis anterior tomamos en cuenta el aspecto mecánico, toca el turno de ver el análisis eléctrico del interruptor. La viga y el electrodo de actuación están modelados como un capacitor de placas paralelas. Si se aplica un voltaje, V , con área, A , mucho más grande que la separación, g , entre ellas, ignorando los campos de contorno, con un ancho de la viga ω y el ancho del electrodo W (donde el área sería $A = W\omega$), la capacitancia, C , entre ellas tomando el espesor del dieléctrico es:

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{g + \left(\frac{t_d}{\varepsilon_r}\right)} = \frac{\varepsilon_0 W \omega}{g + \left(\frac{t_d}{\varepsilon_r}\right)}, \quad (5.2)$$

donde g es la distancia que hay entre la viga y el electrodo (gap), t_d es el espesor del dieléctrico que recubre el electrodo y ε_r es la constante dieléctrica relativa del aislante. La fuerza electrostática que se aplica a la barra se puede calcular si se considera la potencia entregada a una capacitancia dependiente de la distancia entre la viga y el electrodo, esta será:

$$F_e = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC(g)}{dg} = -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 A V^2}{\left(g + \frac{t_d}{\varepsilon_r}\right)^2}, \quad (5.3)$$

donde V es la diferencia de potencial aplicada entre la viga y el electrodo. Se puede apreciar que ésta fuerza es independiente de la polaridad del voltaje aplicado. Si $g \gg t_d$ esta ecuación puede reducirse:

$$F_e = -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 A V^2}{g^2}. \quad (5.4)$$

Si se aproxima que la fuerza electrostática actúa uniformemente en el área de la viga que se encuentra sobre el electrodo, se puede decir que la constante de rigidez se puede utilizar para determinar la distancia que la viga se mueve debido a la fuerza aplicada dada por la ecuación 5.4.

Para encontrar la ecuación del voltaje de actuación del interruptor, se utiliza una aproximación ya que este voltaje se alcanza cuando la fuerzas en la viga se encuentran en equilibrio, se igualará la fuerza electrostática aplicada con la fuerza mecánica de restauración de la viga que es debida a su constante de rigidez ($F = k_z z$), de esta forma se obtiene que:

$$\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 W \omega V^2}{g^2} = k_z (g_0 - g), \quad (5.5)$$

donde g_0 es la distancia entre el electrodo y la viga cuando en el electrodo no se aplica ninguna diferencia de potencial. Despejando el voltaje de la ecuación 5.5 se tiene:

$$V = \sqrt{\frac{2k_z}{\varepsilon_0 W \omega} g^2 (g_0 - g)}. \quad (5.6)$$

El interruptor opera linealmente aproximadamente arriba de 1/3 del espacio entre los platos. Una vez que la viga es atraída abajo de este punto, la fuerza electrostática supera a la fuerza de restauración, y la operación del interruptor se convierte en no lineal y se cierra bruscamente. El voltaje aplicado en el cuál esto ocurre es el voltaje de actuación. Para obtener este voltaje se calcula la derivada de la ecuación 5.6 con respecto a la distancia entre el interruptor y el electrodo, g , igualándola a cero para obtener las discontinuidades (máximos o mínimos) de la grafica de voltaje vs. distancia, el valor obtenido es la distancia a la cual la inestabilidad ocurre y es de dos tercios de la distancia entre el interruptor y el electrodo cuando no se aplica ningún diferencial de potencial, es decir $2/3 g_0$. Sustituyendo el valor en la ecuación 5.6 se obtiene el voltaje de actuación del interruptor y es:

$$V_p = V\left(\frac{2g_0}{3}\right) = \sqrt{\frac{8k_z g_0^3}{27\epsilon_0 W \omega}} = \sqrt{\frac{8k_z g_0^3}{27A\epsilon_0}}.$$

(5.7)

5.4 Diseño mecánico

5.4.1 Partes que integran al interruptor

El interruptor consta de las siguientes partes:

- Viga:** La cual tiene como función actuar como parte de una línea de transmisión en la banda de RF y permite realizar la conmutación entre las otras dos líneas de RF (entrada y salida), ya que se desplaza hacia arriba y hacia abajo.
- Entrada de RF:** Es la línea de transmisión por la cual entra la señal de radiofrecuencia.
- Salida de RF:** Es la línea de transmisión en donde la señal de Radiofrecuencia saldrá.
- Electrodo de actuación:** Tiene como función desplazar a la viga por medio de la actuación electrostática, ya que si tiene voltaje, la viga es atraída hacia él, y se desplaza hacia arriba y si tiene un voltaje de cero la viga se queda estática.

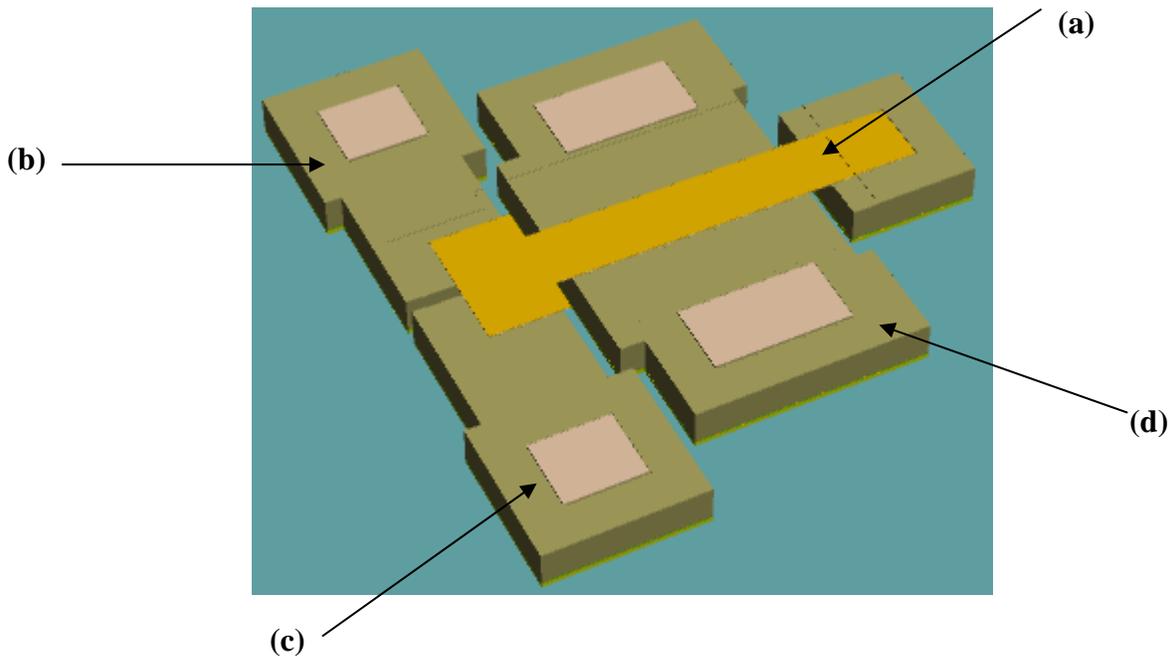


Figura 5.7 Partes generales que componen el interruptor diseñado.

5.4.2 Dimensiones del interruptor base.

En el punto anterior se mostró la estructura del interruptor, como se observó, contaba con un electrodo de actuación, una viga con un anclaje y dos contactos metálicos que serían la entrada y salida de la señal de RF, las dimensiones en μm que se utilizaron para su construcción son:

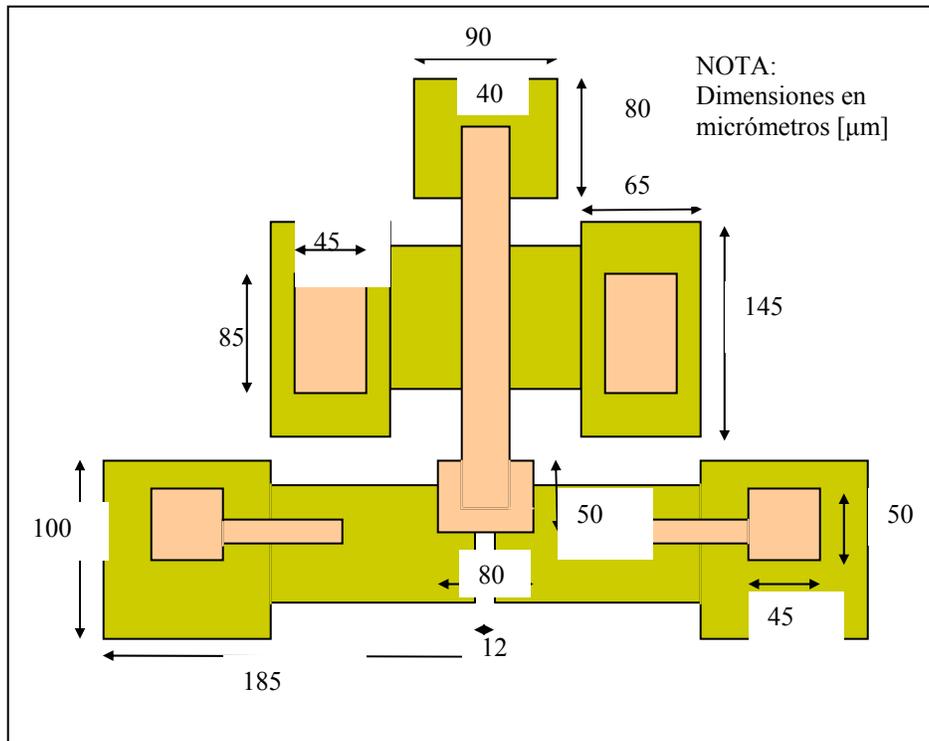


Figura 5.8 Vista inferior del interruptor base.

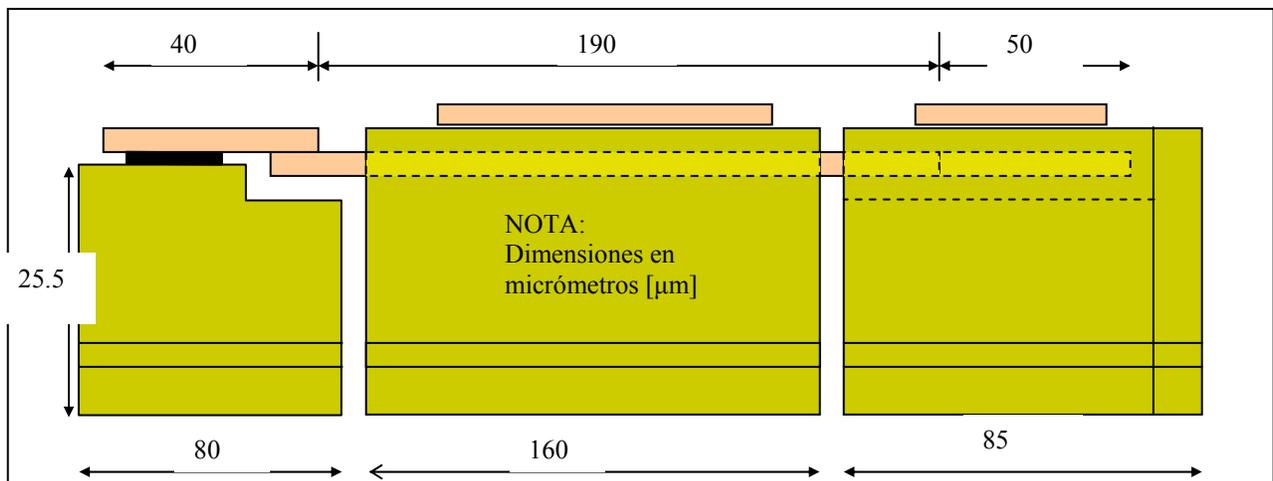


Figura 5.9 Vista lateral del interruptor base.

usando el software y estos fueron:

5.3.2 Evolución del Interruptor

5.4.3 Evolución de la estructura del interruptor

Para seleccionar el diseño del interruptor se realizaron diferentes etapas, en un principio se pensó en realizar un interruptor que contara con una estructura simple ①, una de las cuales es un cantilever en el cual la señal va de un contacto fijo a la viga, y un electrodo es utilizado para la actuación, así que cuando actúa el interruptor la viga toca un contacto, y entonces la señal pasa por la viga hasta llegar al otro contacto. Sin embargo si realizáramos ésta estructura en MetalMUMPs la viga debiera ser hecha de Polisilicio como se mencionó anteriormente, pero este material presenta grandes pérdidas en altas frecuencias, por lo tanto si la señal pasara por toda la viga, tendríamos muchas pérdidas, por lo tanto se decidió modificar un poco la estructura del cantilever.

En el intento por disminuir las pérdidas se colocaron dos contactos en el extremo final de la viga por los cuales la señal de RF viajaría, por lo que, la viga al actuar, tocaría a los dos contactos y entonces la señal viaja solo por una pequeña parte del material de Polisilicio, disminuyendo así las pérdidas ②.

Sin embargo, con esta estructura disminuiríamos las pérdidas pero el voltaje de actuación obtenido era alto (alrededor de 6.5 V) con respecto a la aplicación para la cual estaba diseñado. Para solucionar este problema se propuso modificar la forma de la viga con el fin de hacerla más flexible, lo que ocasionaría que se necesitara menor fuerza para moverla y por consiguiente se usaría un menor voltaje de actuación. Se propusieron dos tipos de viga, las llamamos tipo “T” y la otra tipo “Resorte” donde se dispusieron diferentes formas para disminuir el voltaje de actuación. Al analizar estas dos estructuras se encontró que la que tuvo un menor voltaje de actuación fue la estructura tipo “Resorte”, sin embargo la tipo “T” también cumplía con las especificaciones. Así que se tomó la decisión de analizar las dos y comparar con cual de ellas se obtenían mejores resultados con respecto a los demás parámetros.

Para el interruptor tipo “T” ③ se usó el principio de la palanca de Arquímedes [10] que consiste en la relación inversa entre el largo del brazo y la fuerza necesaria para moverlo (cuanto más largo es el brazo, menor es la fuerza necesaria). Para la estructura tipo “Resorte” ④ se tenía un electrodo de mayor tamaño con el objetivo de disminuir el voltaje de actuación, ya que al tener mayor área habrá mayores cargas, por consiguiente el voltaje disminuirá, la forma de la viga en resorte también debería hacer la estructura más flexible, en la primera estructura de este tipo se tenían dos anclajes que dadas las dimensiones del electrodo se creía que no soportaría todo el peso, por lo tanto se colocaron dos más ⑤, esto produjo que el voltaje de actuación subiese (de 1.2 V a 2.2 V), pero seguía estando dentro del rango especificado. Otra modificación que se hizo para los dos interruptores fue con respecto a la viga, ya que está hecha de Polisilicio cubierto de Nitruro, se observó la posibilidad de poder separar la viga en dos partes con respecto a la capa de Polisilicio ⑥, ya que las reglas lo permitían, con el objetivo de que una parte se encargaría del voltaje de actuación y la otra de las pérdidas, ya que la señal cuando atraviesa la viga no hace lo que se esperaba, debido a que la señal tiene que viajar por toda la viga lo que ocasiona pérdidas. Con esta separación la parte de Polisilicio que atraviesa la señal es menor. Con esto se logró mejorar las pérdidas (el factor de calidad) solo que faltaba optimizar las áreas de las

partes para así obtener el factor de calidad que se esperaba. En la Figura 5.10 se muestran la evolución de la estructura del interruptor.

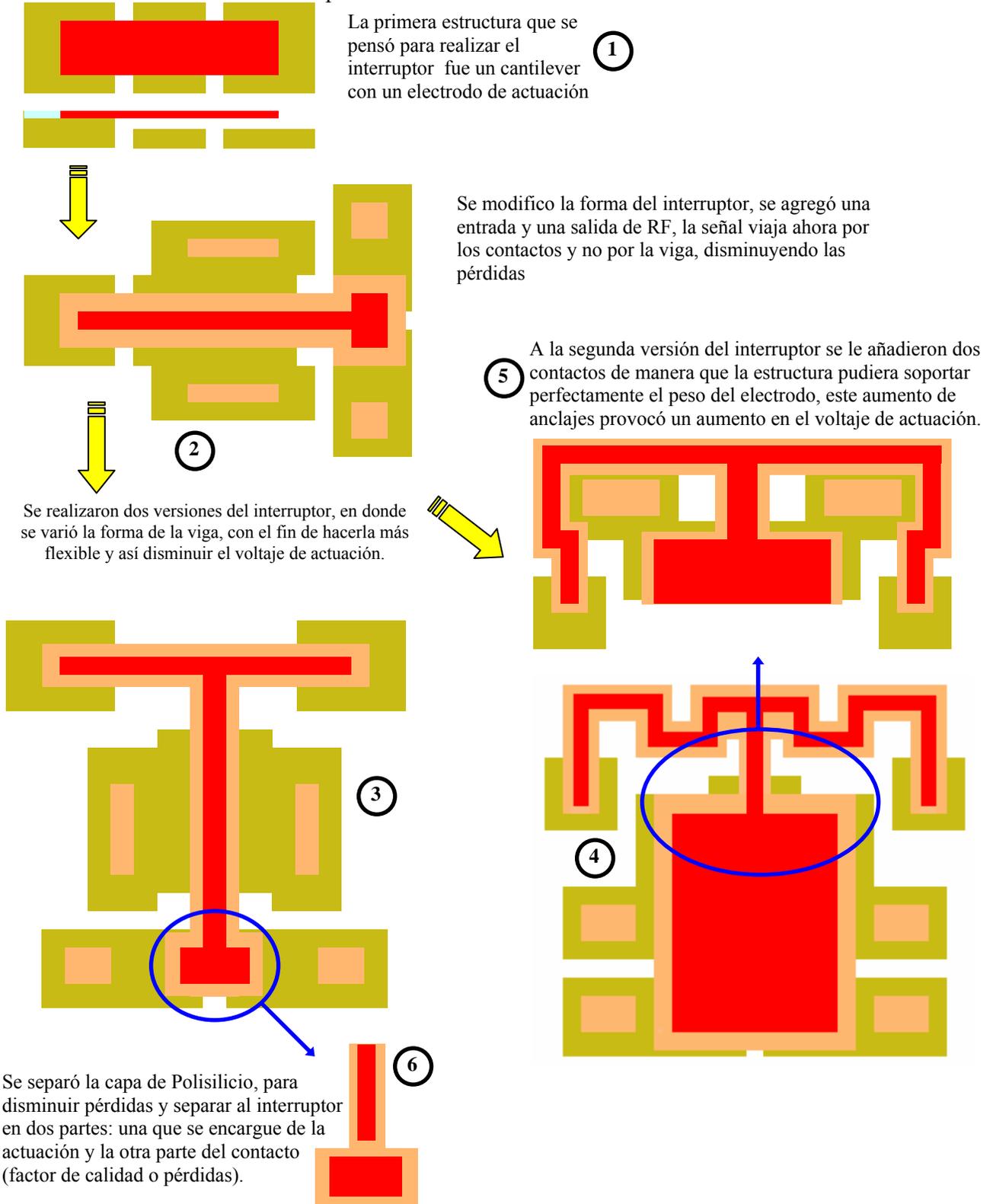


Figura 5.10 Pasos que se realizaron para llegar a la versión definitiva del interruptor diseñado.

5.4.4 Diseño del Interruptor tipo T.

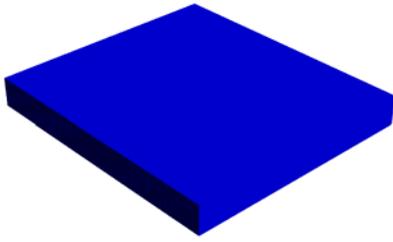
A continuación se mencionarán las capas utilizadas en este diseño, las cuales sirven de base para las modificaciones que se hicieron a este primer interruptor:

Sobre la oblea de sustrato de silicio (tipo N) de espesor 525 μm (**a**) se deposita una capa de óxido de 2.0 μm (**b**) que se utiliza como aislante, en seguida se deposita una capa de 0.5 μm de fosfosilicato de vidrio - PSG - (capa de sacrificio), y se graba (ataca). Esta capa define el área donde se realizará la trinchera en el sustrato (**m**). Se deposita una capa de Nitruro de silicio de 0.35 μm y se graba (**c**), esta capa se utiliza junto con la subsiguiente capa de Nitruro para varios propósitos, puede usarse como un encapsulado protectorio para el Polisilicio o como un enlace mecánico entre las estructuras liberadas de metal que deben ser eléctricamente aisladas. Así con ayuda de esta capa se definen los anclajes de los dos contactos y el electrodo de actuación. Después se deposita sobre la primera capa de Nitruro una capa de Polisilicio de 0.7 μm de espesor que definirá a la viga la cual se separó en dos partes, la primera servirá para realizar el movimiento mecánico, esta es la parte que se encuentra debajo del electrodo, y la segunda parte servirá como contacto entre las líneas de Radiofrecuencia (RF) (**d**), luego se deposita la segunda capa de Nitruro de 35 μm , y se ataca de manera similar a la primera capa de Nitruro, este proceso se debe realizar con una sola máscara pero debido a que Coventor no lo permite se realizó en dos, también la segunda capa de Nitruro se ataca para poder conectar la capa de Polisilicio con la capa de metal (**e**), se deposita otra capa de fosfosilicato de vidrio de 1.1 μm de espesor, que se utiliza como una segunda capa de sacrificio, y se ataca en las partes que se conectarán con la capa de metal que son básicamente los anclajes (**f**), ya que se ha grabado la capa de fosfosilicato de vidrio, este patrón se utilizará para las estructuras de los anclajes de metal, de 35 nm de espesor estos estarán hechos de unas capas delgadas de Cromo y Platino, 10 nm y 25 nm respectivamente (**g**).

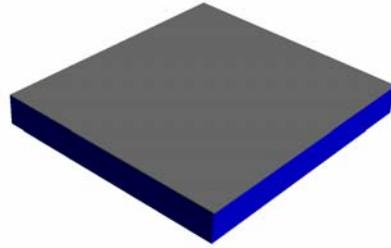
En seguida se deposita la una capa de níquel de 2 μm de espesor y se graba, ésta capa tiene como propósito formar las estructuras faltantes del interruptor en este caso: los contactos, el electrodo de actuación y los anclajes de la viga, seguidamente se deposita una capa de oro de 0.5 μm y se graba de la misma forma que la capa de níquel (**h**), estas dos capas forman la capa de metal, después se deposita una capa de oro de 3 μm de espesor, se graba y solo se deposita en áreas específicas de paredes laterales, en este caso se colocará en los contactos, esta capa tiene la finalidad de proveer una resistencia eléctrica baja (**i**).

Por último se removerán las dos capas de sacrificio (**j**), (**k**), quedando así la estructura liberada, pero hay que mencionar que el área donde se colocó la primera capa de sacrificio, como se mencionó anteriormente era donde la trinchera iba a aparecer, cuando se remueve esta capa también aparece una trinchera que es de 25 μm de profundidad (**m**). Así después de todos los pasos se tiene un interruptor, las dos versiones que diseñamos solo varían en la

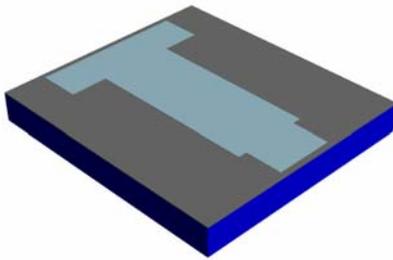
forma que tiene la viga, pero siguen el mismo proceso anteriormente explicado.



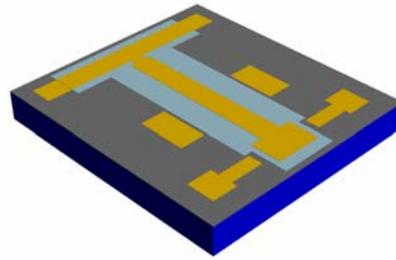
(a)



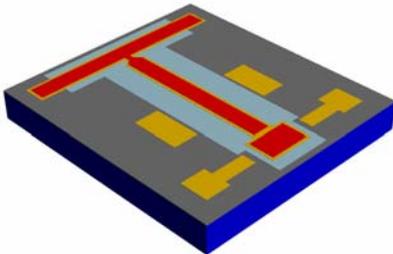
(b)



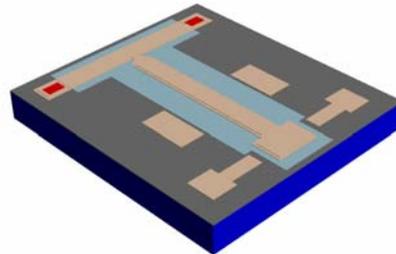
(c)



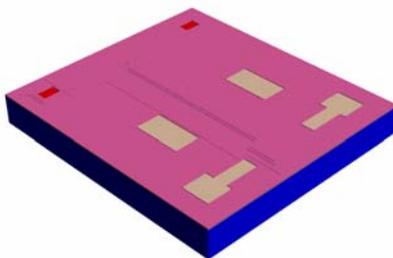
(d)



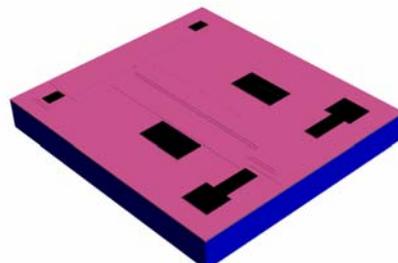
(e)



(f)



(g)



(h)

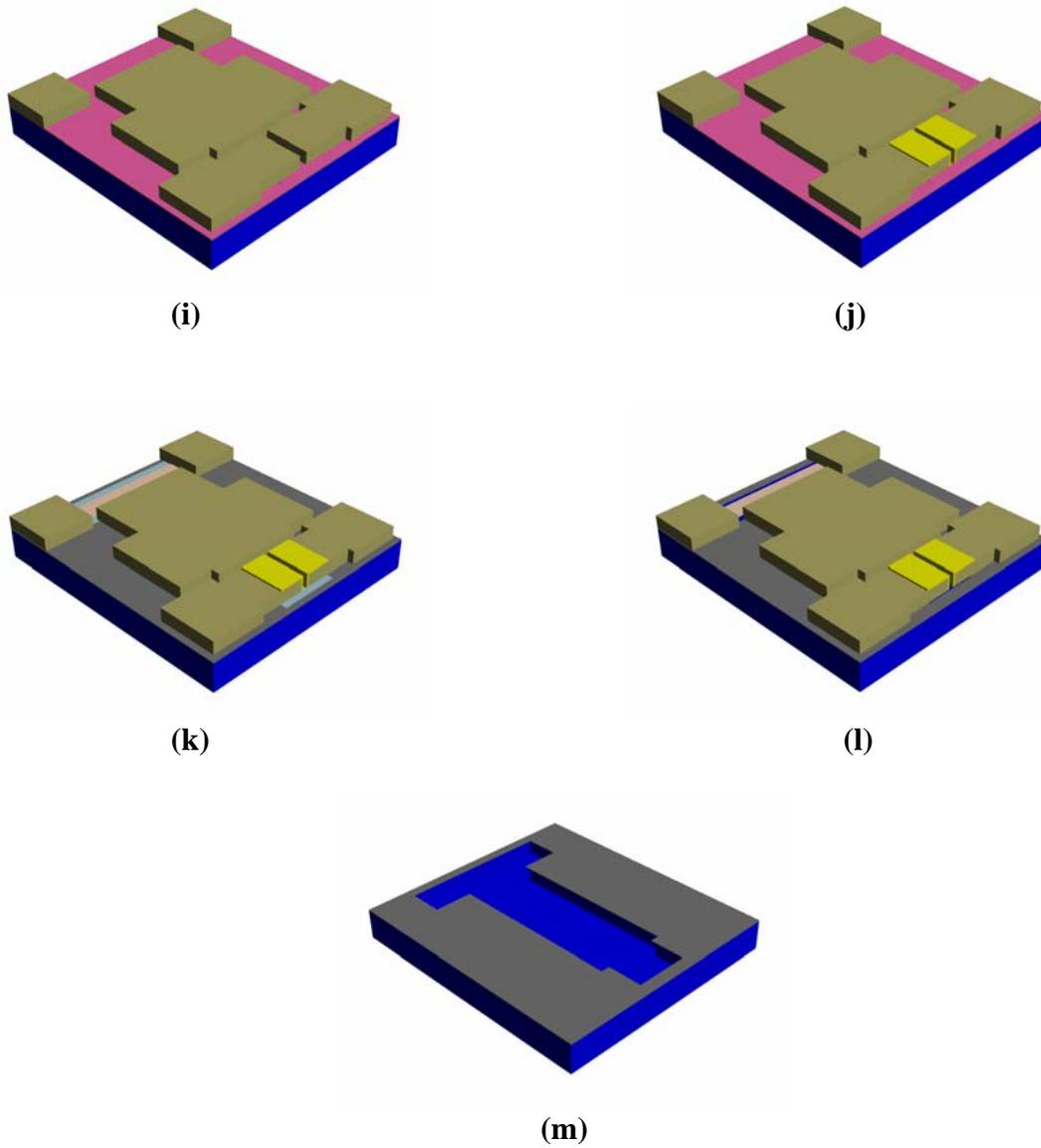
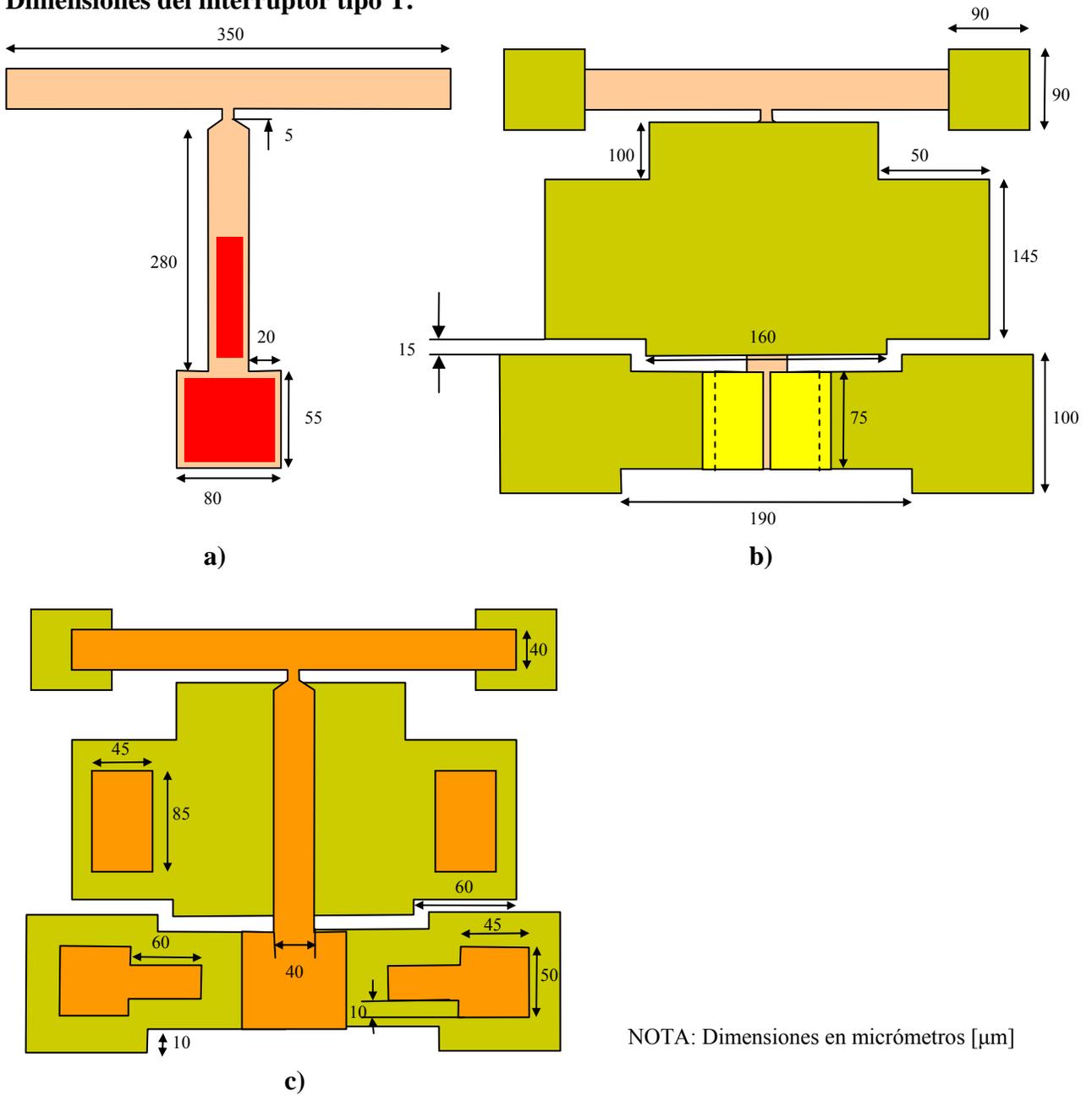


Figura 5.11 Pasos del Proceso MetalMUMPs para la fabricación del interruptor tipo T.

Dimensiones del interruptor tipo T.

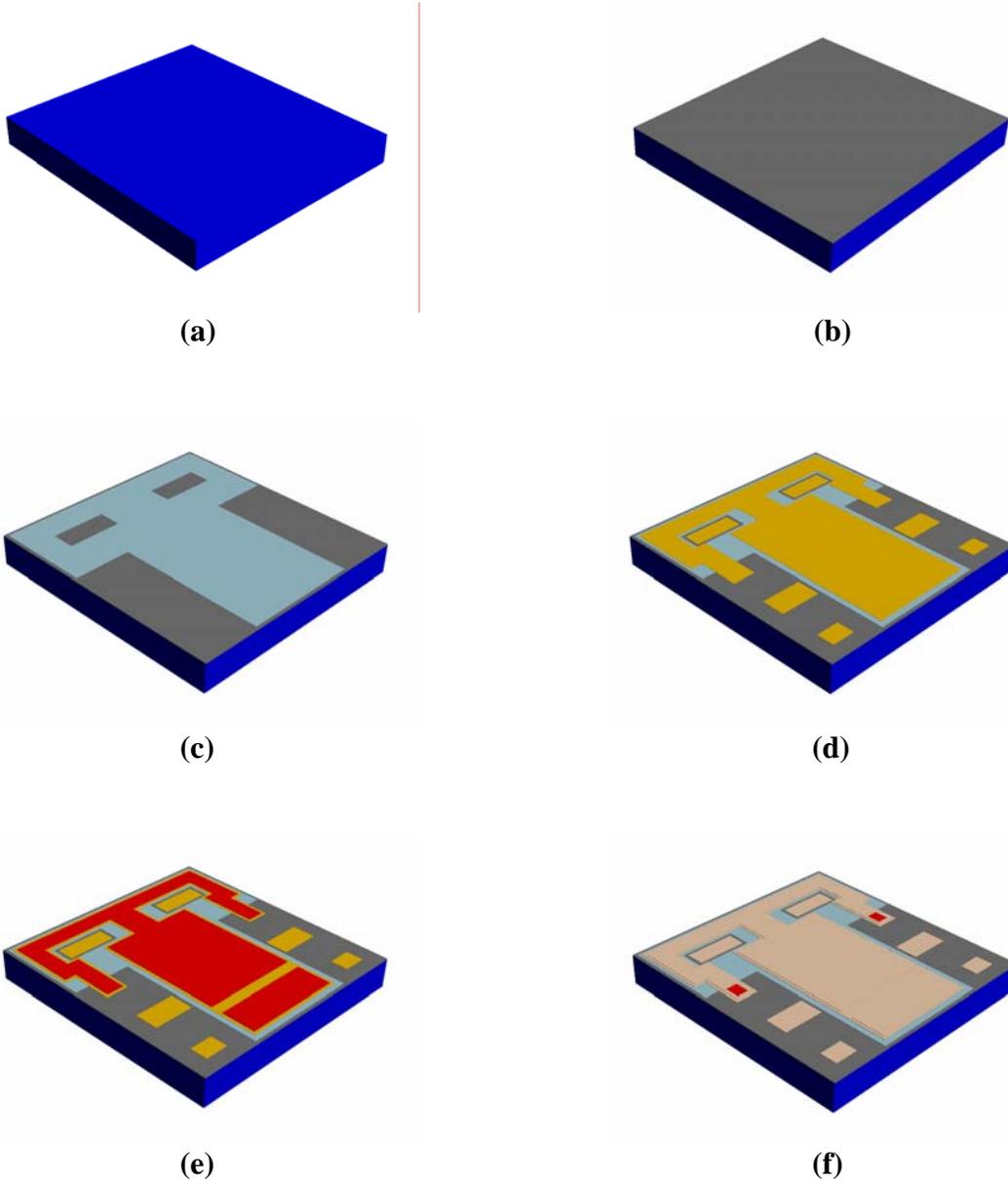


NOTA: Dimensiones en micrómetros [μm]

Figura 5.12 Dimensiones del interruptor tipo T: a) Viga de Si_3N_4 /Polosilicio/ Si_3N_4 , b) Vista superior del interruptor, c) Vista inferior del interruptor.

5.4.5 Diseño del Interruptor tipo Resorte

Para esta versión del interruptor únicamente se varió la forma de la viga, sin embargo el procedimiento del diseño es el mismo al del interruptor tipo T. A continuación se muestra los pasos para su construcción:



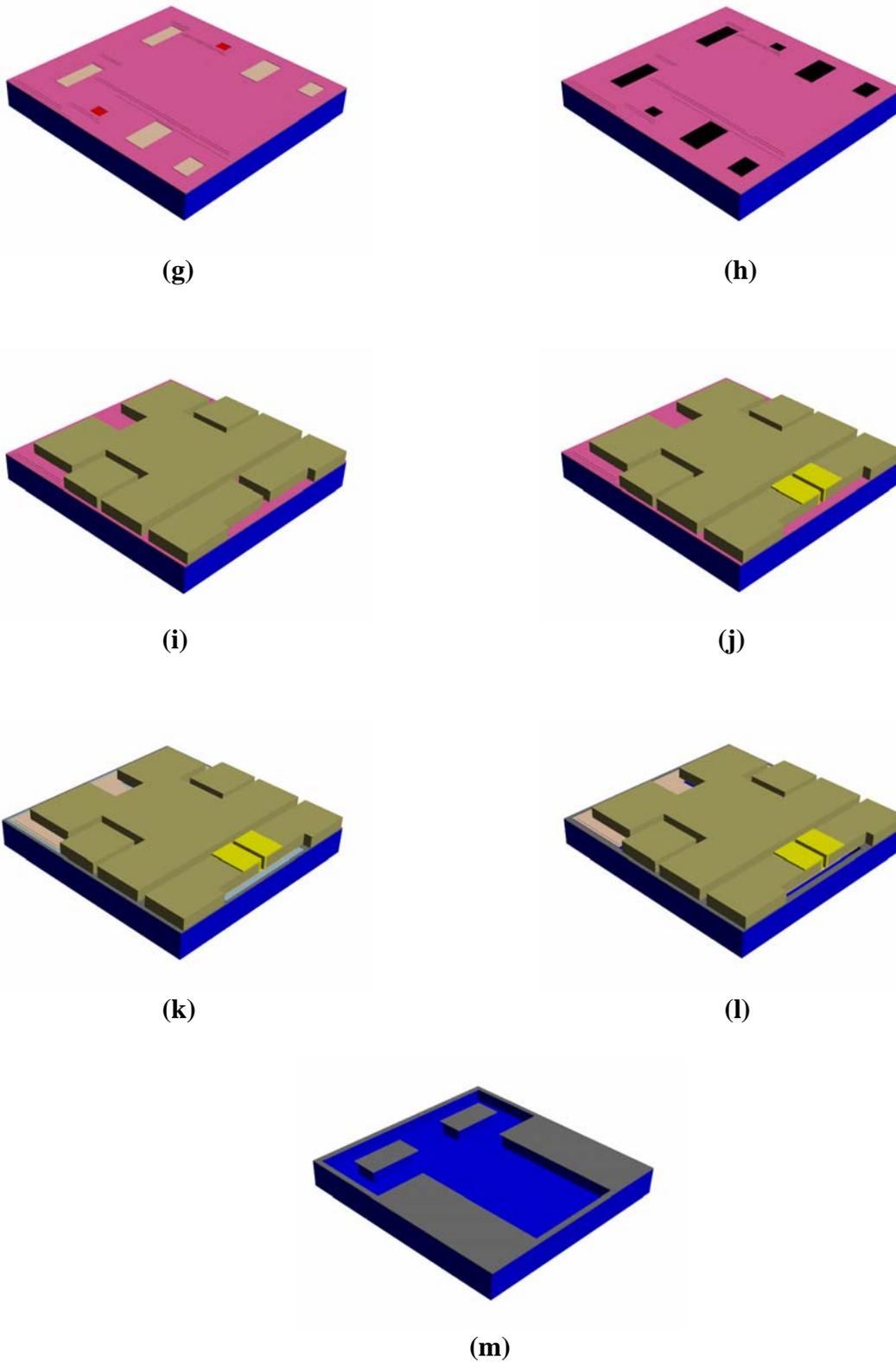


Figura 5.13 Pasos del Proceso MetalMUMPs para la fabricación del interruptor tipo Resorte.

Dimensiones del interruptor tipo Resorte

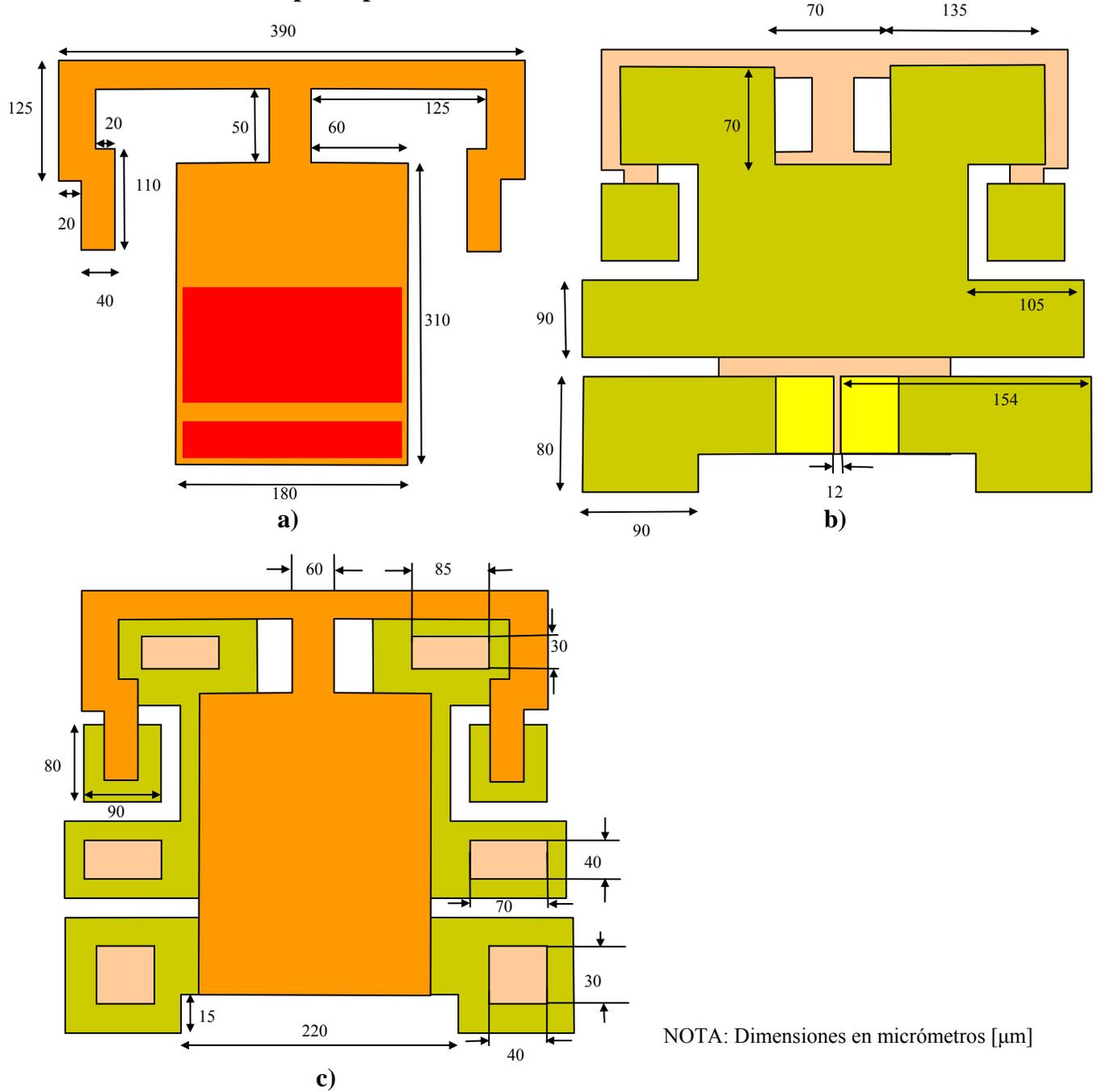


Figura 5.14 Dimensiones del interruptor tipo Resorte: a) Viga de Si_3N_4 /Polosilicio/ Si_3N_4 , b) Vista superior del interruptor, c) Vista inferior del interruptor.

5.5. Simulación del interruptor por medio del software especializado

Con ayuda del software se simularon los dos interruptores propuestos con el fin de obtener sus parámetros. CoventorWare, que se basa en el método de elemento finito (MEF), fue usado para simular el comportamiento mecánico de los interruptores propuestos, mientras que el software especializado en microondas se utilizó para obtener su modelo eléctrico y su simulación electrodinámica.

5.5.1 Constante de rigidez

La constante de rigidez puede ser medida aplicando una fuerza conocida (peso) en el final de la viga y midiendo el desplazamiento, es definida como la razón de la fuerza sobre el desplazamiento y puede ser escrita como:

$$k = \frac{F}{\delta}, \quad (5.8)$$

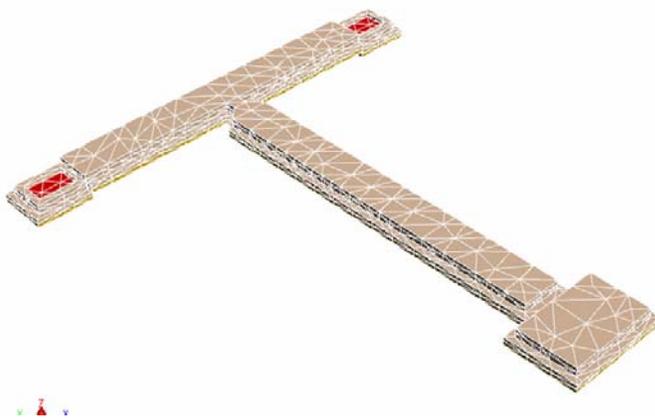
donde:

F es la fuerza estática
 δ es el desplazamiento

Con ayuda del software CoventorWare se le aplicó una fuerza en dirección z al extremo de la viga del interruptor propuesto, obteniendo así el desplazamiento de ésta en la dirección z , ya con lo anterior se procedió a utilizar la fórmula de la constante de rigidez.

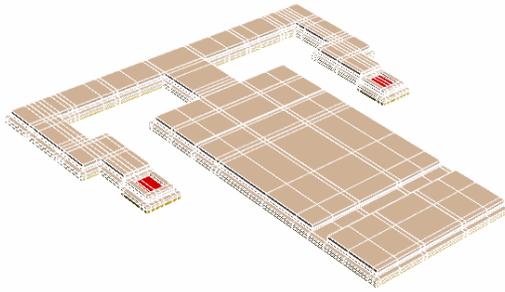
Simulación de la constante de rigidez

En las figuras 5.15 y 5.16 se muestran las vigas de los dos interruptores diseñados con sus respectivos mallados para la obtención de su constante de rigidez, en las tablas 5.2 y 5.3 se muestran los desplazamientos aplicados a las vigas, las fuerzas de reacción obtenidas y la constante de rigidez obtenida por cada desplazamiento en la simulación.



Características del mallado de la viga 1	
Tipo de mallado	Tetraedros
Orden de los elementos	Parabólico
# de elementos volumétricos	3597
Tamaño de los elementos [μm]	20

Figura 5.15 Características del mallado del interruptor tipo T.



Características del mallado de la viga 1	
Tipo de mallado	Tetraedros
Orden de los elementos	Parabólico
# de elementos volumétricos	6720
Tamaño de los elementos [μm]	20

Figura 5.16 Características del mallado del interruptor tipo Resorte.

Tablas de la Constante de rigidez de los interruptores

Desplazamiento Δ_z [μm]	Fuerza de reacción F_z [μN]	Constante de rigidez K_z [N/m]
0.2	1.137	5.686
0.4	2.286	5.715
0.6	3.458	5.763
0.8	4.664	5.830
1.0	5.917	5.917
1.2	7.227	6.022
1.4	8.606	6.147
1.6	10.07	6.291
1.8	11.62	6.454
2	13.27	6.636

Tabla 5.2 Resultados de la simulación de la constante de rigidez de la viga del interruptor tipo T.

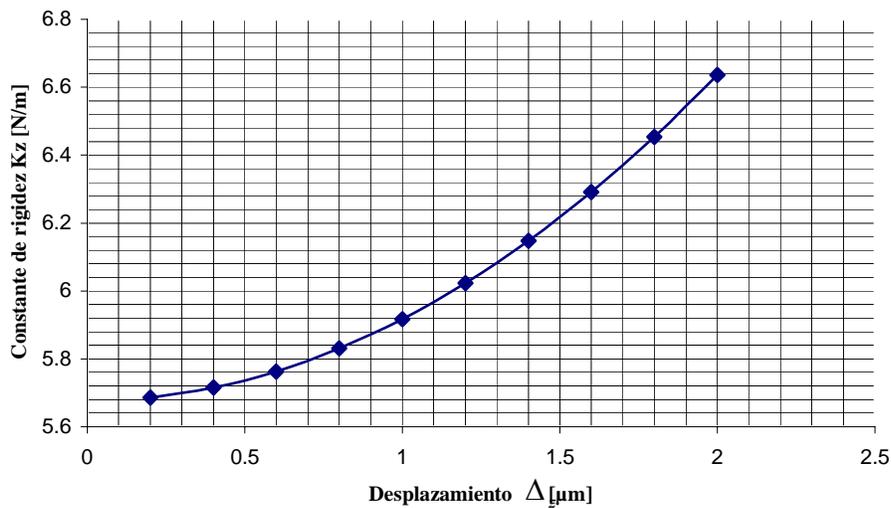


Figura 5.17 Gráfica de la constante de rigidez del interruptor tipo T.

Desplazamiento Δ_z [μm]	Fuerza de reacción F_z [μN]	Constante de rigidez K_z [N/m]
0.2	2.339	11.70
0.4	4.685	11.71
0.6	7.043	11.74
0.8	9.416	11.77
1.0	11.81	11.81
1.2	14.23	11.86
1.4	16.69	11.92
1.6	19.18	11.98
1.8	21.71	12.06
2	24.28	12.14

Tabla 5.3 Resultados de la simulación de la constante de rigidez de la viga del interruptor tipo Resorte.

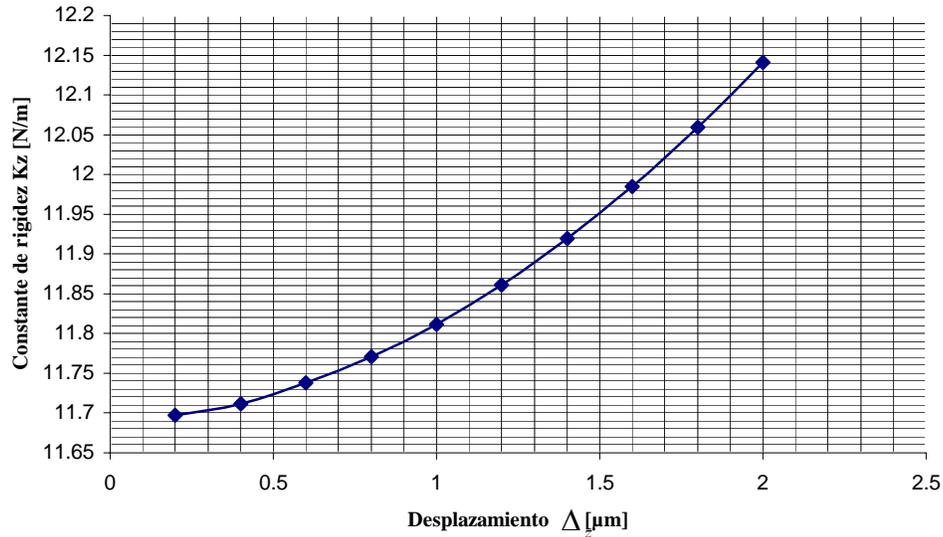


Figura 5.18 Gráfica de la constante de rigidez del interruptor tipo Resorte.

5.5.2 Voltaje de actuación

Para encontrar el voltaje se simuló el interruptor con ayuda del software CoventorWare aplicando un voltaje variable al electrodo, las estructuras se simularon de la siguiente manera:

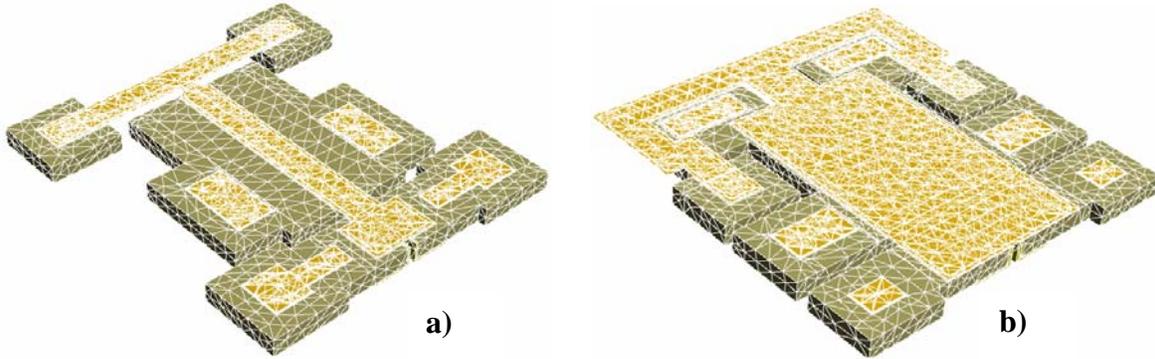


Figura 5.19 Estructuras simuladas en CoventorWare con un mallado en tetraedros: a) Interruptor tipo T, b) Interruptor tipo Resorte.

Interruptor	Voltaje de actuación V_p [V]
tipo "T"	3 - 3.01
tipo "Resorte"	2.25 - 2.26

Tabla 5.4 Resultados de la simulación del voltaje de actuación en CoventorWare.

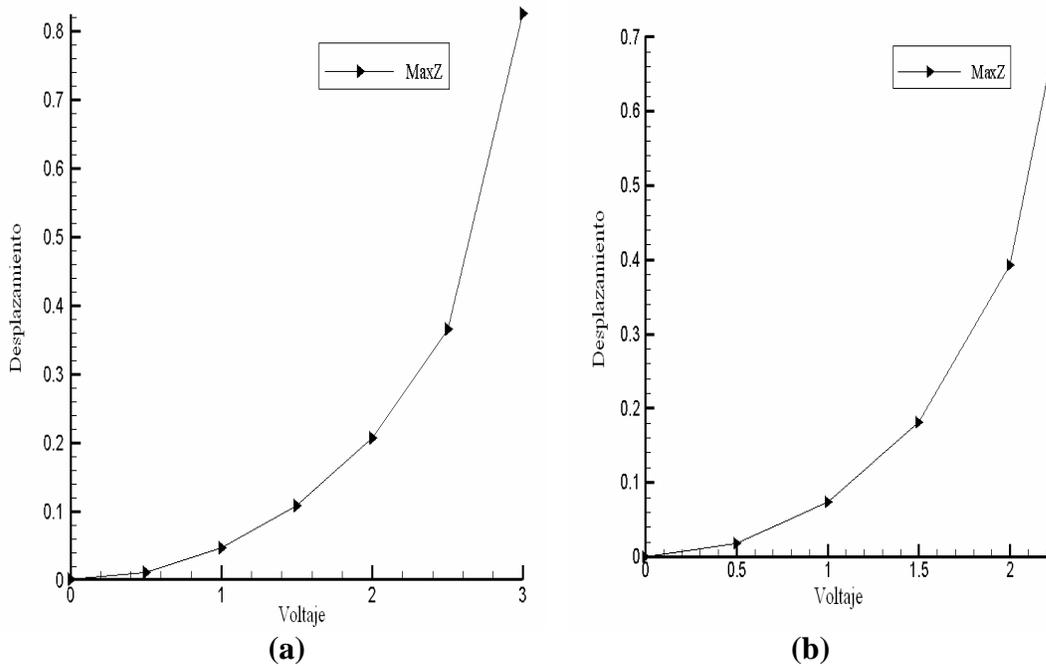


Figura 5.20 Gráficas del voltaje de actuación de los interruptores: a) tipo T, b) tipo Resorte.

Análisis de los tipos de Anclaje

Ya que se había obtenido la primera versión del interruptor que trabajaba en forma adecuada, aunque aún no contaba con los valores que se querían obtener, se procedió a colocar los anclajes de las estructuras del electrodo y las líneas de RF, al momento de colocarlos se procedió a realizar una corrida con el software CoventorWare, y se observó que el voltaje de actuación se veía afectado, por esa razón, para obtener el mejor interruptor se realizaron siete diferentes tipos de versiones de anclajes con el objetivo de conocer las causas de la variación del voltaje de actuación al momento de colocarle los anclajes a las líneas de RF, para ello se tomaron en cuenta dos tipos de factores: el tipo de material del cual estaban hechos los anclajes, y la forma de éstos. A continuación se mostrará una tabla donde se menciona la diferencia que existe en las características de los anclajes de cada versión:

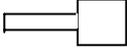
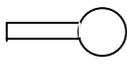
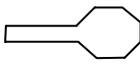
Versión	Material de los anclajes	Forma del anclaje	Realizable en MetalMUMPs
1	Nitruro de Silicio		Si
2	Níquel		No
3	Cr y Ti		No
4	Nitruro de Silicio, Cr y Ti		Si
5	Nitruro de Silicio		Si
6	Nitruro de Silicio		Si
7	Nitruro de Silicio		Si

Tabla 5.5 Materiales y forma de los diferentes anclajes simulados.

Selección del anclaje

Una vez realizadas las pruebas de simulación y con ayuda de los resultados de cada corrida, se seleccionó el anclaje más apropiado para la aplicación, para ello se utilizó el software CoventorWare para obtener el voltaje de actuación de cada versión y otros parámetros citados en la siguiente tabla, los resultados fueron:

Ver sión	Voltaje de actuación [V]	C_{UPENT} [fF]	C_{UPSAL} [fF]	$C_{PULL-IN}$ ENTRADA [fF]	$C_{PULL-IN}$ SALIDA [fF]	$F_{Reacción}$ [μN]
1	6.25-6.5	13.24	14.13	27.39	30.23	1.202
2	6.5-6.75	13.82	13.97	22.77	23.11	1.040
3	7.5-7.75	14.79	13.61	28.81	25.09	1.452
4	6.25-6.5	13.23	14.14	28.07	31.10	1.221
5	6.5-6.75	14.18	14.33	24.12	24.48	1.083
6	6.5-6.75	14.31	14.42	24.24	24.69	1.079
7	6.5-6.75	14.32	14.42	24.24	24.69	1.079

Tabla 5.6 Características de los diferentes interruptores cambiando la forma y los materiales de los anclajes.

Se puede observar en la tabla 5.6 que los valores de los parámetros entre las diferentes versiones de los interruptores no varían mucho de uno a otro, por lo tanto se escogió la versión que tenga el voltaje de actuación más bajo, debido a que en el teléfono celular se está limitado en la fuente, pero también se tomó en cuenta la forma de los anclajes, así que se escogió la forma que tuviera la posibilidad de soportar mejor a la estructura de las líneas de RF, por éstas razones el interruptor seleccionado para nuestro propósito fue la versión No 5, utilizando los materiales de Nitruro de silicio, Cromo y Titanio para tener así un mejor contacto eléctrico, y no se afectaría mucho los parámetros, se puede comprobar comparando la versión 1 con la 4, donde se observa que sus parámetros no varían mucho, se tiene la misma forma pero el material de los anclajes es diferente.

5.5.3 Factor de calidad de conmutación FCC

Una forma de caracterizar una red de un puerto conmutable de dos estados (en el interruptor RF MEMS su estado abierto y su estado cerrado) es con una figura de mérito llamada el Factor de Calidad de Conmutación (FCC) o en inglés Commutation Quality Factor (CQF). Este puede ser aplicado a diferentes dispositivos conmutables (semiconductores, ferroelectricos, superconductores, etc.) y es usado para el diseño de componentes de dos estados con características óptimas. El FCC es definido como la razón de las impedancias de entrada de un bipuerto recíproco sin pérdidas terminado en la impedancia par Z_1 y Z_2 , tal que las partes imaginarias de ambas impedancias de entrada sean cero.

Cuando se caracteriza un interruptor con el FCC y se optimiza, también se esta optimizando el circuito del cuál el interruptor formará parte (un modulador, desplazador de fase, etc.) El FCC se recomienda usar para determinar las mínimas pérdidas de inserción aceptables de un componente de microondas.

Para obtener el FCC de un dispositivo conmutable es necesario conocer sus estados. Los dos estados de un dispositivo conmutable (encendido y apagado) de un puerto se pueden caracterizar por el par de impedancias:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad \text{y} \quad Z_2 = R_2 + jX_2. \quad (5.9)$$

Se comenzara mostrando la ecuación general para obtener el FCC de un dispositivo conmutable [8]:

$$K + \frac{1}{K} = \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_2}{R_1} + \frac{(X_2 - X_1)^2}{R_1 R_2}. \quad (5.10)$$

Con el FCC (K) indicamos la calidad del dispositivo conmutable, se dice que un buen dispositivo de conmutación en aplicaciones prácticas debe tener un alto factor de calidad de conmutación mientras más alto sea su valor, entonces será de mejor calidad el interruptor, por ejemplo $K > 1000$, pero en la aplicación desarrollada la meta es superar al diodo p-i-n que tiene un $K = 5000$, por lo tanto el K de los interruptores diseñados debe ser mayores a ese valor. Para encontrar el FCC, la ecuación 5.10 se puede simplificar en dos formas:

- a) Para el caso cuando la parte real del dispositivo de conmutación esta cambiando ($R_2 > R_1, X_2 \cong X_1$), el FCC será:

$$K \cong \frac{R_2}{R_1}. \quad (5.11)$$

- b) Para el caso cuando la parte imaginaria del dispositivo de conmutación esta cambiando ($R_2 \cong R_1, X_2 > X_1$), el FCC será:

$$K \cong \frac{(X_1 - X_2)^2}{R_1 R_2}. \quad (5.12)$$

5.5.4 FCC de los interruptores propuestos

Para encontrar el Factor de Calidad de Conmutación (FCC) del interruptor que fue diseñado usando la tecnología MetalMUMPs, se supuso que se tenía una semejanza a un capacitor ferroeléctrico ya que los platos paralelos son de metal. La figura 5.21 muestra el circuito equivalente de un capacitor ferroeléctrico. Cuatro parámetros son usados para describir las propiedades en microondas, la resistencia r_1 , y la capacitancia C_1 están conectadas en serie en el estado sin alimentación (no se le ha aplicado un voltaje de DC), mientras que r_2 y C_2 , respectivamente, en el estado de alimentación.

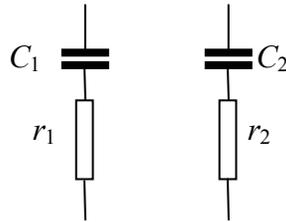


Figura 5.21 Circuito equivalente de un capacitor ferroeléctrico.

Por lo tanto, el par de impedancias del capacitor ferroeléctrico se convierten a:

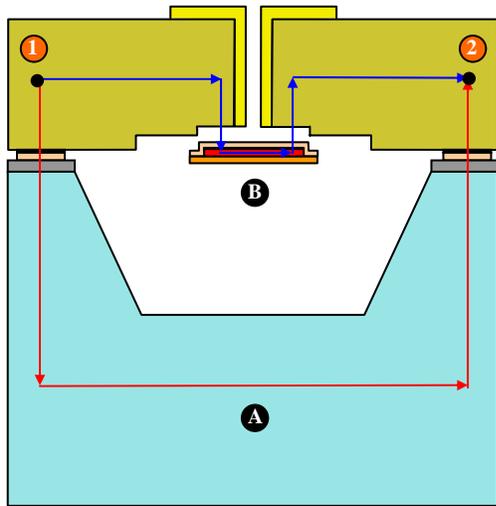
$$\begin{aligned} R_1 &= r_1, \\ R_2 &= r_2, \\ X_1 &= \frac{1}{\omega C_1}, \\ X_2 &= \frac{1}{\omega C_2}. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Para el caso de este interruptor la fórmula para obtener el factor de calidad de conmutación en cualquier frecuencia es:

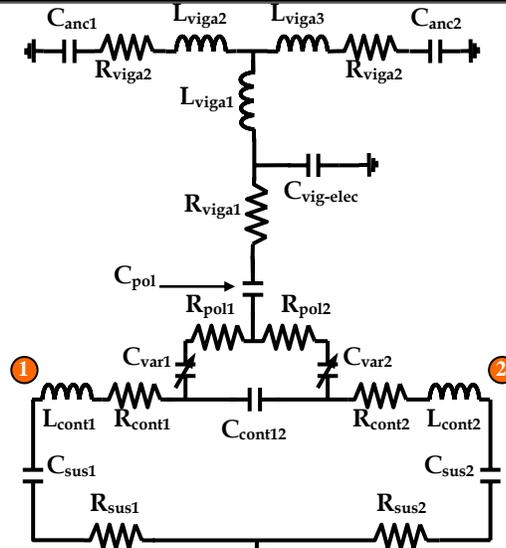
$$K = \frac{\left(\frac{C_1}{C_2} - 1\right)^2}{(\omega C_1)^2 r_1 r_2}. \quad (5.14)$$

Modelo eléctrico de los interruptores

Para poder obtener el modelo eléctrico de los interruptores propuestos, se analizaron las posibles trayectorias que la señal de RF tomaría dentro de cada interruptor para llegar desde la entrada hasta la salida. En la figura 5.22a se observan las dos trayectorias principales que la señal podría tomar en el interruptor tipo T, en donde la ideal es la trayectoria **B** donde pasa por los contactos, atraviesa la viga y llega al otro contacto, en cambio la trayectoria **A** presenta una trayectoria por el sustrato del interruptor, que es debida a la conductividad tan alta que posee el sustrato.



(a)



(b)

- 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_{sus1} : es la mitad de la resistencia total del sustrato.
- R_{sus2} : es la mitad de la resistencia total del sustrato.
- L_{cont1} : es la inductancia del contacto de entrada de Ni/Au.
- L_{cont2} : es la inductancia del contacto de salida de Ni/Au.
- R_{cont1} : es la resistencia del contacto de entrada de Ni/Au.
- R_{cont2} : es la resistencia del contacto de salida de Ni/Au.
- C_{cont12} : es la capacitancia entre el contacto de entrada y el contacto de salida de Ni/Au.
- C_{var1} : es la capacitancia entre el contacto de entrada de Ni/Au y la viga de Polisilicio.
- C_{var2} : es la capacitancia entre el contacto de salida de Ni/Au y la viga de Polisilicio.
- R_{pol1} : es la mitad de la resistencia total de la parte de Polisilicio que se encarga de la conmutación.
- R_{pol2} : es la mitad de la resistencia total de la parte de Polisilicio que se encarga de la conmutación.
- C_{pol} : es la capacitancia entre la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación y la parte de Polisilicio que se encarga de la conmutación.
- R_{viga1} : es 1/3 de la resistencia total de la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación.
- R_{viga2} : es 1/3 de la resistencia total de la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación.
- R_{viga3} : es 1/3 de la resistencia total de la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación.
- L_{viga1} : es 1/3 de la inductancia total de la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación.
- L_{viga2} : es 1/3 de la inductancia total de la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación.
- L_{viga3} : es 1/3 de la inductancia total de la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación.
- C_{canc1} : es la capacitancia entre el anclaje de Ni/Au izquierdo de la viga de Polisilicio y el sustrato.
- C_{canc2} : es la capacitancia entre el anclaje de Ni/Au derecho de la viga de Polisilicio y el sustrato.
- $C_{vig-elec}$: es la capacitancia entre la viga de Polisilicio y el electrodo de actuación.

	Substrato		Oxido 1		Polisilicio		Oxido 2		Metal
	oxido (aislamiento)		Nitruro 1		Nitruro 2		Anclaje de Metal		Pared lateral Metal
	Photoresist								

Figura 5.22 a) Trayectoria de la señal de RF, b) Circuito eléctrico general del interruptor tipo T.

Conociendo las trayectorias de la señal es posible realizar un circuito eléctrico equivalente del interruptor, en la figura 5.22b se muestra el circuito eléctrico del interruptor tipo T, para poder visualizar de manera más detallada como se obtuvo este circuito se sugiere ver la figura 5.23:

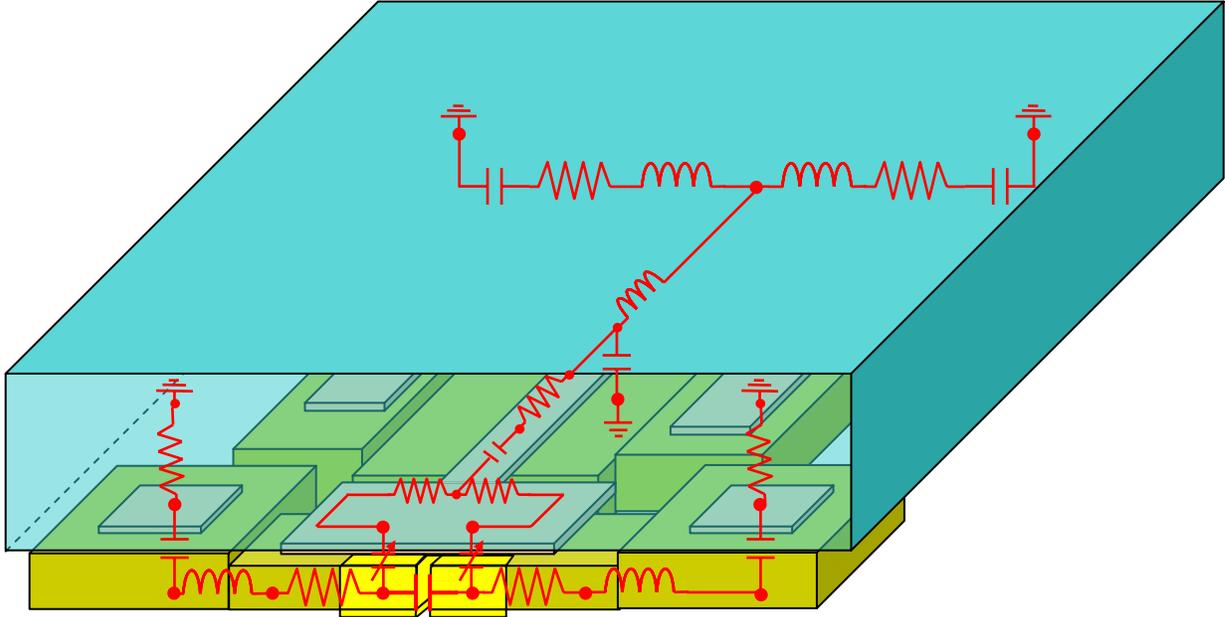
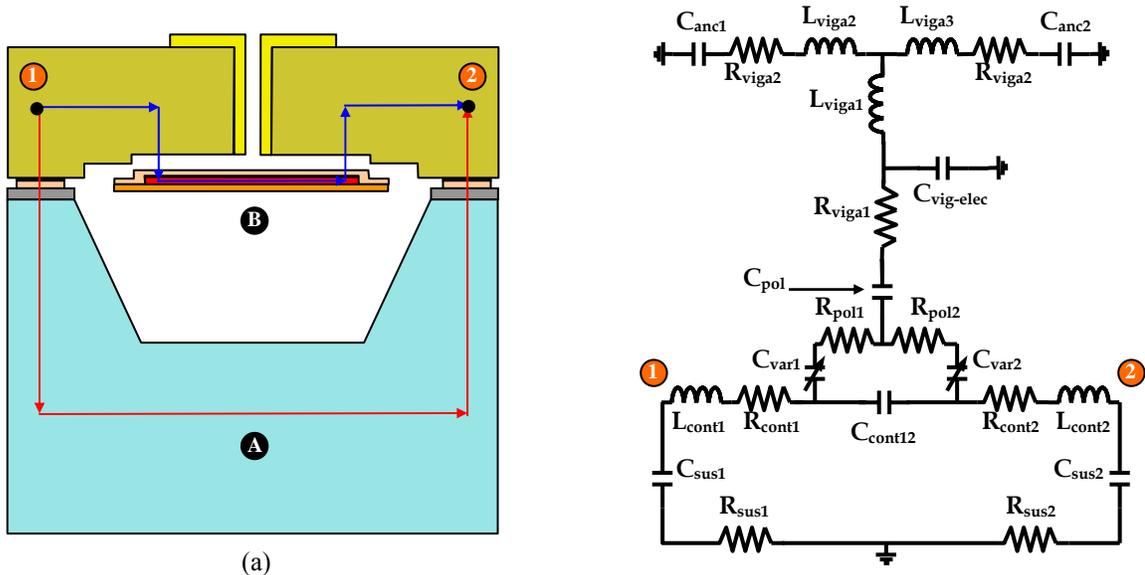


Figura 5.23 Esquema del interruptor tipo T mostrando su circuito eléctrico.

Para el interruptor tipo Resorte se obtuvo su circuito eléctrico de manera similar.



- 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_{sus1} : es la mitad de la resistencia total del sustrato.
- R_{sus2} : es la mitad de la resistencia total del sustrato.
- L_{cont1} : es la inductancia del contacto de entrada de Ni/Au.

- L_{cont2} : es la inductancia del contacto de salida de Ni/Au.
 R_{cont1} : es la resistencia del contacto de entrada de Ni/Au.
 R_{cont2} : es la resistencia del contacto de salida de Ni/Au.
 C_{cont12} : es la capacitancia entre el contacto de entrada y el contacto de salida de Ni/Au.
 C_{var1} : es la capacitancia entre el contacto de entrada de Ni/Au y la viga de Polisilicio.
 C_{var2} : es la capacitancia entre el contacto de salida de Ni/Au y la viga de Polisilicio.
 R_{pol1} : es la mitad de la resistencia total de la parte de Polisilicio que se encarga de la transmisión.
 R_{pol2} : es la mitad de la resistencia total de la parte de Polisilicio que se encarga de la transmisión.
 C_{pol} : es la capacitancia entre la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación y la parte de Polisilicio que se encarga de la transmisión de la señal de RF.
 R_{viga1} : es 1/3 de la resistencia total de la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación.
 R_{viga2} : es 1/3 de la resistencia total de la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación.
 R_{viga3} : es 1/3 de la resistencia total de la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación.
 L_{viga1} : es 1/3 de la inductancia total de la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación.
 L_{viga2} : es 1/3 de la inductancia total de la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación.
 L_{viga3} : es 1/3 de la inductancia total de la viga de Polisilicio que se encarga de la actuación.
 C_{anc1} : es la capacitancia entre el anclaje de Ni/Au izquierdo de la viga de Polisilicio y el sustrato.
 C_{anc2} : es la capacitancia entre el anclaje de Ni/Au derecho de la viga de Polisilicio y el sustrato.
 $C_{vig-elec}$: es la capacitancia entre la viga de Polisilicio y el electrodo de actuación.

	Substrato		Oxido 1		Polisilicio		Oxido 2		Metal
	oxido (aislamiento)		Nitruro 1		Nitruro 2		Anclaje de Metal		Pared lateral Metal
	Photoresist								

Figura 5.24 a) Trayectoria de la señal de RF, b) Circuito eléctrico general del interruptor tipo Resorte.

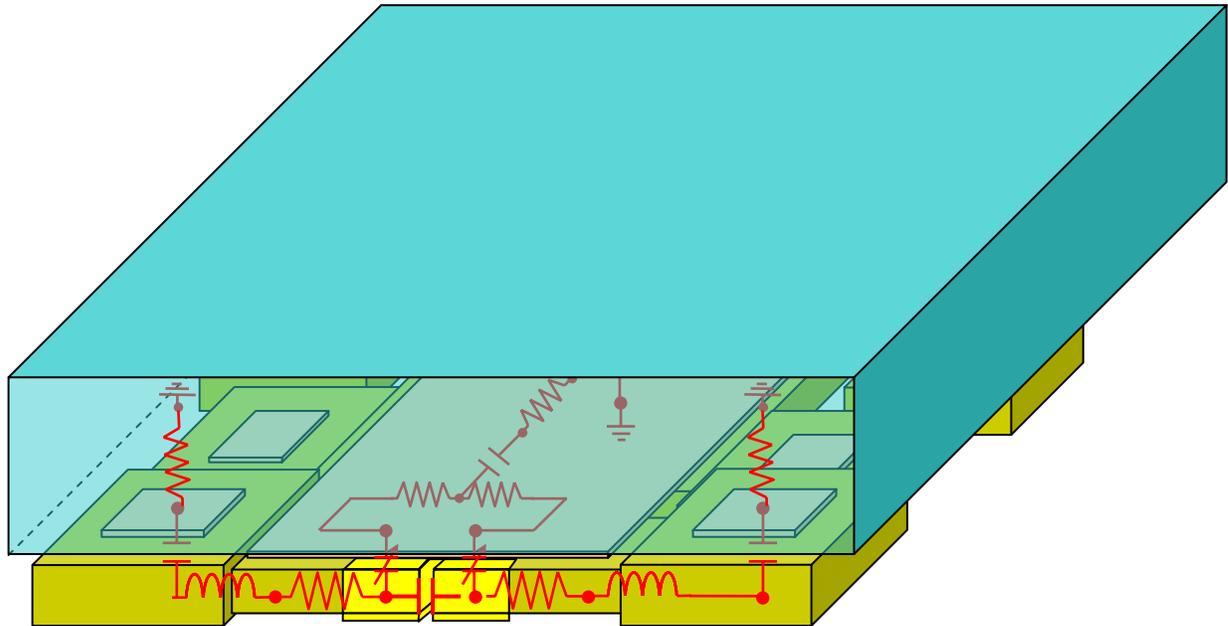


Figura 5.25 Esquema del interruptor tipo Resorte mostrando su circuito eléctrico.

Explicación del circuito obtenido

A continuación se dará una breve explicación de cómo se obtuvieron los circuitos equivalente de las figuras 5.22b y 5.24b.

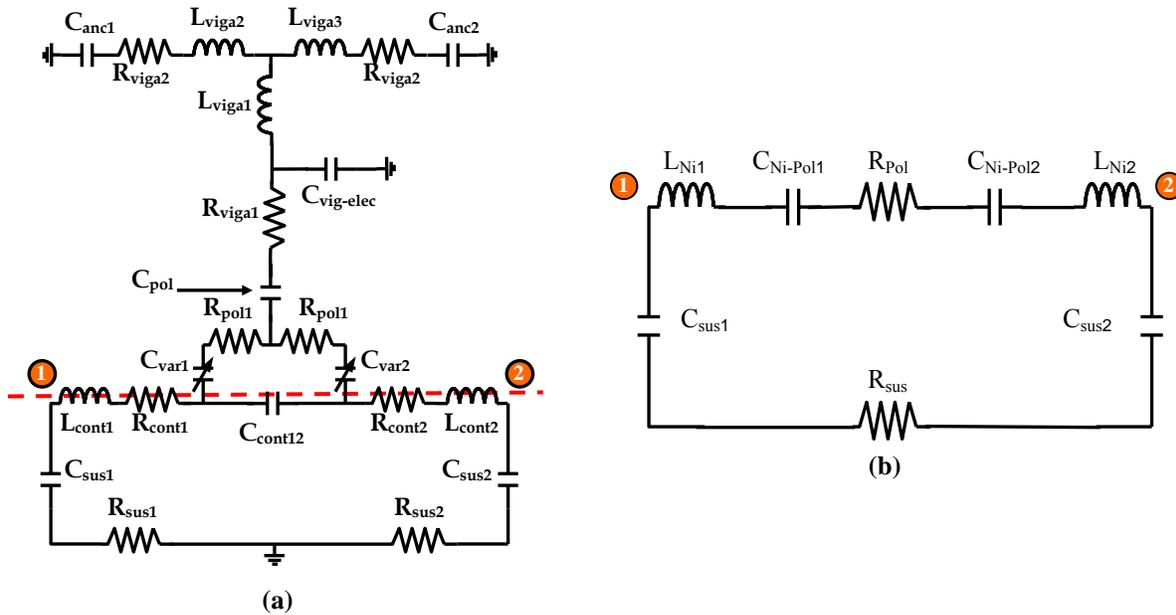
El circuito eléctrico se formó tomando en cuenta que la señal puede llegar del contacto de entrada al contacto de salida por varios caminos, uno de ellos es directamente por medio de la viga que hace contacto y el segundo camino es por el sustrato. Para el camino en el sustrato aparece una resistencia al atravesarlo la cual se dividió en dos para tener un circuito simétrico y son las resistencias R_{sus1} y R_{sus2} , también aparece una capacitancia en el sustrato que es formada por el anclaje metálico y el mismo sustrato en donde el dieléctrico entre ellos es el Nitruro, se colocaron dos capacitancias (C_{sus1} y C_{sus2}) debido a que son dos anclajes.

Si se sigue la trayectoria a través de la viga existe una inductancia (L_{cont1}) y una resistencia (R_{cont1}) debidas al contacto de entrada, en el otro contacto de salida de igual forma se tendrá una inductancia L_{cont2} y una resistencia R_{cont2} . Además existe una capacitancia (C_{cont12}) entre los contactos, que esta compuesta por los mismos contactos y como dieléctrico el aire que se encuentra entre ellos.

Ahora debe de analizarse la viga, la cual se compone de dos capacitancias variables (C_{var1} y C_{var2}), una en cada contacto que varían mientras la viga se va acercando o alejando de los contactos, También la señal atraviesa la viga por la parte de Polisilicio, por lo que hay una resistencia (R_{pol}) debida a que el material no es un conductor perfecto, ésta se dividió en dos (R_{pol1} y R_{pol2}) para tener un circuito simétrico y para conectar el circuito de la parte faltante de la viga (la que se encarga de la transmisión de la actuación). Parte de la señal atraviesa el Nitruro que separa las dos partes de Polisilicio, entre éstas existe una capacitancia C_{pol} y toda la parte de Polisilicio de actuación se puede representar fácilmente por una sola resistencia y una inductancia, pero para tener un circuito simétrico se dividió en tres partes, una parte en el centro de la viga y las otras dos en cada uno de los extremos, éstas son las resistencias (R_{vig1} , R_{vig2} , R_{vig3}) y las inductancias (L_{vig1} , L_{vig2} , L_{vig3}). En esta misma parte se presentan capacitancias que son: la capacitancia entre el electrodo y la viga ($C_{vig-elec}$) y las capacitancias (C_{anc1} y C_{anc2}) que se forman por los anclajes que soportan a la viga y la misma viga.

Circuito simplificado

El circuito obtenido en los dos interruptores es el mismo, sin embargo se trata de un circuito muy complejo para su análisis, por lo que se buscó una manera de simplificarlo suponiendo que al momento de obtener la impedancia del interruptor para los estados de abierto y cerrado la parte superior en la figura 5.26a (es decir la viga) se estaría tomando dentro de la impedancia total, así el circuito simplificado tomaría la forma:

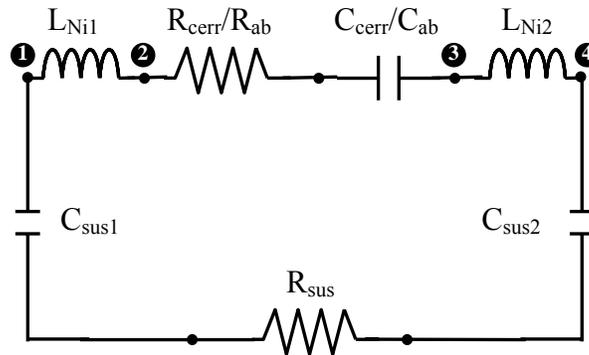


- L_{Ni1} : es la inductancia del contacto de entrada de Ni/Au.
- L_{Ni2} : es la inductancia del contacto de salida de Ni/Au.
- $C_{Ni-Pol1}$: es la capacitancia entre el contacto de entrada de Ni/Au y la viga de Polisilicio.
- $C_{Ni-Pol2}$: es la capacitancia entre el contacto de salida de Ni/Au y la viga de Polisilicio.
- R_{pol} : 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.

Figura 5.26 a) Circuito eléctrico de los interruptores, b) Circuito simplificado de los interruptores.

Obtención del modelo eléctrico general

El circuito simplificado obtenido anteriormente para los dos interruptores se puede reducir a un circuito más simple, en donde dependiendo del tipo de interruptor variarán los valores de los elementos. Para la obtención de sus elementos se utilizó el software especializado en microondas.



- L_{Ni1} : es la inductancia del contacto de entrada de Ni/Au que se encuentra entre los nodos 1 y 2 .
- R_{ab} : es la resistencia total siguiendo la trayectoria entre los nodos 1 y 4 en el estado abierto.
- R_{cerr} : es la resistencia total siguiendo la trayectoria entre los nodos 1 y 4 en el estado cerrado.
- C_{ab} : es la capacitancia total entre los contactos de Ni/Au y la viga de polisilicio así como la capacitancia propia entre los contactos en el estado abierto.
- C_{cerr} : es la capacitancia total entre los contactos de Ni/Au y la viga de polisilicio así como la capacitancia propia entre los contactos 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.
- L_{Ni2} : es la inductancia del contacto de salida de Ni/Au que se encuentra entre los nodos 3 y 4 .

Figura 5.27 Modelo eléctrico general de los dos interruptores diseñados.

Obtención de los parámetros eléctricos

Para obtener el modelo eléctrico de los interruptores se analizaron las partes que los componen en el dominio de la frecuencia, como se observa en la figura 5.27 el modelo eléctrico de los interruptores en los estados abierto y cerrado es el mismo, la diferencia radica solo en el valor de sus componentes. Antes de encontrar los valores, se tiene que analizar el circuito general, en donde se harán las siguientes consideraciones debido a la geometría del circuito:

- 1 La capacitancia entre el contacto de entrada de Ni/Au y el sustrato, C_{sus1} , y la capacitancia entre el contacto de salida de Ni/Au y el sustrato, C_{sus2} , son iguales debido a que tienen las mismas dimensiones y están contruidos del mismo material.

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

- 2 La inductancia del contacto de entrada de Ni/Au, L_{Ni1} , y la inductancia del contacto de salida de Ni/Au, L_{Ni2} , son iguales debido a que tienen las mismas dimensiones y están contruidos del mismo material.

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

Parámetros del interruptor tipo T

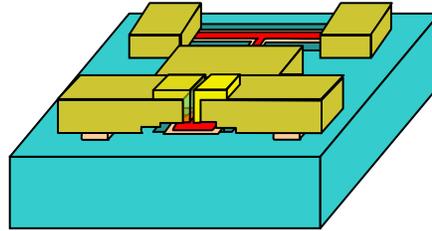


Figura 5.28 Interruptor tipo T.

Para obtener el modelo eléctrico del interruptor tipo T, éste se separo en distintas secciones, y se simularon individualmente para obtener sus impedancias, el comportamiento de las impedancias en frecuencia se simulo dentro del rango de 0 – 20 GHz, las partes en que se dividió fueron:

- El interruptor en estado abierto.
- El interruptor en estado cerrado.
- Los anclajes del interruptor.
- Un contacto del interruptor.

Para la obtención de L_{Ni} se simuló por separado cualquiera de los contactos de Ni/Au, la impedancia obtenida, representa dentro del modelo eléctrico los elementos que comprenden los puntos ❶ – ❷ y ❸ – ❹ , al analizar la impedancia podemos constatar que la parte real es despreciable, en cambio tenemos una inductancia de un valor alto.

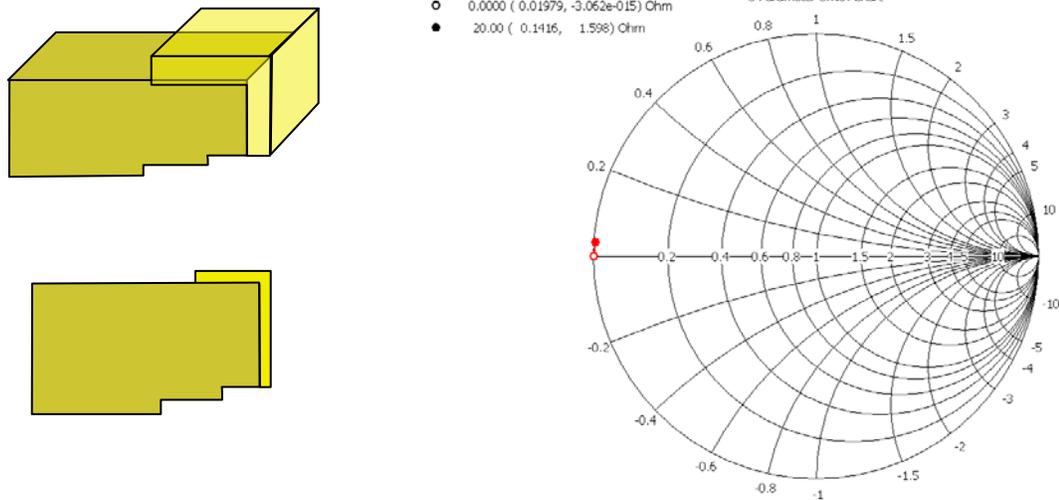


Figura 5.29 Comportamiento del contacto para el interruptor tipo T en la banda de 0-20 GHz por medio de la carta de Smith.

Para obtener el comportamiento de la impedancia de la trayectoria no deseada a través del sustrato, Z_{sus} es decir, la comprendida entre los puntos ❶ - ❷, se simuló solamente los anclajes de los contactos y el sustrato mismo, la impedancia obtenida está compuesta de una capacitancia y una resistencia, la capacitancia corresponde al valor de $2C_{sus}$ y se formó debido a que se tiene un dieléctrico entre dos conductores, los conductores son el anclaje de metal y el sustrato y los dieléctricos son el Nitruro y el óxido de aislamiento, la resistencia R_{sus} es debida al sustrato. El espesor usado dentro de la simulación corresponde al uso de manera estándar, es decir $525 \mu m$.

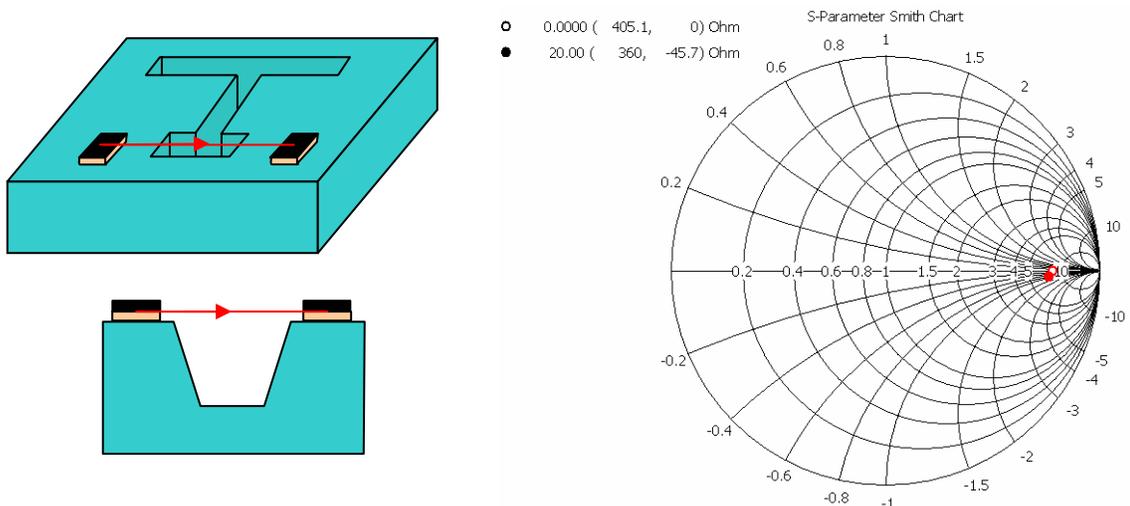


Figura 5.30 Comportamiento de los anclajes para el interruptor tipo T en la banda de 0-20 GHz por medio de la carta de Smith.

Por último se debe de analizar el interruptor en sus dos estados: abierto y cerrado, para obtener Z_{ab} y Z_{cerr} , estas impedancias corresponden a la sección ❷ - ❸. Para obtenerlas simplemente se simuló los contactos de Ni/Au junto con la viga de Polisilicio cubierta

con Si_3N_4 , para el primer caso sin que éstos elementos estuvieran en contacto, es decir, en estado abierto, y para la segunda opción realizando un contacto ideal entre la viga y los contactos. Los resultados se muestran en las figuras 5.31 y 5.32 respectivamente.

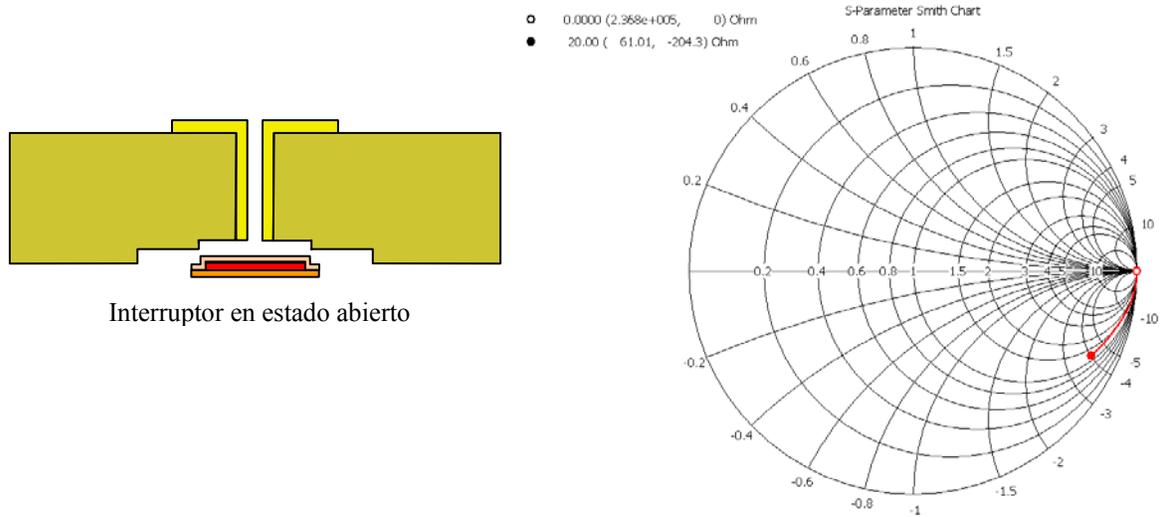


Figura 5.31 Comportamiento en estado abierto del interruptor tipo T en la banda de 0-20 GHz por medio de la carta de Smith.

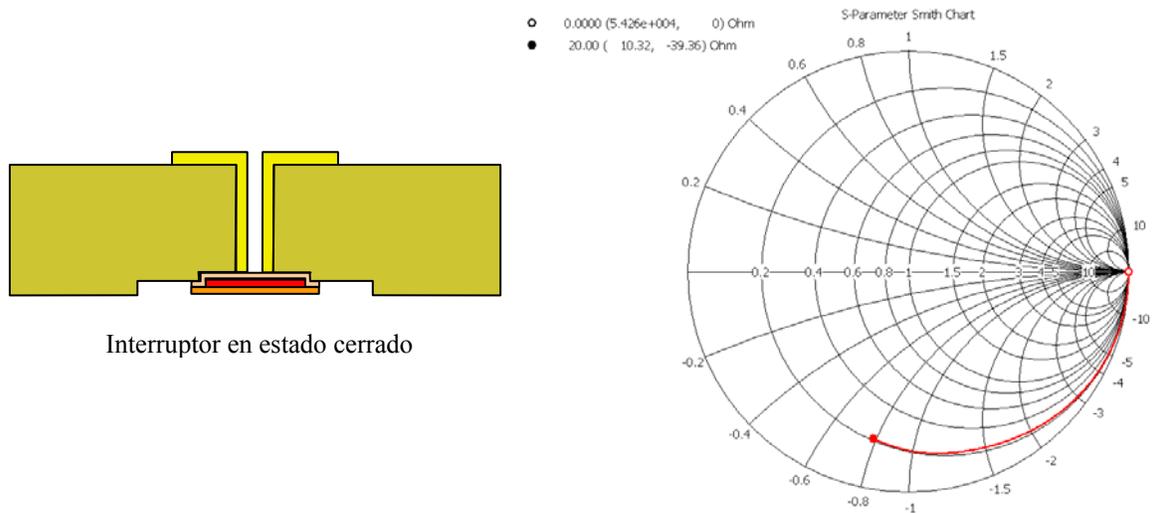


Figura 5.32 Comportamiento en estado cerrado del interruptor tipo T en la banda de 0-20 GHz por medio de la carta de Smith.

Parámetros del interruptor tipo Resorte

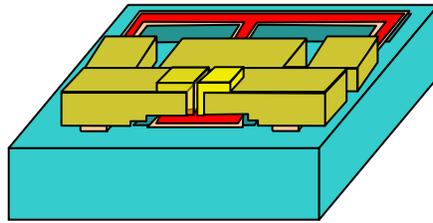


Figura 5.33 Interruptor tipo Resorte.

El mismo procedimiento descrito anteriormente para el interruptor tipo T, se realizó para el interruptor tipo Resorte, los resultados obtenidos se muestran a continuación.

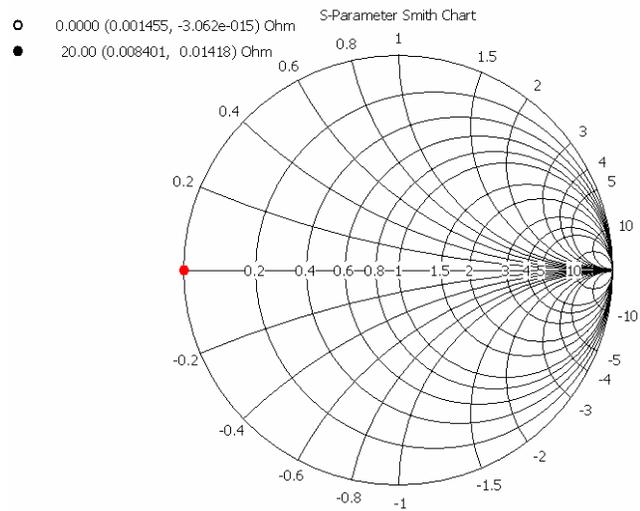
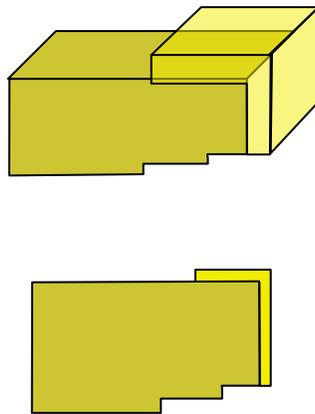


Figura 5.34 Comportamiento del contacto para el interruptor tipo Resorte en la banda de 0-20 GHz por medio de la carta de Smith.

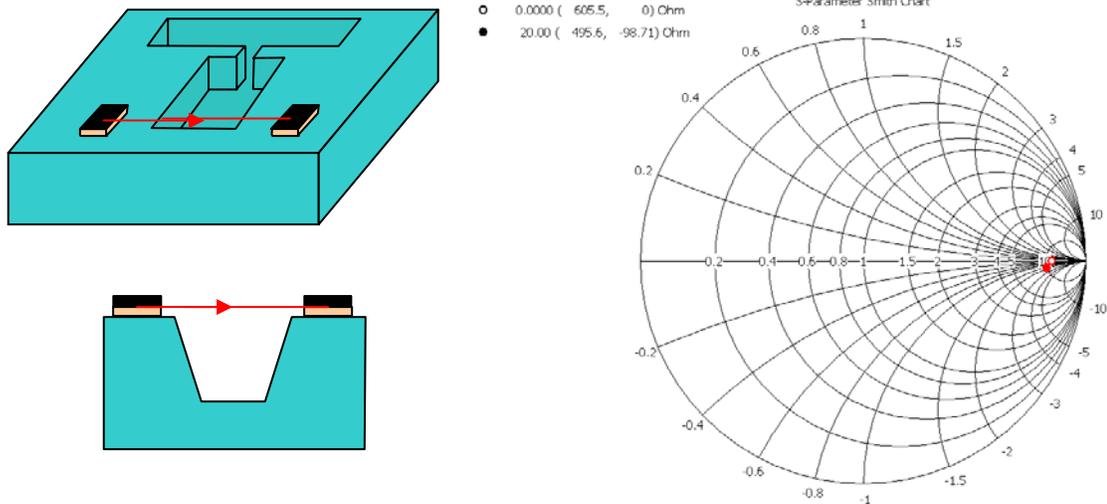


Figura 5.35 Comportamiento de los anclajes para el interruptor tipo Resorte en la banda de 0-20 GHz por medio de la carta de Smith.

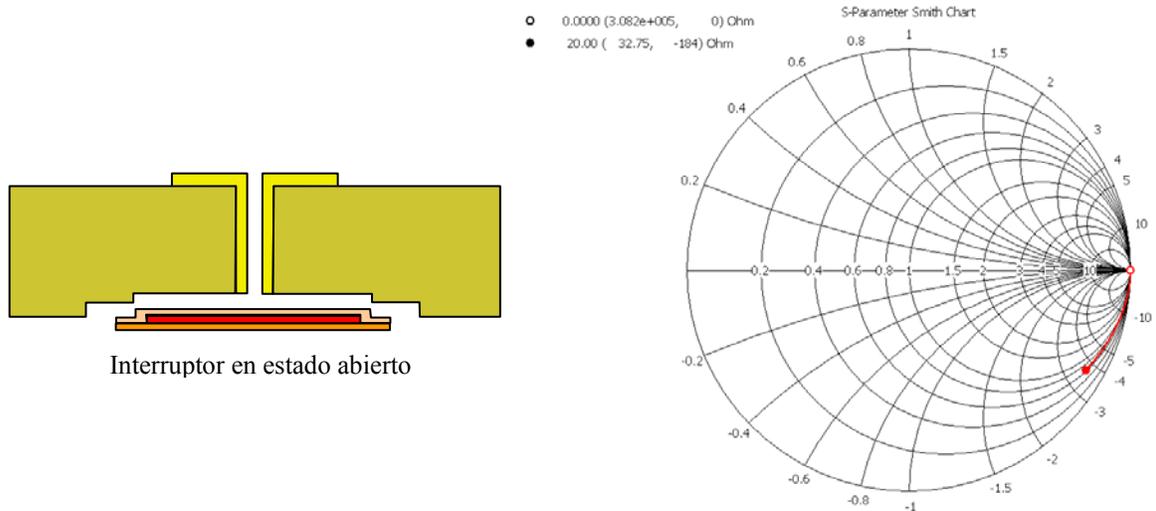


Figura 5.36 Comportamiento en estado abierto del interruptor Resorte en la banda de 0-20 GHz por medio de la carta de Smith.

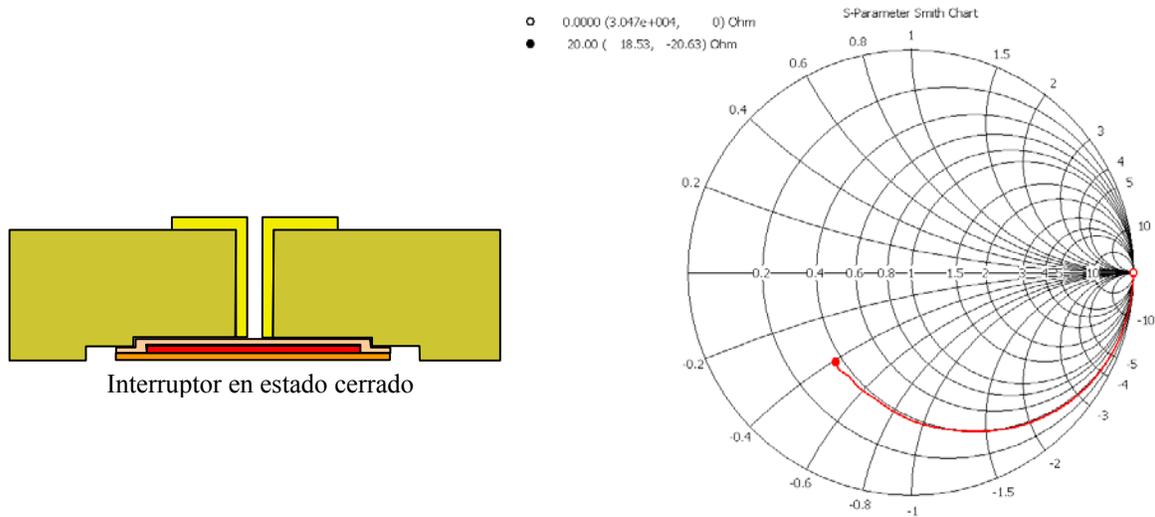


Figura 5.37 Comportamiento en estado cerrado del interruptor tipo Resorte en la banda de 0-20 GHz por medio de la carta de Smith.

Obtención del FCC

Con el objetivo de obtener el FCC del interruptor en el dominio de la frecuencia se exportaron las impedancias de cada sección del modelo eléctrico general obtenidas a partir de los parámetros S_{11} al software especializado. Como se explicó anteriormente, para calcular el FCC del interruptor a una cierta frecuencia es necesario conocer las impedancias del interruptor en el estado abierto y cerrado en esa frecuencia. Como se observa en las figuras que muestran los valores de impedancia de los elementos del modelo eléctrico de los interruptores en el subcapítulo anterior, estos varían con respecto a la frecuencia. Con lo anterior podemos concluir que el Factor de Calidad de Conmutación deberá ser único para cada frecuencia. La manera en que se encontró el FCC en el rango de frecuencias fue sustituyendo cada elemento del modelo eléctrico por bloques, lo cuales simulan las mismas impedancias que los elementos pero estos son dependientes de la frecuencia (ver figura 5.38), posteriormente al encontrar la impedancia total de cada circuito (para el estado abierto y cerrado) se exportaron los datos al programa MATLAB para obtener la gráfica del FCC en la frecuencia.

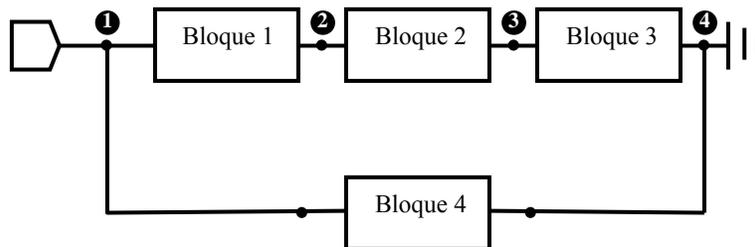


Figura 5.38 Modelo eléctrico utilizando bloques dependientes de la frecuencia.

Los bloques utilizados son el 1, 2, 3 y 4. Los **Bloques 1** y **3** representan la impedancia inductiva de los contactos de entrada y salida de Ni/Au. El **Bloque 4** representa la

impedancia de la trayectoria no deseada del contacto de entrada al contacto de salida a través del sustrato de silicio. Por ultimo el **Bloque 2** representa la impedancia del interruptor en el estado abierto o en el estado cerrado, dependiendo la impedancia en el estado que se desee. Todo esto permitió desarrollar un barrido de frecuencias para obtener las impedancias de entrada del interruptor tanto en el estado abierto como en el cerrado. Posteriormente se exportaron los datos para obtener las gráficas de FCC con respecto a la frecuencia en el rango de 0 – 2 GHz, los resultados se muestran a continuación:

Factor de Calidad de conmutación de los interruptores

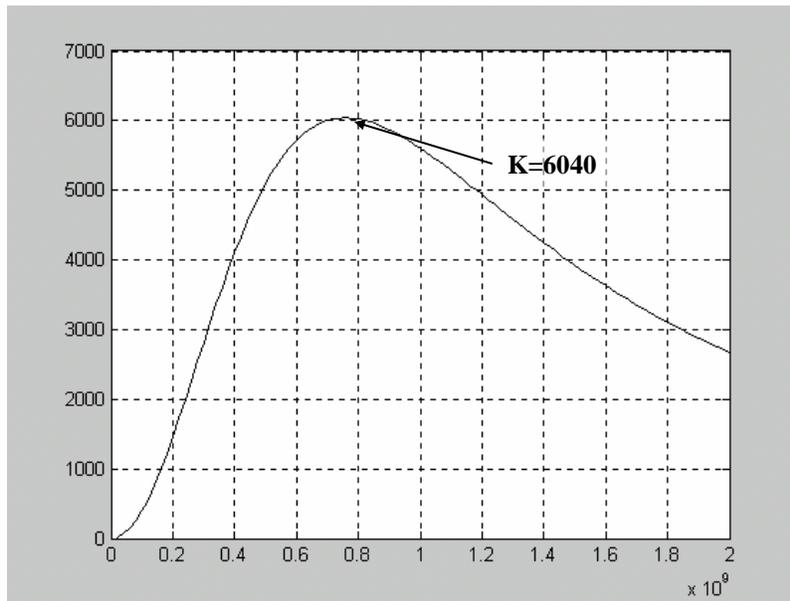


Figura 5.39 Gráfica del Factor de Calidad de Conmutación del interruptor tipo T.

En la figura 5.39 se muestra el FCC del interruptor tipo T en la banda de la telefonía celular. Se puede observar que el valor de frecuencia donde ocurre el máximo del FCC está en 0.76 GHz con una K de 6040.

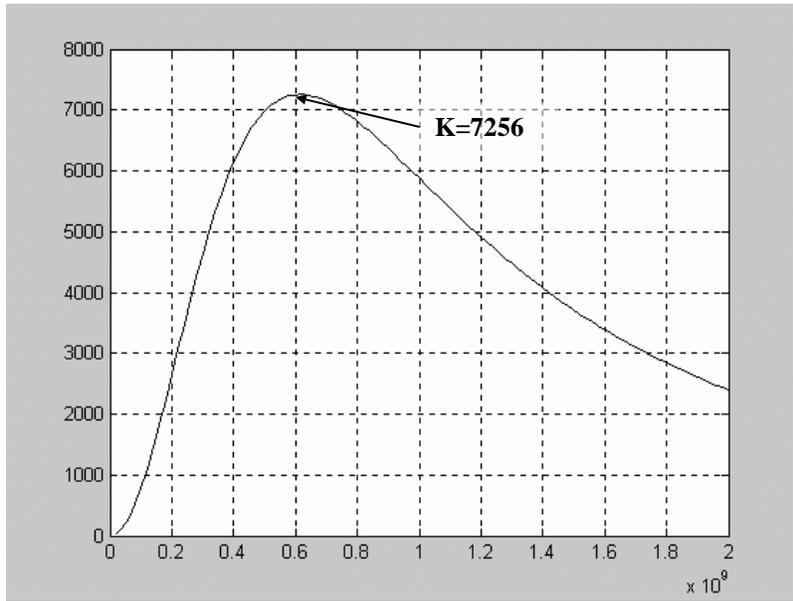


Figura 5.40 Gráfica del Factor de Calidad de Conmutación del interruptor tipo Resorte.

Para el interruptor tipo resorte como se muestra en la figura 5.40 su curva de FCC tiene una $K > 5000$ en una gran parte de la banda de operación del celular (aproximadamente de 0.3 a 1.2 GHz), teniendo su máximo valor a una frecuencia de 0.62 GHz con una K de 7256.

Al analizar las curvas de FCC de los dos interruptores, se aprecia que la forma que tienen es parecida, se observa que la frecuencia superior en que $K > 5000$ es muy parecida (cercana a 1.2 GHz), al comparar los interruptores se aprecia que el mejor es el tipo Resorte en el cual se tendrían menos pérdidas de la señal.

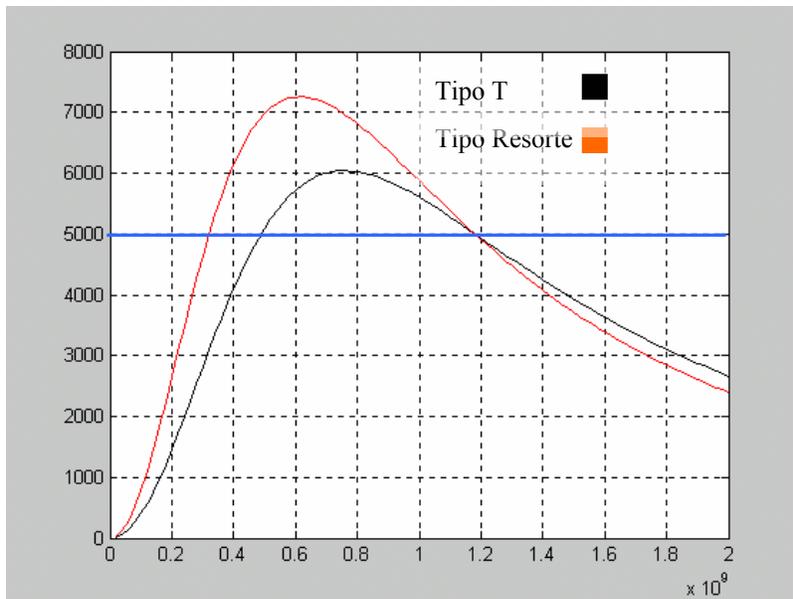


Figura 5.41 Comparación de las gráficas del Factor de Calidad de Conmutación de los dos interruptores diseñados.

Modificaciones hechas al proceso MetalMUMPs

Al analizar los resultados obtenidos en las curvas del FCC de los interruptores, se investigó una manera de obtener un FCC mayor, por lo que se pensó en utilizar el proceso de fabricación MetalMUMPs Plus el cual permite modificar tanto las características eléctricas como el espesor de los material, con lo anterior se realizaron las siguientes propuestas para mejorar el proceso:

Aumentar la conductividad de la capa de Polisilicio: El Polisilicio usado en el proceso MetalMUMPs cuenta con una baja conductividad alrededor de $64000 \Omega/\mu\text{m}$, debido a que la conmutación del interruptor se realiza por medio de la capa de Polisilicio, ocasiona que se tengan bastantes pérdidas de la señal, ya que su conductividad es 192 veces menor que el Níquel, por lo que se propone aumentar la conductividad de la capa de Polisilicio al doble.

Aumentar el espesor de la segunda capa de sacrificio: La brecha o gap usada en el proceso está determinada por la segunda capa de sacrificio (Oxido 2), si se toma en cuenta el estado del arte de los interruptores MEMS la distancia que existe entre el electrodo y la viga que realiza la conmutación se encuentra entre $3\text{-}4 \mu\text{m}$ en promedio, si se compara con la usada en MetalMUMPs ésta es muy pequeña ($1.1 \mu\text{m}$), por lo que se propuso aumentar el espesor de la segunda capa de sacrificio a $2 \mu\text{m}$ para tener un mejor aislamiento.

Se realizaron simulaciones de los dos interruptores con las modificaciones propuestas anteriormente, los resultados se muestran a continuación:

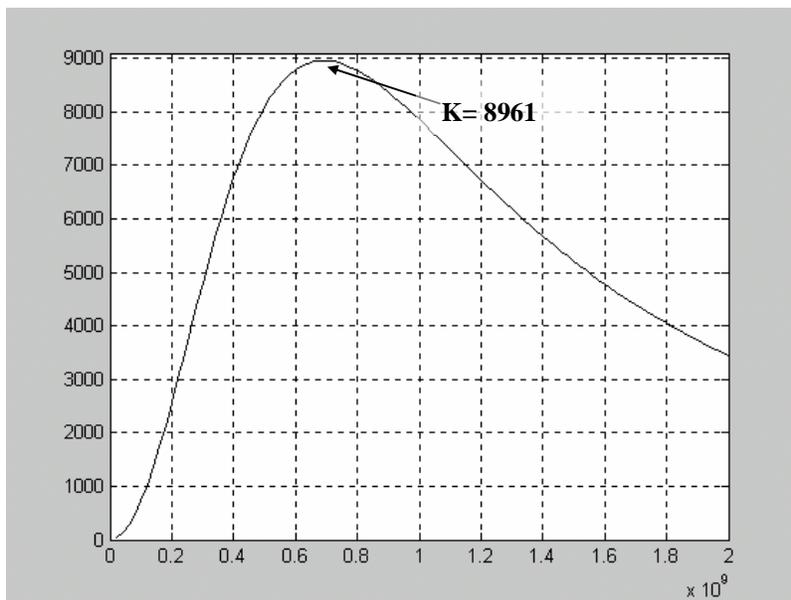


Figura 5.42 Gráfica del Factor de Calidad de Conmutación del interruptor tipo T con un espesor mayor ($2 \mu\text{m}$) de la segunda capa de sacrificio.

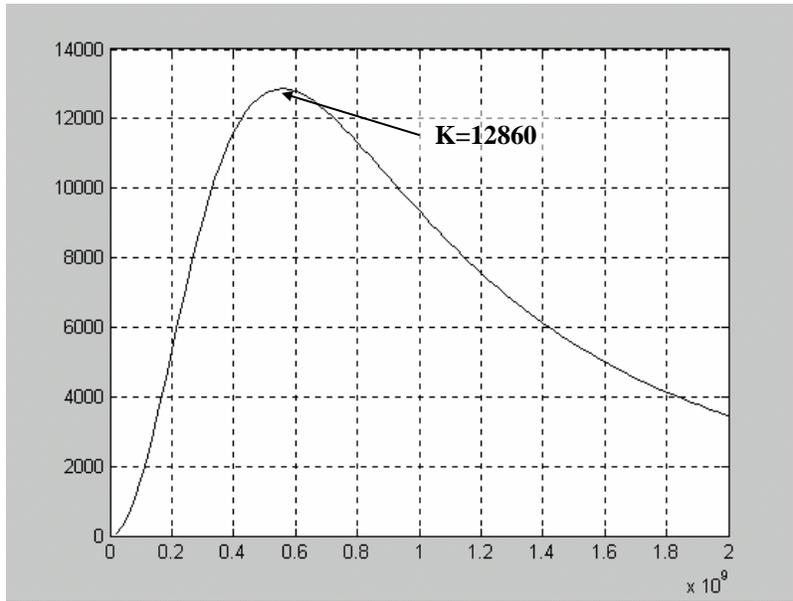


Figura 5.43 Gráfica del Factor de Calidad de Conmutación del interruptor tipo Resorte con un espesor mayor ($2 \mu\text{m}$) de la segunda capa de sacrificio.

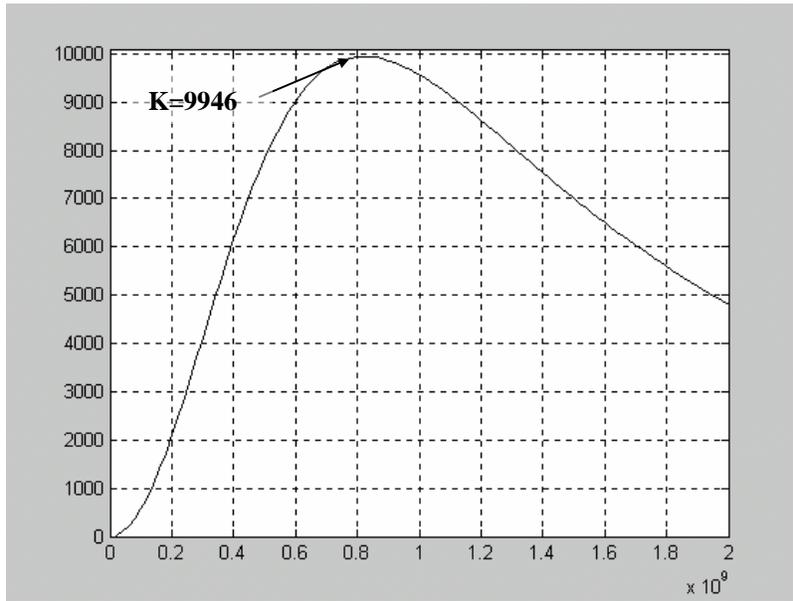


Figura 5.44 Gráfica del Factor de Calidad de Conmutación del interruptor tipo Resorte con una conductividad dos veces mayor ($128000 \Omega/\mu\text{m}$) de la capa de Polisilicio.

5.5.5 Tiempo de conmutación

El tiempo de conmutación es un parámetro de gran importancia dentro de las características de un interruptor ya que indica su tiempo de respuesta. Este parámetro en especial es una de las grandes desventajas que los dispositivos RF MEMS poseen en comparación con sus competidores (FET y PIN). Enseguida se calculará una aproximación del tiempo de conmutación, ya que para obtener un valor preciso de este parámetro el interruptor debería de estar fabricado físicamente. Para calcular el tiempo de conmutación se utilizó la siguiente fórmula [11]:

$$T_c = 3.67 \sqrt{\frac{m}{k} \frac{V_{th}}{V_s}},$$

(5.15)

donde:

V_{th} es el voltaje de actuación estático dado por la ecuación (5.7),

V_s es el voltaje de la fuente,

k es la constante de rigidez y

m es la masa de la viga.

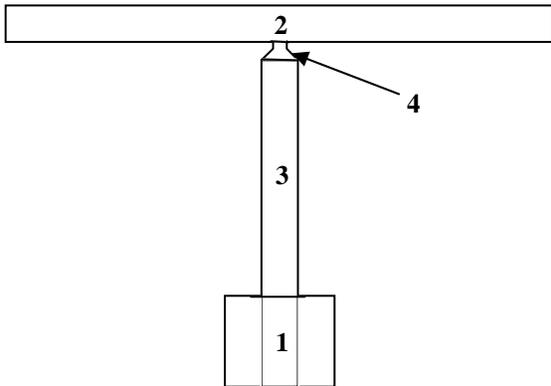
En esta ecuación el término $\sqrt{(m/k)}$ es el inverso de la frecuencia de resonancia mecánica de la viga, ω_0 .

Para calcular el voltaje de actuación estático utilizamos la ecuación (5.7):

$$V_p = \sqrt{\frac{8k_z}{27\varepsilon_0 W \omega} g_0^3} = \sqrt{\frac{8k_z}{27\varepsilon_0 A} g_0^3}.$$

Calculando el área A de las vigas de los interruptores:

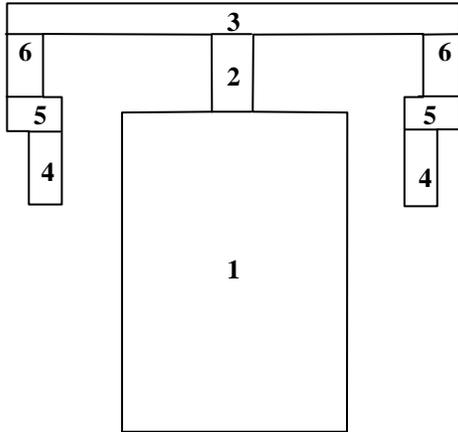
Para el interruptor tipo T:



Donde el área es:

$$\text{Área 1} + \text{Área 2} + \text{Área 3} + \text{Área 4} = 0.03 \mu\text{m}^2$$

Para el interruptor tipo Resorte:



Donde el área es:

$$\text{Área 1} + \text{Área 2} + \text{Área 3} + 2(\text{Área 4}) + 2(\text{Área 5}) + 2(\text{Área 6}) = 0.088 \mu\text{m}^2$$

Obtenida el área de cada viga se procedió a obtener el voltaje de actuación estático:

Interruptor	Voltaje de actuación estático V_p [V]
tipo "T"	2.98
tipo "Resorte"	2.46

Tabla 5.7 Voltaje de actuación estático de los interruptores.

Se aproximó, con ayuda del software CoventorWare, la frecuencia de resonancia simulando solamente la parte que compone la viga, los resultados obtenidos fueron:

Interruptor	Frecuencia de Resonancia f_0 [Hz]
tipo "T"	1.66×10^4
Tipo "Resorte"	5.77×10^3

Tabla 5.8 Frecuencia de resonancia de los interruptores.

Por último se calculó el tiempo de conmutación, cuyos resultados fueron:

Interruptor	Tiempo de conmutación T_c [μs]
tipo "T"	35
tipo "Resorte"	110

Tabla 5.9 Tiempo de conmutación de los interruptores.

5.6 Acoplamiento con la línea de transmisión

Uno de los aspectos que hay que tener presente en cualquier dispositivo diseñado es a donde se va a conectar, puesto que se debe acoplar la entrada con la salida para evitar que haya pérdidas de retorno, y con ello que el dispositivo no opere de manera adecuada, en este caso el interruptor diseñado fue fabricado para utilizarse dentro de un teléfono celular, en donde se tiene una línea de transmisión con impedancia de 50Ω que es el valor estándar dentro de los aparatos electrónicos.

Se debe analizar la impedancia de entrada que presenta en sus dos estados. Para el estado abierto existe una impedancia alta en su parte real e imaginaria (Figuras 5.31 y 5.36), con este valor se puede asegurar un buen aislamiento, debido a que el coeficiente de reflexión será muy alto y la señal de entrada no aparecerá en la salida.

En el estado cerrado, se presenta una impedancia en la que la parte real se tiene un valor bajo ($10\text{-}30 \Omega$), por lo que no existe problema, pero se aprecia que la reactancia tiene un valor elevado (entre 200 a 1900) en frecuencias de $0.4 - 2 \text{ GHz}$ (figura 5.45 y 5.46), esto es debido a que la capacitancia tiene un valor pequeño. Para disminuir esta reactancia se podría proponer:

- Aumentar la capacitancia, lo cual se puede realizar aumentando el área de los anclajes o de la viga.
- Colocar un inductor, sin embargo ocasionaría pérdidas de la señal.
- Colocar un stub (acoplador de impedancias).

Sin embargo, si se colocara un stub para este dispositivo se tendría que diseñar uno de dimensiones en centímetros (6 cm por lo menos) que en comparación al microinterruptor tendría dimensiones muy grandes, además, otro aspecto de importancia es que al colocar un stub el ancho de banda de operación del interruptor se vería afectado ya que se reduciría, debido a que el stub solo funciona perfectamente en una frecuencia, sin embargo, a pesar de no reducir espacio y la reducción del ancho de banda, se mejoraron muchas características (tiempo de conmutación, voltaje de actuación y FCC) y se podría usar si la aplicación lo permite.

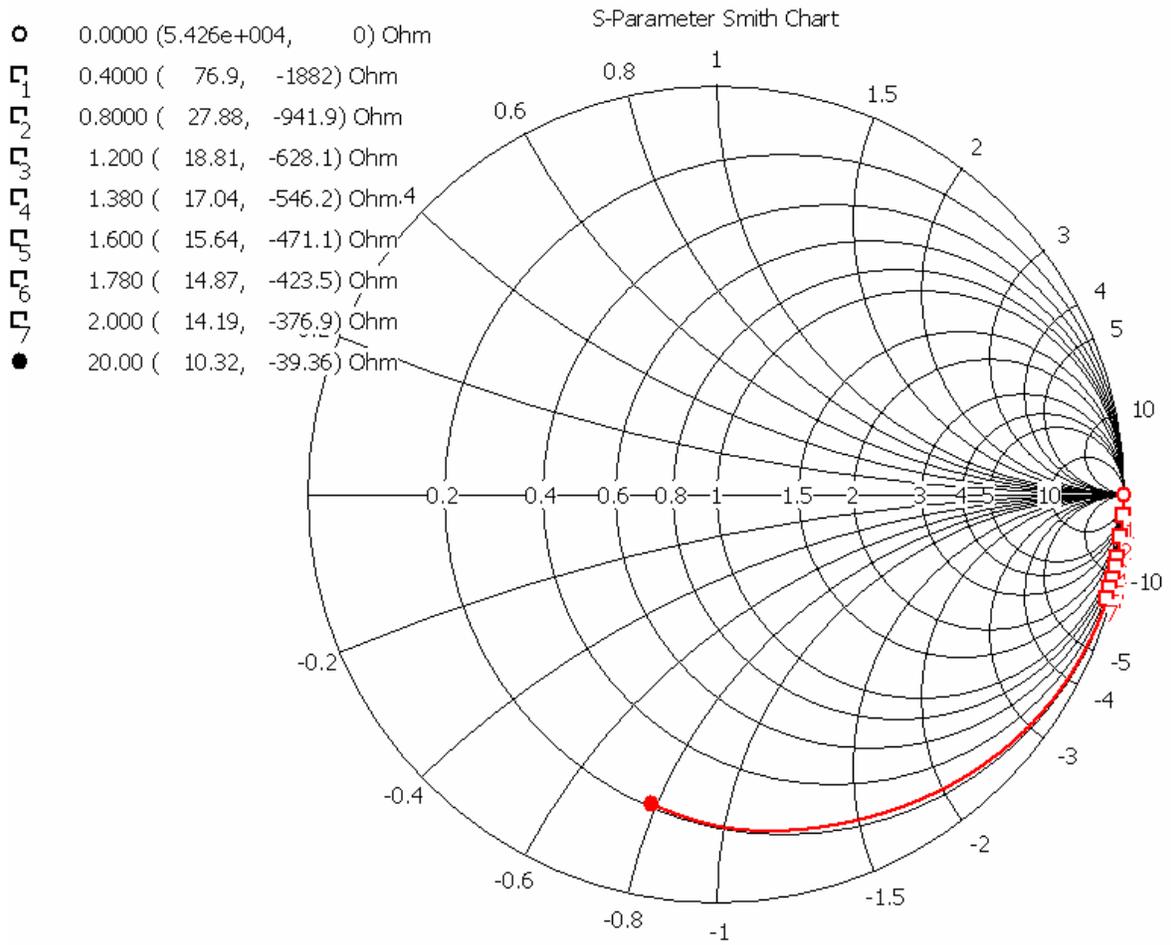


Figura 5.45 Carta de Smith en estado cerrado del interruptor tipo T mostrando la impedancia en algunas frecuencias.

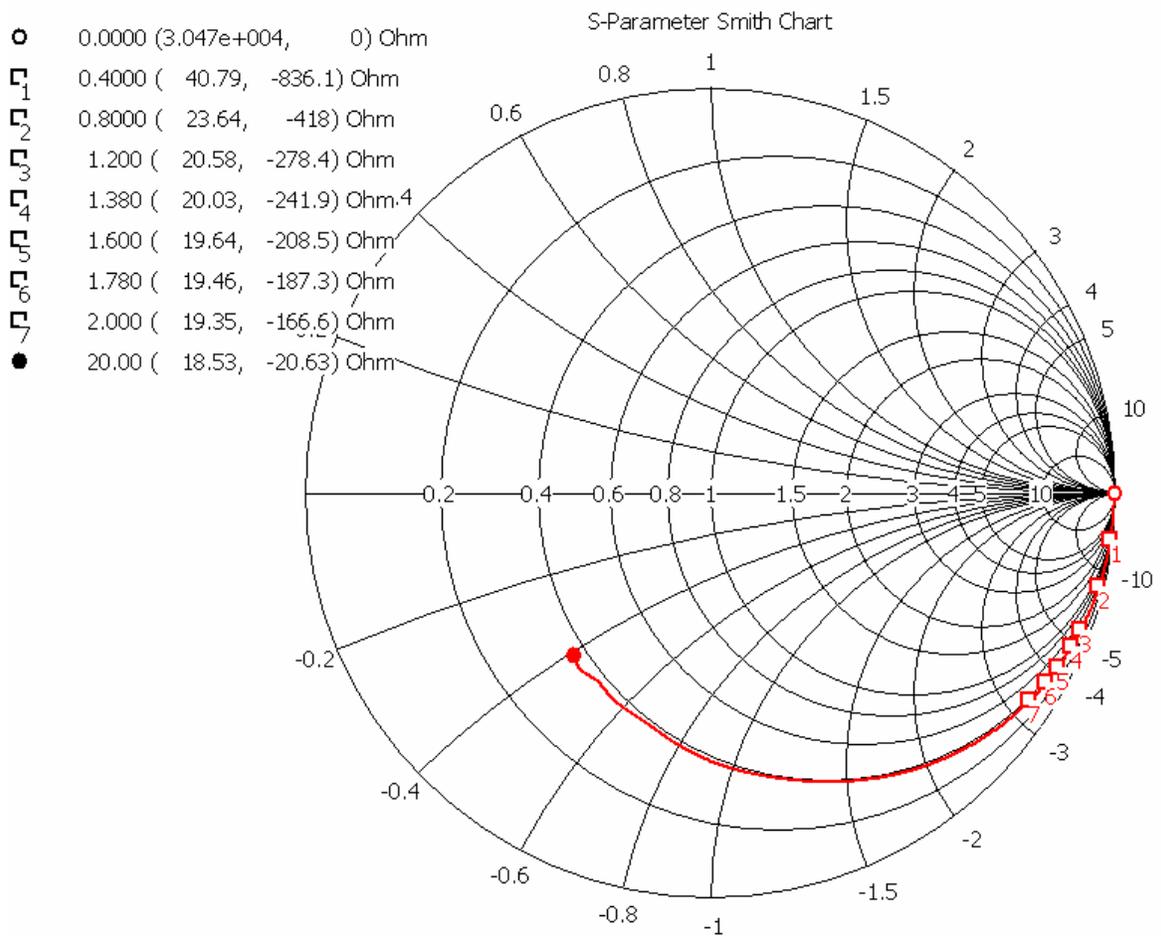


Figura 5.46 Carta de Smith en estado cerrado del interruptor tipo Resorte mostrando la impedancia en algunas frecuencias.

5.7 Aplicaciones en las frecuencias de operación.

Como se observó en el barrido de frecuencias en las figuras 5.39 - 5.44, las frecuencias de operación para las cuales ambas versiones del interruptor son útiles (0.3-1.2 GHz) se encuentran en la banda UHF (300 MHz - 3 GHz), los servicios que encontramos aquí son diversos. En la mayoría del espectro existen comunicaciones de estaciones fijas y operadores móviles, enlaces de radio, televisión, radioastronomía, aeronavegación, señales horarias por satélite, satélites de observación directa, ayudas meteorológicas, GPS y telefonía móvil.

En cuanto a la telefonía celular se encuentran los usos para [13]:
UHF alta (telefonía inalámbrica y TMA),
1.2 GHz (UMTS^[17], DECT^[18] y móviles celulares).

Aquí hay también bandas de radioaficionados, que son:
Banda de 70cm (430 MHz - 440 MHz),
Banda de 33cm (902 MHz - 928 MHz),
Banda de 23cm (1240 MHz - 1300 MHz),
Banda de 13cm (2320 MHz - 2450 MHz).

Las bandas de radiodifusión (que también existen aquí) se encuentran en las siguientes frecuencias: de 470 a 608 MHz, de 614 a 890 MHz, y de 942 a 960 MHz.

5.8 Análisis económico del proceso MetalMUMPs

Costo del Proceso MetalMUMPs

En este tema se tratará de obtener una aproximación del costo del interruptor, iniciando con el cálculo de un dispositivo y posteriormente a gran escala, se podrá observar que entre mayor sea el volumen de fabricación menor será el costo.

Para mandar a fabricar el interruptor diseñado a MEMSCAP, en una corrida con un espacio en la oblea de 1cm x 1cm, se obtienen 15 dispositivos [15], esta corrida tiene un costo de 3200 dólares por lo que cada dispositivo cuesta 2,390 pesos aproximadamente, el precio es alto ya que se trata de unos pocos dispositivos, sin embargo, si se fabricara en miles de unidades durante un año completo el costo disminuiría.

[17] **UMTS**. Sistema Universal de Comunicaciones Móviles. Es el nuevo sistema móvil de tercera generación y sucesor del actual GSM.

[18] **DECT**: Es un estándar europeo de telecomunicaciones, para las comunicaciones sin hilos de voz y datos, de usuarios que se mueven dentro de un área pequeña y bien definida. Tiene una cobertura de entre 25 y 50 metros en interiores y de hasta 250 metros en exteriores. Maneja sin interferencias un gran número de usuarios. Entra dentro de las comunicaciones móviles, en la llamada telefonía sin hilos.

Por otro lado, a gran escala y seleccionando la oblea de un radio de 100 mm, se tienen los siguientes costos [9]:

Obleas utilizadas en un año: 45, 000

	Costo total por año	Costo total por oblea
Material	\$450, 000	\$10.00
Trabajo	\$1, 036, 568	\$23.03
Depreciación	\$2, 788, 536	\$61.97
Mantenimiento de herramientas	\$145, 350	\$3.23
Trabajo indirecto	\$537, 234	\$11.94
Obleas monitor	\$149, 625	\$3.33
Facilidades	\$526, 271	\$11.69
Consumibles	\$1, 157, 848	\$25.73
Total	\$6, 791,432	\$150.92

Tabla 5.10 Costos del interruptor si se fabricara a gran escala

Si por cada oblea se fabrican en promedio 44 dispositivos [9], se puede calcular el costo de cada uno, dando un valor de 3.43 dólares lo que sería 38 pesos si el dólar esta a 11.20 pesos. Pero cabe señalar que este es el costo solo del dispositivo fabricado, falta todavía el costo del empaquetamiento que en promedio es el 75% del costo total.

Empaquetamiento

Compañías de MEMS pueden crear empaquetados sellados para dispositivos de RF, a un costo de aproximadamente de 20 dólares o más por interruptor, lo cuál es relativamente caro, pero se piensa que esto sea solo en un principio ya que se han desarrollado interruptores [16], [17] con ese precio, esperando que baje a un precio de entre \$1 a \$2 dólares al aumentar el volumen de producción.

Las nuevas técnicas de empaquetamiento por ejemplo la in-situ^[19] permiten que los precios bajen y lleguen a tener un precio menor a 2 centavos de dólar por dispositivo [18], [19].

Cabe mencionar que existen varios tipos de empaquetamiento y es posible agruparlos en cuatro categorías las cuales son [20]:

- Empaquetamiento de Metal: Provee una excelente disipación térmica y un excelente escudo electromagnético.
- Empaquetamiento cerámico: Provee baja masa, son fácilmente de producir en masa y son de bajo costo. Además de que pueden ser sellados herméticamente.

^[19] Es un proceso de empaquetado en investigación en el cual una tapa es fabricada sobre la oblea después de que el MEMS está terminado, la tapa compuesta de varios materiales como Polisilicio, compuestos de silicio y germanio así como sus derivados.

- Empaquetamiento de plástico: Es usado ampliamente en la industria electrónica debido a su bajo costo de fabricación, sin embargo no se usa en aplicaciones de alta confiabilidad debido a que no está sellado herméticamente.
- Empaquetamiento multicapas de película delgada: Es un proceso en el que se usan tanto capas de metal, así como polímeros.

Para obtener el costo del empaquetado se deben tomar muchas consideraciones, ya que depende tanto del diseño, del tamaño y del material el cuál este construido así como de la compañía donde se vaya a fabricar y ésta es la que determina el precio definitivo, por lo que se calculará un costo total aproximado del interruptor (para un volumen de 10,000 unidades), tomando en cuenta la relación de costos del empaquetado y de la fabricación dispositivo que es 75 a 25. Por lo que en este caso se tiene un costo total por pieza de:

Precio de fabricación [\$]	Precio del Empaquetado[\$]	# de dispositivos	Precio total [dólares]	Precio total [pesos]
3.43	10.29	1	13.72	154

Tabla 5.11 Aproximación del costo del interruptor al fabricarlo en gran volumen

Conclusiones

En este capítulo se mostró la forma en que se puede analizar un interruptor MEMS diseñado, usando el cálculo analítico aproximado y el software especializado para obtener parámetros fundamentales que lo caractericen.

Se propusieron las metas que el interruptor debería de cumplir para la aplicación en teléfonos celulares. Una de ellas fue el voltaje de actuación el cual debía ser menor a 3.3 V, en la primera versión que se realizó se obtuvo un valor de 6.5 V, el cual debía de reducirse por medio de dos métodos: el principio de la palanca de Arquímedes y aumentando el área del electrodo, de estos dos se obtuvieron las versiones tipo “T” y “Resorte” con el voltaje de actuación de 3.0 y 2.3 V, respectivamente. El otro factor de importancia a considerar fue el Factor de Calidad de Conmutación (FCC). Para facilitar el manejo de los parámetros se dividió la estructura del interruptor en dos partes: una encargada del voltaje de actuación y otra del FCC, en esta última se aumentó el área para de esta forma aumentar el FCC. Los valores del FCC obtenidos utilizando el proceso MetalMUMPs estándar eran satisfactorios ($FCC > 5000$) para competir con interruptores p-i-n en la banda de 0.4 a 1.2 GHz, y en la banda de 1.2 a 2 GHz eran un poco menor del valor requerido, por lo que se propuso modificar el proceso MetalMUMPs obteniendo así resultados satisfactorios en toda la banda de 0.4 a 2 GHz.

Cabe mencionar que existe un problema en el acoplamiento del interruptor en la banda de frecuencia de la telefonía celular debido a que se tiene una reactancia de valor elevado para lo cual se propusieron las siguientes soluciones:

- Una alternativa inicial fue utilizar un stub (acoplador de impedancias) sin embargo, la longitud de onda en esas frecuencias hace que las dimensiones estén en el rango

de centímetros por lo que no es una buena opción, ya que el dispositivo es muy grande.

- Tomando en cuenta que se tiene una reactancia capacitiva de 200, se podría reducir a 20 aumentando el área del capacitor de actuación 10 veces, lo que ocasionaría que el interruptor aumentara de tamaño.
- Otra opción sería colocar un inductor, sin embargo ocasionaría pérdidas de la señal.

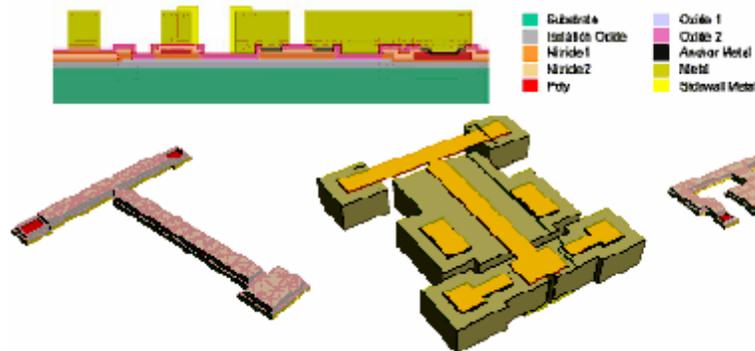
Cabe mencionar que el problema es ocasionado por el sustrato, ya que tiene una resistividad baja y hace que el interruptor cuente con un alto factor de calidad cuando la reactancia es alta. Para poder obtener mejores resultados se podrían modificar los materiales, usando un sustrato con una resistividad mayor o cambiando el dieléctrico en dos formas: a) disminuyendo su grosor ó b) cambiándolo por uno con una permitividad mayor por ejemplo dióxido de silicio.

Bibliografía

- [1] George Barbastathis, Gregory N. Nielson, Peter Vandre, Brad Smith, Mike Shirk “Ultra-fast Low Actuation Voltage RF MEMS Switch”, Deshpande Center for technological innovation, MIT, Abril 8, 2004, pp 6.
- [2] Microelectromechanical Systems (MEMS) based advanced high performance Radio Frequency (RF) systems, <http://www.intellisensesoftware.com/papers/Microelectromechanical.pdf>
- [3] Revéis, M. Gabriel; Muldavin, B.Jeremy. “RF MEMS Switches and Switch Circuits” IEEE Microwave Magazine. Diciembre 2001, pp. 59-71.
- [4] Data Sheet HMC484MS8G, www.hittite.com/product_info/product_specs/switches/hmc484ms8g.pdf.
- [5] Data Sheet HMC226, www.hittite.com/product_info/product_specs/switches/hmc226.pdf.
- [6] Allen Cowen, Bruce Dudley, Ed Hill, Mark Walters, Robert Wood, Stafford Johnson, Henry Wynands, and Busbee Hardy, MEMSCAP, “MetalMUMPs Design Handbook”.
- [7] Barbara Robertson, Fat Duen Ho, Tracy Hunson, “Modeling and Fabrication of RF MEMS Switches”, pp.127-131.

- [8] Irina B. Vendik, Orest G. Vendik, and Erik L. Kollberg “Commutation Quality Factor of Two-State Switchable Devices” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 48, No.5, May 2000, pp. 802-808.
- [9] IC Knowledge.com MEMS cost calculator,
http://www.icknowledge.com/our_products/MEMSmodel_rev00.pdf.
- [10] Principio de la palanca,
<http://www.dlh.lahora.com.ec/paginas/infantila/entorno49.htm>.
- [11] H.H. Lin, C.H. Chu, C.L. Chang, P.Z. Chang, “Mechanical Behavior of RF MEMS” Institute of Applied Mechanics, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University No.1, Sec.4, Roosevelt Rd. Taipei, Taiwan.
- [12] Gabriel M.Rebeiz, Jeremy B.Muldavin, “RF MEMS Switches and switch circuits” Diciembre 2001, IEEE microwave magazine, pp. 59-71.
- [13] Bandas del espectro radial: El espectro radioeléctrico,
<http://www.arieldx.com.arg>.
- [14] David F. Guillou, Packaging MEMS: New Manufacturing Methodology Substantially Reduces Smart MEMS Costs. Diciembre del 2003. IC Mechanics, Inc.
- [15] MEMSCAPINC.com.
- [16] A DELICIOUS IDEA -- BUT IT MAY BE TOO PRICEY TO BE PALATABLE,
http://www.smalltimes.com/document_display.cfm?document_id=6321.
- [17] Radant MEMS Switch,
<http://www.radantmems.com/radantmems/switchoverview.html>.
- [18] Gabriel M. Rebeiz, “MEMS for Reconfigurable Wireless Communications”,
http://research.calit2.net/motorola/files/GRebeiz_Motorola_2005.pdf.
- [19] Valluri Rao,”MEMS Technology (with a focus on packaging, assembly and manufacturing)”,
<http://www.ewh.ieee.org/r6/phoenix/phoenixcpmt/meetings/sep2002slides.pdf>.
- [20] R. D. Gerke, “MEMS Packaging”,
<http://parts.jpl.nasa.gov/docs/JPL%20PUB%2099-1H.pdf>.

Capítulo 6. Análisis de Resultados, Propuestas y Conclusiones.



6.1 Consideraciones de los MEMS en las versiones del interruptor.

En este capítulo se concluye con una breve síntesis acerca del diseño de las versiones del interruptor aplicado a los teléfonos celulares que se realizaron a lo largo de este trabajo, cuyo objetivo fue que contaran con algunas características superiores o equivalentes a los actuales, mediante su análisis y simulación usando la tecnología MEMS y realizados con el proceso de fabricación MetalMUMPs.

Podemos concluir que el objetivo se cumplió ya que se lograron obtener buenos resultados de algunos de los parámetros de las versiones del interruptor que se desarrollaron en esta tesis.

Se inició haciendo una investigación sobre la tecnología MEMS concluyendo que es una plataforma de diseño con la cual se puede reducir espacio y costo, lo cual se logró obtener diseñando ambas versiones del interruptor a 1/9 del tamaño de los interruptores actuales (empaquetados), se observó que el silicio es un material primordial en esta tecnología lo cual lo pudimos constatar al utilizar el proceso de fabricación MetalMUMPs, en el que se utilizó Polisilicio y Nitruro de Silicio que fueron el material estructural y de aislamiento respectivamente.

Una parte importante del estudio de los MEMS es el tipo de actuación que se utiliza, para el diseño de las versiones del interruptor se eligió la actuación electrostática debido a que ofrece entre otras ventajas, un tiempo de respuesta menor y un bajo consumo de potencia.

6.2 Elección del interruptor

Como se mencionó a lo largo de la tesis, para la elección del interruptor RF MEMS a diseñar se investigó que:

- El interruptor es indispensable en el funcionamiento del teléfono celular tanto para el régimen de recepción como en el de transmisión.
- Se decidió utilizar un interruptor de tipo metal-aislante-metal puesto que el proceso MetalMUMPs lo permitía y con ello se logró disminuir pérdidas resistivas que se generarían al utilizar un interruptor metal-metal.
- Se realizó un interruptor en serie en donde la señal eléctrica entra al interruptor, pasa a través de éste y sale del interruptor continuando a través del resto del circuito.
- La estructura diseñada se eligió debido a que es una estructura sencilla que satisfacía los componentes necesarios de un interruptor, tomando en cuenta el proceso de fabricación MetalMUMPs y los puntos mencionados anteriormente.
- Se analizaron dos versiones diferentes para poder darle más flexibilidad a la viga y con ello obtener un voltaje de actuación más bajo.

6.3 Análisis y simulación

Una vez elegido el interruptor, se analizaron y simularon ambas versiones, los parámetros obtenidos en la simulación se explicarán brevemente así como lo más significativo de cada resultado, iniciando por conocer las especificaciones deseadas a las aplicaciones de teléfonos celulares:

1. Propuesta de los parámetros a diseñar de acuerdo con las especificaciones de los interruptores actuales para teléfonos celulares:

- Voltaje de actuación debajo de los 3.3 V.
- Aplicación en la frecuencias otorgadas para la operación de telefonía celular (0.8 – 2 GHz).
- Alto factor de calidad (mayor a 5000.)
- Dimensiones menores a 1000 μm^2 .
- Realizado con el proceso MetalMUMPs.

2. Características del interruptor diseñado:

- Tipo de actuación: electrostática
-

- Proceso de fabricación: MetalMUMPs.
- Tipo de estructura: cantiliver modificado.

3. Evolución de la estructura del actuador del interruptor:

- Tipo T.
- Tipo Resorte.

4. Evolución de la estructura del contacto del interruptor:

- Incremento del área.
- Modificación en su forma.

5. Software de Simulación.

El software utilizado para la simulación de las versiones del interruptor fue sin duda una herramienta invaluable para el desarrollo de esta tesis puesto que gracias a éste se lograron analizar varios parámetros de cada dispositivo sin la necesidad de que estuvieran físicamente construidos, además de ser una ayuda importante antes de construir los dispositivos con la finalidad de poder optimizar sus características y con ello ahorrar errores y costos que se verificarían solo hasta analizarlo físicamente.

En esta tesis los tipos de software utilizado para la simulación fueron:

CoventorWare. Con el cual se simuló la parte mecánica de los interruptores diseñados.

Los parámetros que se obtuvieron fueron:

- Constante de rigidez.
- Voltaje de actuación.
- Construcción óptima del anclaje que mejor satisficiera los requerimientos.
- Frecuencia de resonancia.
- Tiempo de conmutación.

Software especializado. Utilizado en el análisis y simulación de los circuitos de RF, con el cual se analizó y se simuló la parte eléctrica y electrodinámica de los interruptores diseñados donde el parámetro que se obtuvo fue el Factor de Calidad de Conmutación (FCC).

6.4 Resultados obtenidos

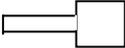
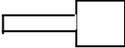
PARÁMETRO	INTERRUPTOR TIPO “T”	INTERRUPTOR TIPO “RESORTE”	ESPECIFICACIONES
Tamaño [μm^2]	1/9 de los interruptores actuales	1/9 de los interruptores actuales	menor a 0.1 mm^2
Estructura	Cantiliver modificado Interruptor en serie, actuación electrostática	Cantiliver modificado Interruptor en serie, actuación electrostática	Realizable en MetalMUMPs
Anclaje	 Nitruro de silicio, Cromo y Titanio	 Nitruro de silicio, Cromo y Titanio	Realizable en MetalMUMPs
Proceso de fabricación	MetalMUMPs	MetalMUMPs	MetalMUMPs
Frecuencias de aplicación [GHz]	0.48-1.2	0.32-1.2	Frecuencias otorgadas para la operación de telefonía celular. (0.8 – 2)
Constante de rigidez [N/m]	6	12	Baja
Voltaje de actuación [V]	3 - 3.01	2.25 – 2.26	Menor a 3.3
FCC	a 760 Mhz K=6040 $\approx 1.2 \text{ Ghz}$ K= 5000	A 620 Mhz K=7256 $\approx 1.2 \text{ Ghz}$ K= 5000	Mayor a 5000
FCC con el proceso MetalMUMPs plus	a 700 Mhz K=8961 (segunda capa de sacrificio)	a 500 Mhz K=12860 (segunda capa de sacrificio) 900 Mhz K=12800 (Polisilicio)	Mayor a 5000
Tiempo de conmutación[μs]	35	110	Alto
Costo a gran volumen de fabricación	Aprox. 14 dólares	Aprox. 14 dólares	< 3 dólares

Tabla 6.1 Resultados obtenidos para ambas versiones del interruptor.

6.5 Análisis de resultados

A continuación se muestra una síntesis sobre el análisis de los resultados descritos en la tabla anterior.

Tamaño y estructura

El interruptor se analizó de manera que cumpliera los requerimientos pedidos, uno de los cuales es que tuviera dimensiones menores a $1000 \mu\text{m}^2$ y como ya se ha mencionado su tamaño fue de 1/9 de los actuales (empaquetados).

Propuesta de modificación de la estructura del interruptor diseñado en el proceso MetalMUMPs con el fin de disminuir el tamaño del interruptor y/o mejorar sus parámetros electrodinámicos.

A continuación se proponen otros tipos de estructuras que se podrían utilizar con el proceso MetalMUMPs, tal es el caso de un cantilever sin electrodo de actuación (Figura 6.1a), en donde la señal de DC podría ir junto con la señal de RF.

También se puede aislar de la misma manera que el diseño realizado en esta tesis con la finalidad de que el actuador (en este caso los contactos) se encuentre aislado del conmutador (la viga) y esto provocaría que la señal tuviera menos pérdidas ya que con ello recorrería menor distancia. Además con el área que ocupaba el electrodo se puede utilizar para otra finalidad.

Otra forma de alimentar esta estructura es conectando la fuente de DC a la viga y la señal atravesaría la línea de transmisión (Figura 6.1b).

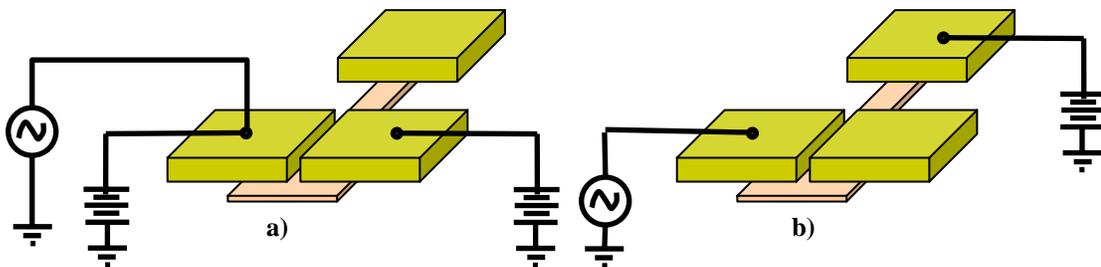


Figura 6.1 Interruptor MetalMUMPs sin electrodo de actuación: a) donde la señal de DC esta en los contactos, b) donde la señal de DC esta en la viga.

Otra posibilidad es la realización de un interruptor lateral. Para la realización de este tipo de interruptor, la capa estructural principal estaría construida de níquel. El tipo de actuación se vería también afectado ya que se tendría que utilizar un actuador térmico, puesto que con un actuador electrostático como ya se ha mencionado anteriormente, se necesitaría un voltaje de actuación mayor. Este componente está inspirado en el usado en el capacitor variable [1] que actúa de forma lateral, en la Figura 6.2 se muestra un bosquejo de cómo podría fabricarse este interruptor.

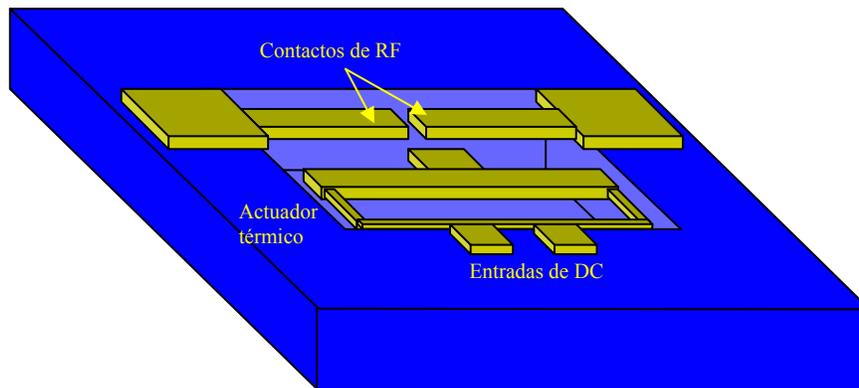


Figura 6.2 Esquema de un interruptor de actuación lateral realizado en MetalMUMPs

Proceso de fabricación

El Proceso MetalMUMPs fue utilizado tomando en cuenta sus reglas de diseño, sin embargo, a pesar de que con los resultados obtenidos se puede concluir que este trabajo cumplió con los objetivos, se pudo observar que con algunas modificaciones al proceso MetalMUMPs se podrían mejorar algunas características por lo que a continuación se mencionarán algunas propuestas para optimización del interruptor RF MEMS.

Propuesta de modificaciones al proceso MetalMUMPs para el interruptor diseñado.

Materiales

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis del interruptor diseñado con el proceso MetalMUMPs se percató que los materiales usados en este proceso no son de muy buena calidad además de que el mismo proceso limita en dimensiones y espesores de capas. Por ello, en seguida se proponen algunas mejoras en el proceso, el cual MEMSCAP lo llama el proceso MetalMUMPs Plus, que dependiendo de las características del material que se pida, dependerá también el precio de éste casi de forma exponencial, lo que limita mucho a investigadores y a universidades que desean fabricar sus dispositivos diseñados en este proceso.

En el diseño del interruptor realizado en esta tesis se proponen algunas variantes al proceso, en dos de ellas se pretende cambiar las características eléctricas de algún material y en la otra, variar su espesor:

Polisilicio: El Polisilicio usado en el proceso MetalMUMPs cuenta con una baja conductividad alrededor de $64,000 \Omega/\mu\text{m}$, lo que ocasiona bastantes pérdidas de la señal, por lo que, teniendo una conductividad al menos del doble se podría mejorar el factor de calidad.

Silicio: En el proceso MetalMUMPs éste material cuenta con una resistividad baja - de $1 \text{ a } 2 \Omega/\text{cm}$ - si se compara con los sustratos usados para otros dispositivos MEMS (alrededor de $1,500 - 10,000 \Omega/\text{cm}$), debido a ésta resistividad se forma la trayectoria no deseada de la señal, por lo que si se tuviera una resistividad mayor ésta trayectoria no afectaría el FCC del interruptor, mejorando así el aislamiento.

Brecha o gap: El gap usado en este proceso es muy pequeño (es de $1.1 \mu\text{m}$), si comparamos con las brechas usadas en otros interruptores actuales, éstos tienen un gap de entre $2 \text{ a } 4 \mu\text{m}$, por lo que se analizó la posibilidad de aumentar el grosor de la capa de Oxido2 hasta tener $2 \mu\text{m}$ con lo cual se mejoraría el factor de calidad de conmutación, ya que en el estado abierto se tendría un mejor aislamiento, sin embargo la desventaja sería un voltaje de actuación mayor.

Proceso

A continuación se propondrán algunas variantes acerca del proceso mismo de MetalMUMPs:

Oportunidad de realización de dimples (pequeñas protuberancias): Este tipo de estructuras son muy útiles cuando se trata de prevenir el fenómeno de pegosidades (“stiction”), el cual ocasiona que la viga se quede pegada al contacto. Al realizar los dimples, no toda la estructura de la viga hace contacto, y así se previene dicho fenómeno. Los dimples podrían ir colocados dentro de la misma viga o en los contactos (ver Figura 6.3). Si se quisiera realizar la primera opción, en el proceso se añadirían dos pasos más. El primero sería dividir la capa de Oxido2 en dos partes: una de $0.5 \mu\text{m}$ de espesor y la segunda de $0.6 \mu\text{m}$, en donde se ataca la primer capa de Oxido2 para formar la plantilla del dimple y se usa la plantilla para realizar el dimple de Nitruro de Silicio de $0.5 \mu\text{m}$ de espesor, se deposita la segunda capa de Oxido2 y los siguientes pasos del proceso MetalMUMPs son los mismos. Para la segunda opción se debe añadir la posibilidad de tener un atacado por profundidad al atacar la capa de Oxido2, así se harían las plantillas de los dimples y al momento de colocar la capa de Metal se formarían.

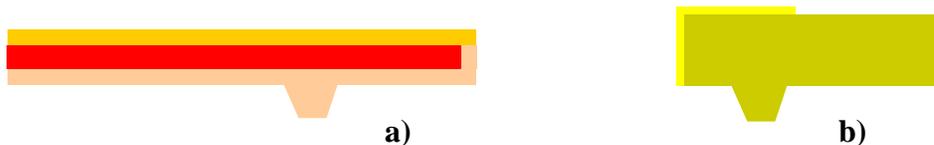


Figura 6.3 Dimples en el proceso MetalMUMPs: a) Dimple en la capa de Nitruro 2, b) Dimple en la capa de Metal.

Rango de frecuencias de aplicación

Las frecuencias a las que operan ambas versiones del interruptor se encuentran en el rango de la telefonía celular, incluso se puede utilizar en enlaces de radio y televisión entre otros.

Voltaje de actuación

El voltaje de actuación se requirió menor a 3.3 V el cual se obtuvo con las simulaciones en el software Coventor.

El parámetro por cumplir fue un voltaje de actuación bajo por lo que para lograrlo fue necesario modificar el área de la viga y se trató de tener una constante de rigidez baja tomando en cuenta los límites en que se pudiera aplicar una fuerza suficiente tal que sea resistente pero fácil de mover, hay que tener presente que al estar hecha de polisilicio tiene buenas propiedades mecánicas (Modulo de Young 158 GPa, fuerza de ruptura 1.21-1.65 GPa), aunque de las propiedades eléctricas no es del todo recomendable.

FCC

Se concluye que en ambos diseños del interruptor se obtuvo un FCC mayor a 5000, que era la meta inicial. Además con la ayuda del proceso MetalMUMPs Plus se pudo mejorar éste parámetro a un valor de 12,000, sin embargo se podría mejorar aún más modificando la parte de polisilicio que se encarga de la conmutación.

Costo

Como se observó en tabla 6.1 el costo de ambas versiones del interruptor resultaría aproximadamente de 14 dólares, cabe mencionar que el costo obtenido se trata solo de una aproximación que se hizo mediante datos proporcionados por empresas constructoras de MEMS y empaquetados a otros usuarios a gran escala, para obtener el valor del costo verdadero, se tendría que contactar con una empresa de fabricación de MEMS, posteriormente con la empresa de empaquetamiento, diseñar la forma y el tipo de empaquetado y el precio real lo darían ambas empresas.

Conclusiones generales

A lo largo de ésta tesis se desarrolló una investigación sobre los microsistemas electromecánicos, en especial de los RF MEMS así como de su aplicación a los teléfonos celulares y se concluye que estos últimos son una buena opción que brindan varias ventajas tales como alto aislamiento, pérdidas de inserción bajas, disminución de tamaño, etc.

Al analizar los dispositivos RF MEMS que se pueden utilizar en el interior de un teléfono celular se eligió el interruptor ya que es indispensable para seleccionar si se va a trabajar en el régimen de recepción o en el de transmisión, así como para reemplazar los

dispositivos ya existentes en el excitador, el transmisor, el duplexor, la antena, el receptor de RF, y el receptor de IF.

Para poder diseñar el interruptor MEMS se utilizó el proceso de fabricación MetalMUMPs y se concluye que es un proceso que permite realizar varios diseños, sin embargo las características (propiedades y grosor) de los materiales que se utilizan podrían mejorarse con lo cual se obtendrían mejores parámetros en el dispositivo diseñado.

Una vez realizadas varias pruebas con el diseño, se logró realizar un interruptor con el proceso de fabricación MetalMUMPs con un voltaje de actuación bajo (en el rango de 2.25 - 3 V) y un FCC alto (mayor a 5000), para lograrlo fue necesario modificar la forma del interruptor en especial de la viga, el área del electrodo y separar la parte de actuación de la parte de conmutación para tener un mayor aislamiento.

Se puede concluir que a frecuencias de aplicación de telefonía celular existe un problema en el acoplamiento del interruptor diseñado. Para solucionarlo se propone lo siguiente:

- Una alternativa inicial fue utilizar un stub (acoplador de impedancias) sin embargo, la longitud de onda en esas frecuencias hace que las dimensiones estén en el rango de centímetros por lo que no es una buena opción, ya que el dispositivo es muy grande.
- Tomando en cuenta que se tiene una reactancia capacitiva de 200, se podría reducir a 20 aumentando el área del capacitor de actuación 10 veces, lo que ocasionaría que el interruptor aumentara de tamaño.
- Otra opción sería colocar un inductor, sin embargo ocasionaría pérdidas de la señal.

Cabe mencionar que el problema es ocasionado por el sustrato, ya que tiene una resistividad baja y hace que el interruptor cuente con un alto factor de calidad cuando la reactancia es alta. Para poder obtener mejores resultados se podrían modificar los materiales, usando un sustrato con una resistividad mayor o cambiando el dieléctrico en dos formas: a) disminuyendo su grosor ó b) cambiándolo por uno con una permitividad mayor por ejemplo dióxido de silicio.

Es importante decir que esta tesis fue un trabajo de larga investigación tanto en el área de MEMS, del proceso de fabricación MetalMUMPS así como de los softwares Coventor y especializados, y con ello se logró tener cierta experiencia para conocer sobre las dificultades que se presentan a lo largo del análisis del desarrollo de un dispositivo, por lo cual se piensa que éste trabajo puede servir para trabajos futuros que logren obtener mejores resultados.

Bibliografía

- [1] Dong Yan, Raafat Mansour, Amir Khajepour, “MetalMUMPs Tunable Capacitor”, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario N2L 3G1, CANADA.

APÉNDICES

Introducción a CoventorWare

Para poder tener un parámetro de medición y comparación con los resultados teóricos que nos ayuden a conocer el comportamiento de los dispositivos diseñados, existen diversos paquetes de cómputo que permiten realizarlo de manera eficiente.

Uno de los principales es CoventorWare, gracias a éste paquete se logran obtener resultados que nos dan la pauta para conocer si un dispositivo es óptimo para ser diseñado o bien si se requieren realizar ajustes en los parámetros. Esto quiere decir que con ello se tiene una importante herramienta para no gastar en la fabricación de MEMS sin antes estar seguro de su funcionamiento.

CoventorWare, es el único software de herramientas integradas que ofrece una metodología para el diseño, optimización, y análisis de dispositivos a microescala, incluyendo sistemas microelectromecánicos (MEMS) y componentes de subsistemas hidráulicos [1].



La metodología de CoventorWare permite modelar el comportamiento de dispositivos por medio de diagramas basados en análisis numérico detallados en tres dimensiones (3D) para apoyar el diseño de una amplia gama de usos de MEMS tales como biotecnología, mecánica, fluidos, óptica, RF, y sensores.



RF MEMS



Sensores



MEMS Ópticos

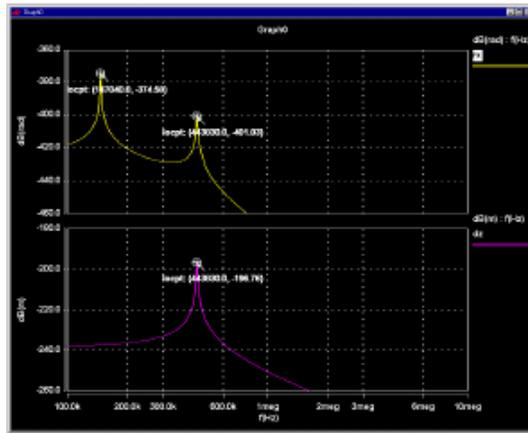


Microfluidos

Módulos de trabajo.

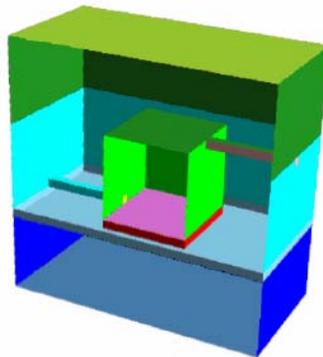
CoventorWare consiste en cuatro módulos integrados:

- **ARQUITECTURA.** Es un ambiente que modela al sistema basado en diagramas, se puede utilizar para explorar rápidamente alternativas de diseño y para optimizar parámetros.



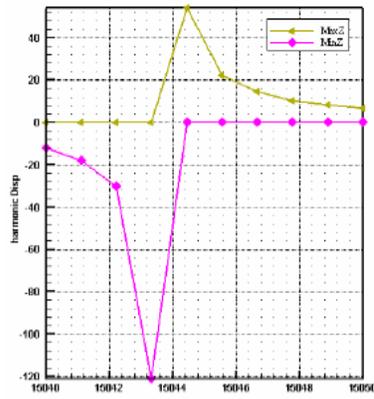
Grafica de una señal de AC en señal pequeña [2].

- **DISEÑO.** Es una herramienta de diseño físico que contiene un editor de capas de dos dimensiones (2D), un editor para las propiedades de los materiales y base de datos, así como un generador de modelos automáticos tridimensionales 3D.



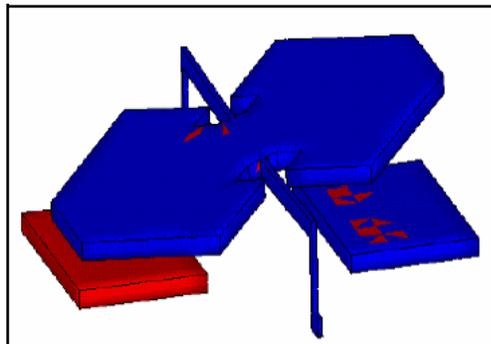
Modelo físico de un reactor.

- **ANÁLISIS.** Este módulo es un analizador hecho a la medida para soportar los requerimientos físicos, diseñar cualquier dispositivo y usarlo posteriormente en el módulo Diseñador para verificar los resultados.



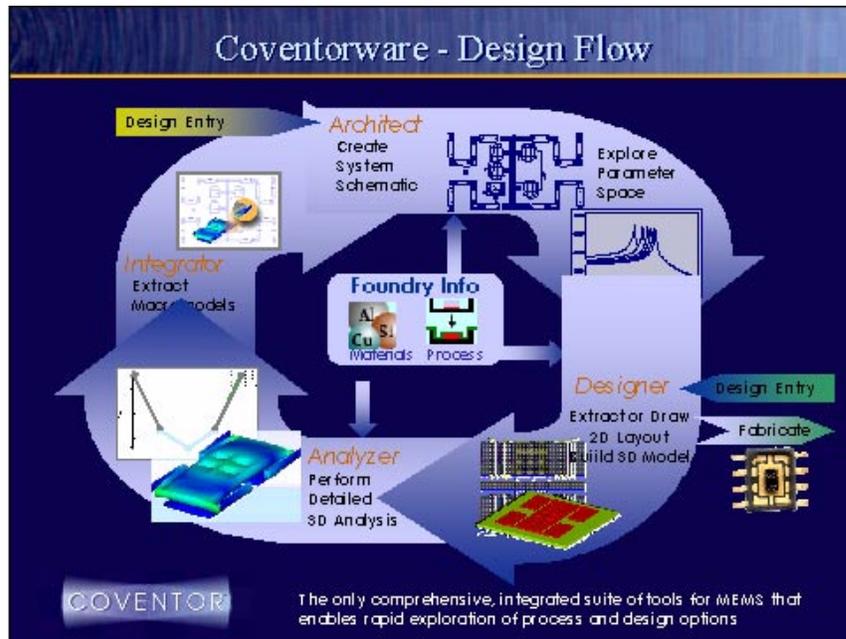
Análisis armónico mostrando el desplazamiento de armónicas así como la función del modelo en frecuencia

- INTEGRADOR - Crea modelos simplificados diseñados en el analizador. Además analiza y/o exporta estos modelos a los simuladores compatibles de circuitos integrados (IC).



Solución Cosolve para un espejo óptico mostrando el movimiento del espejo y la carga del electrodo

Como se puede ver, el trabajar con CoventorWare nos garantiza un completo análisis de los dispositivos que se quieren analizar ya que de acuerdo a nuestras necesidades, podemos elegir diversas opciones de análisis con la ayuda de los cuatro módulos disponibles con los que este software cuenta.



Pasos para diseñar un dispositivo mediante Coventorware

Beneficios

Los beneficios que se tiene al utilizar este software son los siguientes:

- Optimización superior de análisis y diseño asegurando la mejor opción posible de los procesos del diseño y fabricación.
- Reducción de los costos del desarrollo al ser capaz de diseñar elementos eficientes.
- Reducción de procedimiento para el desarrollo de prototipos, los cuales implican menor tiempo de diseño y salida al mercado.

Bibliografía

- [1] <http://www.coventor.com/coventorware/>.

Apéndice B. Análisis de las posibilidades de realización de un resonador con el proceso MetalMUMPs.

Enseguida se mencionarán brevemente algunos puntos importantes para la fabricación de un resonador realizado con el proceso MetalMUMPs, sin embargo cabe mencionar que el objetivo de la tesis no abarca un análisis profundo de esta parte por lo que cualquier simulación propuesta se mencionará como trabajo futuro.

Para realizar un resonador en el proceso de fabricación MetalMUMPs se deben tener presente los siguientes aspectos:

- Investigar las estructuras conocidas del dispositivo que se va a realizar con la finalidad de tener una idea general sobre sus características.
- Entender el proceso de fabricación y predecir si es posible realizar las estructuras conocidas mediante las reglas de diseño.
- En caso de que no sea posible realizar alguna estructura conocida utilizando el proceso de fabricación, proceder a proponer una estructura propia.

Se analizaron las estructuras que existen de los resonadores, en general se agrupan en tres tipos:

- Resonador de viga doblemente anclada o clamped-clamped beam (CC beam).
- Resonador de viga libre – libre o free – free beam (FF beam).
- Resonador a modo disco.

Debido a su rango de frecuencia de operación y sencillez en su fabricación, se decidió comentar sobre el resonador de viga libre- libre [1], enseguida se comentan algunos inconvenientes que se tendrían al realizarlo con el proceso de fabricación, los cuales son:

- **Cálculo de las dimensiones:** Los soportes flexibles de polisilicio utilizados en la estructura analizada en el artículo de Nyugen [1] deben tener un grosor de 1 μm (Figura A2.1), sin embargo, las reglas de diseño de MetalMUMPs [3], indican que la mínima característica de esta capa es de 5 μm , por lo que la solución sería utilizar el modelo matemático del dispositivo mostrado en el documento y calcular las dimensiones de la estructura tomando en cuenta las características de los materiales.
- **Viga del resonador:** La cual está compuesta de dos materiales diferentes, sin embargo, de los materiales estructurales en MetalMUMPs el más factible a usar es el polisilicio, el cual se encuentra cubierto por nitruro. Con el modelo de Nyugen se calcularían las dimensiones de la viga de polisilicio, despreciando al nitruro ya que es un dieléctrico, pero se debe tener presente que el nitruro afectaría a la estructura ya que no se comporta como un dieléctrico perfecto

a altas frecuencias (por arriba de unos MHz), además de que la frecuencia de resonancia de la viga es afectada por este material. Por lo que se puede concluir que el modelo no es aplicable al proceso MetalMUMPs y es necesaria la realización de uno nuevo.

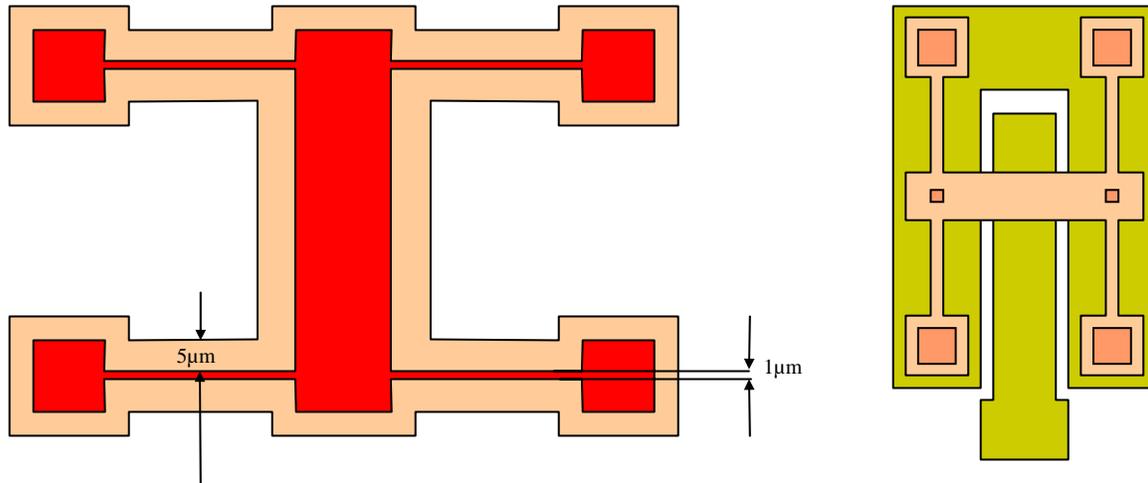


Figura A2.1 a) Esquema de la viga en MetalMUMPs, b) Vista inferior del resonador

- **Imposibilidad de realizar dimples (pequeñas protuberancias) en MetalMUMPs:** Los cuales son pequeños soportes necesarios en las estructuras frecuentemente usadas en la realización de resonadores, ya que previenen que se presente el fenómeno de pegosidades (“stiction”) y con ello que la viga se quede pegada.
- **Los materiales utilizados en MetalMUMPs no tienen características eléctricas favorables:** Es un factor importante para obtener un buen resonador ya que puede afectar en la obtención de características mejores o iguales a los diseñados en otras tecnologías, por ejemplo la Q, ya que se tienen pérdidas grandes debido que el polisilicio tiene una conductividad baja.
- **Complejidad del modelo matemático:** Debido a que la viga esta compuesta de dos materiales.

Soluciones:

- Una posibilidad para usar MetalMUMPs es la de proponer una nueva estructura de resonador con la cual se pueda minimizar lo mayor posible las desventajas de la tecnología.
- Otra solución es mejorar las características del resonador con el proceso MetalMUMPs Plus que permite modificar las características de los materiales usados, con la desventaja de que se tendrá un mayor costo al fabricar el dispositivo.

- Se puede usar otra tecnología de fabricación de la misma familia multiusuario (MUMPs), es decir, PolyMUMPs el cual cuenta con varias ventajas en comparación al proceso MetalMUMPs en el diseño de resonadores: la posibilidad de realizar dimples y el tener una mejor calidad de materiales (el polisilicio en particular).

Conclusiones

Se puede tratar de realizar un modelo de resonador con MetalMUMPs tomando en consideración los aspectos antes mencionados, sin embargo los problemas para dicho proceso al realizar estructuras optimizadas de resonadores mencionados en artículos como el de Nyugen son:

1. Baja calidad de los materiales asignados en el proceso MetalMUMPs para frecuencias altas (baja conductividad del polisilicio, alta conductividad del sustrato de silicio y alta conductividad del nitruro de silicio en altas frecuencias).
2. Limitaciones en los grosores de las capas (grosor grande del níquel y del polisilicio y grosor bajo del Oxido 2).
3. Baja precisión del proceso que impide realizar los espaciamentos pequeños (menor a 5 μm).
4. Imposibilidad de realizar los dimples.
5. Ausencia de un modelo particular para caracterizar el comportamiento del dispositivo hecho con dos o más capas en la viga.

Bibliografía

- [1] Kun Wang, Clark T. C. Nguyen “VHF Free-Free Beam High-Q Micromechanical Resonators” Septiembre 2000, JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 9, NO.3, pp. 347-360.
- [2] Clark T.-C. Nguyen, “Vibrating RF MEMS for Next Generation Wireless Applications” Center for Wireless Integrated Micro Systems (WIMS) Dept. of EECS, University of Michigan Ann Arbor, Michigan 48109-2122, U.S.A.
- [3] A. Cowen, B. Dubley, E. Hill, M.Walters, R.Wood, S. Johnson, and H. Wynands, “*MetalMUMPS’s Design Handbook.*” 2002. Durham, NC: JDS Uniphase.