



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

APLICACION DE LA TECNOLOGIA DE MICROSISTEMAS
ELECTROMECHANICOS (MEMS) A LOS SISTEMAS DE
COMUNICACIONES INALAMBRICAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A :

MARIBEL MIRANDA GARCES

DIRECTOR DE TESIS:
M.I. JOSE ISMAEL MARTINEZ LOPEZ



MEXICO, D. F.

MARZO DE 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Indice

| | |
|--|----|
| 1. Introducción. | 1 |
| 2. Sistemas inalámbricos. | 4 |
| 2.1. Campos de la actividad inalámbrica. | 9 |
| 2.2. Sistemas, estándares y arquitecturas inalámbricas. | 8 |
| 2.3. Retos en la eficiencia de consumo de potencia y ancho de banda en los sistemas inalámbricos | 13 |
| 2.4. Empleo de la tecnología MEMS en los dispositivos inalámbricos | 14 |
| 3. Micro sistemas electromecánicos | 17 |
| 3.1. Orígenes de MEMS | 17 |
| 3.2. Tecnologías de fabricación | 19 |
| 3.2.1. Proceso convencional de fabricación de circuitos integrados | 19 |
| 3.2.2. Micromaquinado de volumen | 21 |
| 3.2.3. Micromaquinado de superficie | 23 |
| 3.2.4. Proceso <i>Fusion Bonding</i> | 26 |
| 3.2.5. Proceso LIGA | 27 |
| 4. Fundamentos de la física de los MEMS | 29 |
| 4.1. Actuación electrostática | 30 |
| 4.2. Actuación térmica | 35 |
| 4.3. Actuación piezoeléctrica | 36 |
| 4.4. Diseño de MEMS asistido por computadora | 36 |
| 4.4.1. Memspro | 37 |
| 4.4.2. Intellisuite | 38 |
| 4.4.3. Memscad | 40 |
| 5. Elementos MEMS para RF | 43 |
| 5.1. Inductor | 43 |
| 5.1.1. Parámetros de eficiencia de un inductor | 44 |
| 5.1.2. Una propuesta de solución | 46 |
| 5.1.3. Fabricación de un inductor elevado MEMS | 46 |
| 5.1.4. Tipos de inductores con fabricación MEMS | 49 |
| 5.2. Capacitor | 51 |
| 5.2.1. Problemática actual de diseño | 52 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.2.2. | Una propuesta de solución | 52 |
| 5.2.3. | Capacitor variable con tecnología MEMS | 54 |
| 5.2.4. | Tipos de capacitores con tecnología MEMS | 55 |
| 5.3. | Interruptor | 56 |
| 5.3.1. | Tipos de interruptores comúnmente usados con MEMS | 57 |
| 5.3.2. | Operación del interruptor capacitivo con membrana | 59 |
| 5.3.3. | Tipos de interruptores con fabricación MEMS | 63 |
| 5.4. | Resonador | 65 |
| 5.4.1. | Descripción de la operación de un resonador MEMS (Clamped-clamped) | 66 |
| 5.4.2. | Ejemplos de resonadores MEMS | 72 |
| 5.5. | Desplazador de fase | 73 |
| 5.5.1. | Descripción de la operación de un desplazador de fase de 4 bits MEMS | 76 |
| 5.5.2. | Ejemplos de desplazadores de fase con tecnología MEMS | 78 |
| 5.6. | Antenas | 80 |
| 5.6.1. | Problemática actual | 81 |
| 5.6.2. | Propuesta de solución | 81 |
| 5.6.3. | Diseño de antenas reconfigurables con tecnología MEMS | 82 |
| 6. | Aplicación de los MEMS a la telefonía celular | 88 |
| 7. | Conclusiones | 94 |
| 8. | Apéndice | |
| | "There 's Plenty of Room at the Bottom" | 98 |

Dedicatoria

A Dios:

Por darme la oportunidad de vivir y darme siempre lo mejor.

A mis Padres:

Muy especialmente, porque me enseñaron a conocer el amor y a no darme por vencida nunca, gracias por sembrar en mi el amor hacia el estudio y hacia lo que hago, por guiarme a lo largo de la vida permitiéndome caer y ayudándome a levantar para seguir. Gracias por compartir cada día y este paso es un logro nuestro... ¡Los Amo!

A mi hermanita Paulina:

Por ser fuente inagotable de amor y ternura que me impulsa a superarme día con día y por enseñarme que la alegría está en nosotros mismos. Pau .. ¡¡esfuérate y lucha!!

A mi hermana Perla:

Gracias por tu apoyo, amor y amistad. Gracias por enseñarme que ante la adversidad siempre se debe luchar. Gracias por estar cerca de mí a pesar de la distancia. ¡¡Te quiero mucho!!

A mi abuelita:

A un mes de tu deceso te dedico este trabajo que es producto de la confianza y amor que siempre depositaste en mí, pues siempre te alegrabas de nuestros logros...ya no estas aquí pero estás viva en mi corazón y en mi mente.

Agradecimientos

A mi Alma Mater por cobijarme con sus libros, sus sabores y formas de pensar.

Muy en especial a Juan Carlos por estar siempre a mi lado a lo largo de la universidad y mi vida, gracias por darle sentido a tantas cosas, tú mejor que nadie sabe lo que hemos pasado. Gracias por enseñarme que todo en esta vida tiene sentido solo cuando tenemos con quien compartir nuestras emociones.

Con especial cariño a M.I. José Ismael López quién además de dirigir mi tesis, se convirtió en un amigo para mí. Gracias por compartir desinteresadamente tu conocimiento conmigo y por tus acertadas sugerencias. Gracias por preocuparte porque este trabajo saliera bien.

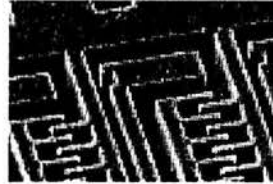
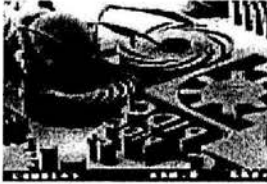
A mi familia por compartir tantos hermosos momentos y por estar siempre a mi lado.

A Gastón, gracias por presionarme y hacerme siempre el comentario adecuado.

A mis amigos: Myriam, Ili, Paty, Sony, Héctor, Heidi, Arely, Lore, Mechita, Sergio, gracias por su apoyo incondicional y cariño sincero y estar cerca de mí a pesar de la distancia.

A todos mis sinodales que se dieron tiempo para hacer de esta tesis un trabajo mejor.

A todos los que de una forma u otra han estado a mi lado y por su estímulo.



I. Introducción

Hace varios años estuvo de moda una película llamada "Viaje Fantástico" donde un científico importante era atacado por agentes enemigos y no era posible que fuera intervenido por la cirugía tradicional, es entonces cuando un equipo médico es reducido a tamaño microscópico para ser inyectados al torrente sanguíneo y de esa forma llegar al corazón y salvarle la vida. Durante su larga travesía se vieron amenazados por las defensas naturales del paciente y se enfrentaron ante todo tipo de situaciones, lo que constituyó un viaje fantástico.

En aquel tiempo, 1966, esto era posible solo en una película de ciencia ficción, pero ahora gracias a los avances de la nanotecnología podemos hacer realidad aquella fantasía.

Como muchos de los avances tecnológicos han surgido de ideas descabelladas en su momento, el científico Richard P. Feynman planteó en 1959 la posibilidad de escribir los veinticuatro volúmenes de la Enciclopedia Británica en la cabeza de un alfiler, lo que nos lleva a pensar que así como existe un macromundo, existe igualmente un micromundo al cual no se le había prestado mucha atención, pues por lo general los ojos de los hombres están puestos sobre las cosas grandes, descuidando así todo aquello que puede ser posible cuando miramos hacia las cosas diminutas. Esta idea la resume Feynman como "Existe mucho espacio allá abajo" [1].

A partir de la idea de Feynman, surgieron muchas líneas de investigación que empezaron a mirar hacia abajo. La nano y la micro tecnología surgen con la finalidad

de explorar las posibilidades de desarrollar sistemas que interactúen con los sistemas reales a esta escala.

MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) es un acrónimo que describe un campo de investigación multidisciplinario de acelerado crecimiento sobre sistemas a escala microscópica. Estos sistemas comprenden la integración de elementos electrónicos y mecánicos al utilizar la microelectrónica junto con las tecnologías de micromaquinado sobre un mismo sustrato de silicio, permitiendo así la posibilidad de desarrollar etapas de sensado, de actuación, de procesamiento y de comunicación en un mismo circuito integrado.

La tecnología MEMS promete revolucionar casi cualquier categoría de productos, haciendo posible la realización de sistemas completos dentro de un circuito integrado. MEMS es una tecnología que permitirá el desarrollo de productos inteligentes en diversas áreas tales como biomedicina, instrumentación, control y telecomunicaciones, entre otras.

En el campo de las telecomunicaciones, la exigencia de los usuarios de tener una conectividad ubicua es ampliamente reconocida como la demanda cuyo cumplimiento desencadenará la siguiente revolución industrial en la primera década del siglo veintiuno. Tal revolución promete dotar a los consumidores de un acceso universal a la información y de una conectividad que permita satisfacer sus necesidades de comunicación. En la actualidad es posible asociar un dispositivo con cada uno de las variadas fuentes de información. Por ejemplo un teléfono celular está asociado con voz, una cámara digital con video, una 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 y más exigentes. Por ejemplo, mientras los dispositivos de la 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) estarán proveyendo capacidades para multimodos, multibandas y multiestándares para voz, multimedia y datos de alta velocidad. Con la movilidad y portabilidad en común, los planes para los servicios de telecomunicaciones inalámbricas de la 3G y 4G utilizarán una amplia variedad de dispositivos, incluyendo pequeñas terminales de bolsillo, teléfonos celulares, computadoras portátiles y

receptores fijos que operen a frecuencias que aprovechen la ventaja de las excelentes propiedades de propagación de las ondas electromagnéticas por abajo de los 3GHz.

El éxito total de esta visión dependerá de dos factores muy importantes: el consumo de potencia y el ancho de banda. El primero es esencial debido al conflicto que ocurre cuando se pretende aumentar los niveles de funcionalidad y sofisticación en el dispositivo, considerando que se cuenta con una limitada capacidad de energía de las baterías. Por otra parte, el ancho de banda es crucial debido a las necesidades intrínsecas de esta comunicación y al alto número de dispositivos que operan abajo de 3GHz. En la actualidad la tecnología convencional de circuitos de RF y microondas presenta limitaciones en estos dos aspectos en el contexto de conectividad ubicua. Por lo que en este trabajo de tesis se analiza el uso de la tecnología MEMS que, utilizada en estos dispositivos de comunicación, permitirá resolver de una forma generosa estos conflictos de consumo de potencia y de ancho de banda. Por lo tanto, el objetivo preciso de este trabajo es explorar el uso de la tecnología MEMS en el diseño de circuitos de RF y microondas que serán utilizados para cumplir con esta visión en el contexto de un paradigma inalámbrico.

Se propone empezar con el análisis de los variados terrenos de la actividad inalámbrica y de sus respectivos dispositivos de comunicación, así como de las necesidades de desempeño. Después se analizarán los elementos de los circuitos y sistemas cuyo nivel de funcionalidad es vital para determinar el éxito de nuestro paradigma inalámbrico. Finalmente, se analizarán las características intrínsecas de la tecnología MEMS que la harán la alternativa ideal para permitir la realización de estos circuitos y sistemas.



II. Sistemas Inalámbricos

Los sistemas de comunicación inalámbrica son el campo de las telecomunicaciones que más desarrollo han tenido en los últimos años y la razón de este desarrollo se debe principalmente a las necesidades de nuestra vida actual y el mundo de conectividad en que vivimos, solo es cuestión de idear aplicaciones que eran inimaginables hace algún tiempo para invitar a los usuarios a encontrar la utilidad de los futuros aparatos electrónicos que se desarrollarán.

Estas necesidades han motivado a los sistemas inalámbricos a incursionar en distintas áreas técnicas y aplicaciones en diferentes rubros con la finalidad de estar informados en cualquier momento. Además, las exigencias de dar una respuesta rápida a usuarios, de estar en permanente contacto con el mundo exterior, la movilidad, la capacidad y la comodidad tan solo son algunos de los retos y ventajas que nos ofrecen los sistemas inalámbricos, por lo que se convierten en un campo fértil de rápido crecimiento tecnológico, tal como se muestra en la (Fig. 2.1).

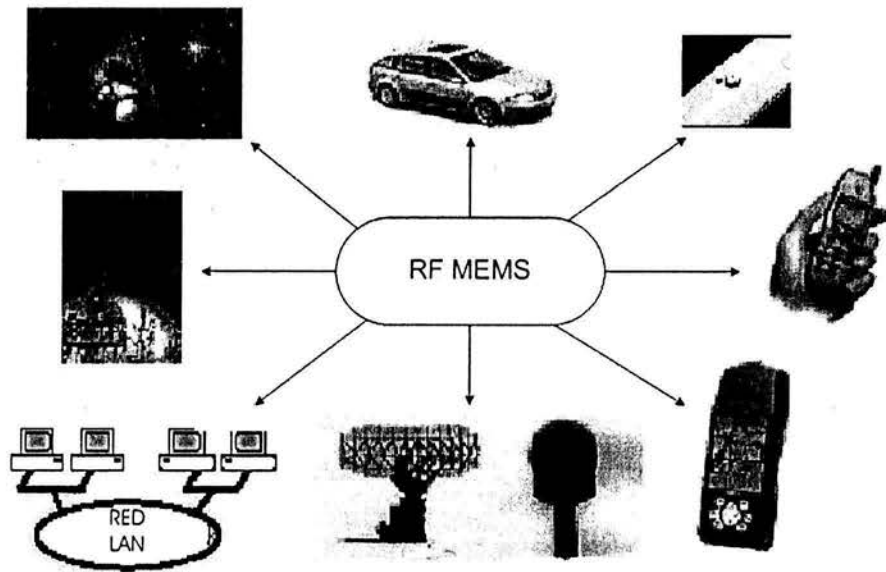


Fig. 2.1 Campos de aplicación inalámbrica

Por otro lado, no todo puede ser tan fácil como lo imaginamos y planteamos, porque debemos reconocer que para lograr todos estos retos es necesario llevar de la mano una definición clara de los problemas que presentan los actuales sistemas inalámbricos y proponer una alternativa de solución.

Como sabemos, para que un sistema de comunicación funcione debe contar con un modelo que sustente su eficiente desempeño y para esto, es necesario partir de cada una de las etapas que hace que un sistema inalámbrico funcione, por ejemplo, en el desarrollo de los nuevos sistemas cuando hablamos de la electrónica, que considero es una parte muy importante de nuestro reto en las comunicaciones inalámbricas, debemos estar conscientes que debemos trabajar mucho en este aspecto para solucionar las limitantes que presenta la electrónica actual, pues de esto dependerá el éxito de las mejoras e innovaciones que más adelante se plantearán en este trabajo con la finalidad de lograr una conectividad ubicua en el campo de las telecomunicaciones.

Actualmente, vivimos en una sociedad que tiene una visión de las telecomunicaciones muy diferente a la de otros tiempos, y podría sintetizarlo de esta manera: *"Conectividad e información en cualquier momento, lugar y forma"*, lo que lo hace una

visión muy ambiciosa, pero a la vez necesaria, pues se vuelve parte de nuestras necesidades diarias en la casa, en la oficina e incluso en la calle. Por ejemplo, hablando de la movilidad, sabemos que nos permite realizar diferentes tareas como son: comunicación a distancia, supervisión de tareas, eficiencia en los tiempos de consultas técnicas en plantas industriales, conferencias, rastreo y consultas médicas, por solo mencionar algunas.

La clave de funcionalidad de los sistemas inalámbricos es tener una convergencia en todas las comunicaciones, es decir, que se vuelvan universales y puedan incluir muchos servicios en un solo dispositivo, en otras palabras, que sean capaces de ofrecer conectividad digital, multimedia, transferencia de datos a alta velocidad, soporte para multimodos, multibandas y multiestándares de voz, con una eficiencia, movilidad y portabilidad de alta calidad.

Todo lo anterior se pretende lograr a un mediano plazo, porque como ya se mencionó, en la actualidad aún se trabaja con elementos electrónicos pasivos, es decir, es en este punto donde se detiene este avance en los Sistemas inalámbricos, porque la electrónica actual que todos conocemos tiene un límite y se debe a las dimensiones de los elementos pasivos, a los materiales y a diversos factores que consideraremos más adelante.

Para entender mejor el verdadero problema que se nos presenta, podemos retomar lo que el autor Richard P. Feynman menciona en su artículo "*There 's a Plenty of Room at the Bottom*" [1], donde se plantea diseñar una computadora súper inteligente que pueda incluso reconocer caras humanas, pero si lo pensamos dos veces entenderemos que tan solo el construirla sería del tamaño de un pequeño edificio y probablemente no alcanzaría todo el germanio en el mundo para fabricar todos los transistores que queramos utilizar en esta magnífica computadora. Además, no debemos perder de vista que el construir algo así requeriría de una enorme fuente de energía y seguramente la transmisión de información sería muy lenta.

Como vemos, lo anterior nos desanima mucho, porque vemos un panorama demasiado limitado y no apegado a las necesidades actuales, por lo tanto la pregunta sería: ¿Cómo hacemos para construir un sistema así?, el mismo autor nos deja una puerta abierta para asomarnos a un mundo nuevo, en donde las leyes físicas no impiden que

los elementos puedan hacerse extraordinariamente pequeños de lo que son en la actualidad (Fig. 2.2) y considerar la posibilidad de trabajar a ese nivel, con la única finalidad de hacer de este nuevo modo de pensar, un nuevo mundo de vivir.

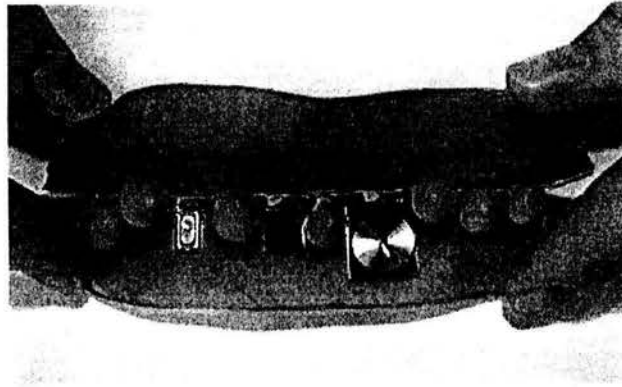


Fig. 2.2 Posibilidad de desarrollo de artículos utilizando microsistemas.

2.1. Campos de la actividad inalámbrica

Los campos de la actividad inalámbrica pueden ser infinitos, ya que la imaginación del hombre es la que los hace posibles en un inicio, pero considero que debemos centrarnos en las áreas que nos benefician directa ó indirectamente.

Considero muy importante señalar que para cualquier campo de aplicación, no se debe perder de vista que las nuevas opciones en cuanto a aplicaciones y dispositivos deben tener una utilidad real y una fuerte penetración, pues es lo que requerimos para adoptar una nueva tecnología.

En nuestra casa, la automatización y el control son áreas que permitirán que los artículos domésticos sean controlados a distancia. Aunque este campo de actividad inalámbrica parece hoy en día muy pequeño, se ha visto que tiene una gran expectativa, ya que se plantean soluciones para controlar electrodomésticos, aparatos que cuenten con acceso a Internet, e incluso, con la capacidad de comunicarse entre ellos. El resultado de todo esto hace que en casa podamos tener dispositivos electrónicos con muchas funcionalidades que no sean solo para un uso común.

Dentro del campo de plataformas móviles, se pretende integrar multifunciones en un solo dispositivo (Fig. 2.3), ya que actualmente para acceder a Internet requerimos de una PC, pero precisamente nuestras demandas han cambiado, ya que actualmente requerimos de equipos que operen con una gran variedad de estándares, tecnologías de accesos y redes, además, existen dos retos muy importantes en este campo que son: la limitante en el tiempo de vida de la batería y el tamaño (peso) de los aparatos para tener con esto una mayor portabilidad[4].

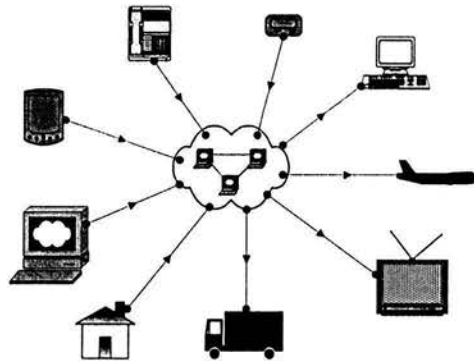


Fig. 2.3. Multifunciones integradas vía Internet

Por último, no olvidemos el campo de las comunicaciones satelitales, donde cada día se demanda contar con mayor capacidad y flexibilidad, ambas limitantes prohíben a los satélites incluir mayores capacidades como son: capacidad de multiusuarios, multienlaces, multitransmisión de datos, por mencionar solo algunas. Por lo que es necesario solucionar el problema de la fuente de poder limitada que lleva a bordo el satélite y encontrar un punto de equilibrio entre capacidad y funcionalidad contra el peso (masa) y consumo de potencia del satélite.

El vasto potencial de la actividad inalámbrica es una actividad que continuamente está en desarrollo, lo que nos lleva a pensar que para lograr una completa armonía se necesitan de normas y estándares que regulen el funcionamiento de los dispositivos electrónicos con la finalidad de crear arquitecturas funcionales que cubran la mayor parte de nuestras necesidades.

2.2. Sistemas, estándares y arquitecturas inalámbricas

Como hemos planteado anteriormente, los servicios inalámbricos cada vez se vuelven más convergentes y comenzarán a ser vistos como un estándar, donde los servicios de voz, video y datos en una sola red o dispositivo se vuelvan necesarios. Estos nuevos dispositivos proveerán servicios personalizados a los usuarios sin depender del medio, tiempo y ubicación. La importancia de establecer estándares se debe a muchas razones, por ejemplo, al establecer un estándar, las nuevas tecnologías que surjan tendrán un punto de referencia de donde partir y hacia donde dirigirse. Los estándares deben tener alcances máximos en las tecnologías de telecomunicaciones, cómputo, informática y electrónica, pues todas están convergiendo.

Cabe mencionar que los estándares de servicios inalámbricos en México son basados principalmente en la transmisión de datos, en localización y en navegación en Internet, entre otros. Lo que nos lleva a pensar que sí existe la tecnología avanzada, pero que el mercado y la economía frenan un poco el impacto que pueden alcanzar estos servicios.

Debido a esta inevitable necesidad en los últimos años, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) enlistó una serie de estándares que se aplican perfectamente al campo de sistemas inalámbricos [2]. Estos estándares cuentan con ciertos parámetros que los hacen diferentes y lo que se busca es establecer evaluaciones cualitativas y cuantitativas para posteriormente elegir la mejor opción y desarrollarla en algún dispositivo electrónico.

En el presente trabajo sólo mencionaré tres de estos estándares, pues el objetivo no es describirlos de manera extensa, pero sí el entender de la importancia de su existencia. Estos tres estándares son aplicables a la telefonía celular y a las aplicaciones de comunicación inalámbrica debido a su portabilidad.

Digital European Cordless Telecommunications (DECT)

Es un estándar europeo desarrollado por el Instituto Europeo de Telecomunicaciones (ETSI). Este estándar está diseñado para operar en la banda de frecuencias de 1880-1900 MHz, con la flexibilidad de utilizar otra banda de frecuencias más cerrada. Su

tecnología está basada en TDMA / TDD (Time División Multiple Access / Time Division Duplex). Tiene un número de 10 portadoras con una separación de 1726 kHz entre ellas. Cuenta con una tasa de transmisión de 1152 kb/s por portadora y un número de 12 canales TDMA por cada portadora. El número total de canales de voz es de 120. Utiliza un código de voz de 32 kb/s llamado ADPCM (Adaptive Differential Pulse Code Modulation) que lo hace superior a otros estándares. El método de modulación es GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying). Además la asignación de canales es en forma dinámica. La máxima transmisión de potencia en la base y en el dispositivo portable es de 250mW, donde el control dinámico de potencia la reduce a 60mW. Pero si hablamos de una potencia promedio encontramos que es alrededor de 10mW o menos, dando como resultado un larga vida a la batería.

Personal Access Communications System (PACS)

Es un estándar desarrollado por Estados Unidos y estandarizado por el Joint Technical Committe (JTC) en 1994. Y opera en dos bandas, 1850-1910 MHz de subida y 1930-1990 MHz de bajada. Estas bandas están alojadas por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) en tres bandas pares de 5 MHz y tres bandas pares de 15 MHz para tener aplicaciones de Servicio de Comunicación Personal (PCS). La interfaz de aire que utiliza se conoce como PACS que permite la operación de división de frecuencia duplex (FDD). El estándar PACS está basado en la tecnología FDD-TDMA con 200 canales con una separación de 300 kHz. La modulación que utiliza y la codificación de voz es QPSK (Modulación de Corrimiento de Cuadratura) y ADPCM de 32 kb/s, respectivamente. La tasa de transmisión del canal es aproximadamente de 384 kb/s. La asignación de canales es cuasi-estática y la asignación de frecuencias es dinámica y se define como (QSFA/DCA). La máxima transmisión de potencia en un dispositivo móvil es de 200 mW, con un promedio de 25 mW.

Personal Handyphone System (PHS)

Este estándar fue desarrollado por Japón y opera en la banda de 1895-1918 MHz. PHS fue desarrollado con la idea de hacer sistemas portables eficientes a bajo costo. En 1993 la Asociación de la Industria de Radio y Negocios (ARIB) aprobó el estándar RCR STD-28, pero fue hasta 1995 que se implementó el primer sistema comercial. El estándar está basado en TDMA / TDD con 77 canales con una separación por portadora

de 300kHz. La velocidad de transmisión es de 384 kb/s y utiliza la modulación QPSK. La codificación de voz es la ADPCM a 32 kb/s y la asignación de canales es dinámica. Además cada canal puede ser usado para tener cuatro canales en el modo TDMA. Una comparación general de los tres estándares DECT, PACS y PHS para aplicaciones inalámbricas se muestra en la tabla 1, así como sus parámetros básicos [3]:

| Sistema | DECT | PACS | PHS |
|--------------------------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| Banda de Frecuencia (MHz) | 1880-1900 | 1850-1910 / 1930-1990 | 1895-1918 |
| Método Duplex | TDD | FDD | TDD |
| Método de Acceso | TDMA | TDMA | TDMA |
| Número de portadoras | 10 | 200 | 77 |
| Separación de portadoras (kHz) | 1726 | 300 | 300 |
| Modulación | GFSK | $\pi/4$ QPSK | $\pi/4$ QPSK |
| Velocidad por canal (kb/s) | 1152 | 384 | 384 |
| Codificación de Voz | ADPCM | ADPCM | ADPCM |
| Handoff | No detectable | No detectable | No detectable |
| Organismos de Estandarización | ETSI | ANSI | RCR |
| Tamaño de Celdas | Pequeño | Muy grande | Grande |
| Eficiencia en la Modulación (b/s/Hz) | 0.66 | 1.28 | 1.28 |
| Conexiones a otras Redes | Buena | Buena | Regular |

Tabla 1. Comparación de estándares DECT, PACS y PHS

Al evaluar los estándares podemos decir que todos proveen flexibilidad, movilidad y un buen desempeño, pero pueden ser todavía mejorados y así obtener un mejor resultado en las aplicaciones que se pretenden ofrecer. Debemos señalar que estos estándares tienen por el momento un desenvolvimiento satisfactorio.

La necesidad de crear un estándar surge con la idea de hacer converger todas las funcionalidades que pueden ofrecer los nuevos dispositivos de comunicaciones inalámbricas y así fabricar componentes electrónicos capaces de soportar todas las exigencias de los mismos estándares, lo que nos lleva a pensar en la posibilidad de un cambio en el diseño y fabricación de las arquitecturas actuales de comunicación.

Lo anterior no significa que debamos cambiar completamente una arquitectura existente y que se deba rediseñar completamente, lo que se propone básicamente es analizar en dónde se pueden obtener mejoras y obtenerlas, así de sencillo. Lo maravilloso de este nuevo panorama es que podamos atrevernos a revolucionar tecnologías que se pensaban limitadas por la misma electrónica.

Por ejemplo, como se muestra en la siguiente arquitectura tradicional inalámbrica basada en el estándar PHS (Fig. 2.4), se encuentra formada por muchos elementos físicamente limitados como son: transistores, capacitores, resistencias, amplificadores, etc. La limitante física en las actuales arquitecturas se debe principalmente a espacio, pues los elementos no pueden reducirse más y con esto no se pueden anexar nuevas funcionalidades al sistema.

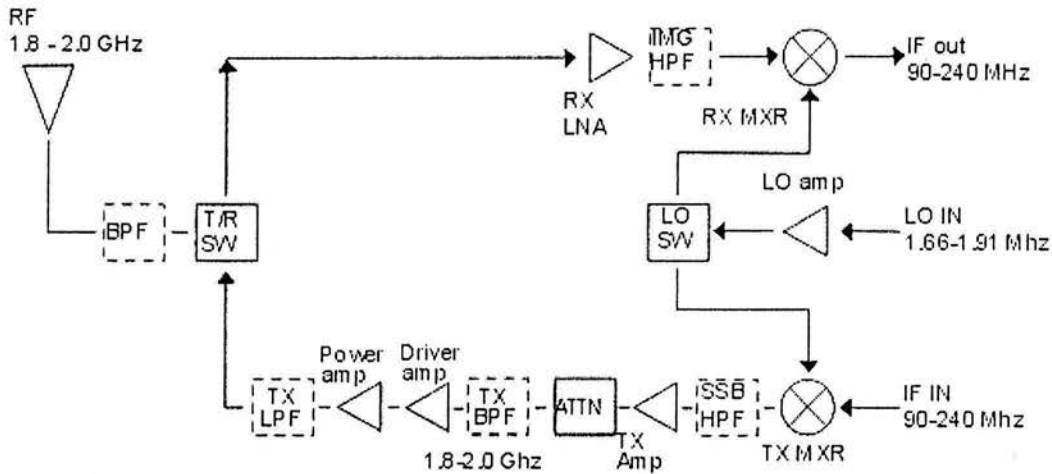


Fig. 2.4 Arquitectura PHS

Una arquitectura de transmisión basada en el estándar PHS necesita de una antena, que pueda operar a una frecuencia específica para proveer el servicio de comunicación, se puede requerir de un filtro paso banda para seleccionar solo la banda de interés y eliminar las frecuencias que no nos interesen, un interruptor para seleccionar si se trata del ciclo de transmisión o de recepción, un amplificador de bajo ruido con alta calidad para obtener una buena relación señal a ruido en nuestro sistema de recepción, un mezclador para obtener en este caso una frecuencia intermedia para poder trabajarla en transmisión o recepción, los amplificadores de potencia se requieren para tener un buen nivel de la señal. Si podemos observar solo los componentes que se encuentran marcados en bloques punteados son los que están disponibles en circuitos integrados (CI), pero no son todos los componentes, en realidad son muy pocos los que así lo están.

Para finalizar este breve análisis en las arquitecturas inalámbricas actuales me gustaría resaltar que en cada bloque que compone cualquier sistema de comunicación

inalámbrica se pueden obtener mayores eficiencias a las que se han obtenido hasta el momento, porque lo que plantearemos más adelante en este trabajo esa solución, por el momento solo comentaré la problemática actual que sufren estos sistemas inalámbricos. Sin olvidar que el reto es conectar varios sistemas que puedan soportar la comunicación entre tecnologías diferentes con diferentes medios de transmisión y velocidades al operar.

2.3. Retos en la eficiencia de consumo de potencia y ancho de banda en los sistemas inalámbricos

Es muy clara la problemática que presentan los sistemas de comunicación inalámbrica actual, pues básicamente no han logrado combinar los requerimientos en términos de consumo de potencia y ancho de banda para transmitir nuestra información.

En este reto, los elementos pasivos juegan un papel muy importante y decisivo en las aplicaciones inalámbricas. Si examinamos de nuevo las arquitecturas que describimos anteriormente, podemos llegar a muchas conclusiones que nos llevan a realizar aseveraciones con respecto a la eficiencia de los elementos que componen a estos sistemas.

Para poder obtener en los sistemas de comunicación redes de acoplamiento, circuitos de sintonización y filtrado con pérdidas de inserción mínimas se requieren elementos pasivos de bajas pérdidas y libres de componentes parásitos por ejemplo: líneas de transmisión, inductores, capacitores, varactores, interruptores y resonadores.

Debido al congestionamiento del espectro se requiere tener la habilidad de desarrollar un filtrado espacial para cancelar interferencia y además se requiere mantener el enlace mientras se está en movimiento. Por lo que las funciones de corrimiento de fase, de suma y de ponderación son invaluable.

Se requiere una larga vida de la batería, por lo que se requiere una alta eficiencia en el desempeño de los subsistemas.

Por otro lado, el consumo de potencia es un punto clave en la eficiencia de los dispositivos, pero desgraciadamente aún esta en vías de desarrollo el crear soluciones

que disminuyan todos estos problemas, por lo cual yo creo que la tecnología MEMS es una excelente opción para mejorar el desempeño de las arquitecturas actuales.

2.4. Empleo de la tecnología MEMS en los dispositivos inalámbricos

La posibilidad de reducción de los dispositivos electromecánicos ha dado como origen el que cada vez se integren más y mejores funciones en los circuitos integrados. El surgimiento de los micromecanismos permitió fabricar elementos electrónicos sumamente minúsculos donde su principal ventaja no se encuentra en sus dimensiones, sino en su eficiencia. Por mencionar casos específicos de lo que se está hablando, investigaciones recientes han demostrado que los circuitos que utilizan la tecnología MEMS tienen un alto factor de calidad Q , en verdad esta tecnología ha llegado a revolucionar los circuitos de comunicación debido al amplio panorama que nos ofrece y que aún está en vías de desarrollo.

Para tener una idea del potencial de la tecnología MEMS en los dispositivos inalámbricos podemos mencionar la existencia de circuitos resonadores diminutos en la banda de UHF con factores de calidad del orden de diez mil, o el caso de microcapacitores variables con factores de calidad Q por arriba de 300 a 1 GHz, con los inductores MEMS también se ha trabajado y se han obtenido factores de 30 a 1 GHz y por último, podemos mencionar los microinterruptores que introducen pérdidas tan bajas como 0.1 dB. Las funcionalidades de fabricar este tipo de dispositivos se vuelven tangibles cuando observamos que son realizables mediante un apropiado diseño de tecnología MEMS, al construir un resonador, hacemos posible que pueda oscilar de una manera altamente estable y con pérdidas realmente insignificantes. Lo mismo sucede cuando se construyen capacitores variables capaces de preseleccionar radiofrecuencias, lo que da origen a una nueva implementación de transmisores multi-banda. Las mismas ventajas se ofrecen en los inductores al usar MEMS, pues se reducen las resistencias parásitas en serie así como las pérdidas por el sustrato. Otra ventaja que presentan estos sistemas son el nulo consumo de potencia DC y sobre todo, la tecnología MEMS hace posible que se vuelva una alternativa viable para la construcción de arquitecturas transmisoras con excelentes resultados en lo referente a ganancia y especialmente en lo referente a la potencia que se necesita, pues al ser tan

pequeños los elementos no se necesitan de grandes cantidades de energía para excitarlos y hacerlos funcionar.

Podría seguir hablando de las ventajas de utilizar MEMS en las comunicaciones inalámbricas, pero en el trasfondo de esta situación se busca una total integración para disminuir la robustez de los dispositivos actuales y también reducir el consumo de potencia para que se convierta en una alternativa en las arquitecturas de transmisión y recepción y de esta forma que sean cada vez más competentes.

Creo firmemente que las ventajas que ofrece la tecnología MEMS son extraordinarias, solo dependerá de nuestra imaginación la aplicación de este nuevo campo que podemos empezar a explorar.

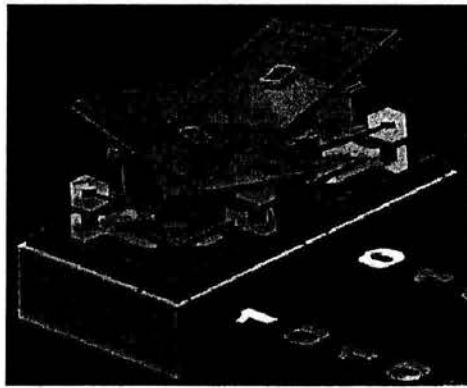


Fig. 2.5 Microespejo con tecnología MEMS para aplicaciones en proyectores

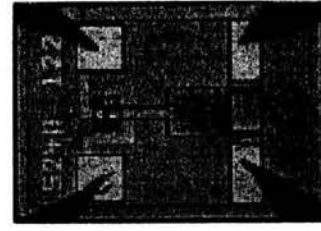
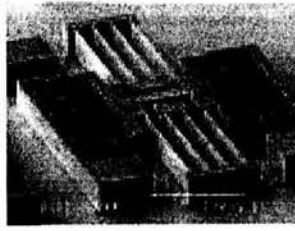
REFERENCIAS DEL CAPITULO 2

- [1] R.P. Feynman, "There's Plenty of Room at the Bottom," *J. Microelectromech. Syst.*, vol.1, pp. 60-66,. 1992, March 1992.

- [2] ITU-R, Draft Rev., Rec F.757, "Basic System Requirements and Performance Objectives for Cellular Type Mobile Systems used as Fixed Systems (Fixed Wireless Local Loop Applications of Cellular Type Mobile Technologies", Doc. 9B/73, Enero 1997.

- [3] O. Monmtahan y H.Hashemi, "A Comparative Evaluation of DECT, PACS y PHS Standars of Wireless Local Loop Applications," Proc. VTC, Otoño de 1999, Amsterdam, p.p. 523-527.

- [4] H. De los Santos, "RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications," Ed. United States: Artech House, 2002, pp. 4-46.



III. Orígenes de MEMS

El avance tecnológico de las últimas décadas ha llevado a la miniaturización o realización de componentes cada vez de menor tamaño, manteniendo las funcionalidades de sus antecesores. Uno de los principales motivos ha sido la necesidad de aumentar constantemente la capacidad y velocidad de los dispositivos. Otras ventajas derivadas de la miniaturización son la reducción de costos y una mayor precisión.

Para entender el origen de los microsistemas, es importante entender por qué usar dispositivos tan pequeños. Una de tantas respuestas es que un microsistema es un sistema inteligente miniaturizado que integra funciones sensoras, de proceso y de actuación. Además los microsistemas deben contar con algunas de las siguientes propiedades: eléctricas, magnéticas, mecánicas, ópticas, químicas, biológicas, magnéticas u otras, de forma que se puedan integrar en un solo Circuito Integrado (CI) o en un CI múltiple[1].

No podemos hablar de una fecha específica de sus orígenes pero se asocia al periodo de mediados de 1960 a inicios de 1970. Tal vez un hecho tan importante de los orígenes se dió en el año de 1867 donde se utilizó un diamante para cortar materiales que posteriormente se utilizan para poder fabricar una gran variedad de componentes metálicos y plástico[3].

Posteriormente las técnicas desarrolladas desde principios de los 80 para la industria microelectrónica fueron extendiéndose progresivamente a otros campos. Así surgieron la microóptica, la micromecánica, etc., las cuales, a su vez, se combinan entre sí para crear microsistemas integrados con diferentes tecnologías.

El primer campo de exploración e implementación de la tecnología MEMS fue en el almacenamiento de datos, pues siempre se consideró la base para dar paso a una nueva tecnología emergente, pues si se lograba hacer esto, se lograría más adelante la miniaturización de computadoras y otros elementos de almacenamiento. Para tener una mejor idea del nivel de reducción que estamos hablando es como almacenar información en una partícula de polvo, donde llegan a aplicar factores de reducción de 25,000, que ocuparía un volumen de 100 átomos y que podría almacenar 10^{15} bits de información, algo que nunca antes se había imaginado en esas diminutas dimensiones.

Cuando hablamos sobre los orígenes de la tecnología MEMS no podemos dejar de lado el estudio del material que lo hizo posible; este material semiconductor se llama Silicio, el cual se ha venido comercializando y consolidando como un material que además de tener excelentes propiedades electrónicas, cuenta también con buenas propiedades mecánicas que lo hacen altamente eficiente en comparación de otros semiconductores [4].

Es muy claro que el Silicio está revolucionando la construcción de nuevos dispositivos electromecánicos y que fue este mismo material el que ayudó a la percepción de dispositivos y componentes en miniatura, debido a las características intrínsecas del mismo. Por ejemplo, el Silicio es un material activo anisotrópico, sumamente abundante en la naturaleza, que puede ser procesado para obtener altos grados de perfección y pureza, aunque también tiene propiedades que lo hacen laborioso, como el hecho de que cuente con defectos de cristalización en sus orillas, es decir, es muy fácil que se astille o rompa si se ejercen diferentes intensidades de concentración de fuerzas (Fig. 3.1).

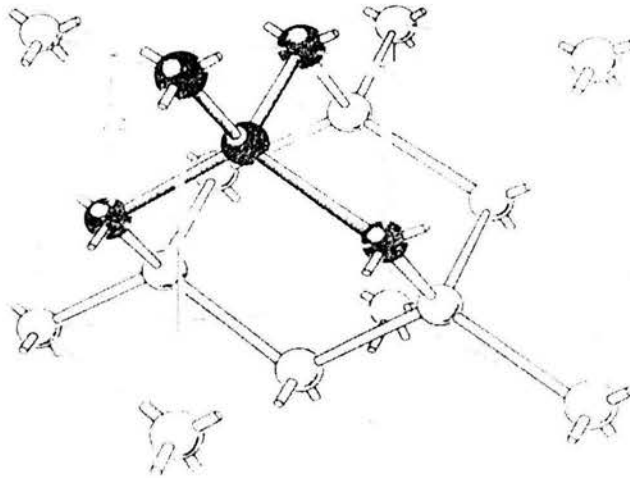


Fig. 3.1 Estructura cristalina del Silicio

3.2. Tecnologías de fabricación

Varias técnicas y aplicaciones novedosas se están continuamente desarrollando para el uso de estructuras MEMS, pero en el presente trabajo solo haré mención a cuatro de estas técnicas. La idea de introducir las tecnologías de fabricación es para conocer que para poder fabricar dispositivos MEMS se necesita trabajar en planos tridimensionales, a diferencia de la fabricación de los CI, además se pueden utilizar los laboratorios con los que se fabrican los circuitos integrados convencionales y así aprovechar sus instalaciones.

3.2.1. Proceso convencional de fabricación de circuitos integrados

Uno de los procesos convencionales de fabricación de CI está basados en la fotolitografía [7] y en ataques químicos como se muestra en la (Fig. 3.2):

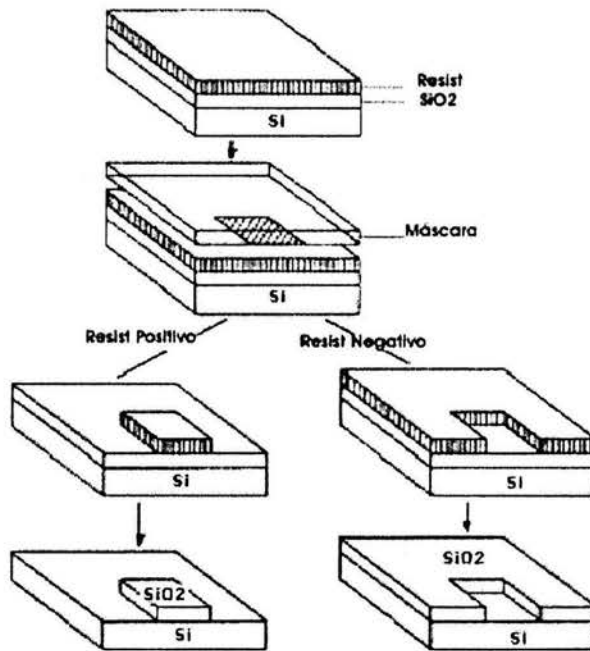


Fig. 3.2 Proceso convencional de fabricación de CI

Como podemos apreciar, el proceso de fabricación se realiza en dos dimensiones, como se describe:

1. La oblea de Silicio es cubierta con una capa muy delgada de dióxido de Silicio (SiO_2) donde el patrón a grabar será definido.
2. El material de SiO_2 es después cubierto con un material llamado fotoresist (polímero sensible a la radiación de la luz) que será posteriormente atacado con luz ultravioleta UV.
3. La fotomáscara con el patrón a transferir, es puesta sobre la oblea de Silicio, y el fotoresist es expuesto a través de la máscara a rayos UV para dejar expuesto el óxido que será removido.
4. El fotoresist es revelado con un proceso similar al utilizado en el proceso ordinario de fotografía. Las partes de la capa del fotoresist son expuestas a rayos UV y quedarán grabadas o no dependiendo del tipo de fotoresist, ya sea positivo o negativo.
5. Si el fotoresist que ha sido expuesto a la luz UV se remueve, se queda una capa de SiO_2 en el área expuesta, entonces es un resist positivo y la máscara

contiene una copia del patrón, que permanecerá sobre la superficie de la oblea de Silicio.

6. Si el fotoresist es negativo permanecerá sobre la superficie de Silicio en las partes que hayan sido expuestas a la luz UV.

Como podemos apreciar en los procesos convencionales, no se piensa en estructuras tridimensionales funcionales, solo se trabaja en dos dimensiones, pero en la nueva tecnología de estudio, esto es una particularidad que ha cambiado, lo que permite que las estructuras se vuelvan más funcionales.

3.2.2. Micromaquinado de volumen

La técnica de micromaquinado de volumen utiliza los procesos tradicionales de construcción basados en la fotolitografía y ataque de las capas. Esta técnica utiliza el proceso de grabado explorando el cubo de cristal de Silicio atacándolo en sus diferentes planos, porque una característica de la oblea de Silicio es que cuenta con planos coordenados $(1,0,0)$, $(1,1,0)$, $(1,1,1)$ [5][7], que sirven de referencia para comenzar a atacar el Silicio y hacer el diseño debido[2](Fig. 3.3).

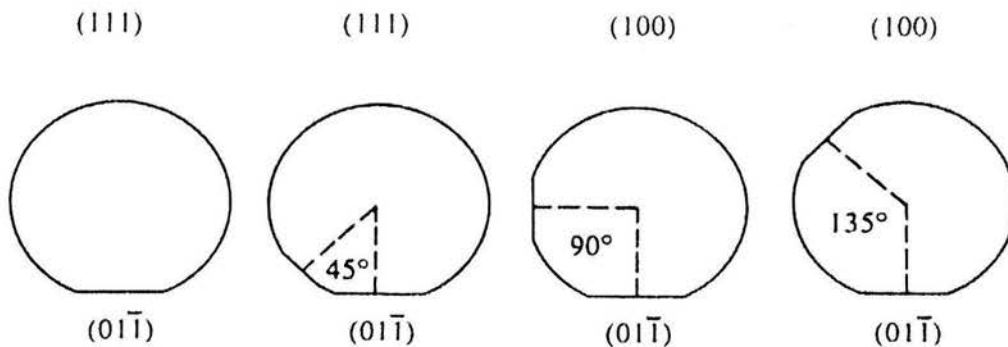


Fig. 3.3 Clasificación de obleas de Silicio

Posteriormente se aplica un ataque anisotrópico que permite crear en el sustrato cavidades profundas con paredes muy verticales, al igual que se pueden utilizar ataques isotrópicos que hace cavidades profundas como de semicírculo; además se

utiliza también el dopado del material de Silicio para acelerar o frenar la reacción química en las regiones de interés como pueden ser los bordes.

Cabe mencionar que el éxito de fabricación del dispositivo que se construya dependerá de cómo se combinen los agentes anisotrópicos direccionales y algunos otros no direccionales isotrópicos, ya que con cada uno de obtienen resultados diferentes dependiendo el plano de acción $(1,0,0)$, $(1,1,0)$, $(1,1,1)$ y las inclinaciones (ángulos) que requiera el propio diseño, tomando como referencia que el plano $(1,1,1)$ que está a 57° con respecto al plano $(1,0,0)$.

Al aplicar el ataque químico anisotrópico sobre el material cristalino, la mínima resolución alcanzable queda limitada por el agrandamiento del patrón debido a la propagación de éste por los planos del cristal (Fig. 3.4).

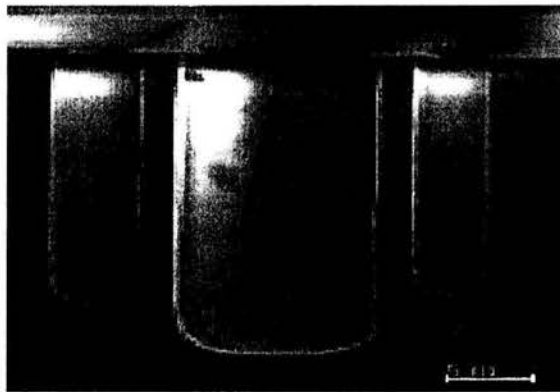


Fig. 3.4 Ataque anisotrópico en la oblea de Silicio

El micromaquinado de volumen permite crear sensores de presión y acelerómetros, por mencionar algunos, pero si se pretende realizar estructuras de mayor complejidad y de menor tamaño, resulta una mejor opción utilizar otra técnica llamada micromaquinado de superficie. Por otro lado el empaquetado de los elementos suele presentar ciertas dificultades debido a la complejidad del proceso y pruebas a las que deben ser sometidos como son: aislamiento total de polvo y agua, interferencias electromagnéticas, humedad, protección contra la temperatura, entre muchos otros efectos.

Cabe mencionar que esta técnica tiene ciertas limitaciones, pues el hecho que la constitución interna del material de Silicio tenga ciertas características cristalinas,

hacen que se restrinja la geometría de los dispositivos en tamaño comparado con otro tipo de tecnologías, y se debe principalmente a las limitaciones de los radios obtenibles para las inclinaciones que se especifican (Fig. 3.5).

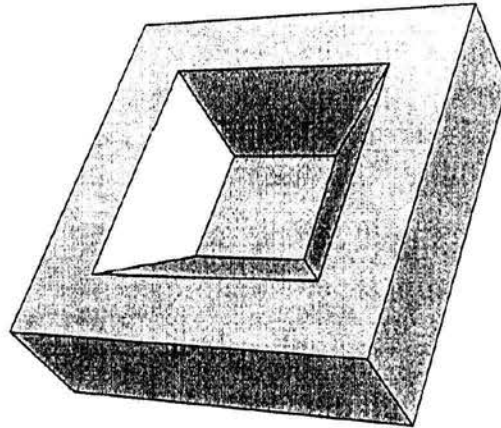


Fig. 3.5. Micromaquinado de volumen.

3.2.3. Micromaquinado de Superficie

El micromaquinado de superficie es una técnica de fabricación que va sumando capas para construir microestructuras sobre la superficie de una oblea de Silicio. Este maquinado se realiza mediante procesos sucesivos de depósito de capas delgadas y la transmisión de patrones sobre dichas capas, para posteriormente realizar sobre ellas un ataque selectivo. Los métodos habituales son: el ataque seco para marcar los patrones deseados sobre el plano xy de las capas depositadas, y el ataque húmedo isotrópico para liberar las capas.

En esta técnica existen dos tipos de capas: las estructurales y las de sacrificio. Un ejemplo típico puede ser una capa de sacrificio de SiO_2 recubierta por encima y en los lados por una capa de poliSilicio, que es el principal material estructural usado en el micromaquinado superficial. Al atacar el conjunto con ácido fluorhídrico, la capa de sacrificio desaparece y queda sólo la capa de poliSilicio, formando ahora una cavidad.

El primer paso a realizar antes de comenzar a trabajar con una oblea de Silicio es su limpieza, pues debido a al polvo procedente del ambiente, personas y aparatos puede contaminarse además con partículas de disolventes químicos, agua, etc. En el proceso

debe contarse también con un cuarto limpio que tenga todo este tipo de medidas de seguridad, así como un tamaño adecuado y buena funcionalidad.

Los métodos de limpieza pueden ser variados, por mencionar algunos: limpieza por vapor, tratamiento térmico, pulido con elementos abrasivos, etc (Fig. 3.6). Posteriormente se depositarán capas delgadas sobre el sustrato de Silicio. Se pondrá primero una película de dióxido de Silicio, después una capa con un material llamado fotoresist [2][7] y es donde se transferirá el patrón deseado después de una radiación a través de la máscara previamente definida, para posteriormente imprimir en el sustrato de Silicio el patrón marcado con el fotoresist. Después se eliminará el fotoresist, que puede ser positivo o negativo dependiendo de la manera en que se ataque la máscara, y por último se colocará la máscara para transferir el patrón al fotoresist.

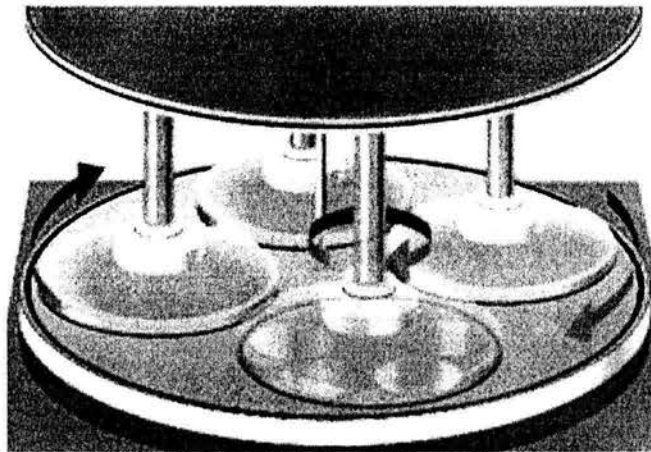


Fig. 3.6 Pulido de obleas de Silicio

Ya que terminamos de colocar capa tras capa y darle forma a nuestro dispositivo electromecánico, lo que hacemos ahora es, aplicar sobre el fotoresist una sustancia química que lo disuelva solo en las partes afectadas expuestas y no expuestas después de la radiación de luz dejando algunas partes del dispositivo móviles (Fig. 3.7).

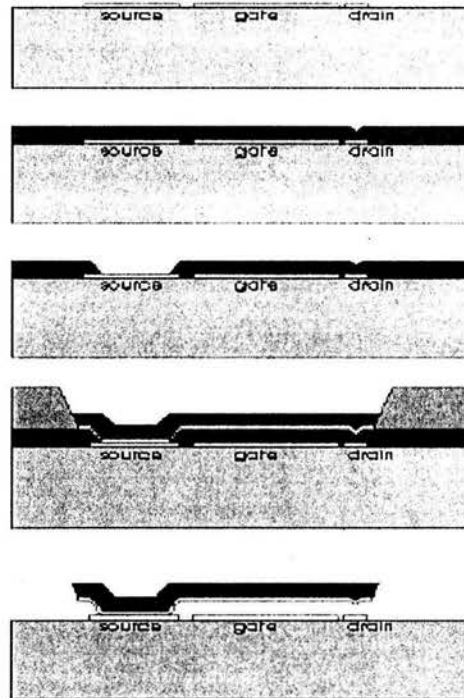


Fig. 3.7 Proceso de micromaquinado de superficie

Cabe mencionar que el micromaquinado de superficie tiene la ventaja de permitir estructuras de altura muy baja, debido a que las capas de deposición pueden ser muy finas, del orden de micras de espesor. Lo cual podría ser una ventaja o desventaja pues solo se utiliza en aplicaciones que no requieran espesores muy altos. Además existen algunas desventajas sobre la técnica de micromaquinado de volumen, pues en este proceso no se utilizan al máximo los planos cristalinos con que cuenta la oblea de Silicio, además que a este nivel se presentan fuerzas que se le conocen como "Stiction" (pegosidad) y tienen la peculiaridad de producir errores en el funcionamiento de las juntas de las piezas mecánicas, debido a que éstas se ven sometidas a las fuerzas de atracción y repulsión, y en ocasiones pueden quedarse pegadas las partes móviles.

Una ventaja importante que tiene esta técnica de fabricación MEMS, es que debido al excelente manejo del poliSilicio y dióxido de Silicio, se pueden fabricar piezas móviles libres de roces o rechinos y estructuras deslizantes. Además que las capas mecánicas pueden ser hechas con dióxido de Silicio, Aluminio, Tungsteno y Silicio policristalino [7].

Considero que la etapa más importante en el proceso es la etapa de eliminar las capas de sacrificio, para ir liberando los elementos móviles que servirán como soporte estructural y posteriormente poder actuar para la función que fueron creados (Fig. 3.8).

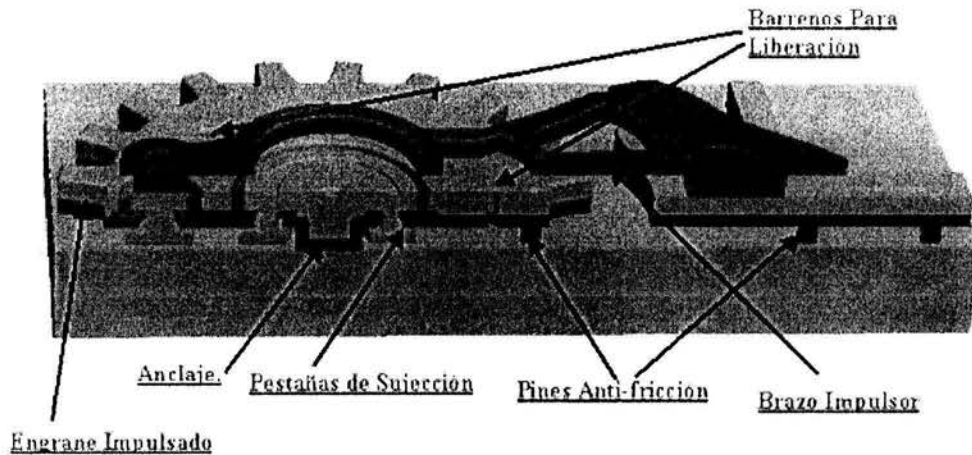


Fig. 3.8 Dispositivo MEMS con la técnica micromaquinado de superficie

3.2.4. Proceso Fusion Bonding

Este proceso básicamente funciona como un ensamble de varias obleas de Silicio, previamente trabajadas y diseñadas utilizando la técnica de micromaquinado de volumen, para posteriormente unir los diferentes componentes y así crear un dispositivo más complejo.

El proceso de fusión permite la integración de múltiples obleas de Silicio y se requiere alcanzar temperaturas aproximadas de 1100 °C para su fusión y reforzar las uniones. La unión de las obleas se lleva a cabo por un proceso químico y son uniones muy confiables y duraderas, además que proporciona un buen sellado hermético del microdispositivo, pero no solo existen integraciones químicas, también se pueden contar con las uniones anódicas, electrostáticas, por mencionar algunas, pero antes se debe preparar y evaluar la superficie y decidir que tipo de unión nos conviene.

Las ventajas de utilizar este proceso es que se pueden fabricar elementos muy pequeños en comparación de la técnica de micromaquinado de volumen.

3.2.5. Proceso LIGA

El proceso LIGA es una técnica de obtención de microestructuras a partir de moldes creados mediante litografía de rayos X. Fue desarrollado como método alternativo de producción de dispositivos con ranuras muy pequeñas, pues además de esta gran ventaja permite obtener microestructuras con alturas muy grandes (del orden de milímetros).

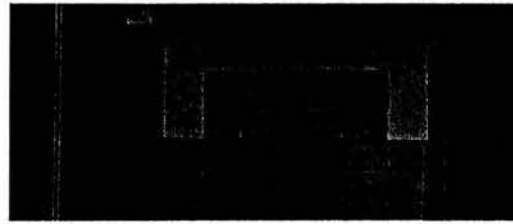
Las microestructuras que se obtienen de los polímeros son usadas como molde de deposiciones con diferentes tipos de metales y tipos de aleación. Una vez realizado el molde metálico éste puede utilizarse para copiar la pieza en plástico o para crear nuevos moldes que permitan transferir la pieza en metales o cerámicas.

Dentro de las ventajas de utilizar este tipo de técnica se encuentran: mayor resolución lateral, ausencia de efectos difractivos, profundidades considerables e inmunidad a las partículas de polvo. Sin embargo, presenta la desventaja del costo requerido para la implantación de un sistema LIGA, al ser necesaria una fuente de rayos X de elevada energía y una colimación alta y el uso de un sincrotrón.

Considero que la técnica LIGA es costosa por la razón que se necesita un sincrotrón para las radiaciones de rayos-X, lo cual lo hace poco accesible, pero vale la pena pues contamos con una profundidad muy considerable a diferencia de las tres técnicas previamente descritas.

REFERENCIAS DEL CAPITULO 3

- [1] H.T. Roger, "Silicon micromechanics sensors and actuators on a chip," *IEEE Spectr.*, pp. 29-35, July 1990.
- [2] H.R. Robbins y Schwartz, " Chemical etching of silicon. The system HF, HNO₃, H₂O y HC₂C₃O₂, J. Electrochem. Soc. Vol. 106, no.6, 1959 pp. 505-508,.
- [3] B. Frazier, C Friedrich, "The miniaturization technologies: past, present and future", presented at 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1994, pp. 1460 -1465.
- [4] P.E. Kurt, "Silicon as a Mechanical Material", Proceedings of the IEEE, vol. 70, no. 5, pp. 420-457, Mayo 1982.
- [5] Gregory T. A. Kovacs y Nadim I. Maluf, " Bulk Micromachining of silicon ", Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 8, pp., 1536-1551, agosto de 1998.
- [6] Fujita, Hiroyuki., "A decade of MEMS and its future ", *IEEE Spectrum*, pp. 1-8, 1997.
- [7] De los Santos, Hector. "Introduction to Microelectromechanical Microwave Systems" , Editorial: Artech House, capítulo 1, pp.1-21, 1999.



IV. Tipos de actuación en los MEMS

Una de las grandes ventajas de los dispositivos MEMS es que integran etapas de actuación de manera que el sistema pueda interactuar con el exterior, aunque también pueden existir etapas de actuación intermedias dentro del propio circuito con algún fin específico.

Los MEMS pueden contener internamente elementos pasivos y dinámicos. Los elementos pasivos incluyen: líneas de transmisión, filtros y acopladores, en cambio cuando hablamos de los elementos dinámicos podemos mencionar: interruptores, capacitores variables y sintonizadores entre otros [1][2].

Algunas de las fuerzas que hace que se muevan las partes movibles sobre la oblea de silicio son: la atracción electrostática, la atracción magnética, la térmica, la piezoresistiva, la electrotérmica e incluso la presión por medio de gases.

Para entender mejor el comportamiento de los actuadores, es necesario analizar a fondo las fuerzas que interactúan en su proceso y logran que el elemento reaccione, estos elementos son modelados por la física y nos sirven para respaldar su buen funcionamiento, aunque la finalidad del trabajo no es lograr demostraciones matemáticas, se busca comprobar que debido a las diferentes fuerzas algunos de los elementos activos y pasivos de un sistema de microondas tienen una actuación debida a una excitación.

4.1. Actuación electrostática

La actuación electrostática está relacionada con la fuerza de atracción entre dos placas con cargas de polaridad opuesta. Por ejemplo, en aplicaciones de microondas, existen actuadores de superficie y los conocemos como interruptores con alta linealidad y bajas pérdidas. En este caso, el interruptor se diseña como se muestra en la (Fig. 4.1) y (Fig. 4.2) como el típico plato paralelo, pero debido a la fuerza de atracción electrostática, el interruptor se abre y se cierra por esta misma atracción, físicamente lo que sucede podemos representarlo con una ecuación que nos describe la energía que está almacenada en el plato paralelo y que hace que éste se deflecte.

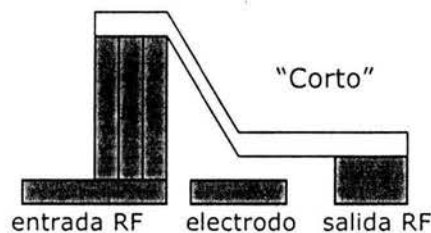


Fig. 4.1 MicroInterruptor cerrado

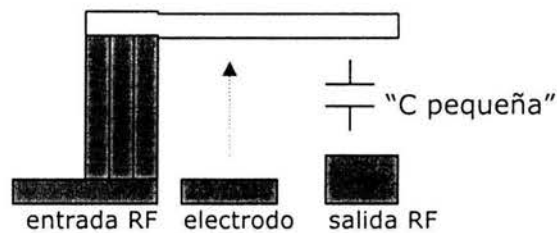


Fig. 4.2 Microinterruptor abierto

La ecuación que describe esta actuación que hace que se restaure la viga sobre el plato paralelo es la siguiente:

La capacitancia está dada por:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (4.1)$$

Donde:

| | |
|--|------------------------------|
| ε = permitividad del medio | $\left[\frac{F}{m} \right]$ |
| A = área de las placas | $[mm^2]$ |
| d = distancia entre las placas | $[mm]$ |

La energía electrostática potencial está expresada como:

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \quad (4.2)$$

La energía potencial representa la energía requerida para prevenir que las placas paralelas cargadas opuestamente en cada placa paralela se colapsen como resultado de la fuerza de atracción de Coulomb:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{qTqB}{d^2} \quad (4.3)$$

donde qB y qT son masas iguales pero cargadas con signo contrario, con lo que esta fuerza se puede expresar como el gradiente negativo de la energía potencial entre los dos platos paralelos:

$$F = -\nabla U \quad (4.4)$$

$$U = \frac{\varepsilon AV^2}{2d} \quad (4.5)$$

Sustituyendo U en la ecuación (4), obtenemos finalmente:

$$F = \frac{\varepsilon AV^2}{2d^2} \quad (4.6)$$

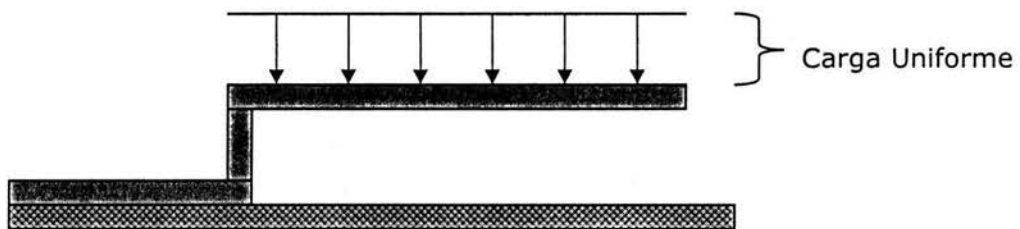
Donde:

| | |
|---|------------------------------|
| ϵ : permitividad | $\left[\frac{F}{m} \right]$ |
| A : área del plato | $[\mu m^2]$ |
| V : voltaje aplicado a las placas paralelas | $[Volts]$ |
| d : distancia entre las dos placas | $[\mu m]$ |

Esta ecuación cuantifica la fuerza que debe ser aplicada sobre el plato paralelo para prevenir que se colapsen en el centro, además nos indica que la fuerza se incrementa linealmente con el área, se incrementa cuadráticamente con el voltaje y se decrementa cuadráticamente con la distancia entre los platos paralelos. Con esto comprobamos que al aplicar un voltaje a los platos paralelos se puede ocasionar que se muevan o actúen sus placas paralelas.

En el diseño del microinterruptor (cantiliver) uno podría suponer que podría presentarse con el tiempo el efecto de Stiction (pegosidad), lo que limitaría su tiempo de vida. Sin embargo, en este caso no es así, debido a que la estructura utiliza un puente de aire que hace que se abra y se cierre el interruptor evitando así este tipo de fallas.

Para entender mejor la actuación de deflección que presenta el cantiliver debido a la fuerza electrostática, que está en función de las propiedades de su estructura y el material, se presenta una ligera deflección cuando la distribución de sus cargas no es de manera uniforme como se muestra en la Fig. 4.3.



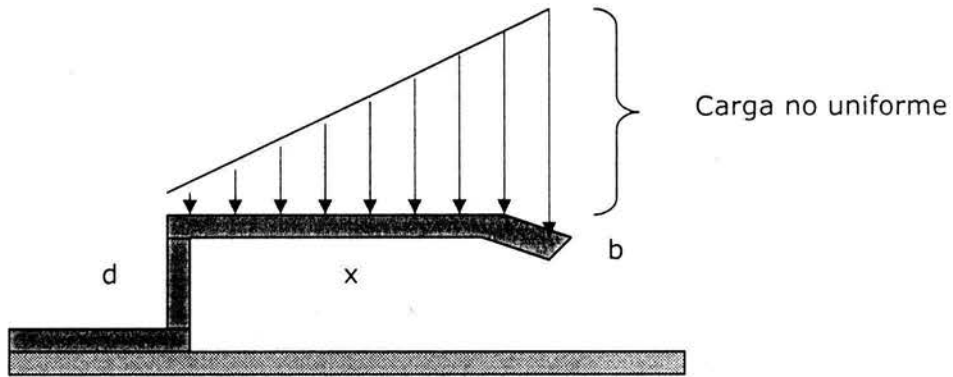


Fig. 4.3 Comportamiento electrostático de un cantiliver

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

$$\delta_T = \left[\frac{x^2}{6EI} \right] (3L - x)bd(x)dx \quad (4.7)$$

Donde:

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

$$q(x) = \frac{\epsilon}{2} \left(\frac{V}{d - \delta(x)} \right)^2 \quad (4.8)$$

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

$$\delta_T = b \int_0^L \frac{3L - x}{6EI} x^2 q(x) dx \quad (4.9)$$

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

$$\delta(x) = \left(\frac{x}{L}\right)^2 \delta_T \quad (4.10)$$

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

$$I = \frac{\epsilon b L^4 V^2}{2 E I d^3} \quad (4.11)$$

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

$$\Delta = \frac{\delta_T}{d} \quad (4.12)$$

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

$$I = 4\Delta^2 \left[\left(\frac{2}{3(1-\Delta)} \right) - \frac{\tanh^{-1} \sqrt{\Delta}}{\sqrt{\Delta}} - \frac{\ln(1-\Delta)}{3\Delta} \right]^{-1} \quad (4.13)$$

Al estudiar el comportamiento de la distribución de cargas del cantiliver, nos damos cuenta que la operación puede volverse inestable debido a la concentración de fuerzas cuando se aplica cierto voltaje y la deflexión puede ser mas allá de la permitida por el mismo diseño.

4.2. Actuación Térmica

La actuación térmica responde a variaciones de temperatura que se generan sobre ciertas partes del dispositivo, con la finalidad de obtener una respuesta a esta excitación. Dentro de los tipos de actuación, ésta es la que mejor sensibilidad tiene a variaciones pequeñas y además puede soportar grandes rangos de operación. El principio de operación está basado en la expansión térmica a través de secciones del microdispositivo. Y esto se logra cuando existen regiones con mayor densidad de corriente que otras, haciendo que dichas zonas se calienten más que otras y debido al fenómeno de expansión térmica se pueda lograr un movimiento mecánico. Cabe señalar que la actuación térmica tiene dos limitantes muy significativas, la primera es que requiere de un consumo de potencia mayor y la segunda es que tiene tiempos de respuesta menores comparados con otros tipos de actuación .

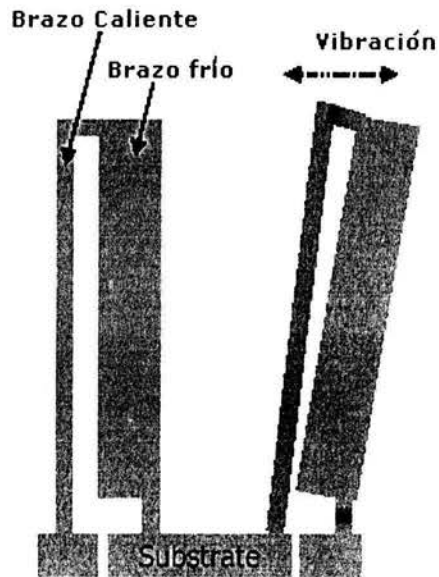


Fig. 4.4 Ejemplo de actuación térmica

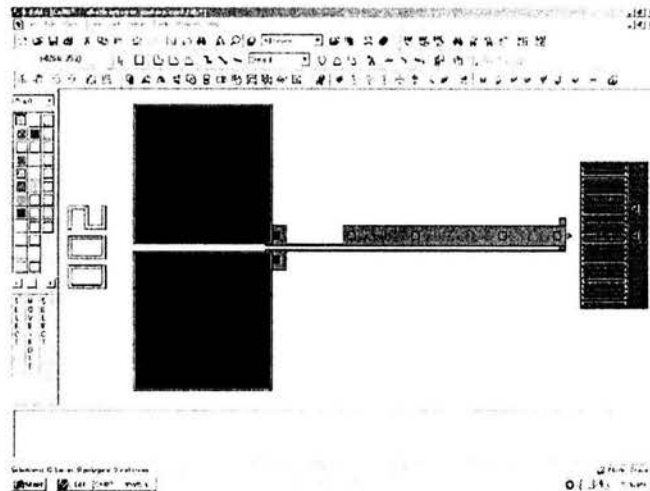
4.3. Actuación piezoeléctrica

La actuación piezoeléctrica puede proveer fuerzas de actuación muy grandes, sobretodo cuando se cuenta con películas piezoeléctricas gruesas. Comercialmente ahora se cuenta con cilindros piezocerámicos que pueden generar unos pocos newtons de fuerza cuando se aplican potenciales del orden de algunos cientos de volts. Sin embargo, los actuadores piezoeléctricos de película delgada ($<5\mu\text{m}$) pueden proveer unos cuantos milinewtons de fuerza [3].

Cabe mencionar que las actuaciones electrostática y piezoeléctrica tienen bajos consumos de potencia ya que la corriente eléctrica es muy pequeña.

4.4. Diseño de MEMS asistido por computadora

La fase de diseño es fundamental para crear un microsistema con una funcionalidad concreta, este debe ser por lo tanto un buen diseño que permita facilitar la fabricación de un primer prototipo, reduciendo con esto costosos experimentos de laboratorio, un gran número de pruebas y errores previos, por lo cual es necesario contar con paquetes de software que faciliten el diseño del microsistema, y la simulación y actuación del mismo.



Estas herramientas de diseño deben incorporar bases de datos con propiedades de materiales, facilidades para el diseño de microsistemas, simulación de efectos físicos (análisis térmico, mecánico, estructural, electrostático, magnetostático, etc.), simulación y bases de datos con parámetros (limitaciones, tolerancias, etc.) de los

distintos procesos de fabricación de MEMS, facilidades para la creación de máscaras, herramientas de optimización y verificación del diseño. Además, deben ser optimizados de acuerdo a los resultados experimentales obtenidos en las estructuras de prueba.

A continuación se describen tres de los principales softwares para el análisis, diseño y simulación de MEMS.

4.4.1 MemsPro

Memspro es un software que fue desarrollado por Memscap con la finalidad de hacer diseños de nuevos dispositivos usando como base bloques funcionales previamente establecidos en las herramientas del software, con la finalidad de facilitar el estudio del comportamiento del nuevo diseño.

Esta herramienta cuenta con muchas funcionalidades de diseño, como son:

1. Máscaras más complejas en geometrías curvilíneas.
2. Verificación del diseño manufacturado.
3. Capas que tienen sus propiedades eléctricas para calcular la capacitancia y resistencia.
4. Editor de diseño (MEMS L-Edit) que hace posible modificar los diseños.
5. Librería con elementos prediseñados, con elementos pasivos y activos.
6. Fase de prueba de materiales y parámetros para verificar la durabilidad del diseño y características del material.
7. Una descripción de los procesos que se han llevado a cabo y un modelador en tercera dimensión.

Además, es muy ilustrativo utilizar esta herramienta de diseño, porque aquí podemos llevar a cabo paso a paso, el proceso de micromaquinado de volumen y el de superficie, y es muy amigable diseñar así los dispositivos MEMS y contar con esta nueva opción.

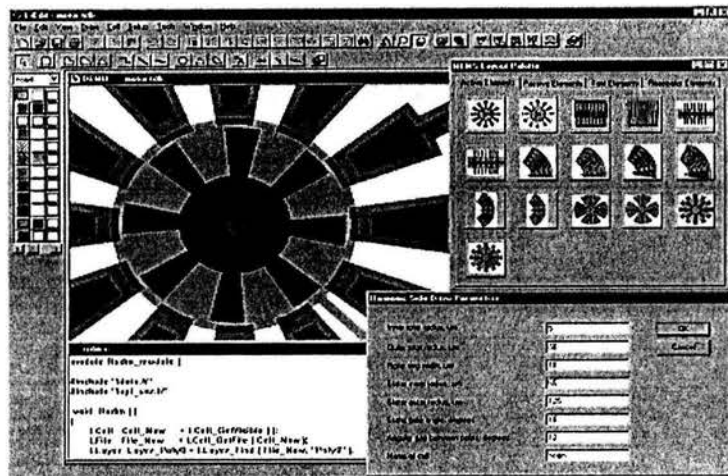


Fig. 4.5 Ambiente de trabajo MemsPro

4.4.2 Intellisuite

El software Intellisuite fue desarrollado por Corning Intellisense y considero que es uno de los más completos y amigables. Fue diseñado de una forma en la que el diseño, la simulación y optimización de MEMS se da de una manera óptima y con muchas capacidades de seguir creciendo.

Intellisuite empieza primero con un diseño del proceso y no de la geometría del dispositivo, lo que demuestra que la geometría del dispositivo y su comportamiento son resultado de ciertas condiciones del proceso. Además, dentro de las ventajas de este software están el hecho de que puede optimizar el diseño, reduce los tiempos y ahorra costos debido a que incorpora muchas funcionalidades y analiza toda la plataforma de fabricación minuciosamente, lo que lo hace una herramienta muy completa en el diseño de MEMS.

Intellisuite cuenta con ciertas etapas de diseño como son:

1. *La simulación del proceso:* El simple hecho de poder simular el proceso de algún diseño nos arroja ciertas ventajas, que nos permite evaluar la geometría, la compatibilidad con la máscara, la eficiencia el proceso de diseño, etc.

2. *Requerimientos de material:* Esta opción tiene la ventaja de permitirnos observar cómo se comporta el material bajo ciertas condiciones, al igual de poder combinar cerca de setenta diferentes elementos que se encuentran en su base de datos.

3. *Simulación de ataque anisotrópico en la oblea de silicio (Anise):* Esta funcionalidad es capaz de predecir los efectos de agentes de ataque como son temperatura y concentración de fuerzas sobre la oblea del silicio, ya que depende mucho del agente que se elija y los planos de orientación de la oblea del silicio para obtener diferentes respuestas de ataque, obteniendo al final una concavidad de diferentes geometrías y profundidades durante todo el proceso de ataque al dispositivo.

4. *Intellimask:* Permite diseñar la máscara que se colocará y servirá de molde, además de que permite conocer el efecto que ésta tendrá al final, así como su manipulación y los diferentes ángulos de visión.

5. *Meshing:* Crea automáticamente una estructura en tercera dimensión (3D) de forma reticulada, donde existe la ventaja de poder realizar refinamientos específicos para su análisis en pequeñas dimensiones y poder analizar comportamientos de presión electrostática, estrés mecánico, fuerzas magnéticas o de flúidos.

6. *Análisis del dispositivo:* Muestra un completo desempeño del dispositivo manufacturado y es aquí donde se decide si se construye físicamente o no.

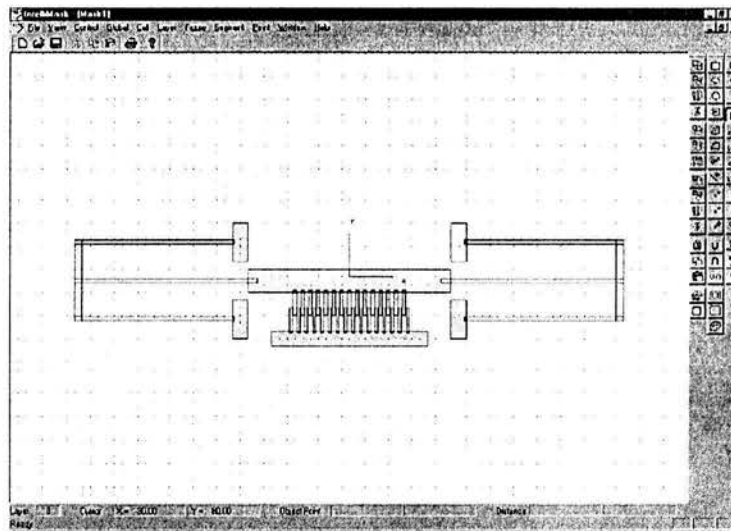


Fig. 4.6 Ambiente de trabajo Intellisuite

Este software es uno de lo más completos en la simulación de MEMS, por todas las etapas con las que cuenta, aunque su eficiencia y aceptación dependerá de nosotros y el de saber aprovechar todas sus herramientas.

4.4.3 Coventor

Este software es desarrollado por CoventorWare el cual está diseñado para realizar procesos muy robustos en cuanto a especificaciones, pues cuenta con una gran variedad de librerías que auxilian a los usuarios en el manejo de este software.

En este proceso de diseño el diseñador debe especificar claramente las características de los materiales, junto con los parámetros de diseño que previamente están cargados en esta paquetería. Aquí también se deben crear las máscaras y para esto se cuenta también con una parte de diseño específica para este proceso, al igual que la etapa de 3D que combina la fase de 2D con la etapa de descripción del proceso.

Por último, se realiza el proceso de análisis de la estructura diseñada utilizando el AutoMesher, que es donde se analizan algunas propiedades como las condiciones de frontera y un análisis más detallado a nivel segmento.

Los resultados se pueden obtener de manera visual con el formato 3D o de manera escrita en un formato de texto.

Cabe señalar que este software es uno de los que tiene mayor capacidad para realizar diseños dentro del área de la óptica, pues cuenta con librerías muy completas para analizar a detalle este tipo de diseños. Además que también se pueden diseñar dispositivos MEMS como interruptores RF, condensadores variables, filtros RF, etc. Creo que Coventor es una herramienta muy poderosa de diseño pues nos ofrece muchas herramientas de diseño que van desde lo más básico a lo complejo, solo depende de lo que queramos construir.

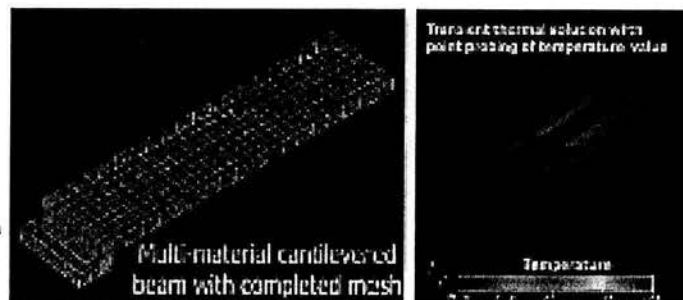
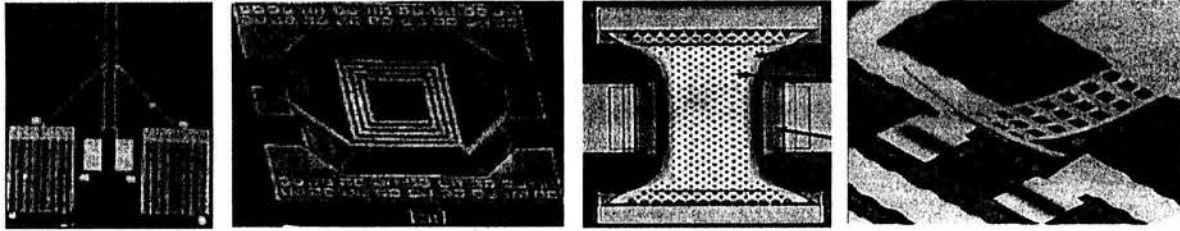


Fig. 4.7 Diseños realizados con Coventor

REFERENCIAS DEL CAPITULO 4

- [1] Larson, E. Lawrence. "Microwave MEMS Technology for Next-Generation Wireless Communications", IEEE, pp. 1073-1076, 1999.
- [2] De los Santos, Hector. "Introduction to Microelectromechanical Microwave Systems" Editorial: Artech House, capítulo 1, pp.1-21, 1999.
- [3] Nadim, Maluf. "An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering". Editorial: Artech House. Capítulo 4. pp. 87-95.2000.



V. Elementos MEMS para RF

En este capítulo se introducirán algunos de los elementos más utilizados en la construcción de los diversos circuitos electrónicos que se utilizan en radiofrecuencia y microondas. Se analizarán los aspectos más importantes de diseño y de desempeño de los dispositivos MEMS para compararlos con los actuales y visualizar la potencialidad e impacto de la tecnología MEMS en el campo de las comunicaciones inalámbricas.

5.1. Inductores

Partiendo de la definición general, un inductor se puede definir como un componente eléctrico pasivo que almacena energía en la forma de un campo magnético. Estructuralmente tiene una forma muy simple, porque consiste de un anillo o una bobina de metal. Su inductancia es directamente proporcional al número de vueltas en la bobina, la cual depende de su radio y del tipo de material del núcleo donde se devana la bobina, como se muestra en la siguiente expresión [2]:

$$L = N^2 \mu_n \frac{\omega_n h_n}{l_n} \quad (5.1)$$

Donde:

| | |
|---|-------------------|
| N : es el número de vueltas de la bobina. | [vueltas] |
| μ : permeabilidad del núcleo. | [H/m] |
| ω_n : radio del núcleo. | [μm] |
| h_n : grosor del alambre. | [μm] |
| l_n : longitud del alambre. | [μm] |

5.1.1. Parámetros de eficiencia en un inductor

Los inductores juegan un papel muy importante en la circuitería de las comunicaciones inalámbricas, debido a la necesidad de contar con etapas de sintonización, de filtrado, de oscilación, de acoplamiento y de mezcla, entre otras, donde se requiere de forma vital el uso de circuitos resonantes ya sea en serie o paralelo.

Antes de continuar con este análisis, es necesario plantear la importancia en todos los procesos de microondas que el transporte de la información se lleve a cabo con las mínimas pérdidas de potencia, sin embargo, esto no ocurre pues durante mucho tiempo hasta la actualidad se ha trabajado con elementos pasivos y con procesos de fabricación que disminuyen por mucho la calidad del dispositivo. Además la señal pasa a través de diferentes etapas y puede presentarse el desacoplamiento de impedancias, además puede existir un fuerte acoplamiento electromagnético entre los elementos cuando éstos se encuentran muy próximos entre sí, tal como se muestra en la Fig. (5.1).



Fig. 5.1.- Placa con los elementos de un transmisor de radio con CI

Fuente: Enciclopedia Encarta

Por todo lo anterior, siempre se debe caracterizar a cualquier elemento que forme parte de un sistema de comunicaciones, por lo tanto en la práctica existe un concepto que se le conoce como *factor de calidad* (Q), que está definido como [2]:

$$Q = 2\pi \frac{\text{Energía Almacenada}}{\text{Energía de Pérdidas}} \quad (5.2)$$

La ecuación (5.2) nos ayuda a caracterizar las pérdidas de potencia y nos indica la calidad que tienen los elementos, pues lo ideal sería no disipar energía en forma de pérdidas, sin embargo en la práctica no es así.

Otro parámetro importante que influye en la calidad de los inductores es la *frecuencia de autoresonancia*, que es un valor que nos indica la frecuencia máxima que el elemento podrá trabajar sin dejar de tener las propiedades que lo caracterizan, es decir, es el valor límite en el cual nuestro dispositivo trabajará como un inductor.

Partiendo de estos dos parámetros de análisis, podemos entender mejor la problemática actual de los elementos, pues obviamente no se obtienen los resultados esperados porque las nuevas necesidades de comunicación demandan altos factores de calidad mayores a 15, con bajas pérdidas, baja potencia de consumo, frecuencias de autoresonancia del orden de 10 GHz y precisiones de inductancia mejores al $\pm 2\%$ [3].

Desgraciadamente los inductores integrados planos fabricados con tecnología CI tienen muchas pérdidas parásitas como resultado de que se encuentran en contacto con el sustrato (dieléctrico) que cuenta con una baja resistividad ocasionando bajas eficiencias que se ven traducidas en pérdidas [1] y cuando se tienen pérdidas altas implica que se tiene una resistividad pequeña, por lo que se busca tener una resistividad en el dieléctrico alta para que las pérdidas sean muy pequeñas y no afecten el desempeño del inductor. Además otra desventaja es la alta permitividad del dieléctrico, que ocasiona un aumento en el valor de las capacitancias parásitas con una consecuente disminución en la frecuencia de autoresonancia.

5.1.2. Una Propuesta de Solución

Muchas técnicas se han desarrollado para reducir las pérdidas del sustrato y elementos parásitos tales como utilizar sustrato de Silicio con una alta resistividad [1] como es el caso de Silicio sobre Zafiro, Silicio sobre vidrio o Cuarzo, por mencionar algunos, o también el de eliminar el sustrato debajo del dispositivo (que ayuda a minimizar las pérdidas del sustrato y capacitancias parásitas) y por último construir un inductor sobre una capa delgada de óxido de Silicio.

Para reducir las pérdidas se propone utilizar técnicas que remuevan el sustrato que soporta a los inductores y para lograr esto se requiere de una construcción en tercera dimensión pues de ese modo se tiene un mejor desempeño al disminuir los efectos negativos que se tienen al contacto con el sustrato. Debido a estas consideraciones, MEMS utiliza varios métodos de fabricación, pero en este caso los procesos de micromaquinado de volumen y superficie cubren las necesidades de diseño de los nuevos inductores MEMS.

En el caso que se diseñen inductores con cavidades, se pretende aumentar la resistividad del dieléctrico y reducir las capacitancias parásitas entre el inductor y el sustrato de Silicio, para entonces poder incrementar el factor de calidad y la frecuencia de autoresonancia.

Otro punto importante en la reducción de pérdidas es la elección de los materiales, como es el caso del polisilicio que por sus propiedades intrínsecas se eligió como un material estructural de soporte, debido a que es un material rígido que puede soportar fuertes vibraciones de manejo y en segundo lugar que es muy flexible, lo que facilita la construcción de estructuras complejas como las del inductor [1].

5.1.3. Fabricación de un Inductor Elevado MEMS

Partiendo de la oblea de Silicio como base para construir un inductor, se coloca una delgada capa de Nitrato de Silicio (SiN) sobre la oblea de Silicio, que en este caso funciona como una capa aislante. Después se trazan las cavidades que serán formadas mediante una máscara y un agente que atacará la cavidad por un químico para lograr

una profundidad de aproximadamente 30 μm , cabe señalar que después de ciertos estudios realizados por el Dr. Hongrui [1] se estableció que a esta profundidad se disminuyen por mucho las capacitancias parásitas después de haber simulado diferentes niveles de profundidad, por lo que ésta es la más eficiente.

Ya formada la cavidad se llena mediante oxidación térmica para posteriormente hacer de nuevo una nueva deposición pero de óxido de Silicio con la finalidad de sellar toda la estructura y que no quede ningún resto abierto de grietas antes de realizar la etapa de pulido mediante procesos mecánico-químicos que nos ayudan a aplanar la superficie que se ha construido [2].

El siguiente paso es crear el inductor elevado, pues hasta el momento solo se ha construido el soporte y la cavidad, para este paso es necesario utilizar las técnicas de micromaquinado MEMS, en el caso específico de este diseño, se utilizó la de micromaquinado de superficie (por la facilidad que presenta al remover las capas sacrificiales), para lo cual se eligió como capa sacrificial al óxido de Silicio que anteriormente fue depositado como se mencionó en el proceso.

El diseño del inductor es rectangular porque como se ha estudiado [1] es una estructura fácil de analizar y previamente se han estudiado diferentes estructuras basadas en el comportamiento de la corriente y otras consideraciones, por lo cual la espira del inductor tiene esta forma.

La etapa final del micromaquinado de superficie que formó al inductor elevado, se realizó mediante dos capas, cada una hecha de polisilicio. Posteriormente se agrega ácido hidrofúorídrico (HF) para remover la capa de sacrificio para que finalmente se libere el inductor de cualquier contacto con la superficie y quede elevado sobre la cavidad de 30 μm .

Finalmente el encapsulado de Cobre se lleva a cabo en la parte final del proceso de fabricación, a temperaturas bajas del orden de 55 $^{\circ}\text{C}$ a 88 $^{\circ}\text{C}$ [1], aunque cabe resaltar que este baño de Cobre es selectivo y solo se adhiere a todo lo que quede expuesto del Silicio y de las estructuras de polisilicio, dejando áreas de óxido de Silicio y Nitrato de Silicio sin bañar.

Para el proceso de encapsulado se debe mojar previamente a la estructura con una sustancia activa para remover el óxido natural de la superficie de Silicio y posteriormente se cubre con una capa de Paladio (Pd) para exponer el Silicio y las estructuras de polisilicio para posteriormente ser bañadas con el Cobre, tal como se muestra en la Fig. (5.2).

Los procesos para construir inductores con la técnica de micromaquinado de superficie son muy eficientes, al construir dos etapas de micromaquinado suspendido sobre la cavidad, se logra obtener un mejor desempeño en los parámetros del inductor al utilizar esta tecnología.

Se mejoró y perfeccionó el manejo de las estructuras que forman el inductor, pues se logró mediante un baño de Cobre tener bajas resistencias a lo largo del alambre, además de contar con una buena tierra para radiofrecuencias y blindaje eléctrico y magnético. Con la cavidad se disminuyeron los problemas de acoplamiento electromagnético y capacitancias parásitas entre el inductor y el sustrato de Silicio.

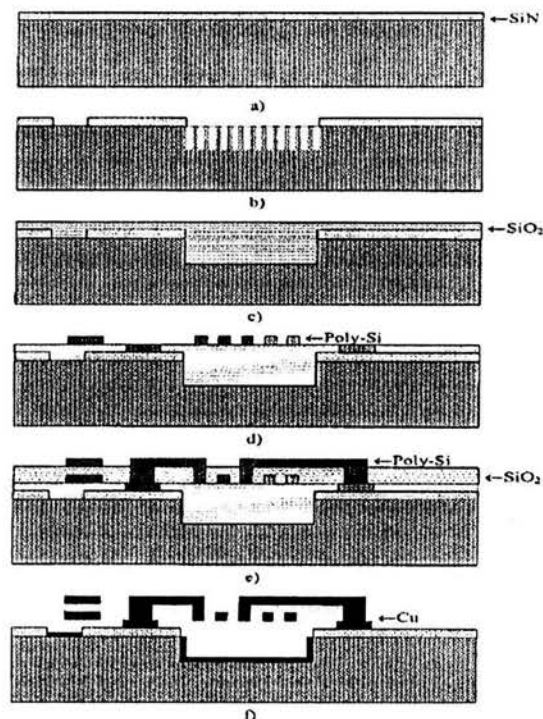
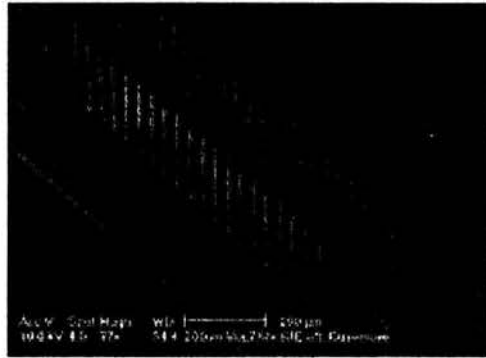
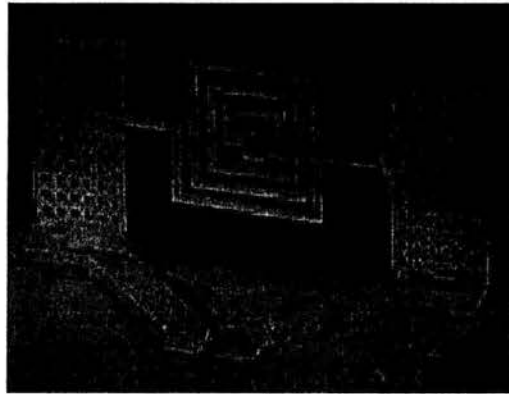


Fig. (5.2).- Esquema de los procesos de la fabricación del inductor MEMS elevado: a) Deposición de la capa de SiN; b) proceso de ataque del sustrato y formación de las capas sacrificiales; c) depósito de la ligera capa de SiO₂; d) se coloca la primera capa de la técnica de micromaquinado de superficie; e) se coloca la segunda capa de micromaquinado del inductor; f) deposición de los ácidos que remueven las capas sacrificiales.



Inductor de Auto-Ensamblado



5.2. Capacitor

El capacitor se puede definir como un componente eléctrico que tiene la habilidad de almacenar energía en forma de campo eléctrico. A dicha habilidad se le conoce como capacitancia, así que cuanto mayor sea la misma, mayor es la magnitud de cantidad de energía almacenada.

Un capacitor tiene una geometría muy sencilla, pues solo está formado por dos placas paralelas separadas a una distancia d (Fig. 5.2.1), dentro de las placas paralelas se tiene un dieléctrico que puede ser de cualquier material: aire, plástico, polietileno, unicel, etc., lo que va a diferir de uno a otro es el valor de la permitividad del material y en consecuencia se verá afectado el valor de su capacitancia. La capacitancia se define como:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1)$$

Donde:

| | |
|--|-------------------|
| C = capacitancia del capacitor | [F] |
| ϵ = permitividad del material | [F/m] |
| A = área de las placas paralelas | [m ²] |
| d = distancia entre las placas | [m] |

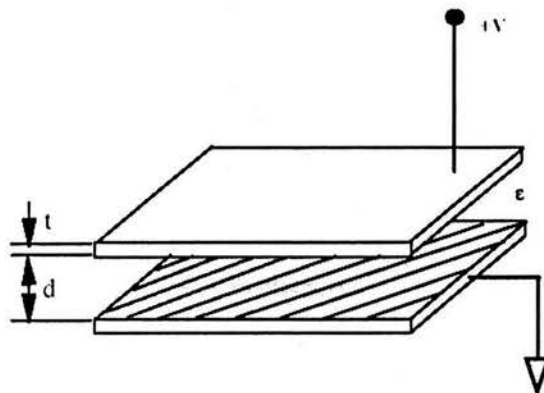


Fig. 5.2.1.- Capacitor de placas paralelas.

El objetivo principal de implementar un capacitor con tecnología MEMS se debe a que los sistemas de comunicación actual demandan portabilidad y movilidad lo que nos lleva a pensar en componentes en un mismo circuito, que ocupen poco espacio para así agregar mayores funcionalidades al sistema.

5.2.1. Problemática actual de diseño

En la actualidad, en los sistemas de comunicación en su etapa de sintonización, se utilizan osciladores con inductores discretos y diodos varactores para seleccionar la frecuencia deseada. La desventaja de este proceso es que los elementos se encuentran fuera del CI, así como el material del que están hechos difiere del integrado, lo que nos limita a no tener una integración completa y por consecuencia, al tener ciertos elementos fuera, se incrementan los costos, el tamaño y la complejidad de ensamblaje del circuito [4].

Una problemática actual es que hasta ahora no se cuenta con capacitores variables, debido a la dificultad de mover dinámicamente las placas paralelas del capacitor, pero con la tecnología MEMS se han podido implementar capacitores variables al poder modificar mediante los diferentes mecanismos de actuación la distancia entre sus placas.

5.2.2. Una propuesta de solución

Gracias a la potencialidad de la tecnología MEMS, ahora es posible diseñar capacitores sintonizables con altos factores de calidad fácilmente integrables a osciladores controlados por voltaje (VCOs), mallas de fase encadenadas (PLL) y otros circuitos de RF [5].

Este diseño se puede llevar a cabo porque este capacitor con alta Q está controlado por el movimiento de sus placas paralelas (dependiendo el diseño puede ser una, dos o tres) [4][5][6], ya que al modificar la distancia entre ellas, se puede obtener un valor de capacitancia variable a diferencia de los capacitores que tienen una distancia fija entre sus placas.

Además para el diseño de cualquier capacitor, la actuación se presenta como factor clave en la excitación de los elementos, debido a que establece los intervalos de operación del dispositivo y sus características de operación.

La actuación electrostática en los capacitores variables es muy utilizada y podría decirse que es la más común porque cuenta con una respuesta más rápida a la de los actuadores térmicos. En el caso de la actuación electrostática lo que se controla es el voltaje y no la temperatura, lo que ocasiona que no se tenga que esperar un cierto tiempo para que reaccione el capacitor, debido a que un sistema eléctrico es mucho más rápido que un sistema térmico. Sin embargo, la desventaja de la actuación electrostática es que se tienen solo ciertos intervalos de operación, es decir, cuando se diseñan capacitores variables con dos placas paralelas, teóricamente el rango de sintonización se encuentra limitado al 50% [5] porque después de cierto valor de voltaje, la placa móvil no se podrá restablecer normalmente como cuando se tiene un voltaje nulo (Fig. 5.2.2) , debido a que después de cierto voltaje máximo, las placas se colapsarían ocasionando que deje de funcionar como capacitor .

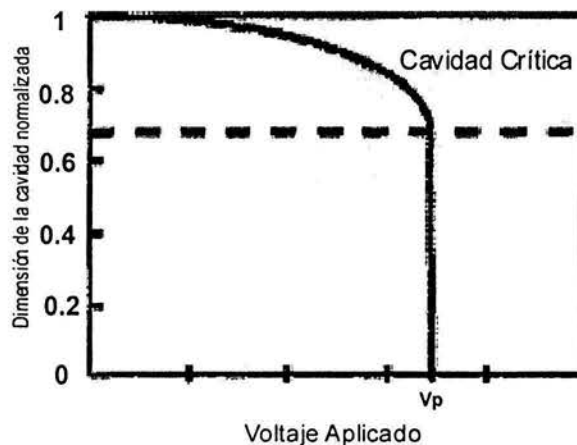


Fig. 5.2.2. Comportamiento de la cavidad con respecto al voltaje de actuación.

Otra desventaja de la actuación electrostática es que no puede tener cambios de voltaje tan finos como la actuación térmica, pues en la actuación térmica podemos tener diferentes resoluciones para variar el espacio entre las placas que van desde 2 a $0.2 \mu\text{m}$ [6].

Con las ventajas que ofrecen ambas actuaciones podemos fabricar capacitores con altos grados de calidad, la elección de una sobre la otra dependerá del mismo diseño y de la necesidad del tiempo de respuesta así como de la sensibilidad al abrir las placas del capacitor.

5.2.3. Capacitor variable con tecnología MEMS

Este capacitor consiste en un plato delgado de aluminio de 200 por 200 μm , suspendido en el aire aproximadamente a 1.5 μm de la capa de aluminio que se encuentra en el centro del diseño, anclado a cuatro vigas mecánicas como suspensión. El aluminio es utilizado como material estructural porque tiene una resistencia baja, lo que se ve reflejado en su factor de calidad [5].

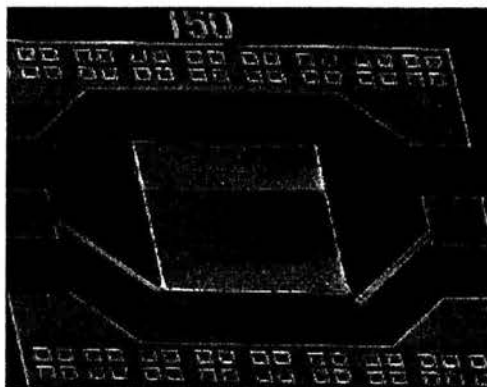
Cuando se le aplica un voltaje de DC a través del capacitor, se produce una fuerza electrostática que hace que pueda subir y bajar el plato suspendido, ocasionando con esto la variación de la abertura entre las placas, como se muestra en la Fig. (5.2.1) [5].

Podemos observar que en este elemento también se presentan las capacitancias parásitas, como en el inductor, debido al sustrato, en el caso específico de este diseño se manifiestan entre la parte superior y la placa inferior de capacitor y el sustrato, los valores de capacitancias son del orden de 220 y 360 fF, lo que causa que se reduzca el intervalo de sintonización y bajar el factor de calidad.

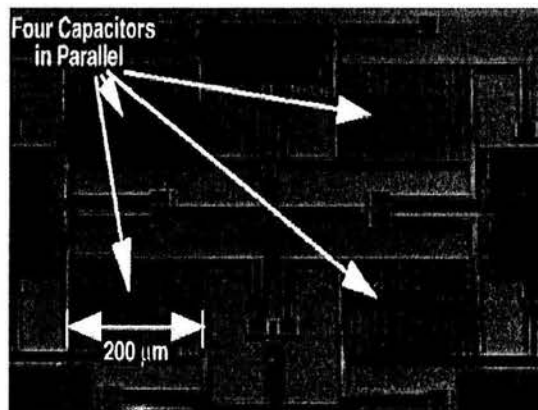
Una forma de disminuir esta desventaja es, con una capa de óxido de 4 μm depositada directamente sobre el sustrato de silicio, que funcionaría como una capa aislante entre el aluminio y el sustrato y en consecuencia reduciría las capacitancias parásitas, así como el aluminio que protegería a los elementos parásitos del sustrato, asegurando un alto factor de calidad.

5.2.4. Tipos de Capacitores con Tecnología MEMS

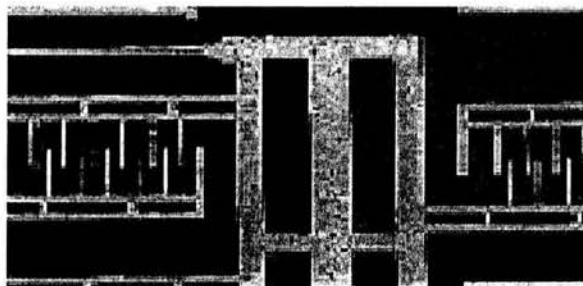
Capacitor MIM



Capacitores MIM en paralelo



Capacitor Variable MEM



5.3 Interruptor

El principio de operación de los interruptores MEMS es muy sencillo, ya que utiliza solo el movimiento mecánico para realizar un corto circuito o un circuito abierto en una línea de transmisión de RF. Las fuerzas que se utilizan para lograr un movimiento mecánico son: la electrostática, la magnetostática, la piezoeléctrica ó la térmica. Pero en donde se han encontrado mejores resultados de desempeño son en la actuación electrostática [7], pues se han obtenido 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 [7].

Cabe mencionar las ventajas que los interruptores MEMS ofrecen sobre los diodos p-i-n y los interruptores a FET para así tener claras las posibilidades de aplicación en el área de las comunicaciones inalámbricas [7] [8]:

- **Potencia de consumo cercana a cero:** Cuando se utiliza la actuación electrostática se requieren rangos de voltajes de 20 a 80 volts, sin embargo prácticamente no se consume corriente, por lo que la potencia disipada es muy pequeña.
- **Buena capacidad de aislamiento:** Los interruptores MEMS son por lo general fabricados con aberturas de aire, por consiguiente se logran bajos niveles de capacitancia (2-4 fF) [7] dando como resultado que tengan buen aislamiento a frecuencias de 0.1 a 40 GHz.
- **Bajas pérdidas de inserción:** Los interruptores MEMS son los que tienen las menores pérdidas de inserción en todo el mercado, pues se encuentran en el intervalo de 0.1 dB a frecuencias de 40 GHz.
- **Baja intermodulación:** Se consideran dispositivos muy lineales y su desempeño es del orden de -30 dB en comparación con los diodos p-i-n e interruptores a FET.

- **Bajo costo:** Debido a que estos interruptores MEMS son fabricados utilizando la técnica de micromaquinado de superficie, se pueden construir utilizando cuarzo, pirex, silicio con alta resistividad y sustrato de arseniuro de Galio GaAs.

Sin embargo los interruptores MEMS cuentan con ciertas desventajas que vale la pena señalar [7]:

- **Velocidad de respuesta relativamente baja:** La velocidad de respuesta de estos interruptores es del orden de 2 a 40 μs , por lo que se ven limitados en ciertas aplicaciones.
- **Limitada potencia de manejo:** Los interruptores MEMS no pueden manejar potencias mayores del orden de 50 mW.
- **Empaquetado:** Los interruptores MEMS necesitan ser empaquetados para su consumo de manera muy específica, pues requieren de atmósferas inertes (nitrógeno, argón, etc.) así como bajos niveles de humedad, por lo que se requiere mucha calidad en el sellado para que se encuentre todo herméticamente cerrado. Debido a estas consideraciones se requieren de altos costos de fabricación en el proceso final de empaquetado para no afectar el desempeño del interruptor.

5.3.1. Tipos de interruptores comúnmente usados con MEMS

Existen dos tipos de interruptores que se utilizan mucho con la tecnología MEMS, donde la principal diferencia se da en el modo de actuación. En el interruptor de membrana capacitivo (Fig. 5.3.2), la actuación se da en el plano que está perpendicular a la línea de transmisión, mientras que la actuación del tipo cantiliver ocurre en el mismo plano de la línea de transmisión como se muestra en la Fig. 5.3.1:

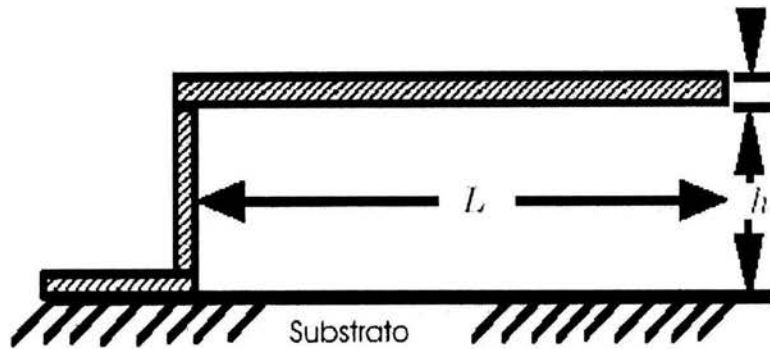


Fig. 5.3.1.- Cantiliver típico sencillo



Fig. 5.3.2.- Interruptor perpendicular a la línea de transmisión de la señal con membrana

Como vemos la principal diferencia entre ambos diseños se presenta en la forma en que la señal de RF viaja por la línea de transmisión por lo tanto, para ambos diseños se deben considerar diferentes tipos de material. Debido a esta consideración, los interruptores en forma de viga, como el caso del cantiliver, se fabrican utilizando metales delgados como son: Aluminio, Plata, Oro, etc. También algunas veces se necesita un dieléctrico dependiendo del diseño en particular.

Una forma también de medir el desempeño de los interruptores electrónicos es por medio de su frecuencia de corte, que aunque no representa la frecuencia a la que el interruptor va a operar nos da una figura de mérito de comparación para dispositivos que operen a frecuencias del orden de 20 GHz, como se muestra en la tabla 5.1 [8]:

| Device Type | R_{on} (ohms) | C_{off} (fF) | FOM-Cutoff Freq. (GHz) |
|---------------------------|-----------------|----------------|------------------------|
| GaAs MESFET | 2.3 | 249 | 280 |
| GaAs pHEMT | 4.7 | 80 | 420 |
| GaAs p-i-n Diode | 5.6 | 420 | 730 |
| Metal Membrane Capacitive | 0.4 | 35 | 9000 |

Tabla 5.1. Comparación de desempeño entre interruptores

Como podemos apreciar en esta tabla se ve claramente que los interruptores MEMS poseen un gran potencial comparados con los demás dispositivos, pues además se ha demostrado que operan con muy bajas pérdidas [8].

5.3.2. Operación del Interruptor capacitivo con membrana

El interruptor capacitivo tiene una membrana con dimensiones aproximadas de 120 μm de ancho por 280 μm de longitud. El interruptor consiste de una membrana metálica suspendida sobre un dieléctrico colocado en el centro del interruptor, por encima de un electrodo. Ahora, cuando se aplica una diferencia de potencial existe una atracción electrostática entre la membrana y el electrodo, lo que hace que la membrana se deflece al centro acercándose cada vez más al dieléctrico [8]. El dieléctrico en este diseño sirve para prevenir ciertas pegosidades (stiction) entre ambas placas metálicas pues como hemos comentado a lo largo de este trabajo, este fenómeno disminuye el tiempo de vida de los dispositivos (Fig. 5.3.3) y (Fig. 5.3.3^a).

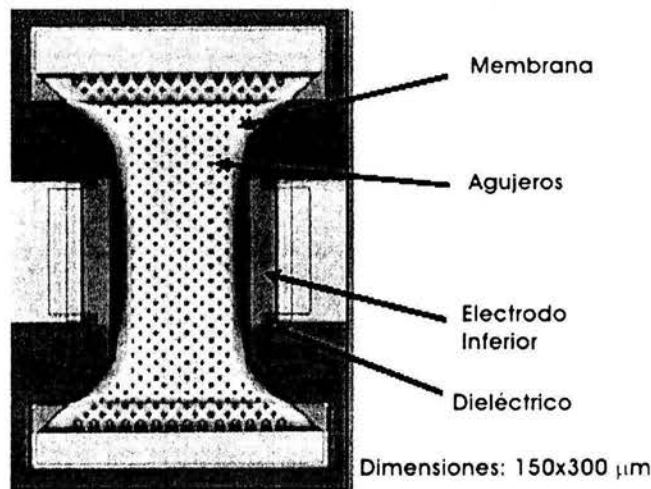


Fig. 5.3.3 Interruptor con membrana vista superior

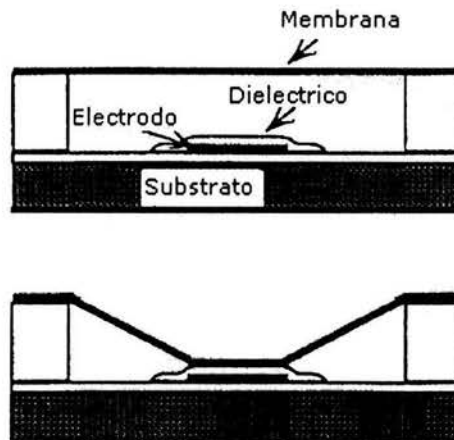


Fig. 5.3.3ª. Interruptor con membrana vista de perfil.

Cuando no se aplica un voltaje, la membrana se encuentra sin actuar, por lo que la capacitancia que se presenta es sumamente baja y se encuentra expresada por:

$$C_{off} = \frac{1}{\frac{h_D}{\epsilon_D A} + \frac{h_a}{\epsilon_0 A}} \quad (5.3.1)$$

Donde:

| | |
|--|-------------------|
| C_{off} = capacitancia en el interruptor en estado abierto | [fF] |
| ϵ_D = permitividad del dieléctrico | [F/m] |
| ϵ_0 = permitividad del aire | [F/m] |
| h_D = espesor del dieléctrico | [μm] |
| h_a = espacio entre la membrana y el dieléctrico en modo abierto | [μm] |
| A = área de la membrana suspendida | [μm] |

Donde la capacitancia en estado abierto es del orden de unos cuantos femtofarads. Pero cuando se aplica una diferencia de potencial, entonces el metal-dieléctrico-metal se juntan y se incrementa por mucho la capacitancia entre ellas, como se describe en la siguiente ecuación que describe el valor de capacitancia en el estado cerrado:

$$C_{on} = \frac{\epsilon_D A}{h_D} \quad (5.3.2)$$

Donde:

| | |
|---|-------------------|
| C_{on} = capacitancia en modo cerrado | [pF} |
| ϵ_D = permitividad del dieléctrico | [F/m] |
| A = área de la membrana suspendida | [μm] |
| h_D = espesor del dieléctrico | [μm] |

Los valores de capacitancia cuando el interruptor se cierra son regularmente de 3 a 4 pF [8] por lo que puede apreciarse el incremento del valor de su capacitancia. Cabe señalar que cuando la reactancia capacitiva es muy grande entonces el interruptor está abierto por la alta impedancia y cuando es muy pequeña (casi un corto para altas frecuencias) el interruptor se encuentra cerrado, y de esa forma se aseguran las condiciones del interruptor abierto y cerrado.

Cuando se caracterizó este interruptor de membrana se obtuvieron resultados aproximados de 0.15 dB de pérdidas de inserción a una frecuencia de 10 GHz y de 0.28 dB a 35 GHz [8]. Estas bajas pérdidas de inserción demuestran que las pérdidas óhmicas en el conductor (metal) comparadas con los diodos p-i-n y FET son por mucho menores y además poseen una excelente impedancia de acoplamiento de 50 ohms con pérdidas de retorno mejores a -15 dB a frecuencias menores a los 40 GHz. Las pérdidas de inserción y de retorno que caracterizan a este interruptor específico se muestran a continuación en la Fig. (5.3.4) y Fig. (5.3.4^a) [8][7].:

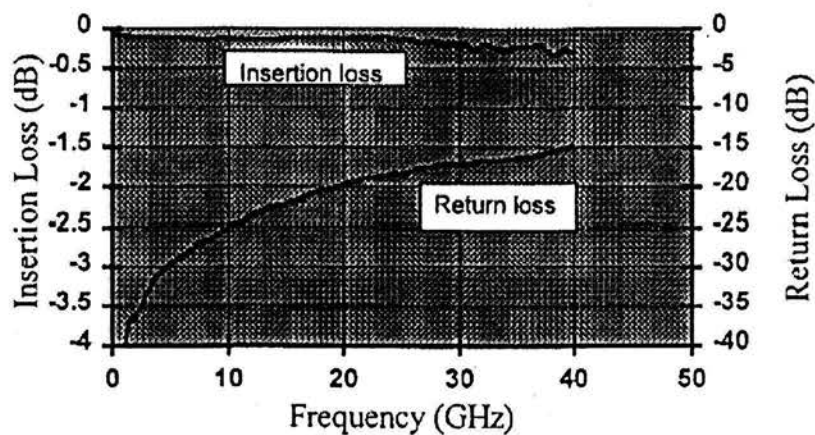


Fig. 5.3.4 Pérdidas de inserción y de retorno del interruptor

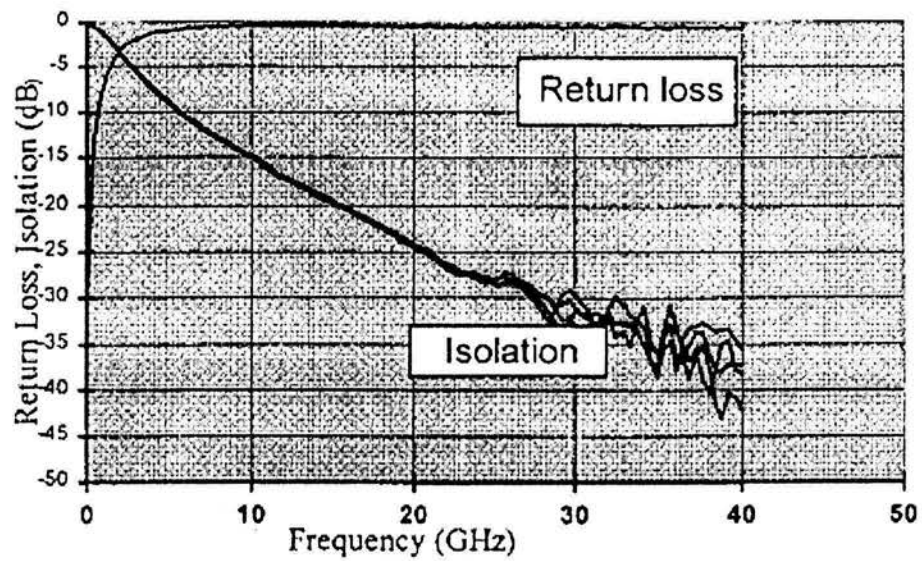


Fig. 5.3.4a. Pérdidas de retorno y de aislamiento

También podemos observar en la siguiente gráfica Fig. (5.3.5) el tiempo de respuesta de este interruptor de membrana que como sabemos no es muy rápido para ciertas aplicaciones.

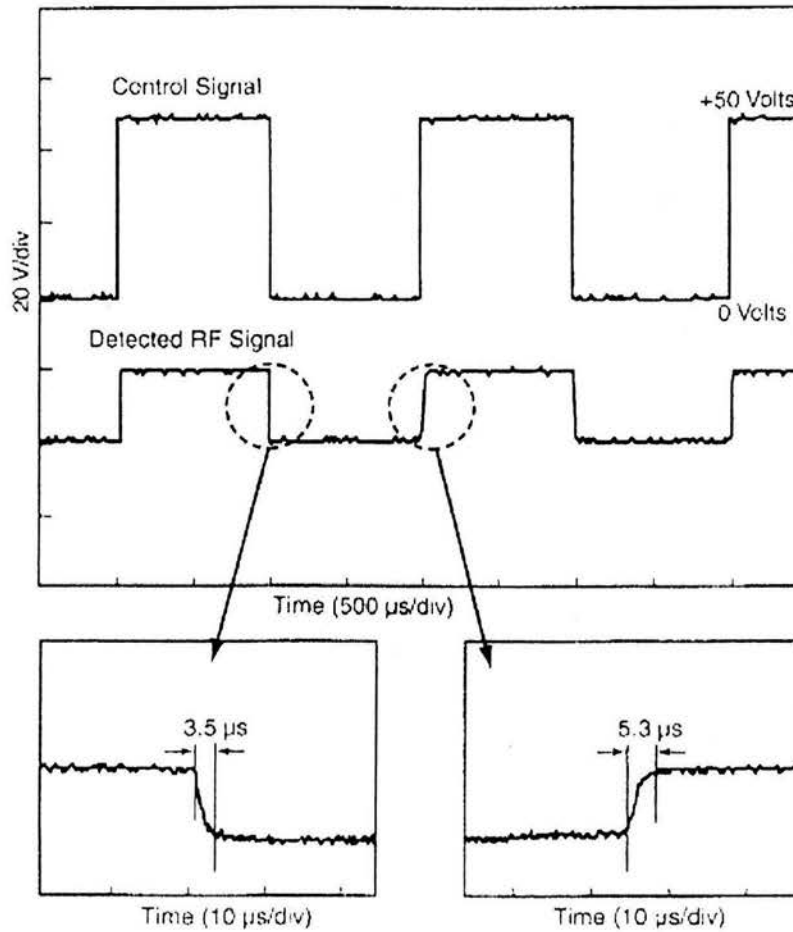
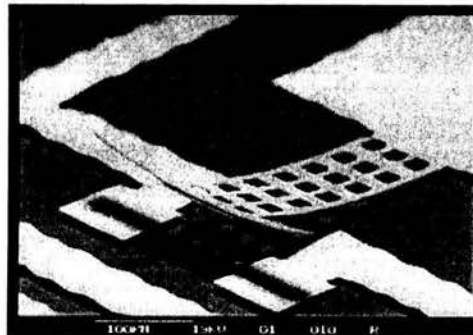


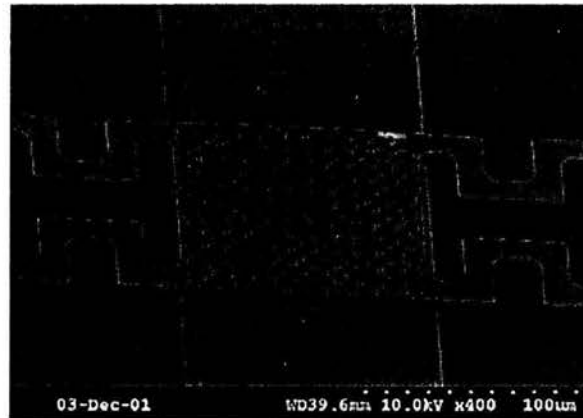
Fig. 5.3.5 Tiempos de respuesta del interruptor

5.3.3. Tipos de interruptores con fabricación MEMS

Interruptor de tipo Membrana



Interruptor de tipo membrana con 4 soportes



Interruptor reconfigurable para un sistema de antenas



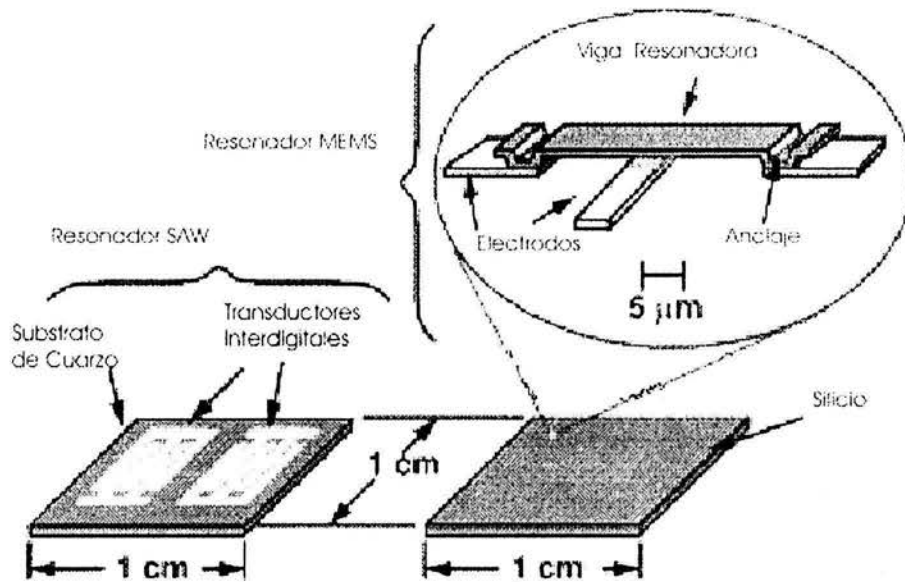


Fig. 5.4.2. MEMS ofrece mayores factores de calidad Q con dimensiones menores en su tamaño

Partiendo de la idea de que existe un gran número de estructuras resonantes, el autor Nguyen [10] menciona que se han investigado y estudiado tres tipos de resonadores: el primero es el resonador de dos vigas (clamped-clamped) [11], el segundo es el resonador libre-libre [12] y el tercero el resonador de contorno de disco [13].

Antes de describirlos cabe mencionar algunas de las especificaciones principales que se deben considerar para elaborar un diseño de resonador, solo hago mención a dos, porque las demás son de carácter intrínseco, como es su temperatura, rigidez del material, dimensiones, etc.:

- *Frecuencia Central:* es la frecuencia de resonancia del modo fundamental.
- *Factor de Calidad (Q)*

5.4.1. Descripción de la operación del resonador MEMS (Clamped-Clamped)

Este resonador consiste en un doble soporte tipo viga, comúnmente llamado cantiliver, colocado sobre el centro de un electrodo. La viga tiene una cierta longitud L , una anchura W_r , y un grosor h , además está hecho de un material con un módulo de Young

E y una densidad de masa ρ . El centro del electrodo tiene también cierta anchura W_e y está separado de la viga por un hueco a una distancia d [9] [10] tal como se muestra en la Fig. (5.4.3).

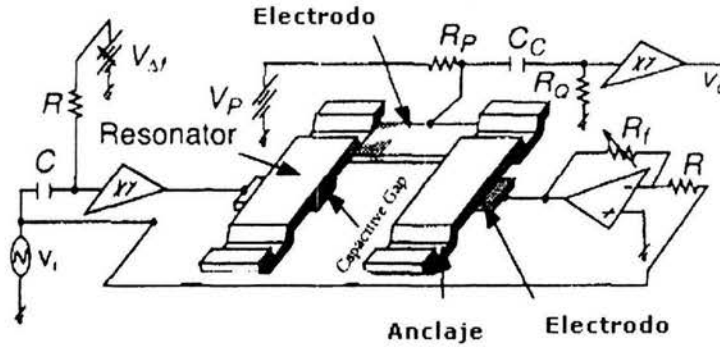


Fig. 5.4.3. Resonador dos vigas MEMS

Cuando se pone en operación el resonador, entonces en una entrada se aplica un voltaje de DC (V_p) y en la otra entrada un voltaje de AC (V_i), ambos a través del capacitor. La capacitancia está definida por la cavidad entre la viga y el electrodo a una distancia d_0 por:

$$C = \epsilon_0 W_r W_e / d_0 \quad (5.4.1)$$

Posteriormente se induce una fuerza electrostática sobre la viga

$$f_e = V_p \frac{\partial C}{\partial x} v_i \quad (5.4.2)$$

lo que provoca que ésta vibre verticalmente, logrando tener un desplazamiento medible x . El cambio que sufre el resonador se mide a través de la capacitancia por unidad de desplazamiento que se detectó en el resonador dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{W_r W_e}{d^2_0} \quad (5.4.3)$$

El desplazamiento que sufrió la viga, en respuesta de V_i , induce una corriente capacitiva expresada por:

$$i_x = V_p \frac{\partial C}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (5.4.4)$$

y es muy grande cuando la frecuencia de excitación es cercana a la frecuencia de resonancia mecánica de la viga, expresada por:

$$f_i = 1.03k \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{h}{L_r^2} \quad (5.4.5)$$

donde k es de escalamiento que modela el efecto de topografía de superficie (por ejemplo, al colocar los agarres y su correspondiente elasticidad que deberán tener)[9]. En general, la frecuencia de resonancia de este resonador se verá afectada por la magnitud del voltaje de polarización V_p como se indica a continuación:

$$f_0 = f_i \sqrt{1 - \frac{k_r}{k_m}} = f_i \sqrt{1 - g(d, V_p)} \quad (5.4.5)$$

donde g modela el efecto de rigidez eléctrica [9]. Además se muestra claramente que la frecuencia de resonancia está en dependencia del voltaje V_p al igual que la frecuencia de resonancia, el factor de calidad también se verá afectado al estar en función de V_p [9].

Después de analizar los tres tipos de resonadores, aunque en el presente trabajo solo se describa el funcionamiento de uno de ellos, señalaré las principales características, así como sus ventajas y desventajas [9][10].

En el caso del resonador de dos vigas se lograron obtener frecuencias del orden de 8 MHz [9] [11] y tiene la particularidad de ser capaz de alcanzar altos rangos de rigidez, que es muy importante en la aplicación de las comunicaciones porque hace posible que se tenga un alto rango dinámico, así como el manejo de potencia [9]. Desafortunadamente este tipo de resonadores sufren de disipación de energía a través del sustrato que está en contacto con sus anclajes tal como se muestra en la Fig. (5.4.4).

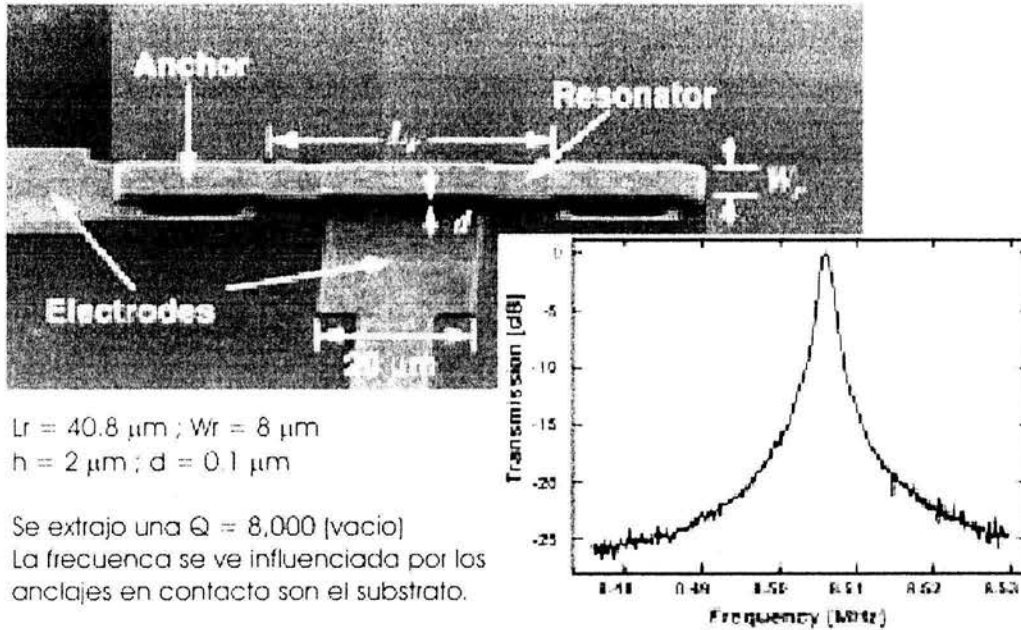


Fig. 5.4.4.- Desempeño del resonador con anclaje

Para contrarrestar esta limitación se desarrolló el resonador con vigas libres, que ha demostrado obtener frecuencias mayores a 92 MHz [9][12], debido a que la estructura del mismo cuenta con una viga suspendida por cuatro pequeñas vigas delgadas, donde cada una de estas cuatro vigas está anclada al sustrato por otro anclaje rígido. Además las vigas tienen una longitud de un cuarto de longitud de onda, lo que hace que ellas presenten una alta impedancia acústica en el punto donde se encuentra la viga resonante principal. Esto significa que muy poca energía acústica se podrá propagar a través de las vigas de soporte al sustrato, dando como resultado un valor de factor de calidad bastante alto. [9]. A diferencia del resonador con dos vigas ancladas al sustrato, en este diseño se pueden obtener valores mejores de Q a altas frecuencias [9][13], tal como se muestra en la Fig. (5.4.5).

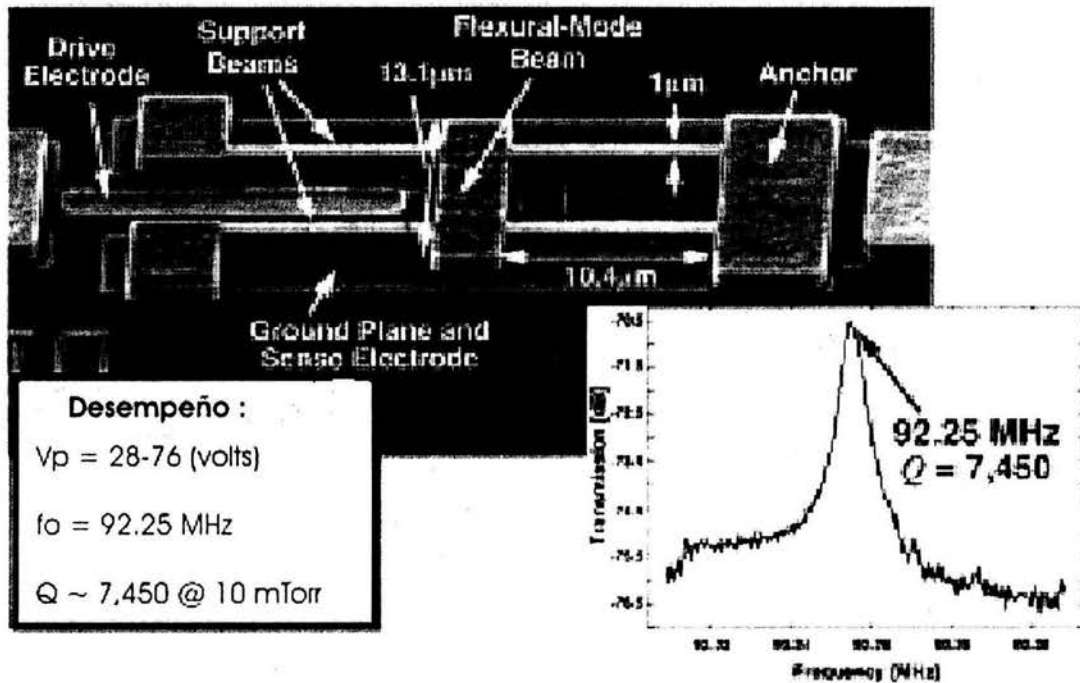


Fig. 5.4.5.- Desempeño del resonador MEMS

Al analizar el desempeño de ambos resonadores [9][10][11][12], cabe mencionar que ambos cuentan con una desventaja muy notable, y se debe cuando se tratan de alcanzar frecuencias mayores a 92 MHz con altos factores de calidad, pues después de esta frecuencia las dimensiones resultan ser demasiado pequeñas. Por lo tanto, el tercer resonador de estudio conocido como de modo disco soluciona la problemática de las dimensiones, pues ha demostrado obtener desempeños mayores a 156 MHz con un Q de 9400 y lo más importante es que mantiene sus dimensiones grandes sin la necesidad de ser modificadas [9][13].

Por último, quiero mencionar que existen muchos tipos de resonadores con tecnología MEMS, pero los principales o los que han demostrado tener buen impacto en el mercado son estos tres que anteriormente mencioné, por lo que a continuación se muestra una tabla comparativa acerca del desempeño y las limitantes de cada uno [10]:

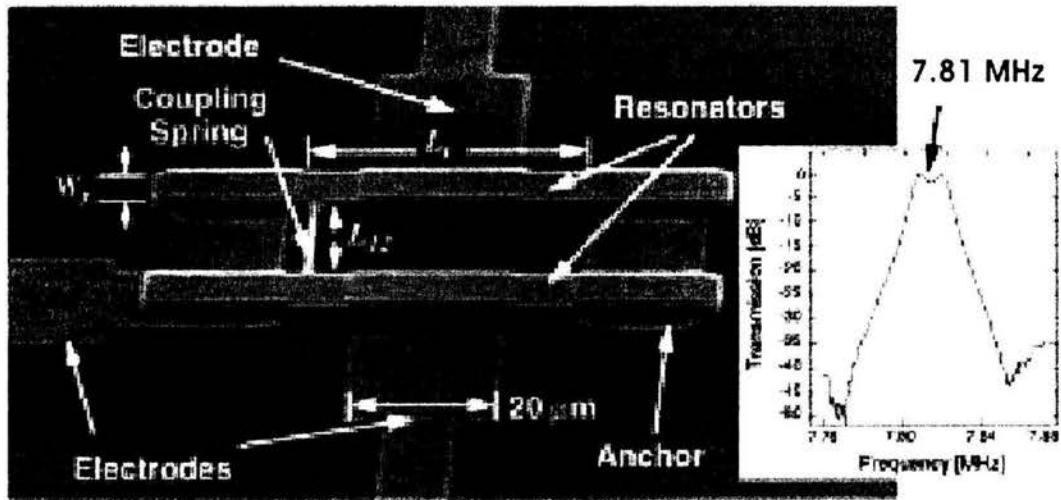
| DISPOSITIVO | DESEMPEÑO | APLICACIONES |
|--|--|--|
| Resonador dos vigas con anclaje | Demostrado: $Q \sim 8000$ @ 10MHz $Q \sim 300$ @ 70MHz (por la disipación) Q cae con la frecuencia, está limitado Resistencia en serie: $R \sim 50-5000$ ohms | En osciladores Filtros HF-VHF Filtros-Mezcladores HF-VHF |
| Resonador suspendido | Demostrado: $Q \sim 8000$ de 10-100MHz No cae Q con la frecuencia Rango de frecuencia: >1GHz; ilimitado escalable a altos modos Resistencia en serie: $R \sim 50-5000$ ohms | En osciladores Filtros HF-UHF Filtros-Mezcladores HF-UHF Banda Ka |
| Resonador modo disco | Demostrado: $Q \sim 10000$ @ 156 MHz No sufre perdidas de disipacion Rango de frecuencia: >1GHz; ilimitado escalable a altos modos Resistencia en serie: $R \sim 50-5000$ ohms | En osciladores Filtro VHF-S Filtro-Mezcladores VHF-S Banda Ka |

Tabla 5.4.1: Comparación de los resonadores MEMS más usados en comunicaciones
 Fuente: RF MEMS for wireles applications

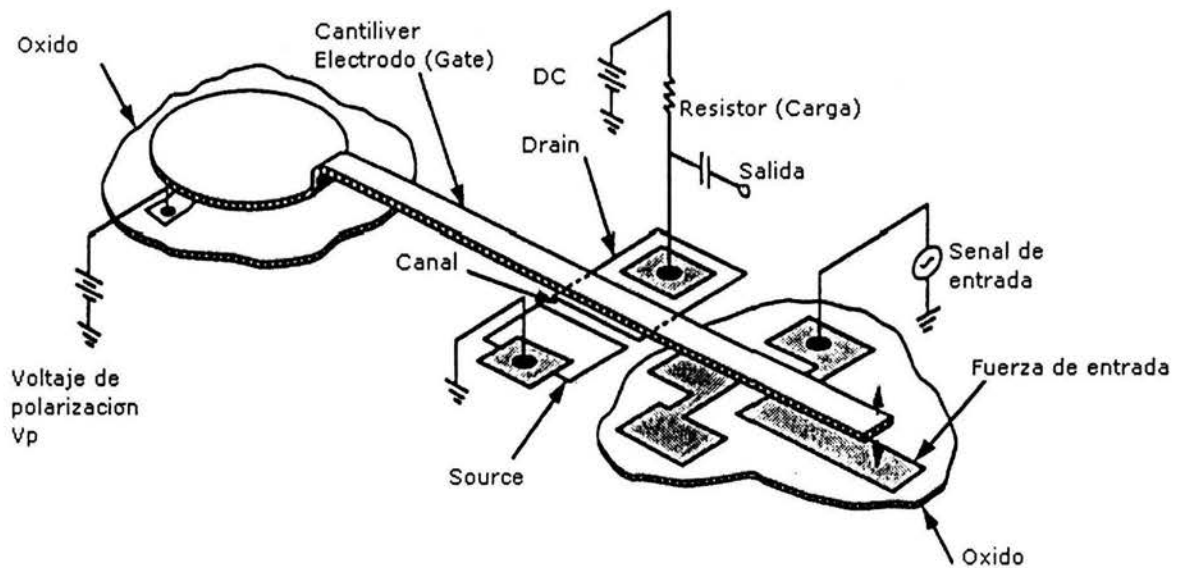
En conclusión, muchas ventajas en el desempeño de los nuevos sistemas de comunicación se deberán en gran parte al avance en el desarrollo de resonadores MEMS, pues presentan muchas ventajas sobre los actuales, pues gracias a su pequeñas dimensiones son capaces de estar incluidos muchos de ellos dentro de un solo circuito, además tienen un mejor desempeño que los anteriores como el tipo SAW, ya que se reduce la gran cantidad de potencia de consumo y en general proveen a los sistemas de transmisión y recepción la facilidad de tener un mayor rango de selectividad en sus frecuencias con altos valores de calidad, aunque cabe señalar que esto solo es el inicio, pues falta mucho por hacer en el área de las comunicaciones.

4.4.2. Ejemplos de resonadores MEMS

Filtro HF



Resonador cantiliver



5.5. Desplazador de Fase

La función principal del desplazador de fase es la de reproducir una señal de entrada a su salida pero modificada en su fase, pues como su nombre lo dice, es un dispositivo que tiene la capacidad de desplazar la fase de la señal (Fig. 5.5.1). Dentro de los parámetros que se tienen para caracterizar al desplazador se encuentran: las pérdidas de inserción, el ancho de banda, la disipación y capacidad de potencia y la inserción de fase.

Las pérdidas de inserción en los desplazadores de fase afectan directamente su sensibilidad en la recepción, por lo que es un factor de suma importancia en su caracterización.

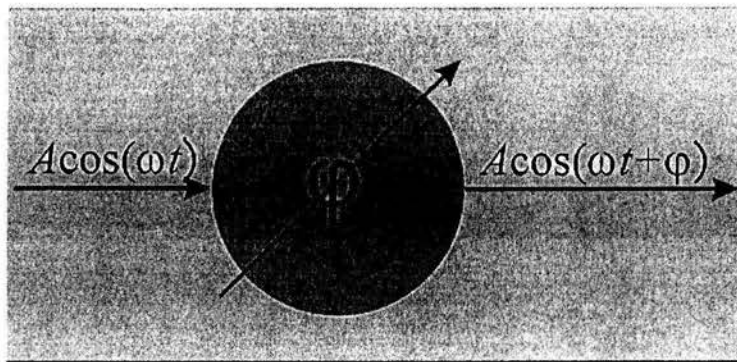


Fig. 5.5.1 Desplazador de fase

Los desplazadores de fase se clasifican dependiendo del tipo de inserción de fase y se pueden clasificar en analógicos y digitales.

En el caso del desplazador de fase mostrado en la Fig. 5.5.2, una propiedad de propagación de la línea de transmisión es su velocidad de fase y está expresada por:

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{L_t C_t}}$$

Donde:

L_t = inductancia por unidad de longitud de la línea [H/m]

C_t = capacitancia por unidad de longitud de la línea [F/m]

Si ahora consideramos introducir periódicamente a lo largo de la línea capacitores para que mediante interruptores puedan ser conectados en derivación a la línea y con esto provocarle un carga capacitiva, entonces la velocidad de fase disminuiría en comparación con la línea sin carga y a la señal le tomará más tiempo recorrer una cierta distancia en la línea de transmisión.

De esta forma como los capacitores de carga C_L introducen una carga periódica en la línea con un periodo p , la máxima frecuencia de operación del desplazador de fase estará dada por:

$$f_{Bragg} = \frac{1}{\pi p \sqrt{L_l (C_l + C_L / p)}}$$

La frecuencia de Bragg es donde las reflexiones de todas las discontinuidades de impedancias inducidas por las cargas de los capacitores son sumadas coherentemente.

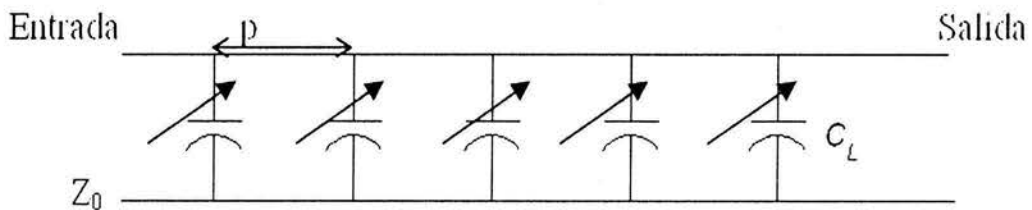


Fig. 5.5.2.- Esquema del desplazador de fase analógico

Cabe señalar que una de las desventajas de los desplazadores de fase analógicos es que tienden a ser sensibles al ruido cuando se controla el voltaje de la línea [14]. Por lo que para solucionar esta limitante se pueden utilizar los desplazadores digitales, donde aquí solo se enruta o se conmuta la señal de entrada a través de múltiples trayectorias a la salida, para así introducir desplazamientos de fase específicos.

Existen diferentes tipos de desplazadores de fase digitales, entre los que tenemos el de línea conmutada, el de línea cargada y el de filtros conmutados.

Cada desplazador es diferente en su funcionamiento, pero en esencia todos realizan la misma función, pues de lo que se trata es de activar diferentes trayectorias por donde pase la señal por medio de los interruptores que anteriormente fueron descritos. Por

ejemplo, el de tipo línea conmutada lleva a cabo diferentes desplazamientos de fase al conmutar los interruptores de tal forma que se puedan elegir diferentes longitudes de línea. El caso más sencillo, que es el desplazador de 1 bit, es mostrado en la Fig. 5.5.3. Conmutando adecuadamente los interruptores puede seleccionarse ya sea la longitud corta o la longitud larga, por lo que la fase diferencial está dada por:

$$\Delta\varphi = \beta(l_{larga} - l_{corta})$$

donde β es la constante de fase de la línea.

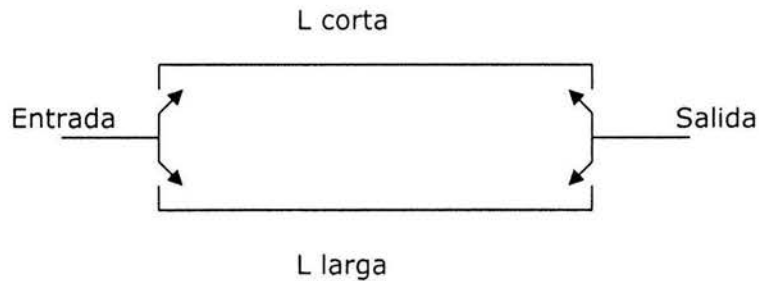


Fig. 5.5.3 Desplazador de fase de tipo línea conmutada

Para ejemplificar cómo se obtienen las diferentes fases en un desplazador de 2 bits se muestra la Fig. 5.5.4. Cada combinación corresponderá a diferencias de fase de 0, 90, 180 y 270 grados.

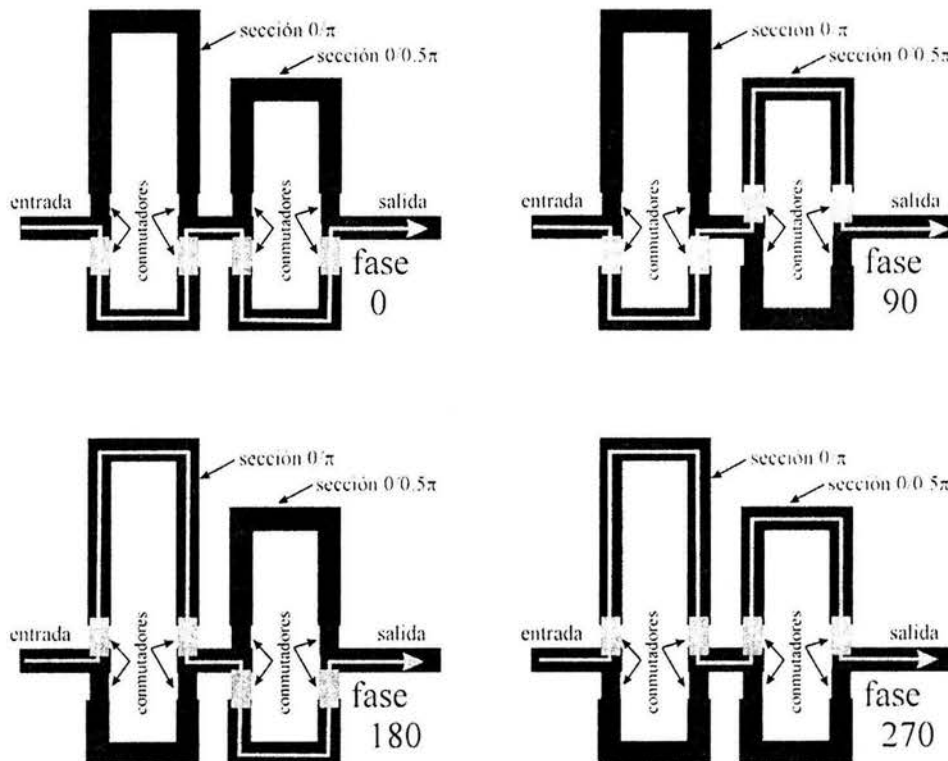


Fig. 5.5.4 Desplazador de fase de 2 bits tipo conmutado

Un aspecto muy importante en la fabricación y diseño de los desplazadores de fase son los interruptores de membrana capacitivos, pues como ya explicamos éstos manejan pérdidas de inserción muy bajas y se ha comprobado que son los que mejor desempeño demuestran en los desplazadores de fase de cualquier tipo [14][15]. La función principal de estos interruptores es la de dejar pasar o no la señal a través de ellos, por lo que es de suma importancia contar con ellos.

Es muy clara la motivación por usar interruptores MEMS, pues no se puede negar las características que los hacen superiores a los interruptores tradicionales debido a su alto desempeño y capacidad de introducir pérdidas de inserción muy pequeñas al desplazador de fase [14].

5.5.1 Descripción de la operación de Desplazador de Fase de 4 bits MEMS

El desplazador de fase de 4-bits, en banda Ka, como se muestra a continuación en la Fig. 5.5.5:

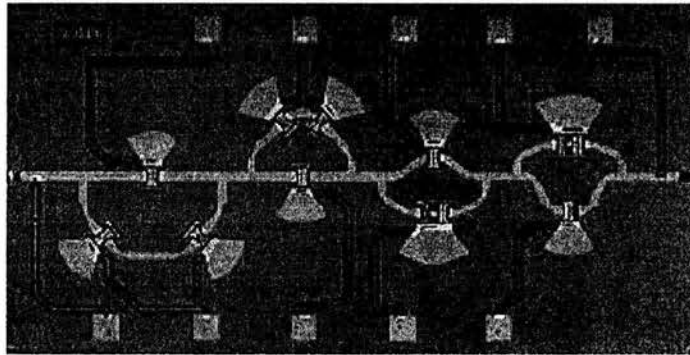


Fig. 5.5.5.- Desplazador de 4-bits

Dentro de las consideraciones de diseño se deben construir sobre el silicio que posee alta resistividad y a la vez utiliza pequeñas vigas resonantes como una tierra virtual para RF a lo largo de todo el dispositivo [16]. La función principal del interruptor de membrana MEMS es la de dejar pasar la señal a través de él o limitarla, pues como ya estudiamos al aplicarle un voltaje de DC a la membrana, entonces se genera una fuerza electrostática entre ella y el electrodo, haciendo que la membrana se acerque cada vez más al electrodo ocasionando que se tenga una alta capacitancia debida al

dieléctrico, el valor de capacitancia que presenta es del orden de 3 pF [15]. Por lo que a altas frecuencias el interruptor se cerrará (debido a que a altas frecuencias la reactancia capacitiva tiende a cero) y entonces la señal pasará libremente a través de él.

El mismo efecto ocurre cuando el interruptor no está actuando pues entonces la señal lo que ve es una línea abierta, debido a que la membrana se encuentra separada del electrodo y la señal ve un pequeñísimo valor de capacitancia del orden de 33 fF [15] por lo que el interruptor estará abierto.

Hasta el momento se ha explicado como es que se funcionan los interruptores, pero ahora lo más importante es entender cómo es que se da el desplazamiento de fase, por lo que antes era necesario entender la trayectoria de la señal a través de los interruptores.

En el caso específico de este diseño de 4-bits, es necesario apagar secciones donde cada sección tiene especificado previamente un rango de desplazamiento de fase (180° , 90° , 45° , 22.5°)[15][16], para lograr esto, lo que se hace es una serie de transformaciones de dos cuartos de onda, cabe resaltar que no se debe a las dimensiones físicas del dispositivo, sino a las dimensiones de la longitud de onda de la señal. Lo que sucede entonces es que para apagar una sección de línea se hace la primer transformación de la punta final hasta el inicio del interruptor, donde en la punta final se presenta un circuito abierto y al centro del interruptor se presenta un corto a la frecuencia deseada, la segunda transformación se da inversamente pues ahora se traslada el corto del centro del interruptor a la unión de los desplazadores.

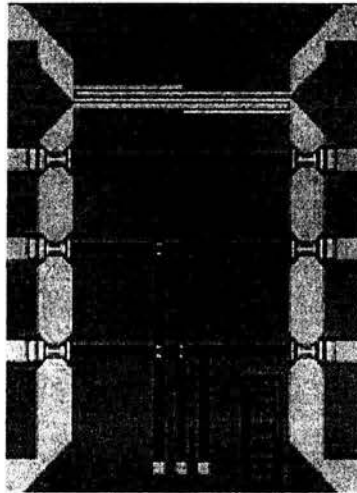
Entonces cuando los interruptores están en funcionamiento y siguieron una línea de trayectoria establecida, la señal se propaga a través de cada uno, sumando en cada etapa un desplazamiento que se da por los retrasos que sufre en las trayectorias, en el caso específico de este diseño, primero sufre un retraso de 180° , el próximo es de 90° , después de 45° y por último de 22.5° . Como vemos cada bit está colocado en cascada, dando como resultado un desplazador que recorre de 0° a 337.5° con espaciamentos de 22.5° .

Por último al analizar su desempeño a una frecuencia de 34 GHz, se observó que tiene

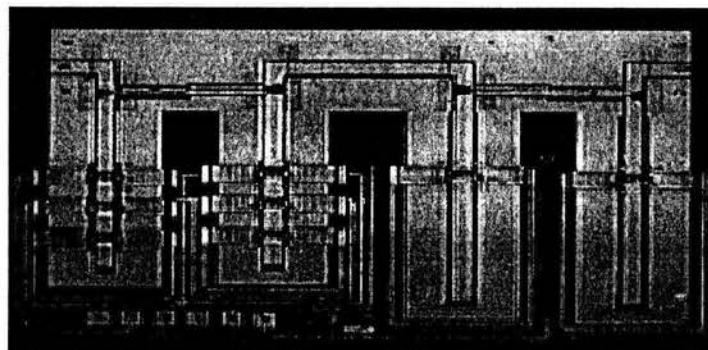
unas pérdidas de inserción de 1.8 dB a una referencia de 0° y de 3 dB a 337.5°, obteniendo un promedio de 2.25 dB en total. Las pérdidas de retorno son mejores a 15 dB. Los interruptores actúan en un rango de 3-6 μ m. Las pérdidas que se presentan en la línea de transmisión son del orden de 0.7 dB/cm [15].

5.5.2. Ejemplos de Desplazadores de Fase con tecnología MEMS

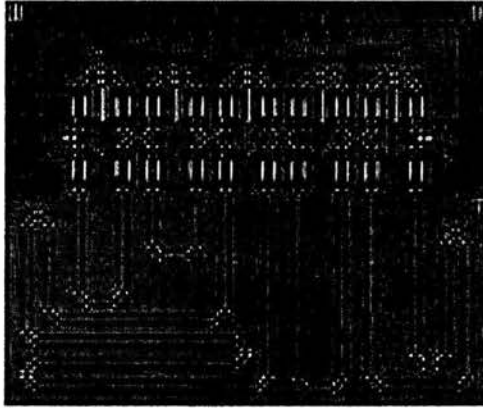
Desplazador de fase en banda X



Desplazador de fase de 3-bit



Desplazador de 5-bits



5.6. Antenas

Una antena puede ser definida como un transductor entre una onda guiada propagándose en una línea de transmisión y una onda electromagnética propagándose en un medio sin fronteras (usualmente el espacio libre), o viceversa. Las antenas son construidas en varias formas y tamaños y son utilizadas en un sin fin de aplicaciones tales como radio y tele difusión, sistemas de comunicaciones de radio, sistemas satelitales, teléfonos celulares, sistemas de radar y sistemas de anticolidión en automóviles, entre muchas otras.

Las propiedades de radiación e impedancia de una antena se establecen por su forma, tamaño y material con el que está construida. La función direccional que caracteriza la distribución relativa de potencia radiada de una antena es conocida como el patrón de radiación. La mayoría de las antenas son dispositivos recíprocos, esto es, exhiben el mismo patrón de radiación para los regímenes de transmisión y recepción como se muestra en la Fig. 5.6.1.

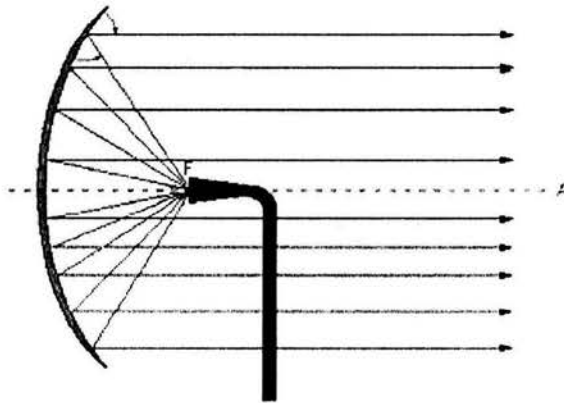


Fig. 5.6.1 Geometría de una antena parabólica.

En general el desempeño de una antena consiste en dos aspectos, sus propiedades de radiación y su impedancia. Las propiedades de radiación incluyen el patrón direccional de radiación y la polarización asociada a la onda radiada. El segundo aspecto, la impedancia de la antena, tiene que ver con la transferencia de potencia del generador a la antena y de la antena a la carga dependiendo de si se está trabajando como antena transmisora o receptora, respectivamente.

Cuando muchas antenas son conectadas juntas, la combinación es un arreglo de antenas, y el arreglo como un todo se comporta como si fuera una sola antena. Al controlar la magnitud y la fase de la señal de alimentación a cada antena individual es posible conformar un determinado patrón de radiación de todo el arreglo y poder conducir la dirección del haz electrónicamente.

5.6.1. Problemática Actual

La problemática actual surge debido a la necesidad de diseñar nuevas habilidades en los sistemas de comunicaciones para tener la capacidad de soportar servicios en las bandas de más alta frecuencia, así como diversos requerimientos de anchos de banda.

Actualmente las antenas fijas únicamente pueden radiar con un solo patrón de radiación (porque está en función de su geometría), y debido a las características de movilidad se requiere de un patrón que permita localizar la fuente y el objetivo en muchas direcciones, lo que implica un alto consumo de potencia debido a que se desperdicia energía en aquellas direcciones en donde no se encuentra la fuente o el objetivo deseado. Un factor desfavorable que también presentan es que debido a esta alta potencia de consumo, se tiende a invadir el espectro de frecuencia de otros servicios y a la vez se limita el propio sistema ya que su tiempo de uso es menor debido a la limitada capacidad de carga de las baterías.

Otra desventaja que presentan las antenas fijas es que sus propiedades de radiación presentan una dependencia entre la longitud de su estructura y la frecuencia a la que se está radiando. Por ejemplo, en el caso de las antenas de dipolo, se vuelven resonantes a distancias cercanas a media longitud de onda de la señal de excitación, por lo que nuevamente se vuelven limitadas. Así podemos enumerar una gran cantidad de desventajas, por lo cual aquí se analizarán las ventajas de la aplicación de la tecnología MEMS a las antenas.

5.6.2. Propuesta de Solución

Las antenas reconfigurables tienen la habilidad de controlar dinámicamente su patrón de radiación a través de la capacidad de modificar su geometría por sí mismas. Esto provee la capacidad de cubrir diferentes bandas de frecuencia y en un arreglo permite

la capacidad de direccionar electrónicamente el haz. Esta nueva tecnología ha ido revolucionando los diseños de las antenas con la finalidad de dar solución a las necesidades actuales, por lo que las antenas inteligentes reconfigurables son un nuevo paso para lograr todas estas metas, pues son consideradas con un alto potencial que indudablemente mejorará el desempeño de los sistemas de comunicaciones.

La idea principal de las antenas inteligentes es la de combinar múltiples elementos con el procesamiento de la señal para optimizar el patrón de radiación, además de incluir arreglos adaptivos de antenas que puedan seleccionar entre diferentes arreglos de patrones de radiación con la finalidad de cubrir mayores regiones en todo momento, de tener mejor calidad de recepción/transmisión, de ser de bajo consumo de potencia, y de detectar las fuentes que intenten violar la seguridad de los sistema satelitales [17].

5.6.3. Diseño de antenas reconfigurables con tecnología MEMS

Los desplazadores de fase y los interruptores a MEMS son la base en el diseño de las antenas inteligentes debido a que en un arreglo de antenas cada elemento individual posee un desplazador de fase que controla la amplitud y la fase de su excitación y en las antenas reconfigurables se requiere del uso de interruptores para modificar su geometría o longitud.

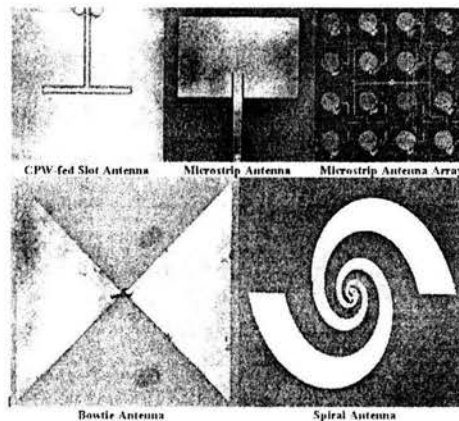


Fig. 5.6.2 Elementos para arreglos de antenas reconfigurables

Cabe mencionar que las antenas fractales reconfigurables trabajan con múltiples frecuencias, debido a que utilizan los desplazadores de fase y éstos a su vez utilizan los interruptores también desarrollados con tecnología MEMS, que permiten tener secciones de conectividad con partes conductoras, dando como resultado el acoplamiento entre los elementos fractales y permitiendo así el manejo de múltiples

frecuencias en una sola antena. Dentro de las mejoras de estos dispositivos se encuentra el de implementar redes neuronales que puedan desarrollar un nuevo tipo de antenas inteligentes reconfigurables [18], para que sean autosuficientes y puedan adaptarse y aprender la teoría de optimización de las antenas y darle de esta forma autonomía propia al sistema.

Este arreglo de antenas puede ser integrado en un solo circuito con tecnología MEMS y radiar con múltiples haces con la ayuda de un DSP (Digital Signal Processor). Aunque el objetivo de este trabajo no es analizar la teoría de cómo funciona esta antena reconfigurable es importante conocer a grandes rasgos como es que opera, pues ya estudiamos cómo es que los interruptores funcionan cuando operan sobre los desplazadores de fase, así que lo que se debe entender a grandes rasgos es que esta antena fractal selecciona diferentes trayectorias por medio de los desplazadores para obtener las diferentes frecuencias de operación e ir activando diferentes secciones del arreglo [17][18].

Otra antena muy importante es la antena Vee, que consiste en dos brazos conductivos separados uno del otro con un ángulo conocido como ángulo-Vee. Los brazos de la antena se encuentran sujetos del sustrato de un eje fijo rotacional, cabe señalar que este brazo no se encuentra en contacto con el sustrato lo que permite que se mueva libremente, además cada brazo tiene una longitud de 1.5λ y se pueden hacer girar en diferentes ángulos de 30° y 45° donde el haz principal se obtiene con un ángulo de 75° como se muestra a continuación, Fig. 5.6.3.

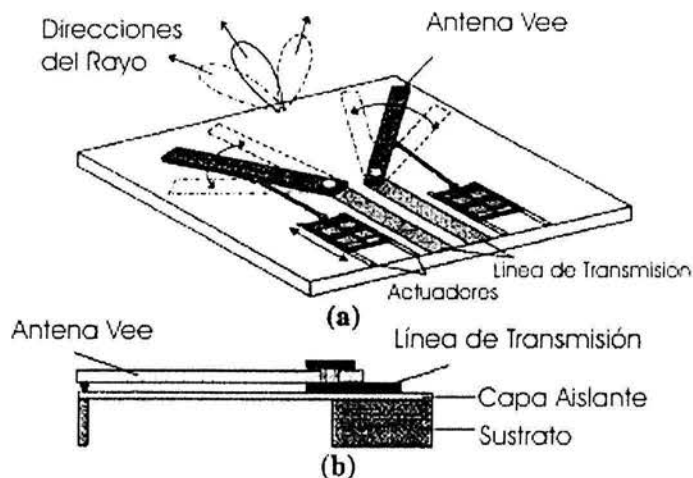


Fig. 5.6.3 (a) Concepto de antena Vee reconfigurable; (b) Sección transversal de la antena Vee.

Se puede apreciar claramente en el diagrama anterior que debido a que cuenta brazos movibles, se pueden obtener diferentes direcciones y formas de rayos lo que la convierte en una antena reconfigurable con la facilidad de modificar su patrón de radiación, cada brazo de la antena es independiente lo que permite que se pueda mover uno solo a la vez. Esta antena ha demostrado tener desempeños eficientes en la frecuencia de 17.5 GHz [20] lo que la convierte en una antena muy utilizada en las comunicaciones inalámbricas.

Esta antena se puede incorporar a circuitos de recepción y transmisión monolíticos como se muestra en la Fig. 5.6.4:

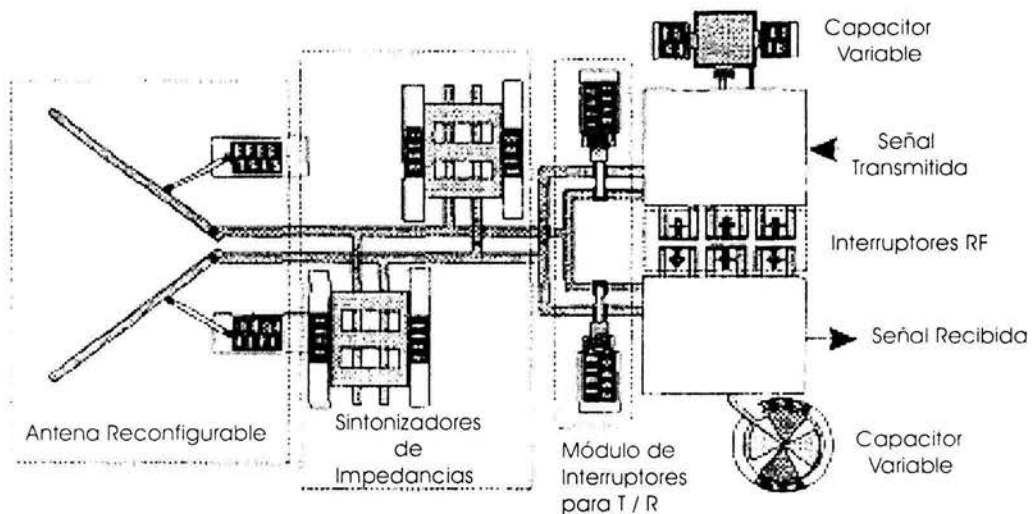


Fig. 5.6.4 Arquitectura de recepción/transmisión utilizando antena Vee

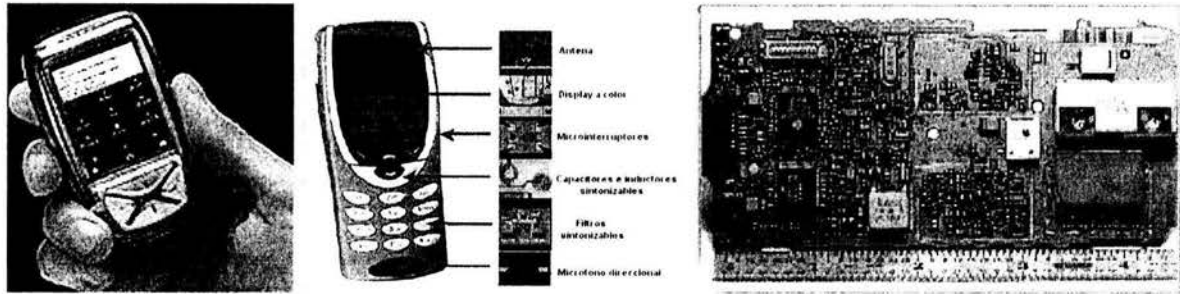
REFERENCIAS DEL CAPITULO 5

- [1] Hongrui Jiang, Ye Wang. " *On Chip Spiral Inductors Suspended over deep Copper-Lined Cavities*" . IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 48, No. 12. Diciembre del 2000.
- [2] De los Santos, Hector. " *Introduction to Microelectromechanical Microwave Systems*" , Editorial: Artech House, capítulo 1, pp.1-21, 1999.
- [3] V.M, Lubecke, B. Barber. " *Self-Assembling MEMS Variable and Fixed RF Inductors*". Bell Labs, Lucent Technologies.
- [4] Jun Zou, Chang Liu. " *Development of a Wide tuning Range MEMS Tunable Capacitor for Wireless Communication Systems* ". IEEE 2000. pp.1721-1724.
- [5] Amal, Mohamed, Hamed Elsimary. " *Design of MEMS Tunable Capacitor all Metal Microstructure for RF Wireless Applications* " Analog VLSI lab, EE Ohio State University.
- [6] Darrin J. Youn, Bernhard E. Boser. " *A Micromachine-Based Rf Low-Noise Voltage-Controlled Oscillator* " IEEE 1997 Custom Integrated Circuits Conference. Pp. 431-434.
- [7] Rebeiz, M.Gabriel; Muldavin, B.Jeremy. " *RF MEMS Switches and Switch Circuits*" IEEE Microwave Magazine. Diciembre 2001. pp. 59-71.
- [8] Yao, Jamie; Chen Shea. " *Micromachined Low-Loss Microwave Switches*". IEEE Journal of Microelectromechanical Systems. Vol. 8. No.2 Junio 1999. pp. 129-134.
- [9] De los Santos, Hector. " *Introduction to Microelectromechanical Microwave Systems*" Editorial: Artech House, capítulo 4, pp.81-98, 1999.

- [10] Nguyen, T. Clark. "*RF MEMS for Wireless Applications*". Department of Electrical Engineering and Computer Science. University of Michigan. Pp. 9-12.
- [11] Clark, John; Bannon, Frank. "*Parallel-Resonator HF Micromechanical Bandpass Filters*". Transducers 97. International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Chicago. Junio 16-19, 1997.
- [12] Wang, Kun; Nguyen, Clark. "*High Order Micromechanical Electronic Filters*". IEEE 1997. Department of Electrical Engineering and Computer Science. University of Michigan, Chicago. pp. 25-31.
- [13] Clark, John; Nguyen, Clark. "*High Q VHF Micromechanical Contour-Mode Disk Resonators*". IEEE 2000. Department of Electrical Engineering and Computer Science. University of Michigan, Chicago. Pp. 20-24.
- [14] De los Santos, Hector. "*RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications*". Artech House. Boston. Capítulo 5. pp.145-159.
- [15] Pillans, S. Eshelman; Malczewski, A. "*KA-Band RF MEMS Phase Shifters for Phased Array Applications*". IEEE 2000, Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. Pp. 195-198.
- [16] Pillans, S. Eshelman; Malczewski, A. "*KA-Band RF MEMS Phase Shifters*" IEEE 1999. Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 9, No. 12 Diciembre. Pp. 520-522.
- [17] De los Santos, Hector. "*RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications*". Artech House. Capítulo 4. pp.139-141.
- [18] Anagnostou, D., Christodoulou, C. "*Smart Reconfigurable Antenna for Satellite Applications*". Department of Electrical and Computer Engineering. Universidad de Nuevo México. Pp. 1-4.

- [19] Anagnostou, D., Christodoulou, C. "*Fractal Antenna with RF MEMS Switches for Multiple Frequency Applications*". Department of Electrical and Computer Engineering. Universidad de Nuevo México. Pp. 22-25.

- [20] Chiao, Jung-Chih. "*MEMS RF Devices for Antenna Applications*". Department of Electrical Engineering, Universidad de Hawai. pp.1-4.



VI. Aplicación de los MEMS a la telefonía celular

Una aplicación muy interesante es el caso del teléfono celular, debido a que es un claro ejemplo de una arquitectura que tiene la funcionalidad de trabajar como receptor y transmisor a la vez.

Una de las limitantes que se planteó desde el inicio del presente trabajo con respecto a los circuitos electrónicos actuales es el ineficiente consumo de potencia, por lo que uno de los principales objetivos que pretende alcanzar la tecnología MEMS es precisamente hacer más eficientes estas arquitecturas mediante un bajo consumo de potencia, bajos costos de fabricación y un uso eficiente del ancho de banda, entre otros.

Como sabemos las arquitecturas de comunicación están basadas en circuitos electrónicos y son en estos circuitos donde se pueden obtener alcances novedosos de desempeño, ya que la tecnología MEMS fácilmente puede reemplazar estas etapas con la finalidad de hacerlo más eficiente y es por esta razón que se podría actualmente implementar en los teléfonos celulares.

Para ser más específica de las mejoras obtenidas a nivel dispositivo que se obtienen cuando se trabaja con elementos MEMS en RF, creo que es muy importante señalar que se reemplazarían circuitos integrados que funcionan como resonadores como es el caso del resonador de onda acústica superficial (Surface Acoustic Wave, SAW) por

caso del resonador de onda acústica superficial (Surface Acoustic Wave, SAW) por resonadores MEMS con mejores factores de calidad, además se puede contar con varios bancos de filtros que trabajen a diferentes frecuencias y que pueden ser seleccionados con interruptores MEMS de bajas pérdidas de inserción y con esto es posible manejar una amplia gama de frecuencias que permitan la realización de arquitecturas multibanda, Figura (6.1).

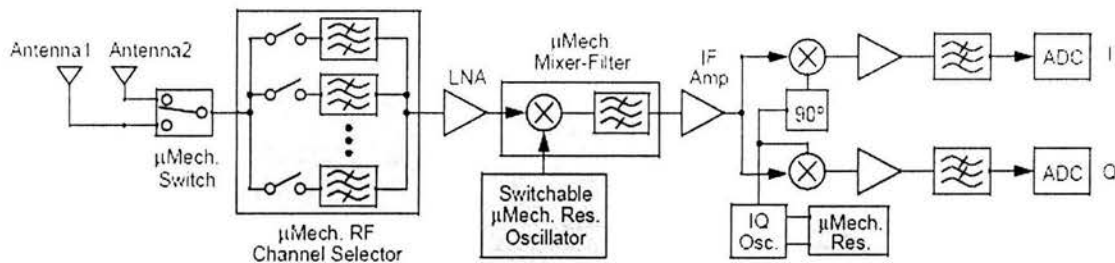


Fig. 6.1: Diagrama a bloques de un sistema receptor RF para seleccionar diferentes canales.

En el caso de la arquitectura en RF que aquí se analiza, se asume que todos los dispositivos MEMS operan en la banda de UHF con factores de calidad del orden de 10,000. En el caso específico del microresonador libre-libre se tiene un alto factor de calidad de 8,000 [1] que lo hace ser muy selectivo y podría reemplazar a los resonadores cerámicos, de cristal y de tipo SAW que son una parte fundamental en la selección de la banda de operación del sistema y en los filtros para frecuencias intermedias de operación. Otra sección en donde se podrían implementar los dispositivos MEMS es en la sustitución de los elementos pasivos utilizados en el VCO (Osciladores Controlados por Voltaje) como son los inductores y capacitores variables debido al buen desempeño [1], y por supuesto también se encuentran los microinterruptores que no sólo proveen la conmutación entre las etapas de transmisión y recepción sino que también ahorran en consumo de potencia, todo esto nos lleva a pensar, sin duda alguna, que la tecnología MEMS mejora considerablemente cada dispositivo de este sistema de comunicación, Fig (6.2).

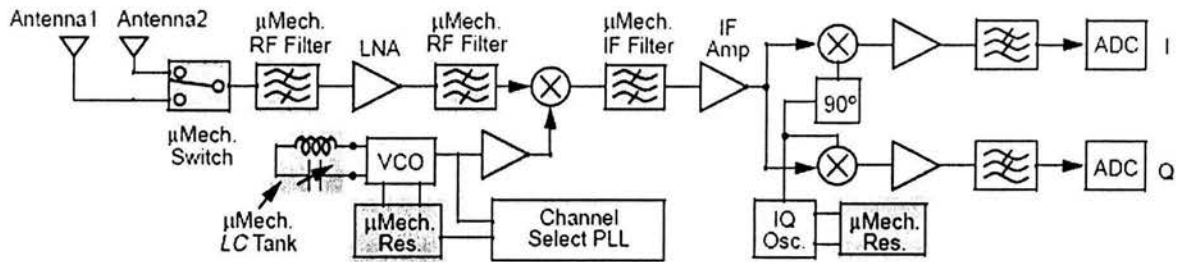


Fig. 6.2: Diagrama a bloques de un receptor heterodino donde se muestra la potencialidad de reemplazar algunos dispositivos por la tecnología MEMS.

Por supuesto que uno de los principales beneficios es la reducción de dimensiones, ya que en el caso de telefonía celular lo que siempre se ha buscado es integrar cada vez más funcionalidades que lo hagan un sistema cada día más completo para las necesidades del mundo actual.

Lo que es muy importante señalar es que esta tecnología además de ofrecer ventajas de desempeño a nivel dispositivo y a nivel sistema también provee la posibilidad de hacer un sistema con mayor complejidad sin dejar de ser funcional.

Cabe señalar que el mercado de la telefonía celular es el que ha tenido mayor crecimiento comparado con otros mercados, pues tan solo en el año pasado se vendieron 432,000,000 de unidades, en comparación con el mercado de cómputo donde se vendieron 28,857,000 computadoras de escritorio. Lo que nos hace pensar que este mercado es uno en donde más se invierte debido a la alta demanda de usuarios. Por esta razón todas aquellas mejoras que pueden obtenerse con la tecnología MEMS impactarán fuertemente el diseño de las siguientes generaciones de teléfonos celulares.

Por ejemplo, en el caso de los interruptores la tecnología MEMS ofrece reducir el costo de un dólar por cada interruptor, considerando que un teléfono celular tiene en promedio diez interruptores, se estaría teniendo un ahorro de diez dólares por cada teléfono y considerando el altísimo número de unidades que se fabrican al año estamos hablando de un ahorro millonario.

En este estudio de caso, se puede apreciar claramente que la implementación de MEMS traería muchas mejoras a la arquitectura tradicional del teléfono celular, Fig (6.3) además de la reducción de costos, por lo que si se considera esta opción representaría obtener un mejor desempeño y se podría reducir tanto el tamaño del celular e incluir más funcionalidades al mismo.

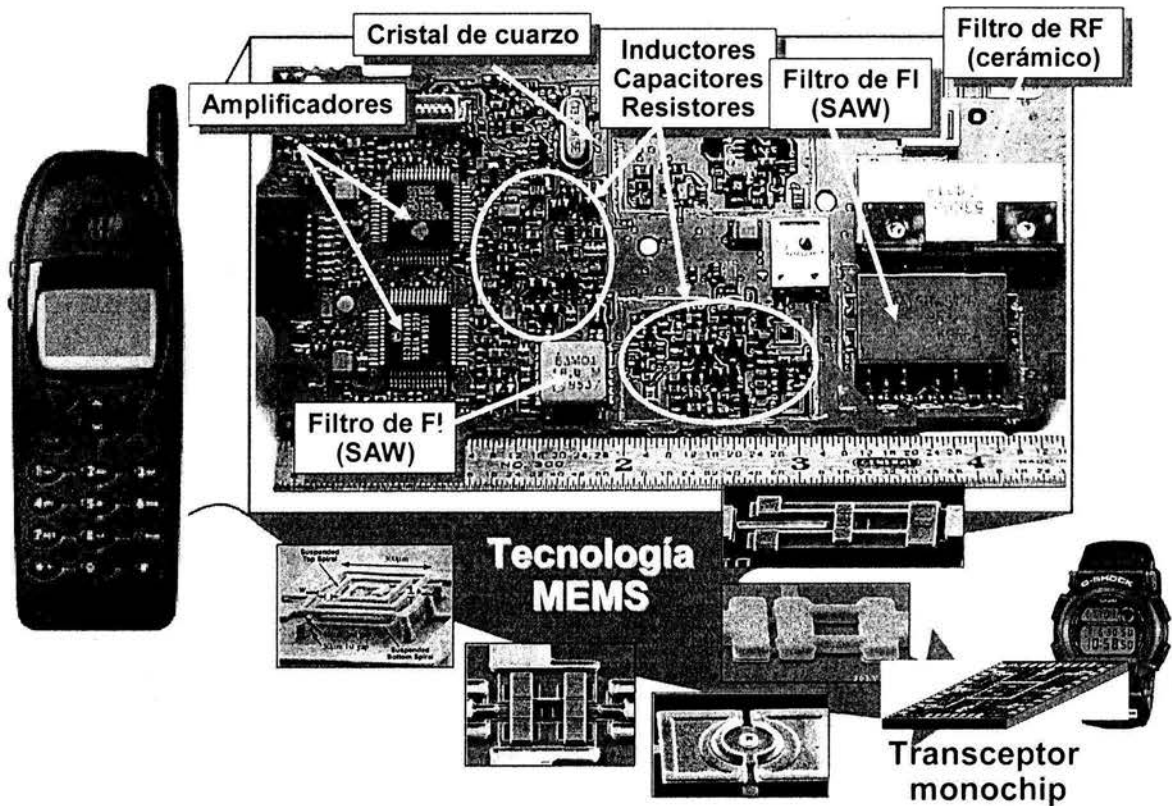


Fig. 6.3: Arquitectura interna de un teléfono celular real.

Otro componente muy importante en el teléfono celular es la batería, y si se implementa la tecnología MEMS se podrían reducir los consumos de potencia de los subsistemas y se vería reflejado una duración mayor en la carga o bien reducir su tamaño.

La tecnología MEMS ha avanzado en muchos dispositivos, pues también se han diseñado micrófonos que son pequeños y de bajo costo. Así, si seguimos analizando cada parte funcional del teléfono celular podemos ver que esta compuesto de elementos electrónicos de RF fácilmente reemplazables por dispositivos MEMS en los que obtendríamos altos factores de calidad, mayores rangos de frecuencia y portabilidad.

REFERENCIAS DEL CAPITULO 6

- [1] Nguyen, Clark. " *Transceiver Front-End architectures using vibrating micromechanical signal processors* ". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Michigan , 2001, pp. 23-32.

- [2] Nguyen,Clark.T.-C. " *Micromechanical circuits for communication transceivers*" Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, 2000. Proceedings of the 2000, Septiembre 2000, pp:142 - 149.

Conclusiones

El desempeño de los sistemas de comunicaciones inalámbricas depende en gran medida de la calidad de los elementos y dispositivos que conforman los circuitos electrónicos. En el presente trabajo se analizaron, por una parte, las limitantes de varios de los elementos y circuitos que se utilizan hoy en día, y por otra, la aplicación de la tecnología MEMS para desarrollar dichos elementos y circuitos.

Se puede concluir que la actual electrónica presenta serias limitantes para cubrir las nuevas necesidades de los modernos sistemas de comunicaciones inalámbricas. Entre estas limitantes podemos referir la dificultad de obtener anchos de banda adecuados, factores de calidad altos, pérdidas de inserción bajas, dimensiones pequeñas y bajos consumos de potencia, entre otras que podrían citarse.

Al analizar cada uno de los elementos que conforman un sistema de comunicaciones inalámbricas, y en particular en los sistemas móviles, se requiere cumplir con especificaciones tales como dimensiones pequeñas y bajos consumos de potencia, para cumplir con la función de portabilidad y de alto rendimiento en la batería. La tecnología MEMS ofrece mejoras sustantivas en estos aspectos, al reducir significativamente las dimensiones de los elementos y por ende, los consumos de potencia.

En este trabajo se analizó la aplicación de la tecnología MEMS en las comunicaciones inalámbricas, en particular se analizaron los elementos MEMS para RF tales como inductores, capacitores, interruptores, resonadores, desplazadores de fase y antenas inteligentes, los cuales determinan de una forma significativa el desempeño de los sistemas de comunicaciones inalámbricas.

La tecnología MEMS mejora sustancialmente el desempeño de los dispositivos y circuitos al proveer dispositivos de alta calidad, bajas tolerancias, bajas pérdidas y altas confiabilidades, entre otras ventajas.

Podemos concluir que la tecnología MEMS posee las siguientes ventajas:

1. Reducción de dimensiones y de peso.
2. Reducción de consumo de potencia.
3. Fabricación monolítica permite reducción de costos y de mano de obra.
4. Producción en masa y alta precisión.
5. Integración de múltiples funciones.

Ahora bien, en el caso de los dispositivos MEMS para RF se tienen las siguientes ventajas:

1. Reducción de las pérdidas.
2. Altas frecuencias de operación.
3. Altos factores de calidad.
4. Tamaños pequeños.
5. Bajo consumo de potencia.
6. Ajustabilidad y adaptabilidad electrónica.
7. Multifuncionalidad.
8. Alta precisión.
9. Bajo costo.

Hablando específicamente de los dispositivos más usados en las comunicaciones inalámbricas se tienen los investigados en la presente tesis, a continuación se resumen las principales características y desempeños que presentan.

| DISPOSITIVO | DESEMPEÑO |
|--------------------------------|---|
| Resonador dos Vigas | Demostrado: $Q \sim 8,000$ @ 10 MHz $Q \sim 300$ @ 70 MHz Q cae cuando aumenta la frecuencia |
| Resonador Suspendido | Demostrado: $Q \sim 8,000$ @ 10-100 MHz Q no cae con la frecuencia Rango de frecuencia > 1 GHz |
| Resonador modo Disco | Demostrado: $Q \sim 10,000$ @ 156 MHz Rango de frecuencia > 1 GHz |
| Capacitor Variable | Demostrado: $Q \sim 300$ @ 1 GHz Capacitancia: $1 \sim 4$ pF Q en función del plato variable |
| Inductor Suspendido | Demostrado: $Q \sim 30$ @ 1 GHz Inductancia: $1 \sim 4$ nH |
| Interruptor de Membrana | Demostrado: Voltaje de switcheo: > 20 V Pérdidas de Inserción ~ 0.1 dB Pérdidas de Retorno IIP3 ~ 66 dBm Tiempo de Switcheo $\sim 5 \mu\text{s}$ |

Además otros circuitos empleados en las comunicaciones inalámbricas son los desplazadores de fase y las antenas inteligentes y son muy importantes en las actuales arquitecturas de sistemas de comunicación satelital. Y es aquí donde los MEMS ofrecen nuevamente mejorar considerablemente los desempeños de los sistemas actuales.

| DISPOSITIVO | DESEMPEÑO |
|--------------------------------------|--|
| Desplazador de Fase de 4 bits | Demostrado: $f = 34$ GHz Pérdidas de inserción en promedio = 2.25 dB Pérdidas de retorno mejores a 15 dB |
| Antenas Vee Reconfigurable | Demostrado: $f = 17.5$ GHz Genera diferentes formas y direcciones de patrones de radiación |

Todas las ventajas que ofrecen los dispositivos y circuitos MEMS darán como resultado una nueva generación de sistemas de bajo costo, bajo consumo de potencia, grandes anchos de banda y alta portabilidad tal como puede observarse en el análisis de caso del teléfono celular.

Para finalizar considero que esta tecnología, que en otras áreas se ha consolidado como una tecnología líder, tendrá un fuerte impacto en las comunicaciones inalámbricas debido a los múltiples beneficios que ya se han analizado. Sin embargo, quizá aún seremos sorprendidos por lo que en un futuro no muy lejano esta tecnología permitirá realizar, debido a que una de las líneas más fuertes de la tendencia tecnológica mundial es la nanotecnología.

Apéndice:
"There's Plenty of Room at the Bottom"

There's Plenty of Room at the Bottom

Richard P. Feynman

Imagine experimental physicists must often look with envy at men like Kamerlingh Onnes, who discovered a field like low temperature, which seems to be bottomless and in which one can go down and down. Such a man is then a leader and has some temporary monopoly in a scientific adventure. Percy Bridgman, in designing a way to obtain higher pressures, opened up another new field and was able to move into it and to lead us all along. The development of ever higher vacuum was a continuing development of the same kind.

I would like to describe a field, in which little has been done, but in which an enormous amount can be done in principle. This field is not quite the same as the others in that it will not tell us much of fundamental physics (in the sense of, "What are the strange particles?") but it is more like solid-state physics in the sense that it might tell us much of great interest about the strange phenomena that occur in complex situations. Furthermore, a point that is most important is that it would have an enormous number of technical applications.

What I want to talk about is the problem of manipulating and controlling things on a small scale.

As soon as I mention this, people tell me about miniaturization, and how far it has progressed today. They tell me about electric motors that are the size of the nail on your small finger. And there is a device on the market, they tell me, by which you can write the Lord's Prayer on the head of a pin. But that's nothing; that's the most primitive, halting step in the direction I intend to discuss. It is a staggeringly small world that is below. In the year 2000, when they look back at this age, they will wonder why it was not until the year 1960 that anybody began seriously to move in this direction.

Why cannot we write the entire 24 volumes of the Encyclopaedia Britannica on the head of a pin?

Let's see what would be involved. The head of a pin is a sixteenth of an inch across. If you magnify it by 25 000 diameters, the area of the head of the pin is then equal to the area of all the pages of the Encyclopaedia Britannica. Therefore, all it is necessary to do is to reduce in size all the writing in the Encyclopaedia by 25 000 times. Is that possible? The resolving power of the eye is about 1/120 of an inch—that is roughly the diameter of one of the little

dots on the fine half-tone reproductions in the Encyclopaedia. This, when you demagnify it by 25 000 times, is still 80 angstroms in diameter—32 atoms across, in an ordinary metal. In other words, one of those dots still would contain in its area 1000 atoms. So, each dot can easily be adjusted in size as required by the photoengraving, and there is no question that there is enough room on the head of a pin to put all of the Encyclopaedia Britannica.

Furthermore, it can be read if it is so written. Let's imagine that it is written in raised letters of metal; that is, where the black is in the Encyclopaedia, we have raised letters of metal that are actually 1/25 000 of their ordinary size. How would we read it?

If we had something written in such a way, we could read it using techniques in common use today. (They will undoubtedly find a better way when we do actually have it written, but to make my point conservatively I shall just take techniques we know today.) We would press the metal into a plastic material and make a mold of it, then peel the plastic off very carefully, evaporate silica into the plastic to get a very thin film, then shadow it by evaporating gold at an angle against the silica so that all the little letters will appear clearly, dissolve the plastic away from the silica film, and then look through it with an electron microscope!

There is no question that if the thing were reduced by 25 000 times in the form of raised letters on the pin, it would be easy for us to read it today. Furthermore, there is no question that we would find it easy to make copies of the master; we would just need to press the same metal plate again into plastic and we would have another copy.

HOW DO WE WRITE SMALL?

The next question is: How do we *write* it? We have no standard technique to do this now. But let me argue that it is not as difficult as it first appears to be. We can reverse the lenses of the electron microscope in order to demagnify as well as magnify. A source of ions, sent through the microscope lenses in reverse, could be focused to a very small spot. We could write with that spot like we write in a TV cathode ray oscilloscope, by going across in lines, and having an adjustment which determines the amount of material which is going to be deposited as we scan in lines.

This method might be very slow because of space charge limitations. There will be more rapid methods. We could first make, perhaps by some photo process, a screen which has holes in it in the form of the letters. Then we would strike an arc behind the holes and draw metallic ions through the holes; then we could again use our sys-

MEMS Editor's Note: This manuscript addresses many current research issues. It is the transcript of a talk given by Richard P. Feynman on December 26, 1959, at the annual meeting of the American Physical Society at the California Institute of Technology, and was published as a chapter in the Reinhold Publishing Corporation book, *Miniaturization*, Horace D. Gilbert, Ed. It is reprinted with the consent of Van Nostrand Reinhold, New York, NY 10003.

The author, deceased, was with the California Institute of Technology, Pasadena, CA.

IEEE Log Number 9105621

tem of lenses and make a small image in the form of ions, which would deposit the metal on the pin.

A simpler way might be this (though I am not sure it would work): We take light and, through an optical microscope running backwards, we focus it onto a very small photoelectric screen. Then electrons come away from the screen where the light is shining. These electrons are focused down in size by the electron microscope lenses to impinge directly upon the surface of the metal. Will such a beam etch away the metal if it is run long enough? I don't know. If it doesn't work for a metal surface, it must be possible to find some surface with which to coat the original pin so that, where the electrons bombard, a change is made which we could recognize later.

There is no intensity problem in these devices—not what you are used to in magnification, where you have to take a few electrons and spread them over a bigger and bigger screen; it is just the opposite. The light which we get from a page is concentrated onto a very small area so it is very intense. The few electrons which come from the photoelectric screen are demagnified down to a very tiny area so that, again, they are very intense. I don't know why this hasn't been done yet!

That's the Encyclopaedia Britannica on the head of a pin, but let's consider all the books in the world. The Library of Congress has approximately 9 million volumes; the British Museum Library has 5 million volumes; there are also 5 million volumes in the National Library in France. Undoubtedly there are duplications, so let us say that there are some 24 million volumes of interest in the world.

What would happen if I print all this down at the scale we have been discussing? How much space would it take? It would take, of course, the area of about a million pinheads because, instead of there being just the 24 volumes of the Encyclopaedia, there are 24 million volumes. The million pinheads can be put in a square of a thousand pins on a side, or an area of about 3 square yards. That is to say, the silica replica with the paper-thin backing of plastic, with which we have made the copies, with all this information, is on an area of approximately the size of 35 pages of the Encyclopaedia. This is only one-fourth as many pages as a copy of the *Saturday Evening Post*. All of the information which all of mankind has ever recorded in books can be carried around in a pamphlet in your hand—and not written in code, but as a simple reproduction of the original pictures, engravings, and everything else on a small scale without loss of resolution.

What would our librarian at Caltech say, as she runs all over from one building to another, if I tell her that, ten years from now, all of the information that she is struggling to keep track of—120 000 volumes, stacked from the floor to the ceiling, drawers full of cards, storage rooms full of the older books—can be kept on just one library card! When the University of Brazil, for example, finds that their library is burned, we can send them a copy of every book in our library by striking off a copy from the master plate in a few hours and mailing it in an en-

velope no bigger or heavier than any other ordinary air mail letter.

Now, the name of this talk is "There is *Plenty* of Room at the Bottom"—not just "There is Room at the Bottom." What I have demonstrated is that there is room—that you can decrease the size of things in a practical way. I now want to show that there is *plenty* of room. I will not now discuss how we are going to do it, but only what is possible in principle—in other words, what is possible according to the laws of physics. I am not inventing anti-gravity, which is possible someday only if the laws are not what we think. I am telling you what could be done if the laws are what we think; we are not doing it simply because we haven't yet gotten around to it.

INFORMATION ON A SMALL SCALE

Suppose that, instead of trying to reproduce the pictures and all the information directly in its present form, we write only the information content in a code of dots and dashes, or something like that, to represent the various letters. Each letter represents six or seven "bits" of information; that is, you need only about six or seven dots or dashes for each letter. Now, instead of writing everything, as I did before, on the *surface* of the head of a pin, I am going to use the interior of the material as well.

Let us represent a dot by a small spot of one metal, the next dash by an adjacent spot of another metal, and so on. Suppose, to be conservative, that a bit of information is going to require a little cube of atoms $5 \times 5 \times 5$ —that is 125 atoms. Perhaps we need a hundred and some odd atoms to make sure that the information is not lost through diffusion, or through some other process.

I have estimated how many letters there are in the Encyclopaedia, and I have assumed that each of my 24 million books is as big as an Encyclopaedia volume, and have calculated, then, how many bits of information there are (10^{15}). For each bit I allow 100 atoms. And it turns out that all of the information that man has carefully accumulated in all the books in the world can be written in this form in a cube of material one two-hundredth of an inch wide—which is the barest piece of dust that can be made out by the human eye. So there is *plenty* of room at the bottom! Don't tell me about microfilm!

This fact—that enormous amounts of information can be carried in an exceedingly small space—is, of course, well known to the biologists, and resolves the mystery which existed before we understood all this clearly, of how it could be that, in the tiniest cell, all of the information for the organization of a complex creature such as ourselves can be stored. All this information—whether we have brown eyes, or whether we think at all, or that in the embryo the jawbone should first develop with a little hole in the side so that later a nerve can grow through it—all this information is contained in a very tiny fraction of the cell in the form of long-chain DNA molecules in which approximately 50 atoms are used for one bit of information about the cell.

BETTER ELECTRON MICROSCOPES

If I have written in a code, with $5 \times 5 \times 5$ atoms to a bit, the question is: How could I read it today? The electron microscope is not quite good enough; with the greatest care and effort, it can only resolve about 10 angstroms. I would like to try and impress upon you, while I am talking about all of these things on a small scale, the importance of improving the electron microscope by a hundred times. It is not impossible; it is not against the laws of diffraction of the electron. The wave length of the electron in such a microscope is only $1/20$ of an angstrom. So it should be possible to see the individual atoms. What good would it be to see individual atoms distinctly?

We have friends in other fields—in biology, for instance. We physicists often look at them and say, "You know the reason you fellows are making so little progress?" (Actually I don't know any field where they are making more rapid progress than they are in biology today.) "You should use more mathematics, like we do." They could answer us—but they're polite, so I'll answer for them: "What you should do in order for us to make more rapid progress is to make the electron microscope 100 times better."

What are the most central and fundamental problems of biology today? They are questions like: What is the sequence of bases in the DNA? What happens when you have a mutation? How is the base order in the DNA connected to the order of amino acids in the protein? What is the structure of the RNA; is it single-chain or double-chain, and how is it related in its order of bases to the DNA? What is the organization of the microsomes? How are proteins synthesized? Where does the RNA go? How does it sit? Where do the proteins sit? Where do the amino acids go in? In photosynthesis, where is the chlorophyll; how is it arranged; where are the carotenoids involved in this thing? What is the system of the conversion of light into chemical energy?

It is very easy to answer many of these fundamental biological questions; you just *look at the thing!* You will see the order of bases in the chain; you will see the structure of the microsome. Unfortunately, the present microscope sees at a scale which is just a bit too crude. Make the microscope one hundred times more powerful, and many problems of biology would be made very much easier. I exaggerate, of course, but the biologists would surely be very thankful to you—and they would prefer that to the criticism that they should use more mathematics.

The theory of chemical processes today is based on the theoretical physics. In this sense, physics supplies the foundation of chemistry. But chemistry also has analysis. If you have a strange substance and you want to know what it is, you go through a long and complicated process of chemical analysis. You can analyze almost anything today, so I am a little late with my idea. But if the physicists wanted to, they could also dig under the chemists in the problem of chemical analysis. It would be very easy to make an analysis of any complicated chemical substance; all one would have to do would be to look at it and see

where the atoms are. The only trouble is that the electron microscope is one hundred times too poor. (Later, I would like to ask the question: Can the physicists do something about the third problem of chemistry—namely, synthesis? Is there a *physical* way to synthesize any chemical substance?)

The reason the electron microscope is so poor is that the f -value of the lenses is only 1 part to 1000; you don't have a big enough numerical aperture. And I know that there are theorems which prove that it is impossible, with axially symmetrical stationary field lenses, to produce an f -value any bigger than so and so; and therefore the resolving power at the present time is at its theoretical maximum. But in every theorem there are assumptions. Why must the field be axially symmetrical? Why must the field be stationary? Can't we have pulsed electron beams in fields moving up along with the electrons? Must the field be symmetrical? I put this out as a challenge: Is there no way to make the electron microscope more powerful?

THE MARVELOUS BIOLOGICAL SYSTEM

The biological example of writing information on a small scale has inspired me to think of something that should be possible. Biology is not simply writing information; it is *doing something* about it. A biological system can be exceedingly small. Many of the cells are very tiny, but they are very active; they manufacture various substances; they walk around; they wiggle; and they do all kinds of marvelous things—all on a very small scale. Also, they store information. Consider the possibility that we too can make a thing very small, which does what we want—that we can manufacture an object that maneuvers at that level!

There may even be an economic point to this business of making things very small. Let me remind you of some of the problems of computing machines. In computers we have to store an enormous amount of information. The kind of writing that I was mentioning before, in which I had everything down as a distribution of metal, is permanent. Much more interesting to a computer is a way of writing, erasing, and writing something else. (This is usually because we don't want to waste the material on which we have just written. Yet if we could write it in a very small space, it wouldn't make any difference; it could just be thrown away after it was read. It doesn't cost very much for the material.)

MINIATURIZING THE COMPUTER

I don't know how to do this on a small scale in a practical way, but I do know that computing machines are very large; they fill rooms. Why can't we make them very small, make them of little wires, little elements—and by little, I mean *little*. For instance, the wires should be 10 or 100 atoms in diameter, and the circuits should be a few thousand angstroms across. Everybody who has analyzed the logical theory of computers has come to the conclusion that the possibilities of computers are very interesting—if they could be made to be more complicated by

several orders of magnitude. If they had millions of times as many elements, they could make judgments. They would have time to calculate what is the best way to make the calculation that they are about to make. They could select the method of analysis which, from their experience, is better than the one that we would give to them. And, in many other ways, they would have new qualitative features.

If I look at your face I immediately recognize that I have seen it before. (Actually, my friends will say I have chosen an unfortunate example here for the subject of this illustration. At least I recognize that it is a *man* and not an *apple*.) Yet there is no machine which, with that speed, can take a picture of a face and say even that it is a man; and much less that it is the same man that you showed it before—unless it is exactly the same picture. If the face is changed; if I am closer to the face; if I am further from the face; if the light changes—I recognize it anyway. Now, this little computer I carry in my head is easily able to do that. The computers that we build are not able to do that. The number of elements in this bone box of mine are enormously greater than the number of elements in our "wonderful" computers. But our mechanical computers are too big; the elements in this box are microscopic. I want to make some that are *sub-microscopic*.

If we wanted to make a computer that had all these marvelous extra qualitative abilities, we would have to make it, perhaps, the size of the Pentagon. This has several disadvantages. First, it requires too much material; there may not be enough germanium in the world for all the transistors which would have to be put into this enormous thing. There is also the problem of heat generation and power consumption; TVA would be needed to run the computer. But an even more practical difficulty is that the computer would be limited to a certain speed. Because of its large size, there is finite time required to get the information from one place to another. The information cannot go any faster than the speed of light—so, ultimately, when our computers get faster and faster and more and more elaborate, we will have to make them smaller and smaller.

But there is plenty of room to make them smaller. There is nothing that I can see in the physical laws that says the computer elements cannot be made enormously smaller than they are now. In fact, there may be certain advantages.

MINIATURIZATION BY EVAPORATION

How can we make such a device? What kind of manufacturing processes would we use? One possibility we might consider, since we have talked about writing by putting atoms down in a certain arrangement, would be to evaporate the material, then evaporate the insulator next to it. Then, for the next layer, evaporate another position of a wire, another insulator, and so on. So, you simply evaporate until you have a block of stuff which has the elements—coils and condensers, transistors and so on—of exceedingly fine dimensions.

But I would like to discuss, just for amusement, that

there are other possibilities. Why can't we manufacture these small computers somewhat like we manufacture the big ones? Why can't we drill holes, cut things, solder things, stamp things out, mold different shapes all at an infinitesimal level? What are the limitations as to how small a thing has to be before you can no longer mold it? How many times when you are working on something frustratingly tiny, like your wife's wrist watch, have you said to yourself, "If I could only train an ant to do this!" What I would like to suggest is the possibility of training an ant to train a mite to do this. What are the possibilities of small but movable machines? They may or may not be useful, but they surely would be fun to make.

Consider any machine—for example, an automobile—and ask about the problems of making an infinitesimal machine like it. Suppose, in the particular design of the automobile, we need a certain precision of the parts; we need an accuracy, let's suppose, of $4/10\,000$ of an inch. If things are more inaccurate than that in the shape of the cylinder and so on, it isn't going to work very well. If I make the thing too small, I have to worry about the size of the atoms; I can't make a circle out of "balls" so to speak, if the circle is too small. So, if I make the error, corresponding to $4/10\,000$ of an inch, correspond to an error of 10 atoms, it turns out that I can reduce the dimensions of an automobile 4000 times, approximately—so that it is 1 mm across. Obviously, if you redesign the car so that it would work with a much larger tolerance, which is not at all impossible, then you could make a much smaller device.

It is interesting to consider what the problems are in such small machines. Firstly, with parts stressed to the same degree, the forces go as the area you are reducing, so that things like weight and inertia are of relatively no importance. The strength of material, in other words, is very much greater in proportion. The stresses and expansion of the flywheel from centrifugal force, for example, would be the same proportion only if the rotational speed is increased in the same proportion as we decreased the size. On the other hand, the metals that we use have a grain structure, and this would be very annoying at small scale because the material is not homogeneous. Plastics and glass and things of this amorphous nature are very much more homogeneous, and so we would have to make our machines out of such materials.

There are problems associated with the electrical part of the system—with the copper wires and the magnetic parts. The magnetic properties on a very small scale are not the same as on a large scale; there is the "domain" problem involved. A big magnet made of millions of domains can only be made on a small scale with one domain. The electrical equipment won't simply be scaled down; it has to be redesigned. But I can see no reason why it can't be redesigned to work again.

PROBLEMS OF LUBRICATION

Lubrication involves some interesting points. The effective viscosity of oil would be higher and higher in pro-

portion as we went down (and if we increase the speed as much as we can). If we don't increase the speed so much, and change from oil to kerosene or some other fluid, the problem is not so bad. But actually we may not have to lubricate at all! We have a lot of extra force. Let the bearings run dry; they won't run hot because the heat escapes away from such a small device very, very rapidly.

This rapid heat loss would prevent the gasoline from exploding, so an internal combustion engine is impossible. Other chemical reactions, liberating energy when cold, can be used. Probably an external supply of electrical power would be most convenient for such small machines.

What would be the utility of such machines? Who knows? Of course, a small automobile would only be useful for the mites to drive around in, and I suppose our Christian interests don't go that far. However, we did note the possibility of the manufacture of small elements for computers in completely automatic factories, containing lathes and other machine tools at the very small level. The small lathe would not have to be exactly like our big lathe. I leave to your imagination the improvement of the design to take full advantage of the properties of things on a small scale, and in such a way that the fully automatic aspect would be easiest to manage.

A friend of mine (Albert R. Hibbs) suggests a very interesting possibility for relatively small machines. He says that, although it is a very wild idea, it would be interesting in surgery if you could swallow the surgeon. You put the mechanical surgeon inside the blood vessel and it goes into the heart and "looks" around. (Of course the information has to be fed out.) It finds out which valve is the faulty one and takes a little knife and slices it out. Other small machines might be permanently incorporated in the body to assist some inadequately-functioning organ.

Now comes the interesting question: How do we make such a tiny mechanism? I leave that to you. However, let me suggest one weird possibility. You know, in the atomic energy plants they have materials and machines that they can't handle directly because they have become radioactive. To unscrew nuts and put on bolts and so on, they have a set of master and slave hands, so that by operating a set of levers here, you control the "hands" there, and can turn them this way and that so you can handle things quite nicely.

Most of these devices are actually made rather simply, in that there is a particular cable, like a marionette string, that goes directly from the controls to the "hands." But, of course, things also have been made using servo motors, so that the connection between the one thing and the other is electrical rather than mechanical. When you turn the levers, they turn a servo motor, and it changes the electrical currents in the wires, which repositions a motor at the other end.

Now, I want to build much the same device—a master-slave system which operates electrically. But I want the slaves to be made especially carefully by modern large-scale machinists so that they are one-fourth the scale of

the "hands" that you ordinarily maneuver. So you have a scheme by which you can do things at one-quarter scale anyway—the little servo motors with little hands play with little nuts and bolts; they drill little holes; they are four times smaller. Aha! So I manufacture a quarter-size lathe; I manufacture quarter-size tools; and I make, at the one-quarter scale, still another set of hands again relatively one-quarter size! This is one-sixteenth size, from my point of view. And after I finish doing this I wire directly from my large-scale system, through transformers perhaps, to the one-sixteenth-size servo motors. Thus I can now manipulate the one-sixteenth-size hands.

Well, you get the principle from there on. It is rather a difficult program, but it is a possibility. You might say that one can go much farther in one step than from one to four. Of course, this has all to be designed very carefully and it is not necessary simply to make it like hands. If you thought of it very carefully, you could probably arrive at a much better system for doing such things.

If you work through a pantograph, even today, you can get much more than a factor of four in even one step. But you can't work directly through a pantograph which makes a smaller pantograph which then makes a smaller pantograph—because of the looseness of the holes and the irregularities of construction. The end of the pantograph wiggles with a relatively greater irregularity than the irregularity with which you move your hands. In going down this scale, I would find the end of the pantograph on the end of the pantograph on the end of the pantograph shaking so badly that it wasn't doing anything sensible at all.

At each stage, it is necessary to improve the precision of the apparatus. If, for instance, having made a small lathe with a pantograph, we find its lead screw irregular—more irregular than the large-scale one—we could lap the lead screw against breakable nuts that you can reverse in the usual way back and forth until this lead screw is, at its scale, as accurate as our original lead screws, at our scale.

We can make flats by rubbing unflat surfaces in triplicate together—in three pairs—and the flats then become flatter than the thing you started with. Thus, it is not impossible to improve precision on a small scale by the correct operations. So, when we build this stuff, it is necessary at each step to improve the accuracy of the equipment by working for awhile down there, making accurate lead screws, Johansen blocks, and all the other materials which we use in accurate machine work at the higher level. We have to stop at each level and manufacture all the stuff to go to the next level—a very long and very difficult program. Perhaps you can figure a better way than that to get down to small scale more rapidly.

Yet, after all this, you have just got one little baby lathe four thousand times smaller than usual. But we were thinking of making an enormous computer, which we were going to build by drilling holes on this lathe to make little washers for the computer. How many washers can you manufacture on this one lathe?

A HUNDRED TINY HANDS

When I make my first set of slave "hands" at one-fourth scale, I am going to make ten sets. I make ten sets of "hands," and I wire them to my original levels so they each do exactly the same thing at the same time in parallel. Now, when I am making my new devices one-quarter again as small, I let each one manufacture ten copies, so that I would have a hundred "hands" at the 1/16th size.

Where am I going to put the million lathes that I am going to have? Why, there is nothing to it; the volume is much less than that of even one full-scale lathe. For instance, if I made a billion little lathes, each 1/4000 of the scale of a regular lathe, there are plenty of materials and space available because in the billion little ones there is less than 2 per cent of the materials in one big lathe.

It doesn't cost anything for materials, you see. So I want to build a billion tiny factories, models of each other, which are manufacturing simultaneously, drilling holes, stamping parts, and so on.

As we go down in size, there are a number of interesting problems that arise. All things do not simply scale down in proportion. There is the problem that materials stick together by the molecular (Van der Waals) attractions. It would be like this: After you have made a part and you unscrew the nut from a bolt, it isn't going to fall down because the gravity isn't appreciable; it would even be hard to get it off the bolt. It would be like those old movies of a man with his hands full of molasses, trying to get rid of a glass of water. There will be several problems of this nature that we will have to be ready to design for.

REARRANGING THE ATOMS

But I am not afraid to consider the final question as to whether, ultimately—in the great future—we can arrange the atoms the way we want; the very *atoms*, all the way down! What would happen if we could arrange the atoms one by one the way we want them (within reason, of course; you can't put them so that they are chemically unstable, for example).

Up to now, we have been content to dig in the ground to find minerals. We heat them and we do things on a large scale with them, and we hope to get a pure substance with just so much impurity, and so on. But we must always accept some atomic arrangement that nature gives us. We haven't got anything, say, with a "checkerboard" arrangement, with the impurity atoms exactly arranged 1000 angstroms apart, or in some other particular pattern.

What could we do with layered structures with just the right layers? What would the properties of materials be if we could really arrange the atoms the way we want them? They would be very interesting to investigate theoretically. I can't see exactly what would happen, but I can hardly doubt that when we have some *control* of the arrangement of things on a small scale we will get an enormously greater range of possible properties that substances can have, and of different things that we can do.

Consider, for example, a piece of material in which we make little coils and condensers (or their solid state analogs) 1000 or 10 000 angstroms in a circuit, one right next to the other, over a large area, with little antennas sticking out at the other end—a whole series of circuits.

Is it possible, for example, to emit light from a whole set of antennas, like we emit radio waves from an organized set of antennas to beam the radio programs to Europe? The same thing would be to *beam* the light out in a definite direction with very high intensity. (Perhaps such a beam is not very useful technically or economically.)

I have thought about some of the problems of building electric circuits on a small scale, and the problem of resistance is serious. If you build a corresponding circuit on a small scale, its natural frequency goes up, since the wave length goes down as the scale; but the skin depth only decreases with the square root of the scale ratio, and so resistive problems are of increasing difficulty. Possibly we can beat resistance through the use of superconductivity if the frequency is not too high, or by other tricks.

ATOMS IN A SMALL WORLD

When we get to the very, very small world—say circuits of seven atoms—we have a lot of new things that would happen that represent completely new opportunities for design. Atoms on a small scale behave like *nothing* on a large scale, for they satisfy the laws of quantum mechanics. So, as we go down and fiddle around with the atoms down there, we are working with different laws, and we can expect to do different things. We can manufacture in different ways. We can use, not just circuits, but some system involving the quantized energy levels, or the interactions of quantized spins, etc.

Another thing we will notice is that, if we go down far enough, all of our devices can be mass produced so that they are absolutely perfect copies of one another. We cannot build two large machines so that the dimensions are exactly the same. But if your machine is only 100 atoms high, you only have to have it correct to one-half of one per cent to make sure the other machine is exactly the same size—namely, 100 atoms high!

At the atomic level, we have new kinds of forces and new kinds of possibilities, new kinds of effects. The problems of manufacture and reproduction of materials will be quite different. I am, as I said, inspired by the biological phenomena in which chemical forces are used in a repetitious fashion to produce all kinds of weird effects (one of which is the author).

The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of maneuvering things atom by atom. It is not an attempt to violate any laws; it is something, in principle, that can be done; but, in practice, it has not been done because we are too big.

Ultimately, we can do chemical synthesis. A chemist comes to us and says, "Look, I want a molecule that has the atoms arranged thus and so; make me that molecule." The chemist does a mysterious thing when he wants to make a molecule. He sees that it has got that ring, so he

mixes this and that, and he shakes it, and he fiddles around. And, at the end of a difficult process, he usually does succeed in synthesizing what he wants. By the time I get my devices working, so that we can do it by physics, he will have figured out how to synthesize absolutely anything, so that this will really be useless.

But it is interesting that it would be, in principle, possible (I think) for a physicist to synthesize any chemical substance that the chemist writes down. Give the orders and the physicist synthesizes it. How? Put the atoms down where the chemist says, and so you make the substance. The problems of chemistry and biology can be greatly helped if our ability to see what we are doing, and to do things on an atomic level, is ultimately developed—a development which I think cannot be avoided.

Now, you might say, "Who should do this and why should they do it?" Well, I pointed out a few of the economic applications, but I know that the reason that you would do it might be just for fun. But have some fun! Let's have a competition between laboratories. Let one laboratory make a tiny motor which it sends to another lab which sends it back with a thing that fits inside the shaft of the first motor.

HIGH SCHOOL COMPETITION

Just for the fun of it, and in order to get kids interested in this field, I would propose that someone who has some

contact with the high schools think of making some kind of high school competition. After all, we haven't even started in this field, and even the kids can write smaller than has ever been written before. They could have competition in high schools. The Los Angeles high school could send a pin to the Venice high school on which it says, "How's this?" They get the pin back, and in the dot of the "i" it says, "Not so hot."

Perhaps this doesn't excite you to do it, and only economics will do so. Then I want to do something; but I can't do it at the present moment, because I haven't prepared the ground. I hereby offer a prize of \$1000 to the first guy who can take the information on the page of a book and put it on an area $1/25\ 000$ smaller in linear scale in such manner that it can be read by an electron microscope.

And I want to offer another prize—if I can figure out how to phrase it so that I don't get into a mess of arguments about definitions—of another \$1000 to the first guy who makes an operating electric motor—a rotating electric motor which can be controlled from the outside and, not counting the lead-in wires, is only $1/64$ inch cube.

I do not expect that such prizes will have to wait very long for claimants.¹

¹Editor's Note: The latter prize was presented by Dr. Feynman on November 28, 1960 to William McLellan who built an electric motor the size of a speck of dust. The other prize is still open.