



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAestrÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRICA – TELECOMUNICACIONES

INTERRUPTOR MEMS Y SU INTEGRACIÓN A UN DESPLAZADOR DE FASE
PARA LA BANDA X.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSÉ ARTURO GÁMEZ LUGO

TUTORES PRINCIPALES:
DR. OLEKSANDR MARTYNYUK
DR. JORGE RODRÍGUEZ CUEVAS

MÉXICO, D. F. ENERO 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Gutiérrez Castrejon Ramón

Secretario: Dr. Gomez Castellanos Javier

Vocal: Dr. Martynyuk Oleksandr

1^{er}. Suplente: Dr. Martínez López José Ismael

2^{d o}. Suplente: Dr. Rodríguez Cuevas Jorge

Lugar donde se realizó la tesis:

Ciudad Universitaria, México, D.F.

TUTORES DE TESIS:

Oleksandr Martynyuk

Jorge Rodríguez Cuevas

FIRMA

FIRMA

Agradecimientos

Agradezco a la UNAM, mi Alma Mater, por ofrecerme una formación profesional dentro los más altos valores humanos y una educación de calidad.

A mi director de tesis, Dr. Oleksander Martynyuk, y cotutor, Dr. Jorge Rodríguez, por su guía, conocimiento y experiencia que me brindaron durante la realización de este trabajo de tesis sin el cual no hubiera sido posible su culminación.

A mis hermanas Nancy y Lynda por su cariño y apoyo incondicional.

A mis amigos en especial Rosalba por sus consejos y ayuda en la revisión de este trabajo. Gracias Rose!

A mi mamá y papá, por su confianza y motivación que me han brindado a lo largo de toda mi vida.

A mi querida Paulina por su continuo afán y dedicación para que cada día sea(mos) mejor(es).

Finalmente a la Dirección General Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por el apoyo económico recibido a través de los proyectos PAPIIT IN114911, IN116112, IN114213 e IN117814 útil para el desarrollo de este trabajo de investigación. Y Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo en forma de beca recibido a través del proyecto 166106 para la culminación de este trabajo.

Índice general

Agradecimientos	I
1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodología	2
1.4. Metas	3
1.5. Estructura de la Tesis	3
2. Estado del Arte	5
2.1. Introducción: Desplazadores de Fase	5
2.1.1. Diferentes tipos de desplazadores de fase (según su elemento de control)	7
2.2. Desplazadores de Fase utilizando MEMS	12
2.2.1. Conmutador SP4T banda 5 - 65 GHz	12
2.2.2. Conmutador RF-MEMS para desplazador de fase a 12 GHz	13
2.2.3. Conmutador RF MEMS de bajo voltaje de actuación para la banda X	14
2.3. Reto a superar	16
2.4. Conclusiones	18
3. Análisis y diseño del interruptor	19
3.1. Planteamiento	19
3.2. Principio de Operación del Interruptor	20
3.3. Diseños	21

3.3.1.	Interruptor V1	22
3.3.2.	Interruptor V2	23
3.3.3.	Interruptor V3	23
3.4.	Análisis Electro-mecánico	24
3.5.	Análisis utilizando CoventorWare	26
3.5.1.	Materiales	27
3.5.2.	Proceso	27
3.5.3.	Máscaras	28
3.5.4.	Modelo / Mallado	29
3.5.5.	Simulador	29
3.5.6.	Resultados de simulaciones	31
3.6.	Circuito de Polarización	34
3.7.	Conclusiones	38
4.	Desplazador de Fase	39
4.1.	Principio de operación	39
4.2.	Análisis por simulación	41
4.2.1.	Desplazador de fase con 1 Stub	42
4.2.2.	Desplazador de fase con 2 Stubs (1 bit)	48
4.2.3.	Desplazador de fase con 4 Stubs (2 bits)	49
4.2.4.	Conclusiones	52
5.	Fabricación - Fabricación de la membrana del interruptor MEMS y diafragma de control del desplazador de Fase	53
5.1.	Fabricación de la membrana.	55
5.1.1.	Ancla	55
5.1.2.	Punta de contacto	63
5.1.3.	Viga voladiza	64
5.2.	Desarrollo del proceso de fabricación del diafragma de control del desplazador de fase.	66
5.2.1.	Formación de electrodos	66
5.2.2.	Formación de islas de BCB	69
5.2.3.	Formación del anillo	72

5.2.4. Formación de pistas de polarización	72
5.2.5. Conclusiones	75
6. Conclusiones	76
Bibliografía	78

Índice de figuras

2.1. Arreglos de antenas.	6
(a). Arreglo pasivo	6
(b). Arreglo activo.	6
2.2. Arreglo reflectivo - Vista lateral	7
2.3. Circuito equivalente del diodo p-i-n según su polarización	9
(a). Polarización directa	9
(b). Polarización inversa	9
2.4. Conmutador SP4T [5]	13
(a). Vista superior - Conmutador SP4T	13
(b). Desplazador de fase 2 bits - línea conmutada	13
2.5. Tiempo de conmutación. [15]	14
(a). Conmutación on	14
(b). Conmutación off	14
2.6. Desplazador de fase - esquemático. [15]	14
2.7. Conmutador SP4T [1]	15
2.8. Desplazador de fase de 2 bits [9]	16
3.1. Vista lateral de interruptor, estado abierto y cerrado	21
(a). Interruptor en estado abierto	21
(b). Interruptor en estado cerrado	21
3.2. Isométrico de interruptor V1 - exageración en el eje z x05	22
3.3. Isométrico de interruptor V2 - exageración en el eje z x05	23
3.4. Isométrico de interruptor V3 - exageración en el eje z x05	24
3.5. Dimensiones del Interruptor v01 (todas en μm)	25

3.6. Dimensiones del Interruptor v02 (todas en μm)	26
3.7. Dimensiones del Interruptor v03 (todas en μm)	26
3.8. Procesos utilizados	28
3.9. Máscaras utilizadas en la fabricación del interruptor v3	30
(a). Máscara 1	30
(b). Máscara 2	30
(c). Máscara 3	30
(d). Máscara 4	30
(e). Máscara 5	30
(f). Máscara 6	30
(g). Máscara 7	30
(h). Máscara 8	30
3.10. Interruptor V3 - Mallado	31
3.11. Simulación Desplazamientos	32
3.12. Simulación 3D	33
(a). 11 Volts	33
(b). 12 Volts	33
(c). 13 Volts	33
(d). 14 Volts	33
3.13. Separación de señal RF y señal de control	35
3.14. Stub triangular para filtro a 10 GHz	36
(a). Isométrico	36
(b). Impedancia del Stub vs Frecuencia	36
3.15. Diseño de pistas para polarización de Interruptor	37
4.1. Desplazador de fase de 2 bits [9]	40
4.2. Vista superior del Desplazador de 1 Stub con interruptor MEMS	43
4.3. Simulación - 1er ajuste de parámetros.	44
(a). Puertos en guía de onda para simulación.	44
(b). Isométrico del Desplazador de 1 stub con interruptor MEMS.	44
4.4. Simulación - 1er ajuste de parámetros.	45
(a). 1er simulación.	45
(b). Simulación optimizada - sintonizado a 10.67GHz.	45

4.5. Simulación - 2do ajuste de parámetros.	46
(a). Simulación inicial.	46
(b). Simulación optimizada - sintonizado a 10.67GHz.	46
4.6. Simulaciones de diferencia de fases.	47
(a). 1er corrida - Diferencia de fases.	47
(b). 2da corrida - Diferencia de fases.	47
4.7. Desplazador de Fase 1 bit: Diferencia de fase entre modos.	48
4.8. Vista superior del Desplazador de 1 Bit (2 stubs) con interruptores MEMS	49
4.9. Vista superior del Desplazador de 2 bits con interruptores MEMS	50
4.10. Desplazador de 2 bits: Diferencia de fase entre modos.	50
5.1. Lámina de aluminio sobre cristal superplano.	56
5.2. Máscaras para la fabricación del interruptor versión 3	57
(a). Máscara 1	57
(b). Máscara 2	57
(c). Máscara 3	57
5.3. Marcas de alineación	60
(a). Superior Izquierda	60
(b). Superior Derecha	60
(c). Inferior Izquierda	60
(d). Inferior Derecha	60
(e). Marca asimétrica	60
5.4. Fotos del primer paso de fabricación	61
(a). Interruptor(ancla) dentro del arreglo	61
(b). Ancla	61
5.5. Proceso Litográfico	62
(a). Sustrato Rogers 5880	62
(b). Depósito de fotoresina	62
(c). Revelado de Resina	62
(d). Ataque húmedo	62
(e). Limpieza con acetona	62
5.6. Fotografías paso 2	64

(a).	Sección del interruptor	64
(b).	Detalle de punta de contacto	64
5.7.	Proceso de fabricación de la membrana.	65
(a).	Lámina de aluminio sobre sustrato de cristal	65
(b).	Formación del ancla	65
(c).	Formación de punta de contacto	65
(d).	Formación total de la membrana	65
5.8.	Flujo de proceso de fabricación del diafragma.	67
(a).	Sustrato Rogers 5880	67
(b).	Formación de electrodos	67
(c).	Depósito de BCB	67
(d).	Formación de islas de BCB	67
(e).	Formación del anillo	67
(f).	Depósito de cobre ($1 \mu m$)	67
(g).	Formación de pistas	67
5.9.	Máscaras para la fabricación del diafragma de control	68
(a).	Máscara 1	68
(b).	Máscara 2	68
(c).	Máscara 3	68
(d).	Máscara 4	68
5.10.	Fotografías de fabricación del desplazador - formación de islas de cy- clotene y anillo ranurado.	71
(a).	Stub a 90 grados	71
(b).	Stub a 180 grados	71
(c).	Stub a 225 grados	71
(d).	Stub a 315 grados	71
5.11.	Fotografías de fabricación del desplazador - depósito de cobre	73
(a).	Stub a 90 grados	73
(b).	Stub a 180 grados	73
5.12.	Fotografías de fabricación del desplazador - Pistas de polarización	74
(a).	Stub a 90 grados	74
(b).	Stub a 180 grados	74

(c). Stub a 225 grados	74
(d). Stub a 315 grados	74

Índice de cuadros

2.1. Características de desplazadores basados en ferrita (En la banda de 2 a 10 GHz). [13]	8
2.2. Dimensiones del diafragma de control.	17
3.1. Constante de Resorte y Voltaje de Jale	25
3.2. Materiales	27
3.3. Valores para calculo de capacitancia interruptor V3	34
4.1. Resultados de simulación. Desplazador 1 stub sin pantalla de corto. .	44
4.2. Dimensiones del diafragma de control.	46
4.3. Resultados de 2da corrida. Desplazador 1 stub sin pantalla de corto. .	47
4.4. Desfasamiento en desplazador de 1 bit.	49
4.5. Desfasamiento en desplazador de 2 bits.	51
5.1. Materiales para la fabricación de la membrana del interruptor MEMS	54
5.2. Equipo a utilizar en la fabricación del interruptor MEMS	54

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

Los desplazadores de fase son dispositivos comunmente utilizados en arreglos de antenas para controlar la dirección del haz sin necesidad de girar parcial o completamente la antena y con esto lograr direccionar el haz con mayor velocidad. Por esta razón son utilizados principalmente en radares.

Debido a las ventajas que ofrecen este tipo de antenas se le ha brindado gran atención a sus elementos esenciales, los desplazadores de fase, diseñándolos, fabricándolos y controlándolos de diferentes maneras, siempre con el propósito de bajar costos, disminuir pérdidas, soportar mayor potencia, aumentar su confiabilidad y un control a mayor velocidad.

Para controlar el cambio de fase en los desplazadores de forma electrónica se han ocupado diodos p-i-n y transistores efecto de campo (FETs por sus siglas en inglés) como interruptores. Dependiendo el número de cambios de fase es la cantidad de diodos o FETs utilizados en cada desplazador. Una tecnología más reciente es la de

los interruptores MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), los cuales presentan mejoras en comparación con los diodos p-i-n y FETs.

Es importante considerar la cantidad de elementos (desplazadores de fase) requeridos en una antena, éstos suelen ser cientos o miles. Por lo que el sistema en conjunto llega a ser demasiado costoso, generalmetne sólo accesible para la industria militar.

Con base en lo anterior, en este trabajo se propone integrar un interruptor MEMS a un desplazador de fase tipo reflectivo para la banda X, fabricándolo a través de procesos fotolitográficos.

1.2. Objetivos

- Analizar, diseñar y simular un interruptor RF MEMS con cualidades suficientes para ser utilizado en desplazadores de fase, considerando su manufactura en los laboratorios del grupo de trabajo UNAMems, Facultad de Ingeniería UNAM.

- Integración del interruptor al desplazador de fase tipo reflectivo presentado en [9] , y optimización del sistema.

1.3. Metodología

- Investigación de interruptores RF MEMS con el fin de conocer los parámetros esenciales que se consideran en su análisis y diseño.

- Investigación de desplazadores de fase y requerimientos mínimos para los conmutadores utilizados en ellos.

-Diseño de un interruptor MEMS para ser integrado en el desplazador de fase así como su análisis electromecánico del interruptor MEMS.

-Integración del interruptor al desplazador de fase y la optimización del desplazador con el interruptor diseñado.

1.4. Metas

Análisis y diseño de un interruptor MEMS para la banda X, con voltaje de actuación bajo.

Análisis por simulador de un desplazador de fase tipo reflectivo usando el interruptor MEMS diseñado.

Optimización del desplazador tipo reflectivo usando el interruptor MEMS diseñado.

Fabricación de la membrana del interruptor y diafragma de control de un desplazador de fase.

1.5. Estructura de la Tesis

La tesis está dividida en 6 capítulos y sigue la siguiente estructura:

- En el primer capítulo se presenta una breve introducción y las metas de la tesis.
- En el segundo capítulo se presentan diferentes tipos de desplazadores así como las cualidades de sus sistemas de actuación. También se presentan tecnologías

actuales de desplazadores con uso de conmutadores RF MEMS.

- En el tercer capítulo se presenta el diseño y análisis por simulación del interruptor MEMS.
- En el cuarto capítulo se presenta el desplazador de fase diseñado y su análisis por simulación de 1 y 2 bits.
- En el quinto capítulo se presenta la fabricación de la membrana del interruptor y del diafragma de control del desplazador de fase con las tecnologías presentes en los laboratorios UNAMems.
- En el sexto y último capítulo se presentan las conclusiones generales.

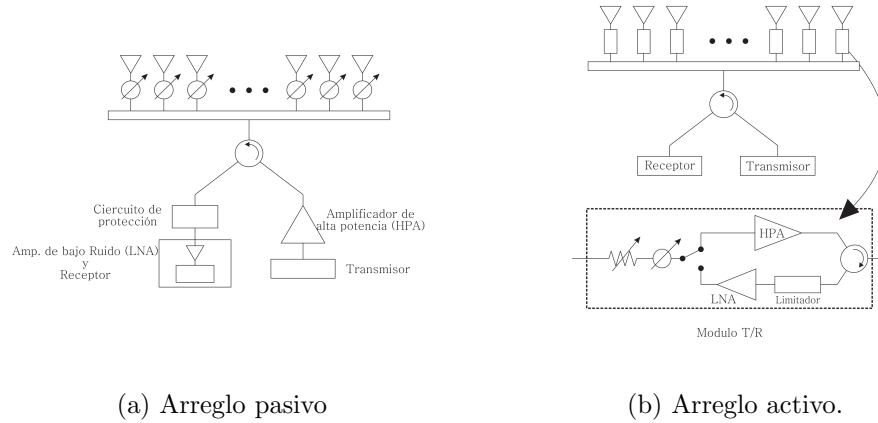
Capítulo 2

Estado del Arte

2.1. Introducción: Desplazadores de Fase

Un desplazador de fase ideal es aquel dispositivo que permite modificar la fase de una señal de manera controlada sin modificar su amplitud, se modela como una red de dos puertos en la cual existe una diferencia de fase entre las señales de entrada y salida. Existen dos tipos básicos de desplazadores de fase, el analógico y el digital. En el analógico se tiene un cambio continuo de fase (construido con diodos varactores), el digital presenta corrimientos discretos en la fase (construidos generalmente con conmutadores). Estos últimos son los más utilizados debido a que pueden ser controlados mediante microprocesadores.

Los desplazadores de fase se pueden encontrar en dos tipos de arreglos: pasivos y activos. Los arreglos pasivos ideales solo modifican de manera controlada la fase de la señal en cada desplazador, Figura 2.1(a), en cuanto a los arreglos activos tienen además la capacidad de amplificar la intensidad de la señal en cada desplazador, Figura 2.1(b).[12]



(a) Arreglo pasivo

(b) Arreglo activo.

Figura 2.1: Arreglos de antenas.

Una ventaja de los arreglos activos es que a través del control de la potencia se puede compensar las pérdidas inherentes de cada desplazador de fase. En contraste, un arreglo de fase pasivo soporta directamente la potencia de transmisión o de recepción. Por lo que se busca minimizar las pérdidas de los desplazadores de fase y así tener la mayor transmisión de potencia. En cuanto a las ventajas de los arreglos pasivos son su baja complejidad y por consiguiente bajo costo en comparación con los activos.

Un arreglo de fase especial es el reflectivo, el cual controla la radiación electromagnética al cambiar la dirección del haz de la onda reflejada. Esto se logra al modificar los elementos reflectores del arreglo. La modificación se realiza en un cambio en la geometría propia de elementos y/o la distribución de ellos en el arreglo.

En la Figura 2.2 se muestra la geometría de un arreglo reflectivo, también llamado reflector plano debido a su forma plana. Este tipo de arreglo de fase es de nuestro interés, ya que su fabricación se puede realizar mediante procesos de manufactura planar, utilizados numerosas veces por el grupo de trabajo UNAMems. Otra ventaja del uso de arreglos reflectivos es la alimentación espacial, eliminando con ello la complejidad y las pérdidas en las redes de alimentación.[7]

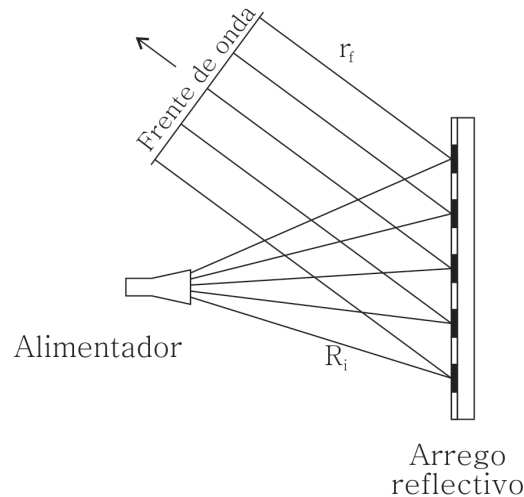


Figura 2.2: Arreglo reflectivo - Vista lateral

2.1.1. Diferentes tipos de desplazadores de fase (según su elemento de control)

Los desplazadores de fase se pueden dividir por los elementos que controlan su cambio de fase. Estos pueden ser basados en ferritas, diodos p-i-n, conmutadores FETs e interruptores MEMS.

2.1.1.1 Basados en Ferrita

Su funcionamiento se basa en la interacción entre las ondas electromagnéticas de la señal de interés y el momento angular de los electrones dentro de una ferrita magnetizada. Al modificar la magnitud y/o dirección del campo magnético aplicado se modifica la permeabilidad de la ferrita y esto a su vez modifica la constante de propagación de la onda electromagnética. Obteniéndose con esto un cambio de fase de la onda.

Hay cuatro principales desplazadores de fase basados en ferrita, los cuales son: de permeabilidad variable, toroidal, de modo dual y campo rotatorio, de los últimos tres podemos observar sus características en el Cuadro 2.1

Cuadro 2.1: Características de desplazadores basados en ferrita (En la banda de 2 a 10 GHz). [13]

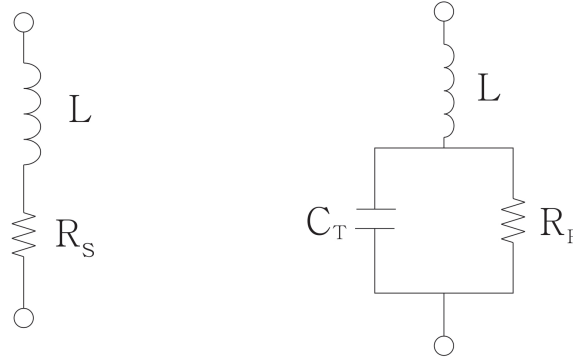
Parámetros	Toroidal	De Modo-Dual	Campo rotatorio
Pérdidas	0.6 dB	0.7 dB	0.7 dB
Dimensiones	15.2x40.6 mm	25.4x55.8 mm	25.4x66.0 mm
Peso	23 g	28 g	79 g
Tiempo de conmutación	2-5 μ s	50-150 μ s	50-200 μ s
Exactitud de fase	7 rms	6 rms	3 rms
Manejo de Potencia	10 W	20 W	120 W
Potencia consumida	100 mW	100 mW	2 mW

Los desplazadores basados en ferrita son buenos en el manejo de potencia y sus bajas pérdidas pero su lenta respuesta en el tiempo de conmutación y sus dimensiones no hacen tan deseable su uso en aplicaciones donde esto es una prioridad. [13]

2.1.1.2 Basados en diodos p-i-n

El diodo p-i-n ha sido utilizado como conmutador o como modulador de amplitud en frecuencias de microondas, ya que la principal ventaja del diodo p-i-n frente a un diodo convencional es el comportamiento de mantener su estado activo en altas frecuencias.

Por otro lado el diodo p-i-n en el dispositivo de microondas, introducirá pérdidas, pues el diodo utilizado no es ideal, es por eso que las pérdidas se estiman de manera analítica, previo a la fabricación del dispositivo, también debe considerarse que las pérdidas deben ser mínimas y dependerán de un elevado aislamiento que presente el diodo p-i-n.



(a) Polarización directa

(b) Polarización inversa

Figura 2.3: Circuito equivalente del diodo p-i-n según su polarización

Los dispositivos conmutadores diseñados con diodos p-i-n se modelan en función de la frecuencia de operación y de acuerdo a la polarización del diodo.

Bajo polarización directa, la conductividad de la región intrínseca es controlada o modulada por la inyección de carga de las regiones p y n de los extremos, y el diodo conducirá corriente. La resistencia en estado de baja impedancia del diodo es controlada por la polarización directa. El diodo tiene una excelente linealidad y baja distorsión. [4]

En este estado de baja impedancia, el diodo es controlado por las características de inyección de carga de la unión p-n. El diodo puede ser representado como una resistencia con un valor determinado por la corriente que fluye en el diodo.

El diodo p-i-n se comporta como una inductancia L en serie con una resistencia R_s . Su modelo de circuito equivalente se muestra en la figura 2.3(a).

Cuando se tiene una polarización inversa, el diodo p-i-n se comporta como el circuito conformado por una inductancia L en serie con el paralelo de una capaci-

tancia C_T y una resistencia R_P . Tal como se muestra en la figura 2.3(b). Para esta polarización el diodo se encuentra en estado de alta impedancia, la región intrínseca produce valores muy altos de voltaje de ruptura e impedancia. Así proporciona una buena aproximación a un circuito abierto.[8]

La presencia de la región intrínseca permite obtener características operacionales muy deseables para aplicaciones de conmutación. A medida que el ancho de la región intrínseca aumenta, la capacitancia formada en las uniones del diodo disminuye. Esta característica es benéfica en la conmutación de señales de microondas, puesto que una capacitancia baja y una alta impedancia del diodo p-i-n en situación de polarización inversa, hacen posible que el diodo se comporte como un circuito abierto.[4]

Los valores de resistencia y capacitancia, principalmente, determinan el desempeño del dispositivo. Es decir, estos dos parámetros del modelo equivalente del diodo p-i-n definen el nivel de pérdida y aislamiento que presentará el circuito de microondas.

Su modelo eléctrico para fines prácticos se puede considerar en el estado de baja impedancia como una resistencia entre 0.2 a 5 ohms y en el estado de alta impedancia como una resistencia aproximada de 20 Kohms con una capacitancia entre 0.01 pF y 2 pF.

Por las características de estos dispositivos se tienen desplazadores más pequeños, de una velocidad de conmutación superior (del orden de ns) y menos costosos en comparación con los de ferrita, pero sus pérdidas de inserción son mayores para altas frecuencias y su consumo de potencia es superior alrededor de 3 a 10 mW por diodo.[3]

2.1.1.3 Basados en conmutadores FET

El transistor de efecto de campo (FET) es usado como un interruptor activado por su voltaje de compuerta. En un FET de canal n se tiene que a un voltaje superior al de “pinch off”, el conmutador FET presenta alta impedancia, mientras que con un voltaje menor su comportamiento es de baja impedancia.

Al igual que los diodos p-i-n estos transistores se utilizan para conmutar entre diferentes líneas y con esto generar el cambio de fase.

Los conmutadores FET tienen ciertas ventajas con respecto a los diodos p-i-n como son: velocidades de conmutación superiores (del orden de ns), consumo de potencia muy bajo, compatibles con dispositivos de integración monolítica (lo que implica una reducción en el costo de ensamble), puede ser utilizado como un conmutador y amplificador a la vez (a ciertas frecuencias) y puede utilizarse en desplazadores de fase tanto analógicos como digitales.

En cuanto a sus desventajas se puede decir que presentan altas pérdidas de inserción en altas frecuencias (4-6 dB para 12-18 GHz y 8-9 dB para 35 GHz en diseños de 4 bits) y una baja capacidad de manejo de potencia.

2.1.1.4 Basados en interruptores MEMS

Los Sistemas Micro-Electromecánicos (MEMS por sus siglas en inglés) son dispositivos que combinan elementos mecánicos con eléctricos y cuyas dimensiones son de un μm a un mm . De entre ellos se encuentran los interruptores MEMS, los cuales han sido utilizados para remplazar los interruptores de estado sólido debido a su baja pérdida de inserción (menor a 2 dB en el rango de 8 a 120 GHz), tamaño reducido, bajo peso, muy bajo consumo de potencia y a su relativa facilidad de integración en los propios procesos de integración monolítica.[14]

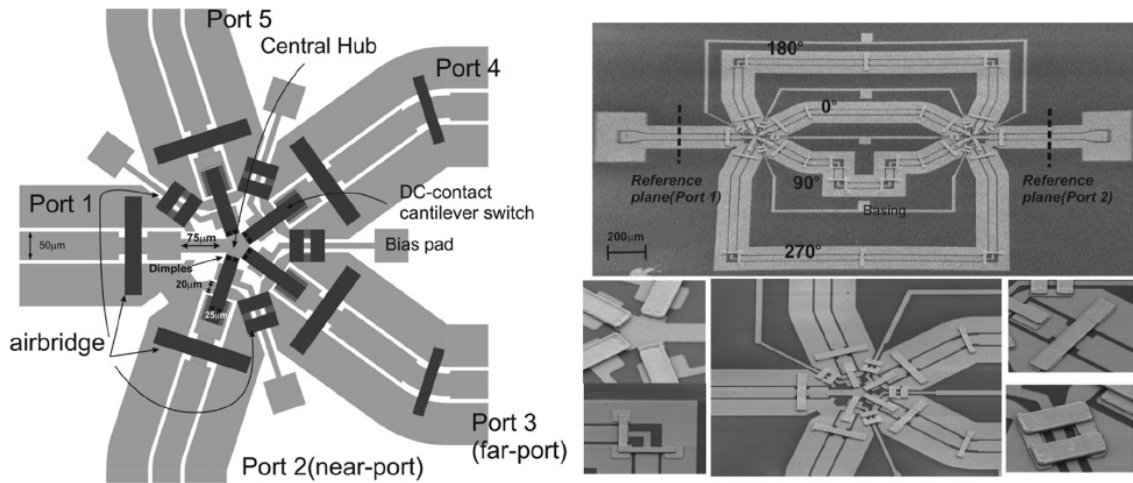
Los desplazadores de fase ofrecen sobre todo una alternativa para aplicaciones de arreglos pasivos en los cuales la potencia radiada por elemento es relativamente baja. En la siguiente sección se presentarán desarrollos de interruptores MEMS para desplazadores de fase en la actualidad.

2.2. Desplazadores de Fase utilizando MEMS

2.2.1. Conmutador SP4T banda 5 - 65 GHz

Songbin en la Universidad de Virginia en el 2011 desarrolló un desplazador de fase de 2 bits usando Interruptores RF-MEMS (tipo viga voladiza) formando un conmutador un polo cuatro tiros (SP4T por sus siglas en inglés), con un promedio de pérdidas de inserción de 2.5 dB en la banda 55-65 GHz con una pérdida de retorno mejor a 12 dB para cada estado, y presentando un error de fase menor de 1 grado en cada desplazamiento de fase a 60 GHz. En la Figura 2.4(b) se muestra el sistema de conmutación. Se observa en la Figura 2.4(a) el arreglo de 4 interruptores tipo viga voladiza para formar el conmutador completo de 1 polo 4 tiros. [5]

El trabajo corresponde a un desplazador de fase de línea conmutada en el cual se puede seleccionar una de 4 líneas. Logrando obtener cambios de fase de 90, 180 y 270 grados. Se debe conmutar simultáneamente 2 interruptores a la vez para conectar la línea correspondiente. En la figura 2.4(b) se observan dichas líneas con los desplazamientos ocasionados por cada una de ellas.



(a) Vista superior - Conmutador SP4T (b) Desplazador de fase 2 bits - línea conmutada

Figura 2.4: Conmutador SP4T [5]

2.2.2. Conmutador RF-MEMS para desplazador de fase a 12 GHz

En la Universidad de Tokyo, Japón desarrollaron un interruptor RF-MEMS DPDT (dos polos dos tiros) para un desplazador de fase a 12 GHz, teniendo un voltaje de actuación de 4V, una velocidad de conmutación de 12 microsegundos, como se puede apreciar en las gráficas de la Figura 2.5, pérdidas de inserción de 3dB, pérdidas de retorno de 12 dB y un aislamiento de 30 dB a 12 GHz. [15]

En este diseño se observa un movimiento lateral para realizar la conmutación en donde la misma sección móvil es el extremo de la línea. La estructura tiene un movimiento horizontal, diferente a lo común en los interruptores MEMS en donde el movimiento es vertical. En este trabajo aprovechan esta cualidad para poder, en una misma estructura, conmutar entre 2 caminos formando un interruptor de 1 polo 2 tiros. Esto se puede observar en la figura 2.6.

Usando una tecnología de capas semiconductor-aislante-semiconductor logran minimizar la interferencia ocasionada por el interruptor MEMS y la línea.

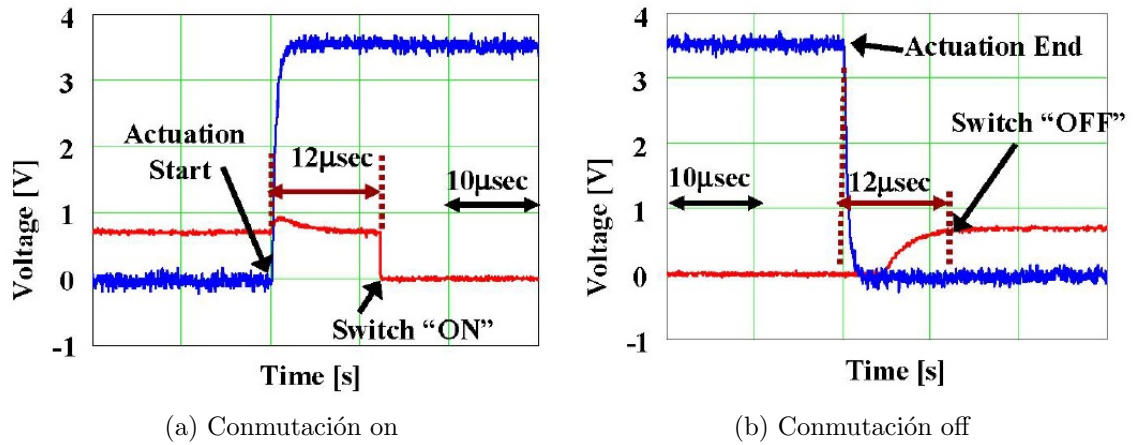


Figura 2.5: Tiempo de conmutación. [15]

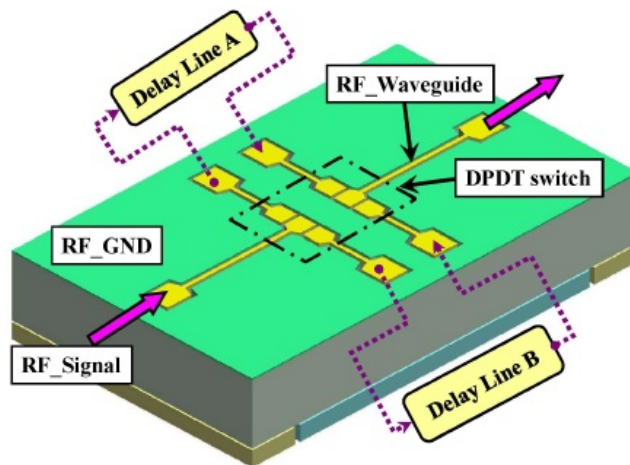


Figura 2.6: Desplazador de fase - esquemático. [15]

2.2.3. Conmutador RF MEMS de bajo voltaje de actuación para la banda X

En 2012 el Instituto de tecnología de Georgia, fabricó un conmutador de tamaño reducido (SP4T) piezoeléctrico diseñado en polímero de cristal liquido (LCP por sus siglas en inglés) obteniendo una reducción en área del 22.5% y un voltaje de

actuación de 7 V. Las pérdidas debidas a los interruptores es de 0.75dB/bit con 2.25 grados de error de fase a 10 GHz.

El LCP es usado gracias a sus propiedades mecánicas y capacidad de procesamiento multicapa así como las bajas pérdidas y baja constante dieléctrica ($\epsilon_r = 2.9$) lo que lo hace benéfico para aplicaciones de antenas en el rango de las microondas, reduciendo la atenuación ocasionada por el mismo. [1]

En la figura 2.7, se puede observar el arreglo de interruptores para la formación del conmutador SP4T.

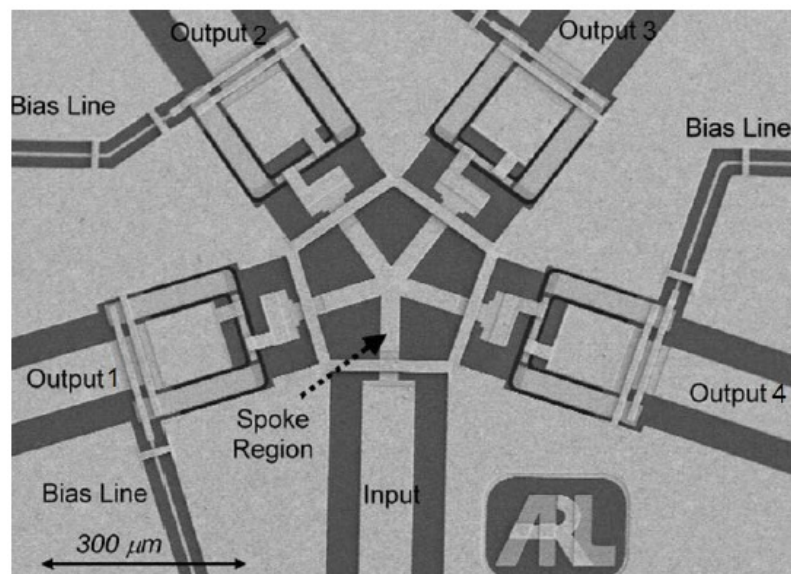


Figura 2.7: Conmutador SP4T [1]

2.3. Reto a superar

En el 2006 en la Universidad Nacional Autónoma de México se fabricó un desplazador de fase tipo reflectivo basado en diodos p-i-n con resultados sobresalientes.[9] Considerando las aplicaciones que se tiene para este tipo de desplazadores en la mayoría por no decir en su totalidad, se colocan en arreglos para formar antenas de mayor potencia y con control de haz. Estos arreglos están compuestos por cientos o miles desplazadores de fase y cada uno de estos desplazadores contiene 4 diodos por lo que en estas dimensiones los costos de fabricación aumentan considerablemente.

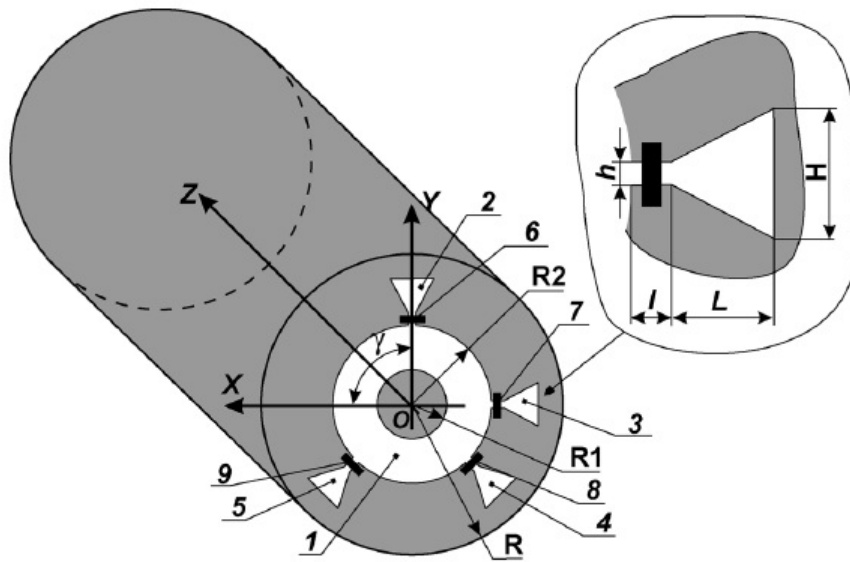


Figura 2.8: Desplazador de fase de 2 bits [9]

En la figura 2.8 se muestra el diseño del desplazador de fase. El desplazador consta de un diafragma de control situado en la sección transversal de una guía de onda circular la cual es terminada en corto circuito. El diafragma de control contiene un resonador de anillo ranurado 1 y cuatro stubs radiales 2-5. En cada stub se encuentra conectado en paralelo un diodo p-i-n 6-9. En cualquier momento dado, un diodo es conmutado a su estado apagado y los restantes tres al estado encendido.

Entre las características presentadas en el artículo se tienen: pérdidas de inserción mejores a 0.5 dB en la banda de 9.75 a 11.5 GHz, un tiempo de conmutación de 150 ns y un error de fase menor a 11 grados para cualquiera de sus desplazamientos. En el cuadro 2.2 se presentan las dimensiones del dispositivo. [9]

Cuadro 2.2: Dimensiones del diafragma de control.

$R1$	$R2$	L	l	H	h	R
3.1 mm	7.1 mm	3.05 mm	0.6 mm	3.6 mm	0.4 mm	11.4 mm

Con los procesos de fabricación desarrollados por el grupo de trabajo UNAMems, hoy en día es posible fabricar dispositivos MEMS en sus laboratorios. Por lo que se busca adentrarse en este tipo de tecnología con el objetivo de aprovechar las cualidades de estos dispositivos, específicamente los interruptores RF MEMS.

Dado este avance en desplazadores de fase tipo reflectivo y las ventajosas cualidades de los interruptores MEMS se plantea el reto del diseño de un interruptor MEMS para su implementación en este desplazador de fase. Por lo que el desarrollo de esta tesis se centra en el diseño del interruptor MEMS y posteriormente la optimización del desplazador en conjunto con el interruptor propuesto sin dejar de considerar su implementación.

En cuestión de la implementación se presenta un factor muy importante que no debe ser olvidado y es la correcta polarización del dispositivo, en donde se deben separar las señales de control(actuación) de la señal RF propia del desplazador.

El interruptor debe ser de bajo costo considerando que remplazará a los diodos uno a uno, por lo que los costos de fabricación deberán de ser menores a los provocados por usar los diodos p-i-n. Los Interruptores MEMS son muy buena alternativa primeramente por que se pueden fabricar en los laboratorios con los que se cuentan y en dado caso por su integración directa al desplazador de fase sin tener que colocar o soldar cada interruptor por separado. Lo que nos lleva a tener menos procesos de manufactura y con esto reducir aún más los costos.

Dado esto, el desafío que presenta esta tesis se puede resumir como:

Diseño de un interruptor capaz de reemplazar, los diodos p-i-n en el desplazador presentado en [9]. Así también la integración del interruptor al desplazador y su optimización. Todo ello considerando la manufactura factible en los laboratorios que se poseen en UNAMems.

Consideraciones de diseño:

- Interruptor que sea capaz de conectar 2 superficies separadas $400 \mu m$.
- Con un ancho máximo de $600 \mu m$.
- Bajo Voltaje de actuación (menor a 20 V).
- Reducir o al menos igualar en la banda X las pérdidas de inserción. (0.5 dB)

2.4. Conclusiones

1. Los interruptores MEMS presentan superioridad en reducción de pérdidas de inserción, consumo de energía casi nulo y bajo costo.

2. En los arreglos reflectivos se evitan pérdidas en las redes de alimentación cambiando ésta por una alimentación espacial.

3. Finalmente se propone como meta superar el dispositivo presentado en [9], cambiando la tecnología de diodos p-i-n utilizada, por interruptores MEMS diseñándolos y fabricándolos en los laboratorios presentes en UNAMems.

Capítulo 3

Análisis y diseño del interruptor

En este capítulo se muestra el diseño del interruptor para el desplazador de fase tipo reflectivo[9] mostrado en el capítulo 2. Se pretende diseñar interruptores con la tecnología MEMS que remplazarán a los diodos p-i-n.

Los interruptores MEMS son muy buena alternativa gracias a sus características de casi nulo consumo de potencia, linealidad y en dado caso por su integración directa al desplazador de fase sin tener que colocar o soldar cada interruptor por separado.

Al cambiar los diodos p-i-n por interruptores MEMS los costos bajarían en gran medida e incluso gracias a las características de los mismos se puede mejorar el desempeño del desplazador de fase.

3.1. Planteamiento

Se realiza el diseño de un interruptor RF MEMS con miras en su fabricación haciendo uso de papel aluminio de $11 \mu m$ de grosor, considerado éste un material

sumamente accesible, de bajo costo y funcional. Utilizando técnicas de fotolitografía se realiza la fabricación, creando interruptores independientes que se tienen que situar y anclar posteriormente en el dispositivo deseado, en este caso un desplazador de fase.

Esta idea es tomada de [11] en donde se presenta un interruptor microfabricado y posteriormente ensamblado, lo que se busca es llevar este principio a escalas mucho menores. Y utilizar estos interruptores en dispositivos tales como las antenas que trabajan en la banda X.

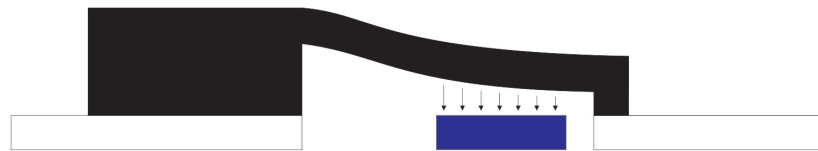
3.2. Principio de Operación del Interruptor

El diseño se basa en los interruptores tipo viga voladiza, esto se decidió ya que, en comparación con los tipo puente, requieren de menor fuerza de atracción para actuarlos. Otro aspecto considerado fue la forma de realizar la conmutación, eligiendo la conmutación electrostática debido a la sencillez y pequeñas dimensiones requeridas. Por lo que se sitúa un electrodo debajo del interruptor. El electrodo se encuentra a un voltaje fijo de 0V mientras que la estructura de la viga voladiza sirve como un segundo electrodo la cual se polariza dependiendo la acción que se desee realizar. Al polarizar la membrana a 0 volts se tendrá el interruptor abierto y al suministrarle un voltaje se creará un campo eléctrico entre los electrodos y éste a su vez generará una fuerza de atracción entre los mismos. Cuando la fuerza de atracción sea lo suficientemente grande, la membrana descenderá y conmutará el interruptor al estado cerrado. Esto lo podemos observar en la figura 3.1.

En la punta de la viga voladiza se tiene una pequeña saliente que evitará un corto circuito entre electrodos cuando el interruptor sea conmutado a su estado cerrado como se aprecia en la Figura 3.1(b), con lo que se logra evitar el uso de una capa aislante entre la membrana y el electrodo.



(a) Interruptor en estado abierto



(b) Interruptor en estado cerrado

Figura 3.1: Vista lateral de interruptor, estado abierto y cerrado

3.3. Diseños

Basandose en los desplazadores diseñados en [9], primeramente se busca un interruptor de dimensiones tales que pueda ser colocado en dicho desplazador tomando el lugar de los diodos p-i-n utilizados hasta ahora. Y teniendo en mente la restricción del grosor de la lámina (papel aluminio) de donde se obtendrá el interruptor con lo que se tendrá que considerar las siguientes dimensiones:

- Interruptor que sea capaz de conectar 2 superficies separadas $400 \mu m$.
- Un ancho máximo de $600 \mu m$.
- Máximo $11 \mu m$ grosor de lámina de aluminio.
- Permita el paso de señales en la banda X (8 a 12 GHz).

En los siguientes apartados se muestra los tres diseños de interruptores realizados durante todo el desarrollo así también sus características físicas (dimensiones) y datos como: constante de resorte, voltaje de actuación y tiempo de conmutación.

3.3.1. Interruptor V1

Primer interruptor diseñado, como se puede apreciar en la Figura 3.2 tiene dos soportes laterales y la viga voladiza al centro. Los dos soportes laterales son para lograr tener una estructura rígida y en cierta medida pueda ser manipulable.

De abajo hacia arriba se tiene el sustrato (el cual por tener un grosor muy superior a las demás capas se omitió en la imagen), sobre él las secciones de cobre (y el electrodo del interruptor) que se desean interconectar, sobre éstas una capa de aislante (BCB) en color rojo, la cual protege de provocar corto circuito en la seal de actuación del interruptor y permite el fácil paso de la señal RF. Sobre esta capa se encuentra la de pistas, las cuales se utilizan para la alimentación del interruptor. Finalmente en color morado se encuentra la estructura de la viga voladiza, apoyada con las anclas laterales en la capa de pistas y dejando libre la viga voladiza. (La escala en el eje Z ha sido exagerada 5 veces para su mejor visualización.)

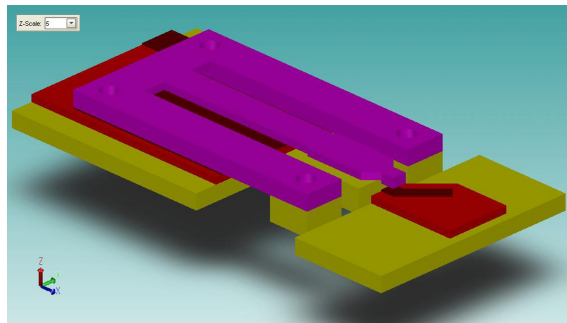


Figura 3.2: Isométrico de interruptor V1 - exageración en el eje z x05

3.3.2. Interruptor V2

Segundo Interruptor diseñado, éste es basado en el anterior (V1). Cuenta con tres orificios de sujeción, uno de ellos de mucho mayor tamaño. El área correspondiente a dichos orificios es 400 % mayor respecto a la versión 1, esto es con el fin de facilitar su futura colocación en el desplazador de fase.

De igual forma se encuentran las capas (Figura 3.3): substrato (omitida en la imagen), capa de cobre (amarillo), capa de BCB (rojo), capa de pistas (café) y la estructura de la viga voladiza (morado). (Nuevamente la escala en el eje Z ha sido exagerada 5 veces para su mejor visualización.)

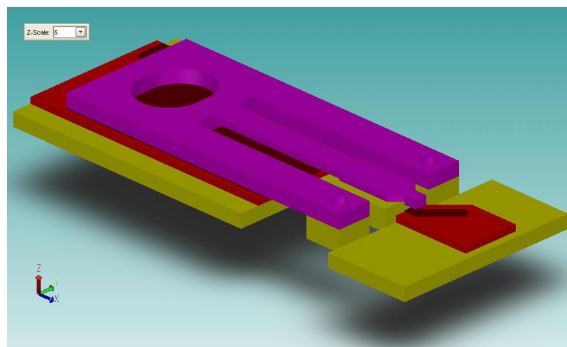


Figura 3.3: Isométrico de interruptor V2 - exageración en el eje z x05

3.3.3. Interruptor V3

En esta versión del interruptor, el problema de rigidez para su fácil manipulación se ataca formando una estructura de una sola ancla y una viga, en busca de mantener un voltaje de actuación bajo se tomó la decisión de incrementar el área entre electrodos en un 370 %. Así también la longitud de la viga $50 \mu m$ aproximadamente, 5.5 % más que la versión 2.

En la sección del anclaje se tiene un orificio en forma de herradura, pensando en el momento del montaje, lo que facilitará el retirar la punta que aplique la sustancia

fijadora de manera horizontal y evitando se levante todo el interruptor adherido a dicha punta.

Una vez más (Figura 3.4) se tiene el sustrato, el cobre (lo que simula ser el desplazador), el aislante, capa de cobre para las pistas y encima la estructura de la viga, en este caso solo formada por el anclaje y la viga. (La escala en el eje Z ha sido exagerada 5 veces para su mejor visualización.)

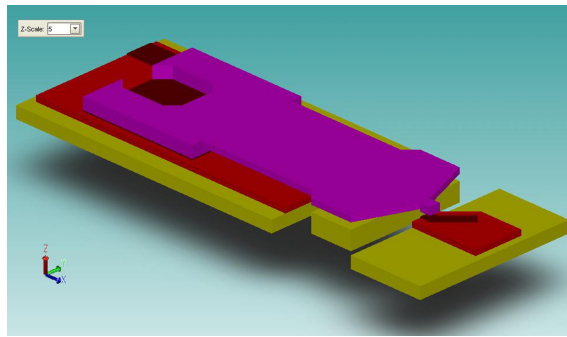


Figura 3.4: Isométrico de interruptor V3 - exageración en el eje z x05

3.4. Análisis Electro-mecánico

Entre los parámetros fundamentales en los conmutadores RF MEMS se encuentra el voltaje de actuación o también llamado voltaje “Pull-in”, que es el voltaje mínimo requerido para que el interruptor conmute. Para los interruptores de tipo viga voladiza se puede tener una buena aproximación de éste con la ecuación 3.1. [6]

$$V_p = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\epsilon_0 A}} \quad [V] \quad (3.1)$$

Donde k es la constante de resorte, g_0 es la separación nominal entre electrodos, ϵ_0 es la constante de permitividad del vacío y A es el área efectiva paralela de los electrodos.

Para el cálculo de la constante de resorte de la estructura se utiliza la ecuación 3.2. [6]

$$k = \frac{2E/(1 - \nu^2)wt^3}{3L^3} \quad [N/m] \quad (3.2)$$

De donde E es el modulo de Young del material de la viga, en este caso aluminio, ν es el coeficiente de Poisson del material, w el ancho de la viga, t el grosor y L la longitud de la misma.

En las figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se encuentra la vista superior de cada uno de los interruptores con las cotas de sus dimensiones. Con esto y los datos proporcionados en secciones anteriores se realizó el cálculo, usando las ecuaciones (3.1) y (3.2), del voltaje de actuación y constante de resorte correspondiente a cada uno de los interruptores. Los resultados se muestran en el cuadro 3.1.

Cuadro 3.1: Constante de Resorte y Voltaje de Jale

Interruptor	k [N/m]	V_p [V]
v01	1.00	16.7
v02	1.00	15.9
v03	3.49	15.1

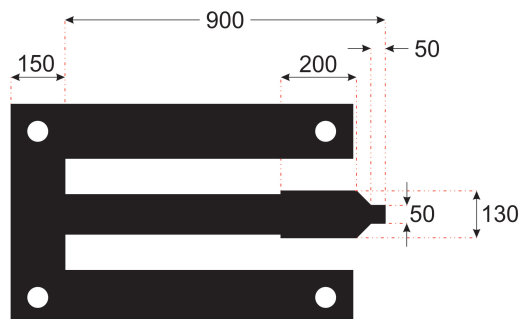


Figura 3.5: Dimensiones del Interruptor v01 (todas en μm)

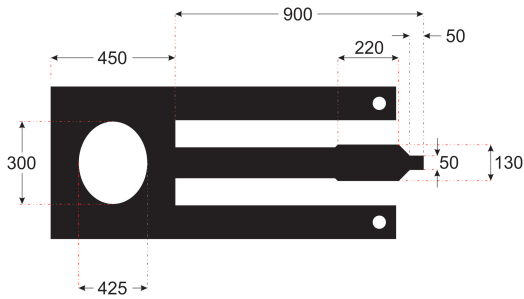


Figura 3.6: Dimensiones del Interruptor v02 (todas en μm)

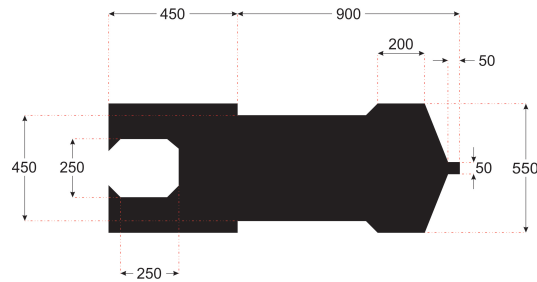


Figura 3.7: Dimensiones del Interruptor v03 (todas en μm)

3.5. Análisis utilizando CoventorWare

Para validar los resultados obtenidos se realizaron simulaciones en un software especializado en estructuras MEMS, CoventorWare 2010. Este software nos permite simular estructuras MEMS en tres diferentes modos: Mecánico, Electrostático y Electromecánico. Dicho software utiliza el método de elementos finitos, por lo que una vez modelada la estructura e indicados los materiales de cada sección, se debe hacer un mallado de la misma. Entre más fino el mallado se tendrán más elementos de cálculo y el resultado de la simulación será más cercano a la realidad.

Cada estructura (interruptores V1-V3) se modeló y posteriormente se realizaron las simulaciones para obtener capacitancias, voltaje de jale y voltaje de liberación.

A continuación se muestra el proceso solo para la versión 3 debido a que es similar para todas las demás. El proceso que se muestra tiene la finalidad de diseñar de forma ideal el interruptor. Esto es debido a que se plantea un proceso diferente a lo que se puede realizar en el simulador, el cual trabaja con procesos convencionales en una sola oblea y no tiene ningún proceso de soldadura o adhesión de estructuras, como es el que se pretende usar en la fabricación.

3.5.1. Materiales

En primer instancia se deber revisar y actualizar la base de datos de materiales. El cuadro 3.2 muestra los valores de los materiales considerados y no presentes en la base de datos por defecto. Los valores del dieléctrico BCB fueron tomados de la hoja de datos del fabricante [2].

Cuadro 3.2: Materiales

Material	Densidad [Kg/μ^3]	Cte. Dieléctrica
BCB	1.05E-15	2.5
BPSG		8

3.5.2. Proceso

En esta etapa se indica en forma cronológica cada proceso a utilizar en la fabricación. Como ésta es una simulación para obtener ciertos valores claves y se pretende utilizar un proceso propio diseñado por el grupo de trabajo del Laboratorio UNAMems, los procesos simulados se usaron de manera indiferente aún sabiendo que no se podría fabricar en la realidad de esta manera. Lo que se buscó es tener de forma virtual la estructura y materiales del interruptor y con esto poder simular su comportamiento electromecánico. En el capítulo 5 se explicará el proceso de fabricación.

Number	Step Name	Layer Name	Material Name	Thickness	Mask Name	Photoresist	Depth	Mask Offset	Sidewall Angle
0	Substrate	Substrate	GaAs	203	Sustrato				
1	Planar Fill	Linea	COPPER	17					
2	Straight Cut				ReduccionLinea	+	6	0	0
3	Straight Cut				LineaActuador	+		0	0
4	Planar Fill	BaseBCB	BCB01	0					
5	Straight Cut				Isla	+		0	0
6	Straight Cut				Isla	-	1	0	0
7	Planar Fill	Pista	COPPER	0					
8	Straight Cut				MPista	+		0	0
9	Planar Fill	Sacrificio	BPSG	6					
10	Straight Cut				Saliente	-	2	0	0
11	Straight Cut				Anda	-	6	0	0
12	Planar Fill	Switch	ALUMINUM	5					
13	Straight Cut				Mswitch	+		0	0
14	Planar Fill	Sacrificio2	BPSG	0					
15	Release Wet Etch		BPSG						

Figura 3.8: Procesos utilizados

3.5.3. Máscaras

La tercer etapa es el diseño de máscaras a utilizar durante el proceso, dependiendo de la resina o material, sensible a la luz UV, (positivo o negativo) se debe prever el tipo de máscara. Para resinas tipo positivas se debe proteger de la luz UV la sección que se conservará de resina, mientras que en las de tipo negativo es lo contrario, se debe proteger la sección que se removerá de ella. El software CoventorWare se configuró para uso de resinas positivas por lo que las máscaras fueron diseñadas bajo este concepto.

En la figura 3.9 se muestran las ocho máscaras utilizadas en toda la fabricación. Las cuales son:

- Máscara 1 - Definición del sustrato.
- Máscara 2 - Formación de electrodo.
- Máscara 3 - Formación de ranura.
- Máscara 4 - Capa de aislante BCB.
- Máscara 5 - Formación de pistas de alimentación y contacto del interruptor.

- Máscara 6 - Formación del anclaje.
- Máscara 7 - Punta de contacto del interruptor.
- Máscara 8 - Definición de la viga.

3.5.4. Modelo / Mallado

Una vez concluidas las etapas anteriores el software es capaz de crear una vista tridimensional del dispositivo fabricado. Y a partir de esta estructura se realiza el mallado de la misma.

Debido a que la estructura en los modelos versión 1 y 2 se tiene segmentos circulares se optó por utilizar un mallado en tetraedrones. CoventorWare posee diferentes tipos de mallado por lo que se debe seleccionar basándose en la geometría del dispositivo. En este caso se optó por usar el mismo tipo de mallado para las tres versiones con un tamaño de elemento de $30\ \mu\text{m}$. Por cuestiones de procesamiento se omite el sustrato en el mallado (debido a que este es demasiado grande).

En la figura 3.10 observamos el resultado del mallado del interruptor sobre el cual trabajará el simulador.

3.5.5. Simulador

Como se mencionó con anterioridad, este software puede simular la estructura de forma mecánica, electrostática y electromecánica. Por lo que configurando correctamente todos los parámetros, se puede simular la estructura ante diferentes estímulos, en nuestro caso se utilizó la herramienta CoSolveEM para simular la estructura de forma electromecánica. Se configura un estímulo de voltaje sobre la estructura del

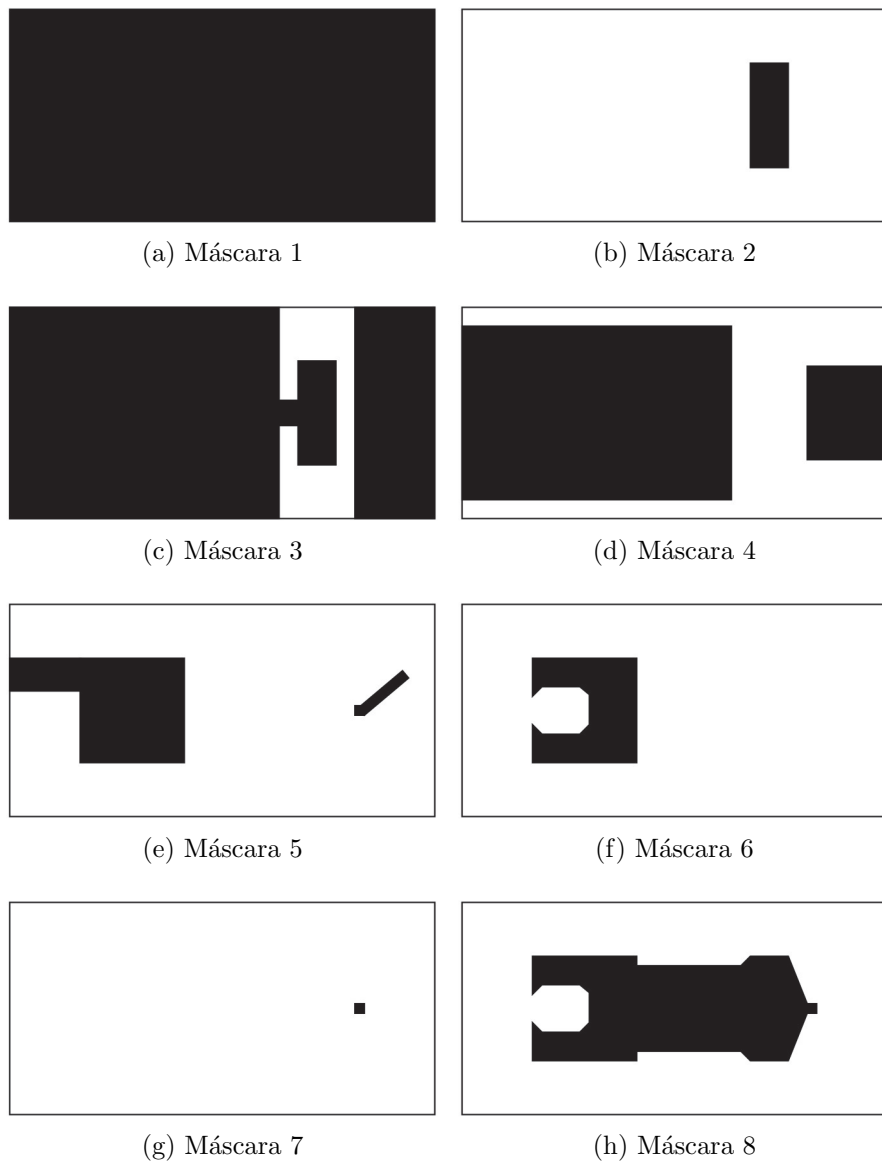


Figura 3.9: Máscaras utilizadas en la fabricación del interruptor v3

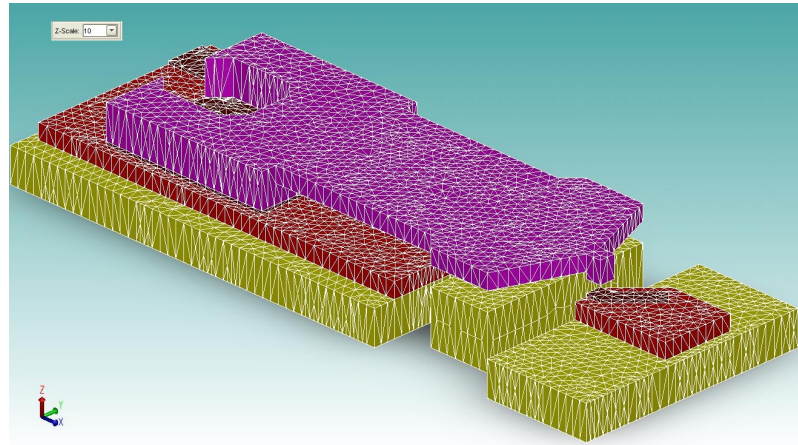


Figura 3.10: Interruptor V3 - Mallado

interruptor y el valor de tierra o 0 Volts en la base de cobre (correspondiente al electrodo situado por debajo del interruptor).

Un proceso muy utilizado para conocer si el mallado es suficientemente fino es empezar con un mallado grueso y repetir las simulaciones con un mallado más fino cada vez, hasta que la variación en las simulaciones sea tan pequeña como una cifra (épsilon) definida.

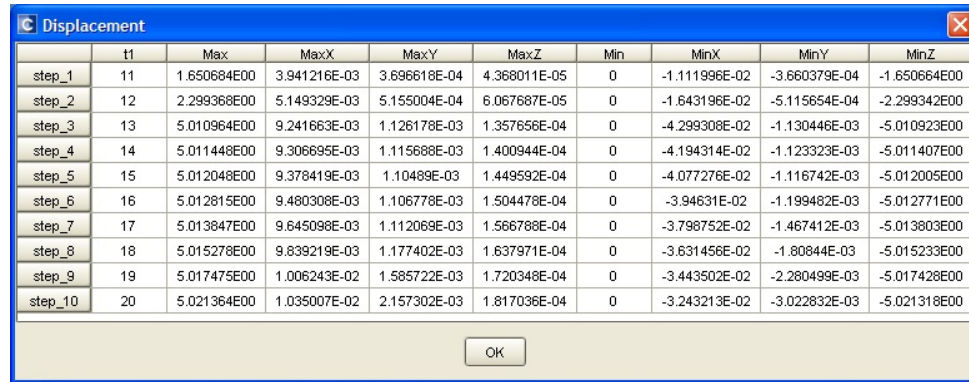
3.5.6. Resultados de simulaciones

El software CoventorWare es utilizado para la obtención de los parámetros de voltaje de actuación, voltaje de liberación y capacitancia.

Estos valores fueron obtenidos con el Interruptor V3.

Para la obtención de voltaje de Pull-in se programó una simulación paso a paso de 11 a 30 volts, en donde el electrodo por debajo del interruptor se mantiene a 0 Volts y la viga es la que recibe el voltaje de polarización. Finalmente se obtiene un voltaje de actuación menor a 13 volts. En la Figura 3.11 se muestra la tabla,

resultado de CoventorWare, de los 10 pasos; de los cuales en el tercero, a los 13 volts, el interruptor ya ha hecho contacto. A pesar de que el voltaje calculado por simulación es de 13 volts siempre es recomendable considerar un voltaje ligeramente mayor, aproximadamente 1.3 veces el voltaje calculado. [10]



	t1	Max	MaxX	MaxY	MaxZ	Min	MinX	MinY	MinZ
step_1	11	1.650684E00	3.941216E-03	3.696618E-04	4.368011E-05	0	-1.111996E-02	-3.660379E-04	-1.650664E00
step_2	12	2.299368E00	5.149329E-03	5.155004E-04	6.067687E-05	0	-1.643196E-02	-5.115654E-04	-2.299342E00
step_3	13	5.010964E00	9.241663E-03	1.126178E-03	1.357656E-04	0	-4.299308E-02	-1.130446E-03	-5.010923E00
step_4	14	5.011448E00	9.306695E-03	1.115688E-03	1.400944E-04	0	-4.194314E-02	-1.123323E-03	-5.011407E00
step_5	15	5.012048E00	9.378419E-03	1.10489E-03	1.449592E-04	0	-4.077276E-02	-1.116742E-03	-5.012005E00
step_6	16	5.012815E00	9.480308E-03	1.106778E-03	1.504478E-04	0	-3.94631E-02	-1.199482E-03	-5.012771E00
step_7	17	5.013847E00	9.645098E-03	1.112069E-03	1.566788E-04	0	-3.798752E-02	-1.467412E-03	-5.013803E00
step_8	18	5.015278E00	9.839219E-03	1.177402E-03	1.637971E-04	0	-3.631456E-02	-1.80844E-03	-5.015233E00
step_9	19	5.017475E00	1.006243E-02	1.585722E-03	1.720348E-04	0	-3.443502E-02	-2.280499E-03	-5.017428E00
step_10	20	5.021364E00	1.035007E-02	2.157302E-03	1.817036E-04	0	-3.243213E-02	-3.022832E-03	-5.021318E00

Figura 3.11: Simulación Desplazamientos

El software es muy ilustrativo, tanto así que nos presenta la visualización de cada uno de los pasos en una vista 3D. En la Figura 3.12 se muestran los primeros 4 pasos con mediciones en micrómetros y colores en donde el azul representa movimiento nulo y el rojo el máximo movimiento reportado en la simulación. Otra ventaja de este software es la posibilidad de generar un video usando cada uno de los pasos de la simulación.

Por último se calculó la capacitancia, de forma analítica se aproximó como si solo existieran dos placas paralelas, correspondientes a la punta de contacto y a la base. Dicha área es la que podemos observar en la punta del interruptor de $50 \times 50 \mu m$ como se aprecia en la figura 3.7. Para la aproximación se utilizó la fórmula de capacitancia entre placas paralelas (3.3).

$$C = (\epsilon_0 * \epsilon_r * A)/d \quad (3.3)$$

En donde ϵ_0 es la permitividad en el espacio libre (vacío), ϵ_r la permitividad relativa, A área de traslape entre las placas paralelas y d distancia entre placas.

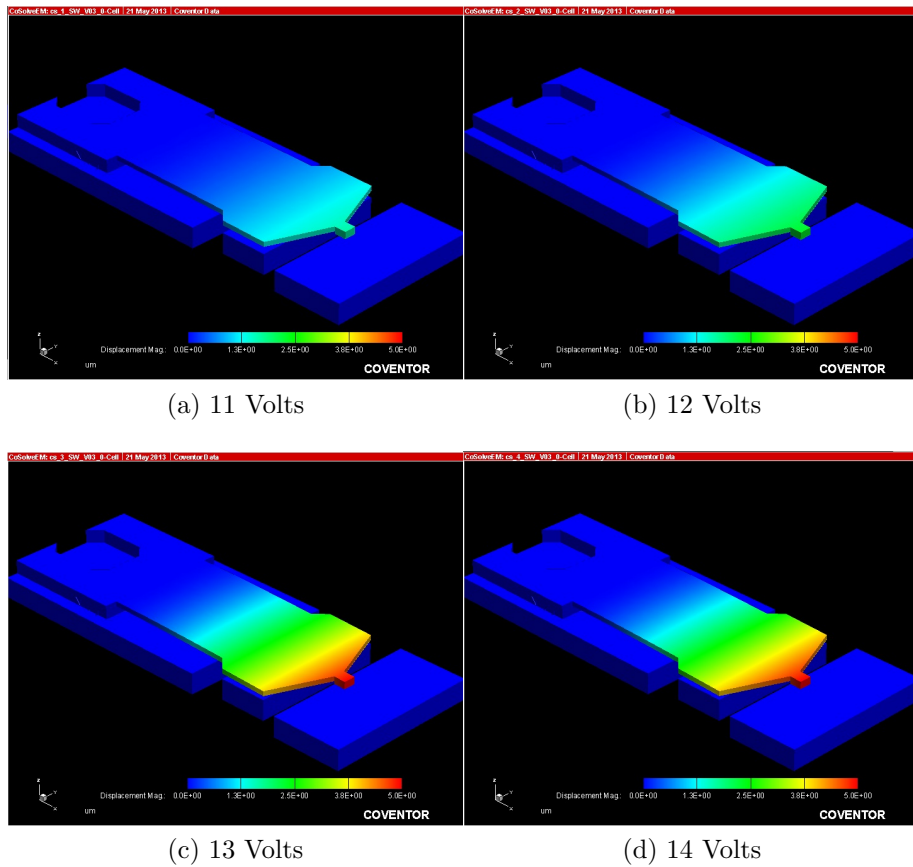


Figura 3.12: Simulación 3D

Calculando para los valores, correspondientes al interruptor versión 3, resumidos en el cuadro 3.3 se obtiene una capacitancia de 11 fF.

Cuadro 3.3: Valores para calculo de capacitancia interruptor V3

Parametro	Valor
ϵ_0	$8.854187817 \times 10^{-12}$ F/m
ϵ_r	1
A	$50 \mu m \times 50 \mu m$
d	$6 \mu m$

En CoventorWare 2010 se realizó la simulación de capacitancias obteniéndose un valor, entre interruptor y placa de contacto, de 29 fF. Al compararlo con el valor calculado analíticamente se aprecia que es 3 veces mayor pero aún en el mismo orden de dimensión.

3.6. Circuito de Polarización

Un punto muy importante a la hora de diseñar un interruptor que pueda ser usado en dispositivos reales es la polarización del mismo. El interruptor presentado es para trabajar en la banda X (8 a 12GHz) y es de los conocidos tipo serie en donde si está en estado apagado (off) la señal no puede cruzar y mantiene al circuito en estado abierto por lo que al cambiarlo al estado encendido (on) la señal podrá cruzar a través de él.

Al tener un interruptor tipo serie se debe tener la precaución de tener separadas la señal a conmutar (en este caso en Banda X) y la señal de polarización (de baja frecuencia). Para realizar una correcta polarización se diseñó un interruptor serie tipo capacitivo, en donde la señal de RF (10 GHz) se separa de la señal de control. En la Figura 3.13 se muestra como será el paso de la señal RF en color azul. La cual cruzará por el interruptor sin ocasionar corto circuito con la señal de polarización.

En la imagen se observa las secciones 1, 2, 3 y 4 son conductoras en tanto las de color rojo son aislantes (BCB).

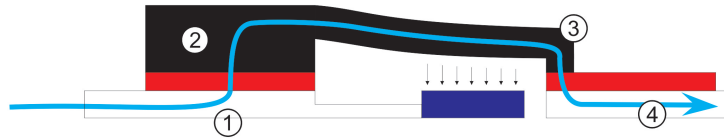


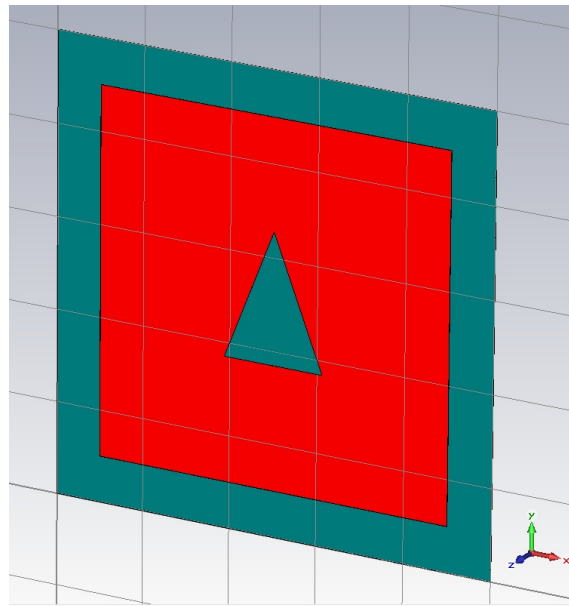
Figura 3.13: Separación de señal RF y señal de control

Para lograr que la señal a 10 GHz cruce por el interruptor se deben diseñar filtros paso banda (sintonizados a 10 GHz) entre las secciones 1 y 2 así como entre 3 y 4 Figura 3.13. El diseño de estos filtros se realiza a través del uso de stubs abiertos de longitud $\lambda/4$. Lo que ocasiona que el inicio del stub se comporte como corto circuito a la frecuencia cuya longitud de onda es λ .

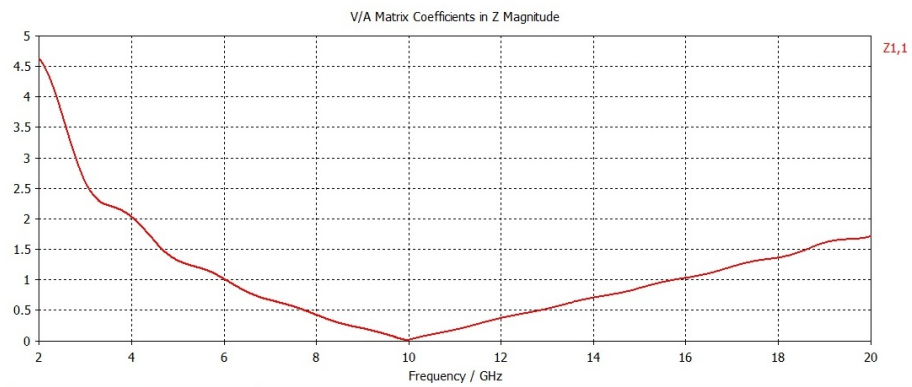
Se utilizan stubs triangulares para tener un intervalo de frecuencias mayor y el filtro no sea exclusivamente a 10 GHz o en un ancho de banda muy estrecho. El stub fue diseñado y optimizado en software especializado en electromagnetismo (en la Figura 3.14(a) se muestra el stub así como el puerto ubicado en la punta del mismo). La punta superior del triángulo es en donde específicamente se forma el corto circuito a 10 GHz.

La figura 3.14(b) muestra la magnitud de $Z_{1,1}$, en donde se observa un comportamiento tipo filtro pasobanda sintonizado a 10 GHz. Finalmente podemos considerarlo una impedancia igual a cero en la banda X (8 a 12 GHz) y la impedancia aumenta según nos alejamos de la misma. Teniendo una impedancia muy alta para bajas frecuencias.

Finalmente se agregan pistas de polarización con un ancho de cien micrómetros y un micrómetro de grosor considerando usar la técnica de deposición de cobre por evaporación al vacío. En la Figura 3.15 se pueden observar dichas pistas en color gris formadas por la base en la que se situará el interruptor, dos stubs triangulares



(a) Isométrico



(b) Impedancia del Stub vs Frecuencia

Figura 3.14: Stub triangular para filtro a 10 GHz

y la salida a conexión. Se tienen dos stubs triangulares debido a que se debe formar un corto (a la frecuencia de microondas de nuestro interés - banda X) tanto en la base del interruptor con la sección externa del anillo, así también en la punta del interruptor (al ser conmutado a su estado cerrado) como se aprecia en la Figura 3.13.

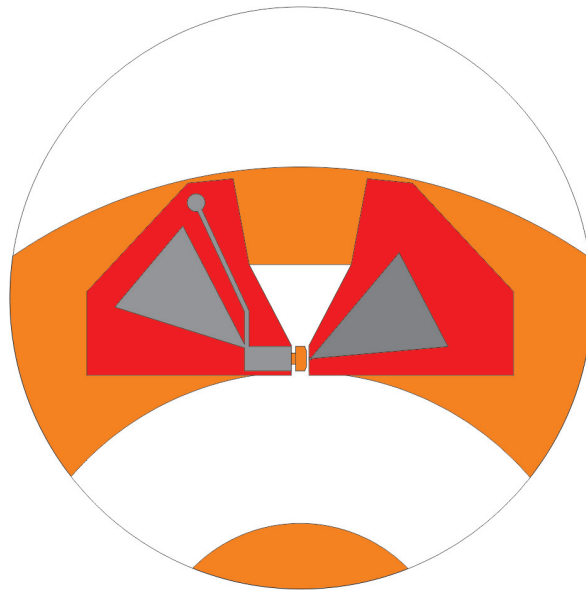


Figura 3.15: Diseño de pistas para polarización de Interruptor

3.7. Conclusiones

1. Se diseñaron tres interruptores tipo viga voladiza, los cuales cumplen los requerimientos en cuanto a dimensiones establecidas para su uso.

2. Se planteó la solución a uno de los problemas habituales, la polarización del interruptor. Dicho circuito de polarización permite separar satisfactoriamente la señal de control de la señal RF en la Banda X.

3. Se realizó el cálculo de voltaje de actuación y se verificó por medio de simulación en el software especializado CoventorWare 2010. En ambos casos se obtuvieron valores similares y menores a 15 Volts, éste es un voltaje de actuación bajo por lo que se reducirán etapas de potencia en la polarización de los mismos.

4. La capacitancia obtenida para cada uno de los interruptores en estado abierto fue menor a 30 fF.

Capítulo 4

Desplazador de Fase

4.1. Principio de operación

El dispositivo completo del desplazador de fase de 2-bits es un diafragma controlado por 4 interruptores. Este diafragma de control es situado en la sección transversal de una guía de onda circular la cual es terminada en corto circuito. El diafragma de control contiene un resonador de anillo ranurado y cuatro stubs radiales. Cuatro interruptores son conectados en paralelo a los stubs. En cualquier momento dado un diodo es conmutado a su estado apagado (abriendo el circuito) mientras los otros tres son conmutados al estado encendido (cerrando el circuito). Figura 4.1, [9].

Se hace incidir una onda de polarización circular en el diafragma, refiriendonos a la Figura 4.1, se tiene que si el interruptor abierto es el correspondiente al stub 2 la componente vertical de una onda de polarización circular que viaja en dirección del desplazador puede atravesar el mismo, ya que se encuentra a la frecuencia de resonancia del anillo (ω_p), y en este caso el stub 2 es invisible a la onda incidente. Por lo que la onda cruza el anillo y avanza $\lambda_g/4$ hasta encontrarse con la pantalla en donde es reflejada. Finalmente se tiene que la componente vertical de la onda

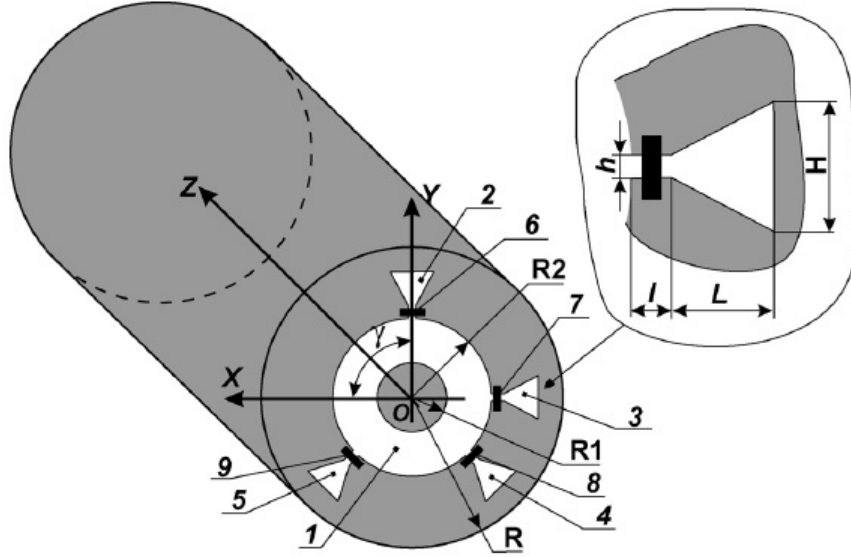


Figura 4.1: Desplazador de fase de 2 bits [9]

incidente en el diafragma tiene un coeficiente de reflexión cercano a 1.

Para el caso del Modo TE_{11} con plano de polarización perpendicular al stub 2, la onda incidente excitará al stub 2 por lo que la inductancia del metal exterior del anillo y la capacitancia del interruptor en estado apagado forman un circuito serie resonante. Por lo que ahora, a la frecuencia de resonancia del anillo el diafragma de control es equivalente a un corto circuito. Finalmente se tiene que el coeficiente de reflexión es cercano a -1 para esta polarización de la onda incidente.

Asumiendo que una onda de polarización circular se está propagando hacia el diafragma de control en la dirección de z

$$\vec{E}_i = E_0(\vec{a}_x + j\vec{a}_y)e^{-j\beta z} \quad (4.1)$$

donde E_0 es la magnitud de la onda incidente, \vec{a}_x y \vec{a}_y son los vectores unitarios en las direcciones x y y respectivamente, β es la constante de propagación del modo

TE_{11} , y $j = \sqrt{-1}$.

La onda reflejada, E_r , puede ser presentada como la suma de dos componentes

$$\vec{E}_r = 0.5E_0e^{2j\gamma}(\Gamma_{\perp} - \Gamma_{\parallel})(\vec{a}_x + j\vec{a}_y)e^{j\beta z} + 0.5E_0(\Gamma_{\perp} + \Gamma_{\parallel})(\vec{a}_x + j\vec{a}_y)e^{j\beta z} \quad (4.2)$$

donde Γ_{\perp} es el coeficiente de reflexión ortogonal, Γ_{\parallel} es el coeficiente de reflexión paralelo y γ es el ángulo entre el eje OX y el stub en donde el interruptor apagado está instalado.

El primer componente de 4.2 es una onda de polarización circular con la misma dirección de rotación que el vector E_i (onda incidente). La fase de esta onda controlada depende de la posición angular del stub con el interruptor apagado. El segundo componente es la onda no deseada con fase no controlada. Para cancelar esta onda no deseada es necesario asegurar la condición (4.3).

$$\Gamma_{\perp} = -\Gamma_{\parallel} \quad (4.3)$$

Dada la posición angular de los stubs 2-5 (90,180, 225 y 315 grados) se tendrá las siguientes ondas de polarización circular reflejadas: 180, 360(0), 450(90), 630(270) grados. Consiguiendo 4 fases diferentes separadas 90 grados cada una.

4.2. Análisis por simulación

Se realizaron las diferentes simulaciones de la estructura presentadas a continuación en software especializado en electromagnetismo. Cabe aclarar que solo el tercer

interruptor es mostrado en este desarrollo de optimización, aunque simulaciones de los otros dos diseños también fueron realizadas mostrando resultados similares (la mejora significativa entre interruptores se debió a la fabricación y pensando en su posterior colocación en el desplazador físico.

Las dimensiones fueron ajustadas en una serie de simulaciones en busca de optimizar el desplazador, partiendo de las expresadas en el artículo [9], mostradas en el cuadro 2.2.

4.2.1. Desplazador de fase con 1 Stub

Para la realización de las simulaciones del desplazador de fase con el interruptor MEMS diseñado, primero se trabaja con el anillo ranurado y sólo un stub en la dirección y , correspondiente al stub 2 mostrado en la Figura 2.8. Se coloca sobre el mismo el interruptor en su estado apagado (abierto) con la finalidad de considerar la interacción electromagnética ocasionada por él al stub y al anillo ranurado. Esta membrana se coloca dentro de una guía de onda circular y se excita con una onda de polarización circular en dirección $-z$ en donde el modo TE_{11} con polarización vertical(dirección y) debe cruzar y el modo TE_{11} con polarización horizontal (dirección x) debe reflejarse en el diafragma de control, a la frecuencia deseada (10 GHz). La membrana a utilizar se muestra en la figura 4.2.

En la figura 4.3(a) se muestra la configuración que se tiene en los puertos de análisis, en donde se observa el puerto 2 como puerto de excitación y el puerto 1, en la parte posterior de color azul, " sería " el de salida. En la figura 4.3(b) se muestra la parte interna en donde se tiene solo el diafragma de control sin la placa reflectora y un solo stub en el mismo.

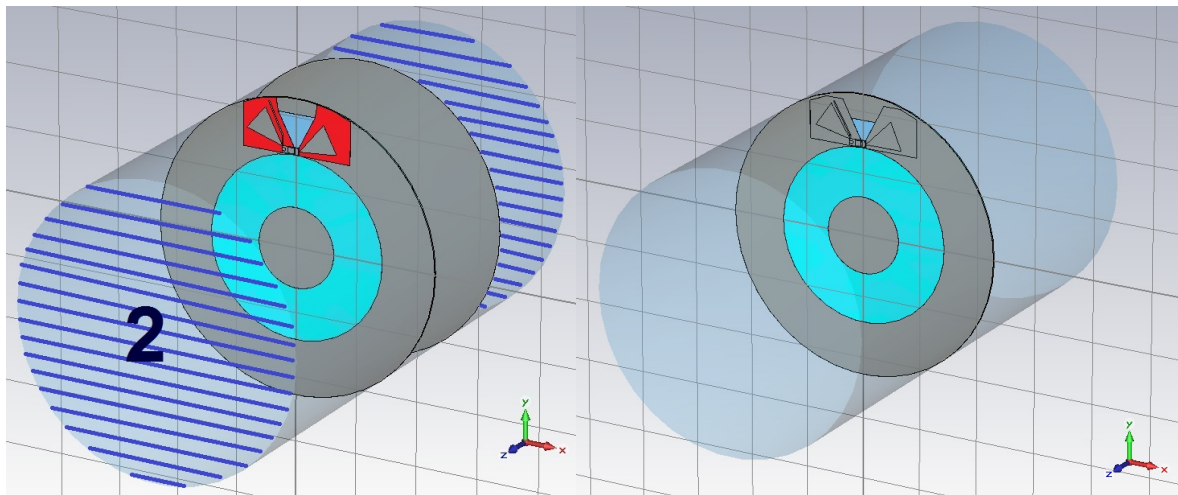
Se realiza un proceso de simulaciones para la optimización de las dimensiones de los elementos del desplazador, específicamente la longitud del stub ranurado y el grosor de la ranura-anillo. Al modificar la dimensión del stub ranurado se modifica la



Figura 4.2: Vista superior del Desplazador de 1 Stub con interruptor MEMS

longitud que la señal tiene que recorrer alrededor de él y la frecuencia de resonancia se puede ajustar. Al cambiar la dimensión del grosor del anillo se ajusta la capacitancia presente entre el centro del anillo y la parte exterior, también se modifica la longitud que la señal tiene que recorrer alrededor del anillo. Con esto se logra ajustar la frecuencia de resonancia del anillo y su comportamiento en las frecuencias cercanas a ésta.

En la Figura 4.4 se presenta la gráfica, de los parámetros S observándose frecuencia contra magnitud de la primera y la última simulación de varias corridas realizadas para ajustar las frecuencias de resonancia y lograr que el modo horizontal se refleje a la misma frecuencia en el que el modo vertical atraviesa la membrana. En la figura se maneja la siguiente nomenclatura: entre paréntesis está el modo de la señal y fuera de ellos el puerto de entrada y de salida [PuertoEntrada(modos)PuertoSalida(modos)]. Por último es importante aclarar la polarización en cada modo. El modo 1 tiene polarización horizontal y el modo 2 tiene polarización vertical. Por lo que se observa la línea correspondiente a $S_{2(1)2(1)}$ en donde es la onda reflejada por el diafragma de control para el modo con polarización (1)-horizontal. De igual manera la $S_{2(2)2(2)}$ se entiende como el parámetro S_{22} para el modo (2)-vertical.



(a) Puertos en guía de onda para simulación. (b) Isométrico del Desplazador de 1 stub con interruptor MEMS.

Figura 4.3: Simulación - 1er ajuste de parámetros.

En el caso mostrado en la Figura 4.4(a) se tiene una frecuencia de resonancia de 10.67GHz para el modo 2 y de 11.02GHz para el modo 1. Como se busca igualar estas dos frecuencias de resonancia se recorrerá la frecuencia de resonancia correspondiente al modo 1 modificando la longitud del stub. En la figura 4.4(b) se observa claramente como las dos frecuencias de resonancia han sido ajustadas a 10.67GHz. Un resumen de las simulaciones más significativas se tiene en el cuadro 4.1, en donde H es la longitud del stub y L el ancho del mismo(figura 2.8), y la frecuencia de resonancia para el modo 1-horizontal (S1(1)2(1)) y modo 2-vertical (S2(2)2(2)).

Cuadro 4.1: Resultados de simulación. Desplazador 1 stub sin pantalla de corto.

Simulación	H [μm]	L [μm]	S2(2)2(2) [GHz]	S1(1)2(1) [GHz]
1	2095	1620	10.67	11.02
2	2280	1800	10.67	10.52
3	2235	1750	10.67	10.64
4	2225	1740	10.67	10.67

Ahora lo que se tiene que realizar es colocar la pantalla de corto a $\lambda/4$ y verificar la diferencia de fase entre las señales sea de 180 grados ocasionada por el modo vertical

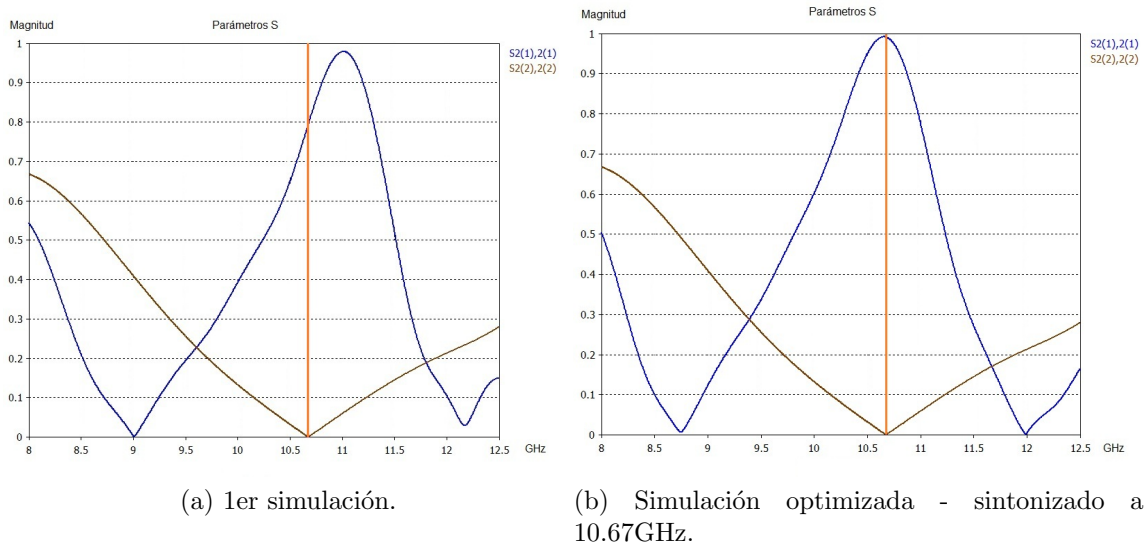


Figura 4.4: Simulación - 1er ajuste de parámetros.

que puede cruzar y recorre $\lambda/4$ hasta el corto, se refleja y recorre otros $\lambda/4$ en la frecuencia sintonizada, mientras que el modo perpendicular se refleja directamente en el diafragma.

La Figura 4.6(a) muestra la gráfica de la diferencia de fases para el rango de 8 a 12.5 GHz en donde se tiene una diferencia de fase de 180 grados en 10.71 GHz. A frecuencias menores la diferencia es menor y a mayores ésta aumenta. Para un buen diseño de desfasador el ancho de banda debe ser amplio por lo que se busca que la diferencia de fase se conserve en 180 grados en un gran rango de frecuencias, si es posible en toda la banda X (8-12GHz).

Para lograr un ancho de banda mayor se cambió el grosor del anillo. Se reduce su grosor modificando el radio interno (R1) de $3100\mu m$ a $3400\mu m$ y el radio externo (R2) de $7100\mu m$ a $6800\mu m$. Esto altera toda la optimización que se hizo con anterioridad, por lo que se debe volver a sintonizar sin la placa de corto para las nuevas dimensiones del anillo.

Ahora con los nuevos parámetros mencionados en el cuadro 4.2 se vuelve a simular

Cuadro 4.2: Dimensiones del diafragma de control.

$R1$	$R2$	L	l	H	h	R
3.4 mm	6.8 mm	1.74 mm	0.6 mm	2.22 mm	0.4 mm	11.4 mm

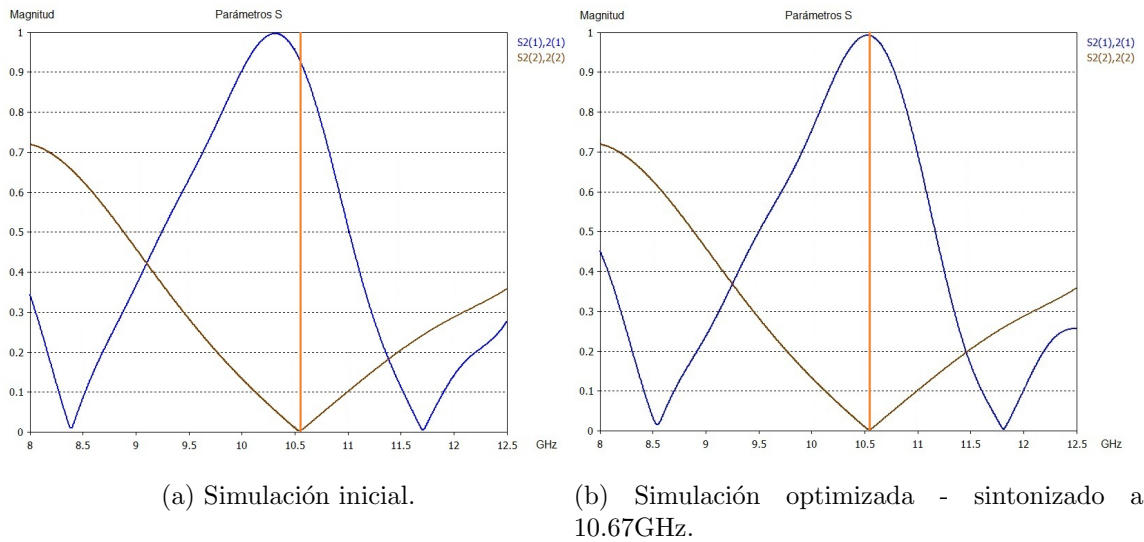
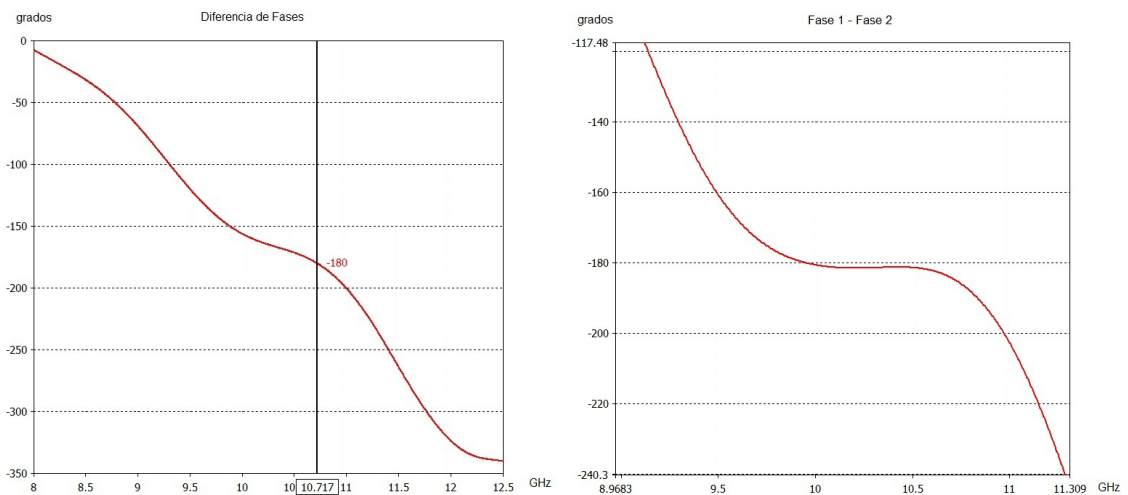


Figura 4.5: Simulación - 2do ajuste de parámetros.

sin la pantalla de corto y se optimiza para el nuevo valor de resonancia del desplazador en este caso de 10.54 GHz. En la Figura 4.5 se muestra al primera y última simulación y en el cuadro 4.3 se muestra el resumen de las mismas, mostrando los cambios entre cada una de las corridas realizadas.

Cuadro 4.3: Resultados de 2da corrida. Desplazador 1 stub sin pantalla de corto.

Simulación	H [μm]	L [μm]	S2(2)2(2) [GHz]	S1(1)2(1) [GHz]
1	2290	1810	10.54	10.31
2	2090	1620	10.54	10.87
3	2195	1715	10.54	10.59
4	2210	1730	10.54	10.54



(a) 1er corrida - Diferencia de fases.

(b) 2da corrida - Diferencia de fases.

Figura 4.6: Simulaciones de diferencia de fases.

Ya sintonizadas las frecuencias a 10.54 GHz se coloca nuevamente la placa a $\lambda_g/4$ y se obtiene la diferencia de fases. En este caso se observa una diferencia de fase alrededor de 180 grados más uniforme en el intervalo de 9.8 a 10.7 GHz. El resultado de la simulación se tiene la gráfica mostrada en la Figura 4.6(b).

4.2.2. Desplazador de fase con 2 Stubs (1 bit)

A la estructura se le agrega un stub más para tener un desplazador de fase de 1 bit el cuál conmuta siempre dejando un interruptor abierto y el otro cerrado. La Figura 4.8 muestra la vista superior del diafragma con los 2 stubs y su correspondiente interruptor en cada uno de ellos. En este caso por el principio de cambio de fase de Fox en donde se obtiene un desplazamiento en la fase equivalente a 2γ , se tendrá el cambio de fase mostrado en el cuadro 4.4.

Para que se cumpla el principio de cambio de fase de Fox es necesario cumplir con la condición mostrada en la ecuación (4.3). Por lo que se debe comprobar la diferencia de fase entre el modo vertical y el modo horizontal corresponda a 180 grados en la banda de frecuencias deseada, con esto se logrará eliminar la onda no controlada. Por lo que se volvió a simular obteniendo la diferencia de fase entre los modos, en este caso se tiene un interruptor abierto y el otro cerrado. La Figura 4.7 muestra la diferencia de fase de 180 grados en la banda 9.7 a 10.7 GHz.

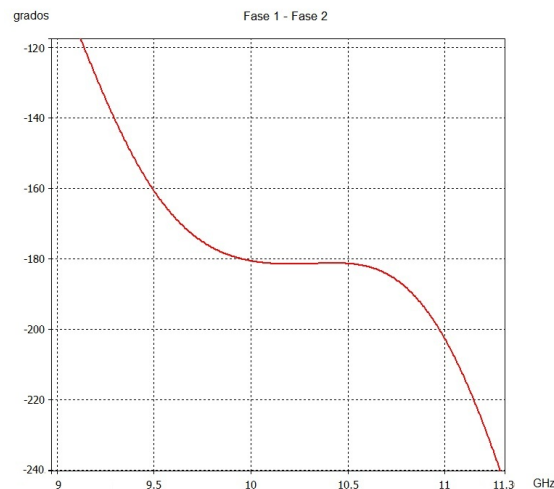


Figura 4.7: Desplazador de Fase 1 bit: Diferencia de fase entre modos.

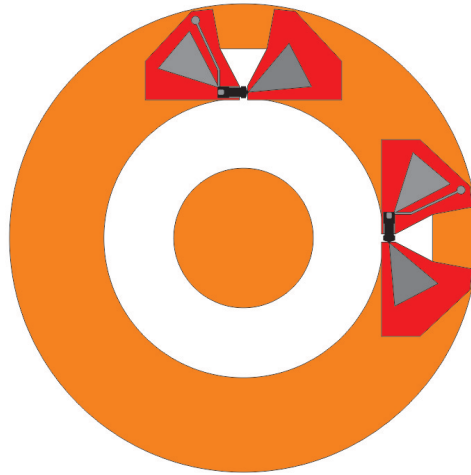


Figura 4.8: Vista superior del Desplazador de 1 Bit (2 stubs) con interruptores MEMS

Cuadro 4.4: Desfasamiento en desplazador de 1 bit.

Stub abierto	γ [grados]	Desplazamiento [grados]
1	90	180
2	180	0 (360)

4.2.3. Desplazador de fase con 4 Stubs (2 bits)

Para formar el desplazador de 2 bits se agregan 2 stubs más al de 1 bit. Dicho arreglo se muestra en la Figura 4.9 en una vista superior del diafragma de control. Por lo que los stubs se sitúan a un ángulo γ de 90, 180, 225 y 315 grados respectivamente. Y dado el principio de cambio de fase de Fox. Los desplazamientos de fase son de 2γ por lo que los ángulos quedan como se muestra en el cuadro 4.5. Para comprobar que se cumpla la condición mostrada en la ecuación (4.3) para el cambio de fase de Fox, se volvió a simular la diferencia de fases obteniéndose una gráfica prácticamente igual a la anterior. La cual muestra cómo se cumple con dicha condición en el mismo rango de frecuencias 9.7 a 10.7 GHz. La figura 4.10 muestra la gráfica de la diferencia de fase entre los modos vertical y horizontal, manteniéndose el ancho de banda de

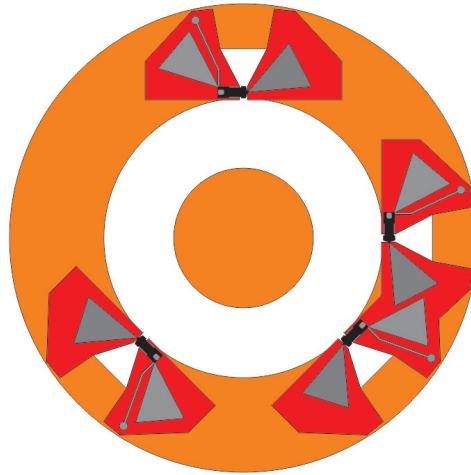


Figura 4.9: Vista superior del Desplazador de 2 bits con interruptores MEMS

1Ghz.

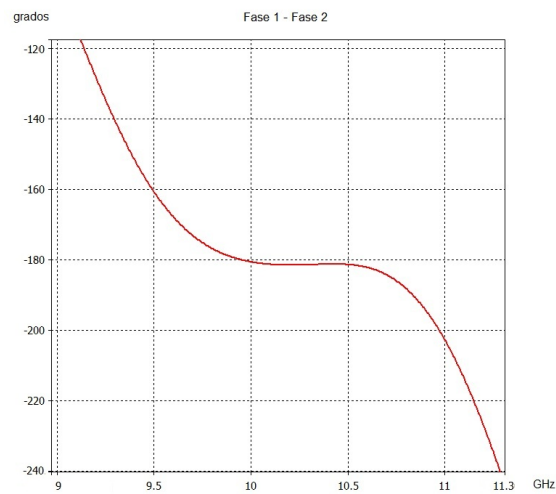


Figura 4.10: Desplazador de 2 bits: Diferencia de fase entre modos.

Cuadro 4.5: Desfasamiento en desplazador de 2 bits.

Stub abierto	γ [grados]	Desplazamiento [grados]
1	90	180
2	180	0 (360)
2	225	90 (450)
2	315	270 (630)

4.2.4. Conclusiones

1. Se rediseñó el diafragma de control presentado en [9] para su uso con el interruptor versión 3 presentado en el capítulo 3.
2. En el desplazador se cumplió el principio de cambio de Fox al tener una diferencia de fases entre los modos de la onda reflejada de 180 grados en la banda de 9.7 a 10.7 GHz. Lo que se aprecia en las figuras 4.8 y 4.9.
3. Finalmente se tiene el diseño por completo de un desplazador de fase de 2 bits utilizando interruptores RF MEMS para la banda X, el cual trabaja en un ancho de banda de 1GHz alrededor de 10.2 GHz.

Capítulo 5

Fabricación - Fabricación de la membrana del interruptor MEMS y diafragma de control del desplazador de Fase

En este capítulo se presenta el proceso de fabricación de la membrana del interruptor MEMS así como el diafragma de control del desplazador de fase de tipo reflectivo, esto se pudo llevar a cabo gracias al apoyo de la Facultad de Ingeniería de la UNAM (UNAMems) y el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), puesto que anteriormente ya se han construido varios interruptores MEMS y se tiene un proceso de fabricación definido y controlado.

Para fabricar la membrana se utilizó el proceso de fotolitografía, que consiste en transferir un patrón desde una máscara a la superficie de una oblea, es por eso que se diseñó y se realizó una máscara que permitió marcar el área que nos interesa proteger, posteriormente se aplica luz ultravioleta para trasladar el dibujo al material fotosensible, con esto solo queda cubierto el patrón que nos interesa y que no se

verá afectado cuando se retire el material sin cubrir.

El laboratorio especializado para este tipo de procedimientos fotolitográficos se encuentra ubicado en el centro CCADET, el laboratorio cuenta con el equipo necesario para comenzar con la fabricación del interruptor, como es la alineadora (marca ORIEL), el spinner para hacer depósitos de fotoresina, calentadores para hornear y la lámpara de UV.

Dado que se fabricará la sección de la viga voladiza (membrana) independientemente del desplazador, y es un proceso nuevo, se inició con la construcción de éste. Posteriormente se realizó el diafragma de control del desplazador de fase.

Los materiales que se utilizaron para fabricar la membrana del interruptor MEMS se muestran en el cuadro 5.1 y el equipo utilizado en el cuadro 5.2.

Cuadro 5.1: Materiales para la fabricación de la membrana del interruptor MEMS

Material
Lámina de aluminio comercial
Foto-resina AZ-9245
Revelador AZ-400K
Agua Bi-destilada
Acetona
Epóxico comercial

Cuadro 5.2: Equipo a utilizar en la fabricación del interruptor MEMS

Equipo
Spinner (CONVAC 1001)
Alineadora y Lámpara UV (ORIEL)
Calentadores
Microscopio con cámara
Campana de extracción

5.1. Fabricación de la membrana.

Se divide en dos el trabajo litográfico: la construcción de la membrana y la construcción del diafragma de control. Dado que se fabrica primero la membrana, pensando en su posterior colocación en el desplazador, se realizarán los pasos como si la fabricáramos desde la base hasta la parte superior. Es decir: se iniciará con el anclaje y finalmente la estructura correspondiente a la viga. Se fabrica de esta manera por la sencillez de su manufactura, utilizando solo procesos de ataque.

Al analizar el procedimiento de fabricación se redujeron los pasos a tres procesos fotolitográficos principales. Antes de comenzar algún proceso fotolitográfico, se tiene que limpiar muy bien la lámina de aluminio para no dejar algún residuo sobre ella.

Después de lavar y secar la lámina de aluminio es necesario adherirla a una superficie plana y rígida para así poder llevar acabo con éxito los procesos litográficos, en este caso se elige una placa de vidrio superplano, suficientemente grande (4x4 pulgadas), en donde primero se coloca una capa de fotoresina de $6 \mu m$, posteriormente se deja caer la lámina para pegar y deslizarlo sin dejar burbujas; una vez colocada se dejó secar por un periodo de 24 hrs. Como se utiliza el mismo tipo de fotoresina que se usará en los pasos fotolitográficos se debe sellar todo el rededor de la placa de aluminio. Esto con el fin de proteger la resina de los químicos usados en el proceso de ataque. La capa de fotoresina colocada en este paso es con el fin de adherir el aluminio al sustrato rígido y en el último ataque proteger el dispositivo. En la Figura 5.1 se muestra el cristal ya con el aluminio adherido y sellado con el epóxico.

5.1.1. Ancla

En esta sección se presenta la construcción del ancla de la viga voladiza, recordando que la fabricación se realiza desde la base del interruptor (lo que es la sección del anclaje) hasta la formación de la viga. El proceso usado es fotolitografía a través

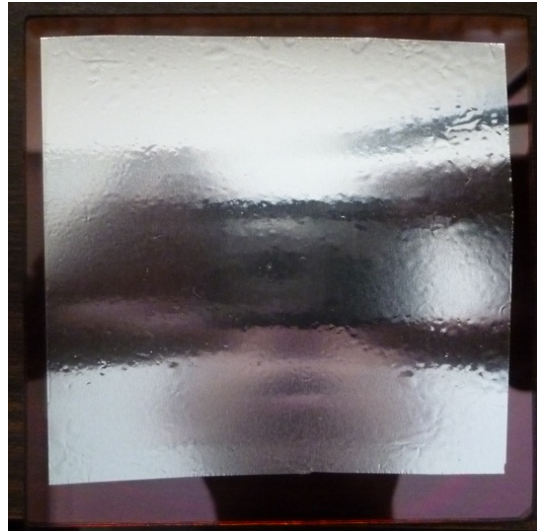


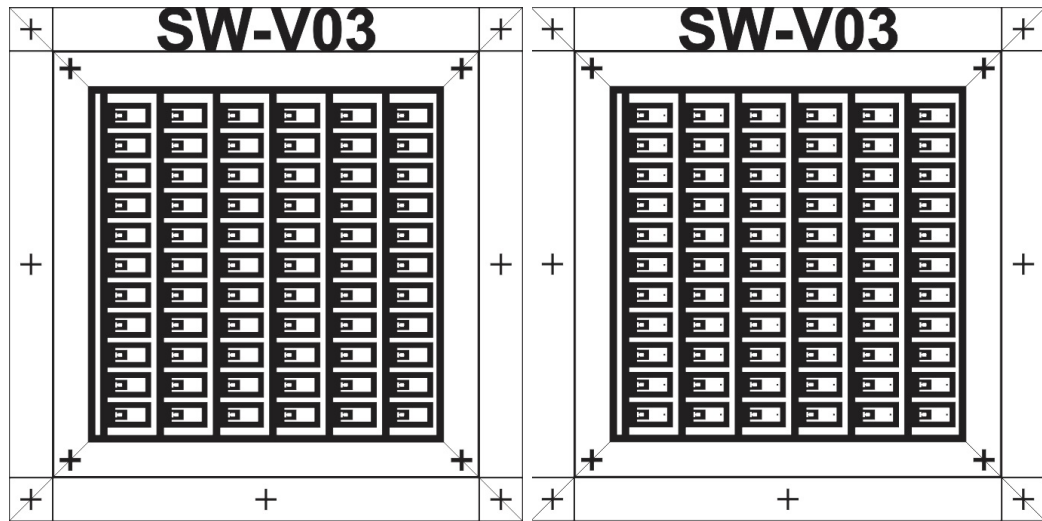
Figura 5.1: Lámina de aluminio sobre cristal superplano.

de ataque húmedo.

Cabe mencionar que en este primer paso se explicará a detalle el proceso y en los pasos subsecuentes se resumirá, ésto es debido a la similitud y en algunos casos repetición completa de algún proceso.

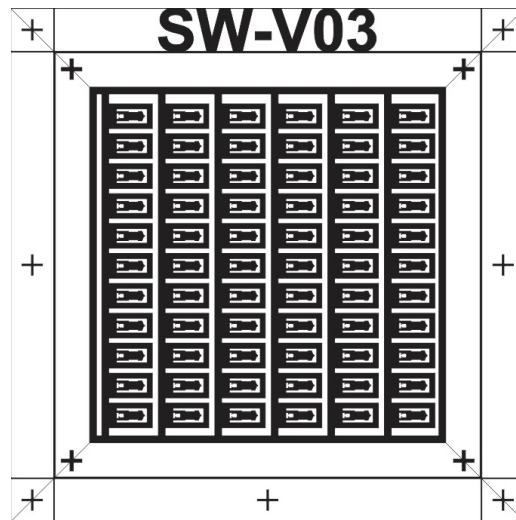
5.1.1.1 Fabricación de la máscara

Con apoyo de software profesional de dibujo se diseñaron las tres máscaras a utilizar, en donde en la máscara 1 se define el ancla del interruptor, que es donde estará sujeta la viga, dicha máscara está impresa sobre una placa de acetato transparente, la cual contienen superficies oscuras y transparentes, requeridas para hacer la definición correspondiente. En la figura 5.2 se muestran las tres máscaras utilizadas.



(a) Máscara 1

(b) Máscara 2



(c) Máscara 3

Figura 5.2: Máscaras para la fabricación del interruptor versión 3

5.1.1.2 Depósito de fotoresina

Una vez que la oblea se encuentra limpia y seca, se procederá a realizar un depósito de fotoresina, para esto utilizamos el spinner a 1500 rpm, con la finalidad de obtener una capa uniforme de $6 \mu m$, cabe mencionar que la fotoresina utilizada es de tipo positivo, es decir que la resina solo va a ser atacada en las partes transparentes (vistas en blanco en la máscara) y las partes oscuras quedarán íntegras. Ésta es la cualidad de las resinas positivas sensibles a la luz UV, en donde se proyecta luz UV se sensibiliza y puede ser removida y la otra sección permanece endurecida.

5.1.1.3 Curado suave (horneado)

Una vez colocada la capa de fotoresina se dejó la placa en reposo alrededor de 5 min, posteriormente se horneó por 5 min a 110 grados C. Los tiempos en este paso del procedimiento son importantes, puesto que dejar más tiempo el horneado, podría ocasionar que la fotoresina se endurezca demasiado o en su defecto si se hornea por menos tiempo, la fotoresina puede quedar demasiado sensible y al utilizar el revelador se diluyan secciones no deseadas.

5.1.1.4 Alineación y exposición en luz UV

Para este paso, es importante definir marcas de alineación suficientemente claras, con la finalidad de mantener una guía entre cada proceso litográfico realizado. Siempre hay que considerar un elemento no simétrico para las mismas y tener una buena referencia en que sentido se debe colocar la máscara, estos elementos asimétricos pueden ser palabras, números o algún símbolo que no presente simetría en ningún eje.

En la Figura 5.3 se observan las marcas de alineación en el aluminio después

del primer ataque, así también los elementos asimétricos. Estas máscaras sirvieron para minimizar movimientos o corrimientos entre procesos fotolitográficos y reducir errores entre la secuencia de ataques.

En este caso como es la primera máscara no es necesario realizar una alineación previa, sin embargo es necesario que tenga marcas para los siguientes procesos fotolitográficos.

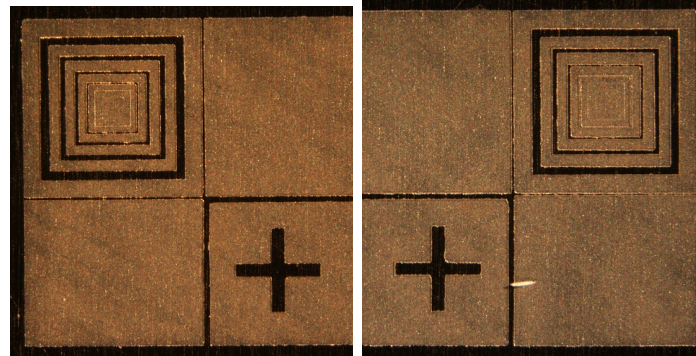
Con la finalidad de obtener el patrón definido presente en la máscara 1 en la fotoresina, se realizó una exposición de 110 s con la lámpara de luz ultravioleta. Éste es el tiempo requerido para sensibilizar adecuadamente la resina.

5.1.1.5 Revelado

Después de hacer la exposición de la lámina de aluminio en los rayos UV se observó la imagen plasmada en la fotoresina, por lo que se procedió con el revelado. Para el revelado se utilizó el revelador 400K, sustancia compatible con la fotoresina con la que se está trabajando, para esto se deja sumergir la oblea de la lámina de aluminio alrededor de 30 s en la solución, posteriormente se secó con ayuda del spinner.

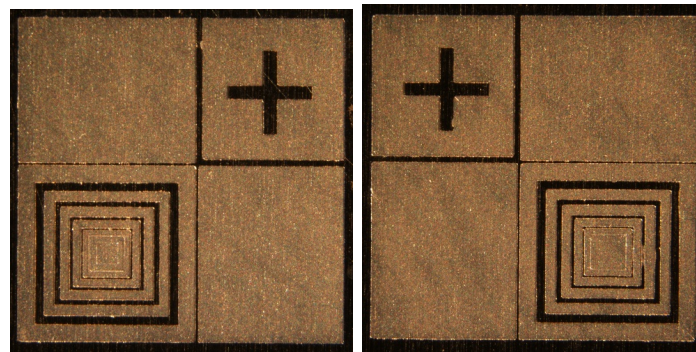
5.1.1.6 Ataque húmedo

Para realizar el ataque a la lámina de aluminio se utiliza lo que se llama ataque húmedo o químico, que se basa en la inmersión de la oblea en una disolución química capaz de “desbastar” el material en contacto. En este caso se utilizó una mezcla química compuesta por peróxido de hidrógeno, ácido clorhídrico y agua, posteriormente se sumergió la oblea dentro de la disolución alrededor de 24 minutos, tiempo para un ataque de 4 μm , finalmente se enjuaga la oblea y se seca.



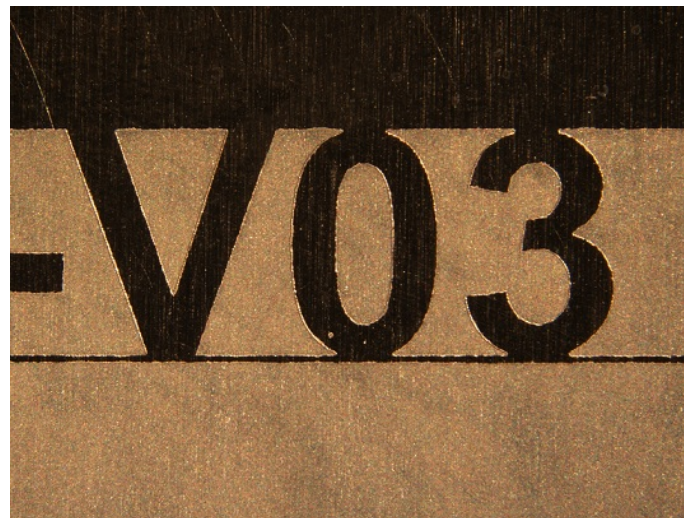
(a) Superior Izquierda

(b) Superior Derecha



(c) Inferior Izquierda

(d) Inferior Derecha



(e) Marca asimétrica

Figura 5.3: Marcas de alineación

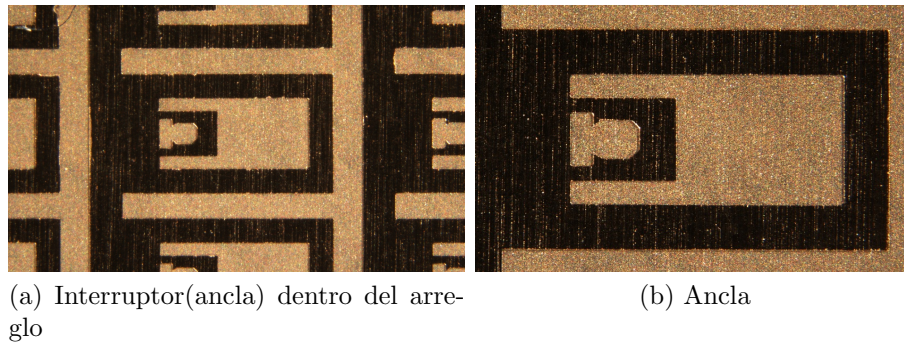


Figura 5.4: Fotos del primer paso de fabricación

En la figura 5.4 se muestra un par de fotografías del primer paso fotolitográfico que se realizó. La Figura 5.4 (a) es el ancla de uno de los interruptores y a su alrededor se observan las demás (dado las dimensiones del dispositivo se fabrican 66 interruptores en la misma oblea) y en 5.4(b) tenemos la sección de uno de los interruptores, en el cual se observa el ancla con forma de herradura y un marco. Este marco sirve para darle mayor rigidez y facilidad de manejo al momento de instalar el interruptor en el desplazador.

Como se puede observar en las figuras 5.3 y 5.4, el primer proceso fotolitográfico se concluyó satisfactoriamente, ya que se puede apreciar de forma definida el ancla, donde estará sujeto el interruptor, así como las marcas de alineación.

Para continuar con la fabricación de la membrana sobre la lámina de aluminio, se procede a limpiar con acetona para quitar la resina utilizada de protección durante el ataque húmedo, y con esto poder proseguir con el segundo paso.

Por otro lado como se mencionó anteriormente se necesitan tres procesos fotolitográficos para fabricar la membrana, como primer instancia se describió a detalle el primero y en la figura 5.5 se aprecia en un diagrama los pasos seguidos. Este proceso es repetitivo por lo que sólo se mencionarán los detalles de interés en cada una de las siguientes etapas.

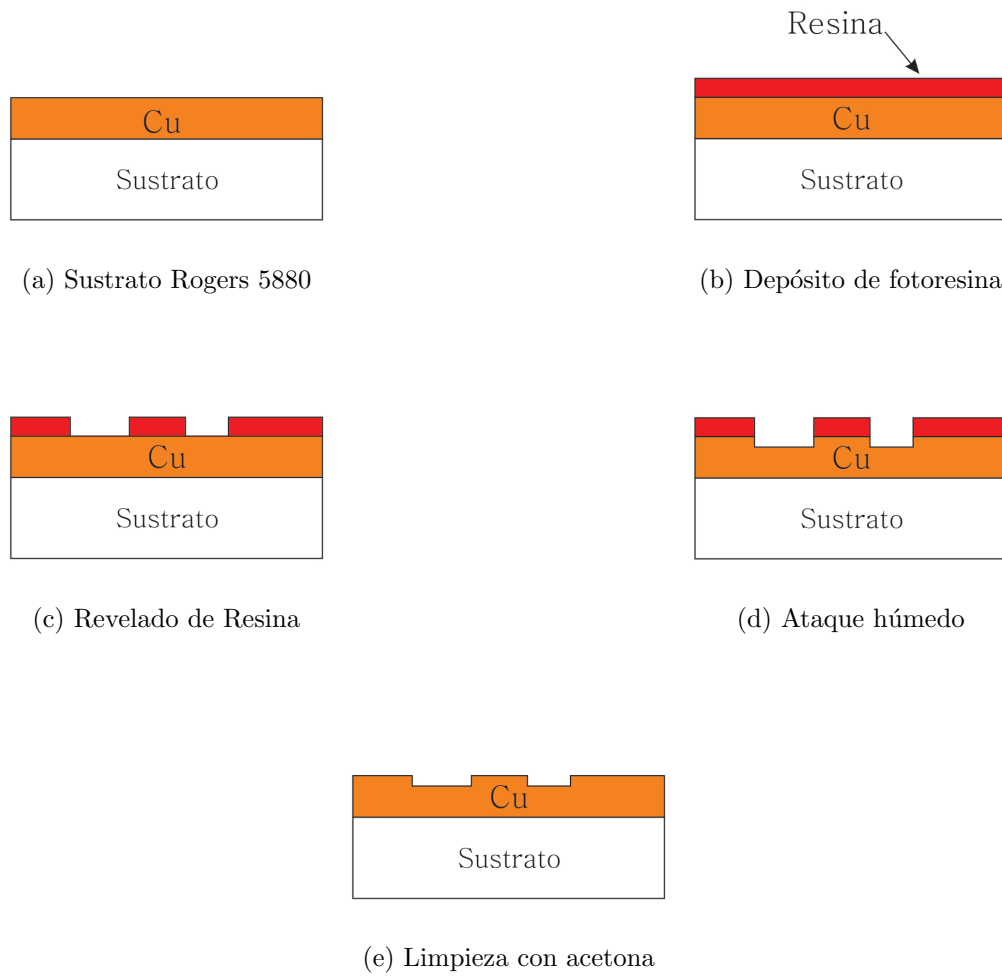


Figura 5.5: Proceso Litográfico

5.1.2. Punta de contacto

En este proceso se fabricará la punta de contacto, la cual se ubica en la orilla de la viga voladiza y tiene dimensiones de $50\ \mu\text{m}$ x $50\ \mu\text{m}$ y un grosor de $2\ \mu\text{m}$. Dado esto, el ataque que se realizará será de dos micrómetros. En este punto no se debe olvidar seguir protegiendo la región correspondiente al ancla.

5.1.2.1 Proceso

- En este caso se utilizó la máscara 2 en donde se define la punta de contacto. La punta de contacto es la sección de menor dimensión en todo el dispositivo, por lo que las marcas de alineación deben ser lo suficientemente buenas para lograr un ajuste aceptable entre máscaras.
- Se realiza el mismo depósito de fotoresina y horneado.
- Se requiere de alineación, de tal forma que la máscara 2 quede sobrepuesta en las marcas que dejó el uso de la primer máscara en la placa de aluminio. Este paso es muy importante y de mucho cuidado, ya que una mala alineación producirá un error que se reflejará en todos los pasos siguientes.
- Mismo revelado.
- Debido a que se requiere atacar $2\ \mu\text{m}$, se deja por un tiempo de 12 min.

En la Figura 5.6 se muestran las imágenes obtenidas del segundo proceso, en donde se formó la punta de contacto. En figura 5.6(a) se observa nuevamente el ancla y al extremo derecho se aprecia la punta de contacto. La figura 5.6(b) muestra un acercamiento a la punta de contacto.

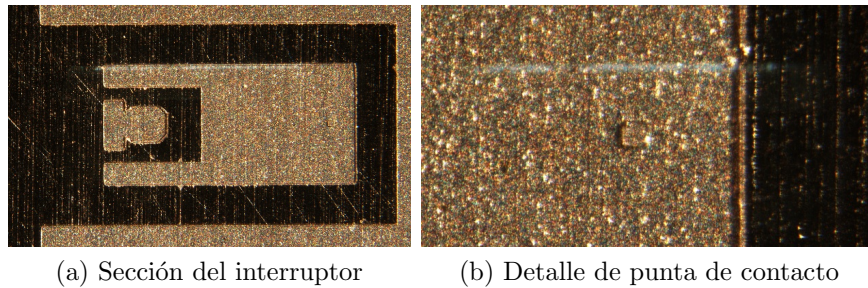


Figura 5.6: Fotografías paso 2

5.1.3. Viga voladiza

En este tercer y último procedimiento se formará la viga y con esto se terminará la fabricación del interruptor. Aquí se puede observar un beneficio de separar la construcción del interruptor MEMS del diafragma de control, la cual es el reducido número de máscaras (solo tres) que conlleva a tener solamente 2 alineaciones en todo el proceso. A continuación se presentan los pasos realizados en esta tercer y última etapa.

5.1.3.1 Proceso

- Para el último proceso de la fabricación de la membrana, se utilizó la máscara 3 en donde ya se tiene definido la forma completa de la viga.
- Se depositó una capa de fotoresina de $6 \mu m$.
- Se realizó el horneado
- En este punto la alineación fue más complicada, ya que al momento de querer alinear, se observa que en el segundo proceso se tuvieron errores de aproximadamente $10 \mu m$ y por ende este tipo de marcas se enciman con el ataque anterior. El tiempo de exposición en la luz UV fue el mismo que en los pasos anteriores (110 s).

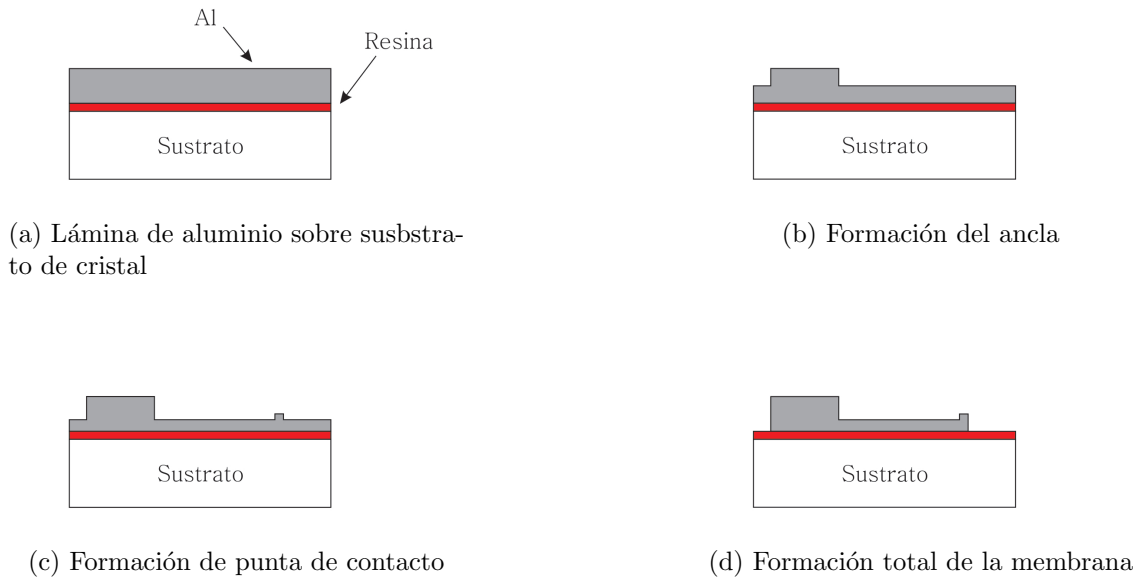


Figura 5.7: Proceso de fabricación de la membrana.

- Se realiza el revelado.
- En este último ataque se deja la lámina en la disolución por aproximadamente 35 min, ya que en esta ocasión se forma por completo el interruptor. El cálculo es de cinco micrómetros (30 min) pero al retirarlo del ataque químico y realizar una revisión bajo el microscopio se decidió atacar por 5 minutos más para tener completamente libres las membranas.

En resumen se presenta en la figura 5.7 el flujo de proceso para la fabricación de la membrana.

5.2. Desarrollo del proceso de fabricación del diafragma de control del desplazador de fase.

Para la fabricación del desplazador se utilizaron los mismos procesos fotolitográficos que en la membrana, sin embargo en esta ocasión se trabajó con un sustrato Duroid Rogers RT 5880 formado por una capa de dieléctrico de $127 \mu m$ de grosor y con una capa de cobre de $17 \mu m$ por ambos lados del dieléctrico.

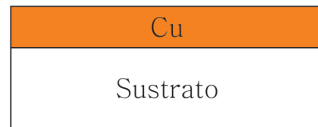
Para esto se cortaron 3 láminas de sustrato Rogers RT 5880 de 4.5×4.5 cm para fabricar tres desplazadores, posteriormente se lavaron y se secaron en el spinner, la intención de tener 3 láminas es en caso de que existiera algún error se pueda corregir al momento con las láminas restantes. Con esto se evita pérdida de tiempo en volver a repetir todo el proceso litográfico. Esto es recomendable sobre todo en procesos largos y con pasos delicados.

Analizando bien los pasos a seguir para la fabricación del desplazador se definieron cuatro procesos fotolitográficos, los cuales son: Formación de electrodos, Formación de islas de BCB, Formación de pistas de polarización, Formación del anillo. En la figura 5.8 se muestra el flujo de proceso de fabricación y a continuación los detalles de la misma.

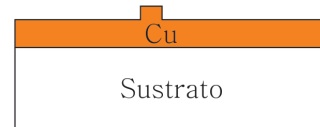
5.2.1. Formación de electrodos

5.2.1.1 Proceso

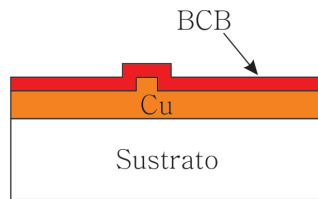
- **Fabricación de la máscara** .- La máscara 1 define el electrodo de actuación, el cual se encarga de causar la atracción al ser polarizado el interruptor. La máscara se muestra en la figura 5.9(a).
- **Depósito de fotoresina** .- Este paso es lo mismo que se utilizó en la realiza-



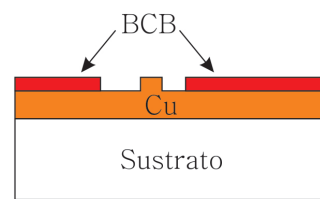
(a) Substrato Rogers 5880



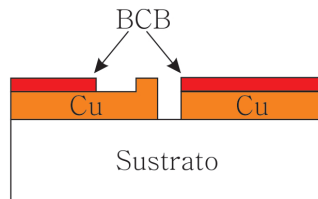
(b) Formación de electrodos



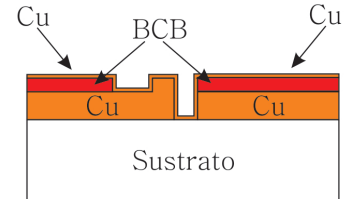
(c) Depósito de BCB



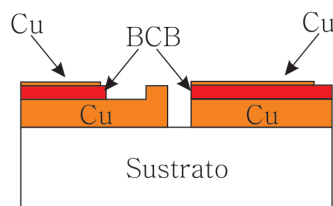
(d) Formación de islas de BCB



(e) Formación del anillo



(f) Depósito de cobre (1 μm)



(g) Formación de pistas

Figura 5.8: Flujo de proceso de fabricación del diafragma.

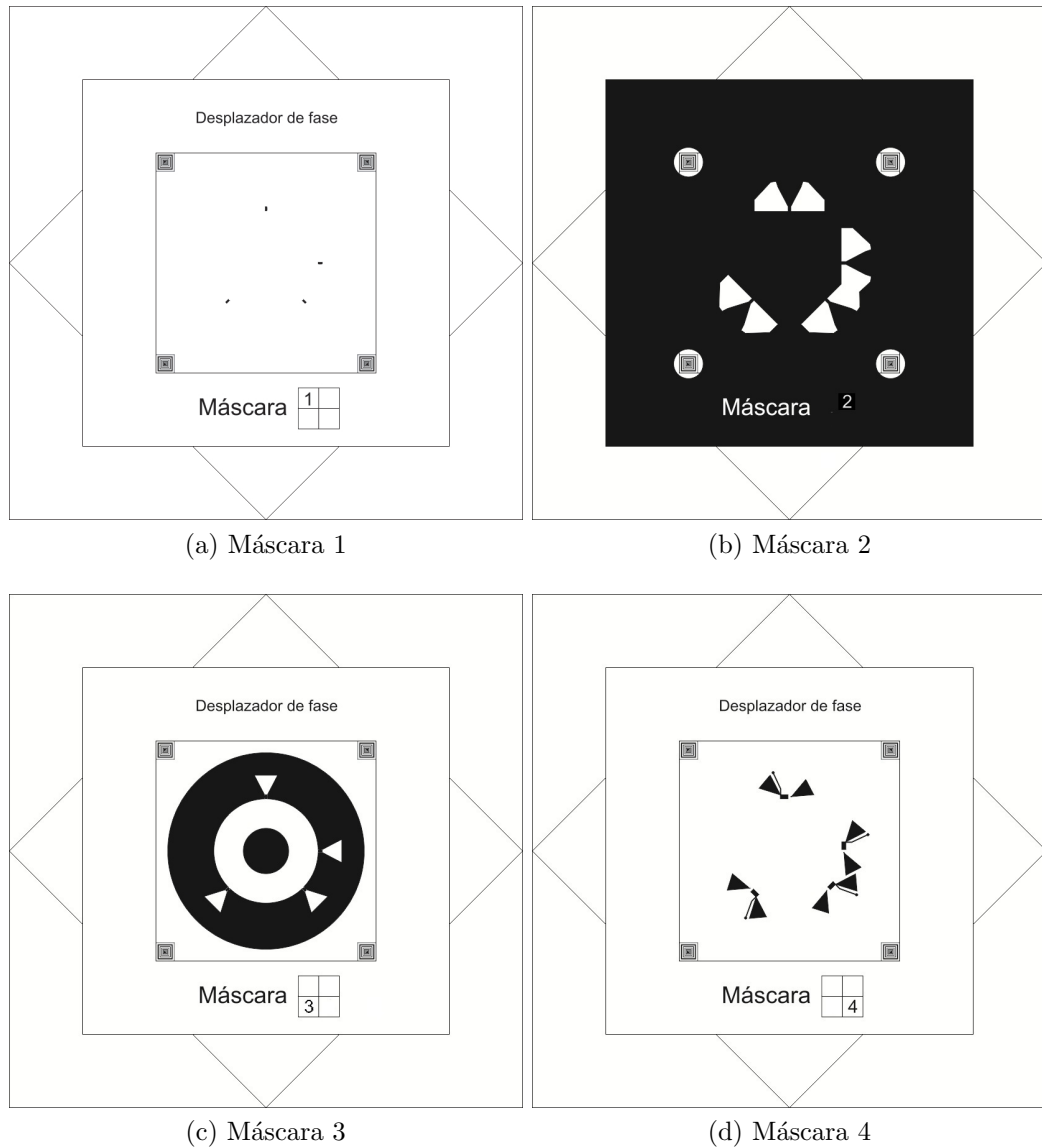


Figura 5.9: Máscaras para la fabricación del diafragma de control

ción de la membrana del interruptor.

- **Curado suave (horneado)** .- Se realizó el mismo horneado que en la fabricación de la membrana.
- **Alineación y exposición en luz UV** .- Como es la primer máscara no se alinea, solo es cuestión de poner la oblea con la máscara fija y las marcas de alineación visibles. El tiempo de exposición se mantiene igual que en el proceso mostrado en la fabricación de la membrana.
- **Revelado** .- Se utiliza el mismo revelador, ya que es la misma fotoresina utilizada.
- **Ataque húmedo** .- Debido a que en esta ocasión es cobre lo que se atacó, la disolución cambia en su relación, y el tiempo de inmersión es menor, para un ataque de $6\mu m$ se necesitó un tiempo de 12s.

5.2.2. Formación de islas de BCB

Para el segundo procedimiento fotolitográfico se definirán las islas en donde estarán las pistas de alimentación y se deben de considerar pasos adicionales, ya que en este caso cambiarán algunos materiales y por ende el proceso variará, pues se depositó un capa uniforme de bisbenzocyclobutene (BCB) CYCLOTENE 4026, la cual es una resina polimérica fotosensible que cuenta con baja constante dieléctrica y bajas pérdidas en alta frecuencia [2]. Cabe aclarar que ésta, al contrario de la fotoresina AZ9245, es negativa.

5.2.2.1 Proceso

- **Fabricación de la máscara** .- En este paso se utilizará la máscara 2, que es donde se definió las islas del dieléctrico requerido. La máscara se muestra en la figura 5.9(b).

- **Depósito del promotor de adhesión de Cyclotene** .- Se realizó un depósito de promotor de adhesión de BCB, por lo que se realizaron ajustes al spinner para lograr una capa delgada. Esta sustancia fortalece la unión entre el BCB y el cobre.
- **Depósito de fotoresina** .- Se depositó una capa de resina de $5 \mu m$ con ayuda del spinner. Es importante mencionar que el cyclotene es una resina negativa, es decir, las partes oscuras son las que se van a atacar y las partes transparentes (mostradas en la máscara) son las que se conservarán.
- **Curado suave (horneado suave)** .- Como primera instancia se horneó por 30 s a 110 grados C, se dejó reposar y después se volvió a hornear por 90 s a 80 grados C.
- **Alineación y exposición** .- Como es la máscara 2 es necesario realizar una alineación completa con todas las marcas que se tienen, con la finalidad de ajustar la oblea con la máscara. El tiempo de exposición es diferente en comparación a los tiempos que se han estado manejando, para este caso se requirió de 35 s.
- **Revelado y ataque** .- Para el revelado se utiliza el revelador DS2100 [2], que este a su vez es el atacante. El tiempo de inmersión es de 25 min para cumplir con los dos procesos.
- **Curado fuerte(horneado extremo)** .- Para este tipo de resina es necesario realizar un horneado especial, que va desde los 0 a 180 grados C en 30 minutos, después se mantiene a 180 grados C por 20 min, y finalmente se baja a la temperatura del medio ambiente.

En la figura 5.10 se muestran fotografías del dispositivo. En 5.10(a) se muestra el stub correspondiente a 90 grados, en (b) el de 180 grados, (c) el de 225 grados y (d) el de 315 grados.

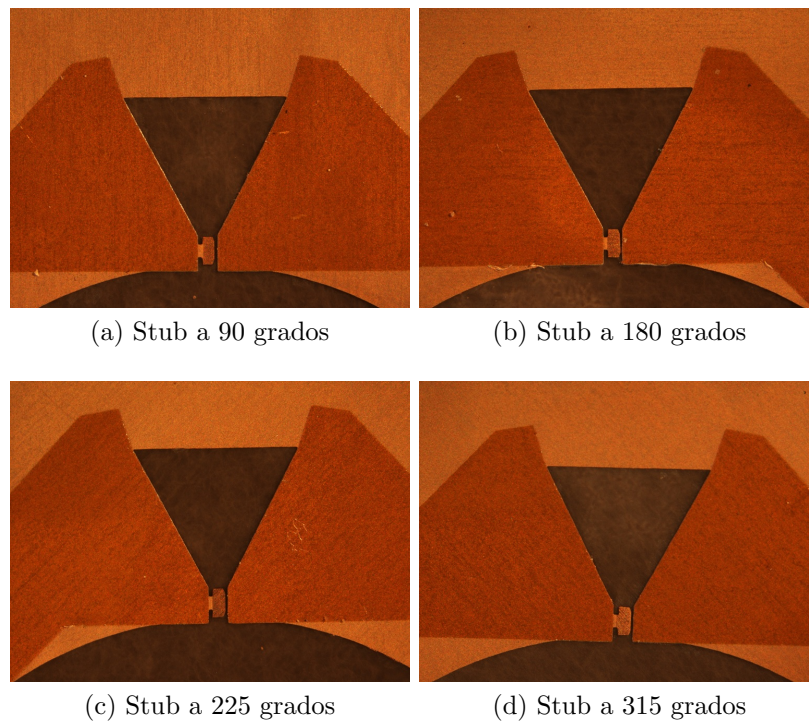


Figura 5.10: Fotografías de fabricación del desplazador - formación de islas de cyclotene y anillo ranurado.

5.2.3. Formación del anillo

En este paso se realizó la formación del anillo y de los stubs ranurados protegiendo los electrodos de actuación y las islas de BCB. Se debe de considerar que es un ataque de $11\ \mu\text{m}$ por lo que una vez formado claramente la ranura se debe retirar inmediatamente del proceso de ataque para evitar un excesivo sobreataque.

5.2.3.1 Proceso

Este es el tercer proceso fotolitográfico el cual es equivalente al mostrado en la formación de los electrodos. En este caso se ocupa la máscara 3 mostrada en la figura 5.9(c). La profundidad de ataque es de 11 micras (el anillo debe quedar completamente definido).

En la figura 5.10 se observa el anillo y los stubs ranurados bien definidos.

5.2.4. Formación de pistas de polarización

Este es el último proceso fotolitográfico, se utilizará para la definición de las pistas de polarización del interruptor, así como la base en donde debe ser fijada la membrana.

5.2.4.1 Proceso

- **Fabricación de la máscara** .- En este paso se utilizará la máscara 4, que es donde se definió las pistas de alimentación del interruptor así como los stubs que trabajan como filtros en la Banda X. La máscara se muestra en la figura 5.9(d).

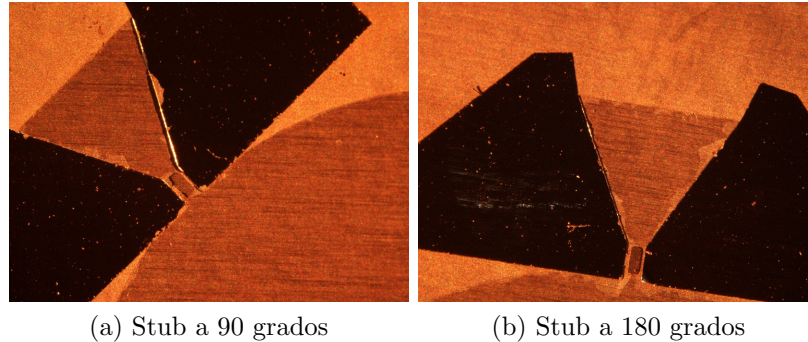


Figura 5.11: Fotografías de fabricación del desplazador - depósito de cobre

- **Depósito de cobre por evaporación al vacío** .- Se realiza un depósito por medio de espurreo catódico de $1 \mu m$ de cobre. El uso de este equipo es relativamente complejo ya que se debe tener mucha precaución con el trabajo de vacío entre las distintas cámaras que tiene y una correcta colocación de la oblea frente al “target”, elemento que proporciona el cobre en gran pureza. Es un proceso que toma, en cuestión de preparar el equipo alrededor de un día y 30 minutos para el depósito de $1 \mu m$ de cobre. En la Figura 5.11 se aprecia el depósito de cobre sobre toda la oblea, el adherido al cyclotene de un tono oscuro.
- **Depósito de fotoresina** .- Este paso es el mismo utilizado para realizar la membrana.
- **Curado suave (horneado)** .- Se realizó el mismo horneado que en la fabricación del interruptor.
- **Alineación y exposición en luz UV** .- En este último paso se acumulan los errores de alineación de los pasos anteriores por lo que es muy importante alinear lo mejor que sea posible cada una de las máscaras usadas. El tiempo de exposición se mantiene igual que en el proceso en el interruptor.
- **Revelado** Se utiliza el mismo revelador 400K, ya que es la misma fotoresina utilizada en la membrana.

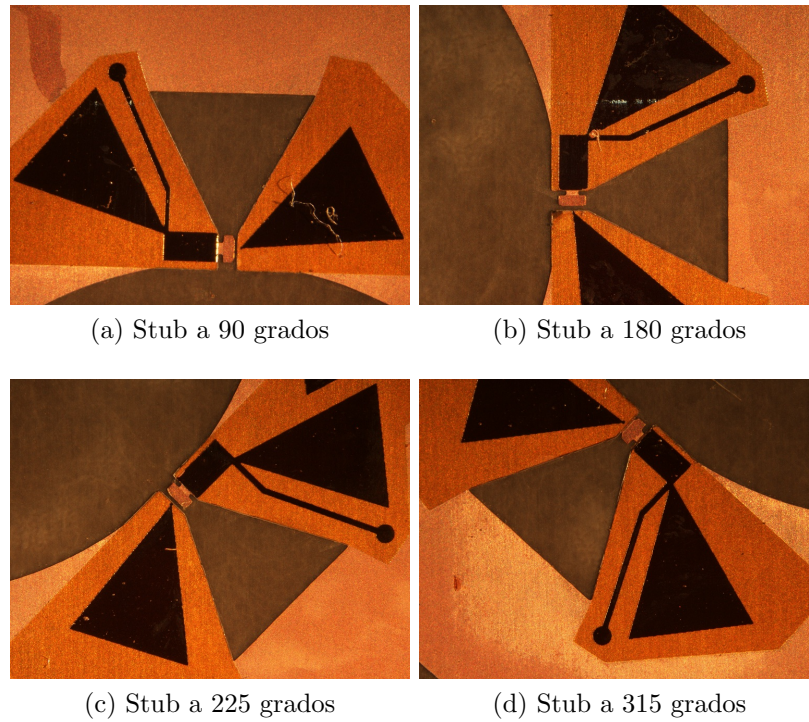


Figura 5.12: Fotografías de fabricación del desplazador - Pistas de polarización

- **Ataque húmedo** .- Nuevamente se ataca cobre y el tiempo de inmersión es, para un ataque de $1 \mu m$, en promedio 3 s. Las pistas se deben definir completamente. Se debe revisar ante el microscopio y si faltara ataque se volverá a repetir este paso, midiendo el tiempo con la experiencia adquirida.

5.2.5. Conclusiones

El proceso de fabricación es una etapa difícil en cuanto a seguir los procedimientos a detalle. La limpieza es otro punto que se debe cuidar de sobremanera, al fabricar dispositivos de dimensiones reducidas, como es este caso. El no cuidar la limpieza conlleva a tener partículas e incluso pelusas no deseadas que entorpecen los pasos realizados. Como conclusiones se pueden enumerar:

1. Se presentó un procedimiento de fabricación nuevo para el diseño de interruptores MEMS basados en aluminio.

2. Se realizó la fabricación del interruptor MEMS con errores entre máscaras menores a 15 micrómetros.

3. Se fabricó el diafragma de control basado en las especificaciones impuestas por el diseño mostrado en el capítulo 4. Los errores debidos a alineación son menores a 10 micrómetros.

4. Debido a partículas en el ambiente se tuvieron ciertas imperfecciones como se puede apreciar en las figuras 5.12 (a) y (b).

Capítulo 6

Conclusiones

A través del desarrollo de este trabajo se presentaron desplazadores de fase que utilizan interruptores MEMS en la actualidad. Así también los actuadores más utilizados para la fabricación de diferentes desplazadores de fase.

Finalmente se planteó un reto a superar. En el artículo [9] se muestra el diseño y fabricación de un desplazador de fase tipo reflectivo el cual utiliza diodos p-i-n. Como alternativa se presenta en este trabajo el uso de interruptores MEMS propios, en lugar de dichos diodos. En conclusión podemos tener:

1. Se diseñó y modeló tres diferentes interruptores MEMS a través del uso de la herramienta computacional CoventorWare 2010.

2. Se realizaron pruebas de simulación electromecánica de las cuales los resultados obtenidos muestran voltajes de actuación menores a 13 volts y capacitancia en estado abierto menor a 30 fF para cada interruptor.

3. Las mejoras entre cada diseño fueron con base en la factibilidad de su implementación, cada nueva versión de los interruptores fue realizada para resolver dificultades de fabricación.

4. Se fabricaron los tres diseños de membranas para interruptor en su totalidad. Teniendo finalmente membranas físicas que cumplen con las características del diseño en cuanto a dimensiones (correspondientes al tercer diseño), con errores en éstas menores a $15 \mu m$.

5. Se rediseñó el desplazador de 2 bits presentado en [9] para su correcto funcionamiento con el interruptor fabricado.

6. El ancho de banda del diseño se encuentra en el rango de frecuencias de 9.7 a 10.7 GHz.

7. Se fabricó satisfactoriamente el diafragma de control del desplazador de fase con los métodos desarrollados por el grupo de trabajo UNAMems.

8. Como trabajo a futuro se montarán las membranas fabricados sobre el diafragma de control para la formación total del desplazador de fase, así también la caracterización del mismo.

Bibliografía

- [1] D.J. Chung, R.G. Polcawich, J.S. Pulskamp, y J. Papapolymerou. Reduced-size low-voltage rf mems x-band phase shifter integrated on multilayer organic package. *Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on*, 2:1617 – 1622, 2012.
- [2] DOW. *Cyclotene*4000 Series, Advanced Electronic Resins (Photo BCB)*, 2009.
- [3] H.P. Feldle y K. Solbach. Passive and active phased arrays using solid state technologies. *Phased Arrays, IEE Colloquium on*, págs. 3/1 – 3/4, 1991.
- [4] Mike Golio. *The RF and Microwave Handbook*. CRC Press LLC, 2001.
- [5] Songbin Gong y Hui Shen. A 60-GHz 2-bit switched-line phase shifter using SP4T RF-MEMS switches. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 59:894 – 900, 2011.
- [6] Rahman Hamood Ur y Rodica Ramer Tim Hesketha. Low actuation voltage RF MEMS series switch with novel beam design. *International Conference on Emerging Technologies IEEE-ICET 2008*, 2008.
- [7] J. Huang. Capabilities of printed reflectarray antennas. *Phased Array Systems and Technology, 1996., IEEE International Symposium on*, págs. 131 – 134, 1996.
- [8] Chang Kai. *Microwave Solid-State Circuits and Applications*. Wiley-Interscience, 1994.

-
- [9] Oleksander Martynyuk, Andrea G. Martinez-Lopez, y Jose I. Martinez-Lopez. 2-bit X-Band reflective waveguide phase shifter with BCB-based bias circuits. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54:4056–4061, 2006.
- [10] G.N. Nielson y G. Barbastathis. Dynamic pull-in of parallel-plate and torsional electrostatic MEMS actuators. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 15:811 – 821, 2006.
- [11] Fatih M. Ozkeskin, SangjoChoi, Kamal Sarabandi, y Yogesh B. Gianchandani. Development of different K-band MEMS phase shifter designs for satellite COTM terminals. *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, 60:1595 – 1604, 2012.
- [12] D. Parker y D.C. Zimmermann. Phased arrays - part I: theory and architectures. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions*, 50:678 – 687, 2002.
- [13] D. Parker y D.C. Zimmermann. Phased arrays-part II: implementations, applications, and future trends. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions*, 50:688 – 698, 2002.
- [14] G.M. Rebeiz y Joseph S. Hayden. RF MEMS phase shifters: design and applications. *Microwave Magazine, IEEE*, págs. 72 – 81, 2002.
- [15] D. Yamane, H. Seita, y S. Kawasaki. A 12-GHz DPDT RF-MEMS switch with layer-wise waveguide/actuator design technique. *Micro Electro Mechanical Systems, 2009. MEMS 2009. IEEE 22nd International Conference on*, págs. 888 – 891, 2009.