

RESUMEN de la tesis de **Rebeca Leal Romero**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **DOCTOR EN CIENCIAS** en **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES** con orientación en **ALTAS FRECUENCIAS**. Ensenada, Baja California, México. Julio de 2011.

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN COPLANARES
FABRICADAS EN SILICIO UTILIZANDO ÓXIDO DE SILICIO RICO EN SILICIO (SRO) COMO
PASIVADOR DE INTERFASE**

Resumen aprobado por:

Dr. J. Apolinar Reynoso Hernández
Director de Tesis

Dr. Ignacio E. Zaldívar Huerta
Co-Director de Tesis

El óxido de silicio rico en silicio (SRO) se puede considerar como un material multi-fase compuesto de una mezcla de óxido de silicio estequiométrico (SiO_2), óxido fuera de estequiometría (SiO_x) y silicio elemental. Las películas de SRO con diferentes excesos de silicio (R_o) generalmente son obtenidas mediante la técnica de depósito químico en fase vapor a baja presión (LPCVD). En este material se han observado dos características eléctricas interesantes: la habilidad de mejorar la conducción eléctrica a través del SiO_2 , y la propiedad de poder atrapar cargas. La primera característica ha sido utilizada para fabricar memorias programables eléctricamente con material SRO, debido a que requiere muy bajos voltajes. En el caso del atrapamiento de carga, este se debe a la existencia de trampas que son univalentes, esto es, que pueden atrapar o liberar un electrón a la vez y pueden atrapar tanto carga positiva como negativa.

Para estudiar el efecto de las propiedades eléctricas de líneas de transmisión coplanares usando óxido de silicio rico en silicio como pasivador de interfase se diseñaron, fabricaron y caracterizaron tres estructuras de líneas de transmisión coplanar: convencionales, micromaquinadas (con grabado iónico reactivo), y líneas con la técnica de oxidación local de silicio (LOCOS) sobre un sustrato de silicio de alta resistividad con y sin implantación N^+ en la parte posterior.

Palabras Clave: Guía de onda coplanar (CPW), Óxido de silicio rico en silicio (SRO), constante de atenuación, constante dieléctrica efectiva, impedancia característica.

ABSTRACT from the thesis presented by **Rebeca Leal Romero** as a partial requirement to obtain the **DOCTOR OF SCIENCE** degree in **ELECTRONIC AND TELECOMMUNICATIONS** with orientation in **HIGH FREQUENCIES**. Ensenada, Baja California, México July 2011.

STUDY OF ELECTRICS CHARACTERISTICS OF COPLANAR TRANSMISSION LINE FABRICATED IN SILICON USING SILICON RICH OXIDE (SRO) AS PASSIVATION LAYER INTERFACE.

The silicon rich oxide (SRO) can be considered as a multi-phase material composed of a mixture of stoichiometric silicon oxide (SiO_2), out of stoichiometric oxide (SiO_x) and elemental silicon. SRO films with different silicon excess (Ro) were deposited by Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD). In this material has been observed two interesting electric properties: the ability to improve the electrical conduction through the SiO_2 , and the property to catch loads. The first feature has been used to produce electrically programmable memories, because it requires very low voltages. In the case of charge trapping is due to the existence of traps that are univalent, that is, which can trap or release one electron at a time and can trap both positive and negative charge.

For a study of the electric characteristic of coplanar transmission lines using silicon rich oxide as a passivation layer, were designed, fabricated and characterized three structures of coplanar transmission lines: conventional, micromachining (with reactive ion etching), and lines with the technique of local oxidation of silicon (LOCOS) on high resistivity silicon with and without N^+ backside to allow

Keywords: Coplanar waveguide (CPW), silicon rich oxide (SRO), attenuation constant, dielectric constant, characteristic impedance.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LÍNEAS DE
TRANSMISIÓN COPLANARES FABRICADAS EN SILICIO UTILIZANDO ÓXIDO
DE SILICIO RICO EN SILICIO (SRO) COMO PASIVADOR DE INTERFASE**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:

Rebeca Leal Romero

Ensenada, Baja California, México, 18 de Agosto del 2011.

TESIS DEFENDIDA POR
Rebeca Leal Romero
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. J. Apolinar Reynoso Hernández
Co-Director del Comité

Dr. Ignacio Enrique Zaldívar Huerta
Co-Director del Comité

Dr. Mariano Aceves Mijares
Miembro del Comité

Dr. Ma. Del Carmen Sánchez Maya
Miembro del Comité

Dr. Arturo Velázquez Ventura
Miembro del Comité

Dr. Roberto Conte Galván
*Coordinador del programa de posgrado
en Electrónica y Telecomunicaciones*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

18 de Agosto de 2011.

Dedicatoria

A mis padres Héctor y Ma. Adela por darme la vida, por todos sus consejos, su apoyo incondicional, y por darme las herramientas necesarias para ser una persona de bien.

A mi esposo Víctor E. Gómez del Villar, por ser la fuente de energía para continuar día con día, por escucharme en los momentos difíciles, por su apoyo incondicional, y por su inmenso amor.

A mi amado hijo Duncan, por iluminar mi vida y ser el mejor incentivo para finalizar esta etapa de mi vida.

Agradecimientos

A mis padres Héctor y Ma. Adela por ser el mejor ejemplo a seguir, a mis tíos Balbina y Rafa, quienes han sido como mis segundos padres y han estado conmigo a lo largo de todo este camino. A mi hermana Yadhira a quien quiero mucho, por su apoyo y cariño, a mis primos Tania, Mónica, Saúl, Raúl, Mauricio, Eli y Guadalupe que más que primos son mis hermanos y que aunque lejos siempre están al pendiente. A la Sra. Laura y el Sr. Enrique por su apoyo y cariño en este proyecto.

Agradezco a mis directores de tesis Dr. Apolinar Reynoso Hernández y Dr. Ignacio E. Zaldívar Huerta la oportunidad y sobre todo la confianza que depositaron en mí para desarrollar este proyecto, por su ayuda, disposición y dedicación haciendo posible la realización de esta tesis.

A los miembros de mi comité de tesis: Dr. Mariano Aceves Mijares por sus atinadas observaciones, conocimientos y su interés en este trabajo, Dra. Ma. Del Carmen Maya Sánchez por sus consejos, enseñanzas, contribuciones, Dr. Arturo Velázquez Ventura por sus recomendaciones, contribuciones y disponibilidad para que se lleve hasta el final este trabajo.

Al Dr. J. Eleazar Zúñiga quien además desarrolló uno de los programas claves en este y muchos otros trabajos del grupo.

A todos los que me brindaron sus conocimientos y enseñanzas a lo largo de los cursos de doctorado, por sus esfuerzos y empeño en transmitir sus conocimientos: Dra. Ma. Del Carmen Maya Sánchez, Dr. Arturo Velázquez Ventura, Dr. J. Apolinar Reynoso Hernández, Dr. José Luis Medina Monroy, Dr. Ricardo A. Chávez Pérez, Dr. Joaquín Álvarez Gallegos, Dr. David H. Covarrubias Rosales, Dr. Luis A. Márquez Martínez, Dr. Jorge

Negrete Regagnon, Dr. José Rosario Gallardo, M.C. José de Jesús Ibarra Villaseñor, M.C. Benjamín Hilarión Ramírez Duran.

A las secretarias del departamento de Electrónica y Telecomunicaciones: Rosa Elena Flores, Aurora Robles y Erica que a través de todo este tiempo siempre mostraron una amable atención y disponibilidad, no sólo en el ámbito administrativo, sino también en lo personal.

A la Dra. Claudia Reyes Betanzo por su ayuda, asesoramiento y disposición para el manejo del equipo de grabado iónico reactivo, al personal técnico del Laboratorio de Microelectrónica del INAOE, especialmente al Quim. P. Alarcón y N. Carlos por la preparación de las muestras y observación de los perfiles de grabado en el SEM.

A M.C. Dolores Sarracino, Quim. Ivonne Best, Citlati Romero y Norma Alicia Fuentes, por la ayuda brindada hacia mi persona.

A todos mis compañeros y amigos por todo el tiempo compartido dentro y fuera de CICESE, a los microonderos: Elizabeth, Brenda, Perla, Karen, Rigo, Deyanira, Edgar, Adrián, Aarón; a los controleros: Ara, Rodrigo, David, Irak, Abimael, Lupe, Raúl, Rigo, Hitara, Lalo; a los Telecomos: Anita, Paúl, Obed, Lily, Pedro, Edwin, Christian. Gracias por hacer de las penas y tragos amargos algo pasajero y sobre todo por aumentar mi lista de amigos. Les deseo muchos éxitos en todos sus proyectos.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) con la beca 48857 y al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por el apoyo económico brindado.

Finalmente, gracias a todas estas personas que influyeron directa o indirectamente en mi formación personal y profesional.

CONTENIDO

	Página
Resumen español.....	i
Resumen inglés.....	ii
Dedicatorias.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Contenido.....	vi
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tablas.....	xiv
Capítulo I: Introducción.....	1
I.1 Motivación.....	1
I.2 Antecedentes.....	3
I.3 Objetivo de tesis.....	4
I.4 Metodología.....	5
I.5 Organización de la tesis.....	7
Capítulo II: Líneas de transmisión.....	9
II.1 Definición.....	9
II.2 Conceptos básicos de líneas de transmisión.....	10
II.2.1 Clasificación de líneas de transmisión.....	10
II.3 Líneas planares.....	15
II.3.1 Tipos de líneas de transmisión planares.....	16
II.3.1.1 Línea de cinta.....	16
II.3.1.2 Microcinta.....	17
II.3.1.3 Línea de microcinta suspendida e invertida.....	17

CONTENIDO (continuación)

	Página
II.3.1.4 Línea ranurada.....	17
II.3.1.5 Coplanar.....	17
II.3.1.5.1 Tipos de Guías de onda Coplanar.....	18
II.4 Comparación: Ventajas y desventajas de líneas planares.....	19
 Capítulo III: Tecnologías de Fabricación.....	 20
III.1 Introducción.....	20
III.2 Diseño de mascarillas.....	20
III.3 Limpieza general.....	23
III.4 Oxidación térmica.....	24
III.5 Depósito químico en fase vapor.....	27
III.5.1 Proceso CVD activado térmicamente a presión atmosférica (APCVD)...	28
III.5.2 Proceso CVD activado térmicamente a baja presión (LPCVD).....	30
III.6 Litografía.....	31
III.7 Grabados.....	33
III.7.1 Grabado húmedo.....	33
III.7.2 Grabado seco (plasma).....	34
III.8 Técnica de Oxidación Local de Silicio (LOCOS).....	38
III.9 Evaporación de aluminio.....	39
III.10 Dieléctricos empleados.....	41
III.10.1 Óxido de silicio (SiO_2).....	41
III.10.2 Óxido de silicio rico en silicio (SRO).....	42
III.10.3 Nitruro de silicio (Si_3N_4).....	43
III.11 Técnicas de caracterización de películas.....	44

CONTENIDO (continuación)

	Página
III.11.1 Elipsometría.....	44
III.11.2 Perfilometría.....	45
 Capítulo IV: Fabricación de Guías de Onda Coplanares.....	 47
IV.1 Introducción.....	47
IV.2 Fabricación de CPW's.....	47
IV.3 Resultados de proceso de fabricación.....	55
 Capítulo V: Modelado y Caracterización Eléctrica.....	 56
V.1 Introducción.....	56
V.2 Modelado.....	57
V.3 Caracterización eléctrica.....	59
V.4 Cálculo de la constante de propagación.....	60
V.5 Método para determinar la impedancia característica de líneas de transmisión uniformes.....	66
 Capítulo VI: Resultados Experimentales.....	 70
VI.1 Introducción.....	70
VI.2 Clasificación de resultados.....	71
VI.3 Líneas de transmisión coplanares convencionales.....	73
VI.4 Líneas de transmisión coplanares con Grabado Iónico Reactivo (RIE).....	79
VI.5 Líneas de transmisión coplanares con Oxidación Local de Silicio (LOCOS)...	86

CONTENIDO (continuación)

	Página
VI.6 Discusión de Resultados.....	92
VI.6.1 Líneas de transmisión coplanares con SRO_{20}	92
VI.6.2 Líneas de transmisión coplanares con SR_{30}	94
VI.6.3 Líneas de transmisión coplanares con $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$	97
VI.6.4 Líneas de transmisión coplanares con $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{30}$	99
 Capítulo VIII. Conclusiones.....	 102
VIII.1 Conclusiones.....	102
 Capítulo VIII. Aportaciones y Trabajo Futuro.....	 107
VIII.2 Aportaciones.....	107
VIII.3 Trabajo Futuro.....	108
 Referencias.....	 110
 Apéndice A: Procesos de Fabricación.....	 117
A.1 Clasificación de muestras.....	117
A.2 Proceso de Fabricación de Guías de Onda Coplanares con grabado iónico reactivo (RIE).....	119
A.3 Proceso de Fabricación de Guías de Onda Coplanares empleando la técnica de LOCOS.....	126
A.4 Proceso de Fabricación de Guías de Onda Coplanares convencionales.....	134

CONTENIDO (continuación)

	Página
Apéndice B: Parámetros S, T y ABCD.....	139
B.1 Parámetros de Dispersión [S].....	139
B.2 Parámetros de Transmisión [T].....	141
B.3 Parámetros ABCD.....	142
B.4 Conversión de parámetros.....	142
B.4.1 Conversión de parámetros S a T.....	143
B.4.2 Conversión de parámetros S a ABCD.....	143

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	CPW convencional. (a) Sin implantación, (b) con implantación N^+ en la parte posterior.....	6
2	CPW con grabado iónico reactivo. (a) Sin implantación, (b) con implantación N^+ en la parte posterior	6
3	CPW con oxidación local de silicio. (a) Sin implantación, (b) con implantación N^+ en la parte posterior	6
4	Representación de un circuito concentrado de una línea de transmisión.....	12
5	Estructuras de transmisión para circuitos de microondas.....	13
6	Principales líneas planares.....	16
7	Tipos de mascarillas: (a) campo claro, y (b) campo oscuro.....	21
8	Plantilla de las estructuras en rubylith en escala 200:1.....	22
9	Primera reducción de 20 veces, correspondiente al negativo del patrón original.....	22
10	Segunda reducción de 10 veces y fotorrepetición.....	23
11	Cinética de crecimiento.....	25
12	Consumo de silicio durante la oxidación térmica.....	25
13	Sistema APCVD (paredes frías).....	29
14	Sistema LPCVD.....	31
15	Proceso de litografía: (a) aplicación de FR, (b) exposición con luz UV, (c) revelado, y (d) eliminación selectiva de FR.....	32
16	Mecanismo de grabado húmedo.....	34
17	Proceso de grabado seco.....	35
18	Grabado físico (poco selectivo).....	36
19	Grabado químico.....	36
20	Grabado iónico reactivo (RIE).....	37
21	Esquema general de un sistema RIE.....	37
22	Sección transversal de estructura LOCOS a) SEMIROX y b) FULLROX.....	39
23	Esquema básico de evaporación.....	40

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
24	Esquema básico de una evaporadora.....	41
25	Diagrama esquemático de un elipsómetro.....	45
26	Estructuras diseñadas a) sin implantación, b) con implantación N^+ en la parte posterior	48
27	Estructuras diseñadas a) sin implantación, b) con implantación N^+ en la parte posterior	48
28	Estructuras diseñadas a) sin implantación, b) con implantación N^+ en la parte posterior	49
29	Geometrías de la CPW.....	50
30	Línea de transmisión con elementos distribuidos	57
31	Estructuras para implementar el método de dos línea.....	60
32	Representación de la constante dieléctrica efectiva.....	65
33	Línea CPW convencional. a) con Si-HR, b) con Si-HR- N^+	73
34	Constante de atenuación de CPW's convencionales.....	74
35	Constante dieléctrica de líneas convencionales.....	75
36	Impedancia característica de CPW's convencionales.....	75
37	Velocidad de fase (v_f) de CPW's convencionales.....	76
38	Resistencia distribuida (R_d) de CPW's convencionales.....	77
39	Inductancia distribuida (L_d) de CPW's convencionales.....	77
40	Capacitancia distribuida (C_d) de CPW's convencionales.....	78
41	Conductancia distribuida (G_d) de CPW's convencionales.....	79
42	Línea CPW con RIE. a) con Si-HR, b) con Si-HR- N^+	80
43	Constante de atenuación de CPW's con RIE.....	80
44	Constante dieléctrica de líneas con RIE.....	81
45	Impedancia característica de CPW's con RIE.....	82
46	Velocidad de fase (v_f) de CPW's con RIE.....	83
47	Resistencia distribuida (R_d) de CPW's con RIE.....	84

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
48	Inductancia distribuida (L_d) de CPW's con RIE.....	84
49	Capacitancia distribuida (C_d) de CPW's con RIE.....	85
50	Conductancia distribuida (G_d) de CPW's con RIE.....	86
51	Línea CPW con LOCOS. a) con Si-HR, b) con Si-HR-N ⁺	86
52	Constante de atenuación de CPW's con LOCOS.....	87
53	Constante dieléctrica de líneas con LOCOS.....	88
54	Impedancia característica de CPW's con LOCOS.....	88
55	Velocidad de fase (v_f) de CPW's con LOCOS.....	89
56	Resistencia distribuida (R_d) de CPW's con LOCOS.....	90
57	Inductancia distribuida (L_d) de CPW's con LOCOS.....	90
58	Capacitancia distribuida (C_d) de CPW's con LOCOS.....	91
59	Conductancia distribuida (G_d) de CPW's con LOCOS.....	91
60	Constante de atenuación de CPW's con SRO ₂₀	93
61	Constante dieléctrica efectiva de CPW's con SRO ₂₀	93
62	Impedancia característica de CPW's con SRO ₂₀	94
63	Constante de atenuación de CPW's con SRO ₃₀	95
64	Constante dieléctrica efectiva de CPW's con SRO ₃₀	96
65	Impedancia característica de CPW's con SRO ₃₀	96
66	Constante de atenuación de CPW's con SiO ₂ /SRO ₂₀	97
67	Constante dieléctrica efectiva de CPW's con SiO ₂ /SRO ₂₀	98
68	Impedancia característica de CPW's con SiO ₂ /SRO ₂₀	99
69	Constante de atenuación de CPW's con SiO ₂ /SRO ₃₀	100
70	Constante dieléctrica efectiva de CPW's con SiO ₂ /SRO ₃₀	100
71	Impedancia característica de CPW's con SiO ₂ /SRO ₃₀	101
72	Red de dos puertos.....	139

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Resumen de fórmulas generales para líneas de transmisión.....	14
II	Combinaciones de dieléctricos para las estructuras.....	49
III	Dimensiones geometrías de las CPW's a fabricar.....	50
IV	Espesores y profundidades obtenidas del proceso de fabricación.....	55
V	Parámetros evaluados y ecuaciones utilizadas.....	71
VI	Clasificación de líneas de transmisión coplanares.....	72
VII	Resumen de estructuras con valores de pérdidas menores.....	105
VIII	Resumen de valores de impedancia característica de líneas de transmisión coplanares.....	105
IX	Clasificación de muestras.....	118

Capítulo I

Introducción

I.1 Motivación

La tecnología de microondas ha avanzado rápidamente en las últimas décadas debido al desarrollo de nuevos dispositivos y circuitos de estado sólido, los cuales juegan un rol importante en la ingeniería de microondas moderna. Las guías de onda rectangulares y tubos aún son utilizados en numerosas aplicaciones, sin embargo, muchas de estas estructuras han empezado a ser sustituidas por líneas de transmisión planares así como circuitos de estado sólido. Una geometría planar implica que la característica de los elementos pueda determinarse desde las dimensiones en un plano. Este tipo de geometría es uno de los requisitos para que las estructuras sean adecuadas para ser utilizadas como elementos de circuito en circuitos integrados de microondas (MIC's) así como en circuitos integrados monolíticos de microondas (MMIC's). Diversas formas de líneas de transmisión han sido adaptadas para su uso en MIC's, las líneas de transmisión planares más representativas son: líneas de cinta, microcinta, microcinta invertida, línea ranurada, guías de onda coplanares, y de cinta coplanar. Los circuitos realizados utilizando cualquiera de las líneas mencionadas anteriormente, o combinaciones de ellas, presentan distintas ventajas como: menor peso, tamaño pequeño, mejor funcionamiento, bajo

costo, mejor confiabilidad y reproducibilidad. Además, estas estructuras son compatibles con dispositivos de estado sólido.

Las líneas de transmisión son las interconexiones que transmiten la energía electromagnética de un punto a otro. Esta energía puede ser utilizada en forma de luz, calor, trabajo mecánico, así como para transmitir información oral, musical, fotográfica o estadística (Kraus and Fleisch, 2000). También son esenciales en sistemas de componentes inalámbricos, se utilizan para conectar antenas para transmitir y recibir información, para acoplamientos de impedancias en mezcladores y amplificadores, y como elementos resonante en osciladores y filtros (Pozar, 2001). Así mismo son necesarias para conectar distintos elementos de circuitos y sistemas. Los circuitos que operan en rangos de bajas frecuencias utilizan circuitos abiertos y líneas coaxiales. Mientras que líneas coaxiales, de cinta, microcinta y guías de onda son empleadas en frecuencias de microondas. Por lo general, a bajas frecuencias las características de la señal no se ven afectadas ya que la señal se propaga a través de la línea. Sin embargo, en rangos de frecuencias de microondas se ven afectadas de manera significativa por el hecho de que el tamaño del circuito es comparable a la longitud de la onda (Misra, 2004).

Las guías de onda coplanares (CPW's) son ampliamente utilizadas en MMIC's como interconexiones y redes de acoplamiento. Bajas pérdidas, multifuncionalidad y líneas de transmisión altamente integrables son características importantes para obtener alto rendimiento de MMIC's en tecnología de silicio. Sin embargo, la baja resistividad del sustrato estándar deteriora el rendimiento de componentes pasivos en chip. Para resolver este problema de pérdidas dieléctricas altas y la baja resistividad del sustrato, una capa de dióxido de silicio (SiO_2) y una de polímero son utilizadas en aplicaciones de microondas.

I.2 Antecedentes

La guía de onda coplanar propuesta por Wen, consiste de un sustrato con conductores en la parte superior los cuales forman una tira central separada por una ranura angosta de los dos planos de tierra de cada lado (Wen, 1969). Las dimensiones de la tira central, la separación, el espesor y permitividad del sustrato dieléctrico determinan la constante dieléctrica efectiva (ϵ_{eff}), la impedancia característica (Z_o) y la atenuación de la línea (α). Esta estructura básica se conoce como CPW convencional.

Cuando se tiene una estructura CPW en la cual el metal está en contacto directo con el sustrato se tienen bajas pérdidas a frecuencias de microondas, sin embargo existen corrientes de fuga en DC, por tal motivo Gamble propuso una estructura con un dieléctrico entre el metal y sustrato anulando las corrientes de fuga (Gamble et al., 1999), sin embargo, este dieléctrico provocaba un aumento en las pérdidas debido a la capa inductiva en la superficie del sustrato (por ejemplo: silicio); por otra parte, al hacer discontinuo este dieléctrico se tiene una disminución en las pérdidas de 18 a 3 dB/cm @ 30 GHz (Wu et al., 1999). Otra alternativa para disminuir pérdidas, es removiendo el material entre las ranuras de la estructura, esto con la finalidad de disminuir la dispersión y minimizar pérdidas por propagación (Herrick et al., 1998). También se tienen estructuras con orillas de conductor central y planos de tierra elevados (Kim et al., 2000), obteniendo bajas pérdidas sobre rangos amplios de impedancia. Este tipo de estructuras ayudan a reducir pérdidas por conductor debido a la disminución de la concentración y corriente en las orillas de las líneas de señal. CPW's con puente entre los planos de tierra (Kwon et al., 2001), muestran bajas pérdidas con amplio rango de impedancia (1 dB/cm @ 50 GHz y 25 a 80 Ω) y constante dieléctrica baja, la desventaja de este tipo de estructura radica en la dificultad de implementar el puente. Por otro lado, CPW's con electrodo de señal elevado (Yoon et al., 2001) presentan bajas pérdidas y baja dispersión así como alta impedancia (Kanthamani et al., 2008), sin embargo, tienen un alto costo en producción en masa y

aplicaciones limitadas. Líneas con polímero grueso (10 μm) en silicio de baja resistividad (Bouchriha et al., 2003) disminuyen pérdidas, así mismo (Ponchak et al., 2001) reportan que entre más gruesa sea la capa de polímero, menores serán las pérdidas (28% @ 40 GHz) de la línea, además si el polímero se graba las pérdidas disminuyen 35% más, resultando esta reducción de pérdidas a las presentadas por líneas en silicio de alta resistividad. También se han estudiado estructuras con una capa pasivadora de SRO_{20} entre los conductores y el substrato (Reynoso Hernández et. al., 2003), con lo cual se reportó que a frecuencias menores de 5 GHz las pérdidas son menores que cuando se emplea una capa de SiO_2 . Las CPW's convencionales tienen un conductor relativamente delgado y el campo eléctrico se distribuye en un contorno elíptico, por lo cual (Sagkol et al., 2005) propusieron una estructura coplanar con alta razón de aspecto (HAR) con electrodos de cobre de 15 μm de espesor, permitiendo baja atenuación debido a que tiene un plano paralelo o región de tipo tira, la cual afecta las características de la línea dependiendo de la separación entre los electrodos. Líneas de transmisión con impedancia característica de 18-25 Ω fabricadas en silicio de alta resistividad tienen pérdidas de 2.4-3.4 dB/cm antes de remover el silicio y 1.7-2.4 dB/cm @ 30 GHz después de removerlo (Todd, et al., 2009), con lo que se demuestra una mejoría substancial en las pérdidas debido al silicio eliminado.

I.3 Objetivo de tesis

El objetivo de la presente tesis es estudiar el efecto que el óxido de silicio rico en silicio (SRO) tiene sobre las pérdidas (en función de la frecuencia) de líneas de transmisión coplanares al emplearse como pasivador de interfase, debido a las cargas libres presentes en el SRO. Siendo el objetivo principal de este estudio el análisis del **efecto de estas cargas en la interfase Si-SRO**.

I.4 Metodología

Para lograr el objetivo de este trabajo se proponen dos etapas. La primera es la de fabricación de las líneas de transmisión coplanares en el laboratorio de Microelectrónica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y electrónica (INAOE), en esta etapa se propone utilizar como soporte un substrato de silicio con las siguientes características:

- Si de alta resistividad ($\rho > 4000 \Omega \cdot \text{cm}$)
- Tipo N
- $\langle 100 \rangle$
- Con y sin implantación N^+ en la parte posterior.

Para la metalización se propone aluminio, y como dieléctricos para aislar el substrato de la metalización:

- SiO_2
- SRO_{20}
- SRO_{30}

Así mismo se proponen tres estructuras de líneas coplanares, una convencional, una con grabado iónico reactivo y una con oxidación local de silicio, estas estructuras se pueden observar en las figuras 1,2 y 3, respectivamente:

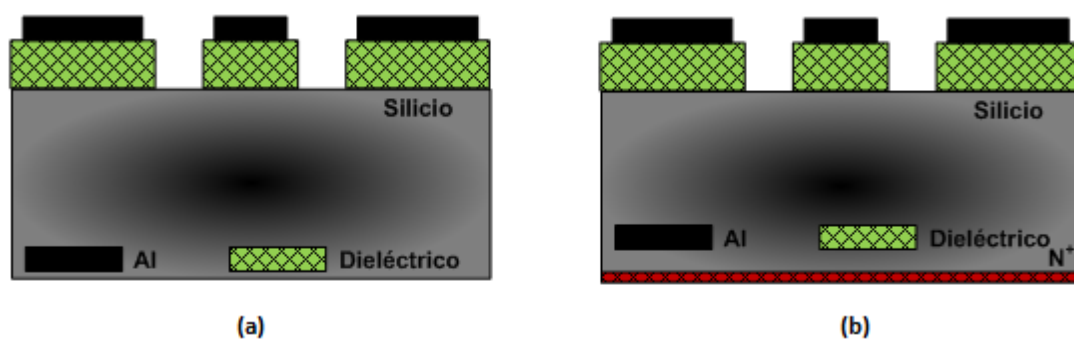


Figura 1. CPW convencional. (a) Sin implantación, (b) con implantación N^+ en la parte posterior.

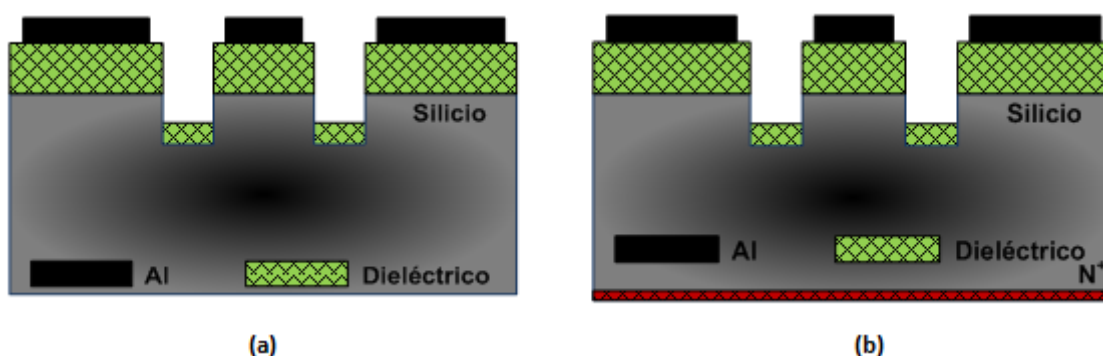


Figura 2. CPW con grabado iónico reactivo. (a) Sin implantación, (b) con implantación N^+ en la parte posterior.

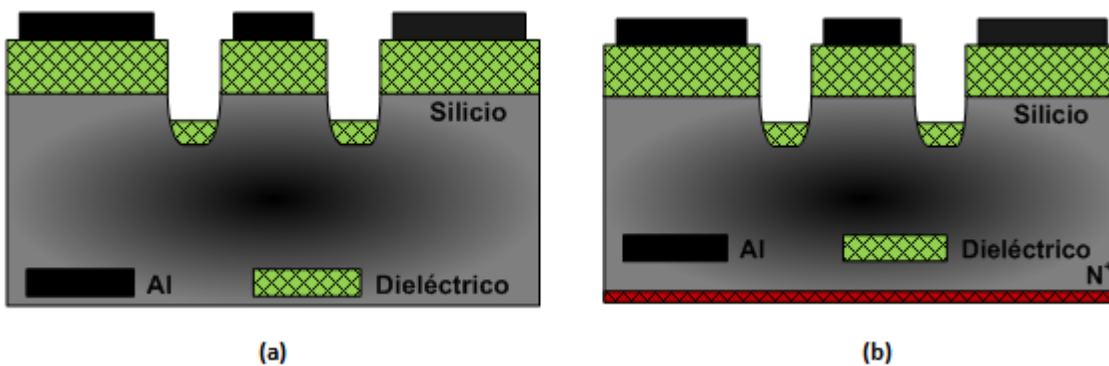


Figura 3. CPW con oxidación local de silicio. (a) Sin implantación, (b) con implantación N^+ en la parte posterior.

La segunda etapa corresponde a la caracterización eléctrica, la cual se realizó en el Centro de Investigación Científica y educación Superior de Ensenada (CICESE).

I.5 Organización de la tesis

En el Capítulo 2 se presentan los conceptos básicos sobre líneas de transmisión, como se clasifican, y los tipos de líneas de transmisión planares.

En el Capítulo 3 se presentan las tecnologías de fabricación necesarias para la fabricación de las guías de onda coplanares, las propiedades de los dieléctricos utilizados, los tipos de grabados, así como una breve explicación de la técnica de oxidación local, finalmente las técnicas de medición de espesores de películas e índice de refracción de los materiales empleados.

El Capítulo 4 muestra los procesos de fabricación de las CPW's, así como los diagramas de flujo correspondientes a cada proceso. Se presentan los resultados obtenidos de las estructuras fabricadas.

En el Capítulo 5 se detalla ampliamente la caracterización eléctrica que se empleará para obtener las características de las CPW's, como son: la constante de atenuación (α), la constante dieléctrica efectiva (ϵ_{eff}), impedancia característica (Z_L), y los parámetros distribuidos de las líneas de transmisión (L_d , C_d , R_d y G_d).

En el Capítulo 6 se muestran los resultados experimentales obtenidos de la caracterización eléctrica de las estructuras fabricadas, así como la comparación de las líneas de transmisión estudiadas.

En el Capítulo 7 se presenta la discusión de los resultados experimentales de las líneas de transmisión coplanares estudiadas.

En el capítulo 8 se presentan las conclusiones del estudio realizado a líneas de transmisión coplanares fabricadas en silicio utilizando óxido de silicio rico en silicio como pasivador e interfase, las aportaciones y el trabajo futuro.

Capítulo II

Líneas de transmisión

II.1 Definición

Una línea de transmisión puede ser rigurosamente definida como cualquier estructura que guía la propagación de una onda electromagnética desde un punto a hasta un punto b (Dworsky, 1979). Las líneas de transmisión en circuitos de microondas normalmente se emplean para llevar información o energía de un punto a otro y como elemento de circuito dentro de circuitos pasivos como filtros, transformadores de impedancia, acopladores, líneas de retardo, etc., (Bahl and Bhartia, 1988). A bajas frecuencias, dos componentes electrónicos pueden ser conectados mediante un alambre o una línea en un circuito impreso. En frecuencias de microondas el empleo de alambres se reflejan en pérdidas y potencia radiada dentro del circuito. Por lo antes mencionado se requieren líneas de transmisión y guías de onda para conectar componentes de microondas y elementos de circuito. Las líneas de transmisión más comunes para este rango de frecuencia son guías de onda rectangulares, líneas coaxiales, y de microcinta. La opción de un medio de transmisión conveniente para construir circuitos de microondas, componentes, y sistemas está dictada por características eléctricas y mecánicas. Las eléctricas envuelven parámetros como las pérdidas de la línea de transmisión, dispersión, modos de mayor orden, rango de niveles de impedancia, máxima frecuencia de operación,

y conveniencia para implementar componentes y dispositivos. Mientras que las mecánicas incluyen facilidad de fabricación, tolerancia, y confiabilidad (Chang, 1994).

II.2 Conceptos básicos de líneas de transmisión

II.2.1 Clasificación de líneas de transmisión

Las líneas de transmisión se pueden clasificar en base a la configuración de campo o modos en los que pueden transmitir. De esta manera se clasifican en dos grandes grupos:

- 1) *Tipos de modo propagación transversal electromagnético (TEM)*: el campo eléctrico (E) y el magnético (H) son transversales a la dirección de propagación. A este tipo pertenecen las líneas de dos conductores tales como las líneas bifilares, coaxiales, etc.
- 2) *Tipos de modos transversal eléctrico (TE) y transversal magnético (TM)*: el campo eléctrico (E) o el magnético (H) o ambas tienen componentes en la dirección de propagación. A este tipo pertenecen “las guías” de onda huecas de un solo conductor y las fibras ópticas o varillas dieléctricas.

Estructuras multiconductoras que soportan modos de propagación TEM o no-TEM son comúnmente referidas como “líneas de transmisión”. Guías de onda (conductor simple) o barra dieléctrica (no conductora) o sus derivados soportan el modo de propagación no-TEM.

Las líneas de transmisión TEM se caracterizan por cuatro parámetros básicos: la impedancia característica Z_o , la velocidad de fase v_p , la constante de atenuación α , y la capacidad de manejo de máxima energía P_{max} , en términos de parámetros físicos y propiedades de los materiales dieléctricos y conductores empleados.

En una línea TEM (terminada perfectamente), la razón de voltaje-corriente en cualquier punto a lo largo de la línea es constante, teniendo las unidades de resistencia para un medio de bajas pérdidas. Esta razón es definida como la impedancia característica. La constante de propagación para una estructura de transmisión es una cantidad compleja, abarcando una parte real conocida como la constante de atenuación (la cual contiene información acerca de la disipación debida a las pérdidas por el conductor y el dieléctrico) y una parte imaginaria conocida como la constante de fase (que contiene información acerca de la velocidad de fase). La constante de atenuación es definida por (Bahl and Bhartia, 1988):

$$\alpha = \frac{\text{Potencia promedio perdida por unidad de longitud}}{2 \times \text{Potencia transmitida}} \quad (1)$$

Considerando una línea de transmisión uniforme con resistencia en serie ($\bar{R}$), inductancia en serie ($\bar{L}$), conductancia en paralelo ($\bar{G}$), y capacitancia en paralelo ($\bar{C}$), todo definido por unidad de longitud de la línea mostrada en la figura 4.

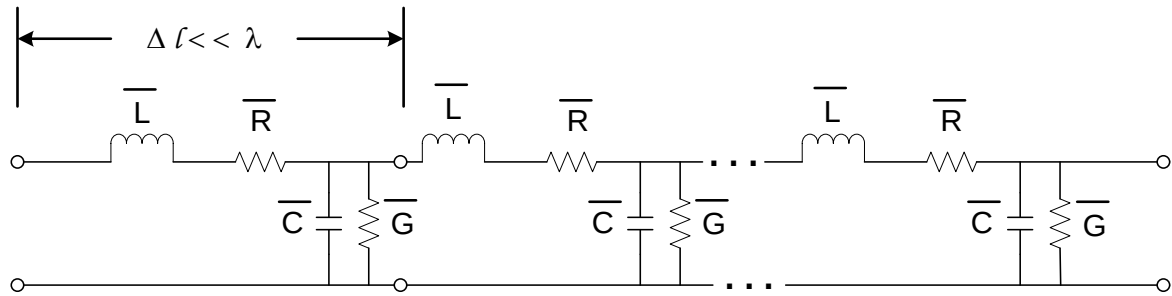


Figura 4. Representación de un circuito concentrado de una línea de transmisión.

Tomando en cuenta que ni el material del conductor ni el del dieléctrico son perfectos, entonces se puede asociar la existencia de una resistencia en serie y una conductancia en paralelo debido a dichas imperfecciones.

Una extensa variedad de estructuras de líneas de transmisión y guías de onda son válidas en frecuencias de microondas. La figura 5 muestra las estructuras (convencionales e integradas) más comunes. Media longitud de onda ($1/2 \lambda$), un cuarto de longitud de onda ($1/4 \lambda$) o secciones pequeñas de estas líneas forman los bloques básicos en la mayoría de los circuitos de microondas.

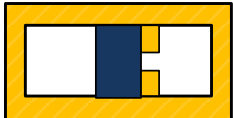
Convencionales		Integradas	
Línea Coaxial		Línea de cinta (stripline)	
Guías de onda rectangular		Línea microcinta	
Guías de onda cilíndrica		Línea ranurada	
Guías de onda acanalada		Línea coplanar	
Guías de onda dieléctrica rectangular		Línea microcinta suspendida	
Guías de onda dieléctrica cilíndrica		Línea terminada	

Figura 5. Estructuras de transmisión para circuitos de microondas.

En la tabla I se presenta un resumen de las expresiones más importantes para líneas de transmisión (Bahl and Bhartia, 1988).

Tabla I. Resumen de fórmulas generales para líneas de transmisión.

Cantidad	Expresión de línea general	Expresión de línea ideal	Aproximación para líneas de bajas pérdidas
Constante de propagación $\gamma = \alpha + j\beta$	$\sqrt{(\bar{R} + j\omega\bar{L})(\bar{G} + j\omega\bar{C})}$	$j\omega\sqrt{\bar{L}\bar{C}}$	
Constante de fase β	$Im(\gamma)$	$j\omega\sqrt{\bar{L}\bar{C}} = \frac{\omega}{v_p} = \frac{2\pi}{\lambda}$	$\omega\sqrt{\bar{L}\bar{C}} \left[1 - \frac{\bar{R}\bar{G}}{4\omega^2\bar{L}\bar{C}} + \frac{\bar{G}^2}{8\omega^2\bar{C}^2} + \frac{\bar{R}^2}{8\omega^2\bar{L}^2} \right]$
Constante de atenuación α	$Re(\gamma)$	0	$\frac{\bar{R}}{2Z_o} + \frac{\bar{G}Z_o}{2}$
Impedancia característica Z_o	$\sqrt{\frac{\bar{R} + j\omega\bar{L}}{\bar{G} + j\omega\bar{C}}}$	$\sqrt{\frac{\bar{L}}{\bar{C}}}$	$\sqrt{\frac{\bar{L}}{\bar{C}}} \left[1 + j \left(\frac{\bar{G}}{2\omega\bar{C}} - \frac{\bar{R}}{2\omega\bar{L}} \right) \right]$
Impedancia de entrada Z_i	$Z_o \left(\frac{Z_L \cosh(\gamma l) + Z_o \sinh(\gamma l)}{Z_o \cosh(\gamma l) + Z_L \sinh(\gamma l)} \right)$	$Z_o \left(\frac{Z_L \cos(\beta l) + jZ_o \sin(\beta l)}{Z_o \cos(\beta l) + jZ_L \sin(\beta l)} \right)$	
Impedancia de línea en corto ($Z_L=0$)	$Z_o \tanh(\gamma l)$	$jZ_o \tan(\beta l)$	$Z_o \left(\frac{\alpha l \cos(\beta l) + j \sin(\beta l)}{\cos(\beta l) + j \alpha l \sin(\beta l)} \right)$
Impedancia de línea abierta ($Z_L=\infty$)	$Z_o \coth(\gamma l)$	$-jZ_o \cot(\beta l)$	$Z_o \left(\frac{\cos(\beta l) + j \alpha l \sin(\beta l)}{\alpha l \cos(\beta l) + j \sin(\beta l)} \right)$
Impedancia de $1/4 \lambda$	$Z_o \left(\frac{Z_L \sinh(\alpha l) + Z_o \cosh(\alpha l)}{Z_o \sinh(\alpha l) + Z_L \cosh(\alpha l)} \right)$	$\frac{Z_o^2}{Z_L}$	$Z_o \left[\frac{Z_o + Z_L \alpha l}{Z_L + Z_o \alpha l} \right]$
Impedancia de $1/2 \lambda$	$Z_o \left(\frac{Z_L \cosh(\alpha l) + Z_o \sinh(\alpha l)}{Z_o \cosh(\alpha l) + Z_L \sinh(\alpha l)} \right)$	Z_L	$Z_o \left[\frac{Z_L + Z_o \alpha l}{Z_o + Z_L \alpha l} \right]$
Coeficiente de reflexión ρ	$\frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o}$	$\frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o}$	
Relación de onda estacionaria	$\frac{1 + \rho }{1 - \rho }$	$\frac{1 + \rho }{1 - \rho }$	

II.3 Líneas planares

Para que una estructura sea utilizada como elemento de circuito dentro de circuitos integrados de microondas (MICs), uno de los principales requerimientos es que esta estructura tenga configuración “planar”, es decir, que las características de los elementos puedan determinarse desde las dimensiones en un plano.

Diversas formas de líneas de transmisión han sido transformadas para su uso en MICs, las líneas de transmisión planares representativas son: líneas de cinta, microcinta, microcinta invertida, línea ranurada, guías de onda coplanares, y de cinta coplanar. Los circuitos realizados usando cualquiera de las líneas mencionadas anteriormente o combinaciones de ellas presentan distintas ventajas como: menor peso, tamaño pequeño, mejor funcionamiento, bajo costo, mejor confiabilidad y reproducibilidad, comparadas con circuitos de microondas convencionales. Estas estructuras son compatibles con dispositivos de estado sólido.

El nombre de circuitos planares se refiere a redes de conductores depositados sobre uno o ambas caras de una placa aislante (substrato dieléctrico), (Gardiol, 1984). Para aplicaciones de ondas milimétricas, estas estructuras deben ser completamente blindadas por metal (guía de onda) para suprimir radiación, por ejemplo la línea de substrato suspendida, y la línea terminada (finline). Las principales estructuras empleadas en circuitos planares son la microcinta, línea ranurada, y línea coplanar, las cuales se muestran en la figura 6.

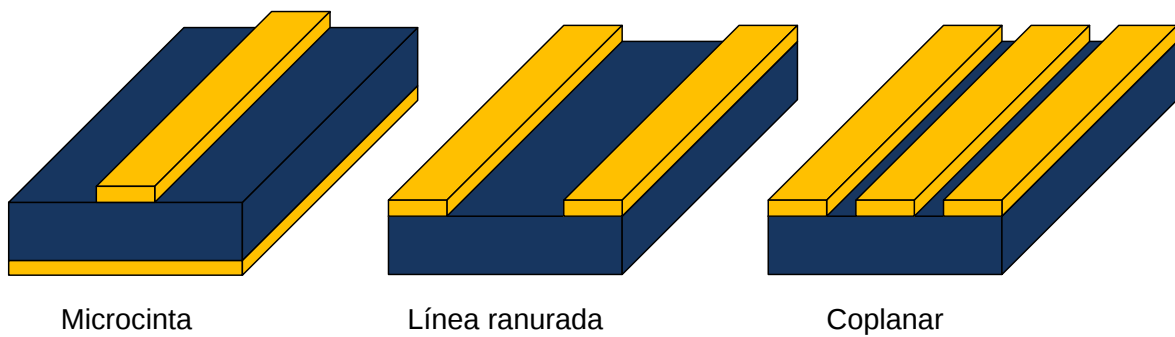


Figura 6. Principales líneas planares.

Las líneas de transmisión planares son líneas no-homogéneas que consisten de dos medios de propagación de materiales con propiedades diferentes (generalmente aire y un dieléctrico).

En resumen, conductores metálicos son depositados en una o ambas caras del dieléctrico, incrementando la complejidad de la estructura. El modo dominante en estas estructuras es un modo híbrido, que incluyen las seis componentes de los campos electromagnéticos.

Los problemas electromagnéticos correspondientes no poseen una solución analítica exacta para la distribución de campo y las características de propagación. Un gran número de métodos de aproximaciones se han desarrollado.

II.3.1 Tipos de líneas de transmisión planares

II.3.1.1 Línea de cinta

Es una de las líneas de transmisión usadas comúnmente para MICs pasivos. El modo de propagación dominante es el TEM, su diseño puede obtenerse completamente mediante análisis electrostático como mapeo conformal.

II.3.1.2 Microcinta

Esta estructura es una línea de transmisión no homogénea, donde las líneas de campo entre la cinta y el plano de tierra no están contenidas completamente en el sustrato. Entonces, el modo de propagación a lo largo de la microcinta no es puramente TEM sino cuasi-TEM.

II.3.1.3 Línea de microcinta suspendida e invertida

Las líneas de microcinta suspendidas e invertidas proveen un mayor factor Q (500-1500) que la microcinta. El amplio rango de valores de impedancia hace a este medio particularmente interesante para filtros.

II.3.1.4 Línea ranurada

La configuración de este tipo de estructuras es empleada en circuitos donde se requieren líneas de alta impedancia, stubs en serie, circuitos en corto, y combinaciones híbridas con circuitos de microcinta en MICs. El modo de propagación es no-TEM y casi TE en naturaleza.

II.3.1.5 Coplanar

Este tipo de estructura soporta un modo de propagación cuasi-TEM, ofrece diversas ventajas en cuestión de diseño sobre la línea de microcinta convencional:

primero, simplifica la fabricación; segundo, tienen facilidad de montar dispositivos activos y pasivos tanto en serie como en paralelo; tercero, elimina la necesidad de perforar el sustrato (via-holes) y cuarto, reduce las pérdidas por radiación (Simons, 2001). En cuanto a fabricación permite el uso de técnicas medición en oblea controladas por computadora para caracterización de dispositivos y circuitos hasta varias decenas de GHz. En cuanto al rendimiento, el modo de propagación cuasi-TEM en la CPW tiene baja dispersión, por esta razón ofrece el potencial para construir circuitos y componentes de banda ancha.

II.3.1.5.1 Tipos de Guías de onda Coplanar

Este tipo de estructura puede clasificarse de la siguiente forma:

- CPW convencional.
- CPW con conductor posterior.
- CPW micromaquinado.

En una CPW convencional, los planos de tierra son semi-infinitos a cada lado del conductor central. Sin embargo, en un circuito práctico los planos de tierra son finitos. La CPW con conductor posterior tiene un plano de tierra adicional en la parte inferior del sustrato. Este plano de tierra no sólo provee soporte mecánico al sustrato sino que actúa como disipador de calor para circuitos con dispositivos activos.

Las aplicaciones típicas de líneas coplanares son: amplificadores, combinadores activos, dobladores de frecuencia, mezcladores, interruptores o conmutadores, antenas impresas, filtros, etc.

II.4 Comparación: Ventajas y desventajas de líneas planares

El diseño de circuitos de microondas genera algunos problemas interesantes de topología, particularmente cuando se hace uso de guías de onda.

Una **ventaja** de los circuitos planares, radica en el hecho de que estas estructuras existen prácticamente en un universo bidimensional. Su fabricación está basada en procesos fotográficos, los cuales pueden ser repetidos cualquier número de veces una vez que un prototipo ha sido diseñado y revisado. Las dimensiones pueden reducirse significativamente mediante el uso de substrato con alta permitividad. La inserción de elementos de circuito, son fácilmente implementados en circuitos planares. Los dispositivos generalmente son conectados en serie en microcinta, en paralelo en líneas ranuradas, y en líneas coplanares se pueden realizar tanto conexiones en serie como en paralelo.

Las principales **restricciones** en líneas planares son su baja capacidad de manejo de potencia, lo cual limita sus aplicaciones para niveles de pequeña señal, y las discontinuidades producidas por los conectores, lo cual es difícil de evitar.

Capítulo III

Tecnologías de Fabricación

III.1 Introducción

La evolución y crecimiento de la industria electrónica en las últimas tres décadas ha sido posible gracias a la disponibilidad de circuitos microelectrónicos con mejores características. El silicio es el material semiconductor mayormente utilizado en electrónica de estado sólido. Para continuar con el crecimiento en el tamaño de los circuitos integrados y la complejidad, el silicio ha sido empleado en forma de cristal simple con incremento continuo en tamaño y mejoras en perfección, por lo cual es importante conocer las técnicas de fabricación. En este capítulo se detallan los pasos necesarios para la fabricación de guías de onda coplanares, desde la obtención de las mascarillas, depósitos, oxidaciones, técnicas de medición de espesores de películas e índice de refracción de los materiales empleados.

III.2 Diseño de mascarillas

Las mascarillas son patrones geométricos sobre películas delgadas opacas de cromo (Cr) u óxido ferroso (FeO) pre-depositadas sobre substratos de cuarzo o vidrio de borosilicato. Esencialmente, las mascarillas son el equivalente a un negativo en fotografía.

Las propiedades más importantes que debe tener el sustrato para las mascarillas son: alto grado de transparencia óptica, bajo coeficiente de expansión térmica, alto grado de planaridad (Campbell, 1996). Existen mascarillas con diferente polaridad (ver figura 7), las cuales son:

- Campo claro, es decir, en su mayoría es clara y los patrones de interés son oscuros.
- Campo oscuro, es oscura en su mayoría y los patrones son claros.

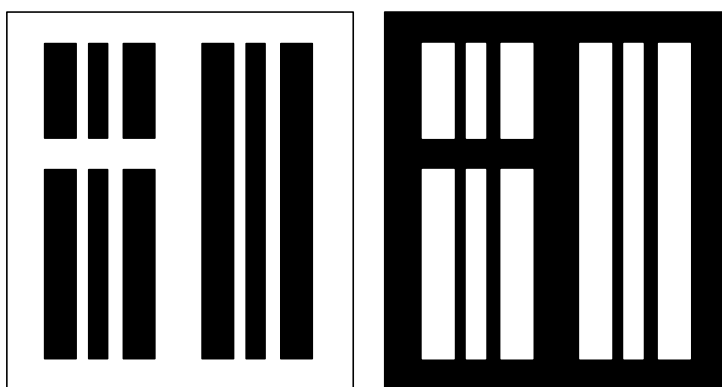


Figura 7. Tipos de mascarillas: (a) campo claro, y (b) campo oscuro.

En este trabajo se empleó la técnica disponible en el laboratorio de microelectrónica del INAOE para la obtención de mascarillas, la cual consta de los siguientes pasos:

El primer paso en la obtención de mascarillas consiste en realizar una plantilla de las dimensiones geométricas de las CPW's en papel albanene a una escala de 200:1. La cual posteriormente permite la obtención de los patrones geométricos en un material llamado rubylith, que se puede observar en la figura 8.

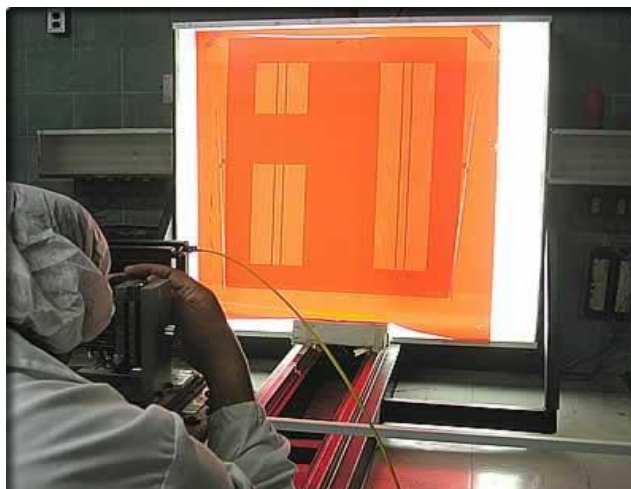


Figura 8. Plantilla de las estructuras en rubylith en escala 200:1.

A continuación se lleva a cabo una primera reducción de 20 veces al tomar una placa fotográfica de los patrones geométricos que corresponde al negativo del patrón original, la figura 9 muestra la primera reducción.

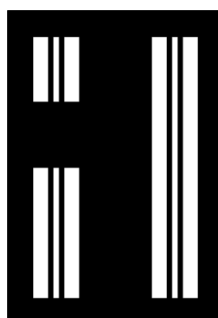


Figura 9. Primera reducción de 20 veces, correspondiente al negativo del patrón original.

Subsecuentemente se prosigue con la *fotorrepetición*, la cual es una segunda reducción ahora de 10 veces. Esta última placa permite la repetición matricial sobre la superficie de una placa fotográfica (conocida como maestra), la cual se obtiene por medio del uso de una fotorrepetidora. Es a partir de esta última placa que se obtiene una fotografía de contacto sin hacer reducción, a esta nueva placa se le conoce como *placa de contacto* y corresponde a un negativo del patrón geométrico en rubylith, como se muestra en la figura 10.

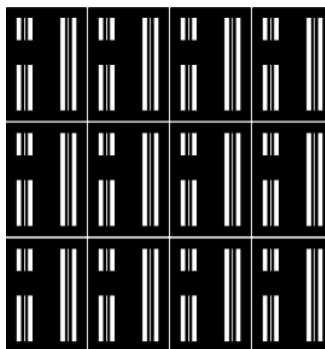


Figura 10. Segunda reducción de 10 veces y fotorrepetición.

III.3 Limpieza general

La finalidad de este paso es producir una superficie de silicio sin impurezas o cargas atómicas. Esta etapa de fabricación es de gran importancia para cualquier proceso, debido a que de esto depende que el proceso de fabricación se realice de forma adecuada y que no existan contaminantes externos durante ésta. Las impurezas que pueden existir en la superficie de la oblea incluyen desde residuos orgánicos, materiales depositados durante grabados, partículas metálicas depositadas en plasma, cámaras de implantación y grabado, y oxidación de películas delgadas. Para remover todos los tipos de impurezas se requieren operaciones secuenciales. Para aislar las operaciones, cada paso normalmente finaliza con un enjuague en agua desionizada. La pureza del agua es medida por la resistividad y el contenido total orgánico (TOC). La resistividad típica es entre 14 y 18 $M\Omega \cdot cm$. Es importante recalcar que las etapas de limpieza dependen de cada laboratorio, en el caso del laboratorio de microelectrónica del INAOE se conforma de las siguientes etapas:

- a. **Desengrasado.-** se realiza con la finalidad de eliminar la grasa que puedan tener las muestras.

- b. **Eliminación de óxido nativo.**- se realiza con la finalidad de eliminar el óxido que se forma en la superficie del silicio cuando se expone a un ambiente de oxígeno o aire a temperatura ambiente, y que es de aproximadamente 5-10 Å.
- c. **RCA's.**- también conocida como limpieza estándar, ésta consta de dos soluciones con peróxido de hidrogeno (H_2O_2): una mezcla alcalina con hidróxido de amonio (NH_4OH) (RCA I) y otra formada por una mezcla ácida (RCA II) con ácido clorhídrico (HCl). Ambas soluciones son calentadas entre 75 y 80° C, la RCA I está formada de NH_4OH (27%), H_2O_2 (30%) y H_2O , en proporciones desde 1:5:5 a 1:2:7 por volumen y se utiliza para remover residuos orgánicos, mientras que la RCA II consta de H_2O_2 (30%), HCl (37%), y H_2O en proporciones desde 1:1:6 a 2:1:8 por volumen, ésta está designada para remover iones y cationes alcalinos, así como contaminantes metálicos que no se eliminaron durante la RCA I (Zhang, 2001).

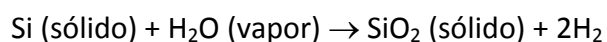
III.4 Oxidación térmica

La oxidación del silicio ocurre por la difusión interna del oxidante, como consecuencia, un óxido crece en la interfase Si/SiO₂ (Campbell, 1996).

La oxidación de silicio se produce mediante la reacción química en la interfase Si/SiO₂, de acuerdo a la siguiente cinética de crecimiento (Figura 11):



Oxidación seca



Oxidación húmeda

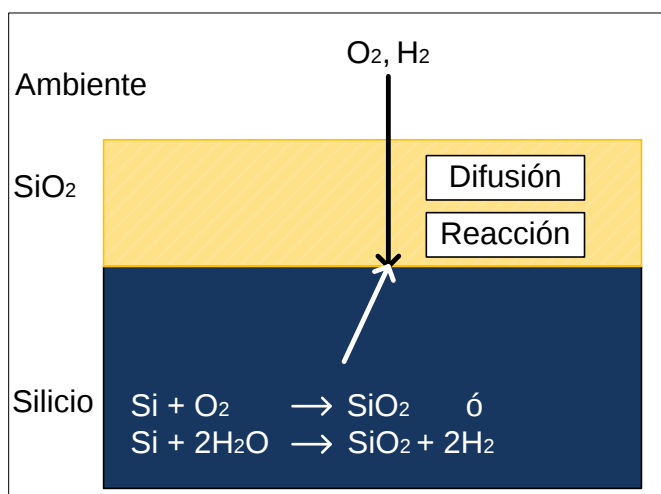


Figura 11. Cinética de crecimiento.

Para crecer un óxido no son necesarias temperaturas altas, a temperatura ambiente, el silicio expuesto en un ambiente de oxígeno o aire, formará una capa de **ÓXIDO NATIVO** sobre la superficie de aproximadamente 5 – 10 Å en 5 minutos.

Durante la oxidación el silicio se consume aproximadamente el 44% del total del espesor oxidado de SiO₂, como se puede apreciar en la figura 12.

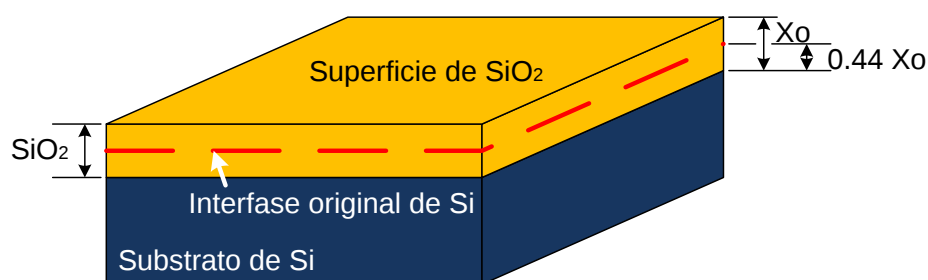


Figura 12. Consumo de silicio durante la oxidación térmica.

La razón de crecimiento se expresa como:

$$R = \frac{J}{N_1} = \frac{dt_{ox}}{dt} = \frac{Hk_s P_g}{N_1 \left[1 + \frac{k_s}{h} + \frac{k_a t_{ox}}{D} \right]} \quad (2)$$

Asumiendo que en el tiempo 0 el espesor del óxido es t_0 . La solución de la ecuación diferencial (2) es:

$$t_{ox}^2 + At_{ox} = B(t + \tau) \quad (3)$$

Donde $h = h_g/(HkT)$, y

$$A = 2D \left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{h_g} \right) \quad (4)$$

$$B = \frac{2DHP_g}{N_1} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{t_o^2 + At_o}{B} \quad (6)$$

Donde H es la constante de Henry, N_1 es la densidad de átomos de oxígeno en SiO_2 , k la constante de Boltzman, P_g la presión parcial de oxígeno en el horno, h_g el coeficiente de transporte de masa.

La ecuación (4) tiene dos casos, que son:

a) óxido delgado:

$$t_{ox} \approx \frac{A}{B}(t + \tau) \quad (7)$$

b) óxido grueso:

$$t_{ox}^2 \approx B(t + \tau) \quad (8)$$

Donde los coeficientes parabólico (B) y lineal (B/A) se refieren a los límites de la oxidación.

Los factores que afectan la velocidad de oxidación son:

- Orientación cristalina.
- Coeficiente parabólico $B \rightarrow$ independiente de la orientación del cristal.
- Coeficiente lineal $B/A \rightarrow$ depende de la orientación del cristal.
- Efecto de la orientación y temperatura sobre los coeficientes de velocidad.

III.5 Depósito químico en fase vapor

El depósito químico en fase vapor (CVD) es uno de los métodos más importantes en la obtención de películas empleado en la fabricación de circuitos integrados en silicio a gran escala (VLSI), así como dispositivos microelectrónicos de estado sólido en general. Este tipo de depósito es definido como un proceso en el que componentes de un gas o vapor reaccionan químicamente cerca o en una superficie del sustrato para formar un producto sólido (Levy, 1986). Una gran variedad de materiales, prácticamente todos los necesarios en tecnología de dispositivos de microelectrónica, pueden ser obtenidos por la técnica de CVD.

Las condiciones químicas y físicas (temperatura, presión, concentración de entrada, razones de flujo de gas, geometría del reactor, y principio de operación del reactor) durante la reacción del depósito pueden afectar fuertemente la composición y estructura del producto, así como determinar la razón de depósito y las propiedades de la película obtenida.

Los procesos de CVD pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de energía suministrada al inicio y durante la reacción en:

- (i) *Reacciones activadas térmicamente en varios rangos de presión*, los cuales abarcan la mayoría de los procesos CVD; calor es aplicado por técnicas de calefacción de resistencia, de inducción RF, o de radiación infra-roja.
- (ii) *Reacción promovida por plasma*, donde una descarga de resplandor inducido de RF (o DC) es la fuente que proporciona la mayor parte de energía que inicializa y controla la razón de la reacción.
- (iii) *Reacción inducida por fotones*, donde una longitud de onda específica del disparador de radiación acciona y sostiene la reacción por fotólisis directa o por un agente de transferencia de energía, por ejemplo mercurio activado por UV.

Este trabajo se enfoca en los procesos CVD activados térmicamente, los cuales se describen a continuación:

III.5.1 Proceso CVD activado térmicamente a presión atmosférica (APCVD):

Es el tipo más simple de los procesos de CVD, se realiza a presión atmosférica o normal (APCVD o NPCVD). Reactivos de gases son introducidos en un reactor a presión atmosférica. La presión en el sistema del reactor está ligeramente arriba de la presión atmosférica debido a la impedancia del flujo de gas en la salida del sistema. El control de la presión es algunas veces necesario para obtener buena uniformidad de la película depositada. La energía es aplicada para calentar el sustrato a una temperatura apropiada para iniciar y mantener la reacción química. La temperatura y la razón de flujo de la reacción determinan la razón de depósito de la película. La ventaja de APCVD es su simplicidad, debido a que no es necesario el empleo de bombas de vacío. Además esta técnica es un proceso muy versátil en la producción de circuitos monolíticos (Pierson,

1992), es relativamente simple, se realizan en tiempos cortos y a temperaturas moderadas ($\sim 450^\circ \text{C}$). La desventaja es la tendencia para nucleación en fase de gas homogénea para contaminación de partículas, a menos que se utilicen técnicas de inyección de gas optimizadas especialmente. Los sistemas de presión atmosférica, tienen mayores desventajas cuando:

- Operan a alta temperatura, se debe emplear una configuración horizontal.
- Operan a baja temperatura, la velocidad de depósito disminuye.

Mediante este proceso es posible la obtención de SiO_2 , el cual se obtiene mediante la reacción química de O_2 , SiH_4 y N_2 , lo que provoca la formación de una película sobre el sustrato. Si bien, este óxido no es de buena calidad como uno crecido térmicamente, es lo suficientemente bueno para funcionar como aislante. En la figura 13 se muestra un esquema de un sistema APCVD básico.

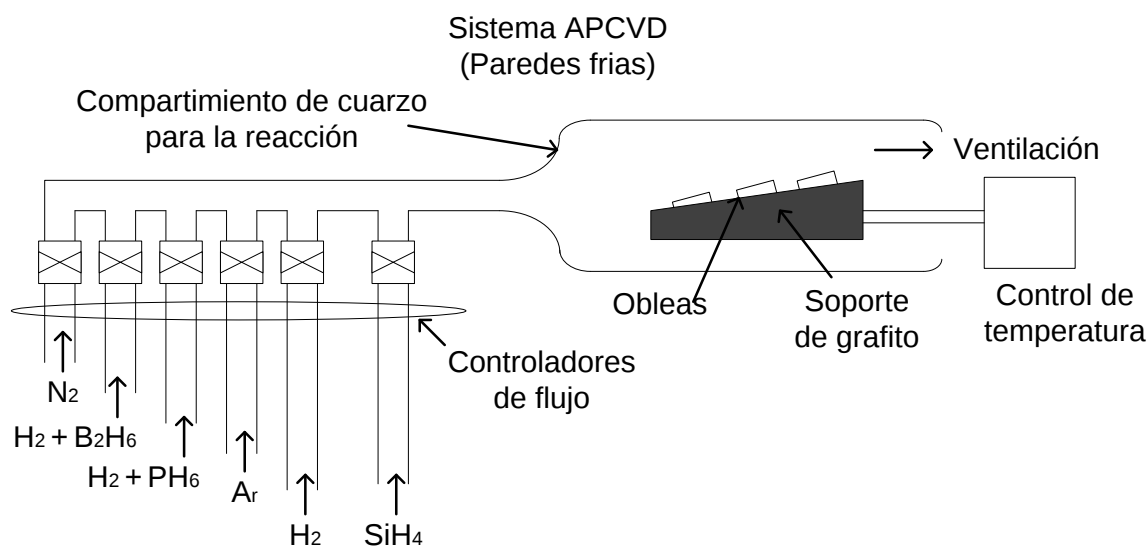


Figura 13.- Sistema APCVD (paredes frías).

III.5.2 Proceso CVD activado térmicamente a baja presión (LPCVD):

La mayoría de los procesos CVD a baja presión se conducen o calientan por resistencias, o en menor frecuencia, por técnicas de calentamiento de radiación infra-roja para obtener condiciones isotérmicas de modo que el sustrato y las paredes del reactor tengan una temperatura similar. La razón de depósito y uniformidad de las películas creadas por procesos CVD están gobernadas por dos parámetros básicos:

- (i)** La razón de transferencia de masa de gases reactivos a la superficie del sustrato, y
- (ii)** La razón de reacción superficial de gases reactivos a la superficie del sustrato.

En otras palabras, un depósito LPCVD consiste en el crecimiento de una película uniforme en topografía e integridad estructural, debida a la trayectoria libre de las moléculas de gases reactivos a baja presión. En la figura 14 se muestra un esquema de un sistema LPCVD.

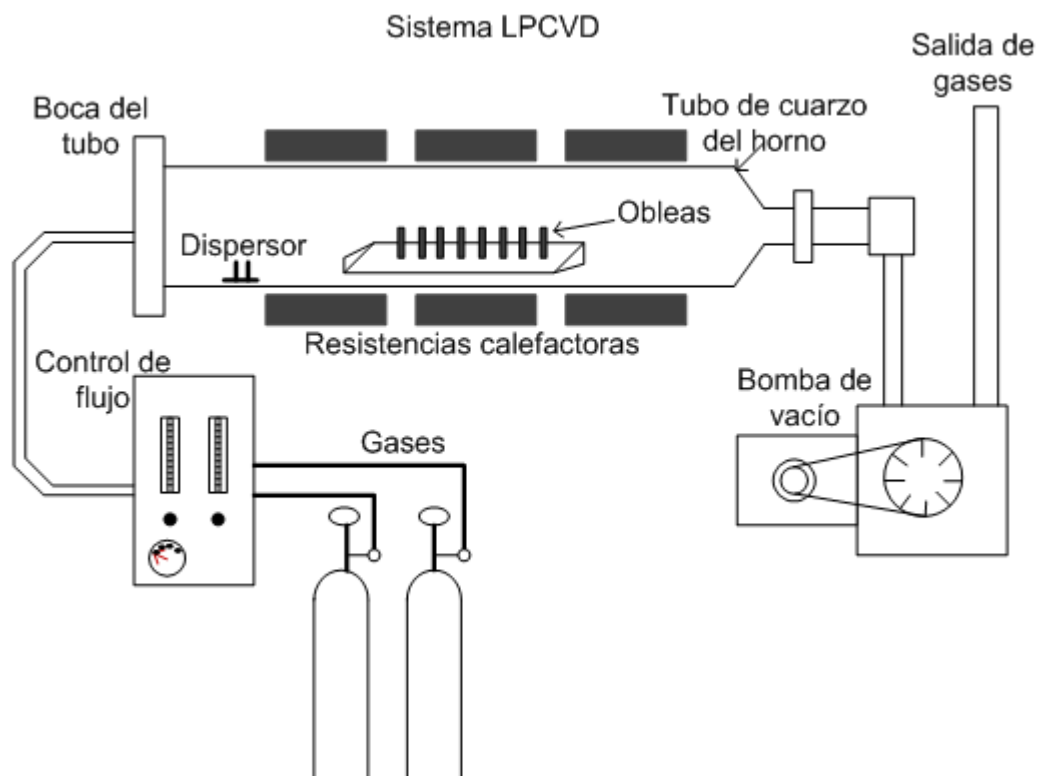


Figura 14.- Sistema LPCVD.

III.6 Litografía

La litografía es el proceso más complicado, caro y crítico en la fabricación microelectrónica. En esta etapa se invierte aproximadamente un 60% de tiempo y 35% de costo de fabricación, además de que es una etapa crítica en la definición de patrones submicrométricos. Este proceso se divide en los siguientes pasos:

1. Cubrir la muestra con una capa delgada de un material fotosensitivo conocido como fotorresina (FR), que es una película líquida que se dispersa sobre la muestra.
2. Realizar un precalentamiento (prebake o softbake) con la finalidad de evaporar los solventes y densificar la FR después de la cobertura.

3. Transferir (proyectar) los patrones de la mascarilla sobre la superficie de la muestra con ayuda de una fotoalineadora mediante la cual se reproduce el patrón de la mascarilla sobre la FR.
4. Exponer a cualquier tipo de radiación de luz visible o ultravioleta (UV), en nuestro caso se usa luz UV.
5. Se realiza el revelado, con lo cual se remueven las regiones expuestas o no expuestas (dependiendo del tipo de FR y mascarilla empleadas).
6. Efectuar un postcalentamiento (postbake o hardbake), para estabilizar y endurecer la FR, remueve cualquier indicio de solvente o revelador residual, introduce tensión en la FR, tiempos largos y temperaturas elevadas pueden hacer que sea difícil retirar la resina.
7. Finalmente, la FR remanente es retirada, o si el proceso lo requiere se emplea como enmascarante para procesos de implantación de iones o grabado de materiales.

En la figura 15 se muestra un esquema del proceso de litografía.

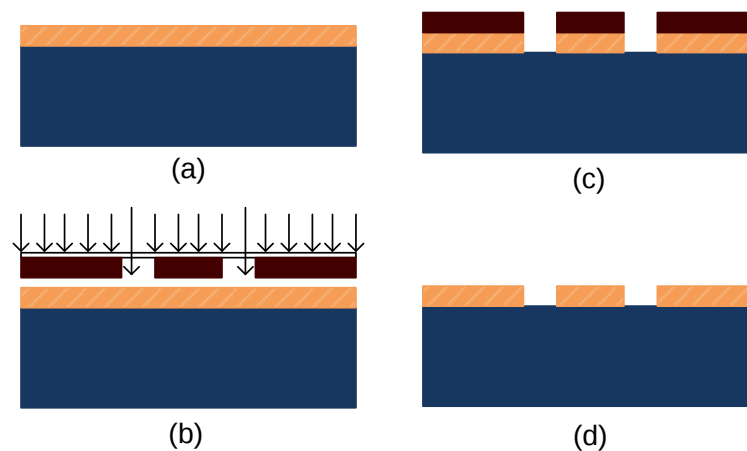


Figura 15. Proceso de litografía: (a) aplicación de FR, (b) exposición con luz UV, (c) revelado, y (d) eliminación selectiva de FR.

III.7 Grabados

El objetivo de un proceso de grabado es la transferencia exacta del patrón definido en la FR sobre el sustrato o películas sobre el sustrato. El grabado puede tener ataque físico, químico o la combinación de ambos. Los grabados se pueden dividir en seco y húmedo, los cuales se explican a continuación.

III.7.1 Grabado Húmedo

Es la forma más sencilla de grabado, es un método sin ataque físico (grabado químico), consiste en la inmersión de la muestra en una solución líquida que contiene un agente grabante, seguido de enjuague con agua desionizada. Este tipo de grabado se caracteriza principalmente por su falta de anisotropía, bajo control de proceso, y excesivas contaminación de partículas. Sin embargo tiene alta selectividad y no daña el sustrato (Campbell, 1996). Desde el punto de vista físico-químico, el grabado húmedo (químico) involucra cinco pasos (figura 16):

- *Difusión* de las especies reactivas a la superficie.
- *Adsorción*.
- *Reacción* química en la superficie.
- *Desorción*.
- *Difusión* o alejamiento de los productos.

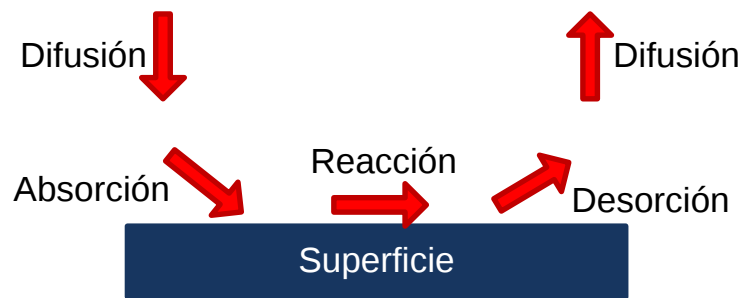


Figura 16. Mecanismo de grabado húmedo.

Este proceso **NO** debe ser afectado por la geometría del patrón enmascarante.

III.7.2 Grabado Seco (plasma)

Este tipo de grabado presenta control de velocidad de grabado, selectividad y daños superficiales. El hecho de usar grabado seco se debe a que:

- ✓ Permite la fabricación de estructuras pequeñas.
- ✓ Facilidad para transferir fielmente los patrones litográficos.
- ✓ Proceso limpio debido que se trabaja en vacío.
- ✓ Evita el consumo de ácidos.
- ✓ Obtención de perfiles verticales sin la dependencia de la orientación del sustrato.

De manera general, durante el grabado seco intervienen los siguientes pasos (figura 17):

1. Producción de especies reactivas.
2. Difusión de especies hacia la superficie.
3. Adsorción de especies.
4. Reacción.
5. Desorción.

6. Difusión hacia el volumen del gas.

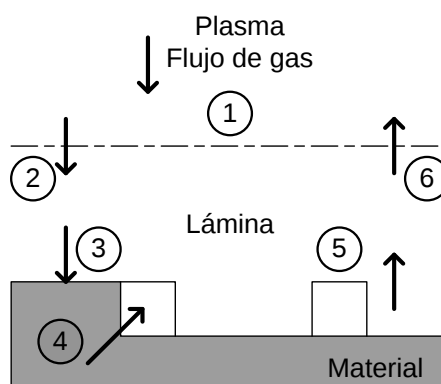


Figura 17. Proceso de grabado seco.

De manera más específica, durante el grabado seco influyen los siguientes mecanismos:

Grabado por bombardeo de iones o Sputter etching (grabado físico) se realiza por iones, típicamente elementos atómicos a partir de gases inertes (por ejemplo Ar) y puede presentar:

- Grabado direccional
- Poco selectivo
- Daños superficiales

Las especies que graban son iones como F^+ , CF_4^+ o Ar^+ , que remueven el material por *sputtering*. No hay mucha selectividad debido que todos los materiales son bombardeados con la misma velocidad. *Sputtering* puede causar daños en la superficie. El daño está relacionado directamente con la energía del ion, no con la densidad.

Grabado químico por plasma (*plasma etching*) es realizado por especies neutras reactivas, es un proceso isotrópico y selectivo. En éste una descarga eléctrica produce

especies químicamente reactivas (átomos, radicales, iones) en concentraciones $[+]$ y $[-]$ iguales, a partir de un gas (moléculas) relativamente inerte. El gas reactivo es seleccionado para generar especies que químicamente reaccionan con el material a grabar y cuyos productos reactivos son volátiles.

Estos tipos de procesos son puramente químicos y por lo tanto son isotrópicos y selectivos, como en el grabado húmedo. En las figuras 18 y 19 (Ruska, 1987) se presentan ejemplos de grabados físico y químico.

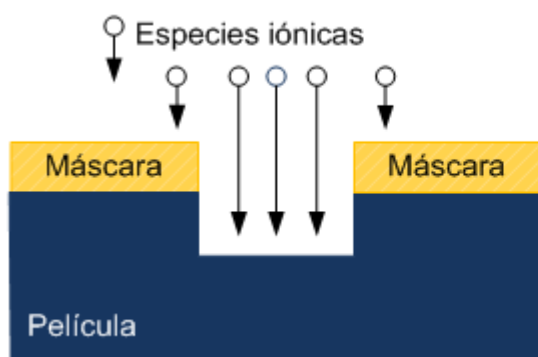


Figura 18. Grabado físico (poco selectivo).

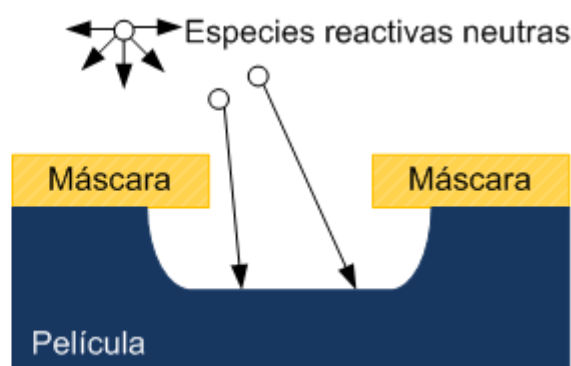


Figura 19. Grabado químico.

Grabado Iónico Reactivo – Reactive Ion Etching (RIE) es realizado por la combinación de mecanismos físicos y químicos, por lo tanto es un proceso selectivo y anisotrópico. En este tipo de grabado se crea una capa de un material inhibidor en las paredes grabadas, la cual evita el grabado lateral provocando de esta manera que el grabado sea anisotrópico, lo cual se puede observar claramente en la figura 20:

Un inhibidor podría ser un subproducto directo del proceso de grabado, o un subproducto indirecto (tal como la formación de un polímero de carbono en el gas o de la resina).

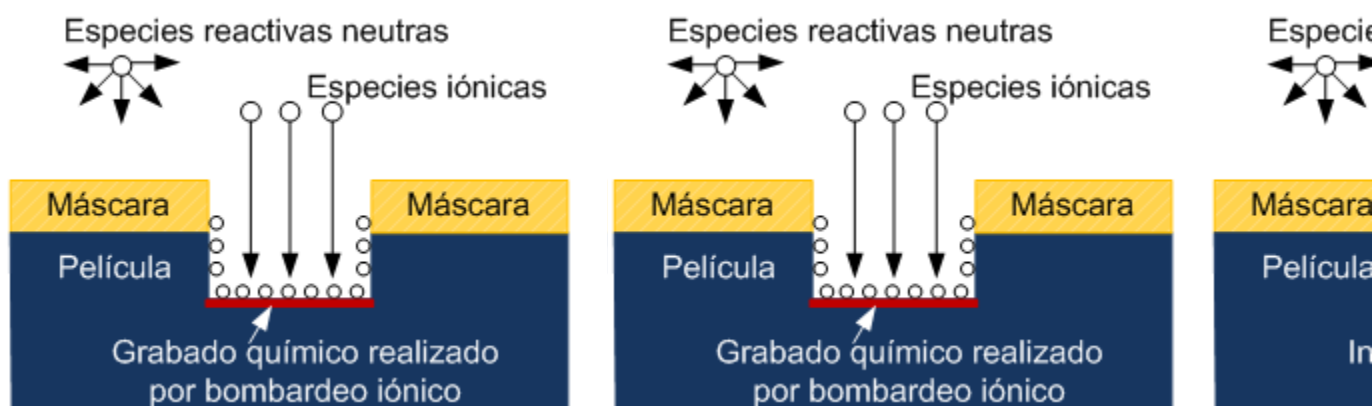


Figura 20. Grabado iónico reactivo (RIE).

Cuando se habla de grabado iónico-reactivo se menciona que ambos mecanismos pueden actuar simultáneamente: *físico* para obtener buena anisotropía y *químico* para obtener buena selectividad. La figura 21 muestra un esquema general de un sistema RIE.

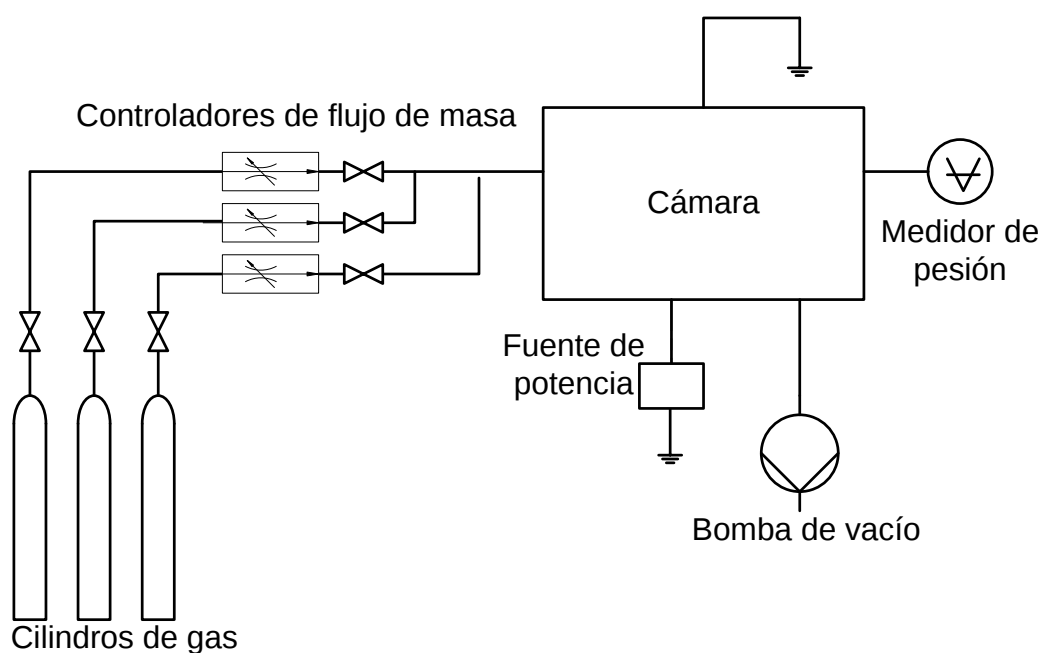


Figura 21. Esquema general de un sistema RIE.

III.8 Técnica de Oxidación Local de Silicio (LOCOS)

La Oxidación Local de Silicio (LOCOS por sus siglas en inglés LOCal Oxidation of Silicon), es una técnica de aislamiento usada para la fabricación de circuitos integrados (CI's), hasta tecnologías de 0.25 μm , y se desarrolló en 1966. Se utiliza para definir las áreas activas y de campo en los CI's, así como también proporciona aislamiento entre los dispositivos dentro del circuito (Kooi, 1991). Consiste en crecer óxido térmico de un espesor que varía entre 4000 y 7000 Å de una manera selectiva sobre las regiones de campo, es decir, donde no se fabrican los dispositivos y a la vez deja libres las áreas activas en donde se encontrarán los dispositivos tales como capacitores, diodos, transistores, etc.

Esta técnica presenta la ventaja de enterrar aproximadamente el 44% del óxido de campo (estructura SEMIROX) o bien enterrarlo completamente (estructura FULLROX) en la superficie del silicio, esto proporciona una superficie más plana y con orillas suavizadas, reduciendo de esta manera los problemas asociados con el recubrimiento de escalones por las líneas de conducción.

Para realizar esta técnica primero se crece un óxido delgado (óxido “pad” o base) y posteriormente una capa de nitruro de silicio (Si_3N_4) es depositado sobre la muestra, comúnmente mediante LPCVD. El nitruro actúa como barrera para la difusión del oxidante, previniendo oxidación en regiones seleccionadas del silicio (Campbell, 1996). El objetivo del óxido delgado antes del nitruro es reducir los efectos de estrés. Sin embargo tal capa de óxido tiene un efecto marcado en la forma de los bordes de los patrones de óxido de campo crecidos durante la oxidación térmica.

Después de que se lleva a cabo la oxidación térmica, los bordes de los patrones de óxido de campo presentan formas similares a un pico de pájaro (bird's beak) para

estructuras SEMIROX y formas similares a una cabeza de pájaro (bird's head) para estructuras FULLROX, como se aprecia en la figura 22 (a) y (b), respectivamente.

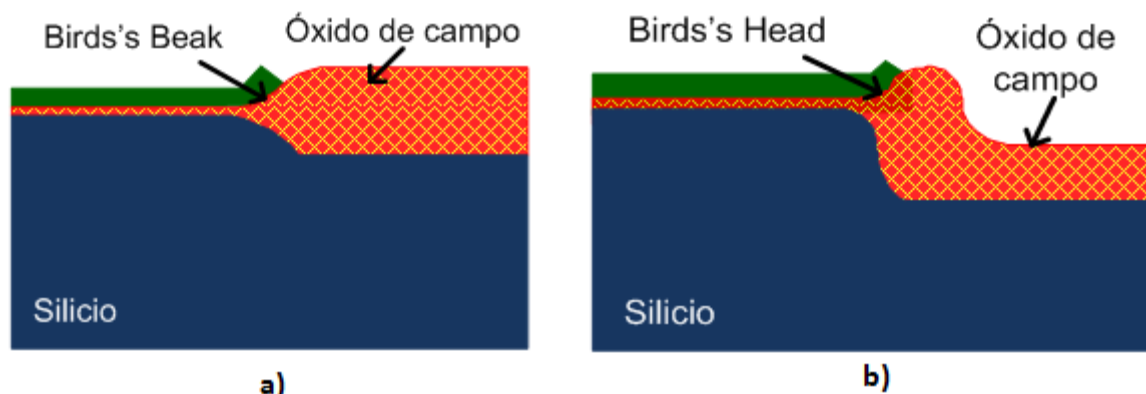


Figura 22. Sección transversal de estructura LOCOS a) SEMIROX y b) FULLROX.

Lo anterior se debe a que cuando hay óxido debajo de los patrones de nitruro, las especies oxidantes (H_2O) se mueven lateralmente hacia el óxido que se encuentra debajo del nitruro consumiendo al silicio. Cuando el silicio se oxida, el volumen del óxido crecido aumenta casi al doble con respecto al que ocupa regularmente el silicio, por lo cual los bordes de los patrones de nitruro tienden a levantarse. El resultado es la forma de bird's beak.

La técnica de LOCOS facilita el control de las propiedades de superficie de algunas áreas crítica en circuitos integrados, porque el proceso de oxidación puede combinarse completamente con implantación iónica selectiva y/o difusión de dopantes aceptores o donadores (Campbell, 1996).

III.9 Evaporación de aluminio

Para realizar la etapa de metalización se emplean depósitos físicos en fase vapor (PVD por sus siglas en inglés Physical Vapor Deposition), estos depósitos consisten en depositar un material sólido a partir de su fase vapor sobre un sustrato (muestra), y la

fuelle de la fase vapor es un “blanco” sólido del mismo material a depositar (Ohring, 1992). Estos depósitos pueden ser por evaporación o por sputtering, siendo la técnica de evaporación la más simple de los PVD, su principio de operación consiste en colocar un sustrato dentro de una cámara de vacío, adyacente al sustrato se coloca el “blanco” del material a depositar, este “blanco” se calienta y se evapora condensándose finalmente en la superficie del sustrato. Los átomos del metal interaccionan con baja energía en el sustrato (~ 0.1 eV), por lo cual no se presentan daños en la superficie. En la figura 23 se presentan esquemas básicos de la evaporación.

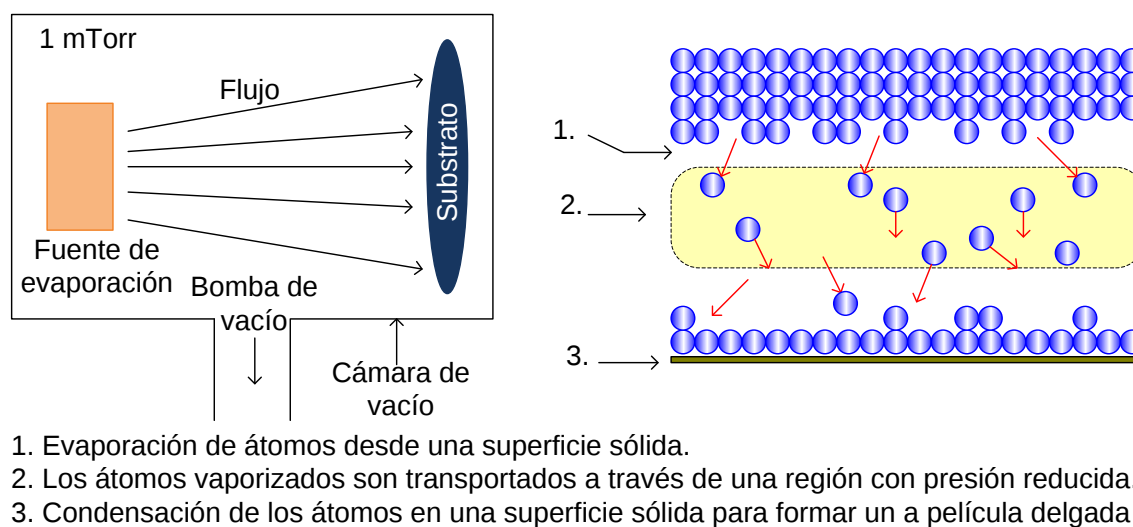


Figura 23. Esquema básico de evaporación (Stanley, 2004).

La figura 24 (Campbell, 1996) muestra el esquema de una evaporadora simple en donde las muestras son colocadas dentro de una cámara en alto vacío.

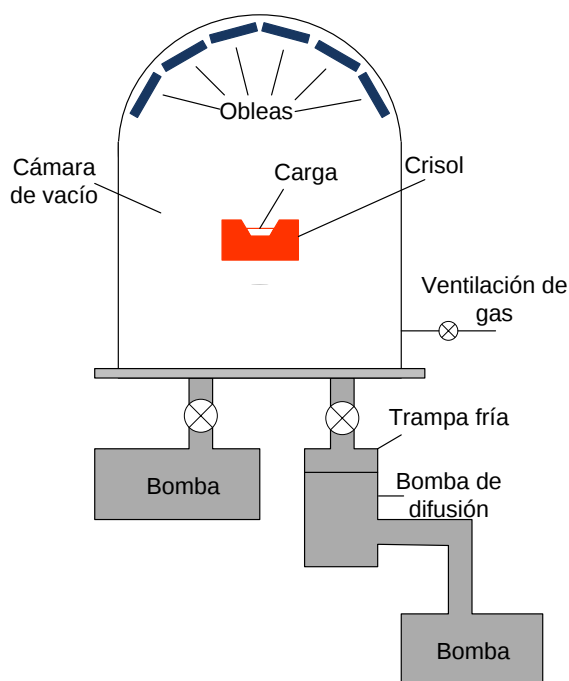


Figura 24. Esquema básico de una evaporadora.

Es importante mencionar que existen diversos métodos de evaporación como son: calentamiento resistivo, haz de electrones (e-beam), calentamiento inductivo, en nuestro caso nos enfocaremos al de haz de electrones que se caracteriza porqué:

- Está libre de contaminación – calentamiento local
- Evapora cualquier metal – función de la potencia del haz.

III.10 Dieléctricos empleados

III.10.1 Óxido de silicio (SiO_2)

Películas de SiO_2 se pueden obtener por diferentes métodos, como oxidación térmica o depósito químico en fase vapor, y tiene una diversa gama de estructuras y propiedades (Zhang, 2001 y Sze 1984). En la fabricación de dispositivos semiconductores,

el SiO₂ es ampliamente usado como aislador de compuerta de dispositivos MOS, planarización de dieléctricos inter-niveles, capa de pasivación, y como material enmascarante. En particular, la capacidad de crecimiento térmico de películas de SiO₂ para reducir el número de defectos superficiales eléctricamente activos es el más importante.

III.10.2 Óxido de silicio rico en silicio (SRO)

El óxido de silicio fuera de estequiometría, es una variante del SiO₂, también llamado polisilicio semiaislante (SIPOS) (Aceves Mijares et al., 1999), posee silicio cristalino en una matriz de óxido compuesta en su mayoría de SiO₂, a temperaturas del orden de 1000° C en un ambiente inerte como nitrógeno. Básicamente la diferencia entre SIPOS y SRO, es que el primero es un polisilicio “contaminado” con oxígeno; mientras que el segundo es oxígeno “contaminado” con silicio. Estas películas generalmente son obtenidas mediante la técnica de depósito químico en fase vapor a baja presión (LPCVD), a temperaturas comprendidas entre 700 y 800° C mediante reacción de silano (SiH₄) y óxido nitroso (N₂O) (Lucovsky et al., 1980). La razón de gases reactivos que determina el exceso de silicio está dada por (Dong et al., 1978):

$$R_o = \frac{N_2O}{SiH_4} \quad (9)$$

Cuando el $R_o < 1$ es adecuado para depositar silicio policristalino semi-aislante (SIPOS), si el $R_o \geq 2$ se usa para obtener SRO [5, 6, 7, 8, 9, 10]. Se ha reportado que para $R_o=3$ el exceso de silicio es aproximadamente del 17 % y para $R_o > 100$, se obtiene óxido de silicio estequiométrico.

En el SRO se han observado dos características eléctricas interesantes, las cuales son: la habilidad para mejorar la conducción eléctrica a través del SiO₂, la otra es la posibilidad de atrapar carga eléctrica (DiMaria and Dong, 1980, Dimaria et. al., 1980, Dimaria et. al., 1981). Por lo que este material es utilizado en memorias eléctricas (Dori and Acovic, 1993) donde se requieren bajos voltajes de inyección. Uno de los mecanismos de conducción en la interfaz SRO/SiO₂, supone que las islas de silicio inyectan electrones hacia el SiO₂ por el mecanismo de tuneleo tipo Fowler-Nordheim. La corriente, en este caso está determinada por (DiMaria et. al., 1980):

$$I = C_0 \frac{dV_g}{dt} + J(t)A \quad (10)$$

Donde el primer término es la corriente de desplazamiento debida a la capacitancia del óxido C_0 , y el segundo término es la corriente de partículas inyectadas. La emisión del tipo Fowler-Nordheim en la interfaz SRO/SiO₂ se modela con la ecuación (DiMaria et. al., 1984):

$$J = \frac{q^3 [\chi \xi(t)]^2}{16\pi^2 \frac{\hbar}{2\pi} \phi_B} \exp \left(\frac{-4(2m^*)^{1/2} \phi_B^{2/3}}{3 \frac{\hbar}{2\pi} \chi |q \xi(t)|} \right) \quad (11)$$

Donde χ es un factor que toma en cuenta el campo eléctrico, ϕ_B es la diferencia de energía entre la banda de conducción del silicio y la banda de conducción del SiO₂, m^* es la masa efectiva del electrón y $\hbar$ es la constante de Planck.

III.10.3 Nitruro de silicio (Si₃N₄)

Las películas de Si₃N₄ son comúnmente preparadas con silano (Si₄N) y exceso de amoniaco (NH₃) o tetracloruro de silicio y NH₃ con hidrógeno como gas diluyente a temperaturas típicas entre 800 y 900° C mediante APCVD o LPCVD. El Si₃N₄ obtenido por

LPCVD entre 800 y 850° C sirve como una excelente barrera de difusión para prácticamente todos los materiales en fabricación de dispositivos de silicio, debido a que no se oxida, por lo cual se emplea como capa enmascarante en procesos como implantación iónica, difusión, grabado, y oxidación local (Levy, 1986 y Campbell, 1996).

III.11 Técnicas de caracterización de películas

III.11.1 Elipsometría

La Elipsometría es una técnica convencional para realizar mediciones precisas de espesores e índice de refracción de películas delgadas (Schroder, 1998). Se basa en la medida de los cambios de estado de polarización de un haz de luz cuando se refleja en la superficie bajo análisis.

En la figura 25 se muestra el principio de operación de un elipsómetro. El láser envía un haz de luz monocromático no polarizado; cuando este haz incide en el polarizador la reflexión total interna sólo permite la salida de luz polarizada linealmente. El compensador (retardador) cambia la luz linealmente polarizada por luz polarizada elípticamente. Los ángulos de P (polarizador) y C (compensador) pueden ajustarse a cualquier estado de polarización variando de lineal a circular. La luz elípticamente polarizada se refleja en la muestra y se convierte en una polarizada linealmente, éste haz pasa a través del analizador, que es similar al polarizador, y el ángulo del analizador (A) es ajustado para la salida mínima del fotodetector.

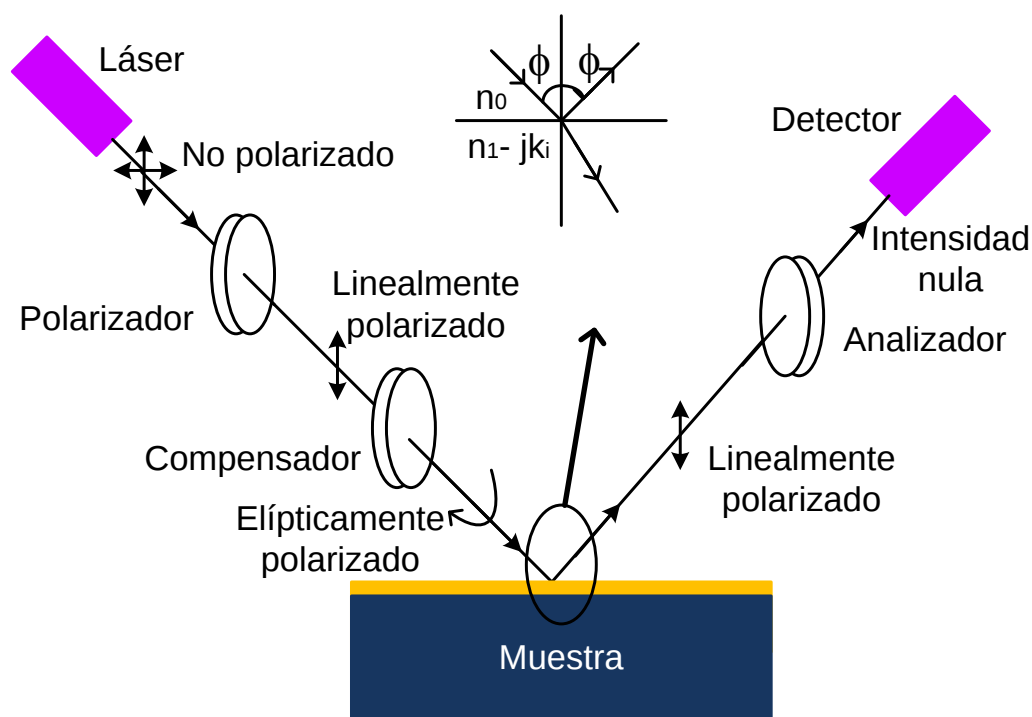


Figura 25. Diagrama esquemático de un elipsómetro (Schroder, 1998).

El objetivo de una medición elipsométrica es obtener un nulo en el fotodetector. Éste se obtiene eligiendo P y C para dar una polarización elíptica, la cual ocurre cuando se refleja en la muestra y se convierte en una polarizada linealmente para extinguirse por el analizador. Se ajustan los ángulos del polarizador (P) y del analizador (A) de manera secuencial para una señal de detección mínima. Existen distintas combinaciones de los ángulos P, C y A que pueden resultar en un par de valores dados por Ψ ($0^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ$) y Δ ($0^\circ \leq \Delta \leq 360^\circ$).

III.11.2 Perfilometría

Mediante esta técnica es posible medir los espesores de diversas películas. Este tipo de medidor tiene una punta móvil que se pone en contacto con la muestra. La punta recorre la superficie de la muestra aplicando sobre ella una fuerza constante (la longitud de barrido y la magnitud de la fuerza pueden variarse en función de las características de

la muestra). La punta está conectada a un sistema de medición que graba los desplazamientos verticales que sufre en su recorrido a lo largo de la superficie de la muestra. De esta forma se determinan cambios en el espesor.

Capítulo IV

Fabricación de Guías de Onda Coplanares

IV.1 Introducción

En la sección anterior se presentaron las principales características y técnicas de obtención de los materiales dieléctricos SiO_2 y SRO ($R_o=20$ y 30), así como la tecnología que se emplea durante el proceso de fabricación. En este capítulo se muestra la secuencia realizada durante el proceso de fabricación para la obtención de las guías de ondas coplanares, así como los resultados experimentales obtenidos.

IV.2 Fabricación de CPW's

Para realizar esta tarea, primero se eligieron las estructuras de CPW's que se fabricarían para alcanzar el objetivo de este trabajo, las cuales pueden apreciarse en las siguiente figuras. El material utilizado como substrato, es silicio tipo n de alta resistividad ($> 4000 \Omega\cdot\text{cm}$) y orientación $\langle 100 \rangle$, además de Si tipo n de alta resistividad ($> 4000 \Omega\cdot\text{cm}$) con implantación N^+ en la parte posterior.

En la figura 26 se presentan las estructuras para los procesos 1, 2, 3 y 4, las cuales se fabricaron empleando grabado de silicio mediante RIE/ICP, para obtener aproximadamente 12 μm de profundidad.

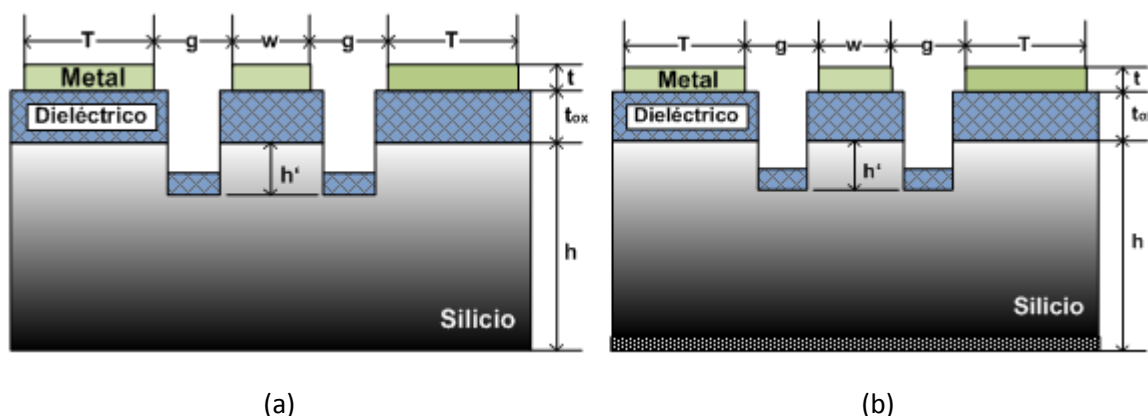


Figura 26. Estructuras diseñadas a) sin implantación, b) con implantación N^+ en la parte posterior.

Enseguida se muestran las estructuras para los procesos 5, 6, 7 y 8 que se fabricaron empleando la técnica de LOCOS para consumir aproximadamente 3 μm de silicio.

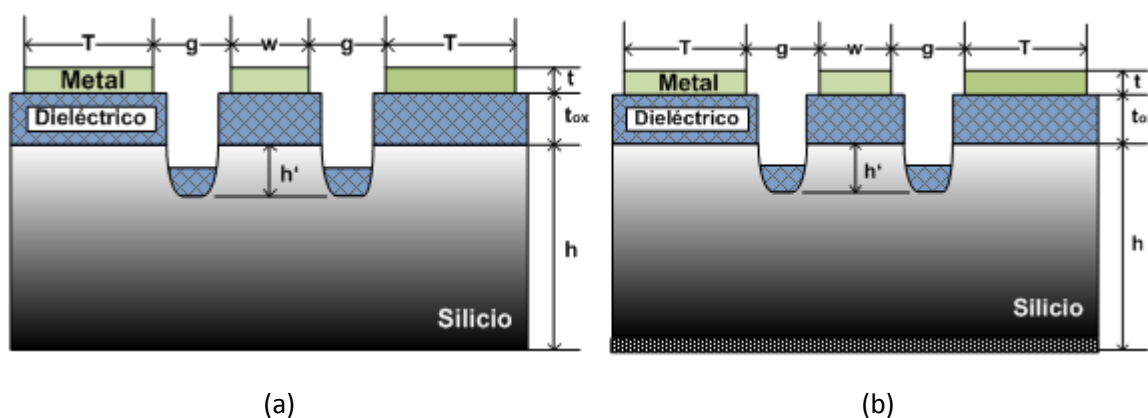


Figura 27. Estructuras diseñadas a) sin implantación, b) con implantación N^+ en la parte posterior.

Finalmente las estructuras de los procesos 9 y 10 que son CPW's convencionales (únicamente con dieléctrico discontinuo).

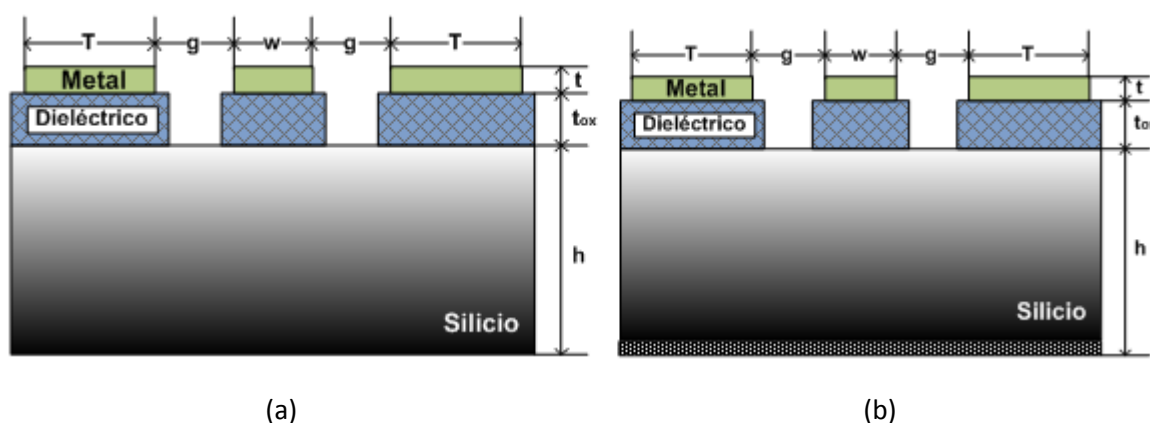


Figura 28. Estructuras diseñadas a) sin implantación, b) con implantación N^+ en la parte posterior.

Para las estructuras de las figuras 1, 2 y 3 se realizaron combinaciones de dieléctricos como se indica en la tabla II.

Tabla II. Combinaciones de dieléctricos para las estructuras.

Proceso	Estructura	Dieléctrico		
		SiO ₂	SRO ₂₀	SRO ₃₀
1	Si/SRO ₂₀ /Al	----	✓	----
2	Si/SiO ₂ /SRO ₂₀ /Al	✓	✓	----
3	Si/SRO ₃₀ /Al	----	----	✓
4	Si/SiO ₂ /SRO ₃₀ /Al	✓	----	✓
5	Si/SRO ₂₀ /Al	----	✓	----
6	Si/SiO ₂ /SRO ₂₀ /Al	✓	✓	----
7	Si/SRO ₃₀ /Al	----	----	✓
8	Si/SiO ₂ /SRO ₃₀ /Al	✓	----	✓
9	Si/SRO ₂₀ /Al	----	✓	----
10	Si/SiO ₂ /SRO ₂₀ /Al	✓	✓	----

Para las dimensiones de diseño de las CPW's se consideró la geometría de una guía de onda coplanar como la que se muestra en la figura 29.

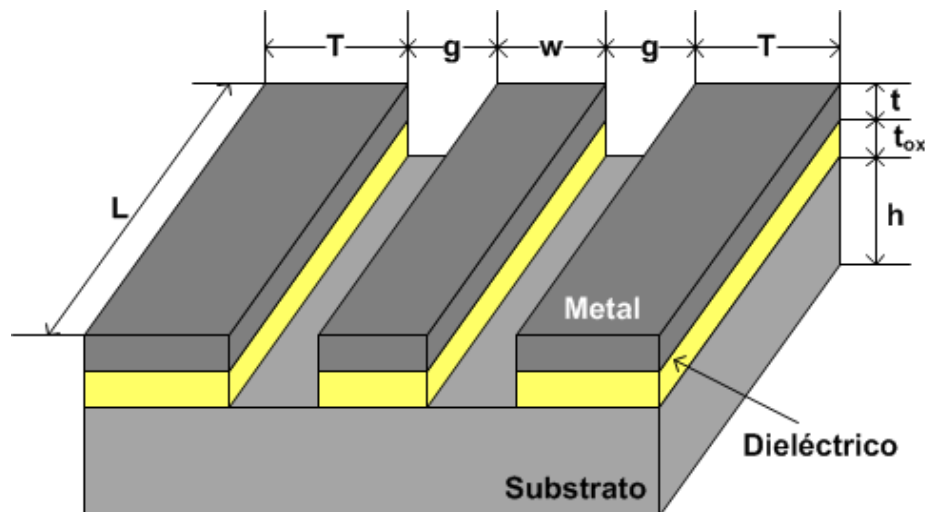


Figura 29. Geometrías de la CPW.

Donde w y T corresponden al ancho del conductor central (línea de señal) y a los laterales (líneas de tierra), respectivamente, mientras que g es la separación (ranura) entre ambos, h es el espesor del sustrato, mientras que t y t_{ox} representan los espesores del conductor y dieléctrico, respectivamente. La tabla III muestra las dimensiones geométricas consideradas para la fabricación.

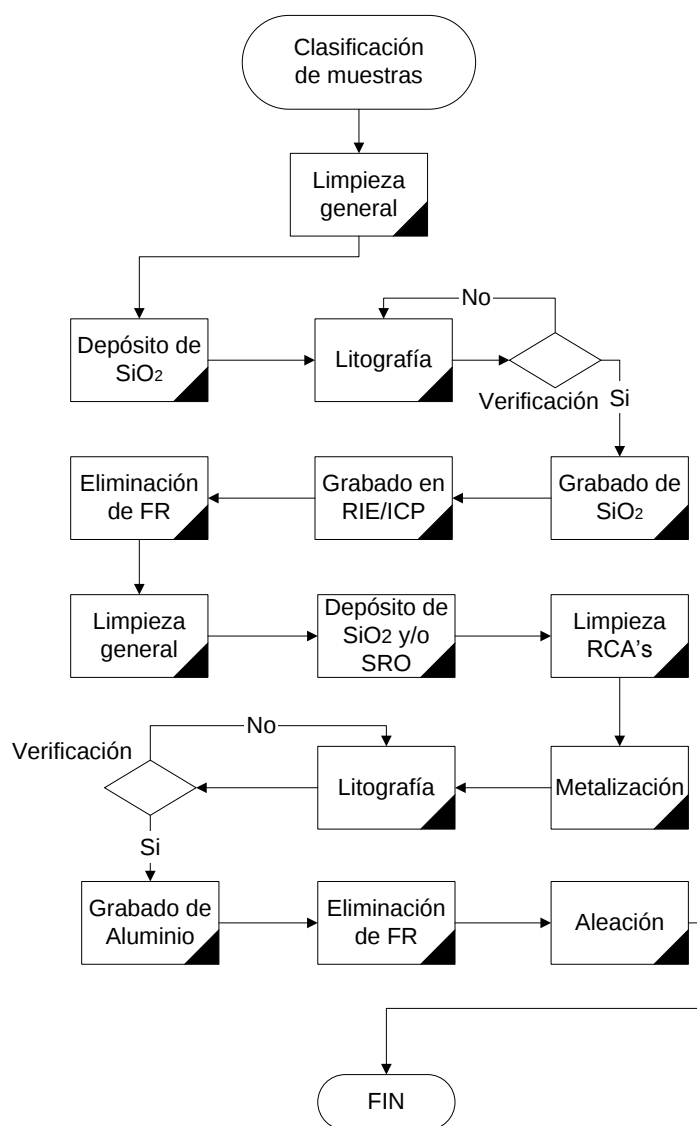
Tabla III. Dimensiones geometrías de las CPW's a fabricar.

Señal w (μm)	Ranura g (μm)	Tierra T (μm)	Dieléctrico t_{ox} (μm)			Metal t (μm)	h (μm)
			SiO ₂	SRO ₂₀	SRO ₃₀		
100	50	360	2	0.5	0.5	1	400

También se consideraron tres longitudes diferentes (L) de 1, 2 y 4 mm (LC, LB, LA, respectivamente).

A continuación se presentan los pasos para cada proceso de fabricación de acuerdo a la estructura deseada, estos se representan mediante diagramas de flujo, para más detalles de los procesos de fabricación, así como la clasificación de muestras, el lector puede referirse al apéndice A.

Diagrama de flujo para procesos 1, 2, 3 y 4:



Para los procesos en los cuales se empleó la técnica de LOCOS (5, 6, 7, y 8), se realizaron simulaciones en SUPREM IV (Stanford University PROcess Engineering Modeling), este es un programa de simulación de procesos de fabricación, en el cual, a partir de la especificación de una serie de parámetros se pueden simular diversos procesos, como son: tratamientos térmicos, oxidación, implantación de iones, difusión, grabado, entre otros (Hansen and Deal, 1993). Mediante las simulaciones con SUPREM IV se determinó tanto el número como las condiciones de oxidaciones necesarias para consumir aproximadamente 3 μm de silicio.

Diagrama de flujo para procesos 5, 6, 7 y 8:

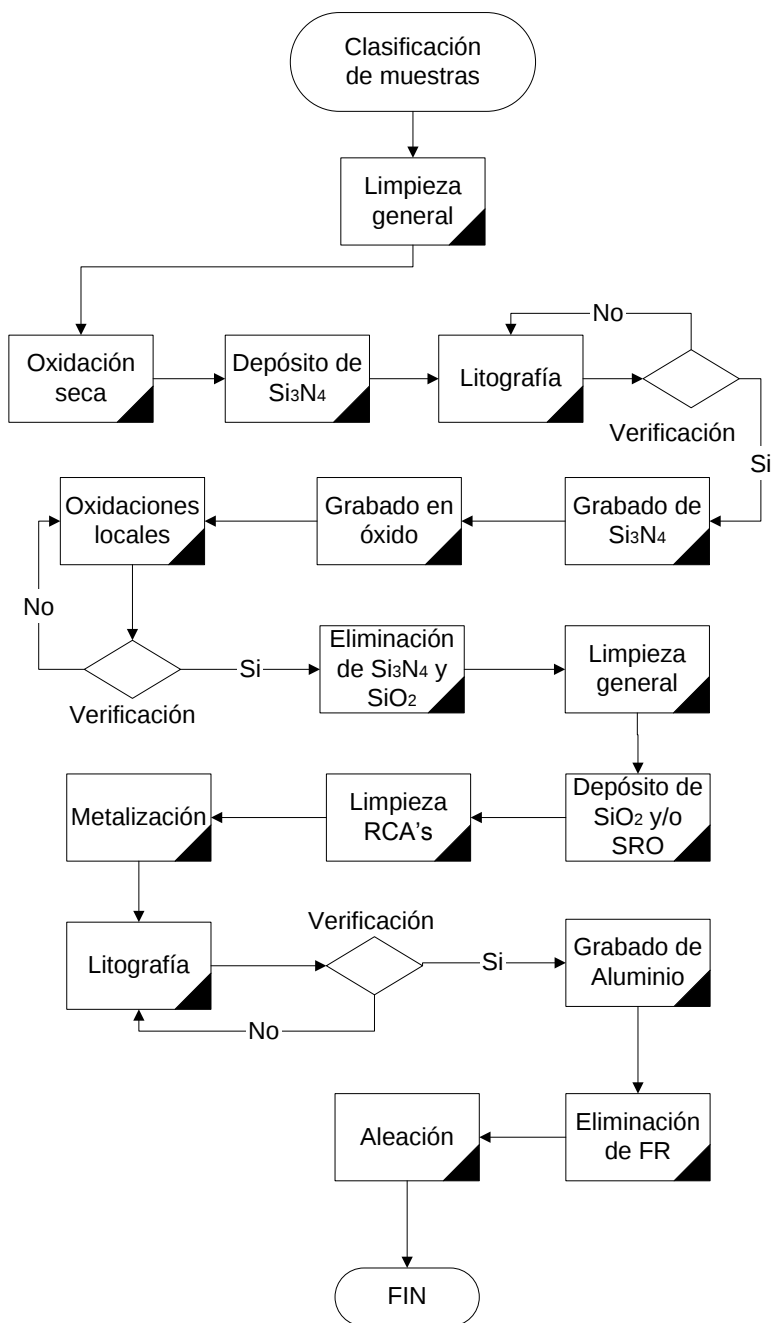
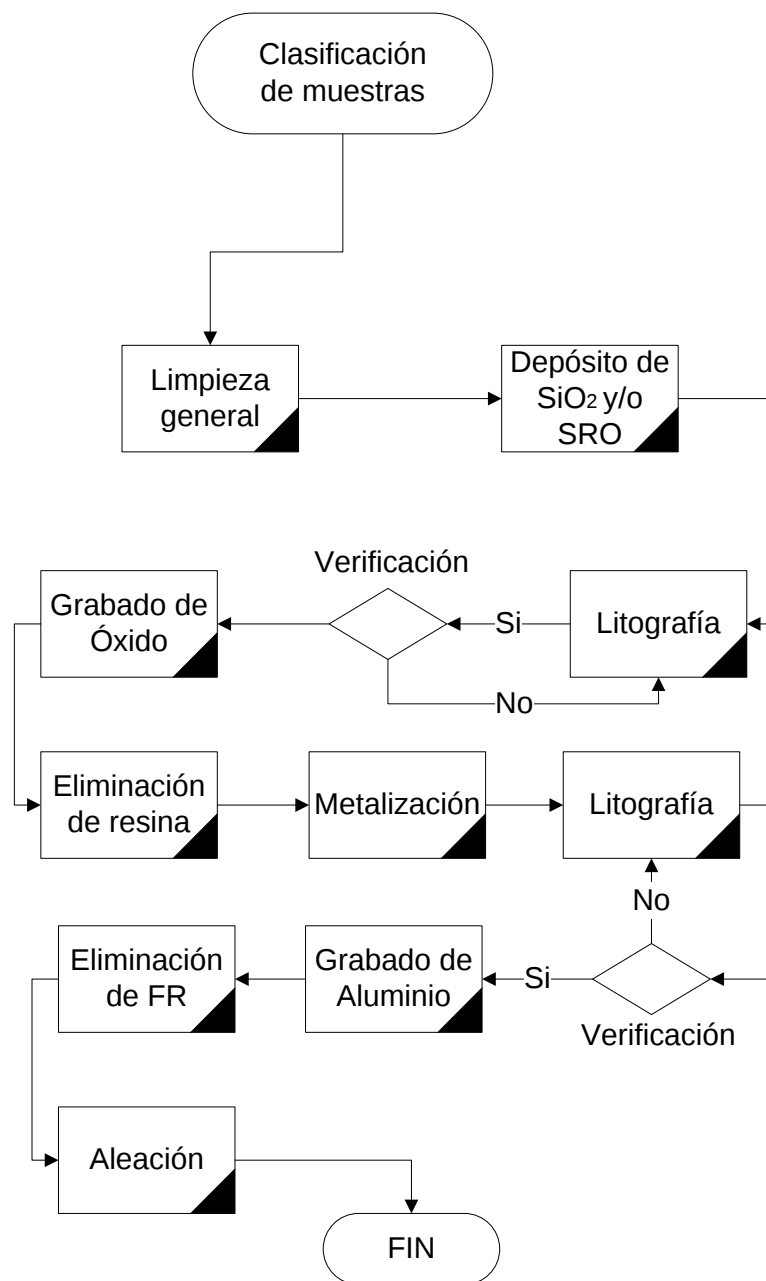


Diagrama de flujo para procesos 9 y 10:

IV.3 Resultados de proceso de fabricación

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante los procesos de fabricación correspondientes a los espesores de los óxidos y el metal, así con de las profundidades de silicio resultantes del grabado con RIE/ICP y con la técnica de LOCOS:

Tabla IV. Espesores y profundidades obtenidas del proceso de fabricación.

Proceso	Estructura	t_{SiO_2} (μm)	h_{Si} (μm)	$t_{SRO_{20}}$ (μm)	$t_{SRO_{30}}$ (μm)	t_{Al} (μm)
1	Si/SiO ₂ /SRO ₂₀ /Al	2.1	12-13	0.5	----	1.1
2	Si/SRO ₂₀ /Al	----	12-13	0.5	----	1.1
3	Si/SRO ₃₀ /Al	----	12-13	----	0.57	1.1
4	Si/ SiO ₂ /SRO ₃₀ /Al	2.1	12-13	----	0.57	1.1
5	Si/SRO ₂₀ /Al	----	3	0.5	----	1.1
6	Si/ SiO ₂ /SRO ₂₀ /Al	2.1	3	0.5	----	1.1
7	Si/SRO ₃₀ /Al	----	3	----	0.57	1.1
8	Si/ SiO ₂ /SRO ₃₀ /Al	2.1	3	----	0.57	1.1
9	Si/SRO ₂₀ /Al	----	----	0.67	----	1.3
10	Si/ SiO ₂ /SRO ₂₀ /Al	2.1	----	0.67	----	1.3

Adicionalmente para los procesos 5, 6, 7 y 8 se obtuvo un óxido “base” mediante oxidación seca de aproximadamente de 500 Å de espesor y 5000 Å de Si₃N₄ mediante LPCVD para enmascarar el sustrato y poder efectuar la técnica de LOCOS.

Capítulo V

Modelado y Caracterización Eléctrica

V.1 Introducción

La caracterización y modelado de líneas de transmisión coplanares y microcinta son muy importantes en el diseño, implementación y medición de circuitos de estado sólido y dispositivos de alta frecuencia. La aplicación más común de estas líneas es en la interconexión de circuitos integrados (CI's). También, estas líneas de transmisión juegan un papel importante cuando se realizan mediciones de microondas (Tiemeijer and Havens, 2003; Torres-Torres et. al., 2005). Por lo cual, diversos métodos para determinar los parámetros principales de líneas de transmisión han sido reportados (Eisenstadt, 1992; Zwick et. al., 2005).

Una línea de transmisión se caracteriza por su constante de propagación (γ) y su impedancia característica (Z_o). En este capítulo se presentan los métodos utilizados para caracterizar las líneas de transmisión investigadas.

V.2 Modelado

Una línea de transmisión es modelada mediante un circuito equivalente de elementos concentrados como se muestra en la figura 30 (Achar and Nakhla, 2001).

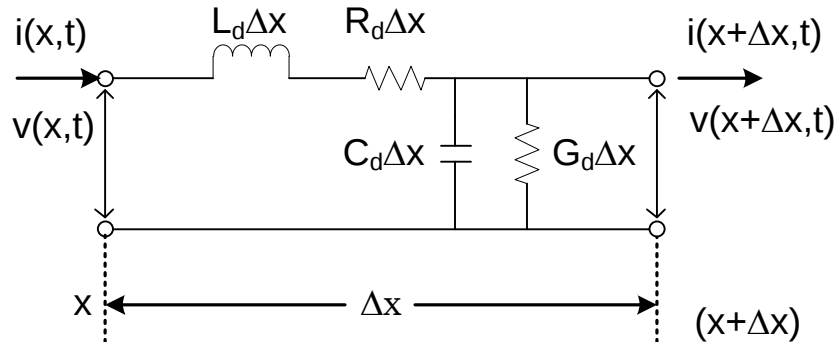


Figura 30. Línea de transmisión con elementos distribuidos.

Cada elemento concentrado representa un segmento infinitesimal de la línea de transmisión física (Wadell, 1991). Cada segmento de la línea de transmisión queda caracterizado, por cuatro parámetros distribuidos (Weber and Nebeker, 1994), resistencia por unidad de longitud (R_d), inductancia por unidad de longitud (L_d), capacitancia por unidad de longitud (C_d), y conductancia por unidad de longitud (G_d).

- La *inductancia distribuida*, es debida al campo magnético alrededor del conductor, se representa como una sola bobina en serie L_d . Este parámetro modela el proceso de almacenamiento de energía en forma de campo magnético que se produce en la línea.
- La *capacitancia distribuida*, es debida al campo eléctrico existente en el dieléctrico entre los conductores de la línea, se representa por un solo capacitor en paralelo

C_d . Este parámetro modela el proceso de almacenamiento energético en forma de campo eléctrico que se produce en la línea.

- La *resistencia distribuida* en el conductor, se representa por una sola resistencia en serie R_d . Este parámetro modela la disipación de potencia debido a la no idealidad de los conductores (pérdidas óhmicas o pérdidas por el conductor).
- La conductancia distribuida, se representa por una conductancia en paralelo G_d . Este parámetro modela la disipación de potencia que se produce por la no idealidad del medio dieléctrico (pérdidas dieléctricas).

La impedancia característica (Z_o) y la constante de propagación (γ) de una línea de transmisión se definen como (Pozar, 2004):

$$\gamma = \sqrt{(R_d + j\omega L_d)(G_d + j\omega C_d)} \quad (12)$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{R_d + j\omega L_d}{G_d + j\omega C_d}} \quad (13)$$

De las ecuaciones (12) y (13) se pueden calcular los parámetros distribuidos y de su producto se obtiene:

$$\gamma Z_o = R_d + j\omega L_d \quad (14)$$

Por lo tanto:

$$R_d = \text{Re}(\gamma Z_o) \quad (15)$$

$$L_d = \frac{\text{Im}(\gamma Z_o)}{\omega} \quad (16)$$

Al dividir (12) entre (13) se tiene:

$$\frac{\gamma}{Z_o} = G_d + j\omega C_d \quad (17)$$

Donde:

$$G_d = \text{Re}\left(\frac{\gamma}{Z_o}\right) \quad (18)$$

$$C_d = \frac{\text{Im}\left(\frac{\gamma}{Z_o}\right)}{\omega} \quad (19)$$

Cuando los parámetros R_d y G_d son muy pequeños, sus efectos se pueden ignorar, de manera que la línea de transmisión se puede considerar como una estructura ideal y sin pérdidas.

V.3 Caracterización eléctrica

La representación de redes en altas frecuencias por matrices de impedancia o admitancia presentan un problema debido a que voltajes, corrientes e impedancias no pueden ser medidos de forma directa en frecuencias de microondas. Por lo cual existe la necesidad de emplear parámetros de dos puertos que sean definidos en términos de mediciones que puedan realizarse en rangos de microondas. Para esto, se emplean parámetros de dispersión [S], los cuales se definen en términos de ondas incidentes y

ondas reflejadas, haciendo posible mediciones directamente con un analizador de redes vectorial (VNA).

V.4 Cálculo de la constante de propagación

La constante de propagación se determina a partir de mediciones de parámetros S realizadas a dos líneas con la misma impedancia característica (arbitraria) pero diferente longitud (Método Línea-Línea) (Bianco and Parodi, 1976). Después de que los parámetros de dispersión son medidos tanto parámetros ABCD (Lee and Nam, 1996) como WCM (Reynoso-Hernández et. al., 1999; Reynoso-Hernández, 2003) pueden ser empleados para calcular la constante de propagación.

En este trabajo se utiliza un procedimiento que implementa el método de dos líneas con la misma impedancia característica pero diferente longitud (Bianco and Parodi, 1976), como se muestra en la figura 31.

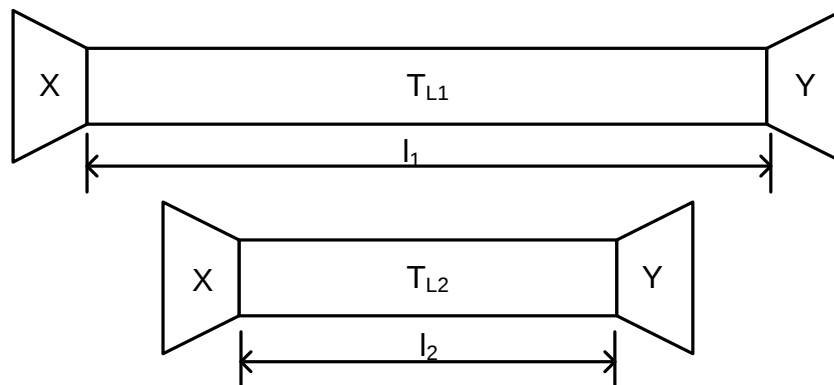


Figura 31. Estructuras para implementar el método de dos líneas.

Los dos puertos referidos como X y Y corresponden a las transiciones utilizadas para asegurar la conexión eléctrica entre el analizador de redes y los puertos de entrada y

salida de la línea. En los elementos de X y Y se incluyen las transiciones coaxial-puntas de prueba o transiciones coaxial-microcinta y todos los accesorios del analizador de redes (test set) (Reynoso-Hernández et. al, 1999). Utilizando el formalismo de matrices de transmisión las transiciones X , Y y las líneas de transmisión se representan como T_A , T_B , T_{L1} y T_{L2} , respectivamente.

Asumiendo que X y Y son diferentes. Los parámetros de transmisión de las estructuras representadas en la figura 31 definidos como M_1 y M_2 se expresan como:

$$M_1 = T_A T_{L1} T_B \quad (20)$$

$$M_2 = T_A T_{L2} T_B \quad (21)$$

Donde: T_A corresponden a la matriz de transiciones del puerto de entrada, y T_B a la matriz de transiciones del puerto de salida, T_{L1} la matriz de la línea L_1 y T_{L2} la matriz de la línea L_2 .

Combinando las ecuaciones (20) y (21), el producto $M_1 M_2^{-1}$ es:

$$M_1 M_2^{-1} = T_A T_{L1} T_{L2}^{-1} T_A^{-1} \quad (22)$$

La matriz T_{Li} de una línea de longitud l_i ($i = 1,2$) con impedancia característica arbitraria Z_L se puede expresar como:

$$T_{Li} = \frac{1}{(1 - \Gamma^2)e^{-\gamma l_i}} \begin{pmatrix} e^{-2\gamma l_i} - \Gamma^2 & \Gamma(1 - e^{-2\gamma l_i}) \\ -\Gamma(1 - e^{-2\gamma l_i}) & 1 - \Gamma^2 e^{-2\gamma l_i} \end{pmatrix} \quad (23)$$

Donde $\Gamma = (Z_L - Z_o)/(Z_L + Z_o)$ y Z_o es la impedancia de referencia.

Lo importante del método para obtener la constante de propagación de líneas de impedancia arbitraria (Reynoso-Hernández, 2003) se basa en el hecho de que la ecuación (23) puede expresarse como:

$$T_{Li} = T_{\Gamma} T_{50Li} T_{\Gamma}^{-1} \quad (24)$$

Donde:

$$T_{\Gamma} = \begin{pmatrix} 1 & \Gamma \\ \Gamma & 1 \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$T_{50Li} = \begin{pmatrix} e^{-\gamma L_i} & 0 \\ 0 & e^{\gamma L_i} \end{pmatrix}; \quad i = 1, 2 \quad (26)$$

Usando las ecuaciones (22) y (24) se tiene:

$$M_1 M_2^{-1} = X_{AM} T_{50L1} T_{50L2}^{-1} X_{AM}^{-1} \quad (27)$$

Donde:

$$X_{AM} = T_A T_{\Gamma} \quad (28)$$

$$X_{AM} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} = r_{22} \begin{pmatrix} a_m & b_m \\ c_m & 1 \end{pmatrix} \quad (29)$$

Definiendo el producto de $M_1 M_2^{-1}$ por:

$$T = M_1 M_2^{-1} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad (30)$$

Y el producto de $T_{50L1}T_{50L2}^{-1}$ como:

$$T_{X50} = T_{50L1}T_{50L2}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda} & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}; \quad \lambda \in \mathbb{C} \quad (31)$$

Donde:

$$\lambda = e^{\gamma(l_2 - l_1)} \quad (32)$$

La ecuación (27) se reescribe como:

$$T = X_{AM}T_{X50}X_{AM}^{-1} \quad (33)$$

Finalmente, T_{X50} se escribe como:

$$T_{X50} = X_{AM}^{-1}TX_{AM} \quad (34)$$

Empleando las ecuaciones (29), (30), y (32) y (34) se tiene:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda} & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} = \frac{1}{a_m - b_m c_m} \begin{bmatrix} c_m \left[\frac{a_m}{c_m} t_{11} - b_m \frac{a_m}{c_m} t_{21} - b_m t_{22} + t_{12} \right] & -[b_m^2 t_{21} + b_m(t_{22} - t_{11}) - t_{12}] \\ c_m^2 \left[\left(\frac{a_m}{c_m} \right)^2 t_{21} + \left(\frac{a_m}{c_m} \right) (t_{22} - t_{11}) - t_{12} \right] & c_m \left[\frac{a_m}{c_m} t_{22} + b_m \frac{a_m}{c_m} t_{21} - b_m t_{11} - t_{12} \right] \end{bmatrix} \quad (35)$$

Comparando término a término el lado izquierdo y el derecho de la ecuación matricial (35), se obtiene la expresión para λ en función de b_m y a_m/c_m dada por:

$$\lambda = \frac{\frac{a_m}{c_m} t_{11} - b_m \frac{a_m}{c_m} t_{21} - b_m t_{22} + t_{12}}{\frac{a_m}{c_m} - b_m} = \frac{\frac{a_m}{c_m} - b_m}{\frac{a_m}{c_m} t_{22} + b_m \frac{a_m}{c_m} t_{21} - b_m t_{11} - t_{12}} \quad (36)$$

y

$$b_m^2 t_{21} + b_m(t_{22} - t_{11}) - t_{12} = 0 \quad (37)$$

$$\left(\frac{a_m}{c_m}\right)^2 t_{21} + \left(\frac{a_m}{c_m}\right)(t_{22} - t_{11}) - t_{12} = 0 \quad (38)$$

El problema en calcular a_m/c_m y b_m con las ecuaciones (37) y (38) reside en la elección apropiada del signo, para lo cual se utiliza el criterio de $|b_m| < |a_m/c_m|$. El método más confiable para escoger el signo apropiado fue propuesto por (Engen and Hoer, 1979). Una vez determinada λ , la constante de propagación γ se determina utilizando la expresión siguiente:

$$\gamma_i = \frac{1}{L_2 - L_1} \ln(\lambda) \quad (39)$$

Donde γ es directamente proporcional al coeficiente de atenuación α y la constante de fase β , las cuales se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (40)$$

$$\beta = \frac{\omega}{v_f} \quad (41)$$

Siendo $\omega = 2\pi f$ y v_f es la velocidad de fase, calculada mediante:

$$v_f = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (42)$$

Donde ϵ_{eff} es la constante dieléctrica efectiva, se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\epsilon_{eff} = \left[\frac{\beta c}{2\pi f} \right]^2 \quad (43)$$

ϵ_{eff} puede ser interpretada como la constante dieléctrica de un medio homogéneo que reemplaza las regiones de aire y dieléctrico de las líneas, como se observa en la figura 32:

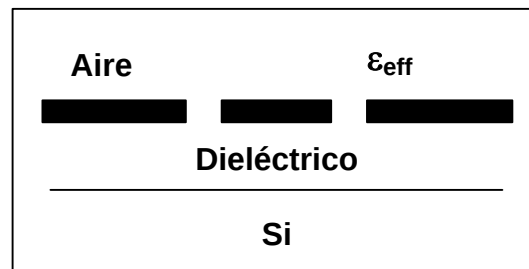


Figura 32. Representación de la constante dieléctrica efectiva.

La constante dieléctrica efectiva indica la cantidad de campo eléctrico en el medio de propagación. Entre mayor sea este valor, la concentración de campo eléctrico es menor, por lo que la densidad de corriente en los bordes de la línea de transmisión es menor, reduciendo con ello las pérdidas en el conductor.

V.5 Método para determinar la impedancia característica de líneas de transmisión uniformes

El cálculo de la impedancia característica de una línea de transmisión, representa un reto considerable cuando la línea no es uniforme (línea con transiciones). Existen diversos métodos para calcular la impedancia característica, en algunos casos se requieren de mediciones tanto de la constante de propagación como de la capacitancia de la línea (Williams and Marks, 1991; Williams and Marks, 1993), otras técnicas utilizan modelos sencillos de las transiciones y de los conectores y de métodos de calibración en dos etapas (Mangan et. al., 2006; Narita and Kushta, 2006) y mediciones de la constante de propagación.

La impedancia característica de líneas de transmisión uniformes se puede determinar utilizando el método basado en parámetros ABCD o el método basado en los parámetros de transmisión [T].

a) Modelo con parámetros ABCD

Los parámetros ABCD de una línea de transmisión uniforme con una longitud l , impedancia característica Z_L y la constante de propagación γ pueden escribirse como (Bahl and Bhartia, 1988):

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \frac{1}{S_{11}} \begin{pmatrix} \frac{1 + S_{11} - S_{22} - \Delta S}{Z_0} & (1 + S_{11} + S_{22} + \Delta S)Z_0 \\ 1 - S_{11} + S_{22} - \Delta S & \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_L \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_L} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{pmatrix} \quad (44)$$

La impedancia característica de la línea puede determinarse como:

$$Z_L = \frac{B}{\sinh(\gamma l)} \quad o \quad Z_L = \frac{\sinh(\gamma l)}{C} \quad (45)$$

En el cálculo de Z_L usando la ecuación (45) requiere conocer primero B o C , γ y l .

Conociendo B y C de una línea de transmisión uniforme, Z_L se expresa como:

$$Z_L^2 = \frac{B}{C} \quad (46)$$

El cálculo de Z_L de la ecuación (46) no requiere conocer γ y l .

Por otro lado, usando las condiciones de simetría ($S_{11}=S_{22}$) y reciprocidad ($S_{12}=S_{21}$), la expresión (46) se convierte en:

$$Z_L = Z_0 \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad o \quad Z_L = Z_0 \sqrt{\frac{(1 + S_{22})^2 - S_{12}^2}{(1 - S_{22})^2 - S_{12}^2}} \quad (47)$$

El cálculo de Z_L usando la ecuación (47) es propenso a errores de simetría. Es decir, cualquier discrepancia entre S_{11} y S_{22} puede producir diferentes valores de Z_L .

b) Método basado en parámetros de transmisión [T]

Los parámetros [S] medidos se convierten a parámetros [T] para determinar la impedancia utilizando el procedimiento reportado por (Reynoso-Hdz., 2003, Reynoso-Hdz et. al. 2003).

La idea fundamental para determinar Z_L usando parámetros de transmisión está basada en la nueva representación de la ecuación (23) que puede expresarse como la ecuación (24).

Resolviendo la ecuación (24) para T_{50L} se tiene:

$$T_{50L} = T_{\Gamma}^{-1} T_L T_{\Gamma} \quad (48)$$

Definiendo los parámetros T de una línea, uniforme como:

$$T = T_L = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{pmatrix} \quad (49)$$

Usando las ecuaciones (25) y (26), la ecuación (48) se convierte en:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda} & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} = \frac{1}{1 - \Gamma^2} \begin{bmatrix} t_{11} + \Gamma t_{12} - \Gamma(t_{21} + \Gamma t_{22}) & \Gamma t_{11} + t_{12} - \Gamma(\Gamma t_{21} + t_{22}) \\ -\Gamma(t_{11} + \Gamma t_{12}) + t_{21} + \Gamma t_{22} & -\Gamma(\Gamma t_{11} + \Gamma t_{12}) + \Gamma t_{21} + t_{22} \end{bmatrix} \quad (50)$$

Comparando cada término de las matrices en ambos lados de la ecuación (50), Γ puede expresarse como:

$$x^2 t_{21} + x(t_{22} - t_{11}) - t_{12} = 0 \quad (51)$$

Con $x = \frac{1}{\Gamma}$

Cuando se resuelve la ecuación cuadrática (51), el valor de Γ es determinado a cada frecuencia de medición y la impedancia característica se determina de la siguiente manera:

$$Z_L = \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right) Z_0 \quad (52)$$

La principal ventaja de usar parámetros de transmisión para determinar Z_L es que la constante de propagación y las dimensiones físicas de la línea no son necesarias. Además, la ambigüedad en el valor de Z_L usando la ecuación (47) es eliminada.

Capítulo VI

Resultados Experimentales

VI.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados experimentales de la caracterización eléctrica realizada a líneas de transmisión coplanares fabricadas en silicio, donde los datos mostrados son un promedio de seis mediciones realizadas a las estructuras CPW's (convencionales, con RIE y con LOCOS). En la caracterización eléctrica se utilizó un analizador de redes vectoriales (VNA) modelo HP8510C y una estación de prueba de tecnología coplanar Cascade Microtech modelo Summit 9000.

Se midieron los parámetros de dispersión [S] en rangos de frecuencia de 45 MHz – 50 GHz y de 45 MHz – 20 GHz, los cuales permiten calcular la impedancia característica (Z_L), constante dieléctrica efectiva (ϵ_{eff}), y la constante de propagación (γ).

Para el cálculo de la impedancia característica se empleó la técnica de calibración LRM (Line-Reflec-Match). Con el valor de γ se obtuvo la constante de atenuación (α) y la constante de fase (β), y finalmente con γ y Z_o se calcularon la velocidad de fase (v_f) y los parámetros distribuidos (R_d , L_d , C_d y G_d), utilizando el procedimiento descrito en el capítulo anterior, y las ecuaciones listadas en la tabla V.

Tabla V. Parámetros evaluados y ecuaciones utilizadas.

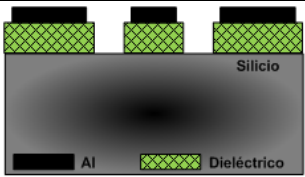
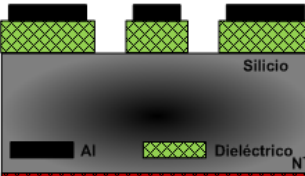
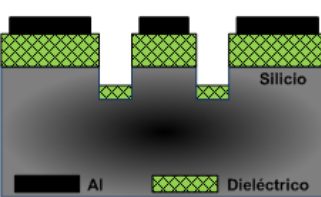
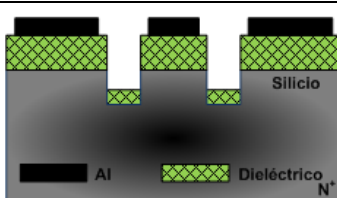
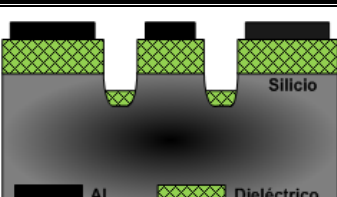
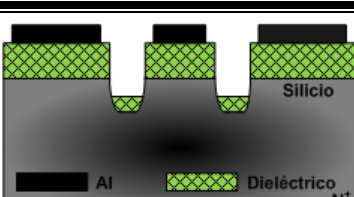
Parámetro	Ecuación	Parámetro	Ecuación
Constante de atenuación	$\gamma = \alpha + j\beta$	Velocidad de fase	$v_f = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$
Constante dieléctrica efectiva	$\epsilon_{eff} = \left[\frac{\beta c}{2\pi f} \right]^2$	Resistencia distribuida	$R_d = Re(\gamma Z_o)$
Impedancia característica	$Z_L = \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right) Z_o$	Inductancia distribuida	$L_d = \frac{Im(\gamma Z_o)}{\omega}$
Conductancia distribuida	$G_d = Re\left(\frac{\gamma}{Z_o}\right)$	Capacitancia Distribuida	$C_d = \frac{Im\left(\frac{\gamma}{Z_o}\right)}{\omega}$

VI.2 Clasificación de resultados

En esta sección se realiza la clasificación de las líneas de transmisión coplanares que se fabricaron en el laboratorio de Microelectrónica del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE).

En la tabla VI se clasifican las líneas de transmisión coplanares de acuerdo al proceso de fabricación, donde la letra “C” corresponde a líneas de transmisión convencionales, la “G” a estructuras con RIE, y la “L” a CPW’s con la técnica de LOCOS, así como el tipo de sustrato empleado como soporte mecánico, en donde “Si-HR” corresponde a silicio de alta resistividad y “Si-HR-N⁺” corresponde a silicio de alta resistividad con implantación N⁺ en la parte posterior, del mismo modo se hace referencia a los dieléctricos empleados en cada CPW’s, SRO con Ro=20 (SRO₂₀), SRO con Ro=30 (SRO₃₀), estructuras con doble capa dieléctrica (SiO₂/SRO₂₀ y SiO₂/SRO₃₀).

Tabla VI. Clasificación de líneas de transmisión coplanares.

Línea de transmisión	Proceso	Dieléctrico	Substrato
	C	SRO ₂₀	Si-HR
		SiO ₂ /SRO ₂₀	
	C-N ⁺	SRO ₂₀	Si-HR-N ⁺
		SiO ₂ /SRO ₂₀	
	G	SRO ₂₀	Si-HR
		SRO ₃₀	
		SiO ₂ /SRO ₂₀	
		SiO ₂ /SRO ₃₀	
	G-N ⁺	SRO ₂₀	Si-HR-N ⁺
		SRO ₃₀	
		SiO ₂ /SRO ₂₀	
		SiO ₂ /SRO ₃₀	
	L	SRO ₂₀	Si-HR
		SRO ₃₀	
		SiO ₂ /SRO ₂₀	
		SiO ₂ /SRO ₃₀	
	L-N ⁺	SRO ₂₀	Si-HR-N ⁺
		SRO ₃₀	
		SiO ₂ /SRO ₂₀	
		SiO ₂ /SRO ₃₀	

VI.3 Líneas de transmisión coplanares convencionales

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización eléctrica de las líneas CPW's convencionales, es decir, de las estructuras que tienen dieléctrico discontinuo como se muestra figura 33 (a) y (b):

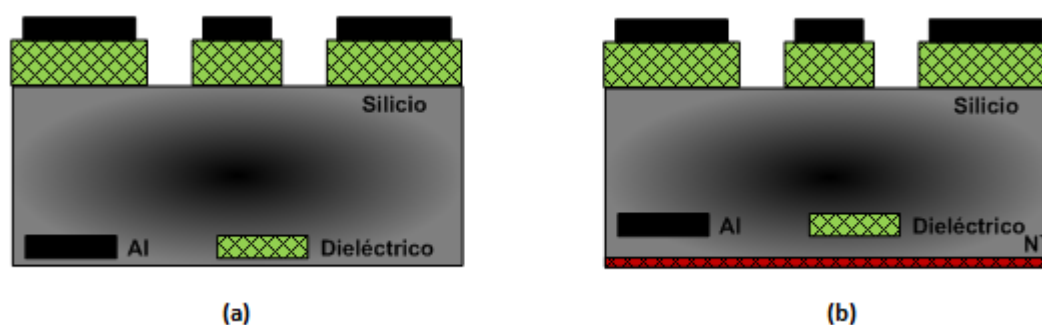


Figura 33. Línea CPW convencional. (a) con Si-HR, (b) con Si-HR-N⁺.

En la figura 34 se grafica las pérdidas en función de la frecuencia. Para las líneas de transmisión con doble capa dieléctrica ($\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$) se tiene un valor de $\alpha=3$ y 3.5 dB/cm a 50 GHz, mientras que para las estructuras con una capa de SRO_{20} se tiene $\alpha = 4$ dB/cm aproximadamente. Además se observa claramente que las líneas con $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$ presentan menores pérdidas en todo el rango de frecuencia.

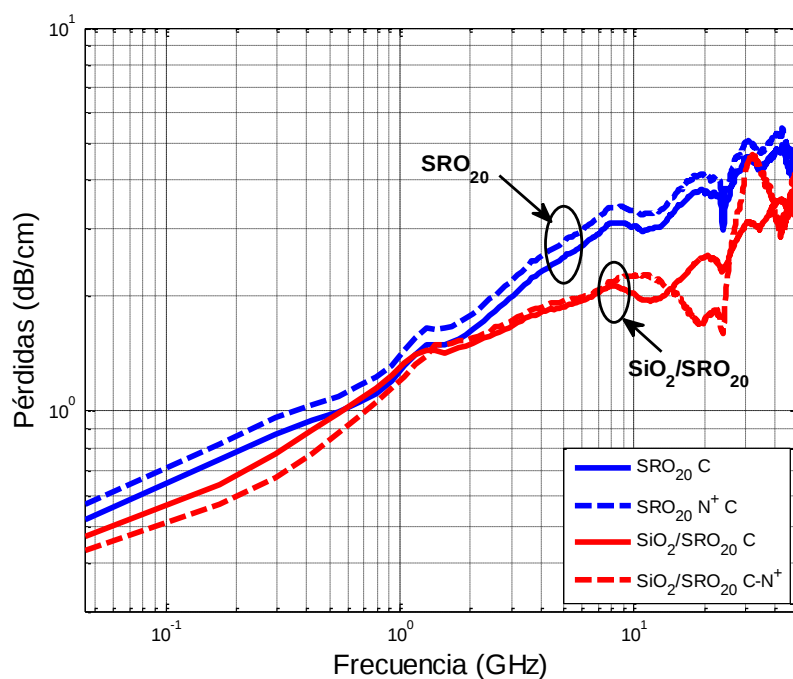


Figura 34. Constante de atenuación de CPW's convencionales.

En la figura 35 se grafica la constante dieléctrica efectiva en función de la frecuencia, en todos los casos se tiene un valor aproximado de 6, el cual se mantiene constante en todo el rango de frecuencia.

La figura 36 corresponde a la gráfica de la impedancia característica en función de la frecuencia. Para las líneas de transmisión con una capa dieléctrica de SRO_{20} se tiene un valor aproximado de $Z_o=48$ a 50Ω , mientras que las estructuras de doble capa dieléctrica ($\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$) se tiene un valor de $Z_o=53 \Omega$. En el caso de las CPW's con $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$ se observa menor variación en el valor de la impedancia característica en todo el rango de frecuencia.

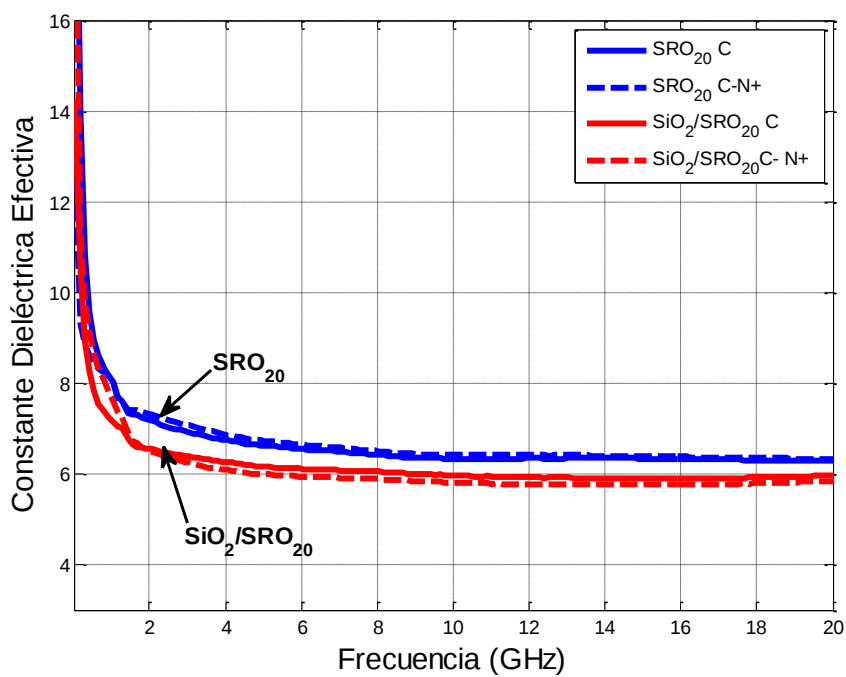


Figura 35. Constante dieléctrica de líneas convencionales.

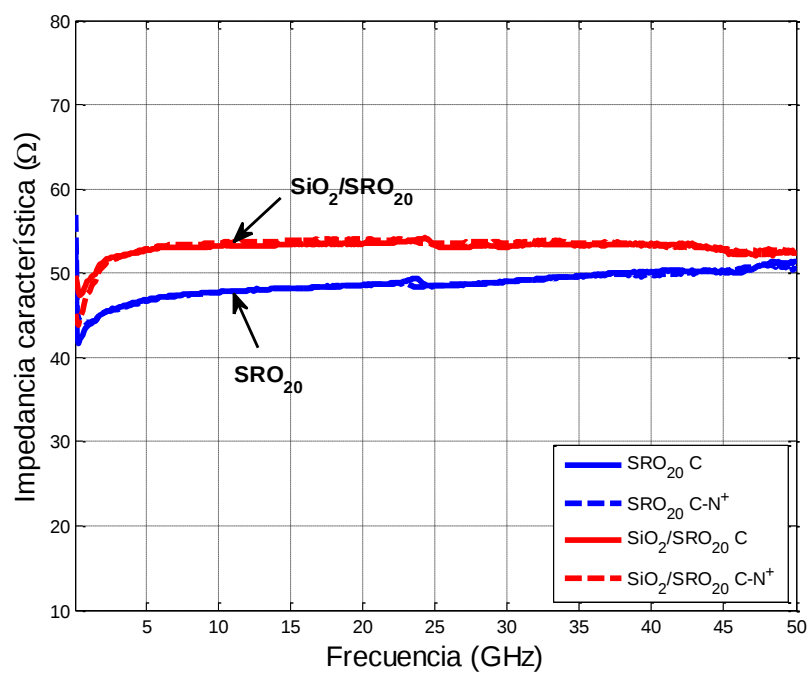


Figura 36. Impedancia característica de CPW's convencionales.

En la figura 37 se grafica la velocidad de fase en función de la frecuencia, cuando este parámetro depende de la frecuencia nos indica que las líneas de transmisión son dispersivas.

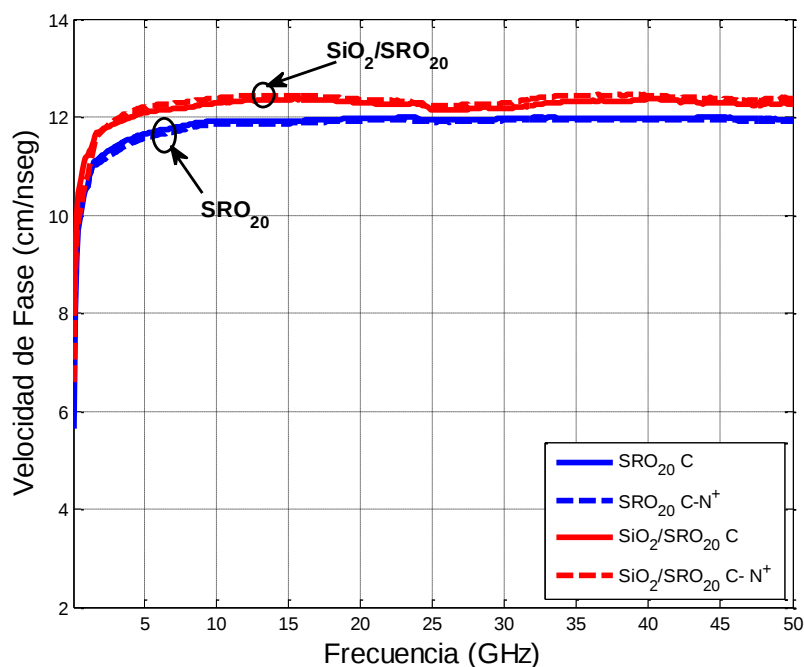


Figura 37. Velocidad de fase (v_f) de CPW's convencionales.

Las figuras 38, 39, 40 y 41 corresponden a los parámetros distribuidos de las estructuras (R_d , L_d , C_d , y G_d).

La importancia de obtener la resistencia y la conductancia distribuida de las líneas de transmisión radica en el hecho de que mediante estos parámetros se obtiene el valor de las pérdidas debidas al metal y al dieléctrico (R_d y G_d , respectivamente).

En la figura 38, se grafica la resistencia distribuida en función de la frecuencia, donde se observa que las pérdidas en el conductor en todo el rango de frecuencia son mayores para las líneas de transmisión con una capa de SRO₂₀.

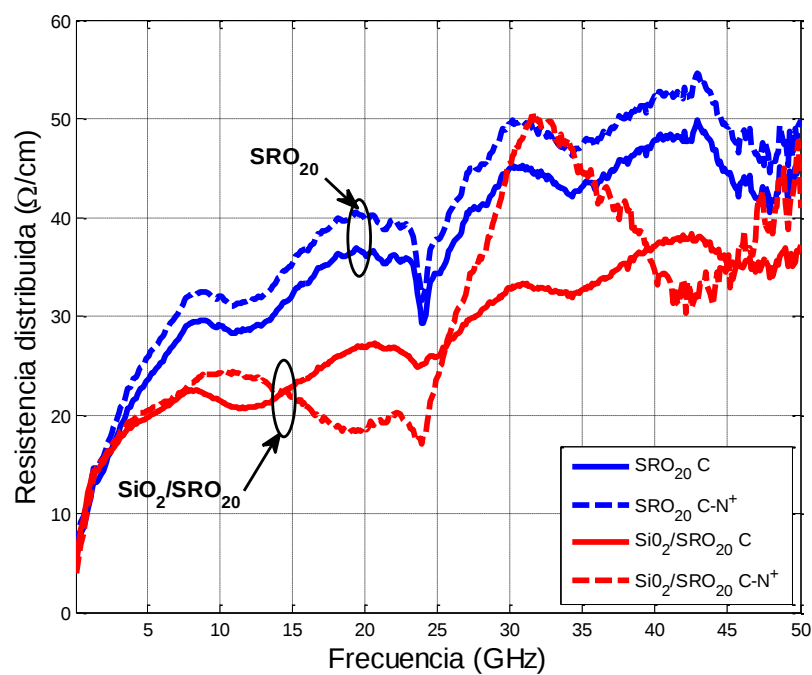


Figura 38. Resistencia distribuida (R_d) de CPW's convencionales.

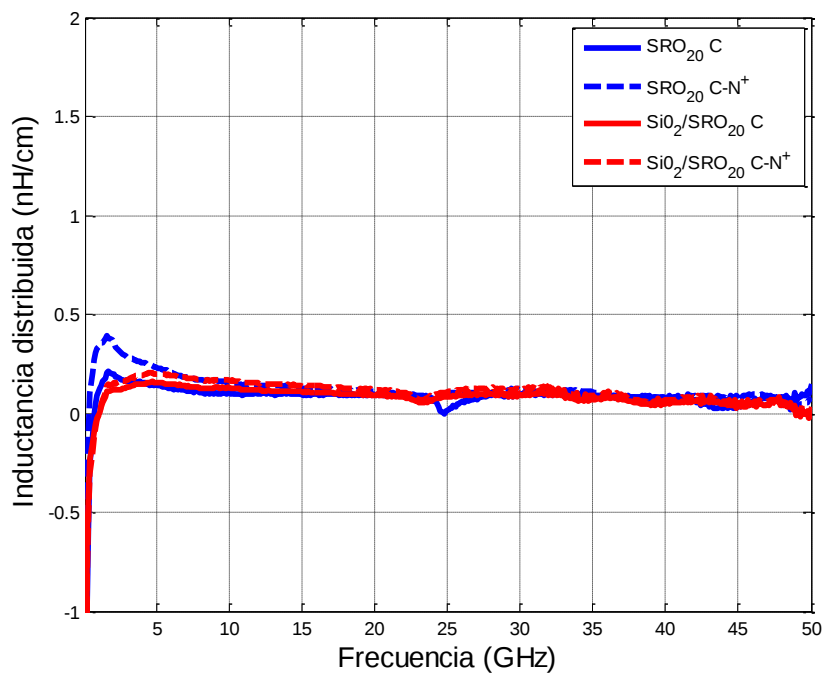


Figura 39. Inductancia distribuida (L_d) de CPW's convencionales.

En la figura 41, se grafica la conductancia distribuida en función de la frecuencia, donde se observa que las pérdidas en el dieléctrico en todo el rango de frecuencia son menores para las líneas con doble capa de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$.

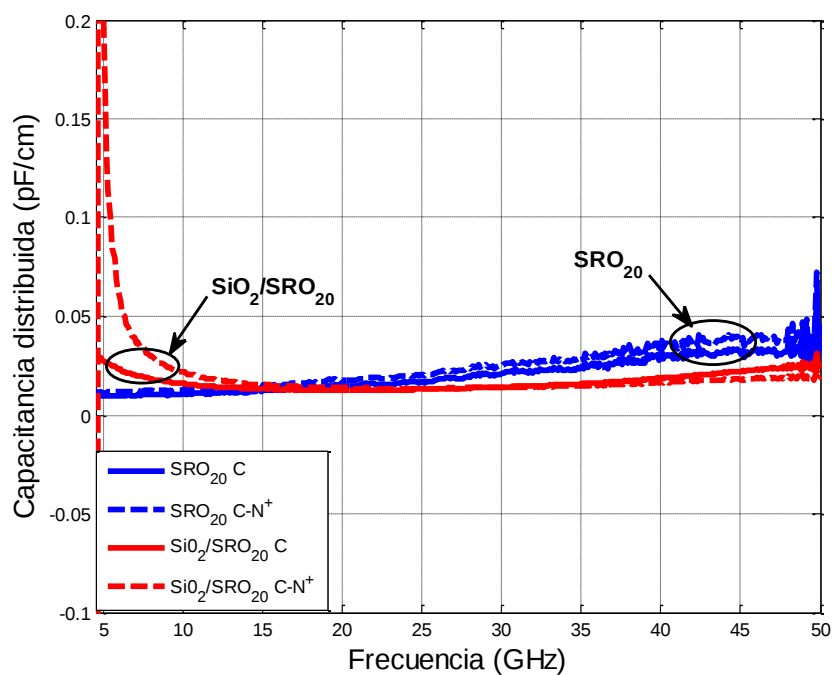


Figura 40. Capacitancia distribuida (C_d) de CPW's convencionales.

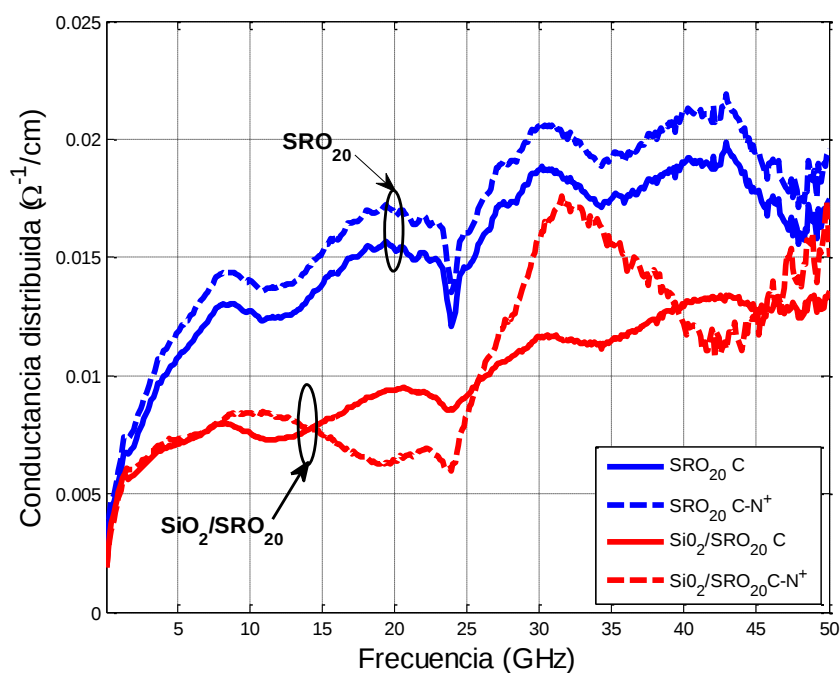


Figura 41. Conductancia distribuida (G_d) de CPW's convencionales.

Como se puede observar en las figuras 34, 38 y 41 se tiene que las líneas de transmisión con doble capa dieléctrica de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$ presentan menor constante de atenuación y menores pérdidas en el conductor y en el dieléctrico.

VI.4 Líneas de transmisión coplanares con Grabado Iónico Reactivo (RIE)

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización eléctrica correspondientes a líneas de transmisión con grabado iónico reactivo (RIE), como se muestra en la figura 42 (a) y (b):

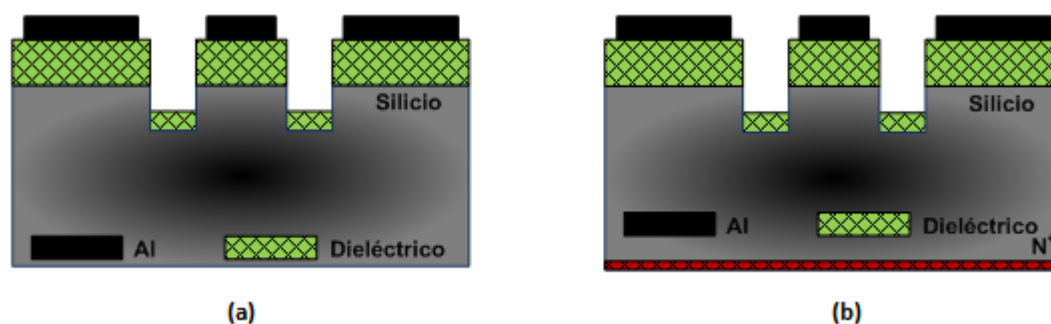


Figura 42. Línea CPW con RIE. (a) con Si-HR, (b) con Si-HR-N⁺.

En la figura 43 se grafica el comportamiento de las pérdidas en función de la frecuencia. En el caso de líneas de transmisión fabricadas en Si-HR, las estructuras con una capa dieléctrica de SRO₂₀ son las que tienen menores pérdidas a frecuencias mayores de 1 GHz, mientras que a frecuencias menores, las estructuras con doble capa (SiO₂/SRO₂₀) presentan menores pérdidas. Además las estructuras con mayores pérdidas son las que se fabricaron en Si-HR y Si-HR-N⁺ con una capa de SRO₃₀.

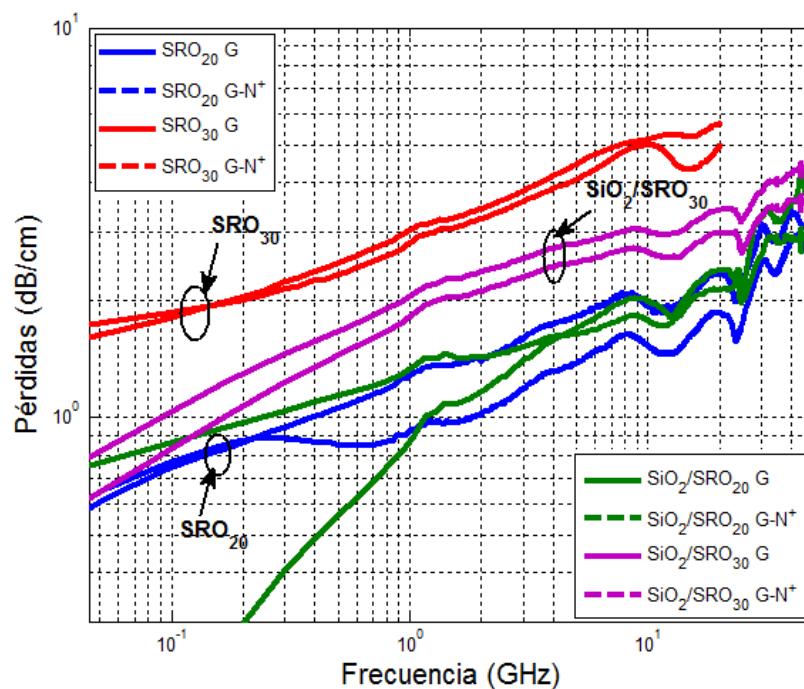


Figura 43. Constante de atenuación de CPW's con RIE.

En la figura 44 se grafica la constante dieléctrica efectiva en función de la frecuencia, se observa un valor aproximado de 5 para las líneas de transmisión con doble capa dieléctrica de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$ fabricadas en Si-HR-N^+ y en estructuras con $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{30}$ en Si-HR , mientras que para las demás líneas se tiene un valor de 6 en todo el rango de frecuencia. En todas las estructuras no se observa un cambio abrupto en el valor de la constante dieléctrica efectiva, por lo cual se puede considerar que son líneas no dispersivas o poco dispersivas.

En la figura 45 se grafica la impedancia característica en función de la frecuencia. En el caso de líneas de transmisión con una capa de SRO_{20} se tiene un valor de $Z_o = 50$ a 52Ω (a frecuencias mayores de 6 GHz), para estructuras con una capa de SRO_{30} se tiene $Z_o = 45$ a 50Ω (a frecuencias mayores de 4 GHz), para CPW's con doble capa dieléctrica de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{30}$ se tiene un valor de $Z_o = 38$ a 40Ω y para estructuras con $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$ se tiene $Z_o = 20$ a 30Ω .

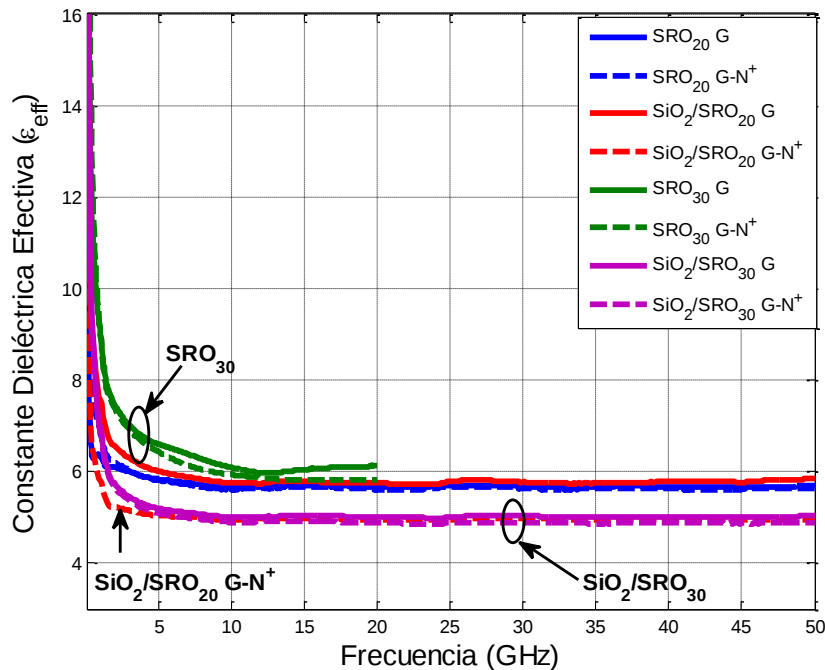


Figura 44. Constante dieléctrica de líneas con RIE.

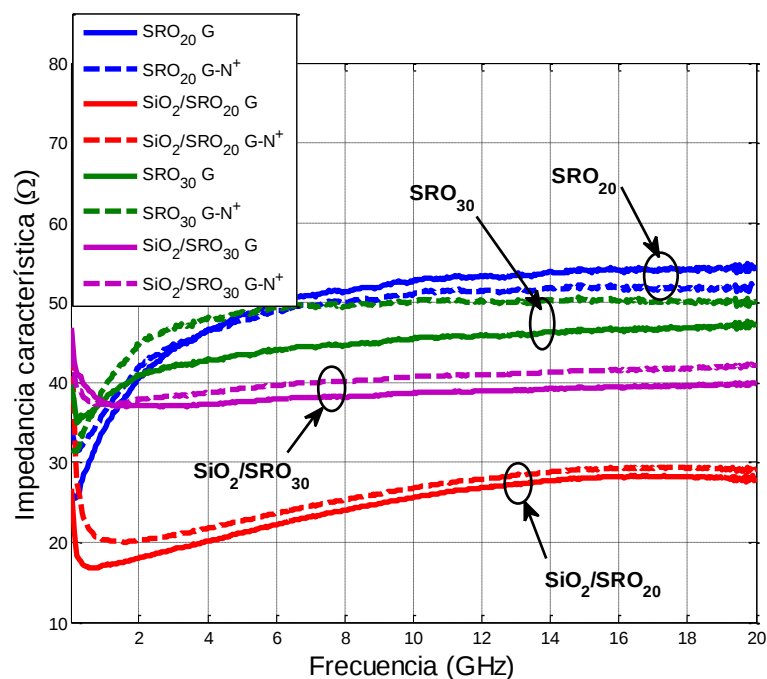


Figura 45. Impedancia característica de CPW's con RIE.

En la figura 46 se grafica la velocidad de fase en función de la frecuencia, se observa que este parámetro no es completamente independiente de la frecuencia, por lo cual las líneas de transmisión son poco dispersivas.

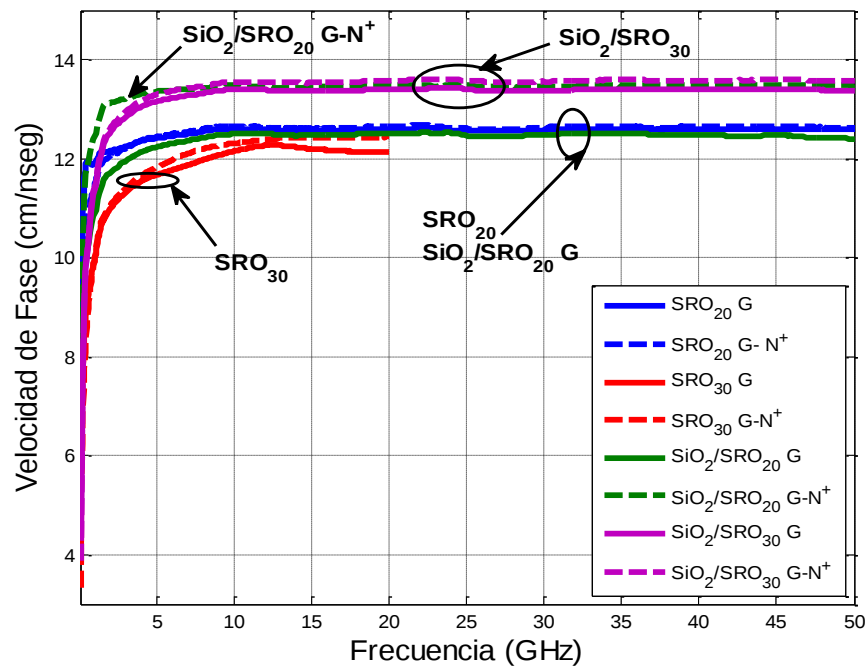


Figura 46. Velocidad de fase (v_f) de CPW's con RIE.

Las figuras 47, 48, 49 y 50 corresponden a los parámetros distribuidos de las estructuras.

En la figura 47 se grafica el comportamiento de las pérdidas en el conductor en función de la frecuencia, en esta gráfica se observa que las líneas de transmisión con una capa dieléctrica de SRO_{30} presentan mayores pérdidas en el conductor, mientras que las estructuras con doble capa de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$ presentan menores pérdidas en el conductor en todo el rango de frecuencia.

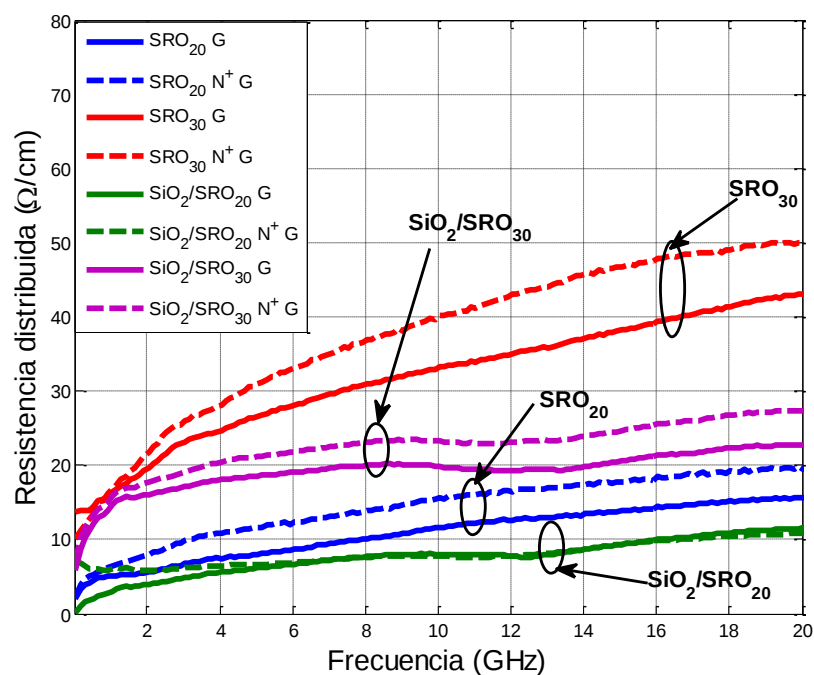


Figura 47. Resistencia distribuida (R_d) de CPW's con RIE.

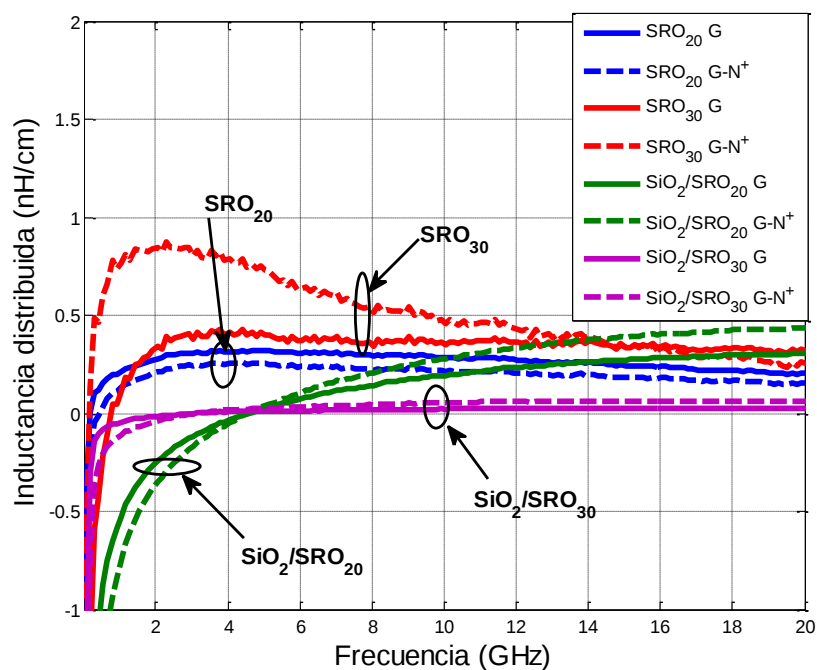


Figura 48. Inductancia distribuida (L_d) de CPW's con RIE.

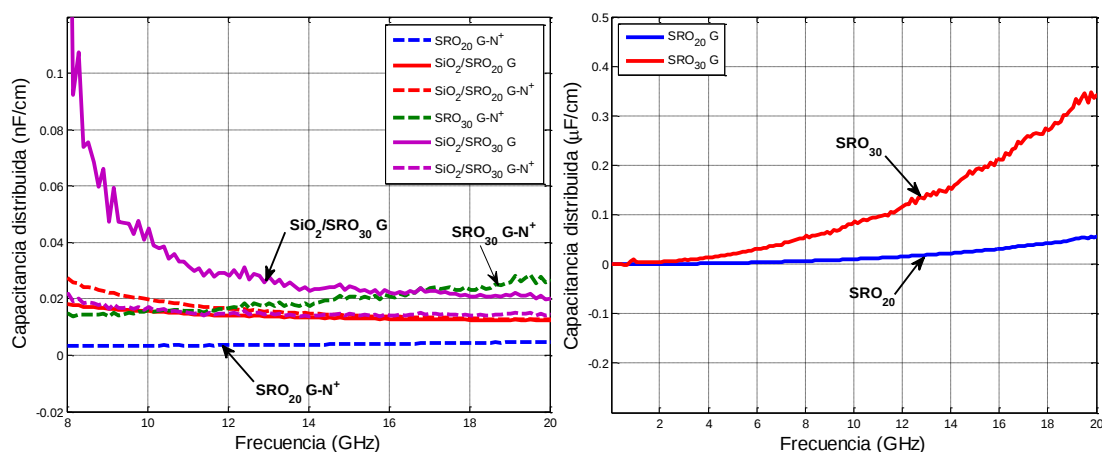


Figura 49. Capacitancia distribuida (C_d) de CPW's con RIE.

En la figura 50 se grafica el comportamiento de la conductancia distribuida en función de la frecuencia, la cual corresponde a las pérdidas en el dieléctrico. En esta gráfica se observa que las líneas de transmisión con una capa dieléctrica de SRO_{20} presentan menores pérdidas en todo el rango de frecuencia, mientras que las mayores pérdidas corresponden a las estructuras con doble capa dieléctrica de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$ en Si-HR (a frecuencias menores de 12 GHz) y a estructuras con una capa de SRO_{30} en Si-HR y en Si-HR- N^+ (a frecuencias mayores de 12 GHz).

En las figuras 43, 47 y 50 se puede observar que las líneas de transmisión con una capa dieléctrica de SRO_{30} presentan mayor constante de atenuación y las mayores pérdidas en el conductor y en el dieléctrico.

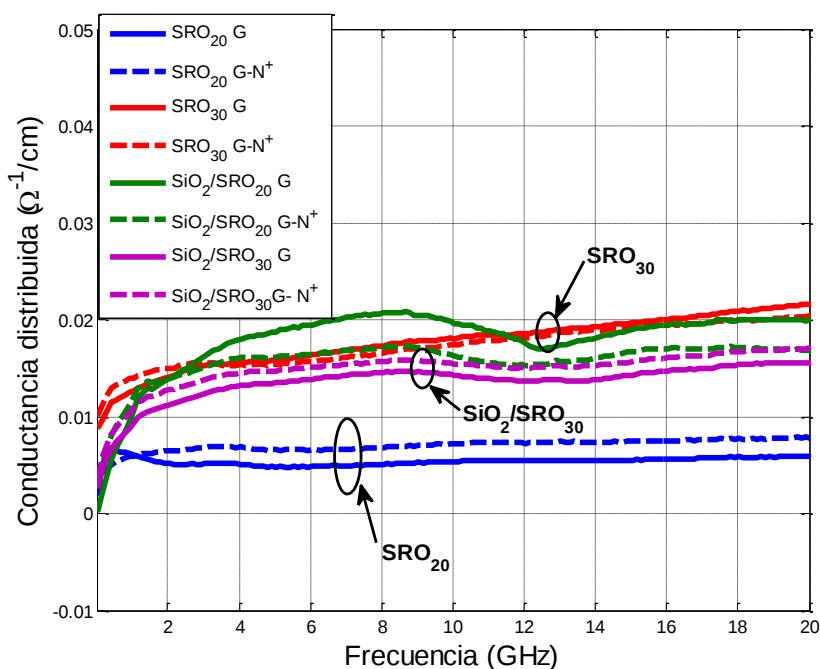


Figura 50. Conductancia distribuida (G_d) de CPW's con RIE.

VI.5 Líneas de transmisión coplanares con Oxidación Local de Silicio (LOCOS)

En esta sección se muestran los resultados de la caracterización eléctrica correspondientes a líneas fabricadas con la técnica de oxidación local de silicio (LOCOS), como se muestra en la figura 51 (a) y (b):

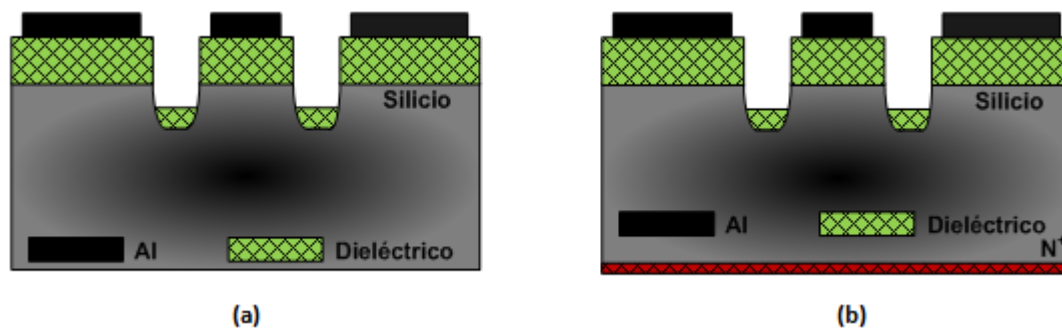


Figura 51. Línea CPW con LOCOS. (a) con Si-HR, (b) con Si-HR-N⁺.

En la figura 52 se grafica el comportamiento de las pérdidas en función de la frecuencia. Las líneas de transmisión con doble capa dieléctrica de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$ en Si-HR presentan menores pérdidas a frecuencias mayores de 1.5 GHz, mientras que las estructuras con una capa de SRO_{30} en Si-HR y en Si-HR- N^+ tienen las mayores pérdidas a frecuencias mayores de 0.3 GHz.

En la figura 53 se grafica la constante dieléctrica efectiva en función de la frecuencia, en esta gráfica se observa un valor aproximado de 6 y 6.5 en todo el rango de frecuencia para todas las estructuras.

En la figura 54 se grafica la impedancia característica en función de la frecuencia. Para líneas de transmisión con una capa dieléctrica de SRO_{20} se tiene un valor de $Z_o = 30$ a 40Ω , para estructuras con doble capa de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$ se tiene un valor de $Z_o = 25$ a 40Ω , para las CPW's con una capa de SRO_{30} se tiene $Z_o = 35$ a 40 y para las líneas con doble capa de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{30}$ se tiene una $Z_o = 15$ a 28Ω .

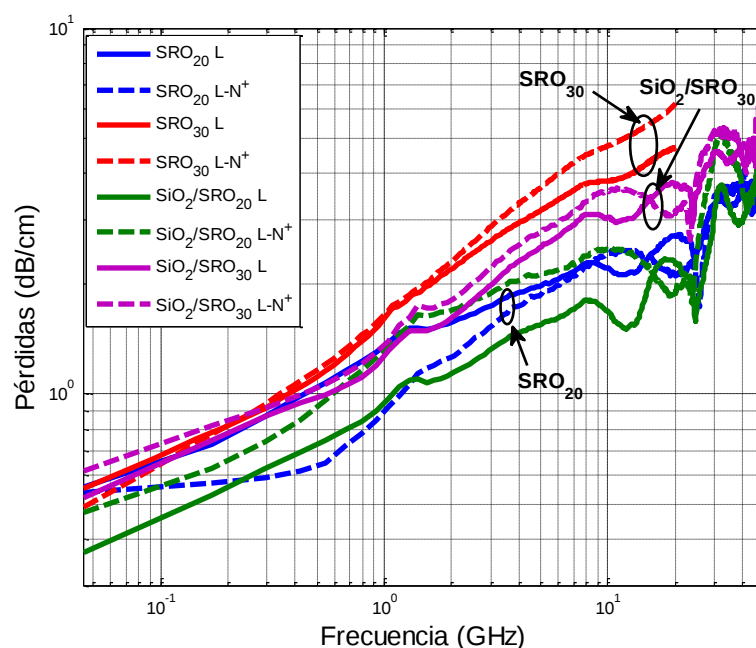


Figura 52. Constante de atenuación de CPW's con LOCOS.

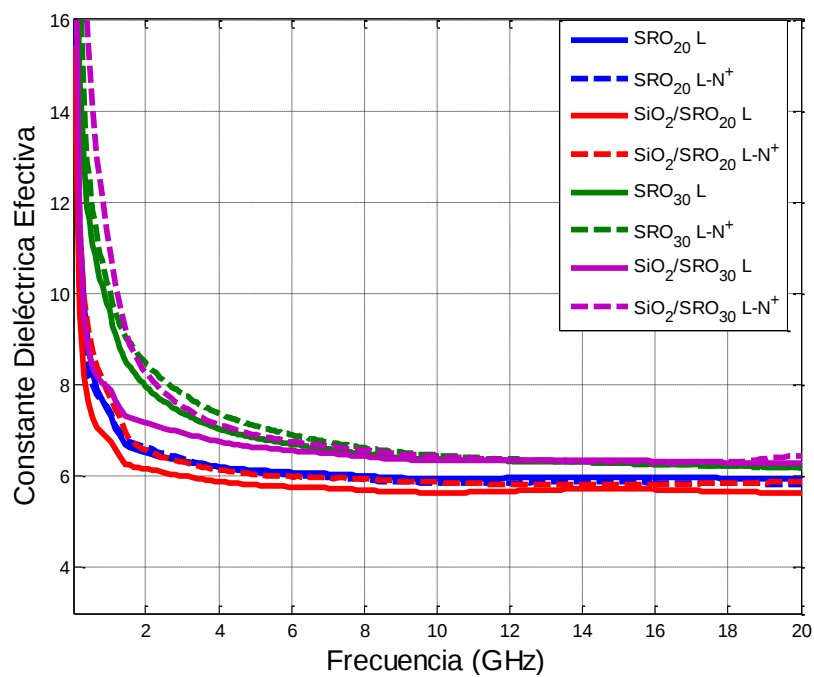


Figura 53. Constante dieléctrica de líneas con LOCOS.

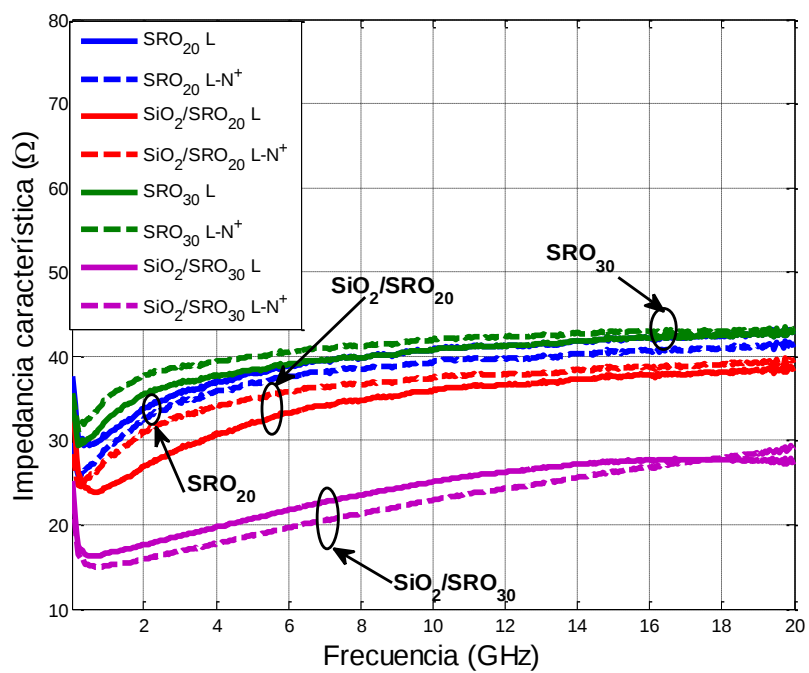


Figura 54. Impedancia característica de CPW's con LOCOS.

En la figura 55 se grafica la velocidad de fase en función de la frecuencia, cuando este parámetro es independiente de la frecuencia nos indica que las líneas de transmisión no tienen dispersión.

En la figura 56 se grafican las pérdidas en el conductor en función de la frecuencia, se observa que para líneas de transmisión con una capa de SRO_{30} se tienen las mayores pérdidas en todo el rango de frecuencia.

En la figura 59 se grafican las pérdidas en el dieléctrico en función de la frecuencia, se observa que líneas de transmisión con doble capa dieléctrica de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{30}$ presentan mayores pérdidas en todo el rango de frecuencia.

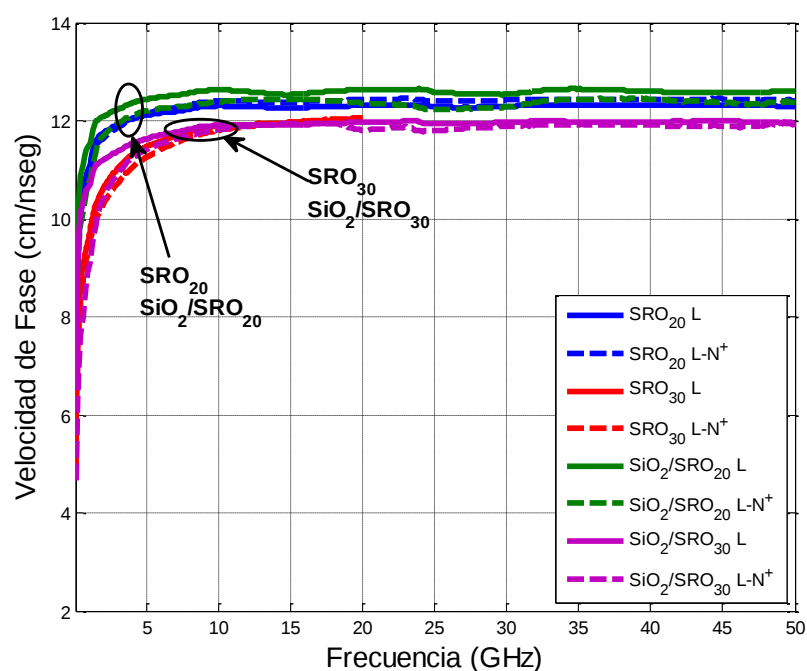


Figura 55. Velocidad de fase (v_f) de CPW's con LOCOS.

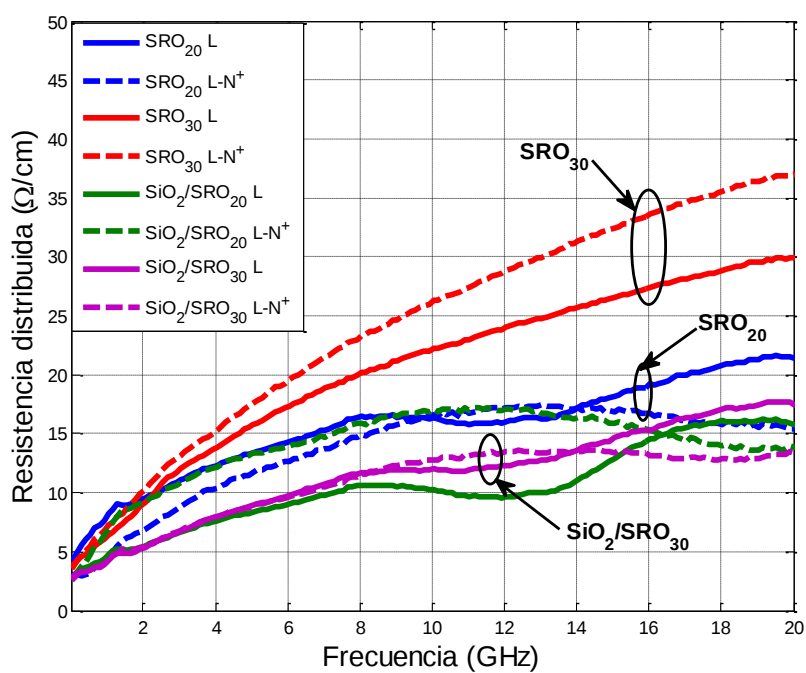


Figura 56. Resistencia distribuida (R_d) de CPW's con LOCOS.

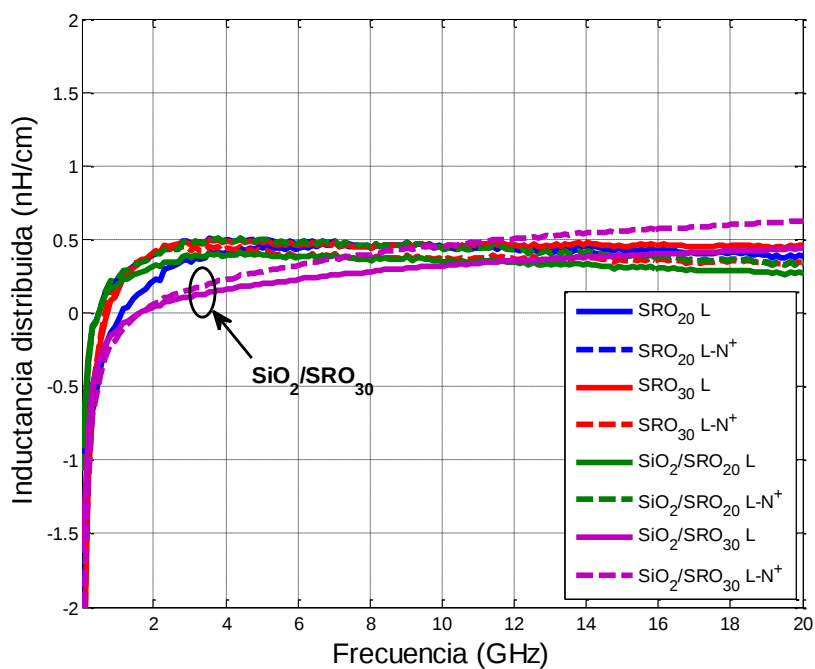


Figura 57. Inductancia distribuida (L_d) de CPW's con LOCOS.

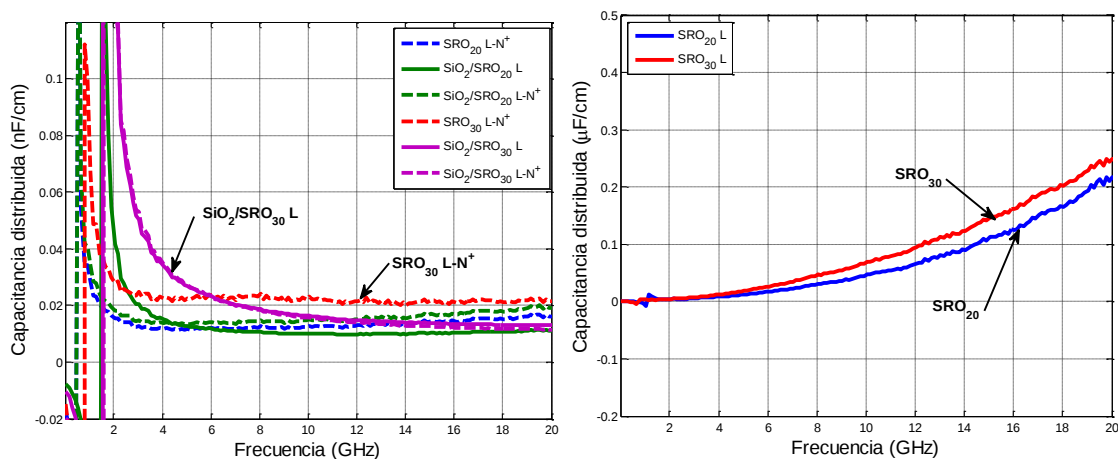


Figura 58. Capacitancia distribuida (C_d) de CPW's con LOCOS.

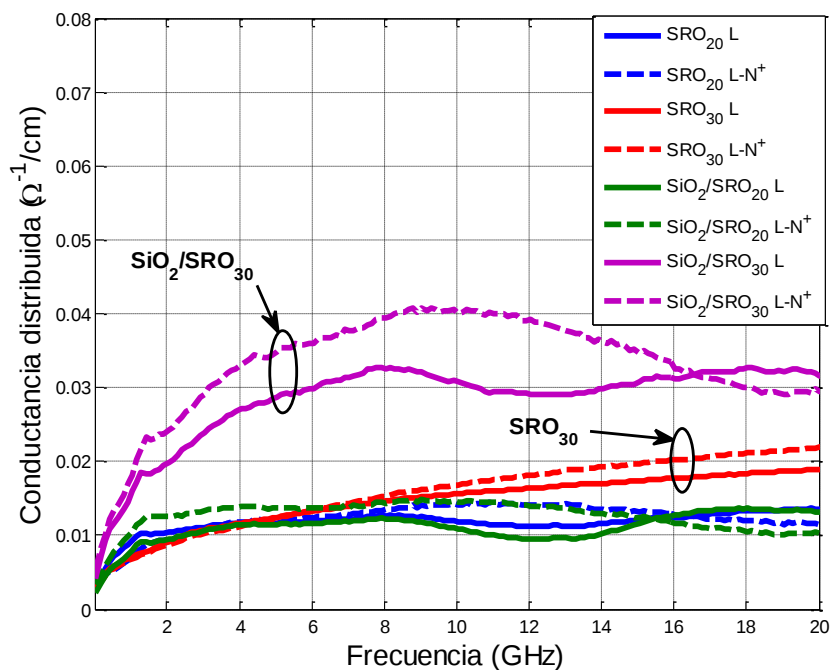


Figura 59. Conductancia distribuida (G_d) de CPW's con LOCOS.

En las figuras 52 y 56 se observa que las líneas de transmisión con una capa dieléctrica de SRO_{30} presentan mayor constante de atenuación y mayores pérdidas en el conductor, mientras que en la figura 59 las estructuras con doble capa dieléctrica de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{30}$ presentan las mayores pérdidas en el dieléctrico.

VI.6 Discusión de Resultados

En esta sección se realizan las comparaciones de las principales características de líneas de transmisión coplanares (convencionales, con RIE y con LOCOS) fabricadas en Si-HR y en Si-HR-N⁺, esta comparación es de acuerdo al dieléctrico empleado en cada estructura (SRO₂₀, SRO₃₀, SRO₂₀/SiO₂ y SRO₃₀/SiO₂).

VI.6.1 Líneas de transmisión coplanares con SRO₂₀

En las figuras 60, 61 y 62 se grafica el comportamiento de las pérdidas, la constante dieléctrica efectiva y la impedancia característica en función de la frecuencia para líneas de transmisión con una capa dieléctrica de SRO₂₀, para estructuras convencionales, con RIE y con LOCOS.

En la figura 60, se grafican las pérdidas en función de la frecuencia. Se observa que en el rango de frecuencia de 1.5 a 25 GHz las estructuras fabricadas en Si-HR con RIE presentan menores pérdidas, mientras que las CPW's convencionales (tanto en Si-HR como en Si-HR-N⁺) son las que tienen mayores pérdidas. Por otra parte, a frecuencias menores de 1.5 GHz las líneas fabricadas en Si-HR-N⁺ y con LOCOS presentan menores pérdidas.

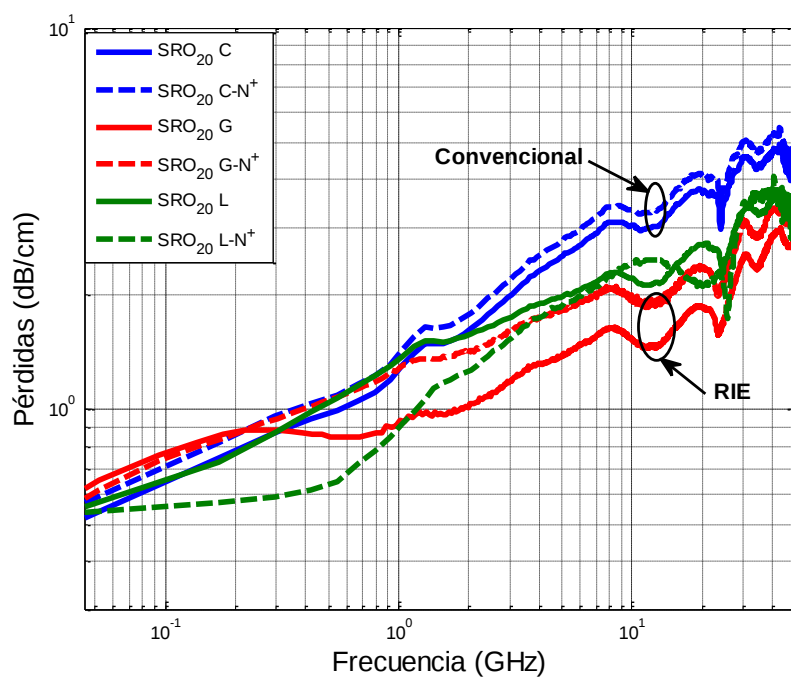


Figura 60. Constante de atenuación de CPW's con SRO₂₀.

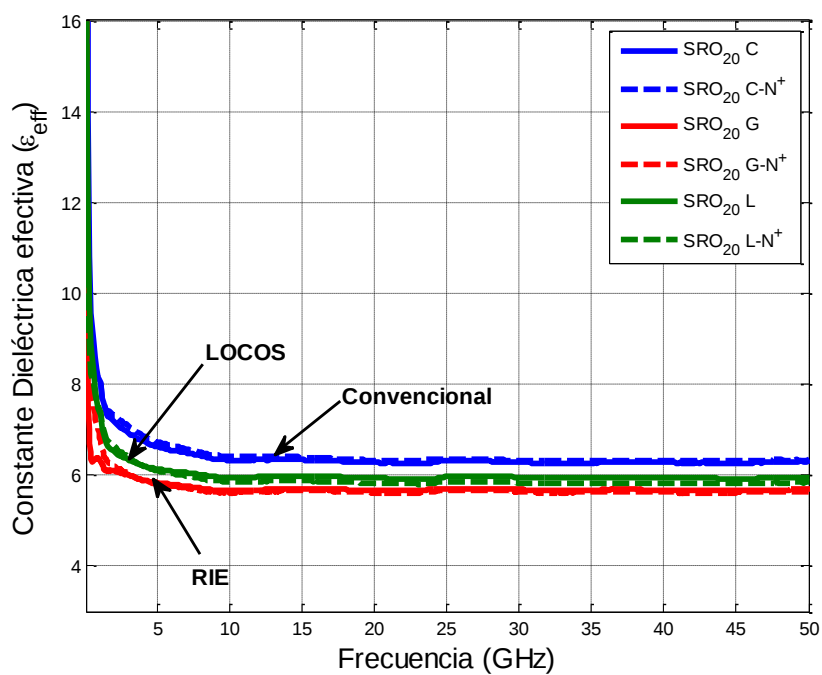


Figura 61. Constante dieléctrica efectiva de CPW's con SRO₂₀.

En la figura 61 se grafica la constante dieléctrica efectiva en función de la frecuencia. En el caso de las estructuras con RIE y LOCOS se tiene un valor de 6, mientras que para las CPW's convencionales es de 6.5 aproximadamente.

En la figura 62 se grafica la impedancia característica en función de la frecuencia. Donde se observa que las líneas de transmisión con RIE tienen un valor de $Z_o = 30$ a 55Ω , las estructuras convencionales tienen una $Z_o = 45$ a 50Ω , y las CPW's con LOCOS tienen un valor de $Z_o = 30$ a 42Ω .

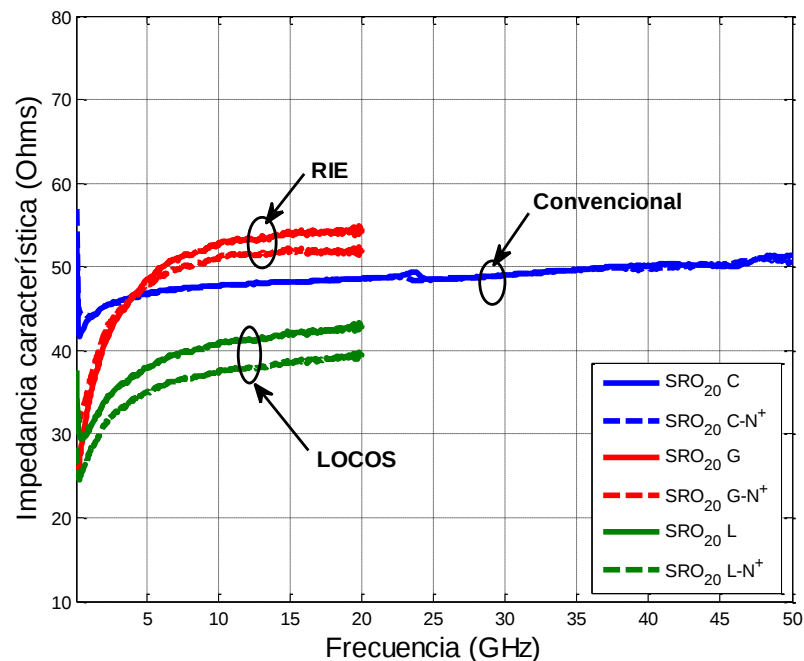


Figura 62. Impedancia característica de CPW's con SRO₂₀.

VI.6.2 Líneas de transmisión coplanares con SRO₃₀

En las figuras 63, 64 y 65 se grafican las pérdidas, la constante dieléctrica efectiva y la impedancia característica en función de la frecuencia de CPW's con una capa dieléctrica de SRO₃₀ para estructuras con RIE y con LOCOS.

En la figura 63 se grafican las pérdidas en función de la frecuencia. Se observa que las líneas de transmisión con LOCOS presentan las menores pérdidas en todo el rango de frecuencia.

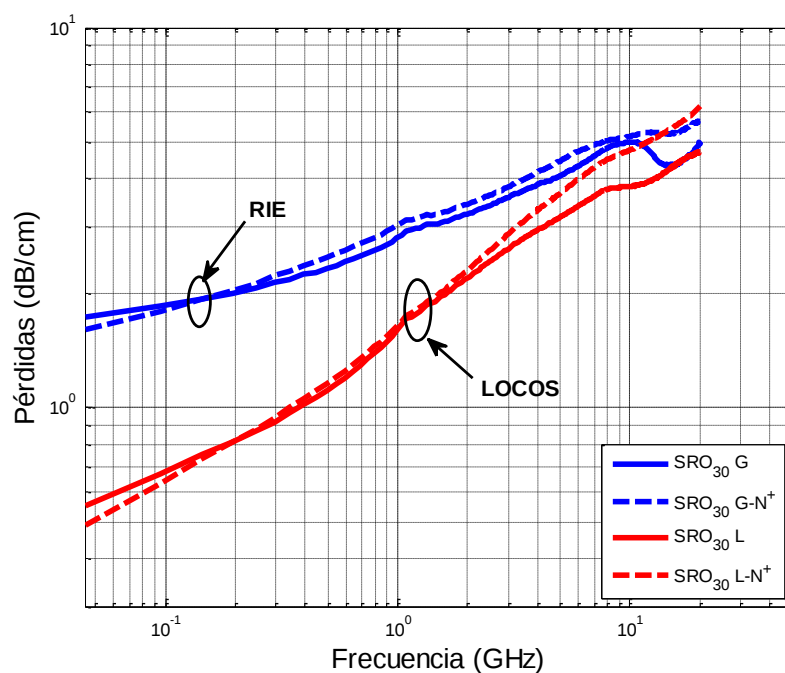


Figura 63. Constante de atenuación de CPW's con SRO₃₀.

En la figura 64 se grafica la constante dieléctrica efectiva en función de la frecuencia. Se observa un valor de 6 aproximadamente para las líneas de transmisión con RIE y con LOCOS. Además no se observan cambios abruptos en todo el rango de frecuencia, por lo tanto, son líneas no dispersivas.

En la figura 65 se grafica la impedancia característica en función de la frecuencia. Se observa que para líneas con RIE se tiene un valor de $Z_o = 45$ a 50Ω , mientras que para las estructuras con LOCOS se tiene un valor de $Z_o = 38$ a 43Ω .

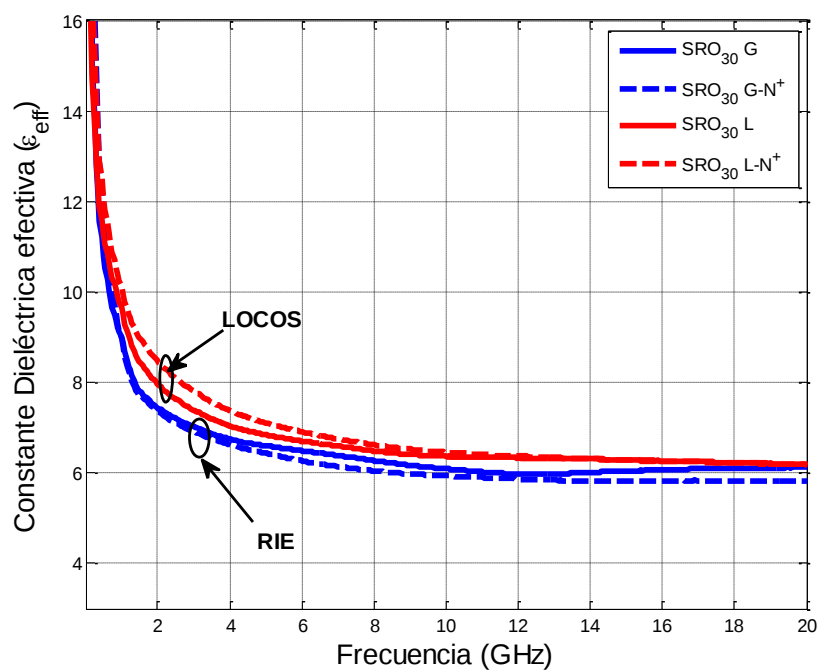


Figura 64. Constante dieléctrica efectiva de CPW's con SRO_{30} .

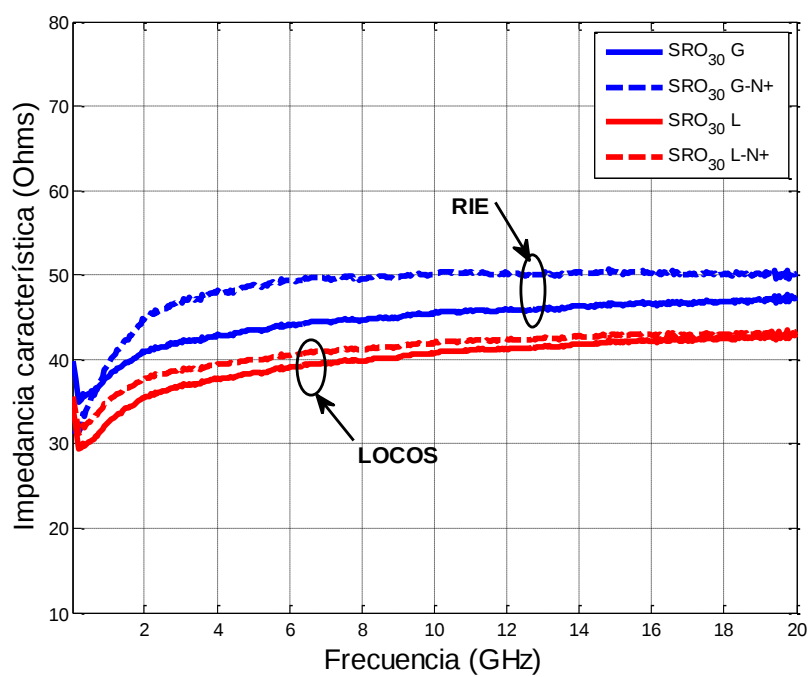


Figura 65. Impedancia característica de CPW's con SRO_{30} .

VI.6.3 Líneas de transmisión coplanares con $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$

En las figuras 66, 67 y 68 se grafican las pérdidas, la constante dieléctrica efectiva y la impedancia característica en función de la frecuencia de CPW's con doble capa dieléctrica de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$, para estructuras convencionales, con RIE y con LOCOS.

En la figura 66 se grafican las pérdidas en función de la frecuencia. Se observa que las líneas de transmisión con LOCOS fabricadas en Si-HR tienen menores pérdidas a frecuencias mayores de 1.5 GHz, mientras que a frecuencias menores las estructuras con RIE fabricadas en Si-HR tienen menores pérdidas.

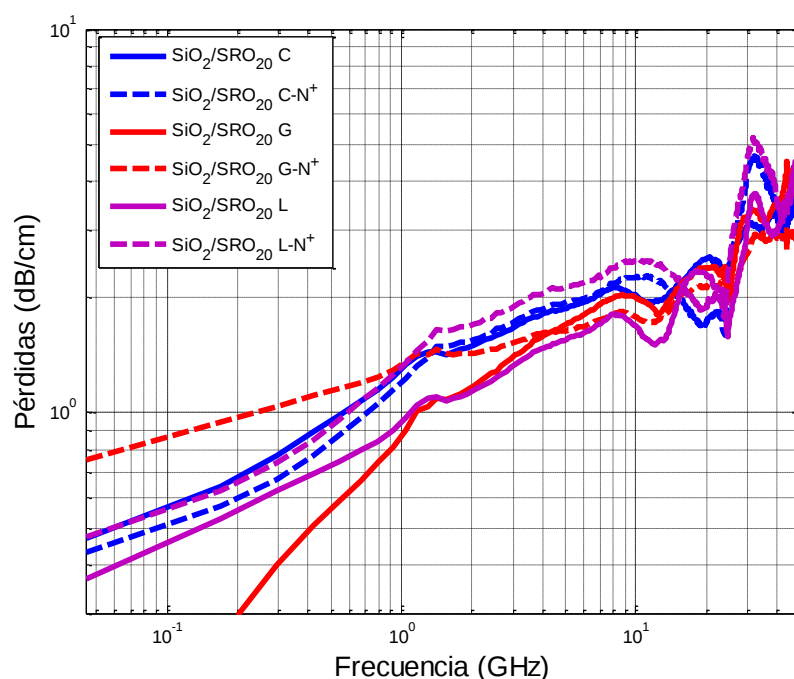


Figura 66. Constante de atenuación de CPW's con $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$.

En la figura 67 se grafica la constante dieléctrica efectiva en función de la frecuencia, en el caso de líneas de transmisión con RIE fabricadas en Si-HR- N^+ se tiene un

valor aproximado de 5, mientras que para el resto de las estructuras se tiene un valor de 6.

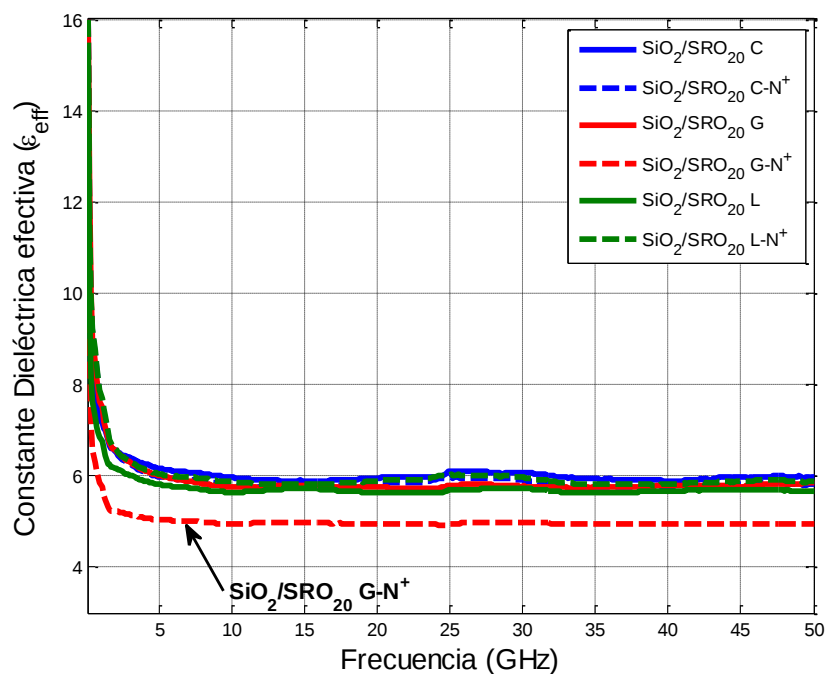


Figura 67. Constante dieléctrica efectiva de CPW's con $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$.

En la figura 68 se grafica la impedancia característica en función de la frecuencia. Para las líneas de transmisión convencionales se tiene un valor de $Z_o = 53 \Omega$, para las estructuras con LOCOS se tiene una $Z_o = 25$ a 40Ω , y para las CPW's con RIE se tiene un valor de $Z_o = 20$ a 30Ω .

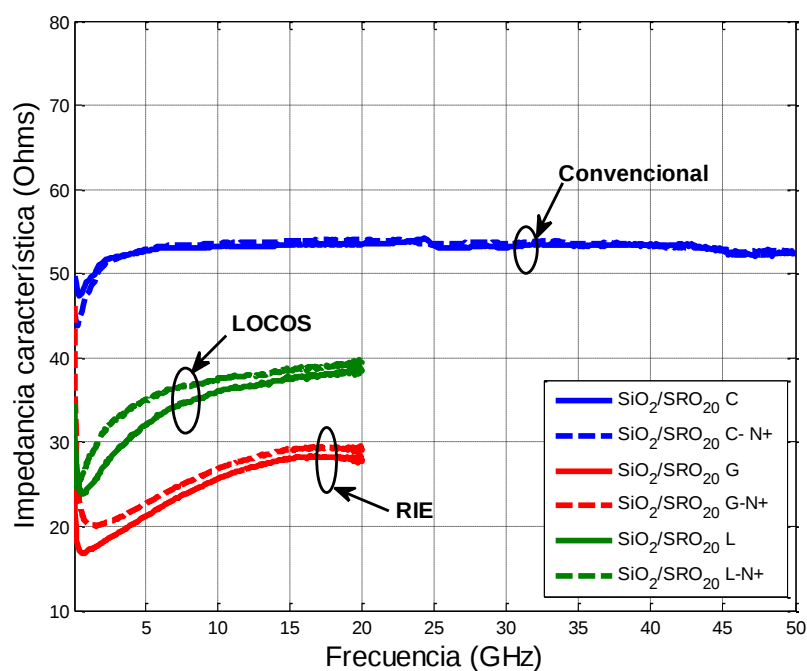


Figura 68. Impedancia característica de CPW's con SiO₂/SRO₂₀.

VI.6.4 Líneas de transmisión coplanares con SiO₂/SRO₃₀

En las figuras 69, 70 y 71 se grafican las pérdidas, la constante dieléctrica efectiva y la impedancia característica en función de la frecuencia de CPW's con doble capa dieléctrica de SiO₂/SRO₃₀, para estructuras con RIE y con LOCOS.

En la figura 69 se grafican las pérdidas en función de la frecuencia. Se observa que las líneas de transmisión con LOCOS tienen menores pérdidas a frecuencias menores de 4 GHz, mientras que las estructuras con RIE tienen menores pérdidas a frecuencias mayores.

En la figura 70 se grafica la constante dieléctrica efectiva en función de la frecuencia. Se observa que para las estructuras con LOCOS se tiene un valor de 6.5 y para las líneas de transmisión con RIE se tiene un valor de 5.

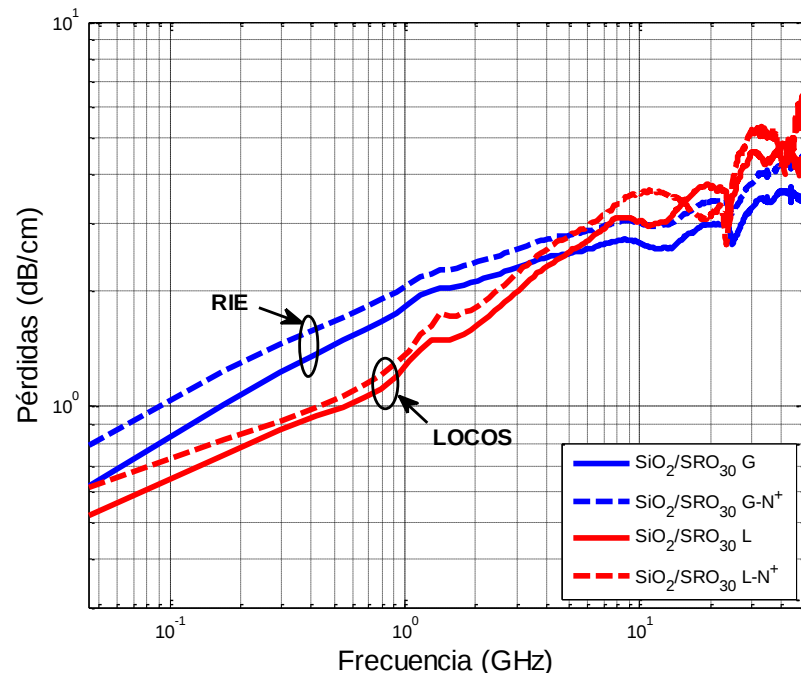


Figura 69. Constante de atenuación de CPW's con $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{30}$.

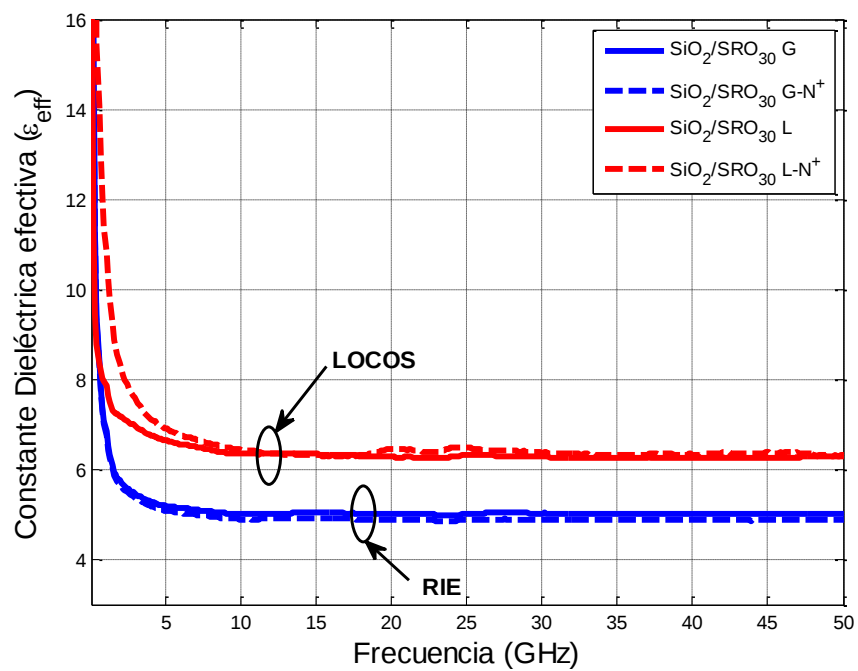


Figura 70. Constante dieléctrica efectiva de CPW's con $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{30}$.

En la figura 71 se grafica la impedancia característica en función de la frecuencia. Se observa que para líneas de transmisión con RIE se tiene un valor de $Z_o = 38$ a 42Ω , mientras que para las estructuras con LOCOS se tiene un valor de $Z_o = 15$ a 28Ω .

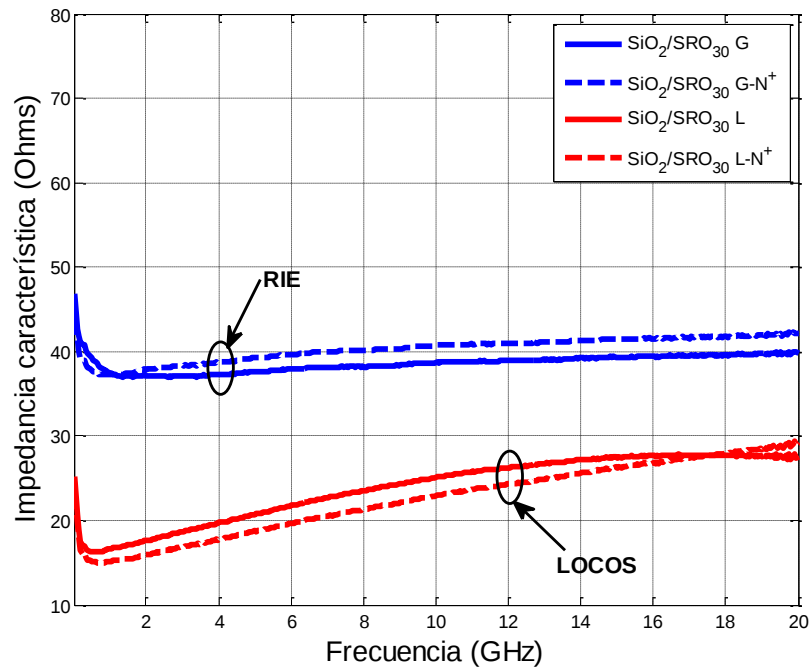


Figura 71. Impedancia característica de CPW's con $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{30}$.

De acuerdo a las comparaciones realizadas a las estructuras fabricadas (convencionales, con RIE y con LOCOS) con diferentes capas dieléctricas (SRO_{20} , SRO_{30} , $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$, y $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{30}$), se observó que la constante dieléctrica efectiva no presenta cambios abruptos en todo el rango de frecuencia, por lo tanto se consideran como líneas de transmisión no dispersivas o poco dispersivas. Otra característica importante es la impedancia característica, la cual presenta diferentes valores dependiendo el tipo de estructura y el dieléctrico empleado, estas variaciones están asociadas a las dimensiones físicas obtenidas en los procesos de fabricación de cada CPW's.

Capítulo VII

Conclusiones

VII.1 Conclusiones

La caracterización de las líneas de transmisión coplanares, proporcionan resultados que al ser tratados de manera correcta permiten desarrollar nuevos y mejores dispositivos de microondas. Al emplear diferentes estructuras y dieléctricos, se puede manipular el comportamiento de las CPW's, presentando una alternativa para modelar algún dispositivo que aproveche las características de estas estructuras.

En este trabajo se fabricaron líneas de transmisión coplanares convencionales, con RIE y con la técnica de LOCOS en Si-HR y Si-HR-N⁺, empleando capas dieléctricas de SRO₂₀, SRO₃₀, SiO₂/SRO₂₀ y SiO₂/SRO₃₀. En el proceso de fabricación de las estructuras se obtuvo lo siguiente:

- Dimensiones aproximadas a las dimensiones de diseño de las líneas.
- Perfiles con tendencia anisotrópica en las estructuras con grabado iónico reactivo (RIE).
- Se removió 13 μm de profundidad aproximadamente de silicio en las ranuras de las estructuras mediante grabado iónico reactivo (RIE).

- Se removió aproximadamente 3 μm de silicio en las ranuras de la estructura mediante la técnica de oxidación local de silicio (LOCOS).
- Se lograron construir líneas coplanares con LOCOS, las cuales son la aportación más relevante de este trabajo debido a la innovación de éstas.

Con estas estructuras fabricadas se estudiaron las propiedades eléctricas al emplear el óxido de silicio rico en silicio como pasivador de interfase, con lo que se obtuvo lo siguiente:

- Se lograron disminuir las pérdidas de líneas de transmisión coplanares al fabricar estructuras en Si-HR y Si-HR- N^+ con RIE y con LOCOS utilizando óxido de silicio rico en silicio como pasivador de interfase.
- Las líneas de transmisión con una capa de SRO_{20} fabricadas en Si-HR y RIE, presentan menores pérdidas en un rango de frecuencia de 1.5 a 25 GHz.
- Líneas de transmisión con una capa de SRO_{20} fabricadas en Si-HR- N^+ y con LOCOS presentan menores pérdidas a frecuencias menores de 1.5 GHz.
- A frecuencias mayores a 1 GHz, las CPW's convencionales con una capa dieléctrica de SRO_{20} fabricadas en Si-HR y en Si-HR- N^+ tienen mayores pérdidas que las líneas con RIE y con LOCOS.
- Las líneas de transmisión con LOCOS y con una capa dieléctrica de SRO_{30} , fabricadas en Si-HR y en Si-HR- N^+ presentan menores pérdidas en todo el rango de frecuencia.

- Las líneas CPW's con doble capa dieléctrica de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$ fabricadas en Si-HR y con la técnica de LOCOS presentan menores pérdidas en un rango de frecuencias mayores de 1.5 GHz.
- Las estructuras con RIE fabricadas en Si-HR y doble capa dieléctrica de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{20}$ tienen menores pérdidas a frecuencias menores de 1.5 GHz.
- Las líneas CPW's con LOCOS y doble capa dieléctrica de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{30}$ fabricadas en Si-HR y en Si-HR- N^+ tienen menores pérdidas a frecuencias menores de 4 GHz.
- Las estructuras con RIE y doble capa dieléctrica de $\text{SiO}_2/\text{SRO}_{30}$ fabricadas en Si-HR y en Si-HR- N^+ presentan menores pérdidas a frecuencias menores de 4 GHz.
- Se obtuvieron diversos valores de impedancia característica, lo que fue ocasionado a las diferentes dimensiones físicas obtenidas durante la fabricación de las líneas de transmisión.

En la tabla VII se muestran las estructuras con menores pérdidas:

Tabla VII. Resumen de estructuras con valores de pérdidas menores.

Dieléctrico	Estructura	Pérdidas	Frecuencia (GHz)	Substrato
SRO ₂₀	RIE	Menores	1.5 a 25	Si-HR
	LOCOS	Menores	< 1.5	Si-HR-N ⁺
SRO ₃₀	LOCOS	Menores	0.045 a 20	Si-HR y Si-HR-N ⁺
SiO ₂ /SRO ₂₀	LOCOS	Menores	> 1.5	Si-HR
	RIE	Menores	< 1.5	Si-HR
SiO ₂ /SRO ₃₀	LOCOS	Menores	< 4	Si-HR y Si-HR-N ⁺
	RIE	Menores	> 4	Si-HR y Si-HR-N ⁺

En la tabla VIII, se muestran los valores de impedancia característica obtenidos para cada línea de transmisión.

Tabla VIII. Resumen de valores de impedancia característica de líneas de transmisión coplanares.

Dieléctrico	Estructura	Z_o (Ω)	Dieléctrico	Estructura	Z_o (Ω)
SRO ₂₀	RIE	30-55	SiO ₂ /SRO ₂₀	RIE	20-30
	LOCOS	30-42		LOCOS	25-40
	Convencional	45-50		Convencional	53
SRO ₃₀	RIE	45-50	SiO ₂ /SRO ₃₀	RIE	38-42
	LOCOS	38-43		LOCOS	15-28

- Se logró comparar el comportamiento en función de la frecuencia de líneas de transmisión coplanares convencionales, con RIE y con LOCOS, fabricadas en Si-HR y Si-HR-N⁺ con diferentes capas dieléctricas.

Capítulo VIII

Aportaciones y Trabajo Futuro

VIII.1 Aportaciones

Las principales aportaciones de este trabajo de tesis se mencionan a continuación:

- Se propuso una nueva estructura de línea de transmisión coplanar empleando la técnica de oxidación local de silicio, con la finalidad de eliminar selectivamente el sustrato de las ranuras de la estructura.
- Se diseñaron y fabricaron estructuras de líneas de transmisión coplanares convencionales, con grabado iónico reactivo (RIE) y con la técnica de oxidación local de silicio (técnica de LOCOS).
- Se caracterizaron y compararon las principales características de las estructuras CPW's fabricadas.
- Se presentó un artículo derivado de este trabajo de tesis en: *28th Annual Meeting International, Conference on Materials, Surfaces and Vacuum*, titulado "Proceso de

grabado seco de silicio monocristalino para aplicaciones en guías de onda coplanares”, Veracruz, Veracruz, México, 29 de Septiembre al 3 de Octubre 2008.

- Se obtuvieron las siguientes publicaciones como resultado de esta tesis:
 - a. R. Leal-Romero, J. E. Zuñiga-Juárez, I. E. Zaldivar-Huerta, M. del Carmen Maya-Sánchez, M. Aceves-Mijares, and J. A. Reynoso-Hernández. 2008. “Fabrication and characterization of coplanar waveguides on silicon using a combination of SiO_2 and SRO_{20} ”, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 31(3):678-682.
 - b. R. Leal-Romero, I. E. Zaldivar-Huerta, J. A. Reynoso-Hernández, C. Reyes-Betanzo, M. C. Maya-Sánchez, M. Aceves-Mijares. 2010. “Proceso de grabado seco de silicio monocristalino para aplicaciones en guías de onda coplanares”, Revista Mexicana de Física, 56(1): 92-96.

VIII.2 Trabajo Futuro

- Modificar las mascarillas de acuerdo a cada proceso de fabricación para obtener una impedancia característica más cercana a 50 Ω .
- Optimizar los procesos de fabricación.
- Explicar la variación de la impedancia característica mediante simulación electromagnética.
- Calcular la impedancia característica (Z_L) mediante modelos estadísticos.

- Estudiar las propiedades eléctricas de líneas de transmisión de microcinta fabricadas en silicio utilizando óxido de silicio rico en silicio (SRO) como pasivador de interfase.
- Proponer un dispositivo que permita aprovechar las características de las CPW's fabricadas.

Referencias

- Aceves M., Falcony C., Reynoso J. A., Calleja W., and Pérez R. 1999. *New experimental observations on the electrical characteristics of the Al/SRO/Si diode and annealing effects*. Materials Science in Semiconductor Processing, 2(2):173-183.
- Achar R., and Nakhla M. S. 2001. Simulatin of High-Speed Interconnects. Proceeding of the IEEE, 89(5):693-728.
- Bahl I. and Bhartia P. 1988. *Microwave Solid State Circuits Design*. John Wiley & Sons, Inc. Boston, Massachusetts, 510.
- Bianco B. and Parodi M. 1976. Accurate Transmission Line Characterization. Alta Frecuencia, XI(2):107.
- Bianco B. and Parodi M. 1976. Determination of the propagation constant of uniform microstrip line. Alta Frecuencia, XIV(2):107(19E)-110(22F).
- Bouchriha F., Grenier K., Dubuc D., Pons P., Plana R., and Graffeuil J. 2003. *Minimization of Passive Circuits Losses realized on Low Resistivity Silicon Using Micro-Machining Techniques and Thick Polymer Layers*. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2(2):959-962.
- Campbell S. A. 1996. *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*. Oxford University Press. New York, 603.
- Chang K. 1994. *Microwave Solid-State Circuits and Applications*. Wiley Series IN Microwave and Optical Engineering. New York, 442.
- Dimaria D. J. and Dong D. W. 1980. Dual electron injector structure. Appl. Phys. Lett. 37(1)61-63.

- DiMaria D. J. and Dong D. W. 1980. High current injection into SiO_2 films and experimental applications. *Journal of Applied Physics*, 51(5):2722-2735.
- DiMaria D. J., DeMeyer K. M., Serrano C. M., and Dong D. W. 1981. Electrically-alterable read-only-memory using Si-rich SiO_2 injectors and a floating polycrystalline silicon storage layer. *Journal of Applied Physics*, 52(7):4825-4842.
- DiMaria D. J., Dong D. W., Falcony C., Theis T. N., Kirtley J. R., Tsang J. C., Young D. R., Pesavento F. L., Brorson S. D. 1984. Charge transport and trapping phenomena in off-stoichiometric silicon dioxide films. *J. Appl. Phys.*, 54(10):5801-5826.
- Dimaria D. J., Ghez R. and Dong D. W. 1980. Charge trapping studies in SiO_2 using high current injection from Si-rich SiO_2 . *J. Appl. Phys.*, 51(9):4830-4841.
- Dong D., Irene E. A., and Young D. R. 1978. *Preparation and some Properties of Chemical Vapor Deposited Si-Rich SiO_2 and Si_3N_4 Films*. *J. Electrochem. Soc.*, 125(5):819.
- Dori L., Acovic A. 1993. *Optimized Silicon-Rich Oxide (SRO) Deposition Process for 5-V-Only Flash EEPROM Applications*. *IEEE Electron Device Letters*, 14(6):283-285.
- Dworsky L. N. 1979. *Modern Transmission Line Theory and Applications*. John Wiley & Sons. New York, 236.
- Eisenstadt WR, Eo Y. S-parameter-based IC interconnection transmission line characterization. 1992. *IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology*, 15(4):483–490.
- Engen G. F., and Hoer C. A. 1979. Thru-Reflect-Line: An Improved Technique for Calibrating the Dual Six-Port Automatic Network Analyzer. *IEEE Transaction Microwave Theory and Techniques*, MTT-27(12):987-993.
- Kraus J. D., and Fleisch D. A. 2000. *Electromagnetismo con Aplicaciones*. McGraw-Hill. 669.

- Gamble H. S., Armstrong B. M., Mitchell S. J. N., Wu Y., Fusco V. F., and Stewart J. A. C. 1999. *Low-Loss CPW Lines on Surface Stabilized High-Resistivity Silicon*. IEEE Microwave and Guide Wave Letters, 9(10):395-397.
- Gardiol F. 1984. *Introduction to Microwave*. Artech House. Elk Grove Village, IL, 495.
- Hansen S. E., and Deal M. D. 1993. SUPREM-IV.GS Two Dimensional Process Simulation for Silicon and Gallium Arsenide. Integrated Circuits Laboratory Stanford University Stanford, California. 312.
- Helszajn J. 1992. *Microwave Engineering Passive, Active and Non-Reciprocal Circuits*, McGrawHill. Punta Gorda.
- Herrick K. J., Schwarz T. A., and Linda P. B. 1998. *Si-Micromachined Coplanar Waveguides for Use in High-Frequency Circuits*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 46(6):762-767.
- Kanthamani S., Raju S., Dhamodharan N., and Chidambaram K. S. 2008. *Characterization of Elevated CPW on Different Substrates for High Speed Digital Interconnects*. International Conference on Recent Advances in Microwave Theory and Applications, 754-756.
- Kim H. T., Jung S., Park J-H, Baek C-W, Yong-Kweon Kim, and Know Y. 2000. *A New Micromachined overlap CPW structure with low attenuation over wide impedance ranges*. IEEE MTT-S Digest International Microwave Symposium Digest, 299-303.
- Kiziloglu K., Matthaei G. L., Dagli N., and Long S. I. 1991. Experimental analysis of transmission line parameters in high-speed GaAs digital circuit interconnects. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 39(8):1361–1367.
- Kooi E. 1991. *The Invention of LOCOS (IEEE Case Histories of Achievement in Science and Technology Vol. 1)*. The Institute of Electrical and Electronics, Engineers, Inc.
- Kwon Y., Kim H. T., Park J. H., and Kim Y. K. 2001. *Low-Loss Micromachined Inverted Overlay CPW Lines with Wide Impedance Ranges and Inherent Airbridge Connection Capability*. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 11(2):59-61.

- Lee M. Q., and Nam S. 1996. An accurate broadband measurement of substrate dielectric constant. *IEEE Microwave Guided Wave Lett.* 6:168-170.
- Levy R. A. 1986. *Microelectronic Materials and Processes*. Kluwer Academic Publishers. Murray Hill, New Jersey, 985.
- Lucovsky, G., Pantelides, S., Galeener, F. 1980. *The Physics of MOS Insulators*. Pergamon Press. New York, 369.
- Mangan A. M., Voinigescu S. P., Ming-Ta Yang, and Tazlauanu M. 2006. De-Embedding transmission line measurement for accurate modeling of IC desing. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 53(2):235-241.
- Medley Max W., Jr. 1993. *Microwave and RF Circuits: Analysis, Synthesis and Design*. Artech House. Boston, 571.
- Misra D. K. 2004. *Radio-Frequency and Microwave Communications Circuits Analysis and Design*. John Wiley & Sons, Ins., Hoboken, New Jersey. 614.
- Narita K., and Kushta T. 2006. An accurate experimental method for characterizing transmission line embedded in multilayer printed circuits board. *IEEE Transaction Advanced Packaging*, 29(1):114-121.
- Ohring M. 1992. *The MATERIALS SCIENCE of THIN FILMS*. Academic Press Inc. Hoboken, New Jersey, 794.
- Pierson Hugh O. 1992. *Handbook of Chemical Vapor Deposition (CVD) Principles, Technology and Applications*. Notes Publications. Westwood, New Jersey, USA. 436.
- Ponchak G. E., Margomenos A., and Katehi L. P. B. 2001. *Low-Loss CPW on Low-Resistivity Si Substrates with a Micromachined Polyimide Interface Layer for RFIC Interconnects*. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 49(5):866-870.
- Pozar D. M. 2001. *Microwave and RF Wireless and Systems*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 366.

- Pozar D. M. 2004. *Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 720.
- Reynoso-Hernández J. A. 2003. Unified method for determining the complex propagation constant of reflecting and non-reflecting transmission lines. *IEEE Microwave and Guide Wave Lett.*, 13(8):351-353.
- Reynoso-Hernández J. A., Estrada-Maldonado C. F., Parra T., Grenier K., and Graffeull J. 1999. An improved method for the wave propagation constant γ estimation in broadband uniform millimeter-wave transmission line. *Microwave and Optical Technology Letters*, 22(4):268–271.
- Reynoso-Hernández J. A., Rangel-Rojo R., Aceves M., Zaldívar I., Sánchez L. E., and Herrera M. 2003. Influence of the SRO as passivation layer on the microwave attenuation losses on the CPW's fabricated on HR-Si. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 13(12):508-510.
- Ruska W. Scot. 1987. *Microelectronic Processing: An Introduction to the manufacture of integrated circuits*. McGraw-Hill, USA. 430.
- Sagkol H., Rejaei B., and Burghartz J. N. 2005. *High Aspect Ratio Copper electroplating Process for Compact Coplanar Transmission Line Implementation*. Proc. STW Workshop on Semiconductor Advances for Future Electronics and Sensor, pp. 43-46.
- Schroder Dieter K. 1998. *Semiconductor Material and Device Characterization*. Arizona State University, John Wiley & Sons. Tempe, Arizona, 760.
- Simons R. N. 2001. *Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems*. Wiley-Interscience. Cleveland, Ohio, 439.
- Spickermann R., and Dagli N. 1994. Experimental analysis of millimeter wave coplanar waveguide slow wave structures on GaAs. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 42(10):1918–1924.
- Stanley W. 2004. *Microchip Manufacturing*. Lattice Press. 584.
- Sze S. M. 1984. *VLSI Technology*, McGraw Hill.

- Tiemeijer L. F, and Havens R. J. 2003. A calibrated lumped-element de-embedding technique for on-wafer RF characterization of high-quality inductors and high-speed transistors. *IEEE Trans Electron Dev.* 50(3):822–829.
- Todd S. T., Huang X. T., Bowers J. E., and MacDonald N. C. 2009. *High Aspect Ratio CPW Fabricated using a Micromachining Process Combining DRIE, Thermal Oxidation, Electroplating, and Planarization*, Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium, CISC 2009, Annual IEEE, 11-14 Oct., 1-4.
- Todd S. T., Huang X. T., Bowers J. E., and MacDonald N. C. 2009. *High Aspect Ratio CPW Fabrication Using Silicon Bulk Micromachining with Substrate Removal*. Microwave Conference, APMC 2009, Asia Pacific, 7-10 Dec. 2136-2139.
- Torres-Torres R, Murphy-Arteaga R, Reynoso-Hernández JA. 2005. Analytical model and parameter extraction to account for the pad parasitics in RF-CMOS. *IEEE Trans Electron Dev.* 52(7): 1335–1342.
- Wadell Brian C. 1991. *Transmission Line Design Handbook*. Artech House. Boston, Massachusetts. 510.
- Weber E. and Nebeker F. 1994. *The Evolution of Electrical Engineering: An Personal Perspective*. IEEE Press, Piscataway, New Jersey, USA, 1994 ISBN 0-7803-1066-7.
- Wen C. P. 1969. *Coplanar Waveguide: A Surface Strip Transmission Line Suitable for Nonreciprocal Gyromagnetic Device Applications*. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 17(12):1087-1090.
- Williams Dylan F. and Marks Roger B. 1991. Transmission Line Capacitance. *IEEE Microwave and Guide Wave Lett.*, 1(9):243-245.
- Williams Dylan F. and Marks Roger B. 1993. Accurate Transmission Line Characterization. *IEEE Microwave and Guide Wave Lett.*, 3(8):247-249.
- Wu Y., Gamble H. S., Armstrong B. Mervyn, Fusco V. F., and Stewart J. A. Carson. 1999. *SiO₂ Interface Layer Effects on Microwave Loss of High-Resistivity CPW Line*. *IEEE Microwave and Guide Wave Letters*, 9(1):10-12.

- Yoon S. J., Jeong S. H., Yook J. G., Kim Y. J., Lee S. G., Seo O. K., Lim K. S., and Kim D. S. 2001. *A Novel CPW Structure for high-Speed Interconnects*. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2:771-774.
- Zhang X. G. 2001. *Electrochemistry of Silicon and its Oxide*. Klumer Academic/Plenum Publishers. Ontario, Canada, 510.
- Zwick T, Tretiakov Y, Goren D. 2005. On-chip SiGe transmission line measurements and model verification up to 110 GHz. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 15(2):65-67.

Apéndice A:

Procesos de fabricación

A.1 Clasificación de muestras

Las muestras se clasificaron y marcaron, para identificar cada proceso de fabricación por estructura y resistividad, de acuerdo a la tabla IX.

En todas las estructuras el silicio es tipo n de alta resistividad ($> 4000 \Omega \cdot \text{cm}$), y orientación $\langle 100 \rangle$. En el caso de las muestras implantadas se refiere a una implantación N^+ por la parte posterior.

Tabla IX. Clasificación de muestras.

Proceso	Estructura	Nomenclatura de muestras		Tipo de CPW
		Sin implantación	Implantadas	
1	Si/SRO ₂₀ /Al	SRO2A	SRO2A+	Micromaquinada
		SRO2B	SRO2B+	
2	Si/SRO ₃₀ /Al	SRO3A	SRO3A+	Micromaquinada
		SRO3B	SRO3B+	
3	Si/SiO ₂ /SRO ₂₀ /Al	OX2A	OX2A+	Micromaquinada
		OX2B	OX2B+	
4	Si/SiO ₂ /SRO ₃₀ /Al	OX3A	OX3A+	Micromaquinada
		OX3B	OX3B+	
5	Si/SRO ₂₀ /Al	LSRO2A	LSRO2A+	Técnica de LOCOS
		LSRO2B	LSRO2B+	
6	Si/SRO ₃₀ /Al	LSRO3A	LSRO3A+	Técnica de LOCOS
		LSRO3B	LSRO3B+	
7	Si/SiO ₂ /SRO ₂₀ /Al	LOX2A	LOX2A+	Técnica de LOCOS
		LOX2B	LOX2B+	
8	Si/SiO ₂ /SRO ₃₀ /Al	LOX3A	LOX3A+	Técnica de LOCOS
		LOX3B	LOX3B+	
9	Si/SiO ₂ /SRO ₂₀ /Al	1OXSRO	1OXSROI	Convencional
		2OXSRO	2OXSROI	
10	Si/SRO ₂₀ /Al	1SRO	1SROI	Convencional
		2SRO	2SROI	

A.2 Proceso de Fabricación de Guías de Onda Coplanares con grabado iónico reactivo (RIE)

El siguiente proceso de fabricación se empleó para los procesos 1, 2, 3, y 4:

1. Clasificación de muestras de silicio:

- ✓ 4 muestras de alta resistividad $> 4000 \Omega \cdot \text{cm}$. (por proceso)
- ✓ Substrato tipo N
- ✓ Orientación $\langle 100 \rangle$

2. Limpieza general:

- ✓ Tricloroetileno (TCE), 10 minutos.
- ✓ Acetona, 10 minutos.
- ✓ Enjuague en agua desionizada (DI).
- ✓ Eliminación de óxido nativo en HF, 10 segundos.
- ✓ Limpieza RCA I, DI, hidróxido de amonio y peróxido de hidrógeno, 15 minutos (en proporción 7:1:1).
- ✓ Limpieza RCA II, DI, peróxido de hidrógeno y ácido clorhídrico, 15 minutos (en proporción 6:1:1).
- ✓ Enjuague en sistema "Súper Q".
- ✓ Secado en centrífuga.

Nota: El tiempo de RCA's se fijó en función de las últimas pruebas realizadas en laboratorio.

3. Depósito de SiO_2 en CVD:

- ✓ Condiciones de depósito.

$T=450^{\circ}\text{C}$

$\text{O}_2 = 8 \text{ s.s}$

Silano = 10 s.s

$\text{N}_2 = 68 \text{ s.s.}$

$t=20 \text{ minutos}$

Hacer escalón y medir en piloto con alpha-step.

Valor esperado $15,000 \text{ \AA}$

Valor medido piloto (t_{ox})= _____ $\text{\AA}$

4. Fotolitografía para seleccionar ranuras:

- a. Aplicación de fotorresina positiva a 3000 r.p.m. durante 30 segundos.
- b. Pre-cocido a temperatura 85°C durante 15 minutos.
- c. Exposición de mascarillas (campo oscuro) en luz UV durante 20 segundos.
- d. Revelado.
Revelador 26 segundos.
 $\text{H}_2\text{O I}$ 15 segundos.
 $\text{H}_2\text{O II}$ 15 segundos
- e. Secado en flujo laminar.
- f. Verificación en microscopio que las líneas estén bien definidas y se verifican las dimensiones.
- g. Post-cocido a temperatura 110°C durante 15 minutos.

5. Grabado de óxido:

- a. Solución ácida HF 7:1

- b. Enjuague con DI
- c. Secado en centrifuga
- d. Las muestras se colocan en el horno a 110° C durante 10 minutos, para endurecer la fotorresina.
- e. Los pasos anteriores se repiten las veces necesarias hasta remover todo el óxido.

Nota: Se debe grabar el piloto para verificar el tiempo necesario para el grabado de las muestras y la solución ácida se debe mantener a 40° C.

6. Grabado de silicio con RIE/ICP:

- ✓ Presión: 40 mtorr
- ✓ Potencia RIE/ICP= 750/100 W
- ✓ Dc bias= 149 V
- ✓ Flujos= 50/10 sccm de SF₆/O₂
- ✓ Distancia del plasma denso= 10 cm
- ✓ Tiempo: 4 minutos.

Medir el piloto con alpha-step, para medir la profundidad de grabado del silicio

Valor medido piloto (t)= _____ Å

Nota: La velocidad de grabado con estas condiciones es de aproximadamente 3 µm/min.

7. Eliminación de fotorresina:

- a. Inmersión en piraña (ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno en proporción 7:2), durante 10 minutos.
- b. Enjuague en DI.
- c. Secado en centrifuga.

8. Limpieza general (Muestras y pilotos):

- ✓ Tricloroetileno (TCE), 10 minutos.
- ✓ Acetona, 10 minutos.
- ✓ Enjuague en agua desionizada (DI).
- ✓ Eliminación de óxido nativo en HF, 10 segundos.
- ✓ Limpieza RCA I, DI, hidróxido de amonio y peróxido de hidrógeno, 15 minutos (en proporción 7:1:1).
- ✓ Limpieza RCA II, DI, peróxido de hidrógeno y ácido clorhídrico, 15 minutos (en proporción 6:1:1).
- ✓ Enjuague en sistema “Súper Q”.
- ✓ Secado en centrífuga.

Nota: El tiempo de RCA's se fijó en función de las últimas pruebas realizadas en laboratorio.

Para los procesos 1 y 2:

9. Depósito de SRO con Ro=20 en LPCVD:

a. Condiciones de depósito.

T=720° C Diales 970 435 890

Silano (Si_3N_4) = 0.77 torr

Óxido nitroso (N_2O) = 0.77 torr

t=180 minutos.

Nota: la razón de gases reactivos que determinan el exceso de silicio (Ro) se determinó mediante la ecuación 1.

Hacer escalón y medir en piloto con alpha-step.

Valor esperado 5,000 Å

Valor medido piloto (t_{ox})= _____ Å

Para los procesos 3 y 4:

10. Depósito de SRO con Ro=30 en LPCVD:

a. Condiciones de depósito.

T=720° C Diales 970 435 890

Silano (SiN_4) =0.833 torr

Óxido nitroso (N_2O)= 1.250 torr

t=300 minutos.

Nota: la razón de gases reactivos que determinan el exceso de silicio (Ro) se determinó mediante la ecuación 1.

Hacer escalón y medir en piloto con alpha-step.

Valor esperado 5,000 Å

Valor medido piloto (t_{ox})= _____ Å

Para los procesos 2 y 4:

11. Depósito de SiO_2 en CVD (Muestras y piloto 2):

✓ Condiciones de depósito.

T=450° C

O_2 =8 s.s

Silano =10 s.s



$N_2 = 68 \text{ s.s.}$

$t = 30 \text{ minutos}$

Hacer escalón y medir en piloto con alpha-step.

Valor esperado 20,000 Å

Valor medido piloto (t_{ox}) = _____ Å

12. Limpieza general:

- ✓ Limpieza RCA I, DI, hidróxido de amonio y peróxido de hidrógeno, 15 minutos (en proporción 7:1:1).
- ✓ Limpieza RCA II, DI, peróxido de hidrógeno y ácido clorhídrico, 15 minutos (en proporción 6:1:1).
- ✓ Enjuague en sistema "Súper Q".
- ✓ Secado en centrífuga.

Nota: El tiempo de RCA's se fijó en función de las últimas pruebas realizadas en laboratorio.

13. Metalización con Aluminio:

Evaporación de Aluminio en las muestras (espejo), aproximadamente 10,000 Å de grosor.

Hacer medición en piloto P3 con elipsómetro (10 puntos).

Valor esperado 10,000 Å

Valor medido P3 (t_{Al}) = _____ Å

14. Fotolitografía para seleccionar aluminio:



- a. Aplicación de fotorresina positiva a 3000 r.p.m. durante 30 segundos.
- b. Pre-cocido a temperatura 85° C durante 15 minutos.
- c. Exposición de mascarillas en luz UV por 20 segundos.
- d. Revelado:
 - Revelador 30 segundos.
 - H₂O I 15 segundos.
 - H₂O II 15 segundos.
- e. Secado en flujo laminar.
- f. Inspección en microscopio
- g. Post-cocido, durante 15 minutos a 110° C.

15. Grabado del aluminio:

Para realizar el grabado húmedo se utiliza Al-etch compuesta de ácido acético, ácido fosfórico y ácido nítrico ($\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{PO}_3 + \text{HNO}_3$) con las siguientes razones 22:75:3 respectivamente. Esta solución se coloca en baño María a una temperatura de 40° C por un tiempo entre 5–6 minutos.

Nota: Se debe grabar el piloto P3 para verificar el tiempo necesario para el grabado de las muestras.

16. Eliminación de fotorresina:

- a. Eliminación de la fotorresina positiva con acetona, durante 2 minutos.
- b. Limpieza en HNO_3 fumante al 90% durante 10 minutos (no ataca al aluminio)
- c. Enjuague con agua DI y secado en centrífuga

17. Aleación del aluminio:

- ✓ Condiciones para el horno de aleación.

$T = 425^{\circ} \text{C}$.

$N_2 = 60 \text{ s.s.}$

$H_2 = 40 \text{ s.s.}$

$t = 30 \text{ minutos.}$

A.3 Proceso de Fabricación de Guías de Onda Coplanares empleando la técnica de LOCOS

El siguiente proceso de fabricación se empleó para los procesos 5, 6, 7, y 8:

18. Clasificación de muestras de silicio:

- ✓ 4 muestras de alta resistividad $> 4000 \Omega \cdot \text{cm}$ (por proceso).
- ✓ Substrato tipo N
- ✓ Orientación $\langle 100 \rangle$

19. Limpieza general:

- ✓ Tricloroetileno (TCE), 10 minutos.
- ✓ Acetona, 10 minutos.
- ✓ Enjuague en agua desionizada (DI).
- ✓ Eliminación de óxido nativo en HF, 10 segundos.
- ✓ Limpieza RCA I, DI, hidróxido de amonio y peróxido de hidrógeno, 17 minutos (en proporción 7:1:1).
- ✓ Limpieza RCA II, DI, peróxido de hidrógeno y ácido clorhídrico, 17 minutos (en proporción 6:1:1).
- ✓ Enjuague en sistema "Súper Q".

- ✓ Secado en centrífuga.

Nota: El tiempo de RCA's se fijó en función de las últimas pruebas realizadas en laboratorio.

20. Oxidación seca:

- ✓ $T=1100^{\circ}\text{C}$
- ✓ $\text{O}_2=45\text{ s.s.}$
- ✓ $t=10\text{ min.}$

Hacer escalón y medir en piloto con alpha-step.

Valor esperado 500 Å

Valor medido piloto (t_{ox})= _____ Å

21. Depósito de nitruro mediante LPCVD:

- a) Condiciones de depósito:

$T=750^{\circ}\text{C}$

$P_{\text{Si}_3\text{N}_4}=510\text{ mTorr}$

$P_{\text{HN}_3}=2\text{ Torr}$

$P_T=2.4\text{ Torr}$

$P_{\text{vacío}}=57\text{ mTorr}$

$t=90\text{ min.}$

Hacer escalón y medir en piloto con alpha-step.

Valor esperado 5,000 Å

Valor medido piloto (t_{ox})= _____ Å

22. Fotolitografía para seleccionar ranuras:



- a. Aplicación de fotorresina positiva a 3000 r.p.m. durante 30 segundos.
- b. Pre-cocido a temperatura 85° C durante 15 minutos.
- c. Exposición de mascarillas (campo oscuro) en luz UV durante 20 segundos.
- d. Revelado.
 Revelador 26 segundos.
 H₂O I 15 segundos.
 H₂O II 15 segundos
- e. Secado en flujo laminar.
- f. Verificación en microscopio que las líneas estén bien definidas y se verifican las dimensiones.
- g. Post-cocido a temperatura 110° C durante 15 minutos.

23. Grabado de nitruro con plasma (micro rie):

- ✓ Potencia= 150 W
- ✓ Presión= 250 mTorr de CF₄ (Freón)
- ✓ P_b=6 mTorr

24. Grabado de óxido:

- a. Solución ácida HF 7:1
- b. Enjuague con DI
- c. Secado en centrifuga

Nota: la solución ácida se debe mantener a 40° C.

25. Oxidaciones locales de silicio:

Limpieza RCA's I y II



Condiciones de horno de oxidación

T=1100° C Diales 590 713 495

Vapor de agua

t=10 min.

Eliminación de óxido con solución ácida 7:1

Enjuague

Nota: Los pasos anteriores se realizan 28 veces, para consumir aproximadamente 2.9 µm de silicio.

26. Eliminación de nitruro:

- ✓ Ácido fosfórico (H_3PO_4)
- ✓ T= 150° C
- ✓ t= 90 min.

27. Eliminación de óxido:

- ✓ Solución ácida HF 7:1
- ✓ Enjuague con DI
- ✓ Secado en centrifuga

Nota: la solución ácida se debe mantener a 40° C.

28. Limpieza general:

- ✓ Tricloroetileno (TCE), 10 minutos.
- ✓ Acetona, 10 minutos.
- ✓ Enjuague en agua desionizada (DI).
- ✓ Eliminación de óxido nativo en HF, 10 segundos.

- ✓ Limpieza RCA I, DI, hidróxido de amonio y peróxido de hidrógeno, 17 minutos (en proporción 7:1:1).
- ✓ Limpieza RCA II, DI, peróxido de hidrógeno y ácido clorhídrico, 17 minutos (en proporción 6:1:1).
- ✓ Enjuague en sistema "Súper Q".
- ✓ Secado en centrífuga.

Nota: El tiempo de RCA's se fijó en función de las últimas pruebas realizadas en laboratorio.

Procesos 5 y 6:

29. Depósito de SRO con Ro=20 en LPCVD:

a. Condiciones de depósito.

$T=720^{\circ}\text{C}$ Diales 970 435 890

Silano (Si_3N_4) = 0.77 torr

Óxido nitroso (N_2O) = 0.77 torr

$t=180$ minutos.

Nota: la razón de gases reactivos que determinan el exceso de silicio (Ro) se determinó mediante la ecuación 1.

Hacer escalón y medir en piloto con alpha-step.

Valor esperado 5,000 Å

Valor medido piloto (t_{ox}) = _____ Å

Procesos 7 y 8:

30. Depósito de SRO con Ro=30 en LPCVD (Muestras y piloto 3):

a. Condiciones de depósito.

$T=720^{\circ}\text{C}$

Silano (SiN_4) = 0.833 torr

Óxido nitroso (N_2O) = 1.250 torr

$t=300$ minutos.

Nota: la razón de gases reactivos que determinan el exceso de silicio (Ro) se determinó mediante la ecuación 1.

Hacer escalón y medir en piloto con alpha-step.

Valor esperado 5,000 Å

Valor medido piloto (t_{ox}) = _____ Å

Procesos 6 y 8:

31. Depósito de SiO_2 en CVD:

✓ Condiciones de depósito.

$T=450^{\circ}\text{C}$

$\text{O}_2 = 8$ s.s

Silano = 10 s.s

$\text{N}_2 = 68$ s.s.

$t=30$ minutos

Hacer escalón y medir en piloto con alpha-step.

Valor esperado 20,000 Å

Valor medido piloto (t_{ox}) = _____ Å



32. Limpieza general:

- ✓ Limpieza RCA I, DI, hidróxido de amonio y peróxido de hidrógeno, 17 minutos (en proporción 7:1:1).
- ✓ Limpieza RCA II, DI, peróxido de hidrógeno y ácido clorhídrico, 17 minutos (en proporción 6:1:1).
- ✓ Enjuague en sistema "Súper Q".
- ✓ Secado en centrífuga.

Nota: El tiempo de RCA's se fijó en función de las últimas pruebas realizadas en laboratorio.

33. Metalización con Aluminio:

Evaporación de Aluminio en las muestras (espejo), aproximadamente 10,000 Å de grosor.

Hacer medición en piloto con elipsómetro (10 puntos).

Valor esperado 10,000 Å

Valor medido (t_{Al})= _____ Å

34. Fotolitografía para seleccionar aluminio:

- a. Aplicación de fotorresina positiva a 3000 r.p.m. durante 30 segundos.
- b. Pre-cocido a temperatura 85° C durante 15 minutos.
- c. Exposición de mascarillas en luz UV por 20 segundos.
- d. Revelado:
 - a. Revelador 30 segundos.
 - b. H₂O I 15 segundos.

- c. H_2O II 15 segundos.
- e. Secado en flujo laminar.
- f. Inspección en microscopio
- g. Post-cocido, durante 15 minutos a 110°C .

35. Grabado del aluminio:

Se debe grabar el piloto para verificar el tiempo necesario para el grabado de las muestras.

Para realizar el grabado húmedo se utiliza Al-etch compuesta de ácido acético, ácido fosfórico y ácido nítrico ($\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{PO}_3 + \text{HNO}_3$) con las siguientes razones 22:75:3 respectivamente. Esta solución se coloca en baño María a una temperatura de 40°C por un tiempo entre 5–6 minutos.

36. Eliminación de fotorresina:

- a. Eliminación de la fotorresina positiva con acetona, durante 2 minutos.
- b. Limpieza en HNO_3 fumante al 90% durante 10 minutos (no ataca al aluminio)
- c. Enjuague con agua DI y secado en centrífuga

37. Aleación del aluminio:

- ✓ Condiciones para el horno de aleación.

$T = 425^\circ \text{C}$.

$N_2 = 60 \text{ s.s.}$

$\text{H}_2 = 40 \text{ s.s.}$

$t = 30 \text{ minutos.}$

A.4 Procesos de Fabricación de Guías de Onda Coplanares convencionales

El siguiente proceso de fabricación se empleó para los procesos 9 y 10:

1. Clasificación de muestras de silicio:

- ✓ 4 muestras de alta resistividad $> 4000 \Omega \cdot \text{cm}$ (por proceso).
- ✓ Substrato tipo N
- ✓ Orientación $\langle 100 \rangle$

2. Limpieza general:

- ✓ Tricloroetileno (TCE), 10 minutos.
- ✓ Acetona, 10 minutos.
- ✓ Enjuague en agua desionizada (DI).
- ✓ Eliminación de óxido nativo en HF, 10 segundos.
- ✓ Limpieza RCA I, DI, hidróxido de amonio y peróxido de hidrógeno, 17 minutos (en proporción 7:1:1).
- ✓ Limpieza RCA II, DI, peróxido de hidrógeno y ácido clorhídrico, 17 minutos (en proporción 6:1:1).
- ✓ Enjuague en sistema "Súper Q".
- ✓ Secado en centrífuga.

Nota: El tiempo de RCA's se fijó en función de las últimas pruebas realizadas en laboratorio.

Para proceso 10:

3. Depósito de SiO_2 en CVD:

a. Condiciones de depósito.

$T=450^\circ \text{C}$

$\text{O}_2 = 8 \text{ s.s}$

Silano = 7.5 s.s

$\text{N}_2 = 68 \text{ s.s.}$

$t=45 \text{ minutos}$

Hacer escalón y medir en piloto con alpha-step.

Valor esperado 20,000 Å

Valor medido piloto (t_{ox})= _____

Para procesos 9 y 10:

4. Depósito de SRO con $R_o=20$ en LPCVD:

a. Condiciones de depósito.

$T=700^\circ \text{C}$

Silano (Si_3N_4) = 1.070 torr

Óxido nitroso (N_2O) = 1.070 torr

$t=125 \text{ minutos.}$

Nota: la razón de gases reactivos que determinan el exceso de silicio (R_o) se determinó mediante la ecuación 1.

Hacer escalón y medir en piloto con alpha-step.

Valor esperado 5,000 Å

Valor medido piloto (t_{ox})= _____

5. Fotolitografía para seleccionar ranuras:

- a. Aplicación de fotorresina negativa a 5000-7000 r.p.m. durante 22 segundos.
- b. Precocido a temperatura 85-90° C durante 15 minutos.
- c. Exposición de mascarillas (campo oscuro) en luz UV durante 1.5 segundos.
- d. Revelado.
 - Rociado con Xileno durante 1 minuto.
 - Aplicar 2 Propanol durante 15 segundos.
 - Secado en flujo laminar.
- e. Verificación en microscopio que las líneas estén bien definidas y se verifican las dimensiones.
- f. Post-cocido a temperatura 130-140° C durante 25 minutos.

6. Grabado de óxido:

Se debe grabar piloto para verificar el tiempo necesario para el grabado de las muestras, y el número de veces que se tiene que repetir el proceso.

- a. Solución ácida HF 7:1
- b. Enjuague con DI
- c. Secado en centrifuga
- d. Las muestras se colocan en el horno a 140° C durante 10 minutos, para endurecer la fotorresina.
- e. Los pasos anteriores se repiten las veces necesarias hasta remover todo el óxido.

Nota: la solución ácida debe mantener a 40° C.

7. Eliminación de fotorresina:

- a. Inmersión en piraña (ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno en proporción 7:2), durante 10 minutos.
- b. Enjuague en DI.
- c. Secado en centrifuga.

8. Metalización con Aluminio:

Evaporación de Aluminio en las muestras (espejo), aproximadamente 10,000 Å de grosor.

Hacer escalón y medir en piloto con alpha-step.

Valor esperado 10,000 Å

Valor medido (t_{Al})= _____

9. Fotolitografía para seleccionar aluminio:

- a. Aplicación de fotorresina positiva a 2000 r.p.m. durante 20 segundos.
- b. Precocido a temperatura 85-90° C durante 17 minutos.
- c. Exposición de mascarillas en luz UV de 6 a 7 segundos.
- d. Secado en flujo laminar.
- e. Inspección en microscopio
- f. Post-cocido, durante 25 minutos a 100-110° C.

10. Grabado del aluminio:

Se debe grabar el piloto para verificar el tiempo necesario para el grabado de las muestras.

Para realizar el grabado húmedo se utiliza Al-etch compuesta de ácido acético, ácido fosfórico y ácido nítrico ($\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{PO}_3 + \text{HNO}_3$) con las siguientes razones 22:75:3 respectivamente. Esta solución se coloca en baño María a una temperatura de 40° C por un tiempo entre 5–6 minutos.

11. Eliminación de fotorresina:

- a. Eliminación de la fotorresina positiva con acetona, durante 2 minutos.
- b. Limpieza en HNO_3 fumante al 90% durante 10 minutos (no ataca al aluminio)
- c. Enjuague con agua DI y secado en centrífuga

12. Aleación del aluminio:

- a. Condiciones para el horno de aleación.

$T = 425^\circ \text{C}$.

$N_2 = 60 \text{ s.s.}$

$H_2 = 40 \text{ s.s.}$

$T = 30 \text{ minutos.}$

Apéndice B

Parámetros S, T y ABCD

B.1 Parámetros de Dispersión [S]

El término de “dispersión” viene de la semejanza del comportamiento de la luz en el campo de energía óptica y de microondas. Estos parámetros son aquéllos datos mediante los cuales una red puede ser caracterizada en altas frecuencias midiendo la reflexión y transmisión de una onda electromagnética (OEM) en cada uno de los puertos, como se muestra en la figura 72 (Bahl and Bhartia, 1988), usando cualquier terminación conveniente (circuito abierto o corto circuito). La característica más importante es la facilidad y exactitud de estos parámetros para mediciones en frecuencia de microondas y la interpretación física directa de los coeficientes.

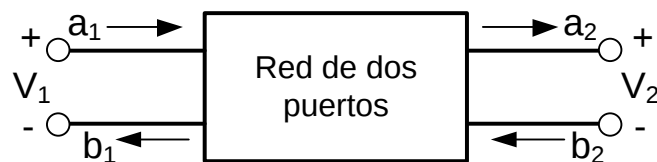


Figura 72. Red de dos puertos.

En la figura B.1 **a** y **b** corresponden a la onda incidente y reflejada de los puertos 1 y 2, respectivamente. Para representar la onda en cada puerto (potencia) se hace una relación de corrientes y voltajes de una red de dos puertos obteniendo:

$$a_1 = \frac{1}{2\sqrt{Z_o}}(v_1 + Z_o i_1) \quad \text{B.1}$$

$$a_2 = \frac{1}{2\sqrt{Z_o}}(v_2 + Z_o i_2) \quad \text{B.2}$$

$$b_1 = \frac{1}{2\sqrt{Z_o}}(v_1 - Z_o i_1) \quad \text{B.3}$$

$$b_2 = \frac{1}{2\sqrt{Z_o}}(v_2 - Z_o i_2) \quad \text{B.4}$$

Por lo que los parámetros S son definidos por:

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad \text{B.5}$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad \text{B.6}$$

En notación matricial:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad \text{B.7}$$

Evaluando los parámetros S de la matriz (B.7), se tiene:

$$S_{11} = \left(\frac{b_1}{a_1} \right) \Big|_{a_2=0} \quad \text{B.8}$$

$$S_{12} = \left(\frac{b_1}{a_2} \right) \Big|_{a_1=0} \quad \text{B.9}$$

$$S_{21} = \left(\frac{b_2}{a_1} \right) \Big|_{a_2=0} \quad \text{B.10}$$

$$S_{22} = \left(\frac{b_2}{a_2} \right) \Big|_{a_1=0} \quad \text{B.11}$$

Donde: S_{11} y S_{21} son los coeficientes complejos de reflexión y transmisión, respectivamente. Mientras que, S_{22} y S_{12} son los equivalentes a los coeficientes de reflexión de salida y transmisión inverso.

B.2 Parámetros de Transmisión [T]

Esta matriz de parámetros de transmisión es obtenida cambiando las relaciones de la dispersión (ecuación B.7) de modo que las ondas a_1 y b_1 sean las variables dependientes y las ondas a_2 y b_2 sean las variables independientes (Helszajn, 1992).

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad \text{B.12}$$

En función de las ondas incidentes y reflejadas se tiene:

$$T_{11} = \left(\frac{b_1}{a_2} \right) \Big|_{b_2=0} \quad \text{B.13}$$

$$T_{12} = \left(\frac{b_1}{b_2} \right) \Big|_{a_2=0} \quad \text{B.14}$$

$$T_{21} = \left(\frac{a_1}{a_2} \right) \Big|_{b_2=0} \quad \text{B.15}$$

$$T_{22} = \left(\frac{a_1}{b_2} \right) \Big|_{a_2=0} \quad \text{B.16}$$

B.3 Parámetros ABCD

También conocidos como parámetros en cadena, pueden ser vistos como el inverso de los parámetros de transmisión, en los parámetros ABCD las variables dependientes son el voltaje y la corriente del puerto 1, mientras que las independientes son las correspondientes a el puerto 2, por lo tanto se definen por la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad \text{B.17}$$

En función de voltajes y corrientes se tiene:

$$A = \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \bigg|_{i_2=0} \quad \text{B.18}$$

$$B = \left(\frac{v}{i_2} \right) \bigg|_{v_2=0} \quad \text{B.19}$$

$$C = \left(\frac{i_1}{v_2} \right) \bigg|_{i_2=0} \quad \text{B.20}$$

$$D = \left(\frac{i_1}{i_2} \right) \bigg|_{v_2=0} \quad \text{B.21}$$

B.4 Conversión de parámetros

Aunque los parámetros S son la representación más adecuada para redes de microondas es necesario convertirlos a otro grupo de parámetros debido al empleo del método de dos líneas y la solución de la constante de propagación.

B.4.1 Conversión de parámetros S a T

Esta conversión se realiza debido al método empleado para la caracterización de las líneas de transmisión, así como a la solución de la constante de propagación (Medley, 1993). Los parámetros T son expresados por (Helszajn, 1992):

$$T_{11} = S_{21} - \frac{S_{11}S_{22}}{S_{21}} \quad \text{B.22}$$

$$T_{12} = \frac{S_{11}}{S_{21}} \quad \text{B.23}$$

$$T_{21} = -\frac{S_{22}}{S_{21}} \quad \text{B.24}$$

$$T_{22} = \frac{1}{S_{21}} \quad \text{B.25}$$

B.4.2 Conversión de parámetros S a ABCD

Esta conversión se realiza para determinar la impedancia característica (Chang, 1994; Spickermann and Dagli, 1994; Kiziloglu et. al., 1991). Los parámetros ABCD son expresados por:

$$A = \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad \text{B.26}$$

$$B = \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad \text{B.27}$$

$$C = \frac{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad \text{B.28}$$

$$A = \frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \quad \text{B.29}$$