UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INTERFAZ COMPLETA VÍA FIBRA ÓPTICA BASADA EN TECNOLOGÍA MOEMS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

ING. EN TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A:
SILVIA AURORA PÉREZ CORZAS

ASESOR:
DR. VLADIMIR SVIRID

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO 2005

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

VNIVERSIDAD NACIONAL AVTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
COORDINACIÓN DE SEMINARIOS
Y SERVICIO SOCIAL

NOTIFICACIÓN DE JURADO PARA EXAMEN PROFESIONAL

TESIS JURADO		BORRADOR DE TESIS RECIBIDO FIRMA	FECHA	BORRADOR DE AUTORIZADO FIRMA	FECHA
PRESIDENTE:	M.I. JUAN FERNANDO SOLÓRZANO PALOMARES		22/abril/05		28/abril/05
VOCAL:	DR. VOLODYMYR SVYRYD		25/04/05		
SECRETARIO:	ING. GABRIEL ALEJANDRO JARAMILLO MORALES		25/IV/05		3/V/05
1ER. SPTE.:	DR. JORGE RODRÍGUEZ CUEVAS		25/Abr/05		3/May/05
2DO. SPTE.:	DR. JOSÉ ISMAEL MARTÍNEZ LÓPEZ		25/04/05		3/mayo/05

TESIS: 042/181 **"INTERFAZ COMPLETA VÌA FIBRA ÓPTICA BASADA EN TECNOLOGÌA MOEMS"**

FECHA Y HORA DE EXAMEN:
RESPETABLE PROFESOR(A):

Por este conducto, me es grato notificarle que ha sido designado(a) miembro del jurado para el examen profesional del alumno(a) **PÉREZ CORZAS SILVIA AURORA** número de cuenta **9710224-9** de la carrera **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** solicito de la manera más atenta revise el trabajo de tesis con el fin de que Ud. haga saber por escrito a esta Coordinación en formato adjunto, si considera necesario que el alumno realice modificaciones al mismo en un plazo de 5 (cinco) días hábiles contados a partir de la fecha en que Ud. reciba esta notificación. De no haber observación alguna de su parte, le agradeceré firmar la presente autorizando el trabajo, con lo cual el alumno podrá imprimir definitivamente su tesis.

Atentamente.
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F. a 17 de Marzo de 2005.

EL COORDINADOR DE SEMINARIOS Y SERVICIO SOCIAL

ING. JOSÉ ARTURO ORIGEL COUTIÑO

A mis padres

CONTENIDO

Introducción

Definición del problema *1*

Objetivos *2*

Metodología *2*

Resultados esperados *3*

Temario general *3*

Capítulo 1

1. Estudio de los procesos de fabricación utilizados en la tecnología MOEMS

1.1. Estado del arte: MEMS y MOEMS *5*

1.2. Ventajas que presenta la utilización de los MEMS/MOEMS *6*

1.3. Impacto social de la tecnología *7*

1.4. Aplicaciones y mercado *8*

1.5. Pasos a seguir para la fabricación de MEMS *10*

1.6. Principales tecnologías utilizadas para la fabricación de MEMS *13*

1.7. Principales materiales utilizados para fabricar MEMS *16*

Capítulo 2

2. Estudio de los programas Intellisuite y Coventor

2.1. Intellisuite *25*

2.2. Coventor *30*

2.3. Comparación entre Coventor e Intellisuite *36*

Capítulo 3

3. Análisis a nivel sistema

3.1. Estado del arte: interfaces completas vía fibra óptica *39*

3.2. Descripción general del sistema *41*

3.3. Diagrama de bloques del sistema *41*

3.4. Requerimientos técnicos de la interfaz *42*

3.5. Requerimientos de potencia *43*

3.6. Dispositivo MOEMS *49*

3.7. Fuente óptica: Conversión E/O *57*

3.8. Fotodetectores: Conversión O/E *61*

3.9. Alimentación de la unidad remota *63*
3.10. Tipo de fibra óptica *70*
3.11. Análisis del tipo de configuración *72*
3.12. Tipo de señal, modulación y codificación *78*
3.13. Interfaz óptica completa comercial *79*

Capítulo 4

4. Análisis a nivel dispositivo
4.1. Dispositivos de estudio *83*
4.2. Prototipos para modulador MOEMS *83*
4.3. Selección de prototipo de modulador *94*
4.4. Selección del tipo de actuador para el MOEMS *94*
4.5. Análisis del fotoconvertidor *100*
4.6. Configuración utilizada *105*
4.7. Fabricación de la unidad remota *107*
4.8. Integración *108*
4.9. Empaquetamiento *110*
4.10. Pérdidas dirección “de ida” *116*
4.11. Pérdidas dirección “de regreso” *119*
4.12. Ejemplo de cálculo de pérdidas de potencia en un enlace *121*
4.13. Dispersión del pulso y ancho de banda *123*

Capítulo 5

5. Diseño y simulación del modulador MOEMS
5.1. Funcionamiento de un actuador electrostático tipo “comb-drive” *127*
5.2. Tipo de vigas de suspensión *129*
5.3. Dimensiones físicas del actuador *132*
5.4. Modelo Matemático del MOEMS
5.4.1. Cálculo de los parámetros eléctricos del actuador *134*
5.4.2. Cálculo de los parámetros mecánicos del actuador *138*
5.4.3. Cálculo de los parámetros ópticos del actuador *143*
5.5. Simulación por computadora *147*
5.6. Señales de alimentación del “comb-drive” *159*

5.6.1. Excitación en régimen de resonancia *159*

5.6.2. Excitación en régimen de modulación por pulsos *160*

Conclusiones generales *163*

Apéndice

I. Procesos de fabricación *167*

II. Glosario de términos *193*

Referencias bibliográficas *197*

INTRODUCCIÓN

Este trabajo delimita su campo de estudio al diseño de una interfaz completa vía fibra óptica entre la unidad central (UC) y unidades remotas (UR) de una red sensorial o de comunicación, capaz de alimentar ópticamente las unidades remotas, que además incluya los beneficios potenciales de la tecnología MEMS. Cabe mencionar que ésta es un área de investigación relativamente nueva en nuestro país y totalmente innovadora en nuestra Máxima Casa de Estudios, por lo que se espera que la investigación en esta área siga un curso fructífero, lo cual abra nuevas puertas en el desarrollo tecnológico de punta en la UNAM, como hasta ahora se ha hecho, y por ende traiga beneficios al país.

Definición del problema

Las tecnologías de sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés) y sistemas micro-opto-electro-mecánicos (MOEMS) se basan en los mismos métodos y procesos de microlitografía que las tecnologías de fabricación de circuitos integrados electrónicos y ópticos. La idea principal es incluir en el mismo proceso de fabricación las partes mecánicas, lo que permite obtener nuevas características importantes de los dispositivos fabricados por medio de estas tecnologías de circuitos integrados, productivas y ya bien desarrolladas [1,2]. Las tecnologías MEMS y MOEMS han crecido rápidamente en las últimas dos o tres décadas y ya tienen aplicaciones exitosas en las áreas de electrónica, mecánica, telecomunicaciones, informática, automotriz, petroquímica, farmacéutica, entre otras, en varios sectores de la industria y la vida cotidiana. Entre los ejemplos de aplicación más famosos se encuentran en los teléfonos celulares, los sistemas de las bolsas de aire contra choques de los automóviles, proyectores y computadoras portátiles.

Un ejemplo en la industria, la compañía mundialmente reconocida de circuitos integrados de semiconductor Intel, se está preparando para una rápida innovación en procesadores en las próximas décadas esperando que su influencia se extenderá más allá de los dispositivos digitales alcanzando nuevas áreas de MEMS y MOEMS como las tecnologías de las comunicaciones inalámbricas, ópticas y de sensores [3].

En el mercado de MEMS, con un crecimiento anual de 35 por ciento, México podría ser competitivo con la unión adecuada de científicos, empresarios y Gobierno, para la creación de empresas de base tecnológica en este campo. México tiene un gran potencial como uno de los lugares donde se pueden diseñar y empaquetar nuevos microsistemas en diversas ramas industriales. Para emprender este tipo de iniciativas, el Gobierno Mexicano, a través de la Secretaría de Economía, ha iniciado un programa con 4.3 millones de pesos para impulsar la instalación de las primeras plantas de diseño de MEMS [4].

La UNAM está participando en el programa del desarrollo en el área de microtecnologías del País. El grupo UNAMEMS está formando junto con otros grupos de investigación una red nacional de alto impacto en el área de microsistemas. En las instalaciones de la División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería ya empezó a funcionar un laboratorio equipado con las computadoras modernas y el software especializado para el diseño de MEMS.

Una de las aplicaciones importantes de los dispositivos hechos con la tecnología MEMS y MOEMS son las redes sensoriales y de telecomunicación [5]-[8]. Estas redes se forman de muchas unidades remotas (de sensor o actuador) y una unidad central (de control). Para el funcionamiento prolongado de las unidades remotas sin un servicio adicional, es importante realizar una interfaz completa que además de la transmisión de señales de control y datos, permita alimentar la unidad remota por el mismo medio.

La interfaz completa vía fibra óptica realiza el aislamiento eléctrico total entre las unidades, y la inmunidad del enlace a las interferencias electromagnéticas. El uso de los componentes diseñados en tecnología MOEMS, permite implementar varios tipos de los sensores o actuadores incluyendo los mecánicos, electrónicos, ópticos o híbridos; miniaturizar significativamente los dispositivos de las interfaces y bajar el precio total del sistema.

Objetivos

Análisis y diseño de una interfaz completa vía fibra óptica que utiliza el mismo canal de fibra óptica para la transmisión simultánea de las señales de datos y control entre la unidad remota y central, y la alimentación de circuitos electrónicos de la unidad remota, así como sensores y/o actuadores.

Además tratar de integrar en un solo chip de silicio la unidad remota de la interfaz óptica completa, dependiendo de las posibilidades, ventajas, y limitaciones de la tecnología MOEMS.

Metodología

La metodología para cumplir el objetivo de esta tesis debe incluir los siguientes elementos:

- Búsqueda bibliográfica sobre los avances técnicos y científicos en la tecnología de MOEMS para las interfaces vía fibra óptica, procesos modernos de fabricación y técnicas de diseño.
- Análisis de los requerimientos técnicos del sistema de interfaz completa vía fibra óptica.

- Identificación de los problemas particulares relacionados con cada subsistema. Determinación de limitaciones físicas de las características técnicas, así como limitaciones tecnológicas de las interfaces basadas en tecnología MOEMS.
- Diseño y optimación de una interfaz típica vía fibra óptica a nivel de sistema y a nivel de dispositivo.
- Estudio y análisis comparativo del software existente para el diseño de los componentes principales de los microsistemas.
- Simulación de cómputo de un dispositivo MOEMS principal por medio de un software especializado.

Resultados esperados

- Que la tesista tenga la capacidad de aplicar sus conocimientos para el diseño de sistemas de comunicaciones e instrumentación basados en tecnología MOEMS con el fin de ser utilizados en el ámbito científico, tecnológico y comercial.
- Que la tesista tenga un buen manejo del software especializado para el desarrollo de la nueva tecnología MOEMS dentro del ámbito universitario.
- Diseño de una interfaz completa vía fibra óptica, con el fin de su implementación a las redes sensoriales y de comunicación.
- Simulación de un componente principal de la interfaz mediante el software especializado en tecnología MEMS.

Temario general

1) Análisis de la situación actual y clasificación de la información obtenida sobre las tecnologías MEMS y MOEMS, especialmente sus procesos de fabricación, características, capacidades y limitaciones.
2) Estudio de los programas de software especializado Intellisuite y Coventor.
3) Diseño de la interfaz a nivel de sistema. Análisis de las configuraciones posibles del sistema.
4) Diseño de los subsistemas a nivel de dispositivo. Determinación de los componentes realizables en tecnología MOEMS.
5) Diseño y simulación de los componentes específicos de la interfaz por medio del software especializado.
6) Análisis de los resultados obtenidos desde punto de vista de realización en tecnología MEMS.

CAPÍTULO 1

1. Estudio de procesos de fabricación de la tecnología MEMS

Es importante tener bases teóricas de la fabricación de los microsistemas para conocer de manera general sus limitaciones. A continuación se realiza un breve estudio de los MEMS, los pasos básicos a seguir para su fabricación, y el conocimiento de las características de los materiales que se utilizan para este fin.

1.1 Estado del arte: MEMS y MOEMS

Los sistemas micro-electro-mecánicos (por sus siglas en inglés, MEMS[1]) son dispositivos que tienen longitudes características mayores a 1 μm pero menores a 1 mm que combinan componentes eléctricos y mecánicos; son fabricados utilizando tecnologías bien establecidas de circuitos integrados [2]. Los MOEMS (o MEMS ópticos) tienen además componentes ópticos. Los componentes mecánicos de los MEMS les permiten la movilidad de sus partes, he aquí una de las principales características que los diferencian de los circuitos integrados y una de las mayores potencialidades que tienen, ya que esto les ha permitido incursionar últimamente en el área de los BIOMEMS, con numerosas e interesantes aplicaciones en medicina.

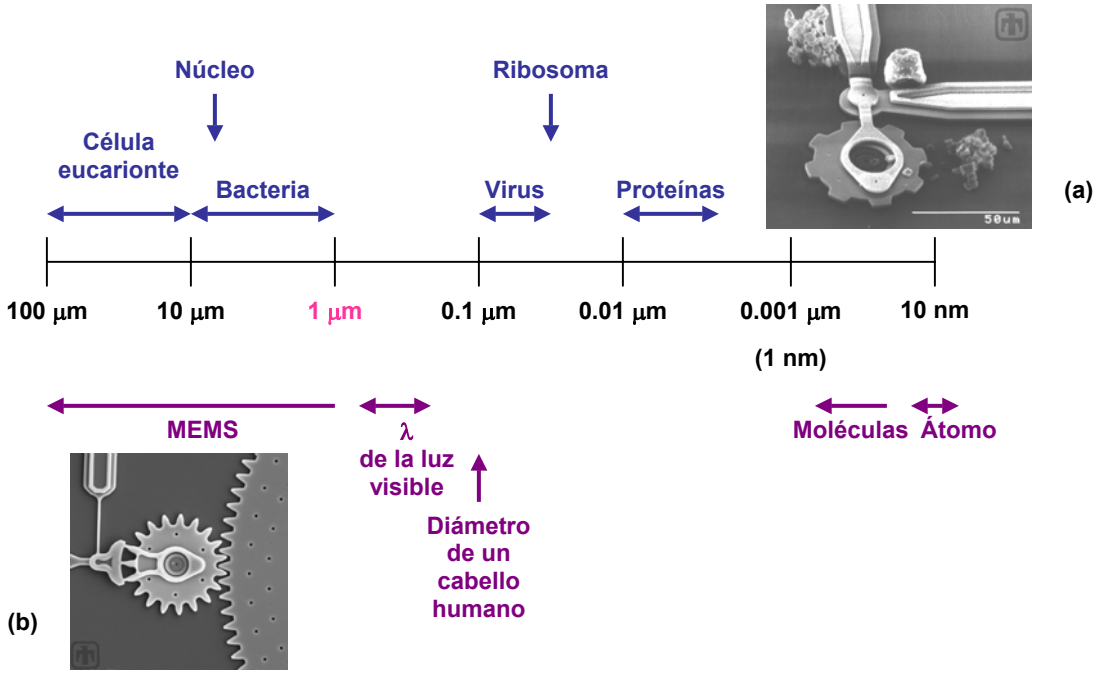


Fig. 1.1 Escala de distintos elementos en μm [2], [9]. (a) Muestra una imagen con un engrane fabricado con tecnología MEMS junto a una espora y a varias células rojas de la sangre. (b) Imagen de un microengrane. [9]

[1] En Europa, son conocidos como MST, *MicroSystems Technology*.

El propósito esencial de muchos MEMS/MOEMS, es la conversión de un tipo de energía a otro, proceso conocido como transducción de energía [1]. En este contexto, un transductor es un dispositivo que es impulsado a actuar por una forma de energía y suple esa energía en otra forma. En la Fig. 1.1 se muestra una línea que representa escalas de longitud en micrómetros y se realiza la comparación de los MEMS con algunas entidades biológicas, ya que éstas son las más cercanas en tamaño [9].

Desde cierto punto de vista, se puede entender a los MOEMS como la integración de dos tecnologías principalmente, la tecnología de la fotónica y la de los circuitos integrados (ver Fig.1.2, Fig.1.3).

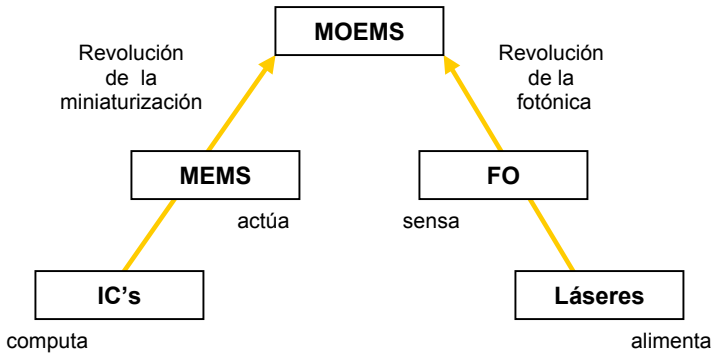


Fig.1.2 Los MOEMS integran dos tecnologías. En el diagrama se muestran las principales funciones de los elementos más representativos de cada tecnología que intervienen en el estudio de esta tesis.

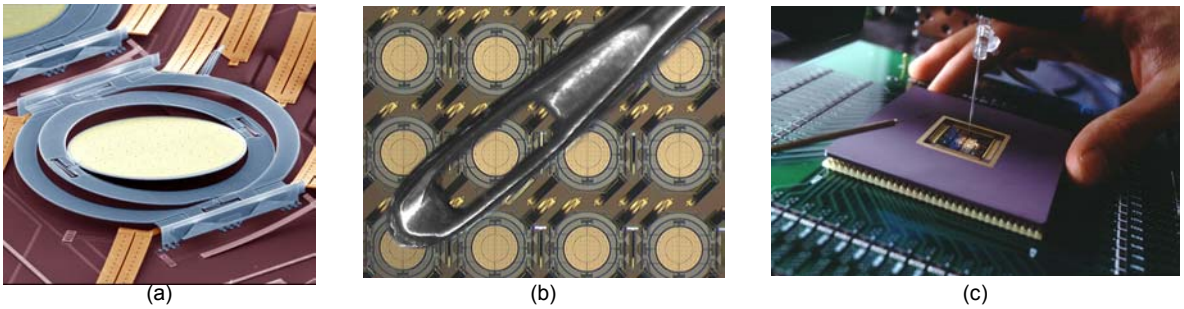


Fig.1.3 Ejemplo de MOEMS. (a) Uno de los microespejos que integran al ruteador Lambda de Lucent Technologies. (b) Un grupo de estos microespejos, cada uno cabe en el ojal de una aguja. (c) El ruteador Lamdba.

1.2 Ventajas que presenta la utilización de los MEMS/MOEMS

Los MEMS/MOEMS no son la mejor opción para todas las aplicaciones. A continuación se muestra una lista útil de las ventajas de estos microsistemas que además nos indica cuando es más conveniente utilizarlos [9].

- Reducción significativa del volumen, peso y consumo de energía.
- Reducción significativa del costo, únicamente cuando son producidos en masa.
- Exactitud y precisión en mediciones de instrumentación.
- Pueden llevar a cabo distintas funciones que no son posibles con macrosistemas. Esto se debe a que la física que dicta el comportamiento de los microdispositivos es diferente [2].

1.3 Impacto social de la tecnología MEMS

Como todas las tecnologías recientes, la aplicación de los MEMS en ciertos ámbitos sigue siendo criticada, pero a pesar de ello ya son utilizados en nuestros días. Así pues, el ser humano tiene tendencia de dudar y tener miedo a las nuevas corrientes ideológicas, los MEMS no son la excepción y como otros sistemas antes inventados tienen que ser aceptados y asimilados por la sociedad aunque esto tarde algo de tiempo (ver Fig.1.4).

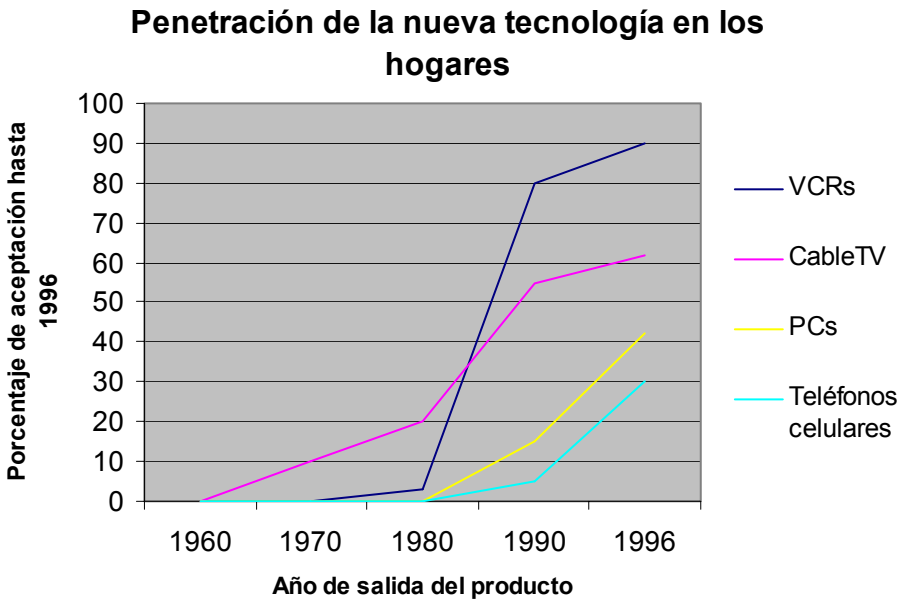


Fig.1.4 Gráfica que muestra la aceptación de la tecnología MEMS en algunos sistemas electrónicos, como puede apreciarse hasta 1996, la tendencia va en aumento.

1.4 Aplicaciones y mercados.

Los MEMS/MOEMS los encontramos en el hogar, la industria, la milicia, etc., en aplicaciones tan diversas como: teléfonos celulares, sistemas de bolsas de aire contrachoques, proyectores, impresoras, sensores (de: presión, desplazamiento, sustancias químicas y biológicas, etc.) y sistemas masivos de almacenamiento de información, entre otros (ver Tabla 1.2) [1], [10]. Las expectativas en el mercado son muy buenas y se pronostica un mercado en millones de dólares en el 2004 (ver Tabla 1.1) [10].

Tabla 1.1 Análisis y pronóstico del mercado de los MEMS en los EU. (Millones de Dólares) [10]

AÑO	Automotriz	Medicina	Tecnología de la Información	Militares y aeroespaciales	Total
1994	255.7	129.5	438.3	49.1	872.5
1995	298.0	146.1	459.0	54.8	957.9
1996	355.0	164.4	492.8	62.2	1,074
1997	419.0	187.0	527.0	71.6	1,204
1998	491.5	216.7	575.3	79.6	1,363
1999	562.0	245.7	645.9	95.8	1,549
2000	645.7	291.3	733.3	110.7	1,781
2001	758.5	354.8	836.0	133.3	2,082
2002	879.6	444.7	995.1	156.9	2,476
2003	1,019	562.9	1,222	176.7	2,980
2004	1,172	716.0	1,514	202.7	3,604
CAGR[2]	16%	21%	16%	16%	17%

[2] CAGR, *Compound Annual Growth Rate*

Tabla 1.2 Ejemplos de aplicaciones presentes y futuras para los MEMS/MOEMS [10].

Aplicaciones Comerciales	**Aplicaciones Militares**
Biomedicina ▪ Sensores biomédicos invasivos y no invasivos ▪ Sensores de monitoreo de la salud ▪ Sensores de análisis bioquímico ▪ Sistemas de gestión cardiacos (marcapasos, catéteres) ▪ Sistemas de gestión de medicamentos (Ej. insulina, analgésicos) ▪ Sistemas neuro-estimuladores (en desórdenes neurológicos) *Industria Automotriz* ▪ Sistemas automotores de seguridad, frenado y suspensión (sensores de accionamiento de bolsas de aire). *Telecomunicaciones* ▪ Componentes para la comunicación vía fibra óptica ▪ Sistemas de comunicación inalámbrica ▪ Conmutadores ▪ Sistemas para el procesamiento electromecánico de señales ▪ Sistemas de almacenamiento masivo de datos	▪ Sistemas inerciales (para guiar municiones y navegación personal) ▪ Sensores de monitoreo y rastreo ▪ Componentes optomecánicos de identificación “amigo-o-enemigo” ▪ Sistemas fluídicos de control de combustión. ▪ Sistemas de detección de armamento bioquímico ▪ Sistemas de control aerodinámico para la navegación aérea

La inversión inicial es parte importante del avance de esta tecnología ya que el costo de los aparatos y laboratorios requeridos para la fabricación de los MEMS es elevado. Además mientras no se masifique la producción será caro invertir en MEMS, como suele suceder con las nuevas tecnologías. En este aspecto México tiene una gran posibilidad para el diseño y empaquetamiento de los MEMS. Así podrían producirse en otras partes del mundo, mientras no se cuenta con las fábricas especializadas para ello.

En cuanto a aplicaciones futuras, los MOEMS se están abriendo paso en aplicaciones espaciales. Se espera que la inclusión de sensores en los automóviles vaya en aumento, así Japón está desarrollando un vehículo de seguridad avanzada. La medicina tiene entre sus aplicaciones sistemas de implantes, como pueden ser marcapasos, sensores de monitoreo de la salud, *chips-on-lab*, etc [1].

1.5 Pasos a seguir para la fabricación de MEMS

Los pasos básicos en la fabricación de componentes de Si y componentes en tecnología MEMS son:

1) Deposición (*deposition*).
2) Trazado de patrones (*patterning*).
3) Grabado (*etching*).

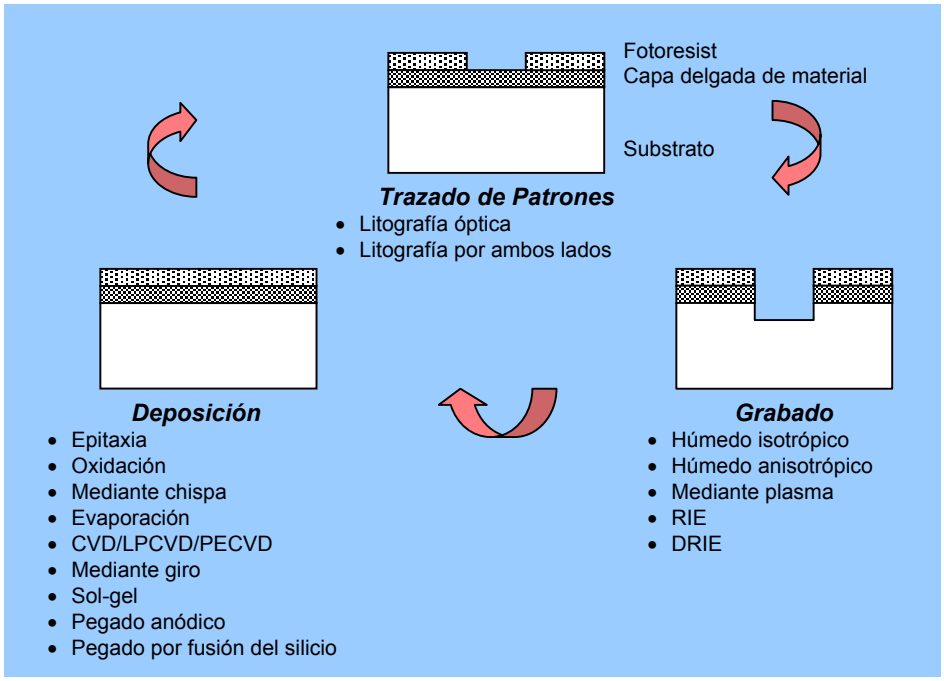


Fig. 1.5 Pasos básicos a seguir en la microfabricación, comienza con la deposición, termina con el grabado, este proceso puede ser cíclico

PRIMER PASO: DEPOSICIÓN

La deposición, es un proceso en el cual una capa delgada de un material cristalino es depositada sobre otra capa de material cristalino (sustrato). Se le conoce como pegado o *bonding*, cuando la capa de material depositado ya está prefabricado y sólo se procede a la unión de éste con el sustrato.

Los métodos más comunes de deposición de materiales son:

- Deposición física de vapor (PVD)
- Oxidación

- Epitaxia
- Deposición mediante giro (*spin-on*)
- Pegado (*bonding*)
- Además existen procesos avanzados como son: el pegado anódico (*Anodic Bonding*), el pegado por fusión del Silicio (*Silicon-fusion bonding*), entre otros, así como la combinación de algunos de ellos.

SEGUNDO PASO: TRAZADO DE PATRONES

El trazado de patrones, en inglés *patterning* o *pattern transfer*, es el proceso posterior a la deposición de el (los) material(es) que se desea(n) forme(n) la microestructura. Para el trazado de los patrones deseados sobre la superficie de la oblea, se requiere una capa de resist que es un material fotosensible a la radiación. El patrón deseado se obtendrá mediante una máscara (que puede utilizarse varias veces) y algún tipo de radiación sobre ella, que dejará impreso el patrón en el resist.

Este proceso se realiza mediante técnicas litográficas, la más conocida y utilizada es LIGA (*Lithographie, Galvanoformung and Abformung*).

TERCER PASO: GRABADO

EL grabado (*etching*) es el proceso de remoción o extracción selectiva del material del sustrato. Los métodos básicos para el grabado de sustratos o de descomposición del material no deseado se dividen en:

- Grabado húmedo, el material no deseado se disuelve mediante líquidos.
- Grabado en seco, el material es grabado en su estado gaseoso.

Por el tipo de corte obtenido en el material grabado se divide en:

- Grabado isotrópico, se remueve el material uniformemente en todas direcciones.
- Grabado anisotrópico, con una dirección preferente sobre las demás, especiales para realizar cavidades y surcos bien delimitados y definidos, las cuales pueden no ser perpendiculares a la oblea de silicio.

Si el método empleado atiende a las propiedades físicas o químicas del material que se desea grabar:

- Grabado químico que se obtiene mediante la descomposición química del sustrato (grabado mediante plasma).

- Grabado físico (grabado mediante bombardeo de electrones).

El tipo de grabado más utilizado en el procesamiento de los semiconductores es el isotrópico húmedo, además, se utiliza en la fabricación de dispositivos discretos y circuitos integrados (ICs) de dimensiones relativamente grandes. También es utilizado para remover contaminantes de las obleas como resultado de su manejo y almacenamiento. La mayoría de los procesos de grabado húmedo son isotrópicos, esto es, no están afectados por la orientación cristalográfica. Sin embargo, algunos solventes son dependientes a la orientación, esto es, tienen la propiedad de disolver un plano del cristal del semiconductor mucho más rápido que en los demás planos.

Enseguida se muestran algunas de las principales característica de cuatro diferentes tipos de solventes utilizados en el grabado anisotrópico:

Solvente (diluyente)	**Material para detener el grabado**	**Velocidad de grabado (100) μm/min**	**Radio de velocidad de grabado**	**Comentarios**	**Máscara (velocidad de grabado)**
KOH (agua) 85° C 44 g/100 ml	B $>10^{20}$ cm^{-3} reduce la velocidad de grabado en 20	1.4	400 para (100)/(111) y 600 para (110)/(111)	Incompatible con tecnología IC, evitar contacto con los ojos, diluye rápidamente los óxidos, se obtienen muchas burbujas de H_2	Fotoresist (grabado poco profundo a temperatura ambiente); Si_3N_4 (<1 nm/min) SiO_2 (28 Å/min)
Etilenediamina pirocatecol (agua) 115°C 750 ml / 120 g / 240 ml	= 7 x 10^{19} cm^{-3} reduce la velocidad de grabado en 50	1.25	35 para (100)/(111)	Tóxico, envejece rápido, O_2 debe excluirse, pocas burbujas de H_2, se pueden precipitar los silicatos	SiO_2 (2 – 5 Å/min) Si_3N_4 (1 Å/min) Ta, Au, Cr, Ag, Cu no son atacados Al @ 0.33 um/min
Hidróxido tetrametil amonio (TMAH) (agua) 90°C	> 4 x 10^{20} cm^{-3} reduce la velocidad de grabado en 40	1	desde 12.5 a 50 (100)/(111)	Compatible con IC, fácil de manejar, terminado de superficie lisa, pocos estudios	Velocidad de grabado del SiO_2 es 4 órdenes menores de magnitud que (100) LPCVD Si_3N_4
N2H4 (agua, alcohol isopropílico) 100°C 100 mL/100 mL	> 1.5 x 10^{20} cm^{-3} prácticamente detiene la velocidad de grabado	2.0	10 (100)/(111)	Tóxico y explosivo, bien a 50% de agua	SiO_2 (<2 Å/min) y la mayoría de los filmes metálicos; no ataca al Al

Tabla 1.3 Solventes utilizados para grabado anisotrópico

Dentro de los solventes para un grabado isotrópico húmedo tenemos los mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 1.4 Solventes utilizados para el grabado isotrópico

Sustancia solvente	**Temperatura (ºC)**	**Velocidad de grabado (μm/hora)**		
		Si (100)	Si (110)	Si(111)
$KOH:H_2O$	80	84	126	0.21
KOH	75	25 – 42	39 – 66	0.5
EDP	10	51	57	1.25
$N_2H_4H_2O$	118	1766	99	11
NH_4OH	75	24	8	1

1.6 Principales tecnologías utilizadas para la fabricación de MEMS

Dentro de la tecnología de micromaquinado del silicio existen de manera general dos principales tipos de tecnologías utilizadas para la fabricación de los MEMS, el micromaquinado de superficie y el de volumen, mejor conocidos por sus nombres en inglés: *surface micromachining* y *bulk micromachining* [11]. Cada uno tiene diferentes características y aplicaciones, lo cual se discutirá brevemente a continuación.

MICROMAQUINADO DE VOLUMEN

El término micromaquinado de volumen se refiere al hecho de que este tipo de micromaquinado es utilizado para realizar estructuras micromecánicas a partir de un bloque de una oblea de silicio monocristalino (SCS) mediante la remoción selectiva de material de la oblea.

Las microestructuras fabricadas por esta técnica cubren un rango de espesor desde unos cuantos micrones[3] al espesor completo de la oblea (200 @ 500 μm) y un rango de anchura lateral desde los micrones hasta la longitud completa del diámetro de una oblea (75 @ 200 mm).

El grabado es el paso clave durante el micromaquinado de volumen. El grabado es el proceso mediante el cual se retira de manera selectiva parte del material, lo que permite dar forma a las microestructuras, esto se realiza mediante la utilización de sustancias solventes (*etchants*).

El proceso de grabado empleado en el micromaquinado de volumen comprende una o más de las siguientes técnicas:

[3] 1 μm (micrómetro)= 1micrón

1. Grabado húmedo isotrópico
2. Grabado húmedo anisotrópico
3. Grabado anisotrópico por plasma
4. Grabado mediante iones reactivos (*Reactive Ion Etching, RIE*)
5. Técnicas de detención de grabado (*stop-etching*)

La mayoría de estos procesos de grabado ya han sido utilizados en la industria de la microelectrónica como tecnologías estándar.

Adicionalmente a los procesos de grabado, el micromaquinado en volumen utiliza con frecuencia otros procesos como el "pegado" de obleas y tecnologías basadas en deposición de capas de óxido.

MICROMAQUINADO DE SUPERFICIE

Las estructuras fabricadas por la técnica conocida como micromaquinado de superficie, están localizadas principalmente en la superficie de la oblea de silicio y existen a manera de filmes delgados. Las dimensiones de estas estructuras son hasta un orden de magnitud menor que las fabricadas por el micromaquinado de volumen. La principal ventaja de los MEMS fabricados por esta tecnología es que pueden ser fácilmente integrados con componentes de circuitos integrados. Sin embargo, ya que las estructuras son miniaturizadas, sus masas, generalmente son insuficientes para fabricar sensores y actuadores.

El problema es mayor para los microsensores mecánicos capacitivos y especialmente en microactuadores manejados capacitivamente, debido a las bajas capacitancias de acoplamiento que presentan. Las técnicas de grabado profundo (DRIE), como la litografía, el electroplating, y el LIGA, han sido desarrollados para evitar este problema, pero son difíciles de realizar en silicio.

Existen diversas aproximaciones para la fabricación de dispositivos MEMS utilizando micromaquinado de superficie. La primera es la tecnología de la capa de sacrificio, la segunda aproximación incorpora tecnología de ICs y grabado húmedo anisotrópico, finalmente la tercera utiliza grabado por plasma para fabricar microestructuras en la superficie de la oblea de silicio.

	CMOS	**Micromaquinado de superficie**
Puntos en común	Procesos basados en Silicio Mismos materiales Mismos principios de grabado	
Flujo del proceso de fabricación	Estándar	Dependiendo de la aplicación específica
Dimensiones verticales de las estructuras	~1 μm	~1 – 5 μm
Dimensiones laterales	<1 μm	2-10 μm
Complejidad (no. de máscaras)	>10	2 – 6

Tabla 1.5 Comparación entre micromaquinado de superficie y tecnología CMOS [86]

Micromaquinado de volumen	**Micromaquinado de superficie**
Obtención de largas estructuras con sustancial masa y grosor	Obtención de pequeñas estructuras con grosor y masa bajos
Utiliza ambas caras de la oblea	Se requieren múltiples deposiciones y grabados para construir las estructuras
Dimensiones verticales: un valor o más del grosor de la oblea	Las dimensiones verticales están limitadas por el grosor de las capas depositadas (~2 μm) permitiendo la construcción de estructuras suspendidas, sostenidas por un soporte fijo
Generalmente involucra el laminado de silicio o vidrio (*glass*) sobre la oblea de silicio	Los dispositivos tienen sus propios soportes que se obtienen durante la fabricación, lo que resulta de menor costo
Se utiliza para sensores piezoresistivos o capacitivos	Utilizados para mecanismos sensores capacitivos y resonantes
Las obleas podrían estar frágiles al finalizar la producción	Se requiere mantener una limpieza estricta cercano el final del proceso
El corte, el empaquetamiento y las pruebas son difíciles de realizar	El corte, el empaquetamiento y las pruebas son difíciles de realizar
Existen productos y productores ya maduros en el mercado	No existen productos ni productores maduros en el mercado
No es muy compatible con la tecnología IC	Es posible la integración, pero es complicado integrar la circuitería; la integración es requerida a menudo debido a las diminutas señales capacitivas
Dimensiones verticales: 200 – 500 μm	Dimensiones verticales: 1 – 5 μm
Dimensiones laterales: desde unos cuantos micrones al diámetro de una oblea (75 – 200 mm)	Dimensiones laterales: 2 – 10 μm

Tabla 1.6 Comparación entre micromaquinado de volumen y micromaquinado de superficie [86].

Cabe mencionar que ésta es solo una breve descripción de los pasos a seguir en la tecnología básica de fabricación de MEMS, para mayor referencia ver el Apéndice I (pág.167), al final de este trabajo.

1.7 Principales materiales utilizados para fabricar MEMS

Las propiedades mecánicas de interés de los materiales MEMS, caen en tres categorías: elasticidad, inelasticidad y resistencia mecánica [2]. El diseñador de un microdispositivo necesita conocer las propiedades elásticas para poder predecir la cantidad de deflexión para una fuerza aplicada, o viceversa. Si el material es dúctil y la estructura deformada no requiere regresar a su forma original, entonces se requiere un comportamiento inelástico del material. También debe ser conocida la resistencia mecánica del material, de modo que puedan establecerse los límites de su operación. El diseñador de MEMS tiene que entender la relación entre el procesamiento y las propiedades del material (ver Tabla 1.7).

El desarrollo temprano de los MEMS puede ser atribuido al reconocimiento del silicio, Si, como material mecánico. La rápida expansión de los MEMS en la última década se debe en parte a la inclusión de nuevos materiales estructurales que han expandido la funcionalidad de los dispositivos microfabricados más allá de los que son posibles realizar en Si.

	Punto de fusión (ºC)	**Expansión térmica (10^{-6}/ºC)**	**Densidad (g/cm^3)**	**Módulo de Young (10^{11} Pa)**	**Fuerza de ruptura (10^{11} Pa)**
Si	1415	2.5	2.4	1.3-1.69	6.9
SiN	1900	2.8	1.48	2.43	14.0
SiO_2	1610	0.5	2.27	0.73	8.4
Al	660	25	2.70	0.70	0.17
Acero	1500-2000	12	7.9	2.1	4.2

Tabla 1.7 Algunas propiedades mecánicas de materiales basados en silicio comparados con Aluminio y Acero [1]

Los principales materiales utilizados para fabricar MEMS son:

- Silicio monocristalino
- Polisilicio, también conocido como silicio policristalino
- Óxidos del silicio (SiO_2, SiO_x, vidrio silicato)
- Nitruro de silicio
- Materiales basados en germanio
- Metales
- Carburo de silicio
- Diamante
- Materiales III-V (B, Al, Ga, In, N, P, As, etc.)

A continuación nos enfocaremos en las propiedades del Si y sus derivados.

SILICIO

El Si es uno de los pocos materiales que pueden ser manufacturados en sustratos monocristalinos de manera muy económica. Su naturaleza cristalina provee ventajas eléctricas y mecánicas significativas. Eléctricamente, el Si, permite una precisa modulación de la conductividad eléctrica mediante la adición de dopantes. Mecánicamente, el Si, es un material robusto y elástico, cuyas características han sido bien estudiadas y documentadas. Por sus propiedades el Si es un material adecuado como plataforma en el cual se pueden integrar funciones electrónicas, mecánicas, térmicas, ópticas e incluso de mecánica de fluidos. El bajo costo de los sustratos (aprox. $10 por una oblea de 100 mm de diámetro) lo convierte en un material atractivo para la fabricación de componentes y sistemas micromecánicos.

El Si como elemento existe en la naturaleza en tres formas: monocristalino, policristalino o amorfo. El silicio policristalino, o simplemente polisilicio, y el amorfo son depositados normalmente en capas (o filmes) delgadas con grosores menores a los 5 μm. Los sustratos de silicio monocristalino están disponibles comercialmente en obleas circulares con un diámetro ya sea de 100-mm (4 in) ó 150-mm (6 in). Obleas de mayor diámetro (200-mm y 300-mm) son económicamente injustificadas en la actualidad para la fabricación de los MEMS, y su uso se restringe a la industria de los circuitos integrados[4]. Las obleas 100-mm estándar tienen un grosor de 525-μm, y las de 150-mm de diámetro tienen normalmente un grosor de 650-μm. Las obleas que se utilizan para la microfabricación en ambos lados, tienen ambas caras pulidas y son aprox. 100 μm más delgadas que las estándar.

El Si es ampliamente utilizado como sustrato debido a su costo relativamente bajo, su facilidad para recubrirlo con finas capas de metal, su acabado extremadamente plano y la existencia de procedimientos de deposición ya bien establecidos.

Material del sustrato	Costo	Metalización	Maquinabilidad
Cerámica	Medio	Razonable	Pobre
Plástico	Bajo	Pobre	Razonable
Silicio	Alto	Bueno	Muy bueno
Vidrio	Bajo	Bueno	Pobre

Tabla 1.8 La tabla muestra el desempeño del Si como material de sustrato sobre otros.

[4] Conocidos por sus siglas en inglés *ICs*

El Si es un buen conductor térmico con conductividad aprox. cien veces mayor a la del vidrio. En complejos sistemas integrados, el sustrato de Si, puede ser utilizado como un eficiente "almacén" de energía calorífica.

Visto como un material estructural, el Si, tiene varias características mecánicas ventajosas. El Si cristalino, es un material resistente, se deforma elásticamente mientras se le aplica una fuerza, hasta que alcanza su punto de ruptura a una presión de 7 GPa, que equivale a un peso de 7000 N suspendido de un área de 1 mm^2. Su módulo de Young depende de la orientación del cristal, con un valor promedio de 160 GPa, cercano al de la aleación acero-cromo (*stainless steel*).

La dependencia de las propiedades mecánicas de la orientación del cristal se refleja en la manera en la cual las obleas del silicio se rompen de manera preferencial a lo largo de los planos del cristal. Mientras que las obleas alargadas tienden a ser frágiles, los volúmenes pequeños de Si cristalino (≤ 1 cm^3) tienen una estructura fuerte y pueden soportar severas condiciones de manejo. Como consecuencia directa de su naturaleza cristalina, las propiedades mecánicas son uniformes a lo largo de los lotes de obleas, y éstas se encuentran libres de fuerza intrínseca.

Desafortunadamente el Si no es un material óptico activo, por ello no existen láseres basados en Si. Debido a las interacciones entre los átomos del cristal y los electrones de conducción, el Si es efectivo únicamente en la detección de la luz; la emisión de luz es muy difícil de alcanzar. A longitudes de onda arriba de los 1100 nm el Si es transparente, pero a longitudes menores a los 400 nm (porciones azul y ultravioleta de espectro visible) refleja más del 60 % de la luz incidente. La profundidad de atenuación de la luz en el Si (la distancia antes de que la luz caiga 36% de su valor inicial) es 2.7 μm @ 633 nm (rojo), y 0.2 μm @ 436 nm (azul). El Si también es conocido por mantener su integridad mecánica a temperaturas mayores de los 500 ºC.

Fig. 1.6 Sustratos de Si a partir de los cuales se realizan los cortes para la obtención de las obleas.

CORTE DE LAS OBLEAS DE SI

Dentro del uso de las obleas de Si existen diferentes tipos de corte, a partir de los cuales se obtendrán diferentes características y parámetros. Entonces, el Si, puede tener diferentes tipos de propiedades dependiendo de su orientación de corte y de las soluciones (solventes) con las que se le puede grabar.

Podemos imaginarnos a la unidad estructural mínima del Si como un cubo (Ver Fig. 1.7) en el cual dependiendo de la forma en que se realicen los cortes en él, cambiarán las características del Si.

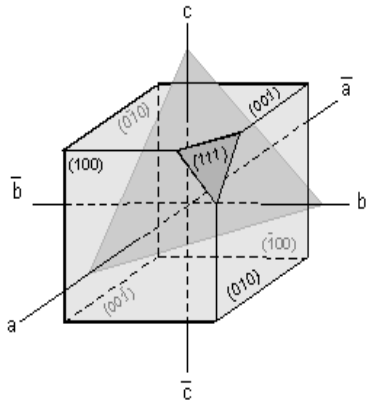
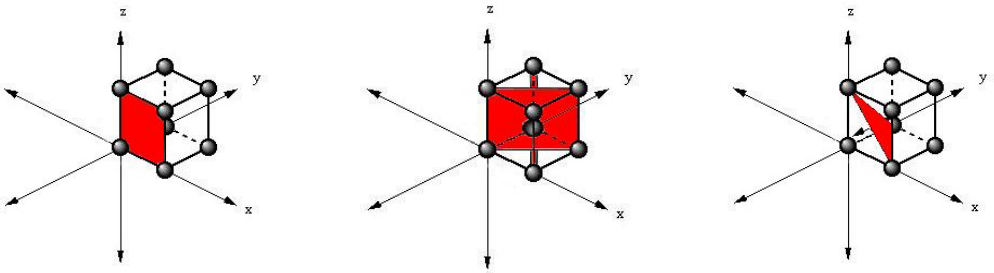


Fig. 1.7 Unidad estructural mínima del Si

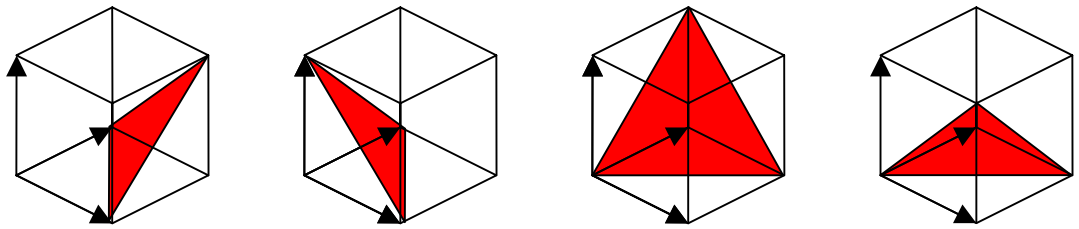
El cubo se puede visualizar en el sistema de referencia rectangular de tres dimensiones, en el cual existirán diferentes planos de corte. Los tipos de corte del material se especifican por números o índices dentro de paréntesis; llamando a esta forma de representar los cortes como "índices de Miller". En seguida se muestra, en la Fig.1.8, los tipos de corte utilizados en las obleas de Si. El corte (100) es uno de los favoritos en la industria de construcción de dispositivos CMOS.



Corte (100) **Corte (110)** **Corte (111)**

Fig.1.8 Tipo de cortes más comunes [10]

Existen distintas variaciones dentro de un mismo tipo de corte (Fig.1.9) que sirven de distinta forma dependiendo de su utilización. Además podemos usar Si dopado tanto del tipo *p*, como del tipo *n*.



Corte (111)

Fig.1.9 Cuatro de los ocho planos (111) equivalentes en la familia {111}. Ref.[10]

POLISILICIO

El polisilicio es un importante material en la industria de los ICs y ha sido ampliamente estudiado. El polisilicio es igualmente importante y atractivo material para los MEMS. Ha sido utilizado de manera exitosa para realizar estructuras micromecánicas, integrar interconexiones eléctricas, termoacopladores, diodos de unión p-n y muchos otros dispositivos con estructuras micromecánicas.

Las propiedades mecánicas del silicio policristalino y el amorfo varían dependiendo de las condiciones de deposición, pero la mayoría son similares a aquellas que presenta el silicio monocristalino. Normalmente, ambos sufren de altos niveles de presión intrínseca (cientos de MPa) ya que requieren elevadas temperaturas de fusión (> 900 ºC). Las estructuras voladizas hechas de polisilicio o de silicio amorfo que no han sido sujetas a condiciones de fusión adecuadas pueden curvarse bajo el efecto de la tensión intrínseca (*stress*).

Las propiedades térmicas del polisilicio son similares a las del silicio monocristalino, mientras que el polisilicio experimenta ligeros efectos de fusión a temperaturas mayores a los 250 ºC, haciendo que su operación a largo plazo sea inestable.

ÓXIDOS DE SI

Se dice que una de las principales razones del éxito del Si, radica en que tiene un óxido estable que es eléctricamente aislante. A diferencia del germanio (Ge) cuyo óxido es soluble en agua, o el arseniuro de galio (GaAr) cuyo óxido no crece de manera apreciable.

Varias formas de los óxidos del Si (SiO_2, SiO_x, vidrio silicato) son ampliamente utilizados en la tecnología de micromaquinado, debido a sus excelentes propiedades eléctricas y térmicas (como aislantes) También son utilizados como capas de sacrificio en el micromaquinado de superficie, ya que puede ser removido "selectivamente" mediante el ácido hidrofluorídico (HF).

El dióxido de Si (SiO_2) se deposita mediante la oxidación (combinación con oxígeno) a temperaturas mayores a los 800 ºC, mientras que otras formas de óxidos se depositan mediante CVD (*chemical vapor deposition*), chispa (*sputtering deposition*), o giro (*spin-on deposition*). Se obtienen capas de óxidos de Si más manejables (suaves y fluidas) a temperaturas arriba de los 700 ºC.

Una desventaja que tienen los óxidos es que presentan tensiones intrínsecas relativamente altas, que son difíciles de controlar. Esto ha limitado su utilización como materiales para estructuras suspendidas de gran tamaño (cientos de micrómetros)

NITRUROS DE SI

Los nitruros de Si (Si_xN_y) son ampliamente utilizados como delgadas capas de aislamiento. Su módulo de Young es mayor que la del Si y su tensión intrínseca puede ser controlada mediante métodos específicos de deposición. El nitruro de Si es un efectivo material utilizado para máscaras en muchas soluciones alcalinas.

OTROS MATERIALES

FILMES DELGADOS DE METALES

La elección del tipo de metal depende en gran medida de la naturaleza de la aplicación. Materiales como oro (Au), níquel (Ni), entre otros, son usados para aplicar finas capas de metal mediante procesos como CVD, evaporación, deposición mediante chispa (*sputtering*), entre otros.

Por ejemplo, el aluminio es el material que más se utiliza para interconexiones eléctricas y es relativamente fácil de depositar por medio de chispa (*sputtering*), pero su operación se limita a ambientes no corrosivos y solo soporta temperaturas menores a los 300 °C. Para ambientes más rudos y mayores temperaturas, el Au, Al y el tungsteno son excelentes substitutos.

El oro es un excelente reflector para rayos infrarrojos, así como el aluminio lo es para la luz visible.

POLÍMEROS

Los polímeros como las poliamidas o el fotoresist pueden se depositados en grosores de unos pocos nanómetros o unos cientos de micrómetros. El fotoresist depositado de manera estándar (por giro) presenta un grosor de 1 a 10 μm, en contraste, algunos fotoresist especiales (como el SU-8) pueden formar capas mayores a los 100 μm de grosor.

Todos los materiales anteriormente expuestos son los más utilizados para la fabricación de MEMS.

Tabla 1.9 Propiedades de algunos materiales utilizados en la fabricación de MEMS en comparación con el Silicio

Propiedad	Si	SiO_2	Si_3N_4	Cuarzo	SiC	AlN	Al_2O_3
Permeabilidad relativa (ε_0)	11.8	3.8	4	3.75	9.7	8.5	9
Rigidez dieléctrica (V/cmx10^6)	3	5-10	5-10	25-40	4	13	11.6
Movilidad del electrón (cm^2 /(V• s))	1500	-	-	-	1000	-	-
Movilidad del hueco (cm^2 /(V• s))	400	-	-	-	40	-	-
Módulo de Young (GPa)	160	73	323	107	450	340	275
Fuerza resistiva (GPa)	7	8.4	14	9	21	16	15.4
Densidad (g/cm^3)	2.4	2.3	3.1	2.65	3.2	3.26	3.62
Coeficiente de expansión térmica (10^{-6} /°C)	2.6	0.55	2.8	0.55	4.2	4.0	6.57
Conductividad térmica 300°K (W/cm K)	1.57	0.014	0.19	0.0138	5	1.60	0.30
Calor específico (J/g K)	0.7	1.0	0.7	0.787	0.8	0.71	0.8
Temperatura de fusión(°C)	1475	1700	1800	1610	2830	2470	1800

Nota: Para evitar confusiones entre el cuarzo fundido y sílice se hace una brevísima descripción de ambos. El cuarzo fundido se obtiene mediante la presión y fusión de cristales naturales, o mediante la fusión de la arena sílice (sílica), por lo que su microestructura es granular y con burbujas de aire atrapadas [12]. La sílice es un mineral que existe en varias formas, incluyendo arena, cuarzo y sílex, y es utilizado para fabricar vidrio y cemento.

Conclusiones

Como todas las tecnologías innovadoras la utilización de MEMS se traduce en fuertes sumas de inversión inicial, principalmente por la implementación de salas blancas y compra de maquinaria especializada, por lo mismo la UNAM debe afianzar alianzas con empresas de micromaquinado. Por ello el equipamiento del laboratorio de UNAMEMS es este primer gran paso. Por el momento la UNAM puede enfocarse a lo que es el diseño y simulación de los MEMS. En Guadalajara, el CINVESTAV ya construyó el primer MEMS en Latinoamérica.

La principal diferencia de los MEMS con los ICs, es que tienen movilidad de sus partes mecánicas. Esto brinda nuevas características además de las eléctricas que tienen los ICs. Entonces los MEMS pueden tener propiedades de tipo: eléctricas, mecánicas, ópticas (en el caso particular de los MOEMS). Esto es lo que permite obtener otras posibilidades para la fabricación de microdispositivos. Las características ópticas pueden ser aprovechadas en sistemas vía fibra óptica y las mecánicas permiten desplazamientos que antes no eran posibles con los ICs.

La utilización de los MEMS tiene las ventajas de reducción de volumen del dispositivo, así como también de peso, costo y consumo de energía, esto resulta atractivo para muchas aplicaciones.

El estudio de la fabricación de los MEMS, es un preámbulo de nuestro estudio, ya que de él dependen: la correcta utilización del software especializado para la simulación de MEMS y el diseño óptimo de los componentes MEMS que se requieran en la interfaz completa.

En este aspecto, se tiene que el micromaquinado de superficie tiene la principal ventaja de que es compatible con el procesamiento CMOS. La compatibilidad con ICs implica simplicidad y economía en la manufactura. Otras características son que mediante micromaquinado de superficie se obtienen dispositivos de un orden de magnitud menor que los obtenidos por micromaquinado de volumen, lo que en ocasiones puede ser tomado por desventaja, sobre todo con los actuadores y sensores, como ejemplo, un actuador capacitivo, debido a las bajas capacitancias que de él se obtienen, lo que se podría traducir en poco desplazamiento. Afortunadamente, existe la técnica de grabado profundo conocida como DRIE (*Deep Reactive Ion Etching*) que permite estructuras verticales mayores a las permitidas por el grabado convencional, ya que tiene una velocidad de grabado vertical 4 veces mayor [74], [86], además tiene la ventaja de que es un método más barato que LIGA [86].

Por otro lado, el micromaquinado de volumen, no es muy compatible con la tecnología ICs, sin embargo permite la elaboración de estructuras de mayor magnitud, lo que puede resultar ventajoso con ciertos tipos de dispositivos, como ejemplo tenemos el mencionado anteriormente, actuadores capacitivos. Una desventaja es que las obleas podrían terminar frágiles al final del proceso.

CAPÍTULO 2

2. Estudio de los programas IntelliSuite y Coventor

Existen diversos programas para la simulación de MEMS, en el laboratorio UNAMEMS se cuenta con el Intellisuite y el Coventor que se escogieron por que sus procesos de fabricación son más generales, permitiendo la construcción de una gran variedad de dispositivos, además las licencias de estos programas son más asequibles.

Tanto Intellisuite como Coventor son programas que se utilizan para la simulación y análisis de los posibles diseños de dispositivos MEMS que tengamos en mente. De aquí que se utilicen como una poderosa herramienta para simular la respuesta física de nuestro dispositivo, de esta manera nos dicen con cierta certeza si el camino recorrido en el diseño ha sido el adecuado o no. Por ello, es importante conocer sus principales características y limitaciones para poder desarrollar con éxito nuestro dispositivo. A continuación, se hace una breve descripción de cada uno de los programas, las herramientas con las que cuentan, algunos beneficios, tipos de análisis que realizan y aplicaciones.

2.1 IntelliSuite

DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

IntelliSuite ofrece la oportunidad de desarrollar dispositivos MEMS para poder reducir el tiempo y los recursos necesitados para su desarrollo. Mediante tutoriales el programa se encarga de introducir a los pasos básicos de fabricación y simulación de MEMS, poniendo para ello diversos ejemplos que pueden ser realizados para un mejor entendimiento en su manejo. El programa cuenta con todos los pasos a seguir de la fabricación de dispositivos en tecnología MEMS. Además de una extensa base de datos de materiales para la fabricación, dependiendo de las necesidades del diseño, hasta la simulación de diversas respuestas físicas.

Realización de conmutadores, sensores, microespejos, simulación de sus propiedades físicas, análisis eléctricos y mecánicos, todo esto es posible gracias a Intellisuite. Especialmente para la parte de dispositivos MEMS requeridos para sistemas inalámbricos, es extensa la capacidad de diseño y simulación, no así para la parte de sistemas ópticos.

Una interfaz que es fácil y amigable, hace que el software sea digerible para todo tipo de usuario con los conocimientos básicos en procesos de fabricación de tecnología MEMS.

HERRAMIENTAS

Intellisuite cuenta con una serie de herramientas útiles en el diseño de MEMS, podemos clasificarlas en tres grupos:

Principales herramientas para el acoplamiento	Herramientas especializadas para análisis a altas frecuencias	Herramientas complementarias del proceso de simulación
Análisis mecánico Resuelve problemas lineales o no lineales, estáticos, de frecuencia, transitorios o de estado estable. Optima diseños utilizando análisis modal y de "buckling", respuesta en frecuencia y resultados de tensión y de deformación. **Análisis térmico** Modela un amplio rango de fenómenos de transferencia de calor, incluyendo calentamiento resistivo, por flujo, por convección y tensiones térmicas. Prueba el desempeño del dispositivo, modelando la respuesta térmica. **Análisis electrostático** Resuelve problemas complejos del mundo real con su algoritmo de mallas de caras expuestas (EFM). Modela problemas multi-dieléctricos, discontinuidades dieléctricas y capacitancias parásitas. **Análisis piezoresistivo y piezoeléctrico** Modelos aproximados de problemas de piezoresistividad y piezoelectricidad. Simula piezo actuación debido a una carga de voltaje o calcula la frecuencia natural y el modo de onda como función de carga	**Análisis Microfluídico y de BioMEMS** Diseñado específicamente para microfluídicos y BioMEMS. Resuelve problemas 3D involucrando flujo de fluido, transferencia de calor, transferencia de masa, estequiometría, electrocinética e interacción 2D de la estructura del fluido. **RF MEMS y Modelado en Microondas** Direcciona las necesidades de los desarrolladores de MEMS de RF, de microondas, ópticos. Provee rapidez, precisión y soluciones costo-efectivas relacionadas con fenómenos de RF y electromagnéticos.	**IntelliFAB** IntelliFAB combina procesos actuales de fabricación (con máscaras) para la creación virtual de prototipos. Optima los procesos de fabricación y elaboración de máscaras, sin el costo de la fabricación actual. **AnisE: Simulador de grabado (etching) anisotrópico** AnisE lleva a cabo simulaciones de grabado basado en tipo de solvente (etchant), temperatura, concentración, tiempo de exposición al solvente. Optima los parámetros de grabado así como el diseño de máscaras utilizadas en un proceso. **MEMaterial** MEMaterial cuenta con una base de datos de capas delgadas de distintos materiales, predice las propiedades del material que se requiere. Más de 70 materiales están disponibles. Optima el proceso. **IntelliMask: Herramienta de trazado de máscaras** IntelliMask está diseñada específicamente para la creación y edición de máscaras. Genera trazados con geometría curva y máscaras multi-nivel, además lleva a cabo operaciones booleanas para la fabricación de máscaras.

Tabla 2.1 Herramientas que utiliza Intellisuite

BENEFICIOS

Una de las principales ventajas de el uso de IntelliSuite sobre todo comparado con el programa Coventor, es su facilidad de uso y su sencillez en su manejo e iniciación, tiene una interfaz de trabajo con el usuario muy amena, de muy fácil acceso y similar a la de Spice, programa utilizado muy comúnmente para la simulación de circuitos electrónicos.

Al tener una pantalla de trabajo muy dinámica, con botones que representan las funciones o procesos que se van a realizar, no se necesita de muchos pasos para realizar un proceso, lo que sí se debe saber muy bien es el orden de los procesos de fabricación y los parámetros a crear o modificar en cada uno de ellos.

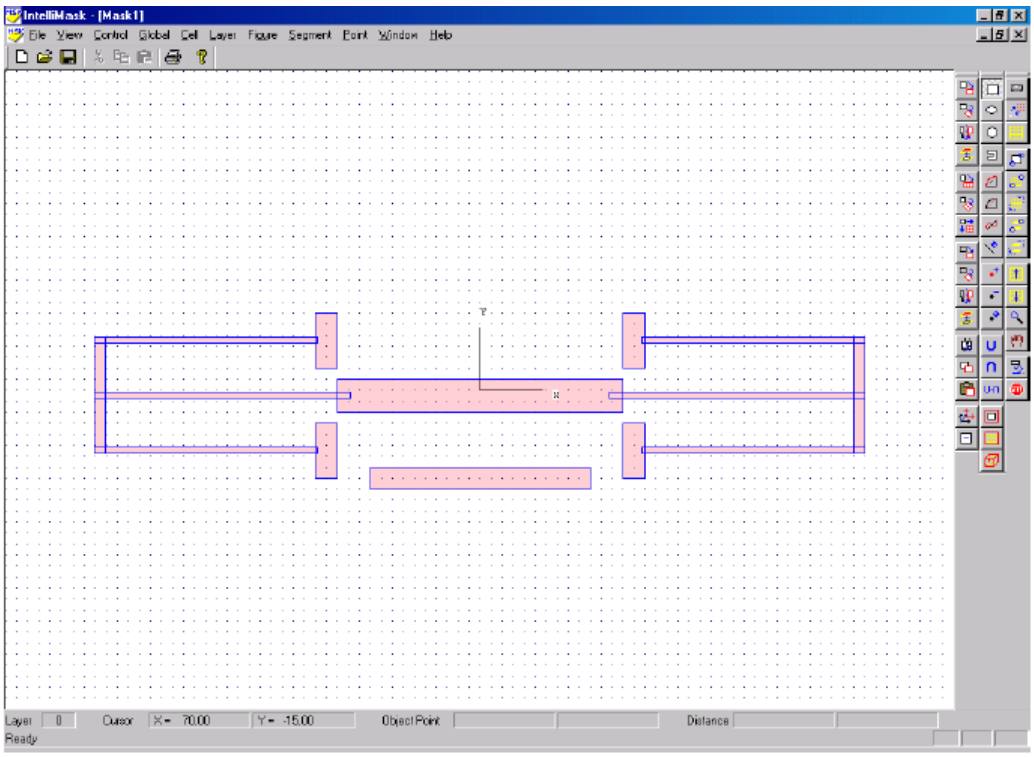


Fig.2.1 Construcción de una estructura resonante en tecnología MEMS.

Existe también una aplicación o programa específico en particular para cada paso que se lleva a cabo, lo que hace que no necesariamente se necesite utilizar todo el programa, cabeceras y potencial del programa para un uso determinado. Por lo que trae como beneficios el mejor entendimiento de la utilización del programa.

TIPOS DE ANÁLISIS

Como se mencionó antes Intellisuite tiene la facilidad de crear dispositivos MEMS con base en procesos de fabricación utilizados comercialmente. Diseñar y simular los dispositivos, para ver sus respuestas y sus parámetros desde antes de su implementación, ahorran mucho esfuerzo, tiempo y dinero.

Es posible realizar diseños de los dispositivos con base en procesos, determinar las propiedades de los materiales que se van a utilizar, realizar análisis eléctricos, mecánicos (por ejemplo un acelerómetro) y electromecánicos. Diseño de complejas máscaras para los procesos de grabado, como paso para la obtención de MEMS. En sí, todos los procesos básicos de la elaboración de dispositivos en tecnología MEMS están disponibles en el software IntelliSuite.

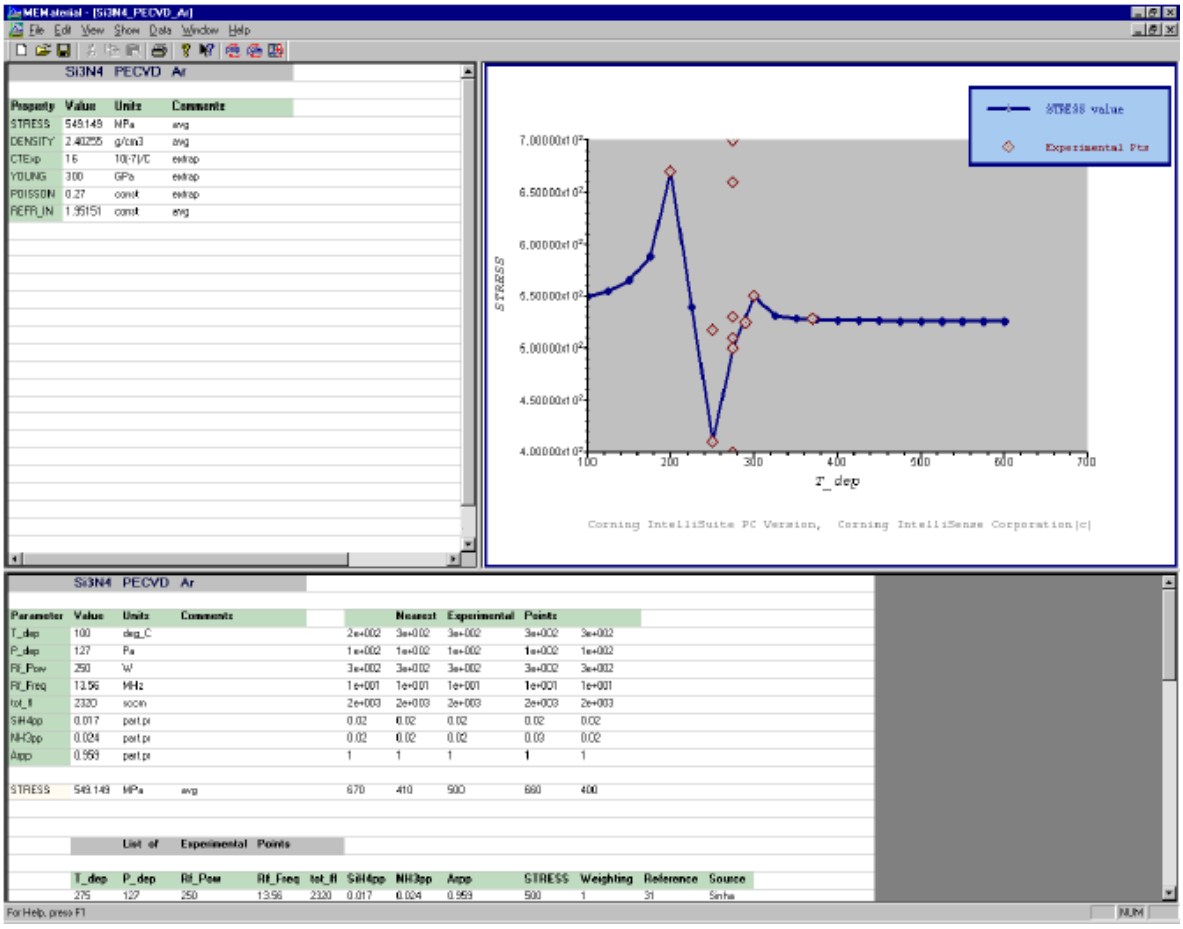
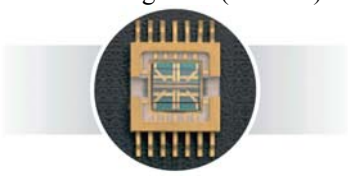


Fig.2.2 Resultados de prueba de presión de un material.

Tabla 2.2 Aplicaciones diseñadas en Intellisuite

Diseño de mecanismos Dispositivos de peine (combdrives) radiales y lineales Series de engranes Elementos biestables y multiestables Estructuras resonantes Motores Membranas Vigas voladizas (cantilevers) Estructuras "popup" Micromontajes (assembly)	**MEMS convencionales** Acelerómetros Sensores de presión Giroscopios Micrófonos MOEMS Bolómetros (bolometers) Escáneres biométricos Interruptores electrostáticos Interruptores térmicos Interruptores de micromotor y ópticos (electrostático, piezo y magnético) Detectores de radiación Microcalentadores (heaters) Intercambiadores de calor criogénicos Sets de herramientas AFM/SPM Microgrippers 	**BioMEMS y Análisis Total de Sistemas** Electroseparación capilar Electroforesis de zona capilar Dielectroforesis Ciclometría de fluido Convergencia iso-eléctrica capilar Isotacoforesis m-capilar Micro-mezcladores Sensores T Cámaras de reacción Suministro de drogas medicinales Mezcladores en cámaras serpentinas Modelado galvanostático y potencioestático Arreglo de dispositivos como: ▪ Chips de hibridación ADN ▪ Sistemas de difusión ▪ Proteómicos en un chip
Microondas Circuitos de microcinta Circuitos stripline Circuitos slotline Guías de onda coplanares Modulación electro-óptica Discontinuidades dieléctricas Componentes bi-puerto Microondas monolíticas Circuitos Integrados (MMICs) 	**MEMS electromagnéticos y RF** Interruptores electrostáticos (en palarelo, serie y capacitivos) Interruptores resistivos Capacitores MEMS ajustables Interruptores Pacheco Desplazadores de fase Inductores Antenas planares 	**Microfluídicos** Microválvulas Toberas Mezcladores Interacción membrana-fluido Bombas

Desafortunadamente, las licencias de Intellisuite han expirado en el laboratorio de UNAMEMS, por lo que no se puede realizar simulación alguna en este programa, por el momento.

2.2 Coventor

DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

Para la fabricación de los MEMS y microsistemas se requiere pasar por una serie de pasos ordenados, sistemáticos y cíclicos; es decir, en ocasiones se necesita regresarse a pasos anteriores, pero esto implica inversión de tiempo y costos, a continuación se muestra un análisis de las capacidades, limitaciones y aplicaciones de CoventorWare 2003.1, una herramienta de gran proyección y aplicación en el proceso de diseño de MEMS.

CoventorWare 2003.1, es un software utilizado en el diseño de MEMS y microsistemas. CoventorWare 2003.1 maneja cuatro módulos: Arquitectura, Diseño, Análisis e Integración. Dichos módulos son herramientas que se relacionan cíclicamente y conforman de esta manera un software útil y robusto que permite simular los procesos de microfabricación con diversos materiales y compuestos, las condiciones normales para el análisis del funcionamiento del microsistema, el establecimiento de parámetros iniciales de manera controlada, el sometimiento a procesos físicos: eléctricos, mecánicos, ópticos, magnéticos, etc.

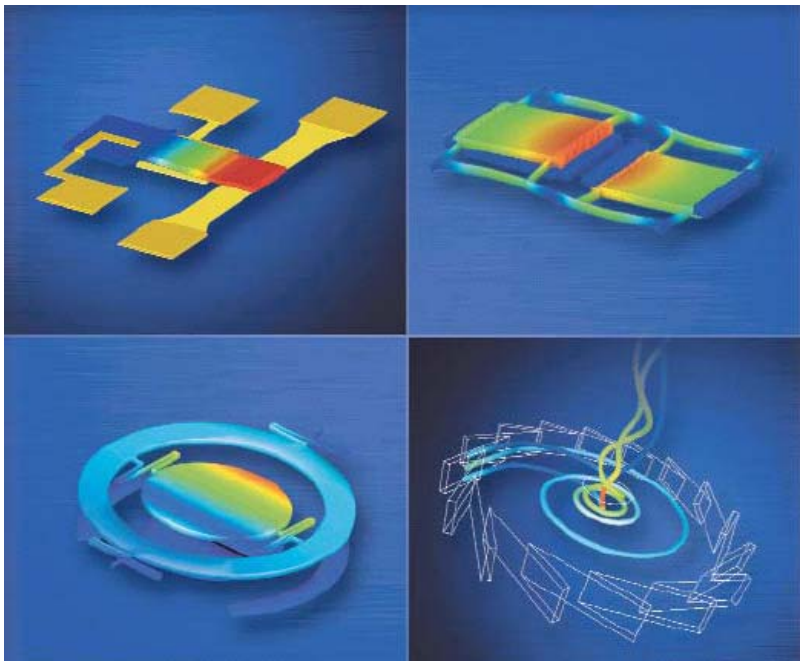


Fig. 2.3 Simulaciones 3-D realizadas en Coventor

DIAGRAMA DE FLUJO A SEGUIR EN EL DISEÑO DE MEMS EN COVENTOR

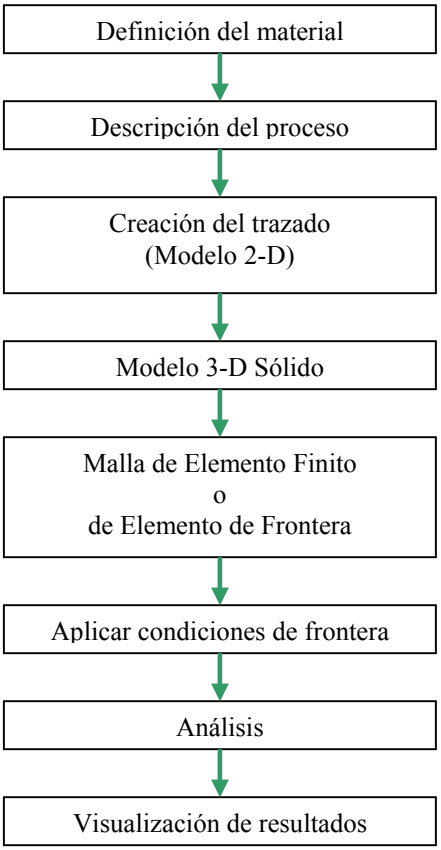


Fig. 2.4 Esquema que muestra los pasos a seguir en el diseño utilizando Coventor

Los parámetros del proceso necesitan ser especificados en un principio para que estén disponibles en cualquier parte del diseño. Así que el usuario comienza por definir o editar las propiedades de los materiales existentes en la base de datos y luego del proceso. El trazado de la máscara es creado a continuación de las máscaras definidas en el archivo de proceso. Es construido el modelo 3-D sólido, combinando la máscara 2-D y la descripción del proceso de fabricación. Posteriormente se dibuja un "enrejado" sobre la estructura 3-D con determinadas características utilizando el AutoMesher. Finalmente el modelo es resuelto mediante la asignación de condiciones iniciales apropiadas y los resultados son visualizados en 3-D o exportación de datos en forma de texto [13].

HERRAMIENTAS UTILIZADAS POR COVENTOR

CoventorWare puede ser descrito como una serie de módulos conectados circularmente. Los diseños pueden comenzarse en diferentes sitios mostrados en el siguiente mapa de flujos del software, dependiendo si el usuario desea diseñar a nivel sistema o a nivel físico.

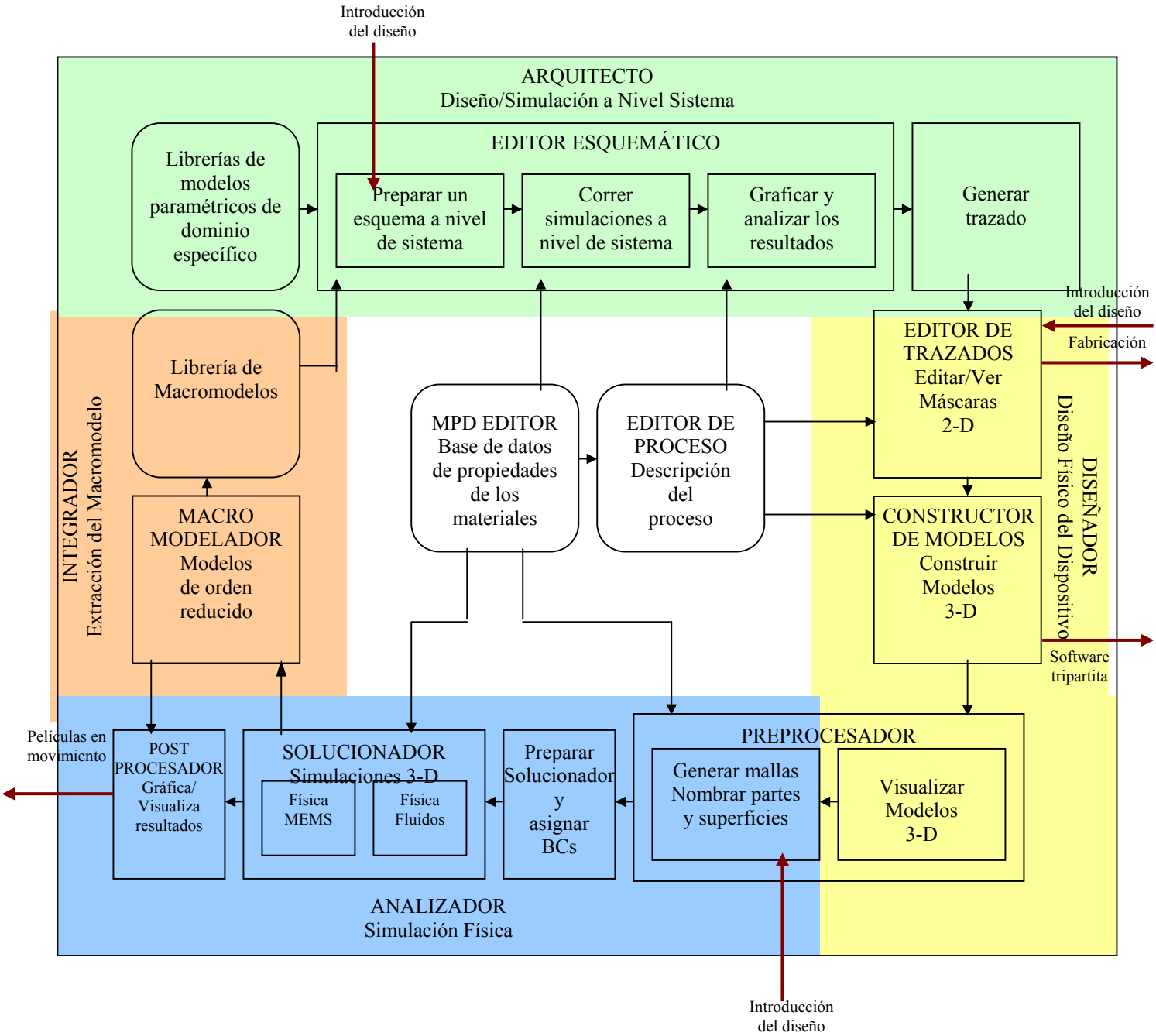


Fig. 2.5 Herramientas utilizadas por Coventor y mapa de flujos del software

CoventorWare maneja cuatro módulos principales para el proceso de diseño:

- *Arquitecto* - Un ambiente de modelado basado en un esquema a nivel sistema permite utilizar de manera más rápida alternativas de diseño y optimación de parámetros.
- *Diseñador* - Una herramienta de diseño físico que contiene un editor bidimensional de máscaras, editor de materiales y base de datos, así como un generador de modelos tridimensionales.
- *Analizador* - Un analizador hecho a la medida para soportar los requerimientos físicos para diseñar cualquier dispositivo y usarlo posteriormente con el módulo Diseñador para verificar los resultados.
- *Integrador* - Crea modelos de orden reducido a partir de modelos detallados creados en el analizador. Analiza y/o transforma estos modelos hacia simuladores compatibles con la industria de circuitos integrados (Sinopsis y Cadente).

BENEFICIOS

CoventorWare 2003.1 es un software que integra herramientas accesibles para la elaboración de diseño, optimización y análisis de dispositivos a microescala, incluyendo herramientas para MEMS, componentes para sistemas de fluidos, subsistemas ópticos, mecánicos, RF, biotecnológicos y sensores.

Tiene varias ventajas en cuanto al alcance que tienen sus simulaciones, es una herramienta poderosa para el diseño, sin embargo su utilización es menos compleja de entender que Intellisuite, tiene una ventana principal desde la cual se pueden manejar todas las aplicaciones disponibles del sistema.

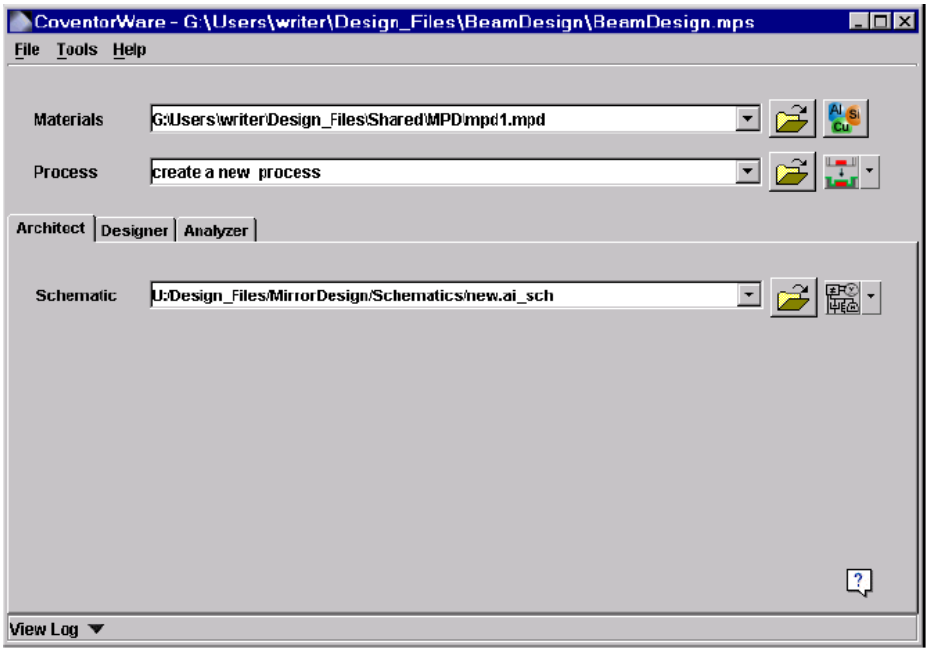


Fig.2.6 Ventana de Coventor

Entre las ventajas se encuentran:

- Optimación de diseño y análisis superior aseguran la mejor elección para el diseño y procesos de fabricación.
- El desempeño comprobado del módulo diseñador reduce notablemente los costos.
- Menos pasos para el desarrollo de prototipos implican menor tiempo de diseño y salida al mercado.

TIPOS DE ANÁLISIS

Tabla 2.3 Características del dispositivo críticas analizadas por CoventorWare

MEMS RF	Sensores MEMS	MEMS Ópticos
Desempeño RF Desempeño de partes movibles Especificaciones del sistema para un diseño de alta frecuencia **Desempeño Dinámico** Efectos transitorios Efectos de amortiguamiento en simulaciones transitorias y factor de calidad Efectos de la aplicación de un voltaje bias en la velocidad de interrupción y en la respuesta en frecuencia **Calentamiento por efecto de Joule** Efecto de las distribuciones de voltaje o corriente sobre el desempeño térmico/mecánico **Optimización en actuadores** Ventajas/Desventajas en distintos métodos utilizados en la actuación **Diseño electro-mecánico** Influencia de la geometría del dispositivo sobre la fuerza de contacto y el voltaje de control del interruptor Velocidad de interrupción Impacto de la tensión residual inducida por la manufactura sobre el desempeño del interruptor **Manufacturabilidad** Influencia por variaciones en el proceso sobre el desempeño del interruptor Parámetros claves del diseño que manejan la confiabilidad y el desempeño del sistema	**Alta sensibilidad** Diseño óptimo de algunos dispositivos (*comb fingers*) Diseño de curva óptimo Reducción del efecto de amortiguamiento mientras se mantiene la sensibilidad **Sensibilidad de cruce** Efectos de la frecuencia operacional sobre la sensibilidad de cruce y la dinámica del sensor Nivel de frecuencia máximo al cual el plato se mantiene rígido **Señales cuadráticas** Diseño de variaciones que reducen la sensibilidad del sistema a la cuadratura Variaciones del procesos de desarrollo que minimizan la cuadratura **Sensibilidad de temperatura** Desempeño sobre el rango de temperatura de operación **Efectos ambientales** Efectos por empaquetamiento (*packaging*) en el desempeño **Manufacturabilidad** Mejores procesos y límites para el desarrollo de procesos Producción esperada con tolerancia de fabricación realista	**Diseño electro-mecánico** Rompimiento del espejo Influencia de la geometría del espejo sobre su capacidad de control Nivel de tensión sobre los soportes del espejo Velocidad ideal de interrupción Influencia de la tensión residual sobre la curvatura del espejo **Desempeño óptico** Grosor de la capa de oro necesaria para optimizar el desempeño óptico del sistema Efectos por la interacción entre las capas ópticas y las de empaque Calidad óptica del espejo durante la operación **Manufacturabilidad** Mejores procesos y límites para el desarrollo de procesos Producción esperada con tolerancia de fabricación realista

APLICACIONES

Coventor puede ser utilizado prácticamente en casi todas las aplicaciones para diseño de dispositivos en tecnología MEMS, siempre y cuando se tengan las licencias para poder utilizar los diversos módulos con los que este software dispone.

- RF MEMS: *Interruptores, varactores, inductores con bajas pérdidas, filtros*
- Sensores
- MOEMS (por el momento no se cuenta en la UNAM con la licencia de esta sección)
- MEMS fluídicos

Tabla 2.4 Dispositivos

Acelerómetros.	**Giroscopios**	**Aplicaciones militares**	**Tipos de giroscopios**	**Giroscopios**
Balance de fuerzas	Sensores de vibración de Coriollis	Seguridad, armamento	Grado promedio.	Osciladores simples
Percibir movimientos angulares	Láser de anillo	Sensores de munición	Grado táctil	Osciladores balanceados
Sensores de vibraciones	Para fibra óptica		Grado inercial	Resonadores

Tabla 2.5 Aplicaciones de Coventor de acuerdo a diversas áreas

Automotriz	**Milicia**	**Aeronáutica**	**Industrial.**	**Comercial.**
Sensores de autochoque	Municiones	Navegación	Sensores sísmicos	Estabilización de imagen
Control dinámico	Vehículos	Aplicaciones satelitales	Sensores de vibración	Videojuegos
Detección de giro	GPS	Sistemas de guía (*displays*)		
Navegación		Distintos medidores		

2.3 Comparación entre Coventor e Intellisuite.

Mientras el nivel de complejidad que existe en el manejo de Intellisuite es menor, es necesario un mayor nivel de comprensión y dominio por parte del usuario en los procesos de fabricación. Los tutoriales de iniciación con los que cuenta Intellisuite explican paso a paso la metodología utilizada y desde un inicio se siente que se tiene pleno acceso a muchas partes del programa, por lo que se consideró que su manejo es muy amigable.

Ambos programas cuentan con los pasos básicos reglamentarios en la fabricación de MEMS y algunos procesos de ICs.

El módulo óptico era de especial interés en este estudio y ambos cuentan con esta sección en sus versiones completas, desafortunadamente, mientras se contó con Intellisuite esta parte no la tenía habilitada y con Coventor tampoco se cuenta con el acceso a ésta. Se espera que en futuras licencias se cuente con ella, ya que serviría de gran ayuda en el estudio de los MEMS ópticos.

Tabla 2.6 Comparación entre Coventor e Intellisuite

Características evaluadas	IntelliSuite	Coventor
Complejidad en la iniciación	Sencilla	Media
Bases de datos de materiales	Muy Buena	Muy Buena
Nivel de comprensión necesario de los procesos de microfabricación	Muy completo	Básico
Pasos básicos para la fabricación	Sí	Sí
Módulo óptico	Sí	No disponible
Compatibilidad con tecnología de ICs	Sí	Sí
Licencia de su uso en el laboratorio UNAMEMS	No (en la actualidad)	Sí

Conclusiones

Se tuvo la oportunidad de poder comparar dos tipos de software para simulación de dispositivos MEMS. El primero, Intellisuite, resultó desde un inicio de fácil manejo, debido a la elaboración de sus tutoriales, sin embargo tiene varios subprogramas que se abren en forma de ventanas separadas, lo que complica quizá un poco el diseño para los usuarios novatos, además requiere de un conocimiento muy profundo en el momento de la fabricación (herramienta IntelliFAB) ya que solicita datos muy precisos de procesos de deposición y grabado. Otro punto considerado del software Intellisuite es que el programa de diseño (herramienta IntelliMASK) tiene un ambiente amigable para la edición de máscaras. Las bases de datos de materiales con las que cuenta IntelliSuite son muy completas, ya que toma en consideración el proceso de fabricación y sus parámetros (temperatura y presión) para predecir características generales de los materiales depositados. Por todo lo anterior, se considera que el software Intellisuite es para usuarios que tengan conocimientos medios a avanzados de fabricación. Desafortunadamente, en estos momentos no se cuenta con la licencia de Intellisuite por lo que se descarta para el diseño de los dispositivos MEMS que requiera la interfaz.

El segundo, CoventorWare2003, integra al usuario desde un inicio a la elaboración virtual y simulación de parámetros de MEMS, además está muy bien documentado, tiene varios tutoriales, por lo que al inicio es un poco difícil saber por cual empezar, por lo que se recomienda iniciar por *MasterHelp.pfd*, que ofrece un panorama general de las posibilidades del software, posteriormente realizar los ocho ejemplos de dispositivos MEMS del Analizer Tutorial (*mems_analy.pdf*) y el Analizer Reference Guide (*reference.pdf*) que es una rápida referencia de muchas herramientas para la simulación, posteriormente los otros tutoriales. Si se sigue este orden de tutoriales, Coventor tiene un inicio accesible para el usuario común. El nivel de conocimientos de la fabricación de MEMS que demanda Coventor no es tan elevado como el que requiere Intellisuite, por lo que lo pone a un mayor alcance de los usuarios. Lo anterior se compensa con las bases de datos de los materiales de fabricación, ya que es posible editar algunas características que Coventor toma por "default", a manera de simular propiedades obtenidas por determinado proceso de fabricación. Las herramientas de edición de máscaras de Coventor son un poco más complicadas de manejar que las de Intellisuite, pero con la práctica se va haciendo más fácil de utilizar. Entonces, se considera que el software Coventor resulta práctico tanto para usuarios principiantes como para usuarios expertos, ya que el software permite simular muchas cosas (dimensiones, gradientes de presión, etc.), lo que un usuario más experimentado es capaz de distinguir lo posible y práctico, de lo que no lo es tanto o que no se acopla a los métodos de fabricación. Debido a razones de fechas de expiración de la licencia de Intellisuite se utiliza CoventorWare 2003 para la simulación de los elementos MEMS que requiera la interfaz óptica.

CAPÍTULO 3

3. Análisis a nivel sistema

En el análisis a nivel sistema se muestra la problemática general del diseño, así como los puntos importantes vistos de forma global, de manera implícita se tienen los pasos que se siguieron durante la investigación. El capítulo presente comprende el estado del arte de interfaces completas, la descripción general del sistema, su diagrama de bloques, la función que cumple cada subsistema, los objetivos que se busca que cumpla esta interfaz, las posibles limitaciones que se encuentren a lo largo del diseño.

3.1 Estado del arte: interfaces completas vía fibra óptica

Antes de definir el concepto de interfaz completa vía fibra óptica y su estado del arte, es necesario hacer una explicación del desarrollo de los enlaces bidireccionales de fibra óptica en los últimos años. Hoy en día, los enlaces bidireccionales de fibra óptica para sistemas sensoriales remotos, operan con fuentes activas de luz en ambos extremos del enlace de comunicación para permitir la transmisión de la información de un punto a otro en el enlace (Ver Fig. 3.1). A este tipo de enlaces se les conoce como "activo-activo" [14], ya que utilizan fuentes activas (diodos láser o LEDs) en ambas terminales.

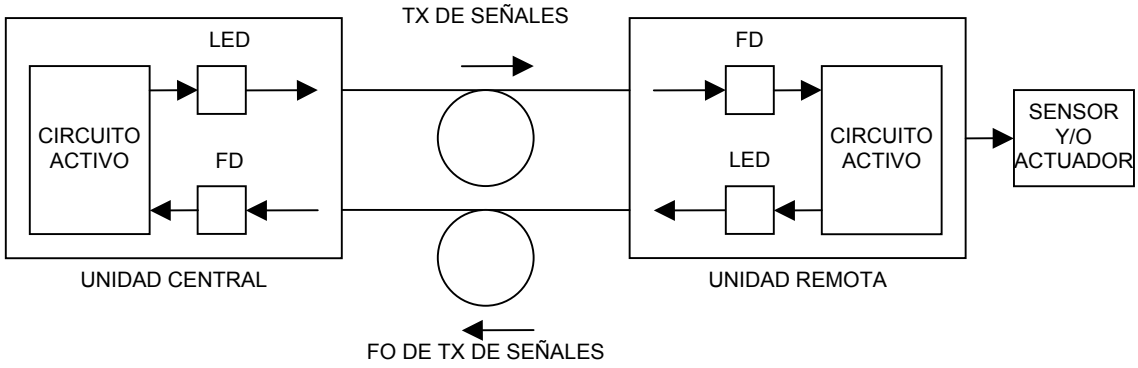


Fig. 3.1 Un enlace bidireccional activo-activo con dos fibras ópticas

Los enlaces convencionales de comunicación de fibra óptica, utilizan fibras separadas para cada dirección: una, donde la señal se dirige de la unidad de control o central a la unidad remota (UC→UR) y otra para donde la señal se dirige en la dirección opuesta (UR→UC) es decir, la comunicación se realiza de manera unidireccional. En contraste, los enlaces bidireccionales de fibra óptica más recientes pueden utilizar una sola fibra para la comunicación en ambas direcciones, utilizando módulos comúnmente conocidos como "BiDi", presentes en ambos lados de las terminales. Así, dos módulos BiDi forman un enlace "activo-activo".

Esto podría ser conveniente cuando se trata de un solo enlace "activo-activo", pero esto no es lo común, imagínese la situación de tener varias URs conectadas a una UC, como en el caso de las redes sensoriales, entonces, si tenemos "n" cantidad de URs contaríamos con "n +1" módulos BiDi, contando al módulo de la UC, lo que corresponde a "n +1" fuentes activas, esto resulta económicamente poco atractivo.

Además, la utilización de fibras ópticas para proveer de potencia a un sensor y/o un actuador que se encuentre en la UR puede ser ventajoso en aplicaciones donde se requiera cualquiera de las siguientes características: (1) aislamiento galvánico entre el sensor o actuador y la UC; (2) inmunidad a interferencias electromagnéticas; (3) seguridad intrínseca; (4) tamaño reducido de la UR; o (5) fuentes ópticas potentes en la UC, porque así lo requiera la UR.

Una alternativa viable para enlaces de redes sensoriales es la conocida con el nombre de enlace "activo-pasivo" [13] es decir, el enlace cuenta con una sola fuente activa en la UC que alimenta a la(s) UR(s).

Ahora entenderemos como interfaz vía fibra óptica, en general, al medio de transmisión de datos en un sistema, en este caso la fibra óptica; pueden existir interfaces unidireccionales y bidireccionales, el tipo de información que puede transmitir la interfaz es de dos clases: datos y señales de control. Adicionalmente una **interfaz completa** vía fibra óptica incluye la alimentación, lo que significa que está directamente relacionada con sistemas alimentados ópticamente. Se supone que en estos sistemas "alimentados ópticamente" su UR (circuitos, sensores, actuadores, etc.) se encuentra alimentada totalmente por la potencia óptica que proviene de la UC (de una fuente óptica) a través de una fibra que se le denomina "de alimentación", es decir no utiliza baterías o fuentes de energía extras. Los sistemas alimentados ópticamente son denominados en inglés como "*optically powered systems*", o "*power-by-light systems*". En la literatura se encuentran muchos ejemplos de sistemas alimentados ópticamente de tipo "activo-activo", por ejemplo Refs. [5], [6], [15] – [23], sin embargo son pocas las investigaciones en torno a los de tipo "activo-pasivo", como las Refs. [14], [24] – [26].

Entonces en la actualidad, por las ventajas económicas que representan los enlaces "activo-pasivo", se están empezando a desarrollar y utilizar en redes sensoriales. Por lo que cada vez es más necesaria la creación de nuevas interfaces completas vía fibra óptica más eficientes y baratas. Este trabajo delimita su campo de estudio al diseño de una interfaz completa vía fibra óptica capaz de alimentar ópticamente la UR, que además incluya los beneficios potenciales de la tecnología MEMS.

3.2 Descripción general del sistema

Para facilitar el estudio y la descripción de la interfaz completa, se considera en primer lugar la descripción del funcionamiento general de un sistema alimentado ópticamente, el cual se considera dividido en tres bloques principales: (1) la unidad central o de control (UC); (2) el enlace de fibra óptica (FO); y (3) la unidad remota (UR).

De manera general, la UC es la encargada de generar la información de control y de proporcionar la potencia óptica necesaria para la UR, mediante un diodo láser o un LED, con la finalidad de activar sensores, actuadores y circuitos. De esta manera se podrán obtener datos del medio externo que rodea a la UR, mismos que serán enviados a la UC para su procesamiento y control.

3.3 Diagrama de bloques del sistema

A continuación se tiene un diagrama que muestra los bloques funcionales principales que integran a un sistema alimentado ópticamente (con una interfaz completa de fibra óptica).

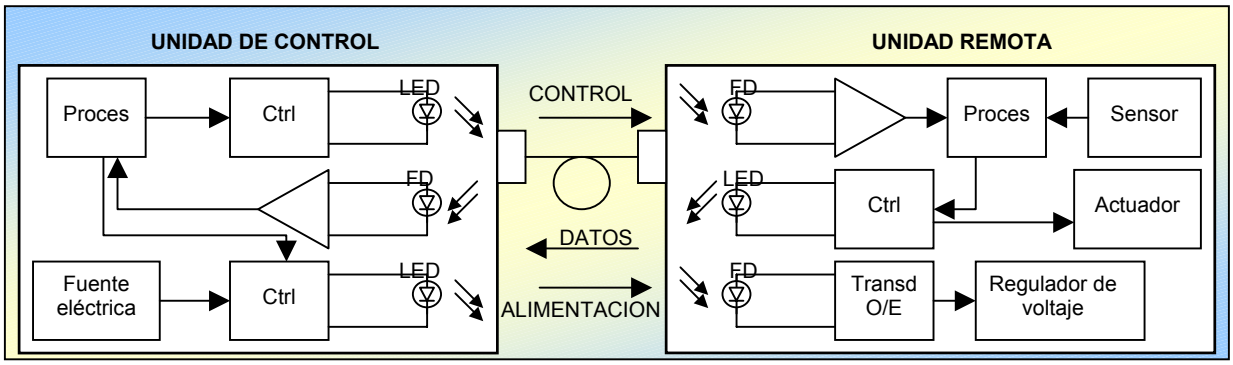


Fig. 3.2 Diagrama de bloques funcionales de un sistema alimentado ópticamente (con una sola fibra).

Para poder obtener un diseño óptimo de la interfaz completa es necesario definir los requerimientos necesarios que encontramos durante su diseño, para posteriormente encontrar las mejores soluciones para poder cubrirlos y hasta donde sea posible optimarlos.

3.4 Requerimientos técnicos de la interfaz completa

Por la definición de interfaz completa que se dio al inicio de este capítulo, se tienen distintas necesidades por cubrir. En primer lugar, la UC debe ser capaz de proveer de potencia suficiente a una UR para poder activar todos los dispositivos que ésta tenga, por lo que es necesario utilizar una fuente óptica potente, ya que existen muchos factores de pérdidas. Además, el estudio de la fuente óptica es de gran importancia para poder optimar los costos del sistema y siempre se debe dedicar un tiempo a su estudio.

Por otra parte, se desea que la interfaz (por lo menos la parte de la UR) esté integrada en un solo chip preferencialmente con tecnología basada en silicio por su bajo costo, esto también dependerá de las limitaciones de la tecnología MEMS existente.

Es también prioritario calcular las pérdidas que se presentan por la misma fibra, para ello se requiere hacer el análisis de qué tipo de fibra es mejor en este caso y analizar cuántos canales son óptimos para llevar a cabo tres tareas: (1) alimentar ópticamente, (2) flujo de información de control y (3) flujo de datos. Los dos primeros se efectuarán de UC→UR; es decir, lleva una dirección de ida o de bajada (*downstream*) el flujo de datos recopilados se hará en sentido opuesto, o sea, en dirección de regreso o de subida (*upstream*) UR→UC.

El menor número de dispositivos necesarios en la interfaz traerán beneficios en eficiencia y costos. En este aspecto, se evaluarán las opciones que se tienen para la alimentación de la UR que puede consistir en un fotodetector, un transformador y un convertidor de voltaje, o la opción de que sea un arreglo de fotodetectores en serie. En este aspecto es importante el material de los fotodetectores, en cuanto a eficiencias y costos de fabricación.

Un punto muy importante de la interfaz es el elemento(s) que le permitirá(n) utilizar la energía que le ha sido proporcionada para poder mandar datos de regreso, todo esto sin una fuente presente en la UR, para que se trate en efecto de un sistema alimentado ópticamente con enlace “activo-pasivo”. Este dispositivo crucial podría ser un MEMS o un MOEMS, ya que consumen baja energía y su fabricación es compatible con circuitos integrados (ICs). En este aspecto se requiere un actuador (modulador) MOEMS, como se verá más adelante.

Como puede notarse el conocimiento de las necesidades básicas de nuestra interfaz sirve como pauta para la investigación.

3.5 Requerimientos de potencia

En el siguiente punto de la investigación se ubicó necesario encontrar los requisitos de potencia de la UR; es decir tanto de MEMS (microactuadores) como de sensores completos, es decir con su parte de electrónica. Posteriormente se discutirá cuál será el dispositivo MOEMS que se utilizará para realizar un enlace "activo-pasivo". Además, se analizarán las posibles configuraciones o arreglos para alimentar a la UR a partir de la potencia óptica de la fuente de la UC. Es muy importante hallar la potencia que utiliza la UR para obtener un buen funcionamiento del sistema ya que de ello dependerá el tipo de fuente óptica, de fibra óptica, de fotodetector y demás dispositivos que sirven para la alimentación de la interfaz completa (como transformadores, rectificadores u otros elementos).

REQUISITOS DE POTENCIA DE SENSORES COMPLETOS

Es fundamental conocer la potencia que necesitan los sensores comerciales actuales, para ello se ha realizado la siguiente Tabla 1 con distintos tipos de sensores: magnéticos, por aceleración, por sonido (acústicos), por presión, por temperatura (térmicos) y otros. Cabe destacar que se consideraron solamente sensores completos, es decir con cierta parte de electrónica, por lo tanto la potencia marcada en la tabla es la que requiere el sensor más la de su parte electrónica. En realidad el sensor por sí mismo casi no consume energía, se podría decir que solo se alimenta con una décima parte de la marcada en la tabla. Como ejemplo de ello tenemos que la potencia requerida únicamente por un sensor (resonante) en resonancia es de ~420 μW [27].

Tabla 3.1 Sensores comerciales [28] – [35]

Tipo de Sensor	Modelo	Corriente de alimentación	Voltaje de consumo [V]	Potencia requerida* (calculada)	Rango (y sensibilidad)	Tamaño [mm]	Ancho de Banda (señal)	Formato de salida	Fabricante	Costo pieza [US$]	Descripción	Aplicaciones y Notas
Magnético	HMC1052	1 mA	1.8 – 20	1.8 mW - ...	(1 mV/V/Gauss[1])	3x3x1	5 MHz	Analógico	Honeywell	100	2 ejes	Sistemas de navegación y posicionamiento, detección de tráfico.
	HMC1023	5 mA	3 – 12	25 – 60 mW	(1 mV/V/Gauss)		5 MHz	Analógico	Honeywell	75	3 ejes	Sistemas de navegación, detección de tráfico, dispositivos médicos.
	HNC1001	10 mA	5 – 12	50 mW - ...	(3 mV/V/Gauss)	5x10x2	5 MHz	Analógico	Honeywell	100	1 eje	Sistemas de navegación, detección de tráfico, dispositivos médicos, iterruptor sin contacto.
Acelerómetros	ADXL202	0.6 – 1 mA	3 – 5. 25 (@ 0.6 mA)	1. 8 – 3. 15 mW @ 0.6 mA	+/- 2 g (12.5 %/g)		6 kHz	Analógico o PWM	Analog Devices	20 (+100)	2 ejes	Periféricos de computadora, detectores de movimiento, seguridad en el vehículo.
	MMA1201P	4 – 6 mA	4. 75 – 5. 25	19 – 21 mW	+/- 40 g	19x6x4			Motorola	6 (+1000)	1 eje	Ya no es manufacturado
	MS 7000	170 uA @ 3V	2.4 – 5.5	510 uW (@ 170 uA, 3V)	+/- 2 g a +/- 50 g (500 mV/g)	16 ∅x4	> 600 Hz	Analógico y Digital	Colibrys		Sensor MEMS	Navegación inercial, medición sísmica, industriales, respaldo GPS

[1] I T = 1 tesla = 10^4 gauss

Tabla 3.1 Sensores comerciales (cont.)

Tipo de Sensor	Modelo	Corriente de consumo	Voltaje de alimentación [V]	Potencia requerida (calculada)	Rango	Tamaño [mm]	Ancho de Banda (señal)	Sensibilidad	Fabricante	Costo pieza [US$]	Descripción	Aplicaciones y Notas
Micrófonos	MKE 2 P-C	2. 6 mA	12 – 48	31. 2 – 124. 8 mW		4	Respuesta en frecuencia: 20 – 2000 Hz	10 mV/Pa +/- 2.5 dB (sin carga)	Sennheiser	300	Micrófono condensador	
	MX185	2 mA	11 – 52	22 – 104 mW	96.2 dB (rango dinámico)	20∅x100	Respuesta en frecuencia: 50 – 17000 Hz	- 35 dB (17 mV), en circuito abierto	Shure	300	Microcondensador lavalier, contiene preamplificador	Reforzador de propósito general del sonido (voz), grabación, aplicaciones de monitoreo remoto.
	WL93	40 uA	2 – 10	80 – 400 uW		4x6x9	Respuesta en frecuencia: 50 – 20000 Hz		Shure	100	Microcondensador lavalier inalámbrico	Micrófono subminiatura ideal durante transmisión televisiva o teatro para el reforzamiento del sonido.
	SM93	0. 33 mA	11 – 52	3. 63 – 17. 16 mW		4x6x9	Respuesta en frecuencia: 80 – 20000 Hz		Shure	240	Con preamplificador	Micrófono subminiatura ideal durante transmisión televisiva o teatro para el reforzamiento del sonido.
	Series-wm WM-64	<0.5 mA	2 – 10	1 – 5 mW					Panasonic	< 30		

Tabla 3.1 Sensores comerciales (cont.)

Tipo de Sensor	Modelo	Corriente de consumo	Voltaje de alimentación [V]	Potencia requerida (calculada)	Rango	Tamaño [mm]	Ancho de Banda (señal)	Formato de salida	Fabricante	Costo pieza [US$]	Descripción	Aplicaciones y Notas
Temperatura	DS1621	<1 mA	2. 7 – 5. 5	2. 7 – 5. 5 mW @ 1 mA				Digital	Dallas Semiconductor	~10. - DEM[2]		Termómetro digital y termostato
	AD7418	6 mA	2. 7 – 5. 5	13. 5 – 33 mW	-40 – 125 ºC			Digital	Analog Devices	<3 (+100)	Convertidor AD en chip	Monitoreo de la temperatura, control en procesos industriales, etc.
	TMP37	0. 5 mA	2. 7 – 5. 5	1. 35 – 2. 75 mW	-40 – 125 ºC			Analógico	Analog Devices	~1 (+100)		Sistemas de control ambiental, control de procesos industriales, alarmas de fuego, etc.
	LM45	1. 2 mA	4 – 10	4. 8 – 12 mW				Analógico	National Semiconductor	~3. - DEM		
Presión	MPXV4115V	6 – 10 mA	4. 75 – 5. 25	28. 5 – 31. 5 mW @ 6 mA				Analógico	Motorola			
	SM5310	1. 5 – 3. 0 mA	5 – 10	7. 5 – 15 mW @ 1.5 mA				Analógico	SMI			
	Series XFPM	1 mA	5	5 mW				Analógico	Fujikura			
Otros	HIH-3605	2 mA	4 – 5.8					Analógico	Honeywell		Humedad	
	AH31		3.2 – 5.5	5 mW, 5 uW (standby)				Digital (SPI)	Sensirion	~50 FRF[3]	Humedad y temperatura	
	TGS261		5	< 15 mW					Figaro	~20 FRF	Gases Explosivos	
	MC145010	0.1 mA	6 – 12	0. 6 – 1. 2 mW				Analógico	Motorola		Detector de humo fotoeléctrico	

[2] 1 DEM = 1 marco alemán = 1.95 €
[3] 1 FRF = 1 franco francés = 6.56 €

DIAGRAMAS DE BLOQUES DE ALGUNOS SENSORES COMPLETOS

Los sensores arriba mostrados tienen su propia parte de electrónica y podemos darnos una idea del tipo de electrónica que utilizan con bloques funcionales básicos que los constituyen. En seguida se muestran los diagramas de bloques de algunos de estos sensores, obtenidos de las hojas de especificaciones provenientes de sus páginas web [28] – [35]. Se trata de sensores completos; es decir, tienen bloques funcionales de electrónica que se pueden observar a continuación:

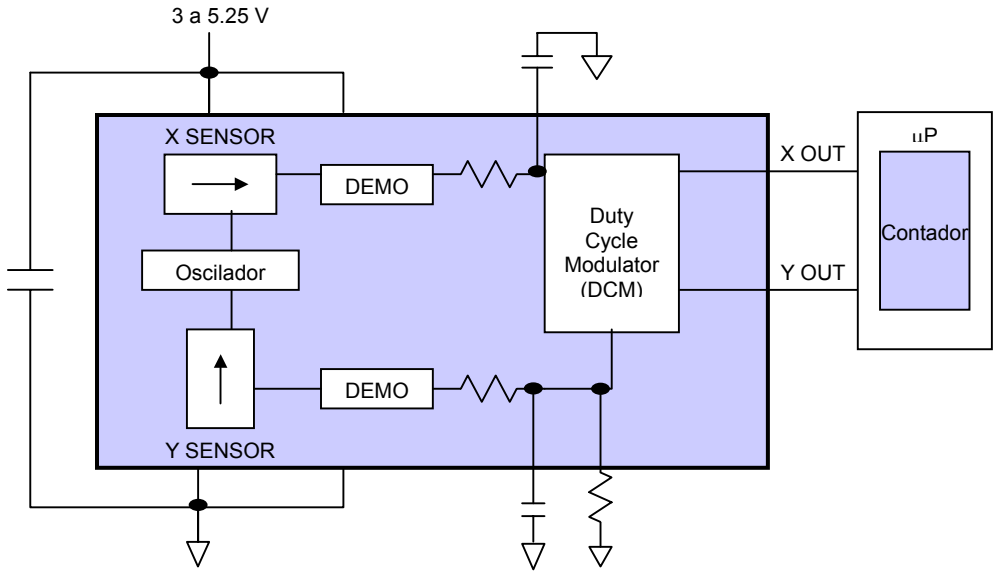


Fig. 3.3 Diagrama de bloques funcionales del acelerómetro ADXL202 de Analog Devices.

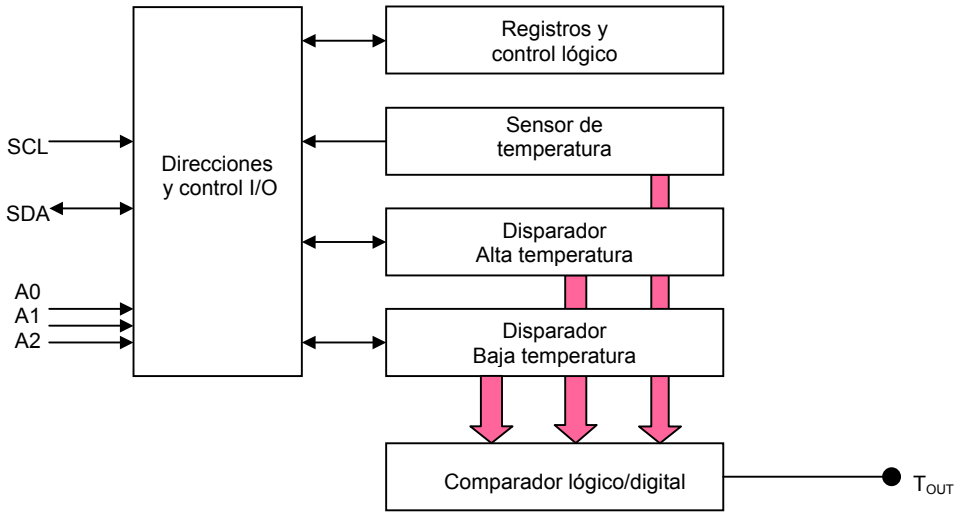


Fig. 3.4 Diagrama de bloques funcionales del sensor de temperatura DS1621 de Dallas Semiconductor.

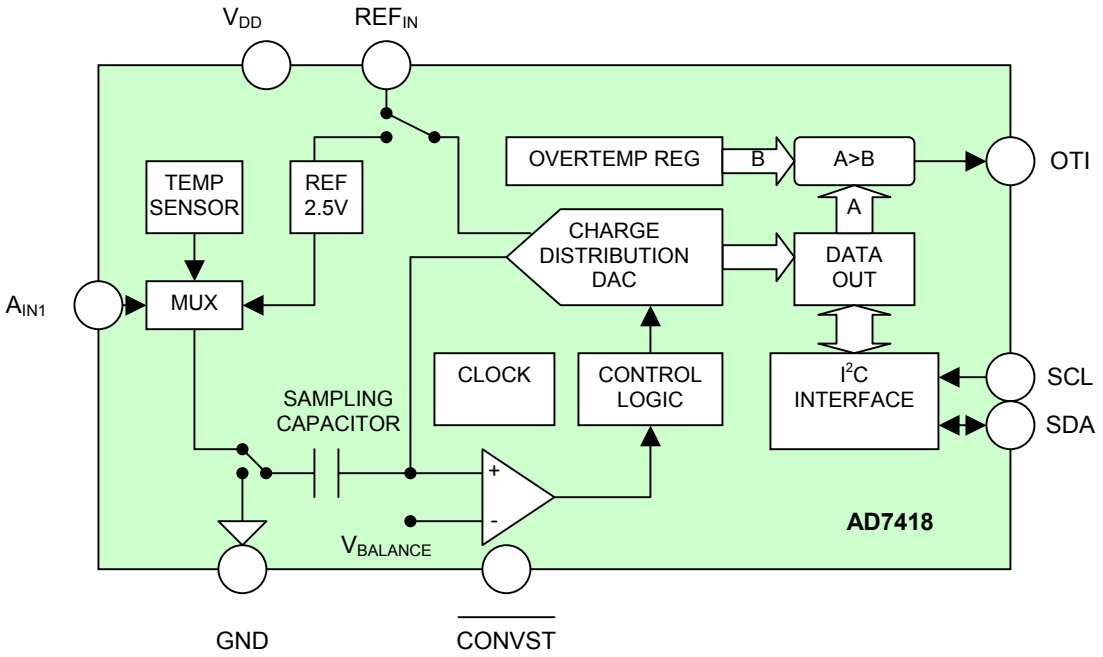


Fig. 3.5

Diagrama de bloques funcionales del sensor de temperatura AD7418 de Analog Devices.

Actualmente existen diversos convertidores fotovoltaicos, diseñados específicamente para alimentar sensores médicos o industriales, proveen potencias desde unos pocos mW hasta 0.5 W, dependiendo de la fuente óptica que se utilice. Pero en realidad la mayoría de los sensores requieren una potencia en el orden de unos cuantos miliwatts para hacer funcionar la electrónica del sensor, éste será el rango de potencias que se considerará que se requiere a la salida del convertidor de voltaje (de la UR). A continuación se muestra una tabla con algunos ejemplos de sensores de fibra óptica y sus requerimientos reales de potencia óptica, en algunos casos también se indican la distancia establecida entre la UC y la UR.

Tipo de sensor	**Potencia requerida en la cabeza del sensor**	**Distancia establecida entre unidad central y unidad remota**
Sensor de cuarzo alimentado ópticamente para la medición de fuerza [3]	~2.2 mW	
Sensor de temperatura alimentado ópticamente (optically-powered) [3]	110 μW	200 m (diámetro del núcleo 400 μm, AN[4] = 0.5)
Sensor basado en la vibración de un alambre para la medición de fuerza [3]	1 μW	0.5 km

Tabla 3.2 Potencia requerida por algunos tipos de sensores de fibra óptica.

[4] AN = apertura numérica de la fibra óptica

REQUISITOS DE POTENCIA DE ALGUNOS TIPOS DE ACTUADORES

En el caso de que se tuviera conectado un actuador a nuestra UR, se tendría un mayor consumo de potencia comparado al de los sensores. Generalmente los actuadores son dispositivos con un consumo mayor de potencia, debido a que constan de partes móviles y requieren una mayor energía para permitir movimiento de partes mecánicas, esto depende de la función que lleven a cabo y del tipo de actuador del que se trate, como puede observarse en la siguiente tabla (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Distintos tipos de actuadores y su consumo de energía [90]

Tipo de actuador	Esfuerzo de actuación.	Tiempo de actuación (s).	Datos eléctricos
Termo-neumático	34kPa	0.03	2.5W
Polímero termo responsivo	437kPa	0.05	30mW
Arreglo de fase	100kPa	0.04	1.9mW
Terno-buckling	100kPa	0.015	3W
Memoria de propiedades mecánicas (elásticas)*	150kPa	0.2	0.12A
Tira bimetálica	50kPa	1.0	0.5A
Calentamiento dieléctrico	1Pa	0.02	10V@4MHz
Capacitivo	50kPa	m.d.	2700V
Piezoeléctrico	25kPa	m.d.	1000V
Electro hidromecánico	2.5kPa	0.0004	700V
Tensión interfacial	10kPa	0.002	1V
Magnéticos	50kPa	m.d.	72A
Inductivos	50kPa	m.d.	18A
Placa ferromagnética	50kPa	m.d.	1.4A
Imán permanente	300kPa	m.d.	0.3A

m.d.= dominado por membrana

* Shape-memory alloy

3.6 Dispositivo MOEMS

Antes de continuar es necesario analizar cuál será el dispositivo que se utilizará para permitir un enlace "activo-pasivo", cabe recordar que será el elemento que le permitirá utilizar la energía que le ha sido proporcionada a la interfaz para poder mandar datos de regreso, todo esto sin una fuente presente en la UR. Este elemento deberá ser un modulador, ya que de esta manera cambiará alguno de los parámetros de la señal recibida (intensidad, fase, frecuencia o polarización) por la UR para ser enviada a la UC, para su procesamiento y control. Entonces, a continuación se hablará del tipo de moduladores que se pueden utilizar.

TIPOS DE MODULADORES

La modulación es el proceso de cambiar una o más propiedades de la portadora, en proporción con la señal de información [37]. En nuestro caso la portadora está en la banda óptica. La señal portadora transporta la información a través del medio de transmisión (fibra óptica, guía de onda óptica o espacio libre). La señal de información modula a la portadora óptica, cambiando su amplitud (intensidad), su frecuencia o su fase.

Por lo tanto, los moduladores son dispositivos que alteran una de las características detectadas (amplitud, fase o frecuencia) de una onda óptica coherente (caso ideal) de acuerdo con la señal eléctrica externa [38].

De manera general, los moduladores ópticos se pueden clasificar en internos y externos. Los internos, modulan directamente la señal óptica y son los diodos láser, tienen velocidades de modulación hasta de GHz, además se utilizan en la modulación por pulsos. Otra forma de clasificar a moduladores es de acuerdo con los parámetros de la señal que pueden cambiar: de intensidad, frecuencia, fase y polarización.

Cabe mencionar que los moduladores son ampliamente utilizados en los sensores de fibra óptica, pero es importante destacar que para nuestra aplicación de interfaz completa utilizaremos el modulador para optimar el diseño de la unidad remota (reducir el número de elementos) y tener un solo medio de comunicación.

MODULADORES DE INTENSIDAD (O AMPLITUD)

Las comunicaciones ópticas, así como los sistemas de telemetría en general están basadas en la detección de intensidad. Este tipo de moduladores generalmente se caracterizan por la potencia óptica recibida y el ancho de banda de la señal.

La modulación de intensidad ofrece simplicidad en los sistemas, confiabilidad y bajo costo, además puede presentar una amplia variedad de configuraciones lo que lo convierte en el de mayor aplicación [39], [44].

Entre los moduladores de este tipo se encuentran los discretos (interruptores encendido-apagado) que funcionan simplemente con el encendido y apagado y los analógicos que se deben a desplazamientos angulares, longitudinales o transversales.

También se encuentran los moduladores que se basan en la reflexión de la señal óptica sobre un espejo movible, como el que se muestra en la siguiente figura (Fig.3.6). Generalmente este tipo de modulación se utiliza en la detección de desplazamiento longitudinal en sensores de fibra óptica. Así, la modulación de la intensidad estará en función de la distancia variable "x". Es decir, la variación de la intensidad tiene relación directa con el desplazamiento entre la superficie de reflexión y la fibra.

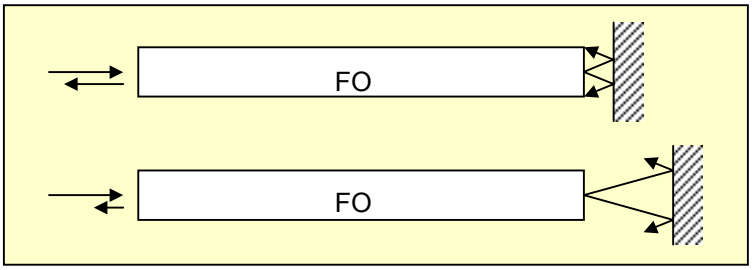


Fig. 3.6 Modulador reflexivo simple, utilizado en la detección de desplazamientos longitudinales.

Otro tipo de diseño que ejemplifica a estos moduladores es el interferómetro Mach-Zehnder (por sus siglas en inglés, MZI). De los avances más recientes en este rubro, se encuentra el modulador de silicio (de Intel) capaz de alcanzar una velocidad de 1 GHz (límite anterior 20 MHz) lo que parece levantará la fotónica de silicio a un nivel de mayor relevancia en la computación comercial. Claro que para nuestra aplicación esta velocidad resulta excesiva.

El MZI divide la señal óptica entrante en dos componentes iguales (ideal) que se propagan sobre los dos brazos del interferómetro (Fig. 3.7 (a)) que se encuentran suficientemente separados uno del otro evitando acoplamientos. Cuando se combinan dos longitudes de onda, la señal sinusoidal resultante es la suma de las dos señales sinusoidales que la conforman. Por ejemplo, si se suman dos señales sinusoidales que están en perfecta sincronía (columna izquierda de la Fig. 3.7 (b)) la onda sinusoidal resultante tendrá el doble de la amplitud de las ondas individuales. En contraste, cuando las dos ondas están totalmente fuera de sincronía, la onda resultante no tiene amplitud, el grado de sincronía entre dos ondas se conoce como "fase". Estos cambios de amplitud resultantes (la intensidad de la luz) son la base para que el fotodetector reconozca los ceros y los unos. Debido a que la amplitud se modula (para codificar los datos) esta técnica se conoce como modulación de amplitud o amplitud modulada (AM) [40]. Cabe subrayar que en este caso los cambios de fase generaron la modulación de intensidad.

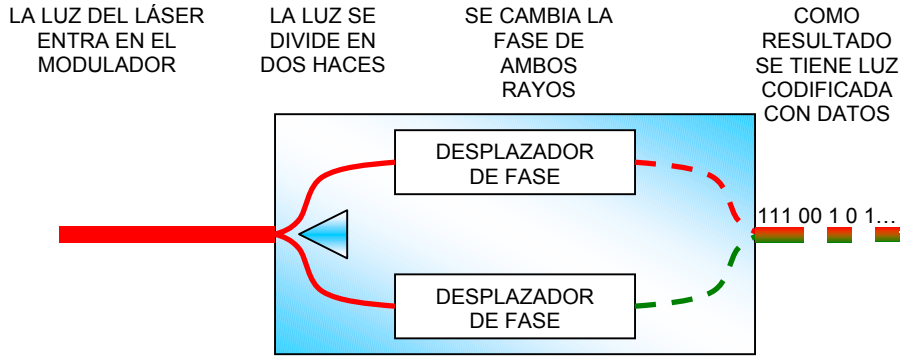
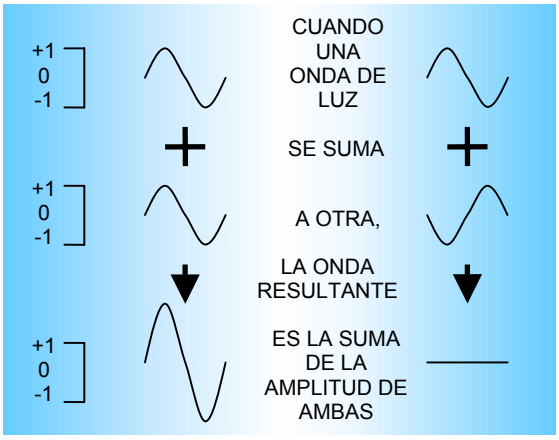


Fig.3.7(a) Modulador de intensidad (o amplitud)



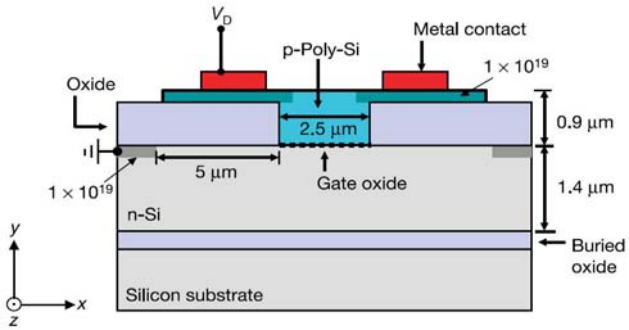


Fig. 3.7(b) Suma de dos señales de misma amplitud pero de diferente fase; (c) Construcción del modulador de intensidad de Si de Intel

Una desventaja importante es que este modulador de Intel es sensible a la polarización óptica, lo que agrega otros elementos al sistema, como polarizadores, fibras especiales, etc.

MODULADORES DE FRECUENCIA

La frecuencia de la luz es una característica que puede ser modulada, para una onda electromagnética, como la luz, la frecuencia y la longitud de onda guardan una relación directa determinada por la expresión

$$f = \frac{\upsilon}{\lambda} \qquad \ldots(3.1)$$

Donde, v es la rapidez de la luz y λ es la longitud de onda de la fuente, entonces, podemos decir, que un modulador basado en el cambio de frecuencia, guarda cierta relación con los que modifican la longitud de onda, por lo cual si se modifica en frecuencia se modula la longitud de onda. Existen numerosos fenómenos dependientes de la longitud de onda, en los cuales puede ser usada la modulación de la luz proveniente de una fuente óptica.

La variedad de técnicas de modulación de longitud de onda (en los textos) es mucho menor a la que existe para la de intensidad. Esto se debe a que el método de demodulación requiere más cuidado y usualmente es necesaria alguna forma de espectrómetro. En algunos casos, una simple técnica de demodulación requiere el empleo de filtros ópticos.

MODULADORES DE FASE

La modulación en fase en fibras ópticas es extremadamente utilizada en sistemas coherentes, así como en sensores interferométricos. Este tipo de modulación tiene la ventaja de permitir gran sensibilidad en la medición de cambios físicos. La fase de la señal óptica en la fibra es afectada por la temperatura, presión y rotación, lo cual es bien aprovechado por los sensores. Cabe notar que las mediciones de fase normalmente son mediciones indirectas de otro parámetro [39].

El más popular y simple modulador de fibra óptica de fase es el cilindro piezoeléctrico [39] (Fig. 3.8) con varias vueltas de fibra óptica que se encuentran bajo cierta presión. Cuando se aplica un voltaje a lo largo de las paredes radiales de un cilindro PZT polarizado, la circunferencia del cilindro cambia resultando en un cambio de la longitud de la fibra. El cambio de fase registrado en la fibra está dado por el cambio de fase:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\left(n\Delta l + l\Delta n\right) \qquad ...(3.2)$$

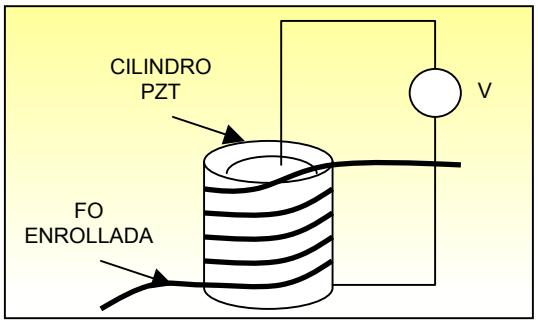


Fig.3.8 Modulador de fibra óptica de fase [39]

MODULADORES DE POLARIZACIÓN

Los moduladores de polarización son los menos utilizados por la complejidad que involucran. Este tipo de modulación es en la práctica muy similar a la interferometría.

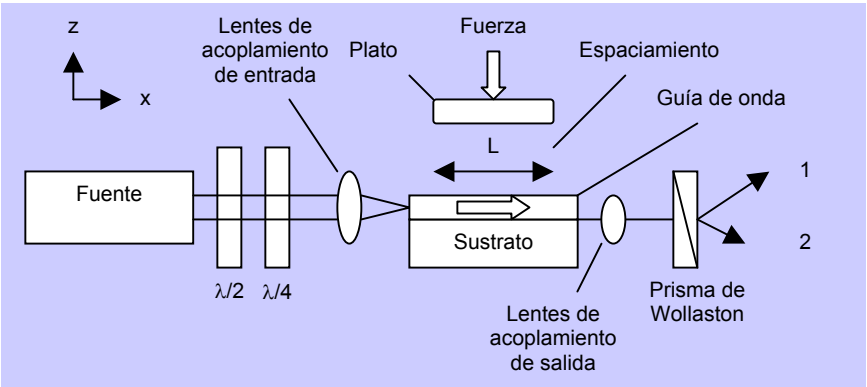


Fig.3.9 Un modulador de polarización [36]

SELECCIÓN DEL TIPO DE MODULADOR

Para mejorar la eficiencia de la interfaz óptica y hacerla "completa", se propone la utilización de un modulador micro-opto-electro-mecánico (MOEMS) de intensidad reflexivo; es decir, un modulador basado en el principio mostrado en la Fig. 3.6. A continuación se justifican las razones.

Una alternativa viable y económica para una interfaz completa, es la implementación de un modulador reflexivo, el cual nos permita que parte de la luz entrante sea utilizada para enviarla de regreso al canal de retorno [14]. De esta manera se tiene un enlace "activo-pasivo". La figura muestra un esquema de comunicación punto a punto utilizando la modulación reflexiva [14]. El siguiente diagrama (Fig.3.10) representa el sistema de alimentación de la interfaz óptica utilizando un modulador reflexivo, como puede observarse tiene un solo medio para la alimentación y el flujo de datos del sensor.

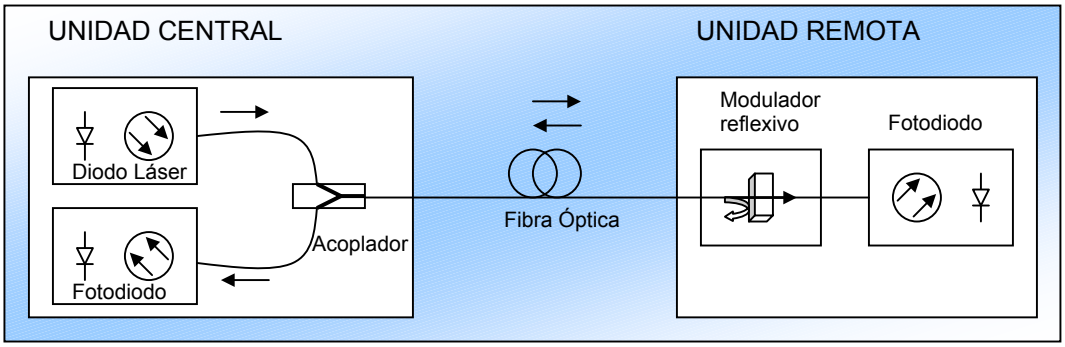


Fig. 3.10 Sistema de alimentación de la interfaz óptica completa [14].

Aplicando los principios de reflexividad en nuestro caso de interfaz completa, se tiene que para enviar datos de la UC hacia la UR, la luz del diodo láser es modulada directamente y un fotodetector en la UR recibe la señal modulada en intensidad.

Para enviar datos desde la UR hacia la UC, parte de la luz incidente es reflejada de regreso a la fibra y simultáneamente es modulada con datos nuevos.

ESTADO DEL ARTE DE MODULADORES REFLEXIVOS

En la actualidad las tecnologías de moduladores reflexivos presentan dos desventajas principalmente. En primer lugar, el precio de los componentes comerciales disponibles no es competitivo, en comparación con el de las fuentes ópticas activas. Esto se debe en gran parte a los altos costos de procesamiento y empacamiento. Más aún, muchos de los dispositivos sufren dependencia de polarización en sus parámetros de operación y altas pérdidas ópticas, factores que reducen considerablemente la longitud posible del enlace [14].

La mayoría de los moduladores reflexivos disponibles actualmente se basan en el fenómeno electro-óptico [14] (efecto de Pockels) el cual consiste en inducir un cambio en el índice de refracción proporcional al campo eléctrico aplicado externamente [38]. La magnitud del efecto electro-óptico depende de los coeficientes electro-ópticos del medio y del campo eléctrico aplicado. Por esta razón se utiliza como medio de estos moduladores el niobato de litio, principalmente. En principio, este efecto provee modulación superior a los 40 Gb/s. Sin embargo, en la mayoría de los casos prácticos, solo son requeridos los altos promedios de transferencia de datos en el flujo de ida (*down-stream*) es decir, cuando la información fluye de la UC hacia la UR [14].

VENTAJAS DE LA MODULACIÓN REFLEXIVA

Los moduladores micromecánicos reflexivos pueden llegar a alcanzar promedios de modulación de varios Mb/s [24], [42], [43]. Si la fabricación de este tipo de moduladores se basa en silicio, tienen la potencialidad de fabricación a bajos costos y pueden ser producidos en grandes cantidades. De esta manera, esta solución puede ser más efectiva en costos que el enlace activo-activo.

Una ventaja más de este tipo de moduladores es su coherencia inherente a la longitud de onda; es decir, dependiendo de la longitud de onda de luz que utilice la UC, la UR utilizará la misma. Por lo tanto, si se pensara en una red WDM (*wavelenght-division-multiplexed*) cada línea suscrita podría manejar distinta longitud de onda. La dificultad en este aspecto estriba en la fuente óptica, ya que debe ser capaz de hacer auto ajustes en la longitud de onda de la luz transmitida dependiendo de cada canal, aunque también se podría pensar en varias fuentes con distinta longitud de onda para cada canal, pero esto resultaría poco práctico y de gran costo.

En este caso no se piensa en una red WDM, ya que aumentaría considerablemente el costo y el número de dispositivos requeridos en la interfaz óptica (multiplexores, demultiplexores, ruteador y en general, el número de unidades remotas) [14].

VENTAJAS DE UTILIZAR MODULADORES MOEMS

Los moduladores de tipo obturador mecánico-óptico a macro-escala consumen una parte sustancial de la potencia, p.ej. el modelo 360 OEM de Boston Electronics Corporation, requiere voltajes en el rango de 7 -15 Volts DC [50], de esta forma se reduce la eficiencia total de conversión de la UR [48], además las dimensiones son considerablemente grandes (43 x 30 x 14 mm^3). La ventaja es mayor cuando se utilizan moduladores a microescala, debido a que los moduladores MEMS no requieren gran cantidad de corriente (~μA) y por ende de energía (~mW) aunque pueden llegar a requerir grandes voltajes de actuación, p.ej. 5-90 V. Por lo que en este respecto, se piensa que las cualidades inherentes a los MOEMS pueden ser explotadas para mejorar el diseño, incluyendo miniaturización de la UR.

En este caso la ventaja adicional de utilizar un modulador MOEMS reflexivo es que podría facilitar la integración en un chip de silicio, ya que se elimina la construcción de un elemento que no se construye normalmente en silicio, es decir, la fuente que se requeriría para la UR.

LIMITACIONES DEL MODULADOR

El ancho de banda de nuestro modulador es el que nos limitará en el sistema, no será el ancho de banda de la fuente ni de la que permita la fibra óptica, esto se debe a las limitaciones propias del modulador electromecánico (velocidad de modulación) ya que las fuentes que existen en la actualidad permiten BW (ancho de banda) grandes, así como las fibras ópticas de índice gradual fabricadas. Uno de los requisitos para que el sistema pueda funcionar es que la anchura espectral de la fuente sea mayor a la del modulador.

$$BW_f > BW_m \quad \ldots (3.3)$$

CARACTERÍSTICAS QUE DEBE TENER EL MODULADOR DE LA UR

Es necesario conocer algunas de las características de trabajo que requiere el modulador reflexivo de la UR, uno muy importante es que permita el paso de la potencia que requiere el sensor, otro el es ancho de banda que maneja, el cual se estudiará para cada caso propuesto posteriormente. Otras características buscadas son:

- Integrar interfaz en chip con tecnologías de fabricación estándares de micromaquinado, junto con fotoconvertidor (dentro de lo posible).
- Una de las característica principales es que el coeficiente de reflexión sea lo máximo posible durante el estado de reflexión y coeficiente de transmisión máximo posible durante el estado transparente.
- Requerimientos básicos para el modulador: 90% del tiempo debe estar en estado transparente (90% transparente mínimo) 10% del tiempo debe estar en estado reflexivo (90% reflexivo mínimo).
- No son necesarios los multiplexores, ya que solo utilizaremos una longitud de onda (de la fuente, del modulador y del fotodetector).
- Desventaja: una sola fibra óptica para mandar la señal de alimentación, la información de control y los datos.
- Ventaja: existe perfecta sincronización en el sistema, ya que cuando se transmite, no se recibe (modulado) y viceversa, por tanto la desventaja anterior no influye demasiado.
- El control de sincronización se encuentra en el modulo central.
- Otra desventaja: tenemos limitación en banda porque es modulador mecánico, la ventaja de este punto, es que para sensores esto no es un problema, ya que no requieren grandes anchos de banda, ni velocidades de transmisión de datos muy grande.
- El módulo lejano de preferencia debe ser fabricado únicamente en tecnología de Si, ya que es más económico y hay menores pérdidas.
- La ventaja de que sea Modulador Reflexivo Mecánico es que es un dispositivo potencial para aplicar la tecnología MOEMS.
- Diseñar una interfaz pasiva; es decir, que no se necesite fuente óptica en la unidad remota y que sea capaz de alimentar al modulador y al sensor.
- Otras fuertes ventajas son que si utilizamos una sola fibra, podemos usar un fotodetector de Si, no necesitamos dispositivos o componentes extras (además del modulador y el fotodiodo) como multiplexor o acoplador a la fibra, otra ventaja es que tiene los componentes básicos que se requieren (modulador y fotodetector –que además es transductor-).

3.7 Fuente óptica: Conversión E/O

ESTUDIO DE LA FUENTE ÓPTICA

El estudio de la fuente óptica es de gran importancia para poder optimar los costos del sistema y siempre se debe dedicar un tiempo a su estudio. En la actualidad existen una gran variedad de fuentes ópticas, que varían tanto en precios como en características.

Un estudio profundo de las fuentes ópticas que existen en el mercado actual es una tarea difícil, el fabricante no siempre proporciona los precios reales, además a veces los precios bajos pueden ser engañosos ya que pueden significar que las fuentes son muy utilizadas comercialmente o que las fuentes ya no están siendo fabricadas, así que dejamos esta tarea a los estudiosos en la materia.

Se va a considerar que una fuente óptica es cara, cuando su precio rebase el 10% del costo total del sistema. Así que bajo este criterio, se consideran dos ejemplos que existen actualmente en el mercado, uno para fibra monomodo y otro para multimodo (ver Cap. 4). Esto, como punto de referencia y comparación en el análisis de nuestra fuente, pues también es importante en el estudio de las pérdidas en los dos tipos de fibras.

Puntos importantes a tomar en cuenta para la elección de la fuente:

- Potencia óptica, debe ser la suficiente para alimentar nuestra unidad remota (cientos de mW)
- Precio, máx. 10% precio total del sistema
- Banda óptica en que trabaja
- Ancho de Banda, si es lo suficientemente grande (mayor que la del modulador) es aceptable.

Otro aspecto importante para la optimación de costos del sistema es saber costos de fuente y de fotodetector por separado (es decir, sin integrarse a otro sistema mayor) y comprarlos de esta manera, diseñar los elementos restantes (modulador, convertidor, etc.).

FUNCIONES BÁSICAS:

Las fuentes ópticas deben cumplir con varias características, pero principalmente se buscan dos:

- Proveer suficiente radiación de energía a una longitud de onda determinada o sobre un rango de ellas.
- Mantener una intensidad de luz constante o regulada por un intervalo de tiempo adecuado para la utilización del dispositivo.

FUENTE ÓPTICA IDEAL PARA ALIMENTACIÓN

Las fuentes ópticas comúnmente utilizadas para los sistemas alimentados ópticamente son los diodos láser de alta potencia (*High-Power Laser Diode, HPLD*) ya que son compactos y tienen gran eficiencia de conversión de energía E/O, por lo tanto son los más apropiados para este tipo de aplicación [21], [22].

$$\eta_{E/O} = \frac{Potencia\ Óptica\ de\ Salida}{Potencia\ Eléctrica\ de\ Entrada} \qquad \ldots(3.4)$$

Los HPLD son fuentes con alta potencia óptica de salida y alta confiabilidad. A diferencia de los LDs, los HPLDs no requieren altas potencias o bajo ruido. Existen tres candidatos posibles como fuente de alimentación en términos de tipo de material y longitud de onda requeridos:

- AlGaAs/GaAs para el rango de 800 – 850 nm
- InGaAs/GaAs para 940 – 980 nm
- InGaAsP/InP para 1480 nm

La tabla 3.4 muestra el desempeño típico de los HPLDs. Los HPLDs en el rango de los 808-nm a 940-nm tienen una máxima potencia de salida desde cientos de mW hasta varios W.

Por el otro lado, la máxima potencia óptica de salida de los HPLDs en el rango de 940-nm y 980-nm son como máximo varios cientos de mW, esto se debe a que tienen un único modo espacial lo que restringe la potencia máxima de salida.

Los HPLDs son generalmente del tipo Fabry-Perot (con superficies reflexivas en su interior, por lo que la luz sufre varias reflexiones antes de salir) lo que permite que la luz proveniente de ellos esté en modo multilongitudinal. Este tipo de luz tiene características efectivas en la supresión de la generación de la dispersión estimulada de Brillouin bajo condiciones de alta intensidad de potencia en la fibra óptica.

Tabla 3.4 Desempeño típico de los diodos láser de alta potencia [21]

Material	λ [nm]	Máxima Potencia	Modo Longitudinal / Espacial	Eficiencia de Conversión E/O	Fibra de acoplamiento (pérdidas por acoplamiento)
AlGaAs/GaAs	808	1 W ~ 20 W	Multi / Multi	41.9 %	MMF (~ 0 dB)
InGaAs/GaAs	940 980			40 – 50 %	
InGaAsP/InP	1480	< 1 W	Multi / Mono	24 %	SMF (~ 2 dB)

La máxima conversión de energía E/O para un HPLD a los 808-nm es 41.9% [21] y para los 1480-nm es igual a 24.0% [21] debido a las pérdidas por acoplamiento a la fibra. Las pérdidas por acoplamiento de los HPLD (en modo monoespacial) con fibras monomodo es 2–4 dB.

En cambio, las pérdidas por acoplamiento de HPLDs a fibras multimodo reducen notablemente las pérdidas por acoplamiento hasta ser de 0 dB.

FUENTE ÓPTICA IDEAL PARA LA TRANSMISIÓN DE SEÑALES

Los sistemas de comunicación han utilizado con éxito por mucho tiempo a los LDs como fuentes ópticas ideales para la transmisión de señales, debido a su alto desempeño y confiabilidad, además de que están disponibles en un amplio rango de longitudes de onda [21] algunos diseñados especialmente para acoplarse a fibras monomodo y otros para fibras multimodo.

Otro tipo de fuentes (no ideales) para la transmisión de señales son los LEDs, son más baratos y solo están disponibles para fibras multimodo. A continuación se muestra una tabla comparativa (Tabla 3.5) de las características generales de ambos tipos de fuentes.

Tabla 3.5 – Comparación entre LEDs y LDs [45]

Característica	LEDs	LDs
Potencia de Salida	Linealmente proporcional a la corriente de manejo	Proporcional a la corriente por arriba de la I threshold
Corriente	Corriente de manejo: 50 a 100 mA Pico	Corriente de Threshold: 5 a 40 mA
Potencia Acoplada	Moderada	Alta
Velocidad de Tx	Baja	Rápida
Patrón de salida	Más alto	Menor
Ancho de Banda	Moderado	Alto
Longitudes de onda disponibles	0.66 a 1.65 µm	0.78 a 1.65 µm
Anchura espectral	Mayor (40-190 nm FWHM)	Menor (0.00001 nm a 10 nm FWHM)
Tipo de Fibra óptica	Sólo Multimodo	SM, MM
Facilidad de uso	Fácil	Más difícil
Tiempo de vida	Mayor	Grande
Costo	Bajo ($5-$300)	Alto ($100-$10,000)

El costo está en dólares americanos ($).

Observación: El hecho de que existan fuentes óptimas tanto para la alimentación como para la Tx (transmisión) de señales, no significa que se descarte la posibilidad de utilizar una sola para ambas funciones.

3.8 Fotodetectores: Conversión O/E

Análogo al estudio de las fuentes, también debe realizarse el análisis del tipo de fotodetector óptimo para cada caso.

La conversión fotovoltaica es el proceso mediante el cual la luz se convierte en energía eléctrica. En el mejor de los casos, se obtiene una eficiencia de un 15% [27] utilizando un fotodiodo de silicio (con un fotodiodo de GaAr, arseniuro de galio, la eficiencia de conversión mejora en un factor de dos) así que menos de una sexta parte de la potencia incidente en el foto-convertidor estará disponible para el circuito que se esté manejando. La eficiencia de conversión O/E se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\eta_{O/E} = \frac{Potencia\ Eléctrica\ de\ Salida}{Potencia\ Óptica\ de\ Entrada} \qquad \ldots(3.5)$$

La eficiencia de conversión, en el caso (O/E), es la medida de la capacidad del transductor de potencia, de cambiar la energía óptica a eléctrica. La potencia óptica de entrada es la potencia que sale de la fibra. La potencia óptica de salida es el producto del voltaje y la corriente de salida del dispositivo, tomado de su curva de voltaje-corriente (curva IV). El punto de potencia máxima está representado por: $P_{máx} = (V_{oc})x(I_{sc})x(FF)$. Donde: V_{oc} = voltaje de circuito abierto, I_{sc} = corriente de corto circuito y FF = fill factor. Este factor depende de I_{sc}, de la calidad del material y del diseño del dispositivo, es una medida de la cuadratura de la curva IV [46].

FOTODETECTOR IDEAL PARA ALIMENTACIÓN

Las características de las celdas fotovoltaicas (*PV cells*) las hacen idóneas especialmente para las grandes intensidades de luz provenientes de un HPLD, ya que se pueden obtener altas conversiones de eficiencia bajo condiciones de bajos valores de resistencias en serie [22].

Las celdas fotovoltaicas han sido diseñadas para convertir la luz proveniente del Sol en potencia eléctrica, la luz del Sol se caracteriza por tener un amplio espectro y el Sol "derrama" todo el tiempo sobre la Tierra una densidad de potencia de 1000 W/m^2, por ello las celdas fotovoltaicas se caracterizan por tener grandes áreas activas. El voltaje de circuito abierto que puede proveer una celda PV, depende de la banda de energía inherente al material con el que esté fabricada la celda (Si, GaAs, InGaAs). La eficiencia de conversión de una celda fotovoltaica puede ser mayor con la luz de un HPLD que para la luz solar, si el pico de sensibilidad de la celda fotovoltaica es diseñado para coincidir con la longitud de onda del HPLD.

La tabla 3.6 tiene a manera de sumario el desempeño medido [21] de varias celdas fotovoltaicas bajo altas intensidades de luz proveniente de un HPLD.

Tabla 3.6 Desempeño medido de celdas fotovoltaicas bajo luz de un HPLD [21].

Material	Longitud de onda sensible [nm]	Banda de energía E_g [eV]	Voltaje en circuito abierto V_{oc} [V]	Eficiencia de conversión (Intensidad óptica)	Área activa [cm^2]
sc-Si*	800-1000	1.12	0.59 (@808 nm)	20% (@100 mW/cm^2)	1.9
GaAs	800-900	1.42	1.05 (@808 nm)	30 % (@100 mW/cm^2)	0.21
InGaAs	1300-1600	0.83	0.48 (@1480 nm)	22.2% (@4.21 W/cm^2)	0.01
Ge	1300-1600	0.66	0.22 (@1480 nm)	9.26% (@12.2 mW/cm^2)	0.78

*Silicio monocristalino.

Lo que muestra la tabla son características como el área activa rectangular de la celda PV de tipo np de silicio monocristalino (*single cristaline,* sc-Si) y la de GaAs de tipo pn son 1.9 cm^2 y 0.21 cm^2 con electrodos a intervalos de 2 mm y 0.2 mm, respectivamente. Ambos tipos de celdas fueron iluminados y probados a 808 nm [21]. También se probaron celdas de InGaAs y Ge a una longitud de onda de 1480 nm. La celda PV de InGaAs tenía un área activa de 0.01 cm^2. La celda de Ge tenía un área de 0.78 cm^2. Nótese que la intensidad de luz que ilumina a las celdas es en ocasiones mucho mayor a la del Sol. Las celdas fotovoltaicas de GaAs tienen la ventaja de que fácilmente pueden obtener altos voltajes con menor número de celdas colocadas en serie. El voltaje eléctrico de salida de una celda PV no cambia con la fluctuación de potencia de un HPLD.

La potencia eléctrica de alimentación de la UR depende de la eficiencia obtenida por este tipo de fotoconvertidores.

FOTODETECTOR IDEAL PARA RX DE SEÑALES

El desarrollo de las comunicaciones vía fibra óptica ha permitido el avance y optimación de un tipo de fuentes ópticas denominadas fotodiodos FD (*photodiodes*, PD), con características como gran ancho de banda, alta sensibilidad y bajas potencias de salida eléctrica [21]. Las áreas activas de los PD difieren de aquéllas de las celdas PV, ya que los primeros tienen pequeñas áreas activas optimadas para la Rx de datos provenientes de una FO.

3.9 Alimentación de la UR

La UR requiere de una fuente de potencia eléctrica para alimentar los circuitos, sensores y/o actuadores conectados a ella. Esta potencia puede provenir de una fuente de DC o de una batería "a bordo" de la unidad sensora. No obstante, se pueden encontrar numerosas ventajas si la UR obtiene su energía eléctrica de la fuente óptica de la UC, como por ejemplo: facilidad en mantenimiento y aislamiento eléctrico [16] ventajas de los sistemas alimentados ópticamente, pero sobre todo, al no contar con una fuente óptica en la unidad remota se reduce drásticamente el costo de la interfaz.

El principal problema que se encuentra con los sensores alimentados ópticamente es que la conversión de energía óptica-eléctrica es baja [16] a continuación se estudian algunos ejemplos de eficiencias de conversión alcanzadas por fotodiodos (o celdas PV) o arreglos de ellos para elevar la energía eléctrica con la que se alimentarán la UR.

Se debe recordar que el voltaje generado en un diodo de Si no excede los 0.7 V en circuito abierto, además el voltaje en el punto máximo de eficiencia de conversión (determinado por la carga y la potencia de la luz incidente) se encuentra alrededor de los 0.5 V. Por esta razón, es claro afirmar que para una aplicación como fuente de potencia para un sensor, se requiere aumentar el voltaje generado (ver Tabla 1) ya sea utilizando un conjunto de foto-convertidores conectados en serie o introduciendo un convertidor de voltaje. Ambas aproximaciones influyen sobre la eficiencia de conversión de la fuente de alimentación.

Adicionalmente a las pérdidas inherentes por conversión de energía (óptica a eléctrica), existen pérdidas por acoplamiento de la fuente (LD, LED, ò HPLD) y el extremo de la fibra, por conectores, divisores de potencia (*splitter*), por atenuación en la fibra, etc. y deben ser consideradas en el estudio de las pérdidas introducidas en el sistema [27].

OPCIONES VIABLES

A continuación se requiere encontrar la manera de optimar la energía eléctrica que alimenta a la UR. Como se ha mencionado con anterioridad, el voltaje generado por un solo fotodiodo no es suficiente para la alimentación del circuito. De aquí que se manejen dos soluciones, principalmente:

- Varios fotodiodos conectados en serie (~ batería fotovoltaica).
- El arreglo de un fotodiodo junto con un convertidor de voltaje.

A partir de estas dos, se analizarán otras posibilidades que se derivan de ellas.

A) FOTODIODOS CONECTADOS EN SERIE

La solución más obvia y práctica para el suministro de potencia es la conexión de varios fotodiodos (o celdas PVs) conectados en serie, de tal manera que puedan proveer el voltaje requerido (ver Fig.3.11). El trabajo de Pember et. al. [27] menciona que existe ventaja al trabajar con la luz sin modular en este caso, sin embargo el precio a pagar es la eficiencia. Cuando se utilizan varias URs y una sola fuente óptica en la UC se presentan pérdidas ya que la potencia repartida a cada una de las unidades remotas no será la misma, de esta manera la serie de fotodiodos que se encuentren en cada UR recibirán una iluminación desigual, causando ineficiencia de conversión de energía. Sin embargo, para una sola UR conectada a la UC, no existen pérdidas por división de potencia óptica.

El arreglo de fotodiodos, es eléctricamente similar a la batería fotovoltaica, con la diferencia de que encierra en un solo substrato varios elementos fotoreactivos que son conectados en serie. Un ejemplo de este tipo de fuentes fabricado con GaAr provee una alimentación de 5V DC, con una eficiencia de conversión mayor al 30% [27].

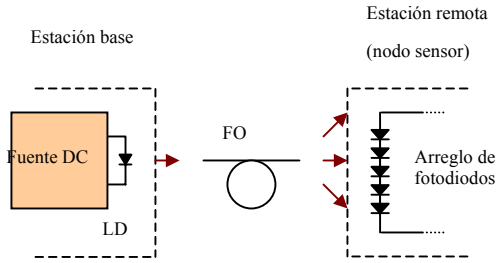


Fig.3.11 Sistema de alimentación óptica mediante un arreglo de fotodiodos en serie.

VENTAJAS

Esta solución es práctica, ya que dependiendo del voltaje requerido a la salida se aumenta el número de fotoconvertidores conectados en serie (ver Fig. 3.11 y 3.12). Para que la iluminación en cada uno de los fotoconvertidores sea uniforme se puede utilizar un acoplador de 1 x N, donde N es el número de convertidores, claro que esto es opcional.

El arreglo puede optimarse para la Rx de luz a través de una FO. Por ejemplo, se puede tener un arreglo dispuesto de tal modo que se forme una circunferencia que emularía la proyección de la luz proveniente de la fibra óptica [6], [17], [51]. En cuyo caso, se facilitaría su aplicación para un sistema que utilice un modulador MOEMS.

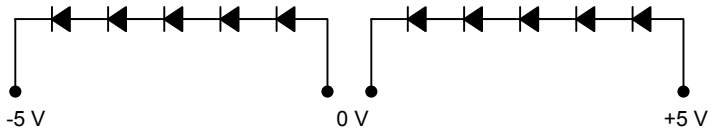


Fig.3.12 Arreglo fotovoltaico

DESVENTAJAS

El costo del arreglo depende del material y el tipo de fabricación que utilicen los fotodiodos. Otra desventaja más es que pueden existir pérdidas ópticas significativas durante el acoplamiento de la fibra óptica y el arreglo como lo mencionan Ref. [14], [47] - [50].

Se tienen registros que se puede alcanzar hasta 41 % de eficiencia de conversión O/E por el arreglo y una eficiencia de 27% del total del sistema de alimentación, con acoplador y arreglo de fotodiodos [47]. El sistema de alimentación se debe optimizar para tener la mayor eficiencia de conversión.

Otra desventaja que se presenta en este tipo de arreglos es que si aumenta el número de fotoconvertidores, también aumentará la resistencia en serie del arreglo y por consiguiente disminuirá la eficiencia de conversión [51].

B) ARREGLO DE UN FOTODIODO JUNTO CON UN CONVERTIDOR DE VOLTAJE

Un solo diodo puede proveer una importante fuente de alimentación eléctrica si junto con él se utiliza un convertidor de voltaje (Fig. 3.14) [27]. La ventaja de estos métodos es que son óptica y eléctricamente simples, la luz debe ser modulada con una frecuencia y un ciclo de trabajo tales que nos brinden la máxima eficiencia de conversión (que depende de la carga y del nivel de potencia óptica).

Se puede utilizar la luz modulada en la transmisión óptica de potencia hacia una UR. Esto es análogo a la utilización de corriente alterna (en contraposición de la CD) en las líneas de potencia eléctrica y el beneficio es similar; para ser más exactos que el voltaje puede ser levantado al nivel deseado mediante la utilización de un transformador.

El convertidor de voltaje se puede reemplazar por un transformador elevador (*step-up*) este método presenta la ventaja de que la eficiencia es menos dependiente de las condiciones de la carga, sin embargo es menor la eficiencia. Cabe hacer notar, que en ambas aproximaciones el fotodiodo requiere que la luz esté modulada (con un ciclo de trabajo de 50:50 para el caso del transformador) [27]. Otra fuente de alimentación para la UR consiste en un fotodiodo, un transformador, un rectificador y un regulador de potencia. La eficiencia de conversión de energía total de esta fuente de alimentación es del 9.7% para potencias ópticas incidentes entre 1 mW y 2 mW [27].

Otra técnica, es un arreglo de un obturador mecánico-óptico, un fotodiodo (modulador), un transformador y un rectificador (ver Fig.3.13). Así la luz que llega al fotodiodo y el voltaje de salida de este fotodiodo es levantado al nivel requerido [48].

Independientemente de la opción elegida, de manera adicional se puede utilizar un capacitor para almacenar la energía mientras el sensor se encuentre en su estado apagado (la mayor parte del tiempo).

VENTAJAS

Se disminuye el número de elementos fotoconvertidores al mínimo (solamente uno). Las soluciones de alimentación que involucran la utilización de un fotodiodo y un convertidor de voltaje o un transformador (y demás elementos) puede ser una ventaja cuando el sistema de alimentación utiliza elementos ya prefabricados.

DESVENTAJA

Arriba se menciona que es una ventaja cuando utilizan elementos prefabricados que puede ser un problema la fabricación integral de todos estos elementos, es decir bajo una misma tecnología de fabricación.

Para la fabricación de transformadores se requieren materiales magnéticos cuyas características son difíciles de mantener con el tiempo. Además las técnicas de microfabricación de transformadores no son sencillas, principalmente por el tipo de material que utilizan.

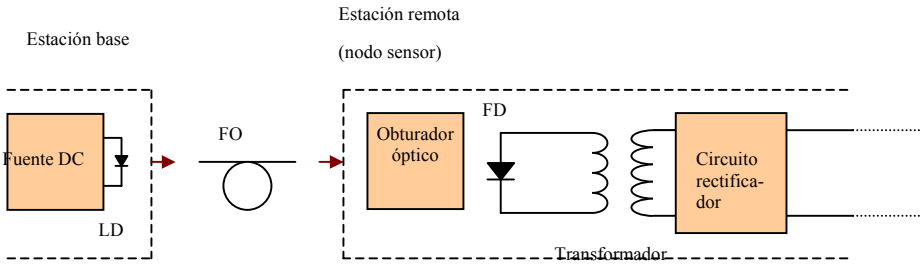


Fig.3.13 Alimentación óptica mediante un arreglo de fotodiodo, obturador óptico, transformador y circuito rectificador [48].

Una opción optimada (mediante trasformador) podría ser el arreglo de un fotodiodo, un transformador y un circuito rectificador [27]. Este sistema (Fig.3.15) emplea el método de igualar las impedancias de la carga y el fotodiodo, por medio de la conversión opto-eléctrica de un pulso de luz con un fotodiodo y el levantamiento del voltaje mediante un transformador. Con este esquema optimado de alimentación óptica para sensores, se obtiene una eficiencia de conversión de energía (O/E) de 14.8% [27], lo cual se puede observar es muy similar a la alcanzada por un fotodiodo de Si, de 15% [27].

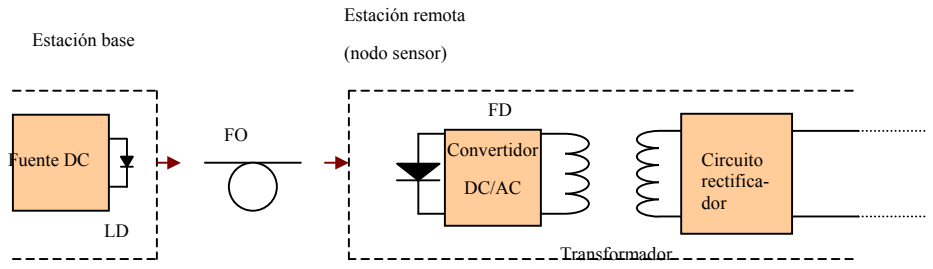


Fig.3.14 Alimentación óptica mediante un arreglo de fotodiodo, convertidor, transformador y circuito rectificador.

Sin embargo, no se está tomando en cuenta que un arreglo de fotodiodos puede llegar a tener una eficiencia mayor que un fotodiodo con un transformador.

En esta técnica, la potencia óptica es modulada en la fuente óptica de la estación base, donde se considera en menor grado la eficiencia, ya que la potencia es mayor ahí. La luz es modulada ya sea en amplitud (onda sinusoidal) o en pulsos (onda cuadrada, "encendido" la primera mitad del ciclo y "apagado" en la mitad restante). La luz modulada llega al fotodiodo (UR) cuya salida es modulada. La salida modulada del fotodiodo alimenta directamente a un transformador debido a la modulación, ya no es necesario procesar la señal con un obturador mecánico-óptico [48].

VENTAJAS

Mostrado en la Fig. 3.15, este método está optimizado para obtener una alta conversión de energía durante la utilización de transformadores. Además que, utilizando una fuente modulada en pulsos se pueden disminuir significativamente las pérdidas eléctricas y ópticas. La luz de la fuente es modulada en pulsos rectangulares se transmite a través de la fibra óptica y convertida en señales de corriente por un fotodiodo. Las señales de AC son levantadas al voltaje requerido por el sensor mediante un transformador, posteriormente convertido a una señal de DC mediante un circuito rectificador, esta señal de DC es la que alimentará al sensor.

En la práctica, la conversión de eficiencia no será mayor a menos que se tenga cuidado en el diseño de los circuitos transformador y rectificador. Otra ventaja adicional, es que requiere de la señal modulada en la entrada del fotodiodo, con lo cual se tiene una segunda opción, se puede utilizar un modulador óptico reflexivo en la UR (ver Fig.3.15), para que la interfaz utilice uno ó dos medios de comunicación (una sola fibra óptica, o dos) y se optimice el número de dispositivos requeridos.

Este tipo de alimentación permite un enlace de fibra óptica entre la unidad central y la unidad remota de ~1 km [16], lo cual es más que suficiente para la aplicación de sensores (típicamente < 20 m, a lo máximo 100 m) [27], [48].

DESVENTAJA

La principal desventaja es la fabricación integral de todo este sistema de alimentación de la UR.

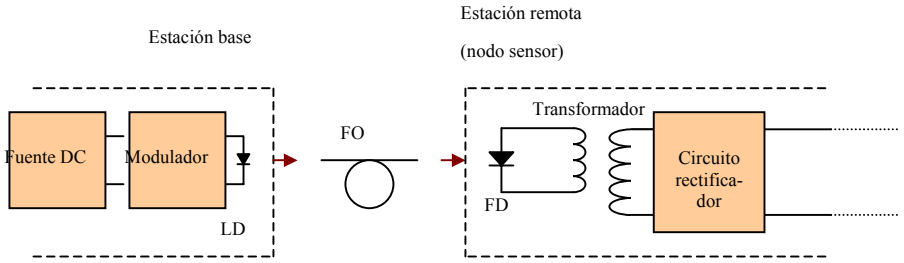


Fig. 3.15 Sistema de alimentación de la unidad sensora mediante luz modulada enviada a un arreglo de un fotodiodo, transformador y circuito rectificador.

COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN

El micro modulador MOEMS reflexivo puede utilizarse tanto en la opción del arreglo de fotodetectores, como en la del fotodetector y su convertidor de voltaje (o transformador y demás elementos) siempre y cuando se coloque entre la fibra y el elemento fotoconvertidor. La principal ventaja de utilizar un modulador MOEMS en la UR es que se reduce significativamente costo y número de elementos en la interfaz.

Tabla 3.7 Características de varias opciones para la alimentación de la UR [27]

Fuente de alimentación	Eficiencia de conversión O/E	Potencia alcanzada para alimentar al sensor	Señal Modulada
Fotodiodo de Si	20%	~0.5V	No
Fotodiodo de GaAr	30%	~0.7V	No
Arreglo de fotodiodos de GaAr en un solo substrato	>30%	5V	No
Arreglo de fotodiodo, transformador, rectificador y un micro-regulador de potencia	9. 7%	3.6 V	Si
Arreglo de fotodiodo*, transformador y rectificador.	14. 8%		Si

* Depende de las características del material semiconductor de fabricación [16]

Como podemos observar en la tabla anterior (Tabla 3.7) la mejor eficiencia de conversión está dada por el arreglo de fotodiodos. Para poder entender, porqué el es una buena opción hay que analizar comparativamente las pérdidas por conversión O/E que se pueden tener cuando se tiene un arreglo de fotodiodos (o celdas PV) y cuando se tiene un FD con su convertidor DC-DC. Esto se ejemplifica con la siguiente gráfica en la que se muestran las eficiencias obtenidas por ambos métodos:

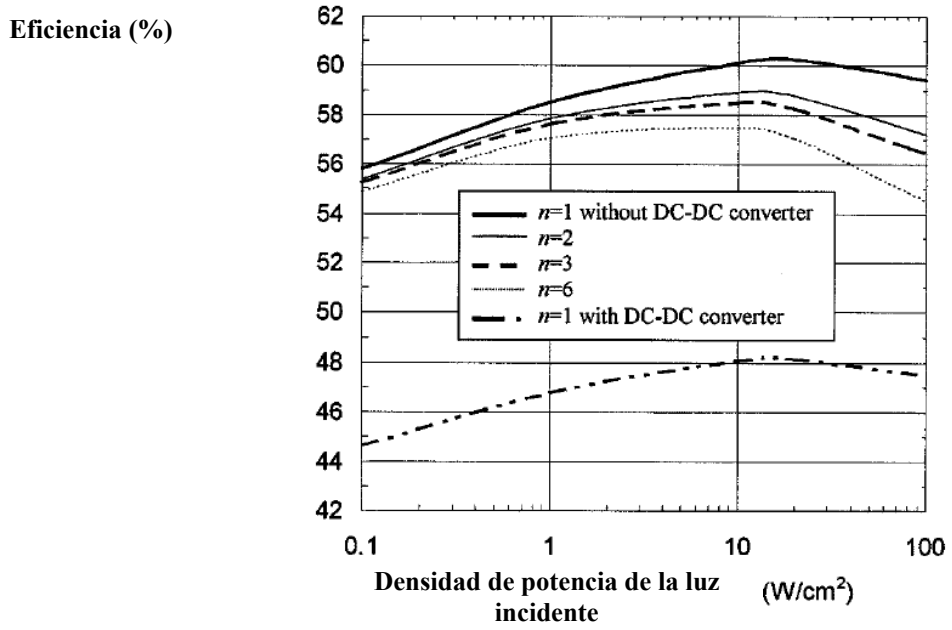


Fig. 3.16 Eficiencia de celdas PV de GaAs para diferentes números de celdas n = 1, 2, 3, 6 comparadas con la eficiencia obtenida si a una PV se le coloca un convertidor DC-DC. [51]

Como puede observarse en la Fig. 3.16 se puede obtener mayor eficiencia con un arreglo de celdas PV que con un solo PV y su convertidor DC-DC.

Sin embargo, por la tabla 3.7 también encontramos que el arreglo en serie de fotodiodos, no necesitan señal modulada, esto impide enviar una señal de dc (alimentación) y la señal de ac (control) en el mismo medio (una sola fibra), si se escoge esta opción. En cambio, el fotodiodo y el transformador si requieren la señal modulada esto permite el envío de señales de control y alimentación en la misma fibra.

Cabe mencionar que en este caso, resultaría poco práctico (y costoso) tratar de integrar diferentes tipos de fabricación, p. ej., la requerida por el modulador MOEMS y la de las celdas PV de GaAs por su eficiencia de conversión O/E mayor, en cuyo caso lo más factible sería pensar en el proceso denominado de "pegado" ("*glueing*") para que tanto el MOEMS como las celdas PVs (de distinto tipo de material el sustrato y distinto tipo de fabricación) se encuentren en dos chips pegados.

Existe otra solución a este respecto, mucho más prometedora: fabricar celdas PVs de Si (no de GaAs) de esta manera se podría ganar en facilidad de integración, aunque se sacrificaría algo de eficiencia de conversión de energía O/E, ya que se tiene registrado que las celdas de GaAs conectadas en serie presentan mayor eficiencia que aquéllas fabricadas en Si, particularmente para las longitudes de onda alrededor de los 830 nm [51], mientras que la mayor eficiencia para las celdas PVs de Si será mayor en las longitudes de onda alrededor de los 950 nm [21].

3.10 Tipo de fibra

Existen dos clases importantes de fibras ópticas utilizadas, las monomodo y las multimodo, que se verán a continuación desde un punto de vista de las telecomunicaciones, únicamente para estudiar sus parámetros y características. La primera está asociada a aplicaciones en telecomunicaciones que necesitan de un gran ancho de banda y gran distancia en el enlace. En cambio, la fibra multimodo es asociada a sistemas de comunicación de datos, baja velocidad de transferencia de datos, y longitudes cortas en el enlace. La terminología monomodo y multimodo se refiere al número de modos permitidos en la fibra, así por ejemplo, como la fibra monomodo tiene un diámetro pequeño respecto a la multimodo, solo el haz de luz con una trayectoria recta (un modo) será propagado a través de la fibra [53]. Las fibras multimodo tienen las ventajas de: (1) fácil manejo; (2) menor costo de los componentes (conectores, repetidores, etc.); (3) además las dimensiones de sus núcleos son mayores a las monomodo, permitiendo un mejor acoplamiento de receptores y transmisores, esto facilita a los operadores preparar las conexiones físicas. Adicionalmente las fibras multimodo tienen la posibilidad de transportar mayores potencias ópticas, por las fuentes con las que cuentan.

Tabla 3.8 Parámetros de las fibras monomodo [55].

Tipo de Fibra	Atenuación, [dB/km]		Dispersión cromática, [ps/km·nm]	
	1310 nm	1550 nm	1310 nm	1550 nm
9/125 SM Convencional	0.35	0.25	0	17

Fibra Multimodo	N_1	Diámetro del Núcleo (μm)	Diámetro de la Cubierta (μm)	Diámetro del Recubrimiento exterior (μm)	AN	Rango de λ de operación (nm)	Atenuación (dB/km)	Dispersión modal en 1 km (ns) [aprox.]	Ancho de banda	Longitud estándar (km)	Fabricante	Costo*	Aplicaciones	Notas
50/125 GI	1.49	50	125	245 (CPC6)	0.20	400 – 1800	0.5 @ 1300 nm solamente, 2.5/0.8 @ 850/1300 nm	40 @ 850/1300 nm	500/500 MHz-km @ 850/1300 nm	1.1 – 4.4	Corning	10 m: $50 25 m: $125	LAN, WAN (datos, voz y/o video)	
62.5/125 GI	1.49	62.5	125	245 (CPC)	0.275	400 – 1800	≤ 3.0/0.7 @ 850/1300 nm	80 @ 850/1300 nm	160/500 MHz-km 200/500 MHz-km @ 850/1300 nm	2.2 – 8.8	Corning		Fibra más común para LAN (voz, datos y/o video)	LEDs, VCSELs 850 nm, Lasers CD 780 nm, y Lasers FP 1300 nm.
100/140 GI	1.49	100	140	245	0.29	400 – 1800	≤ 4.0 @ 850 nm ≤ 1.5 @ 1300 nm	90 @ 850/1300 nm	≥100 MHz-km @ 850/1300 nm	1.0 – 2.2	OFS	10 m: $40 25 m: $100		
50/125 SI	Sílice, n_1=1.46	50	125	N/A (Sílice fundido)	0.22	200 – 900	<100 @ 320-900 nm <1000 @ 220-300 nm	60			Estándar oficial			
100/140 SI	Sílice, n_1=1.46	100	140		0.2-0.3		5 @ 1300 nm		20 MHz-km (22 nm/km)					
100/140 SI	Sílice, n_1=1.46	100	140	N/A (Sílice fundido)	0.22	200 – 900	<100 @ 320-900 nm <1000 @ 220-300 nm	60			Estándar oficial			
200/240 SI	Sílice, n_1=1.46	200	240	260 (Sílice fundido)	0.22		<100 @ 380-900 nm <1000 @ 250-380 nm	60			Estándar oficial			
980/1000 SI Plástico	Plástico	980	1000		0.5		0.2 dB/m @ 660 nm		(110 ns/km)					

Tabla 3.9 Comparación de las características de las fibras multimodo [55], [59], [61], [62]. Notas: n_1 = índice de refracción del material del núcleo. * Los costos se obtuvieron de la página web www.edmundoptics.com

3.11 Análisis del tipo de configuración

Uno de los principales objetivos de los sensores es captar información del medio externo (generalmente en condiciones extremas), y mandarla hacia la UC. Los sistemas que alimentan ópticamente sensores manejan tres tipos diferentes de flujos: (1) flujo de alimentación óptica, mediante la cual se activará toda la UR, (2) flujo de control, por la que se mandarán datos de control (de interrogación y direccionamiento) hacia la UR; (3) y flujo de datos, que enviará el sensor (o actuador) a la UC.

TIPOS DE CONFIGURACIONES POSIBLES DE LA INTERFAZ

A partir del punto anterior, se derivan tres configuraciones posibles para el sistema, mediante la utilización de:

1) Tres fibras ópticas, una para la alimentación de la unidad remota, otra para los datos de control, y la última para los datos que brinde el sensor.
2) Dos fibras ópticas, una para la alimentación y el control, y la otra para los datos.
3) Una fibra óptica, una para todo.

CASO 1) TRES FIBRAS ÓPTICAS

El sistema mostrado en la Fig. 3.17 representa una red de varios sensores, conectados entre sí con una configuración de árbol que utilizan tres fibras ópticas.

El sensor consiste (ver Fig.3.18) en un fotodiodo como entrada del flujo de control, conectado mediante un simple amplificador a un LED que transmitirá los datos. La retroalimentación del amplificador contiene un transductor resonante. Se eligió un LED a la salida del amplificador por sus bajos requerimientos de corriente. La potencia para el amplificador es proporcionada por la fibra óptica de alimentación.

El sensor trabaja en dos modos de operación: (a) no activo, en espera del código de direccionamiento correcto, este es el modo que debe estar la mayor parte del tiempo para ahorrar energía; y (b) en resonancia, con máximo flujo de corriente. Las URs pueden almacenar la potencia eléctrica durante el modo no activo, para ello se puede utilizar un capacitor. Así, la potencia eléctrica convertida por el fotodiodo, y por lo consiguiente, la potencia óptica en la fibra óptica no debe ser tan grande como el valor máximo de potencia que requiere el sensor.

La red de sensores similares están multiplexados de tal forma puedan ser interrogados y alimentados desde una unidad de control en común. Existen varias topologías que pueden ser utilizadas en redes de sensores alimentados ópticamente. En general, el diseño y modo de operación del sensor es el que determina el tipo de topología utilizada. Por ejemplo, un arreglo lineal de sensores (cada sensor se conecta vía fibra óptica monomodo a un "*backbone*" que enlaza a todos los sensores con la unidad de control) podría ser más apropiado para la multiplexación en tiempo de una red de sensores ópticos reflexivos. En el caso de sensores transmisivos (transmisivo, esto es, en el sentido de que el sensor tiene puntos de entrada y salida ópticas diferentes) se tiene que la estructura de árbol es más apropiada y provee flexibilidad a la red. [27].

Como puede observarse en la Fig. 3.18, este sistema conforma un enlace activo-activo, ya que presenta en su UR una fuente para transmitir datos de regreso a la UC. Con la configuración de tres fibras se puede utilizar la fibra multimodo de 62.5, 100 ó 200 μm de radio del núcleo, dependiendo de la potencia que requiera la UR, entre mayor sea la potencia mayor será el radio del núcleo de la fibra MM. La fibra de datos y la de control puede ser fibra monomodo, debido a que permite un mayor ancho de banda y una mayor velocidad para la transmisión de datos. Como fuente de alimentación se puede utilizar un HPLD o un LD para optimizar potencia, y como fuente de la señal de control puede utilizarse un LED utilizado comúnmente en telecomunicaciones, para maximizar velocidad de transmisión y economizar.

Una propuesta de enlace activo-pasivo mediante tres fibras se obtiene utilizando el modulador reflexivo MOEMS, ver Fig. 3.19

VENTAJA

La configuración con tres fibras (Figs. 3.18 y 3.19) presenta la ventaja de que maximiza la alimentación y la velocidad de transmisión de datos y señales de control, pues utiliza la fibra óptica óptima para cada caso.

DESVENTAJA

La desventaja de esta configuración es que no optimiza los recursos ya que utiliza una fibra para cada tipo de flujo.

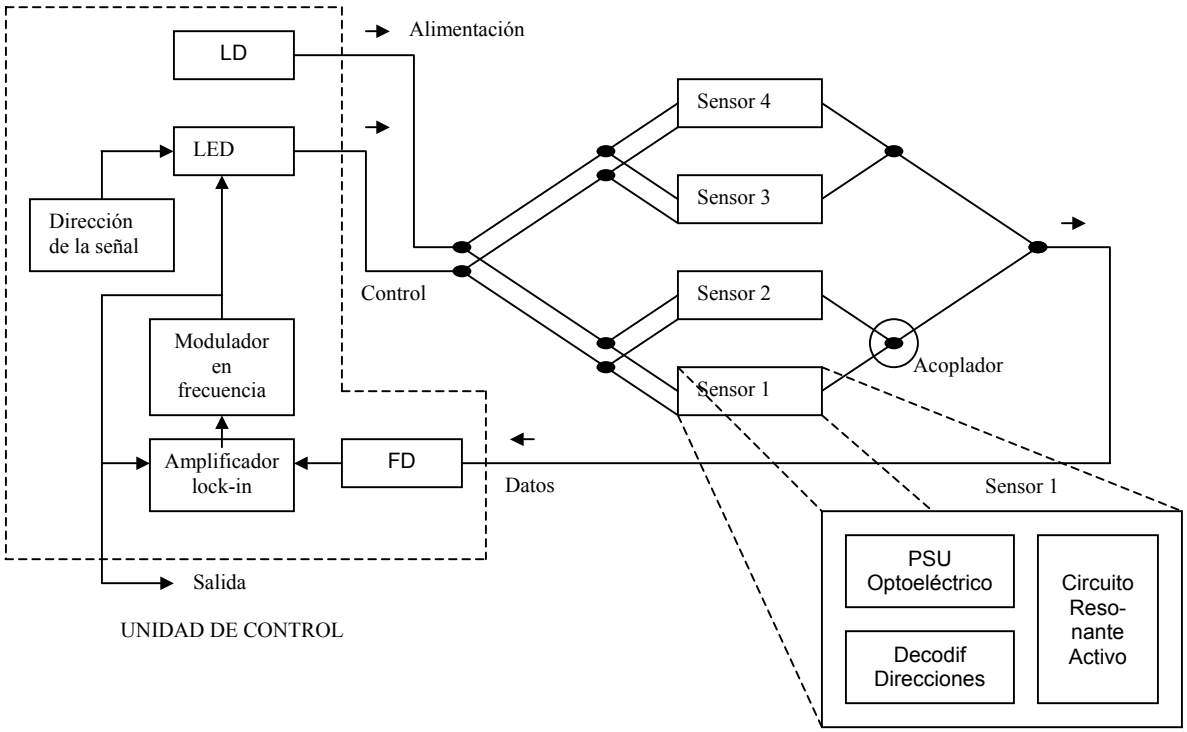


Fig.3.17 Red de sensores en "árbol", este sistema tiene tres fibras ópticas [27].

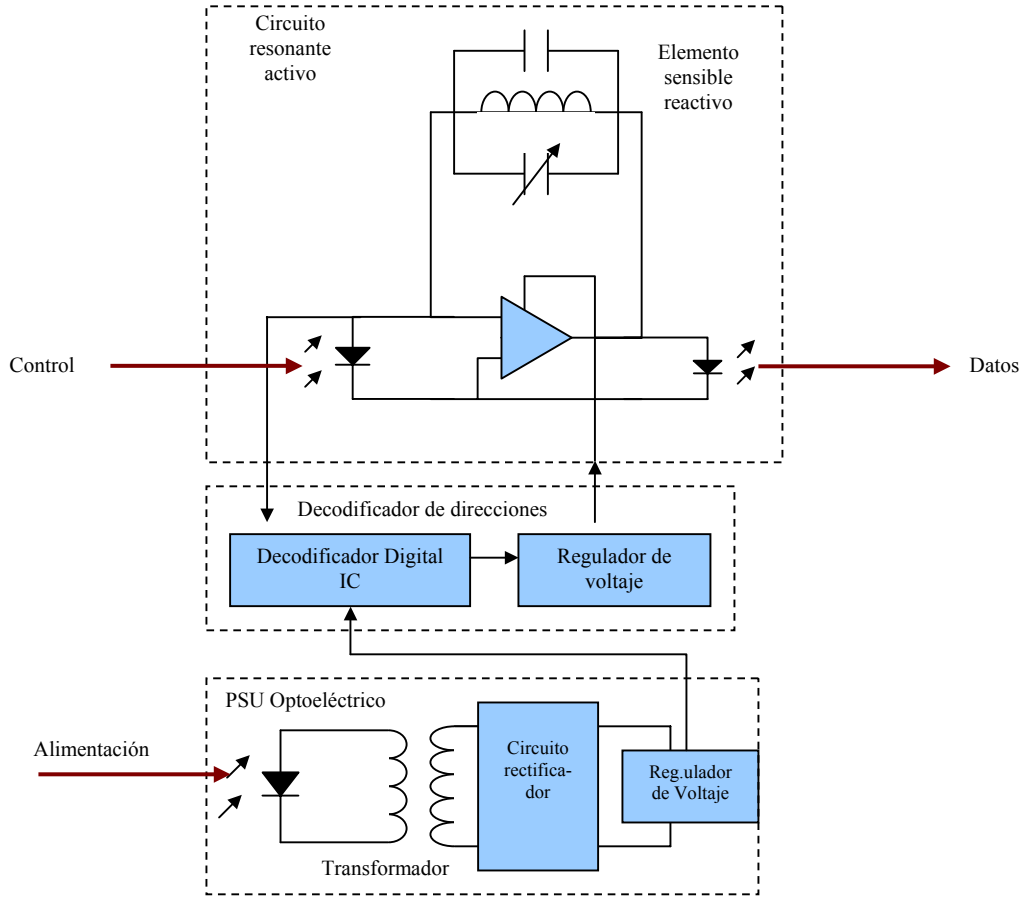


Fig.3.18 Diagramas de bloques del módulo sensor resonante, bajo una configuración de tres fibras ópticas [27].

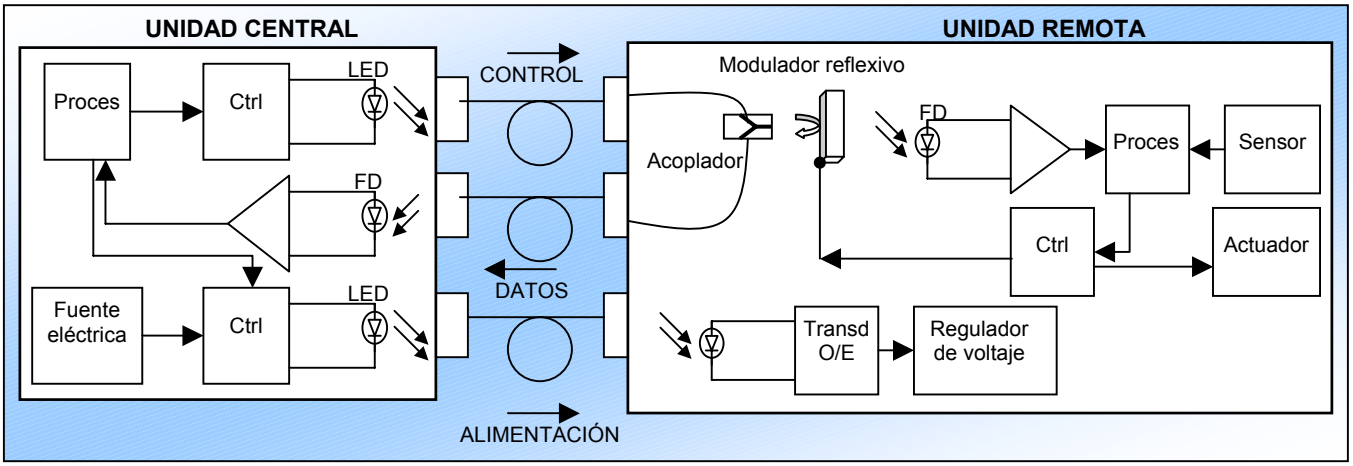


Fig. 3.19 Configuración activo-pasivo con tres fibras.

CASO 2) DOS FIBRAS ÓPTICAS

Para disminuir el número de fibras utilizadas a dos, el cambio es básicamente transportar señales de control y alimentación mediante una primera fibra óptica, que puede ser MM, y el flujo de datos provenientes de la UR mediante otra fibra (SM).Ver Fig.3.20

La transmisión de señales de control y alimentación se realiza mediante un LD (ó un HPLD), mientras que se utiliza un LED para la tx de señales de datos, en un enlace activo-activo.

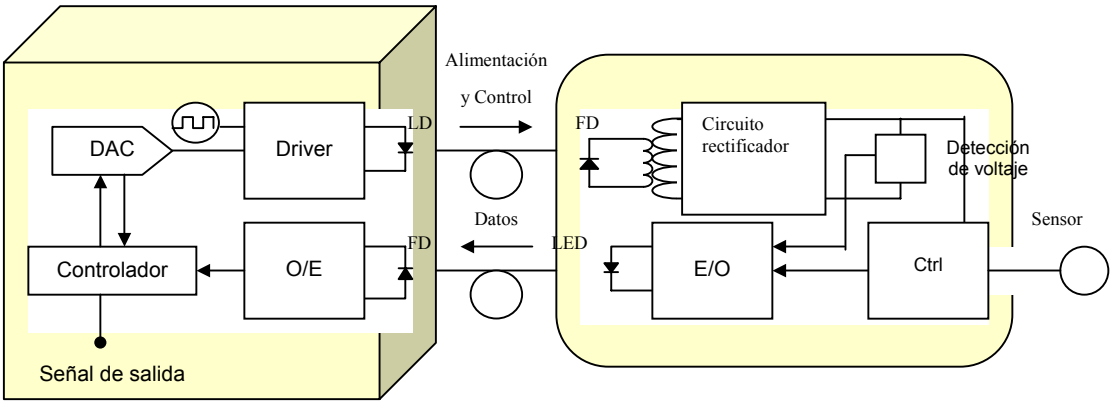


Fig. 3.20 Diagrama de bloques funcionales de un sistema activo-activo reducido con dos fibras ópticas [7].

Se logra un enlace activo-pasivo de dos fibras mediante la utilización de un modulador MOEMS, de manera análoga al esquema de la Fig. 3.19 (de tres fibras), pero en este caso en lugar de utilizar una fuente para la alimentación y otra para el control, se utiliza una fuente para ambas (Ver Fig. 3.21).

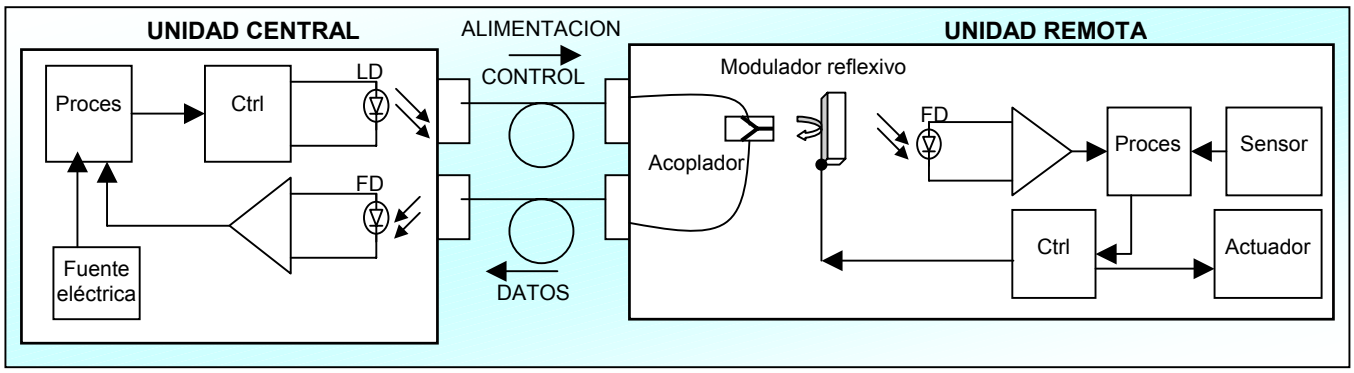


Fig. 3.21 Enlace activo-pasivo con dos fibras ópticas utilizando un modulador reflexivo MOEMS.

VENTAJA

Una ventaja de la configuración con dos fibras (Figs. 3.20, 3.21) es que se puede utilizar un tipo de fibra optimizada para transportar grandes potencias (fibra multimodo) y otra para transmitir los datos provenientes de la UR que esté optimizada para transportar gran cantidad de datos (fibra monomodo, gran ancho de banda).

Otra ventaja es que se elimina una fuente y una fibra, logrando mejor optimización de recursos.

DESVENTAJA

La velocidad del flujo datos viajan estará limitada por la velocidad de modulación del modulador reflexivo MOEMS. El cual, dependiendo de sus partes mecánicas podría alcanzar velocidades de kbps.

CASO 3) UNA FIBRA ÓPTICA

Cuando existe una sola fibra óptica (Fig. 3.22) que nos servirá para los tres tipos de flujos, el análisis se complica, para empezar, la alimentación y los datos de control pueden ser enviados cada determinado tiempo para alimentar al sensor y preguntar si ha existido alguna variación desde la última vez. Si el resultado es afirmativo se mandan los datos del sensor a la unidad de control para su evaluación, en caso negativo se vuelve a preguntar transcurrido el tiempo establecido. Como se mencionó con anterioridad se puede utilizar un capacitor para hacer más eficiente la alimentación óptica, que se cargue en los periodos en que el sensor se encuentre “apagado”.

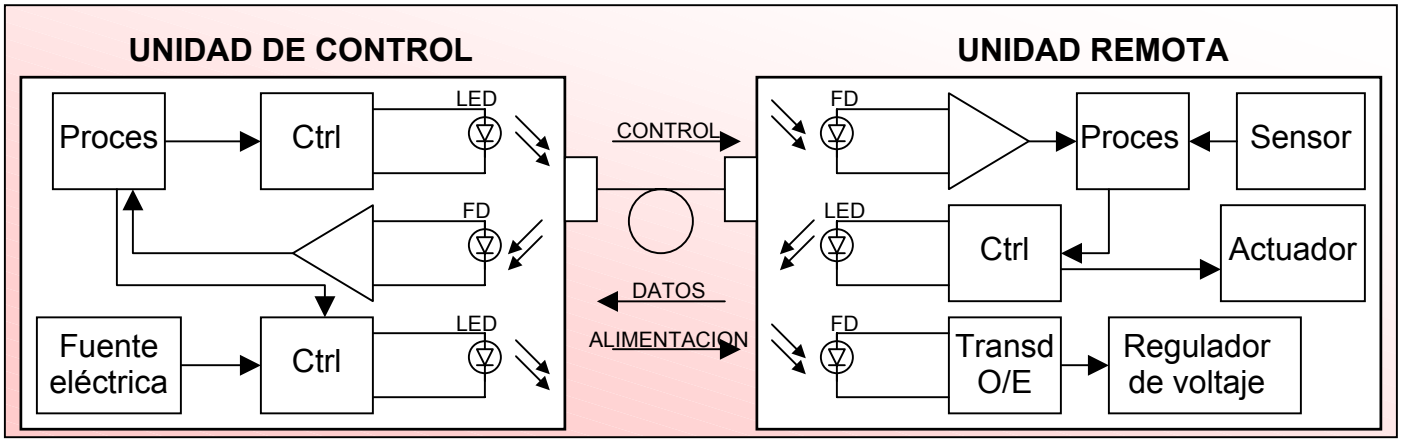


Fig.3.22 Diagrama de bloques básico de un enlace activo-activo con una sola fibra óptica.

A partir de la configuración de una fibra (Fig.3.22) se deriva la propuesta de diseño de la configuración activo-pasivo mediante la utilización de un modulador reflexivo MOEMS.

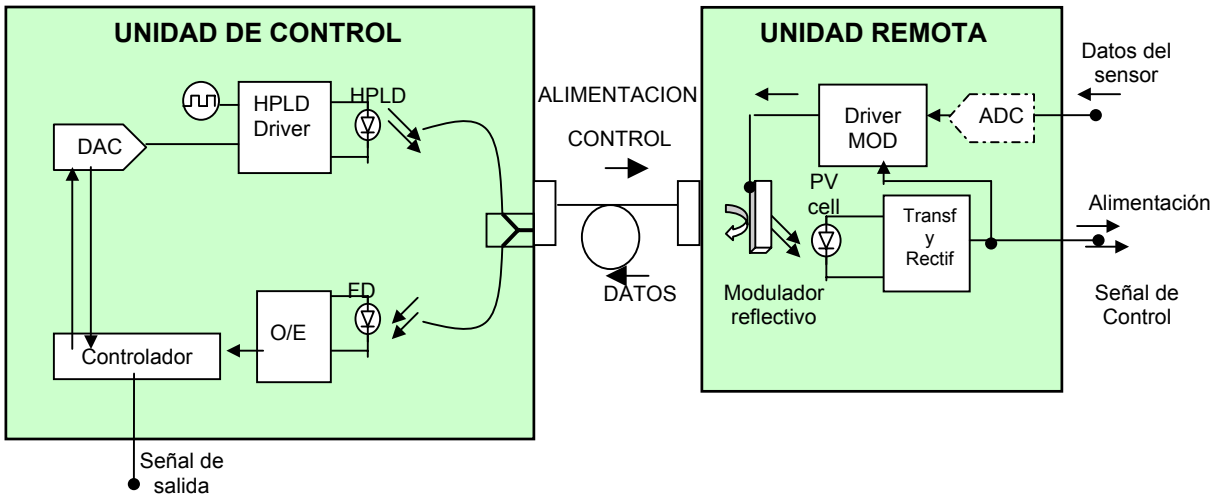


Fig. 3.23 Propuesta para un enlace activo-pasivo que utiliza una sola fibra óptica.

VENTAJA

Del esquema (Fig. 3.23) podemos afirmar que se ha optimizado el número de elementos necesarios en la interfaz

DESVENTAJA

Se debe tener cuidado en el diseño de los tiempos de espera y la forma en que los flujos avanzan, si lo hacen hacia la UR (*up-stream*) o si lo hacen en dirección opuesta (*down-stream*).

Otra desventaja es que la velocidad de transmisión de datos será baja, pero esto no es gran problema en redes de sensores.

3.12 Tipo de la señal, modulación y codificación

Es diferente la modulación que se utiliza para la señal de datos de control (de la UC a la UR), a la modulación que realiza el MOEMS (modulación de intensidad o amplitud). La primera se utiliza para mandar información (en este caso señales de control) a la UR, la segunda se utiliza para modificar la información de llegada cuando sea necesario, para transmitir datos que provengan de los dispositivos conectados a la UR (como sensores ó actuadores). Por otra parte, los datos de control se escogen como pulsos ya que se prefiere la transmisión de señales altas y bajas para evitar los distintos niveles o valores que se tendrían con una señal analógica y de esta forma pueda ser más fácil su detección en la UR. Entonces, la modulación de la señal de control se puede realizar mediante un diodo láser (modulación interna).

La modulación que realice el MOEMS dependerá de su frecuencia máxima, f_{MOEMS}, así por ejemplo si se tiene la frecuencia de los datos de control que envíe la UC, f_{UC}, es menor a f_{MOEMS}, entonces se puede decir que el MOEMS podrá modular por duración del pulso (PDM), en cambio, si $f_{UC} > f_{MOEMS}$, el MOEMS podrá modular por amplitud de pulsos (PAM). En cuanto al tipo de modulación de los datos de control, se descarta la modulación PAM y la PDM, en cambio se puede utilizar modulación por codificación de pulsos (PCM) para enviar datos codificados de unos y ceros que posteriormente puedan ser modificados por el MOEMS.

3.13 Interfaz comercial

Existen algunas interfaces comercialmente disponibles en la actualidad, a continuación se verán los datos técnicos [63] de la OPM-800 de Photonic Power Systems Inc., que está optimizada para un ambiente industrial de alto voltaje.

Tabla 3.10 Características de la interfaz comercial OPM-800

Característica	Descripción
Aplicaciones	Medición de corriente en ambientes de alto voltaje (HV), alimentación óptica de unidades remotas con sensores o transductores.
Descripción	El OPM-800 consiste de dos módulos, uno local y uno remoto, conectados entre sí mediante dos cables de fibra óptica, uno para la alimentación y otro para el enlace de datos.
Características físicas	Tamaño del módulo local: 2.787”x5.00”x8.90’ (7x11x22.6 cm) Temperatura de operación: 0-50ºC Tamaño del módulo remoto: 0.600”x2.565”x5.210” (1.5x6.5x13 cm) Temperatura de operación: -40 a 85ºC
Características eléctricas	Potencia de entrada: +15Vdc @200mA; -15Vdc @100 mA; -5Vdc @2A. Potencia óptica máxima para la aplicación: 700 mW a una distancia de 10m utilizando conectores FC.
Fibras ópticas	Se recomienda el uso de fibras multimodo de índice escalonado 200/230 µm con A.N. de 0.37. Los conectores usados son de tipo FC. El enlace de datos puede ser una fibra de 62.5 µm.

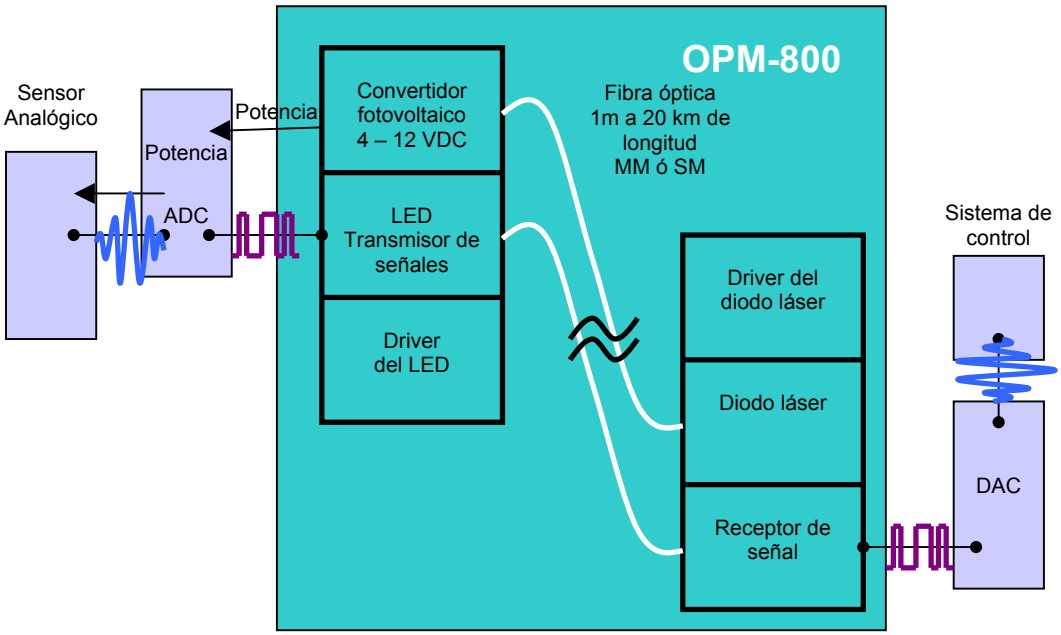


Fig. 3.24 Diagrama de bloques de la interfaz completa comercial OPM-800

Conclusiones

En cuanto a las configuraciones consideradas (una, dos y tres fibras) se tiene que la opción optimizada es la utilización de una sola fibra en combinación con el uso de un modulador de intensidad reflexivo (MOEMS), ya que reduce significativamente el número de elementos totales del sistema, para empezar aprovecha un solo medio para la transmisión de señales de control y potencia de alimentación, y también para la recepción de datos provenientes de la UR, además puede utilizarse una sola fuente en la UC y un solo fotoconvertidor (ó un arreglo de ellos) en la UR (Ver Fig. 3.23).

Se recomienda que el tipo de señal que transmita el sistema sea digital, que reducen las pérdidas de información que podría ocurrir con las señales analógicas, pues se tienen solo dos estados diferentes; uno y cero. La interfaz utiliza dos tipos de modulación, una para la transmisión de datos de control y otra por medio del MOEMS. Puede utilizarse la modulación PCM para los datos de control, y modulación PAM ó PDM, que realizará el MOEMS para los datos de retorno a la UC.

Por otra parte se ubicaron las necesidades que debe cubrir la interfaz, así como los requerimientos de potencia de los sensores, actuadores y circuitos. Se analizaron distintos tipos de moduladores para seleccionar el más adecuado, el modulador (de intensidad) reflexivo permite tener un enlace activo-pasivo, ya que elimina la fuente de la UR, y facilita la integración de la UR en un chip de Silicio, cumpliendo dos de los objetivos para la optimización del sistema.

Se encontró que las fuentes óptimas para la alimentación son los HPLD, y las mejores para la transmisión de datos son las utilizadas en telecomunicaciones (LD, ó el LED). Los primeros se especializan en emitir grandes potencias ópticas, los segundos, en mayores velocidades de transmisión de datos. Mientras que los mejores fotoconvertidores para la alimentación de la UR son las celdas fotovoltaicas y los mejores para la recepción de datos son los fotodiodos. Los primeros, se enfocan en optimizar la eficiencia de conversión O/E con grandes intensidades de potencia óptica, los segundos, tienen tiempos de subida muy pequeños (ns) lo que permite grandes velocidades de recepción de datos.

Sin embargo, si se utiliza la configuración de una sola fibra se podría requerir que el mismo fotoconvertidor sea el que se utilice para conversión de la potencia de alimentación y reccepción de los datos de control, en esta aplicación, es más conveniente utilizar celdas fotovoltaicas ya que se enfocan a la alimentación, es decir se sacrifica la velocidad de recepción por la eficiencia de conversión opto-eléctrica. En cuanto a las fuentes se tiene el mismo dilema al utilizar la configuración de una fibra óptica, en este caso las fuentes más apropiadas son los HPLD que sacrifican altas velocidades de tx, por altas potencias transmitidas.

Por otra parte, se tiene que un punto importante para el desempeño general de la interfaz es la eficiencia de conversión de los convertidores O/E que se utilicen. En este aspecto, se halló que utilizar un arreglo de celdas PVs en serie presenta una eficiencia mayor que el uso de una sola celda con un convertidor de voltaje DC-DC (Ver Fig. 3.16).

En cuanto a la configuración, se analizaron distintos esquemas con una, dos y tres fibras, entre menos fibras se utilizan también puede irse disminuyendo el número de fuentes y fotoconvertidores. La configuración más óptima es la que utiliza una fibra óptica junto con el modulador reflexivo MOEMS de esta manera se elimina el mayor número de elementos tanto en la UC como en la UR.

CAPÍTULO 4

4. Análisis a Nivel Dispositivo

Durante el análisis anterior se presentaron los principales factores a nivel sistema que se tomaron en cuenta, a continuación se muestra el análisis que se realizó a nivel dispositivo, es decir, se tiene el estudio para cada uno de los dispositivos "problema". Los dispositivos que se denominaron "problema" fueron aquellos que ameritaban un análisis más extenso, ya que resultan ser los dispositivos de los cuales depende la eficiencia general (de energía, de costos) del sistema.

4.1 Dispositivos de estudio

Un elemento crucial es el **modulador opto-mecánico (MOEMS)** ya que de éste depende el ancho de banda del sistema en general, debido a la velocidad de movimiento de su parte mecánica, y su elemento óptico determina el nivel de reflexión de la luz incidente que se tendrá.

Por otro lado, tenemos al **fotoconvertidor** como otro elemento determinante para obtener un sistema eficiente en conversión de potencia, ya que durante la conversión opto-eléctrica se presenten grandes pérdidas, a veces sólo el 20% (incluso menos) de la potencia óptica incidente es convertida a energía eléctrica. Otro factor importante es el calentamiento que presenta el fotoconvertidor durante el proceso de conversión energética, es decir disipación de potencia en forma de calor, por lo que se pensó que podía ser necesario un disipador de energía calorífica. La fabricación del fotoconvertidor es más conveniente si se considera como celda solar, ya que requiere un proceso más simple y existe un amplio estudio de ellas, obteniendo coeficientes de conversión bastante aceptables para este caso.

4.2 Prototipos para modulador MOEMS

En este apartado se analizan algunos prototipos de modulador MOEMS, comparando su funcionalidad, y ventajas que presentan. Para ello se considera que nuestro enlace consta de los siguientes elementos: (a) fuente, (b) conector, (c) una distancia D, de enlace de fibra óptica (normalmente de 0.1 a 1 km para sistemas con sensores), (d) modulador, (e) arreglo de fotodiodos ó un fotodiodo y su transformador, ver Fig. 4.1.

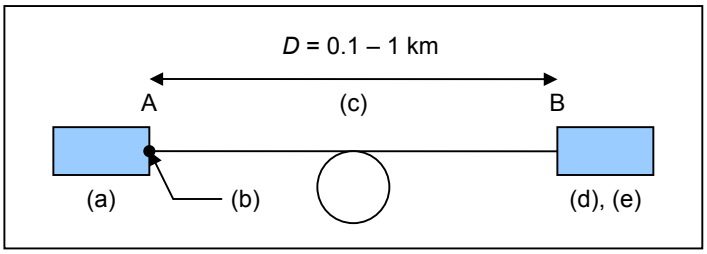


Fig. 4.1 Enlace de fibra óptica que une al punto A del punto B, separados la distancia L.

MODULADORES REFLEXIVOS PROPUESTOS

Se proponen algunos diseños de moduladores reflexivos, se analizan y comparan sus ventajas y desventajas para poder escoger un solo prototipo y de esta manera continuar con su diseño. De manera general, el modulador reflexivo óptimo que se necesita para nuestra interfaz, debe cumplir con dos estados:

a) Estado apagado (o inicial). Es necesario que en su estado apagado permita el paso de la mayor cantidad de luz posible (potencia transmitida), para alimentar los circuitos (fotodetector, transformador, etc.), a los actuadores mecánicos del mismo modulador y al dispositivo conectado a la UR (sensor ó actuador). Por esta razón, a este estado también se le llama "transparente".
b) Estado encendido. Cuando la unidad remota disponga de la cantidad de energía necesaria (almacenada) y el flujo de control lo indique, el modulador puede obstruir la luz reflejándola a la fibra de alimentación y transmitiendo (modulando) en esta manera la señal de datos (de regreso). El nivel de reflexión dependerá de las necesidades del sistema. Por ello a este estado también se le conoce como "reflexivo".

1) MODULADOR BASADO EN ESPEJOS ROTATORIOS CON GIRO DE 90° (TIPO PERSIANAS)

Un diseño posible para el modulador opto-mecánico consiste en un arreglo de espejos en paralelo (ver Fig.4.2), cuya función se describe a continuación. Como estado inicial (estado apagado) los espejos se encuentran dispuestos de tal manera que permitirán el paso de la mayor cantidad de luz posible (posición totalmente vertical) proveniente de la fuente, de tal forma que se pueda alimentar a los circuitos que conforman a la unidad remota y que accionarán la mecánica del modulador, cuando sea necesario.

Por otra parte, en el estado de encendido, el arreglo de espejos realizará un giro de 90°, quedando dispuestos de manera horizontal, reflejando la luz de regreso a la fibra óptica de alimentación.

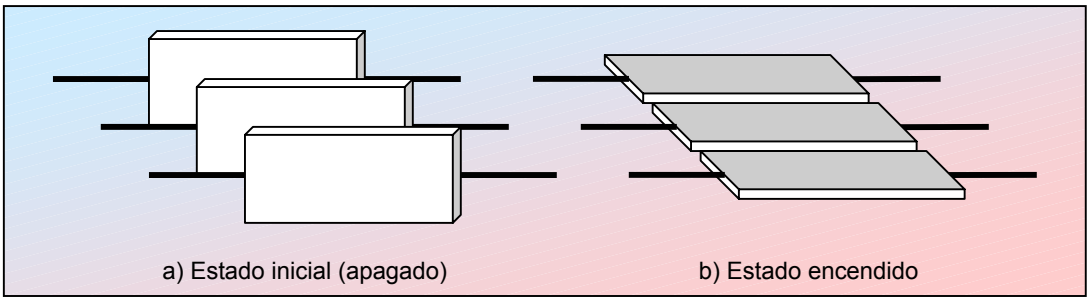


Fig.4.2 Idea básica del funcionamiento de un modulador reflexivo tipo "persianas".

Se requiere conocer de manera aproximada las dimensiones de los espejos (ver Fig.4.3). Pero a primera vista, se puede observar que, para permitir el giro de los espejos se requiere una cierta distancia mínima de separación a la fibra (dimensión w del espejo), lo cual, se traduce en pérdidas de potencia óptica. Para disminuir esta distancia se puede construir los espejos con una posición asimétrica de sus ejes de giro, lo que aumenta la complejidad de la construcción. Otra observación respecto al giro de los espejos, es que podría resultar difícil conseguir una posición totalmente vertical y luego totalmente horizontal.

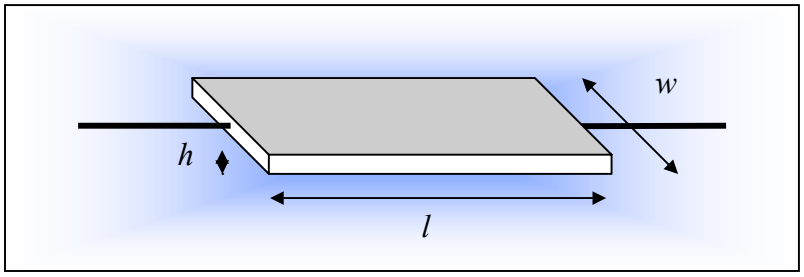


Fig.4.3 Muestra uno de los espejos con sus dimensiones acotadas por una variable, l, para la longitud, w, para la anchura, h para la altura (o grosor)

Mecánicamente, para poder realizar dicho giro, se necesitarían mínimo dos transformaciones de movimiento, uno longitudinal y otro rotacional, como las que utilizan las persianas, de allí su nombre.

2) MODULADOR BASADO EN OBTURADOR DE CAMARA (TIPO OBTURADOR)

Otro modelo que se puede utilizar, se basa en el obturador mecánico que se utiliza en las cámaras fotográficas, llamado comúnmente "diafragma iris" como el que se muestra en la Fig.4.4, se utiliza en sistemas ópticos donde se tiene que enfocar una imagen óptica. La utilización de un modulador óptico en la interfaz óptica completa no hace referencia a esto, únicamente se necesita como atenuador de la intensidad óptica, por lo que se hará referencia a este modulador como "tipo obturador".

De manera simplificada se puede realizar una versión con menos láminas, por ejemplo, con dos o incluso una, ver Fig. 4.5 y 4.6.

Fig.4.4 Diafragma Iris de una cámara fotográfica [64].

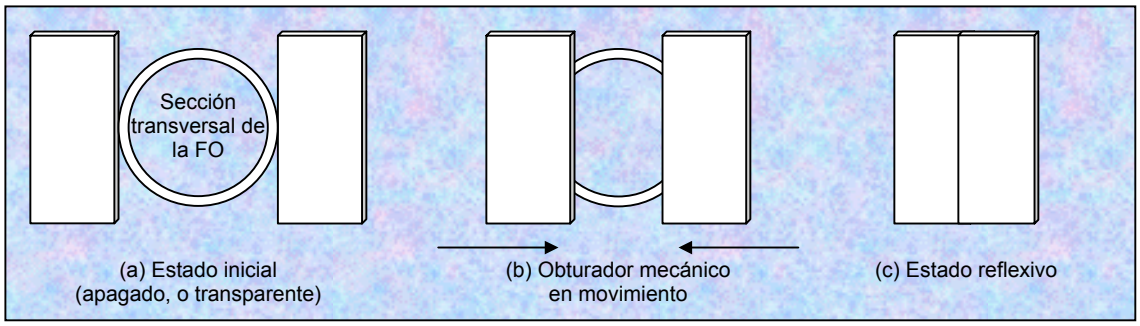


Fig.4.5 Obturador mecánico de dos láminas.

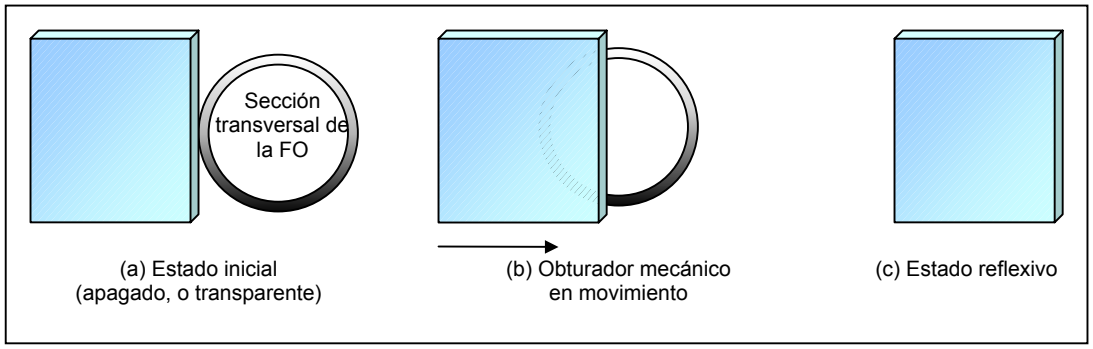


Fig. 4.6 Obturador mecánico de una lámina.

Este tipo de modulador, al igual que el anterior, deben de recubrirse con un material reflexivo (oro, níquel), de tal manera que, cuando se encuentre en su estado encendido, se refleje la mayor cantidad de luz posible o necesaria. Además, este obturador mecánico presenta ventajas importantes sobre el espejo rotacional, a primera vista, la distancia de separación entre el modulador y la fibra es menor a la que necesita el modulador tipo persianas, y es igual al espesor del modulador obturador mas la distancia que requiera para realizar con holgura su movimiento. Otra ventaja observable es que el modulador tipo obturador nada más precisa una transformación de movimiento (longitudinal).

3) MODULADOR DE TIPO CAVIDAD FABRY-PEROT

Este tipo de modulador fue desarrollado originalmente para la transmisión digital de datos, y posteriormente utilizado como atenuador analógico variable de alta velocidad [93]. Su estructura se muestra en la Fig. 4.7, consiste de una capa de material dieléctrico llamada "membrana", de un grosor de un cuarto de longitud de onda, suspendido sobre una oblea de silicio a una separación de tres cuartos de longitud de onda, de esta manera, la estructura actúa como un espejo dieléctrico. Al aplicar un voltaje entre los electrodos crea una fuerza electrostática que acerca a la membrana hacia el sustrato. Cuando el espaciamiento entre la membrana dieléctrica y el sustrato es reducida a una longitud igual a la mitad de longitud de onda, la membrana se convierte en una capa antireflejante [14].

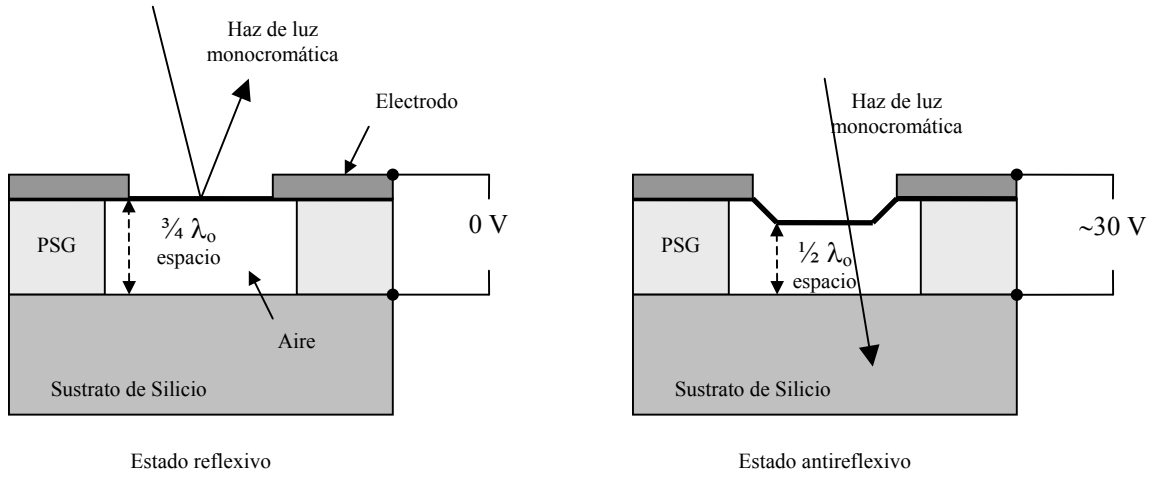


Fig. 4.7 Principio básico del modulador tipo cavidad Fabry-Perot

A pesar que la distancia de movimiento requerida es muy pequeña, la principal desventaja de este tipo de modulador es que tan solo puede ser utilizado para fibra monomodo y alimentado con luz monocromática. Por ello se descarta su utilización para casos más generales.

DISTANCIA DE SEPARACIÓN ENTRE FIBRA Y MODULADOR.

Se consideran cuatro tipos de enlaces de fibra óptica (dos monomodo, dos multimodo) con las fuentes ópticas que se adaptan mejor a las necesidades de potencia de la interfaz.

A continuación se muestra el análisis seguido para determinar la distancia existente entre la fibra y el modulador, *d*, considerando varios porcentajes de pérdidas (10, 20 y 50%) por la separación, para enlaces SM y MM, para cualquiera de los casos de modulador propuesto: espejos rotatorios ó tipo obturador. Lo que equivale a la dimensión mínima, *w*, en el caso del modulador tipo persianas, de la Fig. 4.3.

Consideración inicial: Se tiene que la definición de pérdidas considerada se basa en el siguiente esquema:

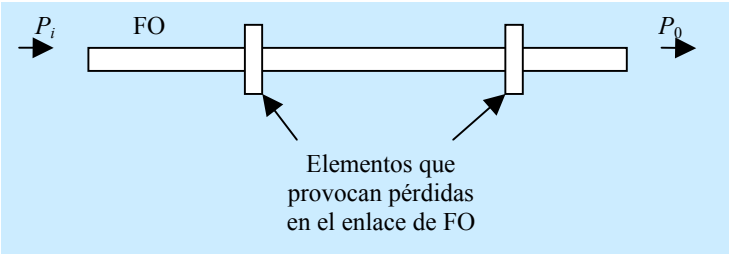


Fig. 4.8 Diagrama considerado para cálculo de las pérdidas

Entonces las pérdidas se definirán como:

$$L[dB] = 10\log\left(\frac{P_i}{P_0}\right) \quad \ldots(4.1)$$

Esto implica que las atenuaciones en la dirección "*de ida*" serán positivas, y para distinguirlas de las "*de regreso*" se antepondrá en las últimas un signo negativo.

Como se requiere limitar nuestro estudio, durante la selección del tipo de enlace, se hace referencia a la selección de tipo de fibra, monomodo o multimodo, que se utilizará en nuestra interfaz. Para ello, se hizo una búsqueda del tipo de fuentes ópticas disponibles para ambos tipos de enlaces, encontrando algunas que cubren nuestras necesidades (alta potencia) para las longitudes de onda centrales: 830, 1310 y 1550 nm.

Al mismo tiempo que se comparan prototipos se analiza la funcionalidad de cuatro enlaces de fibra óptica E1…E4, cuyas características de fuente óptica, tipo de fibra y conectores, se muestran en la siguiente tabla. De esta manera se pueden calcular pérdidas con referencia a una potencia dada, como se hace más adelante.

Tabla 4.1

Tipo de enlace	Características fibra	Fuente	Características fuente	Tipo de conectores
E1 MM (Índice gradual)	50/125 μm $\alpha \cong 2.7$ dB/km @ 830 nm *Corning optical fiber*	Modelo: SDL-2320-L2 Fabricante: *JDS Uniphase*	$P_0 = 0.2$ W* $\lambda c = 830 \pm 15$ nm $\Delta\lambda = 3$ nm $t_r, t_f = 30$ ns	ST-ST Pérdidas por inserción = 0.40 dB
E2 MM (Índice gradual)	62.5/125 μm $\alpha \cong 3$ dB/km @ 830 nm *Corning optical fiber*	Modelo: SDL-2364-L2 Fabricante: *JDS Uniphase*	$P_0 = 0.5$ W* $\lambda c = 830 \pm 15$ nm $\Delta\lambda = 3$ nm $t_r, t_f = 30$ ns	ST-ST Pérdidas por inserción = 0.40 dB
E3 SM (Índice Escalonado)	9.2/125 μm $\alpha = 0.34$ dB/km @ 1310 nm *Samsung Fiberoptics*	Modelo: LFO-24-ip Fabricante: *Roithner Lasertechnik*	$P_0 = 4.5$ mW $\lambda c = 1310 \pm 30$ nm $\Delta\lambda = 10$ nm $t_r, t_f = 2$ ns	FC-FC Pérdidas por inserción = 0.40 dB
E4 SM (Índice Escalonado)	10.4/125 μm $\alpha = 0.21$ dB/km @ 1550 nm *Samsung Fiberoptics*	Modelo: LFO-18/2-i Fabricante: *Roithner Lasertechnik*	$P_0 = 3$ mW $\lambda c = 1550 \pm 30$ nm $\Delta\lambda = 3$ nm $t_r, t_f = 0.7$ ns	FC-FC Pérdidas por inserción = 0.40 dB

*El fabricante de las fuentes ópticas (láser) MM que se proponen, no indica qué tipo de perfil debe tener la FO para que se tenga la máxima potencia acoplada a la fibra (P_0) que indican las hojas de especificaciones de la fuente. Entonces, considerando que una FO es iluminada con una fuente lambertiana (como el LED), y tiene un perfil de índice escalonado, la fibra permite la entrada del doble de potencia que una de índice gradual con el mismo diámetro y apertura numérica. Se están proponiendo fuentes láser (no lambertianas), y por tanto, difiere la proporción de dos a uno en la potencia de un tipo de perfil respecto al otro, en realidad es menor, pero el caso de la fuente lambertiana sirve como el caso peor. Esto lleva a pensar que el fabricante de la fuente MM se refiere a una fibra de índice escalonado, ya que de esta manera se aprovecha al máximo la potencia de su fuente. Sin embargo, en el caso de los enlaces MM, E1 y E2 (tabla 4.1), se tienen fibras MM con un perfil de índice gradual, pues actualmente son más baratas en comparación con las fibras MM de índice escalonado que ya se consideran especiales, por lo que su utilización y fabricación no son comerciales, lo que las convierten en una cara elección.

Cabe mencionar que existen fuentes más potentes que se encuentran disponibles comercialmente, como por ejemplo, la fuente de *JDS Uniphase*, 6390-L3 series, que tiene una potencia acoplada a la fibra de 5 W, para enlace MM con fibra de diámetro de 100 μm, con una frecuencia central de 970 nm, esto posiblemente sirva para otro tipo de aplicaciones o para permitir mayor distancia entre terminales (>1 km).

Para cálculo de la distancia de separación entre fibra y modulador en cada tipo de enlace, se consideró que el caso de una fibra con la luz reflejándose en un espejo ("ideal") podría trasladarse al problema de una juntura o unión entre dos fibras iguales, como lo muestra la Fig.4.9.

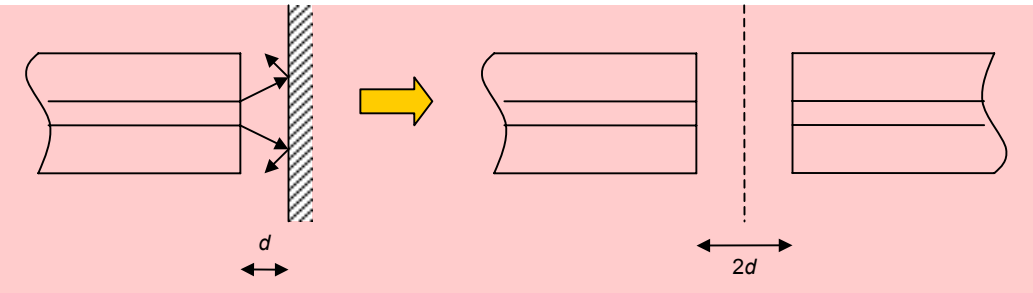


Fig. 4.9 Equivalencia del sistema fibra-espejo

<u>Fórmulas para enlaces multimodo (E1, E2)</u>

De la equivalencia (Fig. 4.9), se puede obtener la distancia *d*, de separación entre el modulador y la fibra. Una expresión útil para la obtención de las pérdidas por separación entre dos fibras se deriva a partir de la expresión [60]:

$$L_A = 10\log\left(\frac{A}{A_F}\right) \qquad \ldots(4.2)$$

donde A_F es el área de la fibra y A es el área de la "mancha" proyectada en la superficie de la segunda fibra (Fig.4.10).

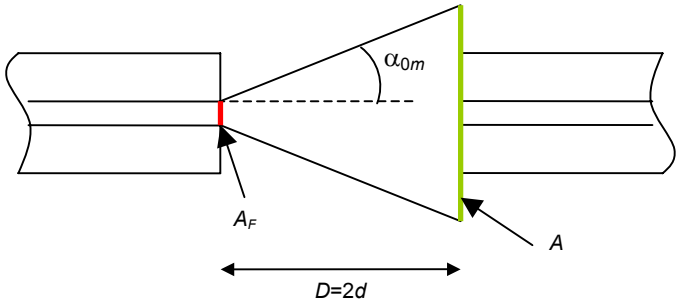


Fig.4.10 Áreas consideradas para la obtención de las pérdidas

A partir de algunas relaciones trigonométricas, se obtiene la expresión:

$$L_A = 10\log\left(\frac{D\tan\alpha_{om} + a}{a}\right)^2 \quad \ldots(4.3)$$

donde a es el radio de la fibra, como se desea ver cómo se comporta la distancia considerando varias pérdidas, de la Ec.(4.3) despejamos la distancia D:

$$D = \left(\frac{a10^{L_A/20} - a}{\tan\alpha_{om}}\right) \quad \ldots(4.4)$$

Es importante señalar que esta expresión sólo es válida si estamos tratando con fibras ópticas multimodo.

<u>Fórmulas para enlaces monomodo (E3, E4)</u>

Para el caso de los enlaces de fibra monomodo (SM), se considera un parámetro denominado radio de modo fundamental, ω_0, se obtendrán fórmulas aproximadas ya que substituirá ω_0 en lugar del radio en la Ec. 4.4.

<u>Nota</u>: El radio de núcleo no es un parámetro que se considere normalmente en los cálculos de la fibra óptica monomodo. Se utiliza en su lugar el radio de modo de propagación ω_0, debido a que la propagación de ondas en este tipo de fibras sobrepasa un poco el radio del núcleo físico de la fibra, por ello se considera ω_0.

La expresión que se utilizó para calcular ω_0, en una fibra monomodo convencional de índice escalonado (*step-index*) es [57]:

$$\frac{\omega_0}{a} = 0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6} \quad ...(4.5)$$

donde a es el radio de la fibra en [μm], y V es la frecuencia normalizada que se determina por la siguiente expresión , en el caso de fibra de índice escalonado [57]:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 (2\Delta)^{1/2} \quad ...(4.6)$$

donde n_1 es el índice de refracción del núcleo, Δ es la diferencia de índice refractivo.

Utilizaremos como fórmula la siguiente aproximación sustituyendo ω_0 en vez de a de la Ec.(4.4):

$$D = \frac{\omega_0 10^{L_A/20} - \omega_0}{\tan \alpha_{0m}} \quad ...(4.7)$$

Entonces a partir de las hojas de especificaciones de las fibras monomodo escogidas y las Ecs.(4.5) y (4.6), obtenemos la siguiente tabla, para los enlaces E3 y E4:

Tabla 4.2

Enlace	Radio del núcleo de la fibra, a [μm]	Índice de refracción del núcleo, n_1	Diferencia de índice refractivo, Δ	Frecuencia normalizada, V	Radio de modo de propagación, ω_0 [μm]
E(3) 1.310 μm	4.5	1.469	0.0034	2.61	4.69
E(4) 1.550 μm	4.5	1.4695	0.0034	2.21	5.25

Nota: n_1 y Δ, se obtuvieron de las hojas de especificaciones.

Como puede observarse en la tabla anterior, ω_0 es ligeramente mayor al radio a y depende de la longitud de onda a la que se está trabajando. Ahora, con los datos obtenidos de las hojas de especificaciones y dispuestos en la tabla 4.3 se calcularon las distancias entre la fibra y el modulador de los cuatro tipos de enlaces en la tabla 4.4.

Tabla 4.3

Enlace	a (ω_0) [μm]	(A.N.)	α_{0m} = sen $^{-1}$ (A.N.)	tan α_{0m}
E1	25	0.20	11.5º	0.204
E2	31	0.28	16.0º	0.286
E3	4.7	0.121*	7.0º	0.122
E4	5.3	0.121*	7.0º	0.122

*La A.N. se obtuvo de la expresión [60]:

$$A.N. \approx n_1\sqrt{2\Delta} = 1.469 \cdot \sqrt{2 \cdot 0.0034} = 0.121 \quad \ldots(4.8)$$

aplicable únicamente para el caso de fibras monomodo, pues este dato está disponible en las hojas de especificaciones de las fibras multimodo.

Tabla 4.4

Porcentaje de pérdidas consideradas en el modulador	Distancia de separación entre fibra y modulador, $d = D/2$
Enlace MM, E1	
10 %.	3.33 μm
20 %	7.24 μm
50 %	25.27 μm
E2	
10 %.	2.97 μm
20 %	6.45 μm
50 %	22.54 μm
Enlace SM, E3	
10 %.	1.05 μm
20 %	2.27 μm
50 %	7.93 μm
E4	
10 %.	1.17 μm
20 %	2.54 μm
50 %	8.87 μm

Entonces tenemos que E1 y E2 permiten mayores distancias de separación para porcentajes de pérdidas de 10, 20 y 50 % insertadas por el modulador. Lo cual es favorable, en comparación con la d obtenida de los enlaces E3 y E4, ya que entre menor sea la distancia, serán necesarias menores dimensiones del modulador, y más difícil resultaría la medición de la potencia reflejada y la potencia transmitida, además de la fabricación. Además, se desea que el espejo tenga las dimensiones óptimas (por ende, mayor área reflexiva) para tener las menores pérdidas ópticas posibles.

4.3 Selección del prototipo de modulador

A manera de conclusión del tipo de modulador, se puede decir que el modulador basado en obturador, presenta ventajas importantes sobre el modulador de espejos giratorios. A continuación se presentan estos resultados a manera de tabla.

Tabla 4.5

Modulador basado en espejos giratorios	Modulador basado en obturador
Ventajas - Si se controla el ángulo de giro de los espejos giratorios se podría direccionar la luz a otra fibra(s), para esta aplicación ó de otro tipo, por ejemplo, como ruteador en redes de telecomunicaciones vía fibra óptica. Desventajas - Es necesario un arreglo de varios espejos para poder ser funcional en la interfaz. - Es difícil obtener físicamente un giro lo más cercano a 90º - Son necesarias por lo menos dos transformaciones de movimiento (longitudinal y rotacional), para conseguir el giro.	Ventajas - Es suficiente que sea un espejo en la aplicación de interfaz completa. - La distancia entre fibra-espejo es la mínima de diseño, por lo que se eliminan ciertas pérdidas. - Basta con una transformación de movimiento lateral (lineal). Desventajas - Dependiendo del tipo de enlace SM o MM puede requerir grandes distancias de desplazamiento longitudinal (por el diámetro del núcleo), y entre mayor sea la distancia, mayor será la fuerza de actuación de desplazamiento y menor será la velocidad de modulación.

Ahora haremos una breve descripción del tipo de actuadores MEMS básicos que existen, para concluir cuál es el mejor para lograr un desplazamiento lineal, como lo requiere el modulador tipo obturador.

4.4 Selección del tipo de actuador para el modulador MOEMS

El diseño del modulador abarca los siguientes pasos generales:

- Elección tipo de actuador, mecanismo de desplazamiento lateral
- Diseño del modulador considerando el actuador (dimensiones, fuerzas, propiedades mecánicas, eléctricas y ópticas).
- Simulación por computadora.
- Cálculo de las pérdidas de potencia considerando el modulador

En este capítulo sólo se trata el primer punto, ya que de la elección del tipo de actuador dependerán los demás puntos del diseño del MOEMS. El siguiente capitulo (cap.5) se enfoca únicamente al modulador MOEMS, su diseño, sus propiedades ópticas, eléctricas y mecánicas, así como la simulación por computadora elaborada en CoventorWare 2003.

ELECCIÓN DEL TIPO DE ACTUADOR

Microactuadores para el modulador reflexivo

Los microactuadores son elementos clave que permiten a los MEMS ejecutar funciones físicas. Se puede generar fuerza en el espacio entre las partes móviles y estacionarias utilizando campos eléctricos, magnéticos y de flujo (como la temperatura). Los microactuadores se pueden clasificar, a partir del tipo de fuerza que manejan en: (1) electrostáticos, (2) piezoeléctrico, (3) térmico, (4) magnético y (5) de tipo *shape-memory alloys* [10], que utilizan materiales con memoria de forma. Cuyas características básicas se describen a continuación.

(1) ACTUADORES ELECTROSTÁTICOS

La actuación electrostática se basa en la fuerza atractiva que existe entre dos platos o elementos con cargas opuestas (Ver Figs. 4.11, 4.12). Las cargas en dos objetos con potencial aplicado externamente entre ellos solo pueden ser de polaridades opuestas. Más aún, un voltaje aplicado, sin importar su polaridad, siempre resultará en una fuerza electrostática atractiva. Si C es la capacitancia entre los platos paralelos, x es la separación entre ellos y V es el voltaje externo aplicado, la fuerza electrostática es entonces $CV^2/(2x)$. Un caso más complejo de este tipo de actuadores son los denominados "*comb-drives*" (Ver Fig. 4.13).

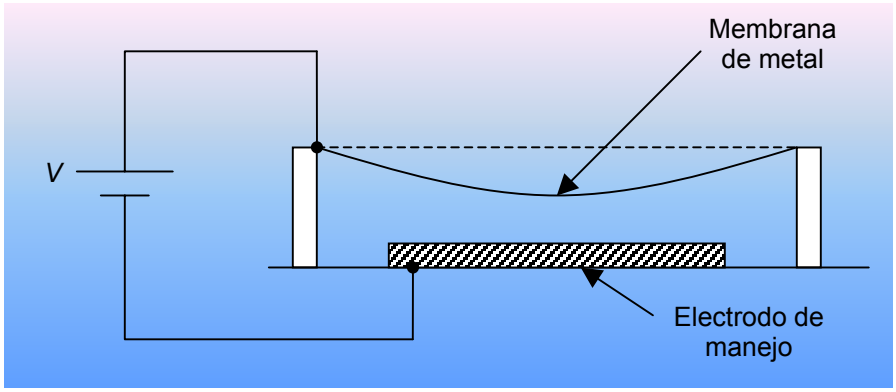


Fig.4.11 Deformación de una membrana [38]

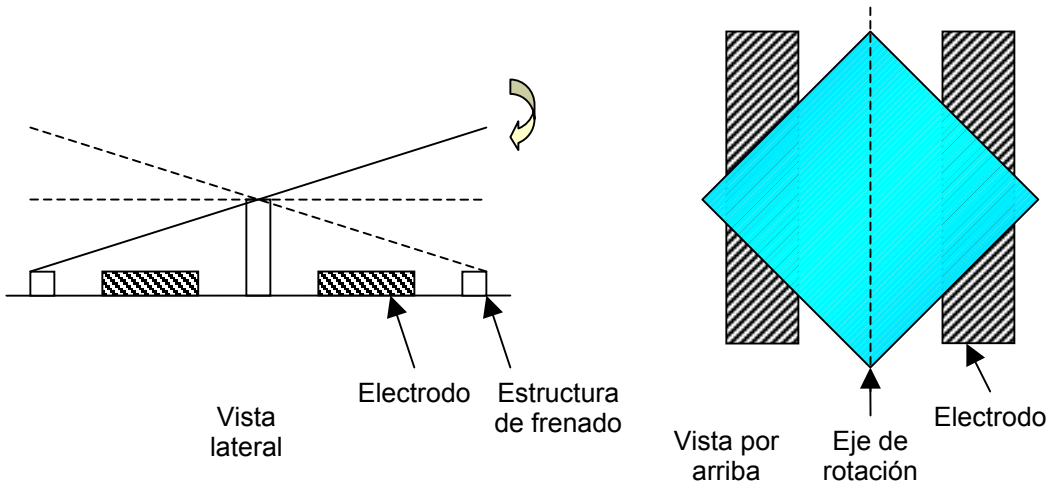


Fig.4.12 Espejos de torsión [38]

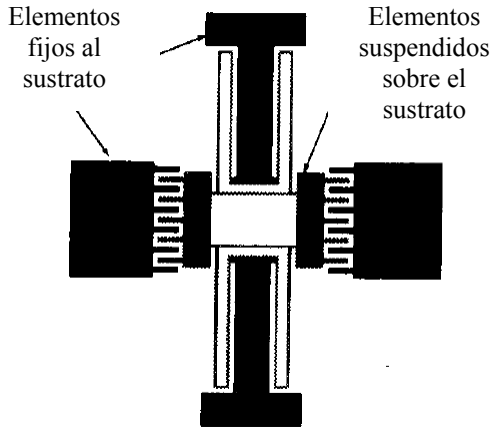


Fig. 4.13 Comb-drives [75]

(2) ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS

La actuación piezoeléctrica puede proveer fuerzas significativamente grandes. Ciertas clases de cristales exhiben una propiedad peculiar, de producir un campo eléctrico cuando está sujeto a una fuerza externa, además, se expanden o contraen en respuesta a un voltaje aplicado. Este efecto fue descubierto por los hermanos Pierre y Jacques Curie en el cuarzo en 1880. Existen cilindros piezocerámicos comerciales que pueden proveer fuerzas mayores a unos cuantos Newtons, con potenciales aplicados de unos cuantos cientos de Volts. Sin embargo, si se utilizan filmes delgados ("*thick films*", <5 μm) para actuadores piezoeléctricos solo pueden proveer unos cuantos miliNewtons. Ambos métodos, piezoeléctrico y electrostáticos, ofrecen la ventaja de baja potencia de consumo, ya que la corriente eléctrica que utilizan es muy baja.

(3) ACTUADORES TÉRMICOS

Los actuadores térmicos consumen mucha más potencia que la actuación electrostática o piezoeléctrica, pero puede proveer, sin contar sus grandes ineficiencias, fuerzas de actuación del orden de los cientos de miliNewtons o mayores. Dentro de este tipo de actuación se tienen tres vertientes en el estudio de los MEMS. El primero se basa en la diferencia de coeficientes térmicos de expansión entre dos capas unidas de materiales distintos, de esta manera se provoca cierta curvatura debido al cambio de temperatura. Así una capa se expande más que la otra con el incremento de temperatura, resultando en presión (*stress*) en la interfaz entre ambos materiales, lo que provoca la curvatura de la estructura. La cantidad de curvatura que se puede obtener depende de la diferencia de los coeficientes de expansión térmica y a la temperatura absoluta. Desafortunadamente, esta dependencia limita severamente el rango de temperatura de operación.

Otra aproximación es conocida como actuación termoneumática. Su funcionamiento se basa en el principio de calentamiento de un líquido dentro de una cavidad sellada. La presión de la expansión y/o evaporación ejerce una fuerza en las paredes de la cavidad. Este método también depende de la temperatura absoluta del actuador.

Un tercer método utiliza una viga suspendida de un material homogéneo "anclado" a un soporte del mismo material. Calentando la viga con una temperatura arriba de la del soporte provoca una diferencia de elongación entre el extremo libre de la viga y el soporte.

(4) ACTUADORES MAGNÉTICOS

La fuerza de Lorentz forma un mecanismo dominante en la actuación magnética, en escala miniaturizada. Esto se debe en gran parte, a la dificultad de depositar filmes delgados permanentemente magnetizados. Una corriente eléctrica en un elemento conductivo, que está localizado dentro de un campo magnético, provoca una fuerza electromagnética (fuerza de Lorentz) en dirección perpendicular a la corriente y al campo magnético. Esta fuerza es proporcional a la corriente, al campo magnético, y a la longitud del elemento. Por ejemplo, un conductor de 1 mm de longitud con 10 mA de corriente y un campo magnético de magnitud de 1 T está sujeto a una fuerza de 10 μN.

(5) ACTUADORES POR ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA (*SHAPE-MEMORY ALLOY*)

Este tipo de actuadores ofrecen la más alta densidad de energía. Este efecto se produce únicamente en algunas clases de aleaciones, que regresan a su forma predeterminada cuando se calientan por encima de una transición de temperatura crítica. El material "recuerda" su forma original después de haber sido deformado.

Algunas aleaciones que presentan este efecto son: Oro-Cadmio, Titanio-Níquel, Cobre-Aluminio-Níquel, Hierro-Níquel, y Hierro-Platino. El tipo de actuadores que se basan en dicho efecto, proveen fuerzas muy grandes cuando la temperatura del material está por encima de la temperatura crítica, típicamente alrededor de los 100ºC. El reto para este tipo de actuadores recae en la dificultad de integrar su fabricación con los procesos de manufactura del silicio. A continuación, se presentan a manera de tabla las diversas características de los principales tipos de actuación: electrostática, piezoeléctrica, y magnética.

En la tabla 4.7 se presenta una comparación entre los diversos métodos de actuación en función de su densidad de energía máxima.

Tabla 4.6 [10].

Electrostática	Piezoeléctrica	Magnética
Estructura mecánica simple	Fabricación simple	Complejidad estructural variable
Bajo costo	Bajo costo	Empaquetamiento complejo
Manejado por voltaje	Manejado pro voltaje o corriente	Manejado por corriente
Requiere circuitos electrónicos	No requiere circuitos	Requiere circuitos de control simples
Susceptible a EMI	Baja impedancia de salida	Susceptible a EMI
Baja dependencia de temperatura	Alta dependencia de temperatura	Baja dependencia de temperatura
Amplio rango dinámico	Baja sensibilidad	Sensible al campo magnético
Sensible a capacitancias parásitas	Insensible a resistencias parásitas	Insensible a inductancias parásitas
Consumo de potencia bajo	Consumo de potencia medio	Consumo de potencia medio

EMI = *Electro Magnetic Interference*

Tabla 4.7 [10]

Actuación	Densidad de energía máx.	Parámetros físicos y del material	Condiciones estimadas	Orden aproximado (J/cm^3)
Electrostática	$\frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$	E = campo eléctrico ε_0 = permitividad dieléctrica	5 V/μm	~ 0.1
Térmica	$\frac{1}{2} Y (\alpha\Delta T)^2$	α = coeficiente de expansión ΔT = cambio de temperatura Y = módulo de Young	3×10^{-6}/ºC 100ºC 100 GPa	~ 5
Magnético	$\frac{1}{2} B^2/\mu_0$	B = campo magnético μ_0 = permeabilidad magnética	0.1 T	~ 4
Piezoeléctrico	$\frac{1}{2} Y (d_{33}E)^2$	E = campo eléctrico Y = módulo de Young d_{33} = constante piezoeléctrica	30 V/μm 100 GPa 2×10^{-12} C/N	~ 0.2
Shape-memory alloy	-	Temperatura crítica		~ 10

REQUERIMIENTOS DE POTENCIA DE MICROACTUADORES

Ya en el capítulo anterior, se vislumbraba la necesidad de conocer los requerimientos de potencia de los actuadores, también se había considerado una tabla más general (con más tipos de actuadores). Ahora que mencionamos algunos de los más importantes tipos de actuadores, es preponderante conocer sus potencias requeridas para poder tomar una mejor elección en el tipo de actuador.

Los requerimientos de potencia de los MEMS dependen del principio de actuación que está involucrado. Anteriormente (arriba) se vieron principios comunes de actuación, utilizados para MEMS, incluyendo electrostático, magnético, piezoeléctrico, y de excitación térmica. Requerimientos de potencia típicos para este tipo de principios de actuación se muestran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 [66]

Dispositivo	Principio de actuación	Material de fabricación	Requerimientos de potencia
Motor	Electrostático	Poli-Si	60 ~ 400 V / nA ~ μA
Motor	Magnético	Ni-Fe	~ 1 V / 500 mA
Motor	Piezoeléctrico	PZT	4 V (100 kHz) / ~ μA
Actuador	Electrotérmico	Si / Au	~ 10 V / ~ mA

CONCLUSIÓN TIPO DE ACTUADOR

Por las tablas anteriores, y por la literatura hallada al respecto, se tiene que el actuador electrostático es el más indicado para nuestra aplicación, ya que consume poca potencia, además de que este tipo de transductor ha sido utilizado con éxito en sensores y actuadores durante más de una década.

Algunos investigadores han logrado decrementar el voltaje de actuación de algunos MEMS electrostáticos. Este tipo de MEMS usualmente requieren voltajes de actuación en el rango de las decenas a las centenas de Volts, y de corrientes de actuación en el rango de nA a μA. Pero una de las principales ventajas que presentan es que permiten desplazamientos relativamente grandes, además de que tienen bajas corrientes de actuación, lo que lleva a bajas potencias de manejo ($P = VI$), lo que compensa en cierto modo los grandes voltajes de actuación.

VENTAJAS /DESVENTAJAS de la utilización de un actuador electrostático

Tabla 4.9

Ventajas	Desventajas
- Bajo consumo de corriente, por ende de potencia - Un actuador electrostático puede desplazarse distancias relativamente grandes. - Son un tipo de actuadores, bien estudiados e implementados con éxito por más de una década.	- Se requieren grandes distancias laterales, lo que implica grandes voltajes de actuación. - Para permitir un desplazamiento grande, requiere de dimensiones físicas grandes.

4.5 Análisis del Fotoconvertidor

Una parte importante del análisis a nivel dispositivo es el fotoconvertidor, ya que de este dispositivo depende la eficiencia de conversión O/E para la alimentación de la UR. Además se desea integrar en la medida de lo posible a la UR en un chip ya que se simplifica el ensamblaje y se reduce el tamaño total del dispositivo.

Una opción es utilizar un fotoconvertidor comercial, eficiente para este tipo de aplicaciones, por ejemplo el PPC-6ME (*Photovoltaic Power Converter*) que alimenta con 6 V o más a una UR. A partir de su hoja de especificaciones, se observa que puede tener una eficiencia de conversión de 40 %, ver Fig. 4.10

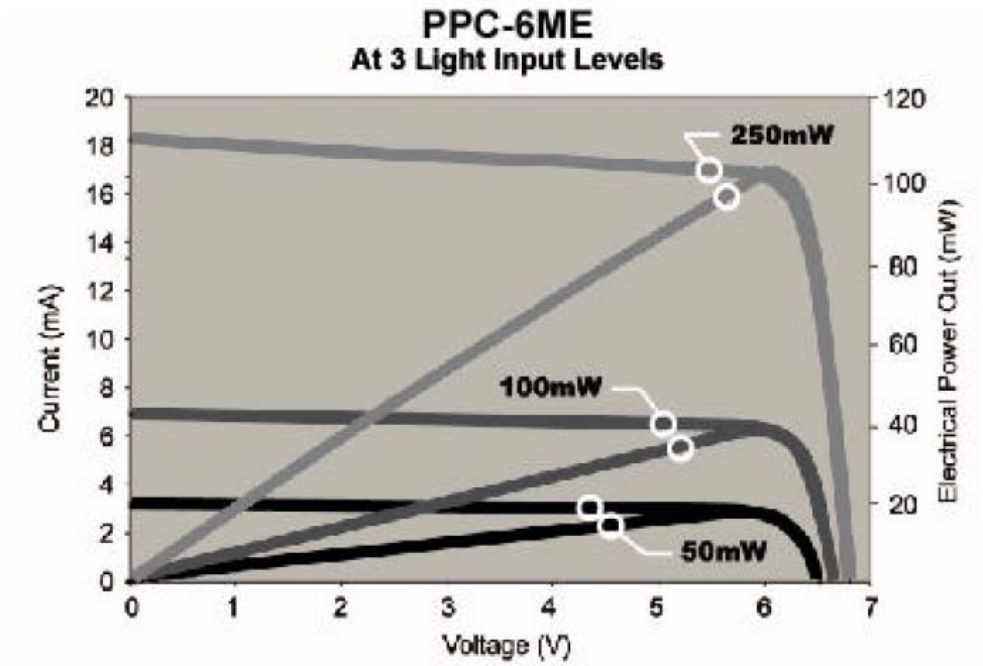


Fig. 4.13 Curva VI (Voltaje-Corriente) del fotoconvertidor comercial PPC-6ME

$$\eta = \frac{100mW}{250mW} = 0.40$$

$$\%\eta = 40\%$$

Entonces se puede considerar este dispositivo para el estudio, ya que al comprarlo aparte resulta más barato que si formara parte de una interfaz completa comercial, como la OPM-800, vista en el capítulo anterior.

Otra opción para es fabricar celdas solares adoptadas comúnmente para la alimentación óptica, ya que la tecnología de celdas solares es compatible con la microfabricación y algunos tipos sencillos de IC's, además utiliza pasos sencillos de fabricación lo cual podría facilitar la integración de la UR en un chip.

Por lo tanto se compararon varias opciones de arreglos de celdas PVs, una de GaAs, otra de Si, y la comercial PPC-6ME.

Tabla 4.10

Tipo de fotoconvertidor / Característica comparada	**Fotoconvertidor comercial PPC-6ME**	**Arreglo de celdas PVs de GaAs**	**Arreglo de celdas PVs de Si**
Eficiencia	40% @ 10 W/cm^2	57% [teórico] 55% [experimental] @ 10 W/cm^2	24.7% @ 540 mW/cm^2
Número de celdas	10 en serie (estimado)	6 en serie	8 en serie
Voltaje circuito abierto, V_{oc}	5 – 6 V	5 V	4.5 V
Área activa	1 mm^2	0.21 cm^2	1.9 cm^2
Separación entre fibra y fotoconvertidor	6 mm	-	-
Ventajas	Opción comercial disponible actualmente.	Opción más eficiente para la λ de la fuente (830 nm).	Opción más económica. Es posible la integración en un chip.
Desventajas	Imposible la integración en un chip	Difícil construcción, es posible la integración mediante "pegado"	Es necesario un mayor número de celdas

No se cuenta con información acerca del material del fotoconvertidor comercial PPC-6ME, pero si se indica que su rango de longitudes de onda de trabajo es de 790-850 nm [91], se puede suponer que están fabricadas con silicio.

Una característica típica de las celdas PVs, es su gran área activa, una pregunta a este respecto que se formuló durante esta investigación era por qué requerían esas grandes dimensiones. La tecnología de celdas solares fue diseñada para aplicaciones de alimentación a macro escala, es decir, se sabe que el sol derrama sobre la tierra 1000 W/m^2, por ello las celdas solares tratan de aprovechar al máximo esta densidad de potencia con grandes áreas activas, y conexiones en serie entre ellas para elevar el voltaje de salida, ya que la eficiencia de conversión O/E no es muy alta. Además sus dimensiones son grandes debido a que de esta forma se reparte mejor la densidad de potencia, evitando el sobrecalentamiento de las celdas por concentrar grandes cantidades de potencia en áreas pequeñas. Por lo tanto el área depende de la densidad de potencia incidente al arreglo.

Una desventaja que presentan las celdas PVs es que entre mayor sea el número de celdas en serie, mayor resistencia en serie se tendrá, lo que se traduce en pérdidas (en forma de calor) que afecta a la eficiencia total de la celda.

AUMENTO DE LA EFICIENCIA DE CONVERSIÓN O/E

Se desea disminuir la reflexión que pueda existir sobre la superficie del fotoconvertidor, de esta forma, aumentar la potencia óptica que ingresa a éste, y por consiguiente aumentar la eficiencia del convertidor O/E. Este aspecto es importante en el diseño de las celdas solares, y se puede mejorar con una capa de material antireflejante (plana) donde la celda recibirá la luz, otra forma es texturizando la superficie de tal forma que la luz tenga menos oportunidades de salir de la celda.

Las capas antireflejantes utilizadas en la tecnología de celdas solares son por ejemplo, el MgF_2 [68], ó Si/SiO_2 [69]. En el caso de celdas de Si con una capa de SiO_2 se tiene que más del 95% de la luz es reflejada, lo cual no resulta eficiente [70]. Sin embargo en el caso de celdas de Si con capa de MgF_2, se ha demostrado una eficiencia de 22.3% aunque su superficie plana provoque un 2% en pérdidas de reflexión [68]. Se utilizan como superficies texturizadas las estructuras de pirámides invertidas, [70], [71] ver Fig. 4.11, y las estructuras de pirámides sin invertir [68], Fig. 4.12. La eficiencia de las pirámides sin invertir es del 22.7% [68] y la de las pirámides invertidas es hasta del 45-50% [70], [71] a los 1000 mW/cm^2 de intensidad óptica. La estructura de pirámide invertida reduce las pérdidas por reflexión de la superficie superior de la celda, asegurando que la luz reflejada en el primer punto de incidencia es reflejada hacia adentro y de esta forma tiene otra oportunidad de ser acoplado dentro de la celda. El diseño de pirámide invertida es muy eficiente para “atrapar” luz mediante reflexión interna total, teniendo que cerca de un 50% de la luz es atrapada por este proceso [70].

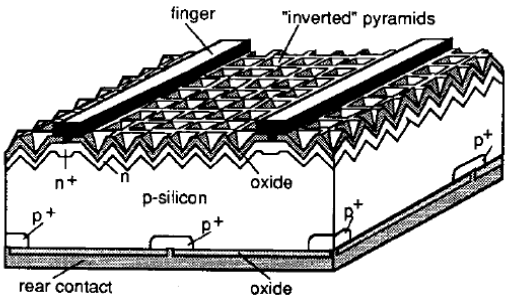


Fig. 4.14 Celda fotovoltaica de silicio con superficie con estructuras de pirámides invertidas [70].

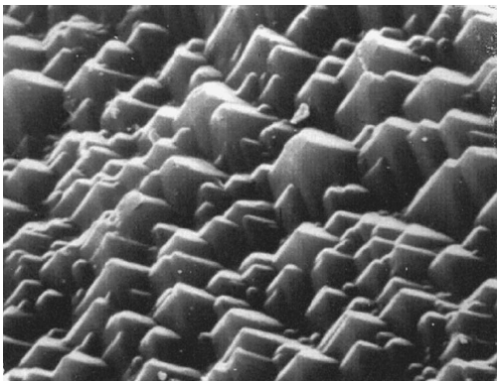


Fig. 4.15 Imagen tomada mediante un microscopio de escaneo de electrones (SEM) de la superficie de un módulo texturizado. Estas pirámides sin invertir tienen en promedio una base de 5 μm de lado [68].

Tabla 4.11 Comparación entre superficies antireflectoras para celdas fotovoltaicas

Tipo de superficie antireflectora	Intensidad [mW/cm^2]	% Eficiencia de la celda PV de Silicio
Sin superficie antireflectora	100	20 [27]
Plana, de MgF_2	100	22.3 [68]
Texturizada, pirámides sin invertir	100	22.7 [68]
Texturizada, pirámides invertidas	100	23 [70]

La tabla 4.11 compara la eficiencia de celdas fotovoltaicas de silicio iluminadas con una intensidad óptica de 100 mW/cm^2, y con tres tipos diferentes de superficies antireflectoras y sin ninguna. De esta manera se puede observar que si se considera que las celdas fotovoltaicas están cubiertas con una superficie antireflectora tipo texturizada con pirámides invertidas puede mejorar hasta un 3% la eficiencia de la celda, comparada con una celda sin ningún tipo de superficie texturizada. Este ligero incremento es importante, pues aumenta la eficiencia general del proceso de conversión fotovoltaica.

DISIPADOR DE ENERGÍA CALORÍFICA

Otro aspecto a considerar en la elaboración de una celda solar u otro tipo de fotoconvertidor es que cuando la potencia óptica incidente sobre las celdas es grande se tiene un calentamiento general del dispositivo convertidor lo que podría causar la destrucción del dispositivo. Por ello es necesario considerar la utilización de un disipador de energía calorífica

Tanto la confiabilidad como la expectativa de vida del equipo electrónico tienen una relación inversa a la temperatura del dispositivo, por lo que el manejo térmico del dispositivo se convierte en una parte importante del diseño electrónico.

La relación entre la confiabilidad y la temperatura de operación de un dispositivo típico de silicio muestran que la reducción de temperatura corresponde a un incremento exponencial en la confiabilidad y expectativa de vida del dispositivo. Entonces, se puede alcanzar un desempeño confiable y darle "larga vida" al componente mediante un control efectivo de la temperatura de operación del dispositivo.

Los disipadores de energía calorífica, como su nombre lo indica, son dispositivos que facilitan la disipación de potencia en forma de calor de una superficie caliente, usualmente llamado componente generador de calor que en nuestro caso son las celdas fotovoltaicas, a un ambiente frío, usualmente el aire llamado elemento enfriador.

Entonces, se asume que el aire es el fluido enfriador. En la mayoría de las situaciones, se tiene que la transferencia de calor a través de la superficie de contacto del sólido y el aire (interfaz sólido-aire) es la menos eficiente dentro del sistema térmico. Así que la interfaz sólido-aire representa la mayor barrera para la disipación de calor.

Los disipadores pueden reducir la diferencia de temperaturas entre el componente generador de calor y el elemento enfriador, principalmente, aumentando la superficie que se encuentra en contacto directo con el enfriador. De esta manera se tiene una mayor disipación del calor, lo que conlleva a menores temperaturas de operación del dispositivo.

En resumen, el principal propósito de los disipadores de potencia es mantener la temperatura del dispositivo por debajo de la temperatura máxima especificada por el fabricante [72].

4.6 Configuración utilizada

Como se discutió en el análisis a nivel sistema existen tres tipos de configuraciones posibles para el sistema: una fibra, dos fibras y tres fibras. Enseguida se estudian las posibilidades para hacer la configuración con una fibra para nuestra aplicación, tomando en cuenta los elementos estudiados en el análisis a nivel sistema.

Opción 1. Una posibilidad viable para tener un enlace con una fibra sería el mostrado en el siguiente diagrama:

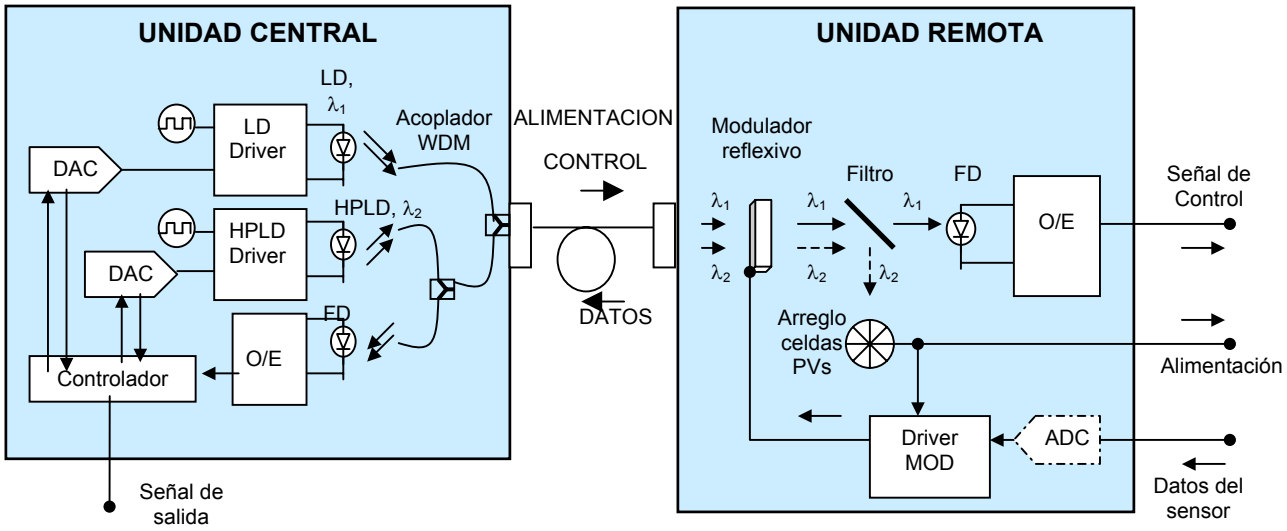


Fig. 4.16 Opción 1 de enlace con una fibra

Este sistema provee de potencia óptica y de una señal de control a una UR mediante una fibra óptica, mientras que utiliza otra como medio de transmisión para los datos (en forma de señales analógicas) que emite el dispositivo conectado, este dispositivo como bien se ha mencionado, puede ser un sensor o un actuador.

Como puede observarse en el diagrama de la opción uno, tenemos dos fuentes en la UC, una es un diodo láser de alta potencia (HPLD) y la otra fuente es un diodo láser (LD), el primero es el encargado de alimentar a la UR, y el LD genera la señal de control. Ambas señales son acopladas en una fibra para posteriormente llegar a la UR, directamente al modulador reflexivo, que al principio se encuentra en estado transparente, es decir deja pasar la potencia, luego las señales son filtradas para que la potencia óptica se convierta en una señal eléctrica de DC mediante un arreglo de celdas fotovoltaicas (PV cells), y la señal de control se convierta en señal eléctrica mediante fotodiodos (PD).

La señal de control eléctrica obtenida por el FD permite la comunicación entre el la UR y la UC. Los datos proporcionados por el dispositivo conectado en la UR llegan al bloque de control de la UR, si estos datos son analógicos requieren un bloque de conversión A/D, para que el control pueda retransmitirlos a la UC a través del movimiento del micromodulador.

En este diseño de configuración, los elementos claves son el HPDL y las celdas fotovoltaicas ya que dependiendo de ellos se logra la alimentación óptica requerida. Existen muchos LDs y PDs de alto rendimiento y confiabilidad para señales de transmisión, en las regiones de 1310-1550 nm, ya que en este rango se encuentran las comunicaciones vía fibra óptica actuales. Los HPLD son las más fuentes ópticas más apropiadas para el sistema propuesto, considerando su tamaño compacto y su eficiencia de conversión E/O. Esta opción es más cara por el tipo de acopladores que se necesitan, ya que son WDM, y por las potencias ópticas que se están manejando, los acopladores WDM que soporten estas potencias son más caros que los comunes. Otra de las características de esta configuración es que se tiene mayor ancho de banda posible, por la utilización de dos fuentes, una para la alimentación y otra para la transmisión de señales de control. El elemento más indeseado en este sistema es el filtro, pues dificulta enormemente la integración en un chip de silicio la UR, lo que desaprovecha la ventaja que se tiene con el modulador reflexivo.

Tabla 4.11 Componentes WDM para sistemas de fibra óptica [21]

Sistema	Longitud de onda de alimentación (y señal)	Pérdidas en la fibra	Pérdidas por acoplamiento	Potencia tolerable en 1 km	Acoplador WDM	Notas
SMF	980 nm, 1480 nm (1310–1550 nm)	~ 2–3 dB/km (980 nm) ~ 0.2–0.3 dB/km (1480 nm)	~ 2 dB	~ varios W 0.2 dB @ 1480 nm	Tipo Fibra (*Fused fiber coupler*)	- Baja potencia - Señales de banda ancha - Cortas distancias
SI–MMF	808–980 nm (850 nm, 1330 nm)	~ 2–3 dB/km (808–980 nm)	~ 0 dB	~ varios cientos de W 2 dB @ 850 nm	Tipo bloque (*Bulk Type: Espejo dicróico*)	- Grandes potencias - Señales de banda angosta - Cortas distancias
GI–MMF	808–980 nm, 1300–1600 nm (850 nm, 1330 nm, 1310–1550 nm)	~ 2–3 dB/km (808–980 nm) ~ 0.2–0.3 dB/km (1300–1600 nm)	~ 0 dB	~ 1 kW 0.2 dB @ 1480 nm	Tipo bloque (*Bulk Type: Espejo dicróico*)	- Grandes potencias - Señales de banda ancha - Grandes distancias

Opción 2. Esta opción es más barata, ya que sólo utiliza una fuente para la alimentación y el control.

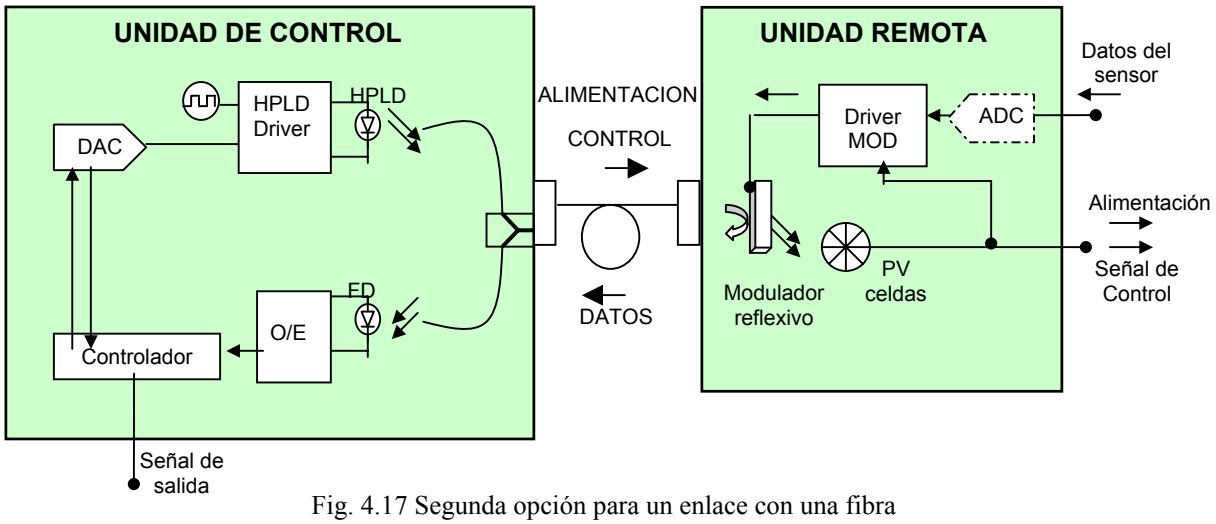


Fig. 4.17 Segunda opción para un enlace con una fibra

De esta manera nos ahorramos una fuente y un acoplador WDM, en cambio el único acoplador que se requiere el sistema no necesita ser WDM, lo que también disminuye los costos notablemente, por lo que esta es una versión barata de interfaz completa.

En la UR se puede utilizar un fotoconvertidor junto con su transformador y su rectificador, en lugar del arreglo de celdas fotovoltaicas, ya que se tiene una señal de alimentación modulada.

4.7 Fabricación de la Unidad Remota

Durante la microfabricación de ICs se integran varios elementos circuitales (resistencias, capacitancias, diodos, etc.) en un solo chip para simplificar el ensamblaje, reducir al mínimo posible el tamaño total del circuito [87], incrementar la eficiencia del sistema y por supuesto, reducir costos de fabricación, todo esto de acuerdo a la tecnología del momento. De igual forma se busca la integración en la fabricación de la UR en un chip de silicio, dentro de lo posible.

Por lo tanto en este tipo de estudios siempre se debe buscar la manera de integrar procesos de fabricación, en este caso del MOEMS y de las celdas PVs, para que estos componentes puedan ser fabricados juntos en un solo chip.

4.8 Integración

Para poder lograr la mayor integración es necesario conocer cuáles son los factores que están involucrados. En este caso, los factores de los cuales depende la integración son los siguientes:

- La densidad de potencia [W/cm^2] que llega al elemento fotoconvertidor.
- El material de fabricación del fotoconvertidor.
- La distancia de separación entre la fibra y el fotoconvertidor.

A continuación se explican cada uno de los factores anteriormente señalados.

<u>Factor: Densidad de potencia incidente</u>

La densidad de potencia óptica incidente a las celdas, se define como:

$$I\left[\frac{W}{cm^2}\right] = \frac{P_{FD}}{A} \qquad \ldots(4.9)$$

es decir, es la potencia óptica que llega a las celdas por unidad de área del arreglo.

La densidad de potencia es un parámetro importante, ya que si se tiene que el área de las celdas es muy pequeña ($\leq$ 1 mm^2) para facilitar la integración, y la potencia incidente es grande, de 1 W por ejemplo, se tiene una densidad de potencia muy grande ($\geq$ 100 W/cm^2) lo cual provocaría el calentamiento del chip. Por lo tanto, si se utilizan potencias grandes se requieren áreas grandes para las celdas, y por ende, grandes distancias de separación entre fibra y celdas, como se ve adelante.

Por lo tanto se proponen 3 soluciones:

- Utilizar áreas pequeñas con alimentación de potencias pequeñas, para facilitar la integración en un chip.
- Si se trata de áreas pequeñas y potencias relativamente grandes, podría utilizarse un disipador de calor, para eliminar el problema del calentamiento.
- Si se alimenta la UR con potencias grandes, procurar utilizar áreas grandes del arreglo fotovoltaico, la desventaja de esta solución es que dificulta enormemente la integración en un chip, por la separación que requieren ambos para iluminar uniformemente toda el área del arreglo.

Algunas investigaciones se han enfocado en parte a la importancia del calor generado en las celdas bajo condiciones de altas potencias, como ejemplo cuantitativo de este problema, se tiene la Ref. [15], en la cual se considera que si el valor de la potencia incidente al arreglo fotovoltaico, P_{FD}, es mayor a los ~650 mW, en un área aprox. de 1 cm^2, lo que significa una densidad de potencia de 0.65 W/cm^2, se debe tomar en cuenta la generación de calor, ya que ésta influye directamente en la eficiencia total del sistema. También existen otros estudios que evalúan la eficiencia total de las celdas considerando grandes densidades de potencia (10-100 W/cm^2) donde las pérdidas por generación de calor pasa a segundo plano, y son más preocupantes las pérdidas por las resistencias en serie de los arreglos PVs en serie [21], [22], [51].

Factor: Distancia de separación entre la fibra y fotocelda

Este factor es importante porque dependiendo de la distancia que exista entre la fibra y el arreglo, se tiene el valor del área que proyecta el cono de salida de la luz proveniente de la fibra sobre las celdas PVs. Como se puede analizar en la Ec.4.4, se tiene una dependencia entre esta distancia y el área requerida para el arreglo. Entre mayor sea el área de las celdas mayor será a su vez la separación entre fibra y celdas. Esto dificulta la integración de los elementos en un solo chip, esto depende directamente de la densidad de potencia que llega al arreglo. Densidades grandes (1-100 W/cm^2), necesitan áreas grandes de los arreglos (>1mm^2) para la conversión de energía de manera adecuada, además de implicar grandes distancias de separación (>1mm), considerando que el grosor de una oblea de silicio es 500 μm, esto imposibilita la integración.

Factor: Material de las celdas

El material de fabricación de las celdas PVs también es importante en el momento de la integración, ya que en el caso de las celdas de GaAs, la mejor opción es la de pegar las 2 obleas, 1 con el MOEMS de polisilicio con oblea de Si, y la otra con el arreglo de celdas con oblea de GaAs. La ventaja de esta solución es que es la óptima por las ventajas que ofrecen las celdas de GaAs, como mayor eficiencia de conversión O/E y menor número de celdas necesarias. La desventaja es que el proceso de fabricación se dificulta y aumenta en costos, pues las obleas de GaAs son más costosas que las de Si, y el proceso de pegado no es sencillo.

En el caso de celdas PVs de Si, se tienen dos opciones, la primera es integrar el MOEMS y el arreglo de celdas en un solo chip de Si, cuando se trata de bajas potencias, la segunda opción es fabricar el MOEMS en una oblea y el arreglo de celdas en otra (ambas de Si), en el caso de utilizar grandes potencias.

4.9 Empaquetamiento

Se pensaron cuatro posibles formas (A, B, C ó D) para integrar el dispositivo MOEMS junto con las celdas PVs en un empaquetado que esté listo para utilizarse. Para encontrar un empaquetamiento adecuado (y económico) para las necesidades a cubrir en este trabajo, se tomaron en cuenta los tres factores mencionados anteriormente.

Propuesta "A"

Entonces, si lo que se requiere es *mayor eficiencia* en conversión de energía O/E se tienen las opciones A y B, en las cuales se propone la integración de dos obleas pegadas entre sí. La ventaja de utilizar dos obleas es que pueden ser de materiales diferentes y pueden tener dos procesos de fabricación muy diferentes, y en este caso en particular, es ventajoso tener una oblea de sustrato de GaAs en la cual se pueda construir celdas PVs de GaAs, que a su vez tienen la ventaja de que puede disminuirse el número de celdas, es decir, tienen mayor eficiencia de conversión de potencia.

Como podemos observar en la Fig. 4.18 se tiene una integración adecuada para la protección del MOEMS, ya que el "grabado" que se ha hecho debajo de la oblea de GaAs sirve como estructura protectora práctica. Así mismo, se tiene que la estructura grabada detrás de la oblea de Si, sirve como estructura de soporte para el núcleo de la fibra multimodo. Aunque también puede surgir la pregunta de cuál será el área posible para las celdas PVs a una distancia de separación igual al grosor del sustrato de GaAs (para una oblea de 100 mm de diámetro, corresponde un grosor de ~625 μm [88]).

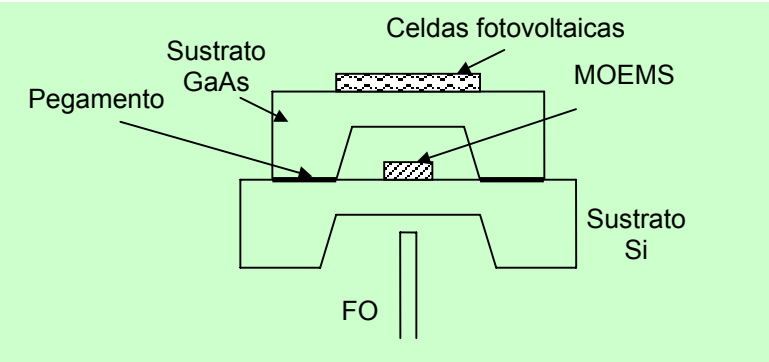


Fig. 4.18 Propuesta de integración A de dos obleas

Entonces se tiene que a esa distancia de separación (~625 μm) y una intensidad de potencia máxima de 100 W/cm^2 (para celdas de GaAs) como lo indica la Ref. [51], aplicando la siguiente ecuación, que se encuentra implícita en la Ec. 4.4:

$$A = \pi\left(D \tan \alpha_{om} + a\right)^2 \qquad \ldots(4.10)$$

donde A es el área del FD, D es la distancia de separación entre la fibra y el FD, α_{om} es el ángulo del cono de aceptación de la fibra, y *a* es el radio del núcleo de la fibra, aplicando esta fórmula, obtenemos el área mínima que deberán tener las celdas igual a, A =π (625[μm] x (0.2860) + 31.25[μm])^2 = 0.1385 mm^2, lo que equivale a un área cuadrangular (para las fotoceldas) de 372.22 μm por lado, ó a un área circular con 210 μm de radio. Y aplicando la Ec. 6.1, se obtiene la potencia máxima que puede entregar la fibra óptica para una densidad de 100 [W/cm^2], es $P_{máx}$ = 138.55 [mW]. Como A es el área mínima para que las celdas reciban la potencia proveniente de la fibra, debe ser un poco mayor para que no existan pérdidas, si A = 0.2 mm^2, se toma un diseño optimizado de arreglo de celdas fotovoltaicas de GaAs con las siguientes características [51] de fabricación:

Tabla 4.12 Características óptimas de fabricación para un arreglo de celdas de GaAs

Densidad de Potencia (I)	**100 [W/cm^2]**
Grosor del Emisor (w_E)	1.84 [μm]
Grosor de la Base (w_B)	4.8 [μm]
Dopaje del Emisor (N_E)	6.2 x 10^{17} [cm^{-3}]
Dopaje de la Base (N_B)	6.8 x 10^{16} [cm^{-3}]
Área (A_{PV})	0.2 [mm^2]
Número de celdas	6
Eficiencia @ 100 [W/cm^2] (%η)	54 %

Un problema que muestra esta integración (Propuesta "A") es que el proceso de fabricación de las fotoceldas debe ser tal que el área activa de ellas sea la primer capa del proceso de fabricación (es decir, sobre el sustrato de GaAs) para que sea posible la entrada de potencia óptica hacia las celdas. Adicionalmente en este caso, otro problema es la ubicación del MOEMS, ya que la ubicación de la superficie reflectora se encuentra en el lado opuesto, claro que podría utilizarse la estructura de polisilicio, pero sería menos reflexiva.

Para el empaquetamiento de la propuesta "A", se observó que para proteger la estructura de las fotoceldas, era necesario pegar las obleas como lo muestra en la Fig. 4.19 con líneas punteadas, de lo contrario se podrían estropear las celdas, el problema es la conexión con los contactos que quedan muy alejados de la cabecera. Otra solución podría ser poner una especie de apoyos sobre la cabecera del chip, para separar las obleas del contacto directo con la cabecera, donde se podrían asegurar o "pegar" las obleas, para evitar el problema de los contactos y proteger la estructura de las celdas.

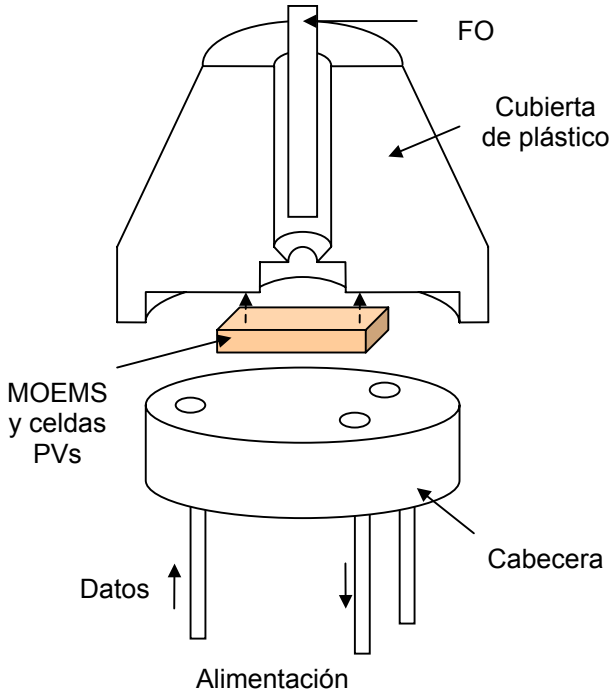


Fig. 4.19 Empaquetamiento para A ó C

<u>Propuesta "B"</u>

Para facilitar la fabricación, se invierte el orden de pegado de las obleas (Fig. 4.20), de esta manera: se evitan problemas durante la fabricación de las celdas (por lo señalado arriba); la estructura grabada debajo de la oblea de Si ofrece protección a las fotoceldas; además, se puede depositar opcionalmente una capa de metal (p.ej. Al) en la cara opuesta donde esta el arreglo de celdas de la oblea de GaAs, a manera de disipador de calor. Análogamente a la propuesta anterior, se calcula la potencia máxima que soportan las celdas, en este caso, la diferencia es que se tomará en cuenta el grosor de la oblea de silicio (500 [μm]), como distancia D, de separación entre la fibra y las celdas.

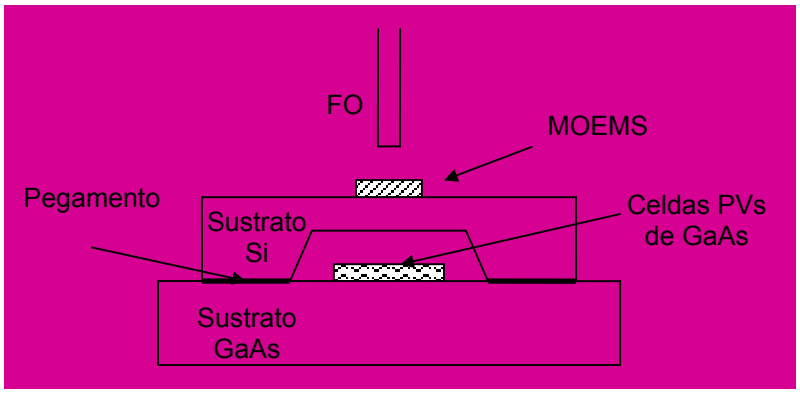


Fig. 4.20 Propuesta de integración B de dos obleas

Entonces, se obtiene el área mínima que deberán tener las celdas igual a, $A = \pi\ (500[\mu m] \times (0.2860) + 31.25[\mu m])^2 = 0.0954\ mm^2$, lo que equivale a un área cuadrangular (para las fotoceldas) de 309 μm por lado, ó a un área circular con 174.25 μm de radio. Y aplicando la Ec. 4.9, se obtiene la potencia máxima que puede entregar la fibra óptica para una densidad de 100 [W/cm^2] es la $P_{máx}$ = 95.4 [mW]. Como se puede constatar, la potencia máxima bajó considerablemente con la distancia D de 500 [μm].

Por otra parte, el empaquetamiento se muestra en la Fig. 4.21, la diferencia es la ubicación (pegado) de las obleas mostrada con líneas punteadas. Un problema con este empaquetamiento es que el MOEMS se encuentra relativamente desprotegido contra el manejo de fabricación.

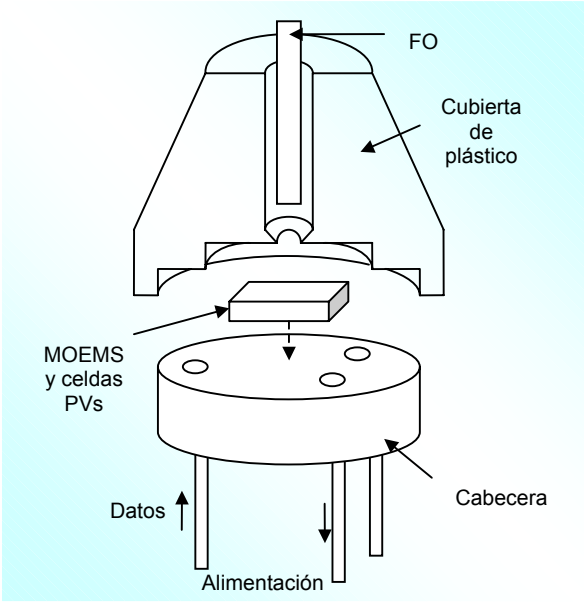


Fig. 4.21 Empaquetamiento para B

Propuesta "C"

Esta propuesta está dirigida a la utilización de una sola oblea de Si para la máxima integración posible. En este caso, el MOEMS se fabrica en un lado de la oblea y las celdas de Si en el otro extremo (Ver Fig. 4.22). Las desventajas de esta configuración son: la fabricación de las celdas de tal modo que el área activa se encuentre en el lado de la oblea; y que al momento de realizar el corte de la oblea en varios chips se podría dañar la estructura, ya que hay un dispositivo en cada cara.

La potencia máxima posible en este caso, es igual que la calculada anteriormente, considerando una D = 500 [μm], y una I = 100 W/cm^2, $P_{máx}$ = 95.4 [mW]. Pero el problema principal con el área A = 0.0954 mm^2 es que la tecnología de celdas solares de Si, normalmente no se tiene celdas fotovoltaicas con área menor a los 0.25 mm^2 (500 x 500 μm^2) [89].

Sin embargo existe la posibilidad de construir una celda cuadrangular de Si con tecnología CMOS de 150 [μm] de lado, como lo marca la Ref. [87] y junto fabricar un trasformador Ref. [89] para levantar el voltaje proveniente de una sola celda, lo que equivale a un área cuadrangular (para las fotoceldas) de 309 μm por lado, ó a un área circular con 174.25 μm de radio. Esta solución no es la más eficiente pero permite la integración de la UR en un chip.

La ventaja que presenta la propuesta "C" es que puede utilizarse una fuente mucho menos potente que la que se propuso de 1W para fibras multimodo. El empaquetamiento puede ser similar al descrito en la propuesta "A" y ejemplificado en la Fig. 4.16.

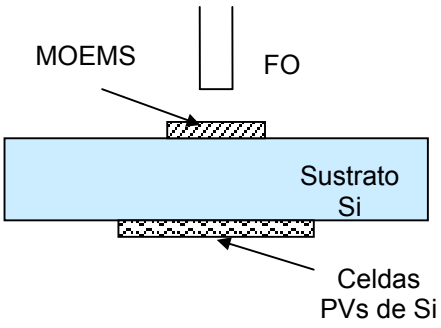


Fig. 4.22 Propuesta de integración C en una oblea

Propuesta "D"

Pensando que la posibilidad de alimentar a mayor potencia de alimentación la UR, es alcanzable aumentando la distancia de separación entre la fibra y el arreglo de celdas, se tiene la propuesta "D" mostrada en la Fig. 4.23. De esta manera se puede "controlar" la distancia D. En este caso, se hará el proceso inverso para los cálculos, para la $P_{máx}$ brindada por la fuente *JSU Uniphase* en un enlace de 100 m (710 mW) y un área de celdas de GaAs igual a 6 mm^2, para un área circular con radio 1.4 mm, se tiene una I = 11.83 W/cm^2 y una distancia máxima D = 4.73 mm.

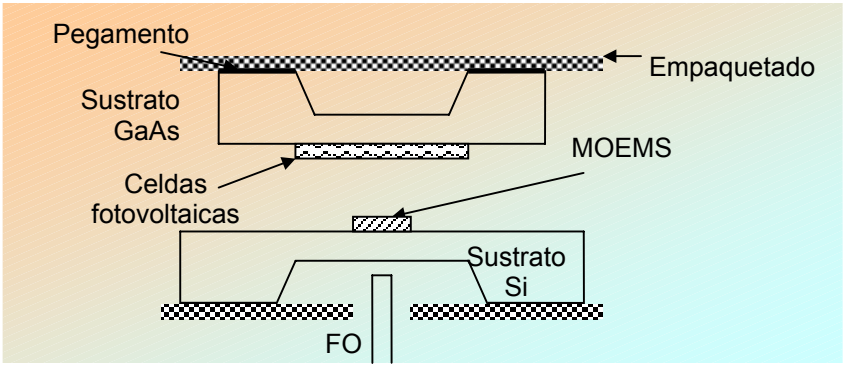


Fig. 4.23 Propuesta de integración D

Los parámetros óptimos para un arreglo de celdas PVs de GaAs, con estas características son:

Tabla 4.13 Características óptimas de fabricación para un arreglo de celdas de GaAs

Densidad de Potencia (I)	**10 [W/cm^2]**
Grosor del Emisor (w_E)	1.78 [μm]
Grosor de la Base (w_B)	4.9 [μm]
Dopaje del Emisor (N_E)	4.3×10^{17} [cm^{-3}]
Dopaje de la Base (N_B)	6.2×10^{16} [cm^{-3}]
Área (A_{PV})	6 [mm^2]
Número de celdas	6
Eficiencia @ 10 [W/cm^2] (%η)	56 %

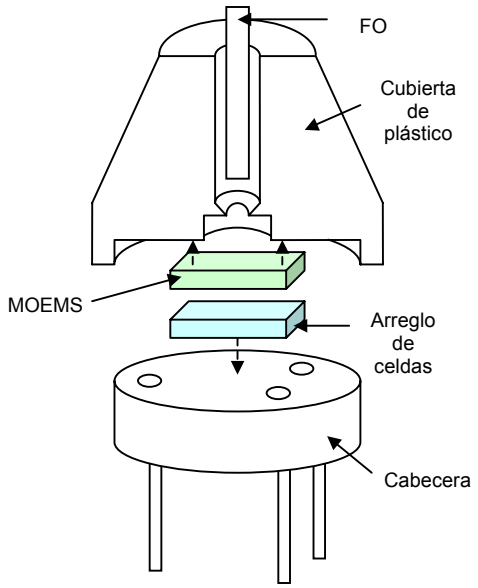


Fig. 4.24 Empaquetamiento propuesto para "D"

4.10 Pérdidas dirección "*de ida*"

Para el estado apagado ó "transparente"

PÉRDIDAS INSERTADAS POR TIPO DE ENLACE Y CONECTOR

A continuación se presentan a manera de tabla los resultados de las pérdidas consideradas en el enlace del punto A al B (Fig.4.1) con una distancia de 100 m ó 1000 m, es decir, antes de considerar las pérdidas agregadas por el modulador. Estas pérdidas son la suma de la atenuación por longitud de la fibra y las agregadas por conectores, L_{enlace}.

Enlace	L_{enlace}, [dB] (100 m)	L_{enlace}, [dB] (1 km)
E(1)	0.67	3.1
E(2)	0.70	3.4
E(3)	0.434	0.74
E(4)	0.421	0.71

Tabla 4.14

Nota: No se consideran las pérdidas que se tienen por acoplamiento de la fuente a la fibra, ya que se consideraron sólo potencias acopladas a la fibra en la tabla 4.1 (P_o).

PÉRDIDAS DE FRESNEL

Las pérdidas de Fresnel, L_F, por la interfaz fibra-aire y se calculan por la expresión [60]:

$$L_F = 10\log\left(\frac{1}{1-r}\right) \quad \ldots(4.11)$$

donde r es el factor de reflexión, que es la relación entre el flujo energético reflejado y el flujo energético incidente, y se calcula mediante [60]:

$$r = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0}\right)^2 \quad \ldots(4.12)$$

donde n_1 y n_0 son los índices de refracción del núcleo de la fibra y del aire respectivamente.

Algunos índices de refracción útiles son los condensados en la siguiente tabla.

Tabla 4.15

Medio	*n*
Aire	1.0003 (≈1.0)
50/125 μm, E1	1.49 @ 850 nm
62.5/125 μm, E2	1.496 @ 850 nm
9.2/125 μm, E3	1.469 @ 1.310 μm
10.4/125 μm, E4	1.4695 @ 1.550 μm

Los últimos cuatro medios corresponden a los índices de refracción de los núcleos de las fibras ópticas con dichas dimensiones. Suponiendo, por ejemplo, que $n_1 = 1.5$, $n_0 = 1$ (aire), para la interfaz fibra–aire, r = 0.04, que es igual a una reflexión del 4% de la luz transmitida, la pérdida de Fresnel para este valor de r es $A_F = 0.18$ (dB). Entonces para dichas fibras se obtuvieron las siguientes pérdidas de Fresnel y parámetros relacionados que se calcularon:

Tabla 4.16

Enlace	*r*	L_F fibra-aire (dB)
E1	0.0387	0.1715
E2	0.0395	0.1749
E3	0.0360	0.1596
E4	0.0361	0.1599

Entonces tenemos el análisis de las pérdidas hasta el punto B del diagrama inicial (Fig.4.1) adicionalmente con las pérdidas de Fresnel calculadas arriba, es decir antes de considerar las pérdidas insertadas por el modulador:

Tabla 4.17

Enlace	Pérdidas, [dB] (100 m)	Pérdidas, [dB] (1 km)
E(1)	0.67 + 0.171 = 0.841	3.1 + 0.171 = 3.27
E(2)	0.70 + 0.175 = 0.875	3.4 + 0.175 = 3.58
E(3)	0.434 + 0.159 = 0.593	0.64 + 0.159 = 0.799
E(4)	0.421 + 0.159 = 0.58	0.71 + 0.159 = 0.869

PÉRDIDAS INSERTADAS POR TIPO DE MODULADOR

Las pérdidas ópticas agregadas por el modulador son dependientes de la distancia de separación entre la fibra y el fotodetector, además de la potencia eléctrica de actuación que consuma el MOEMS (cap.5).

PÉRDIDAS POR ACOPLAMIENTO FIBRA-DETECTOR

Este tipo de pérdidas se encuentran en el sistema cuando el modulador se encuentra en estado transparente (o apagado), independientemente de que tipo de modulador se trate, ya que incluso el modulador basado en obturador, tiene una separación mínima entre la fibra y el detector.

Para poder calcular este tipo de pérdidas es necesario conocer el área activa del fotodetector que se utilizará. Pero para fines prácticos, basta con considerar que el área de la “mancha” que proyecta el cono de salida de la fibra es menor que el área del fotodetector.

PÉRDIDAS INSERTADAS POR CONVERSIÓN O/E

Esto dependerá de la eficiencia del tipo de arreglo de fotoceldas utilizado.

Tabla 4.18

Enlace	Fuente	Características fuente	P_2, Potencia después de modulador* (Pérdidas acumuladas) L = 100 m	P_2, Potencia después de modulador* (Pérdidas acumuladas) L = 1 km
E(1) 50/125 μm *Corning optical fiber*	Modelo: SDL-2320-L2 Fabricante: *JDS Uniphase*	P_0 = 0.2 W λc = 830 ± 15 nm $\Delta\lambda$ = 3 nm t_r, t_f = 30 ns	150 mW (1.27 dB) 132 mW (1.81 dB) 82 mW (3.84 dB)	84 mW (3.73 dB) 75 mW (4.24 dB) 47 mW (6.27 dB)
E(2) 62.5/125 μm *Corning optical fiber*	Modelo: SDL-2364-L2 Fabricante: *JDS Uniphase*	P_0 = 0.5 W λc = 830 ± 15 nm $\Delta\lambda$ = 3 nm t_r, t_f = 30 ns	368 mW (1.33 dB) 328 mW (1.84 dB) 205 mW (3.87 dB)	198 mW (4.03 dB) 176 mW (4.54 dB) 110 mW (6.57 dB)
E(3) 9.2/125 μm *Samsung Fiberoptics*	Modelo: LFO-24-ip Fabricante: *Roithner Lasertechnik*	P_0 = 4.5 mW λc = 1310 ± 30 nm $\Delta\lambda$ = 10 nm t_r, t_f = 2 ns	3.53 mW (1.05 dB) 3.14 mW (1.56 dB) 1.97 mW (3.59 dB)	3.37 mW (1.26 dB) 2.99 mW (1.77 dB) 1.88 mW (3.80 dB)
E(4) 10.4/125 μm *Samsung Fiberoptics*	Modelo: LFO-18/2-i Fabricante: *Roithner Lasertechnik*	P_0 = 3 mW λc = 1550 ± 30 nm $\Delta\lambda$ = 3 nm t_r, t_f = 0.7 ns	2.36 mW (1.04 dB) 2.10 mW (1.55 dB) 1.32 mW (3.58 dB)	2.21 mW (1.33 dB) 1.96 mW (1.84 dB) 1.19 mW (4.02 dB)

* Considerando las pérdidas 10, 20 y 50 %

4.11 Pérdidas dirección "de regreso"

Las pérdidas insertadas por el modulador, son principalmente por: pérdidas de Fresnel de la interfaz fibra-aire-fibra; pérdidas por acoplamiento fibra-fibra; pérdidas por acoplamiento fibra-fotodiodo de UC.

Para estado encendido o "reflexivo"

PÉRDIDAS DE FRESNEL (dirección *de regreso*)

Este tipo de pérdidas se consideran dentro de las pérdidas en el modulador cuando se encuentra en estado reflexivo (o encendido), se puede tomar la aproximación que nos brinda la equivalencia de la Fig. 4.8, tomando en cuenta una interfaz fibra-aire-fibra.

Tabla 4.19

Enlace	r	A_{Ftot} fibra-aire-fibra (dB)
E1	0.0387	-0.3430
E2	0.0395	-0.3499
E3	0.0360	-0.3192
E4	0.0361	-0.3197

Tabla 4.20

Enlace	Pérdidas, [dB] (L = 100 m)	Pérdidas, [dB] (L = 1 km)
E(1)	- 1.013	- 3.4430
E(2)	- 1.0499	- 3.7499
E(3)	- 0.7532	- 0.9592
E(4)	- 0.7407	- 1.0297

PÉRDIDAS POR ACOPLAMIENTO FIBRA-FIBRA

Para calcular este tipo de pérdidas también se toma en cuenta la equivalencia utilizada para las pérdidas de Fresnel, pues cabe recordar que se está considerando el estado encendido del modulador (reflexivo "ideal").

PÉRDIDAS POR ACOPLAMIENTO FIBRA-FOTODIODO (UC)

Al igual que la dirección de ida, tan solo basta considerar que el área del fotodiodo es suficiente para cubrir la sombra proyectada por la fibra.

Tabla 4.21

Enlace	Fuente	Características fuente	P_2, Potencia después de modulador* (Pérdidas acumuladas) L = 100 m	P_2, Potencia después de modulador* (Pérdidas acumuladas) L = 1 km
E(1) 50/125 μm *Corning optical fiber*	Modelo: SDL-2320-L2 Fabricante: *JDS Uniphase*	P_0 = 0.2 W λc = 830 ± 15 nm $\Delta\lambda$ = 3 nm t_r, t_f = 30 ns	143 mW (-1.44 dB) 127 mW (-1.98 dB) 79 mW (-4.01 dB)	81 mW (-3.90 dB) 72 mW (-4.41 dB) 45 mW (-6.44 dB)
E(2) 62.5/125 μm *Corning optical fiber*	Modelo: SDL-2364-L2 Fabricante: *JDS Uniphase*	P_0 = 0.5 W λc = 830 ± 15 nm $\Delta\lambda$ = 3 nm t_r, t_f = 30 ns	353 mW (-1.51 dB) 314 mW (-2.02 dB) 196 mW (-4.5 dB)	190 mW (-4.21 dB) 169 mW (-4.72 dB) 106 mW (-6.75 dB)
E(3) 9.2/125 μm *Samsung Fiberoptics*	Modelo: LFO-24-ip Fabricante: *Roithner Lasertechnik*	P_0 = 4.5 mW λc = 1310 ± 30 nm $\Delta\lambda$ = 10 nm t_r, t_f = 2 ns	3.40 mW (-1.21 dB) 3.03 mW (-1.72 dB) 1.89 mW (-3.75 dB)	3.25 mW (-1.42 dB) 2.88 mW (-1.93 dB) 1.80 mW (-3.96 dB)
E(4) 10.4/125 μm *Samsung Fiberoptics*	Modelo: LFO-18/2-i Fabricante: *Roithner Lasertechnik*	P_0 = 3 mW λc = 1550 ± 30 nm $\Delta\lambda$ = 3 nm t_r, t_f = 0.7 ns	2.28mW (-1.20 dB) 2.02 mW (-1.71 dB) 1.26 mW (-3.74 dB)	2.13 mW (-1.49 dB) 1.89 mW (-1.99 dB) 1.18 mW (-4.18 dB)

* Considerando las pérdidas 10, 20 y 50 %

4.12 Ejemplo de cálculo de pérdidas de potencia en un enlace

Considerando el enlace E2, y teniendo en cuenta que la interfaz completa es la de la Fig. 4.14, pero en vez de tener un FD y un transformador con su rectificador en la UR se considera un arreglo de fotodetectores, como el de la propuesta "D".

Tabla 4.22 Elementos de la interfaz y sus características

Elemento de la interfaz	Características
Tipo de fibra	GI MM 62.5/125 μm Corning optical fiber, Longitud del enlace: 100 m
Tipo de fuente	Fab. JDS Uniphase, Mod. SDL-2364-L2. P_0 = 1 W, λ_c = 830 ± 15 nm, $\Delta\lambda$ = 3 nm t_r, t_f = 300 ns
Tipo de arreglo de fotoceldas	Fabricante: *Photonic Power Systems Inc.*, Mod. PPC-6ME. Material: Si, V_{out} = 5 V, η= 40%, A_{PV} = 1 mm^2, t_r = 0.4 μs*.
Conector tipo ST-ST	Situado entre la fuente y el acoplador. Fabricante: *Advanced Interconnect*. Pérdidas máximas por inserción: 0.40 dB para fibra MM.
Acoplador 1 x 2	Fabricante: *Go4Fiber Ltd*. Mod. MSS 1x2. Pérdidas máx. por inserción: 4.2 dB. Ancho de banda: 800 – 1600 nm
Fotodetector para UC	Fab. Hamamatsu, Mod. S2386-18BK Área activa: 1.2 mm^2 Rango de respuesta espectral: 320 – 1100 nm, Fotosensibilidad: 0.54 A/W @ 830 nm. t_r = 0.4 μs

* El fabricante no proporciona datos sobre tiempo de subida de este convertidor fotovoltaico, se mencionó que era probable que fuera un fotoconvertidor de silicio, así que se buscaron fotoceldas con estas características (material: silicio, 1 mm^2 de área activa, con mayor sensibilidad en longitudes de onda cercanas a los 830 nm) encontrándose un tiempo de subida de 0.4 μs [92].

Tabla 4.23 Pérdidas enlace de ida UC → UR

Potencia CW de la fuente óptica acoplada a la fibra	0.5 W
Pérdidas por conector ST – ST	0.40 dB
Pérdidas por acoplador	4.2 dB
Pérdidas por fibra de 1000 m longitud	2.7 dB
Pérdidas de acoplamiento fibra – arreglo PV (Pérdidas de Fresnel por interfaz fibra-aire)	0.175 dB
Potencia óptica que llega al arreglo de celdas fotovoltaicas	89 mW
Potencia eléctrica de alimentación para la UR (η=40%)	35 mW

Tabla 4.24 Pérdidas enlace de regreso UR → UC

Potencia que llega al modulador	89 mW
Potencia reflejada (80%)	71.5 mW
Pérdidas por acoplamiento modulador-fibra (Pérdidas de Fresnel fibra-aire-fibra + Pérdidas por distancia de separación de 2 μm entre modulador y fibra)	-0.507 dB
Pérdidas por enlace 1000 m	-2.7 dB
Pérdidas por acoplador	-4.2 dB
Pérdidas por acoplamiento fibra-FD	-0.35 dB
Potencia óptica que llega al FD	12 mW
Fotocorriente del FD de la UC (S=0.5A/W)	6 mA

En la tabla 4.24 se puede apreciar que la potencia que llega al FD (de la UC) es aproximadamente el orden de (5-15 mW), pero si se necesitaran medidas preventivas para disminuirla y no crear daño al FD, se proponen las siguientes soluciones:

1) Una película metálica más delgada o película de otro material, como capa reflectora del MOEMS.
2) Unas aberturas en el espejo de modulador, para disminuir la potencia reflejada.
3) Un coeficiente de modulación menor (una amplitud menor en el movimiento del modulador).

La primera opción, implica buscar la manera de convertir al material reflexivo, semireflexivo, con el fin de no reflejar toda la potencia a la UR. Sin embargo, la segunda y la tercera opción permiten que la UR siempre tenga una potencia de alimentación, ya sea que el modulador esté encendido o apagado. La última opción además implica la disminución del voltaje de actuación del MOEMS, es decir, sin afectar el diseño físico original.

4.13 Dispersión del pulso y ancho de banda

Para señal de control

En la fibra multimodo existe dispersión modal principalmente, el cálculo para una fibra multimodo de índice gradual en su perfil óptimo del índice, es el siguiente:

$$\Delta t_m = \frac{n_1}{8c} \cdot \Delta^2 \cdot L = \frac{1.496}{8 \cdot 3 \cdot 10^8} \cdot 0.0169^2 \cdot 1000 = 0.178[ns] \qquad \text{(GI MM)}$$

Por otro lado, la dispersión espectral es:

$$\Delta t_e = \frac{\lambda_0}{c} \cdot \left(\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right)_{\lambda_0} \cdot \Delta\lambda \cdot L = \frac{830 \cdot 10^{-9}[m]}{3 \cdot 10^8 [m/s]} \cdot 5 \cdot 10^{10} \left[1/m^2 \right] \cdot 3 \cdot 10^{-9}[m] \cdot 1000[m] = 0.415[ns]$$

Entonces el tiempo de subida para la fibra multimodo de índice gradual, es:

$$t_{fibra} = 1.1\left[\Delta t_e^2 + \Delta t_m^2\right]^{1/2} = 1.1\left[(0.415[ns])^2 + (0.178[ns])^2\right]^{1/2} = 0.497[ns]$$

Por las hojas de especificaciones se tiene que la fuente tiene un tiempo de subida de 300 ns, y el de la fibra es aproximadamente 0.5 ns, y el de las celdas fotovoltaicas es 0.4 μs. Entonces el tiempo de subida de la señal de control es:

$$T_s = 1.1\left[t_{fibra}^2 + t_{fuente}^2 + t_{fd}^2\right]^{1/2} = 1.1\left[(0.5[ns])^2 + (300[ns])^2 + (0.4[\mu s])^2\right]^{1/2} = 0.55[\mu s]$$

En una comunicación digital, para un código RZ, la velocidad de transmisión binaria, B_r, es:

$$B_r = \frac{0.35}{T_s} = \frac{0.35}{0.55 \cdot 10^{-6}} = 640[kbit/s]$$

Para señal de datos

Por resultados obtenidos en el Cap. 5 se tiene que el tiempo de subida del modulador es 10 ms en régimen de resonancia y 0.42 ms con modulación por pulsos, el de la fibra es 0.5 ns, y el de fotodetector de la UC es de 0.4 μs. Entonces los tiempos de subida de la señal de datos en dos regimenes de modulación mencionados son:

$$T_s = 1.1\left[t_{\text{mod}}^2 + t_{fibra}^2 + t_{fd}^2\right]^{1/2} = 1.1\left[\left(10[ms]\right)^2 + \left(0.5[ns]\right)^2 + \left(0.4[\mu s]\right)^2\right]^{1/2} \approx 10[ms]$$

y $$T_s = 1.1\left[t_{\text{mod}}^2 + t_{fibra}^2 + t_{fd}^2\right]^{1/2} = 1.1\left[\left(0.42[ms]\right)^2 + \left(0.5[ns]\right)^2 + \left(0.4[\mu s]\right)^2\right]^{1/2} \approx 0.42[ms].$$

En una comunicación digital, para un código RZ, las velocidades de transmisión binaria, B_r correspondientes son:

$$B_r = \frac{0.35}{T_s} = \frac{0.35}{10 \cdot 10^{-3}} = 35[bit/s]$$

y $$B_r = \frac{0.35}{T_s} = \frac{0.35}{0.42 \cdot 10^{-3}} = 0.8[kbit/s].$$

Conclusiones

La fibra multimodo presenta el doble de atenuación que la monomodo para la misma longitud de onda (λ=1310 nm), entonces en el aspecto de la atenuación no resulta ser un problema para escoger un tipo de fibra. Por otro lado, la potencia óptica de las fuentes disponibles para los enlaces multimodo resultan ser mayores hasta en un orden de magnitud que las utilizadas en enlaces monomodo, lo cual resulta ser ventajoso para los enlaces multimodo. Por lo mencionado, los enlaces MM tienen ventajas contra los enlaces SM hasta unos 3 km de distancia.

Los enlaces multimodo pueden transmitir altas potencias, a precio de tener un ancho de banda menor que el de los enlaces monomodo. Además, los componentes utilizados en enlaces multimodo resultan más baratos, un enlace multimodo demanda menor número de dispositivos, y su utilización permite la cobertura de una mayor demanda de aplicaciones que la que es posible con los enlaces monomodo.

Cuando se utilizan altas potencias en enlaces multimodo, los fotodetectores requieren mayor área activa, pues existen ciertas restricciones en cuanto a la densidad de potencia óptica incidente en ellos (potencia óptica sobre área de incidencia), de lo contrario se puede crear un sobrecalentamiento no deseado y finalmente la destrucción del fotodetector. Entre mayor sea la potencia óptica incidente ésta, mayor será el área requerida por el fotodetector, y mayor será la distancia de separación que se necesitará para que el cono de apertura de la fibra cubra eficientemente el área de la fotocelda. Esta distancia es la que nos limitará en la integración en un chip de silicio, ya que si la distancia es mayor al espesor de una oblea de silicio, no sería posible tener al modulador y al fotodiodo en un solo chip.

El actuador electrostático es el idóneo para implementarlo como mecanismo de desplazamiento longitudinal del modulador tipo obturador, por varias ventajas: permite amplios rangos de desplazamiento, es un actuador bien estudiado y utilizado con éxito por más de una década, y aunque requiere grandes voltajes de actuación, su corriente de actuación es muy baja, por lo que consume baja potencia.

La velocidad binaria de transmisión de la señal de datos con el modulador trabajando en régimen de resonancia, es relativamente pequeña (de 35 bits/s), pero en muchas aplicaciones como en redes sensoriales con el periodo de interrogamiento de unos segundos a unos minutos, este valor de velocidad binaria es suficiente.

Una interfaz completa vía fibra óptica SM puede satisfacer a las aplicaciones que requieren grandes distancias entre UC y UR, gran ancho de banda y baja potencia de consumo. Por otro lado, como aplicaciones para la interfaz completa vía fibra óptica MM se encuentran las redes sensoriales telemétricas utilizadas en la industria y medicina, teniendo en cuenta que las distancias entre UC y UR son pequeñas, con la ventaja de poder utilizar grandes potencias para la alimentación de otros circuitos incluso microactuadores o sensores.

CAPÍTULO 5

5. Diseño y Simulación del Modulador MOEMS

Para tener un diseño adecuado de las dimensiones del actuador electrostático, debemos considerar en primer lugar que el diámetro del núcleo de la fibra es de 62.5 μm, por lo que el actuador debe permitir grandes distancias de desplazamiento lateral, por lo menos 65 μm. Se debe tomar en cuenta que el modulador elegido es el que tiene función de tipo "obturador" por las ventajas que presenta y el actuador elegido es de tipo electrostático. Además el actuador requiere bajo consumo de potencia, dentro de lo posible, para hacer más eficiente la UR.

- Funcionamiento de un actuador electrostático (tipo *comb-drive*)
- Diseños posibles
- Optimización de diseño
- Cálculos de parámetros mecánicos, eléctricos y ópticos
- Simulaciones en CoventorWare 2003

5.1 Funcionamiento de un actuador electrostático tipo "*comb-drive*"

El "*comb-drive*" basa su funcionamiento en el principio básico de un capacitor de platos planos paralelos (Ver Fig. 5.1). A este capacitor se le aplica un voltaje entre sus platos, lo que causa una fuerza electrostática de sentido contrario entre los platos, generando en una fuerza de tipo atractiva, que finalmente acerca los platos entre sí. Como la fuerza electrostática depende del valor de la capacitancia generada, esta fuerza será mayor (y permitirá mayor desplazamiento) si se aumenta el número de capacitores. En este aspecto, se puede ver al *comb-drive* como una serie de capacitores de platos planos paralelos. Ver Fig. 5.2

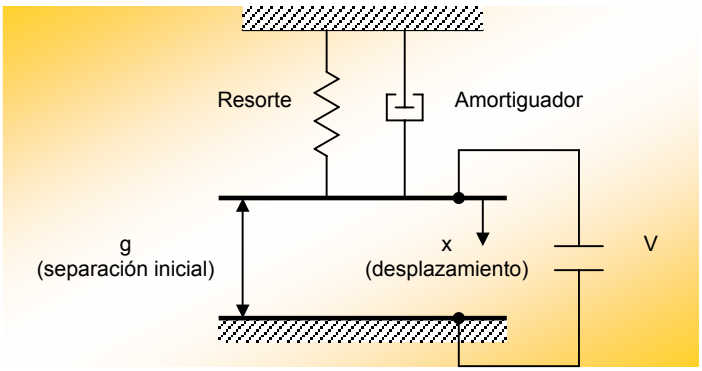


Fig. 5.1 Modelo del capacitor de platos planos paralelos

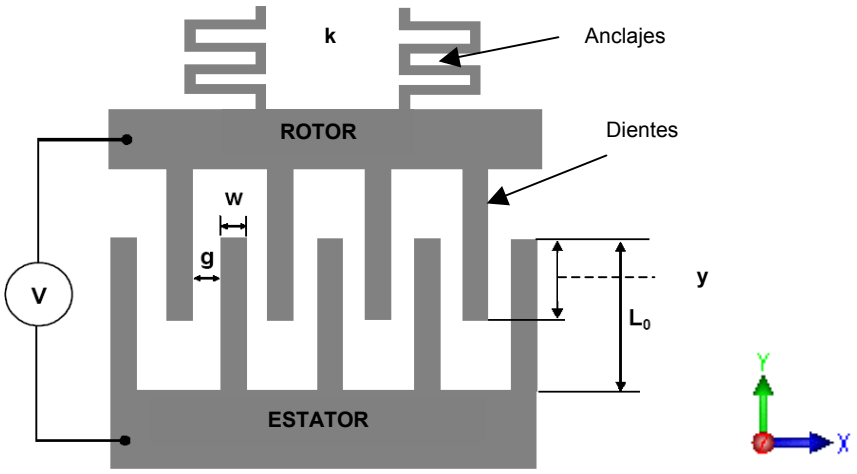


Fig. 5.2 Geometría básica de un actuador lateral "*comb-drive*"

La estructura del microactuador está compuesto de cuatro partes: las anclas, que están fijas a la base (sustrato); las vigas voladizas, que permiten el desplazamiento lateral; y por último sus dos electrodos, se le llama comúnmente "estator" al electrodo fijo ó estacionario y "rotor" al electrodo móvil ó plato móvil [73], cada electrodo con sus "dientes" ó "dedos". Existen actuadores electrostáticos "*comb-drive*" producidos comercialmente con diversos diseños de sus "dientes" (Ver Fig.5.3)

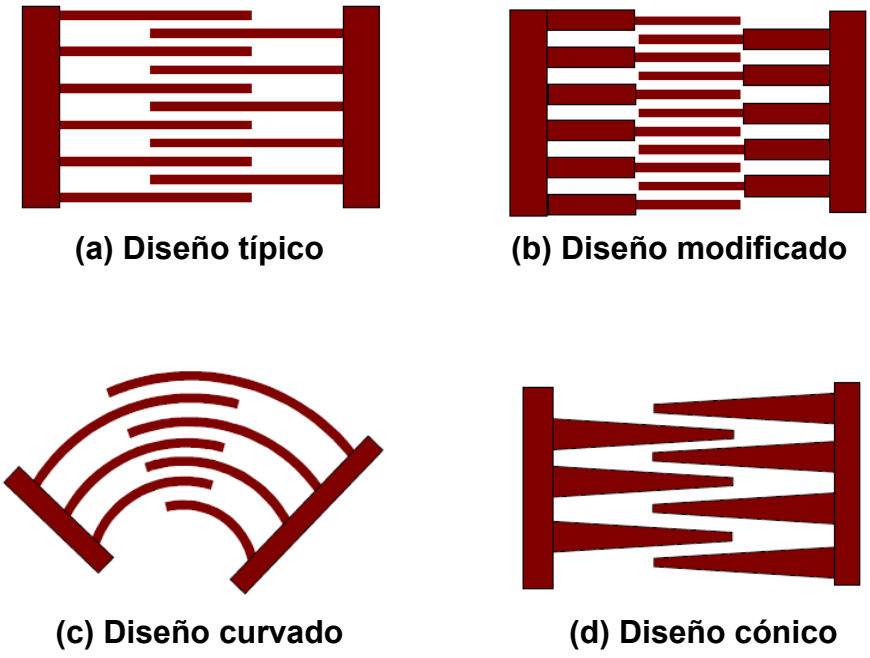
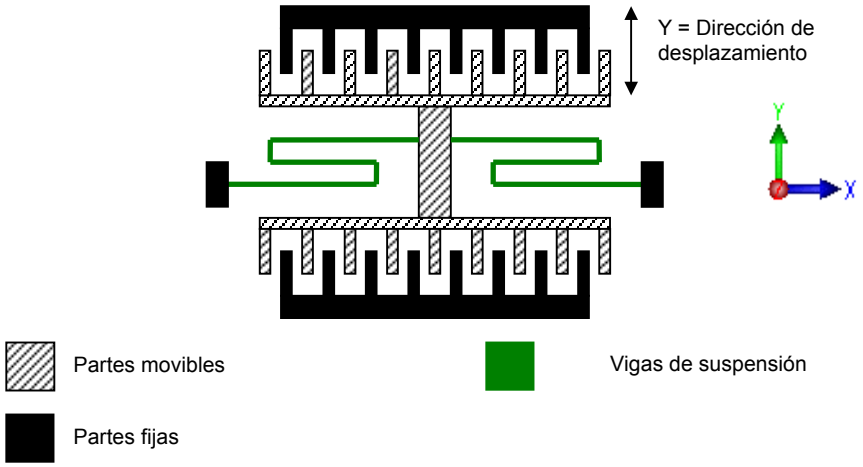


Fig.5.3 Diferentes diseños de los actuadores electrostáticos interdigitados ó *comb-drive*

Nuestro diseño de *comb-drive* obedece al diseño típico de los "dientes", como el mostrado en la Fig. 5.3(a), esto se debe a que este tipo de diseño a demostrado ser el óptimo para la operación de microdispositivos RF, sensores mecánicos, transmisores de potencia mecánica, y actuadores de amplio margen de movimiento lateral [94], como el requerido en el modulador tipo "obturador". Además, se escoge la estructura simétrica tanto del estator como del rotor, pues de esta manera se facilita el alineamiento entre ambos, ya que los desalineamientos podrían degradar significativamente el desempeño del dispositivo. El desalineamiento entre rotor y estator puede deberse a una o varias de las siguientes causas: defectos de fabricación, distribución mecánica o potencial asimétrica (de allí la importancia de que la estructura sea simétrica), propiedades eléctricas no uniformes del silicio (o material estructural), y fallas en la circuitería eléctrica [94].

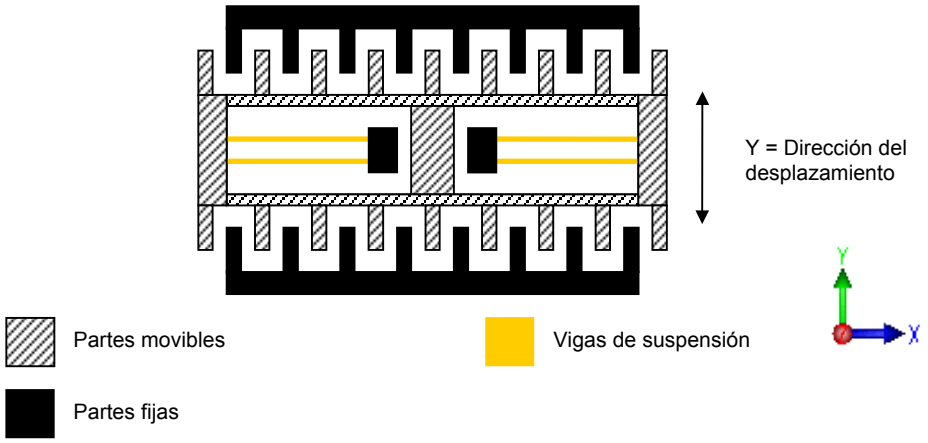
5.2 Tipo de vigas de suspensión

El éxito en el diseño de un actuador tipo "*comb-drive*" se debe, en parte, al tipo de vigas de suspensión y la longitud que éstas posean. Las vigas de suspensión son las estructuras físicas que permiten el movimiento lateral del actuador en sí, además de ellas depende la frecuencia de resonancia del actuador, f_0, como se verá más adelante. Por otro lado, de la forma de las vigas depende que no existan desplazamientos en otros ejes no deseados (incluso giros). Por lo que son uno de los elementos clave de diseño del *comb-drive*. Un tipo de vigas de suspensión es el siguiente:



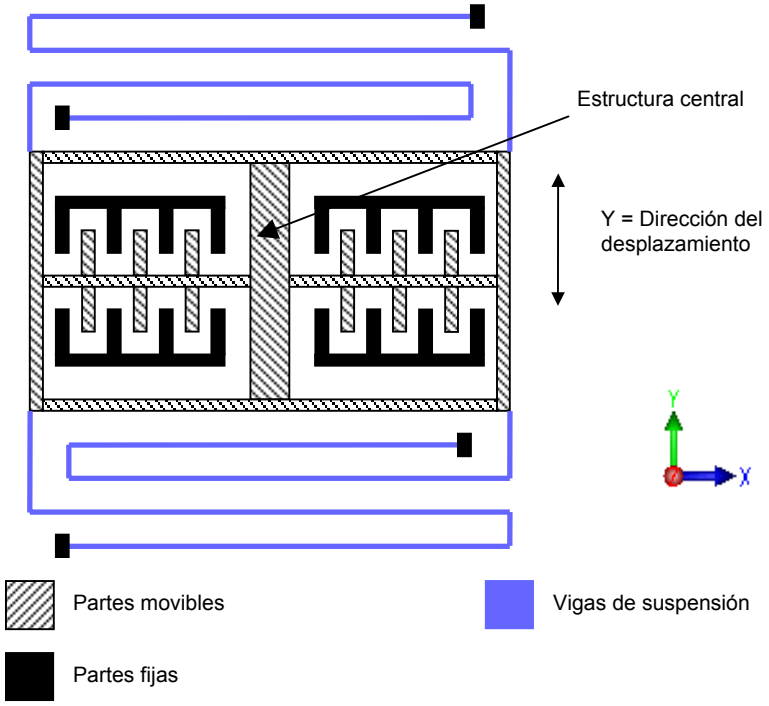
5.4 Modelo de vigas 1 [67]

Pero este tipo de vigas pueden presentar inestabilidad y movimientos no deseados en otros ejes (p.ej. X, Z, incluso giros) debido a su diseño. Durante el estudio de distintos tipos de vigas de suspensión se encontró que el siguiente tipo de vigas, era óptimo para ciertas aplicaciones, sobre todo *comb-drives* relativamente pequeños (en el orden de los 100 μm de largo). Ver Fig.5.5.



5.5 Modelo de vigas 2 [67], [73]

Debido a varios estudios que se basan en este tipo de vigas, el diseño inicial se realizó con estas vigas (Fig. 5.5), sin embargo debido al gran tamaño y desplazamiento del actuador, se presentaba cierta inestabilidad de movimiento en los ejes innecesarios. Por ello se diseñó otra configuración de vigas y otro tipo general de estructura del actuador *comb-drive*, lo cual optimizó el diseño. Además se aprovechó la parte de estructura central para realizar una ventana óptica para nuestra aplicación (Ver Fig. 5.6, 5.7).



5.6 Modelo de vigas 3 diseñadas para la aplicación

Este último diseño de vigas permite mayor estabilidad en los ejes (Y, Z, incluso giros), y facilitó el movimiento en el eje Y, como se pretendía.

5.3 Dimensiones físicas del actuador

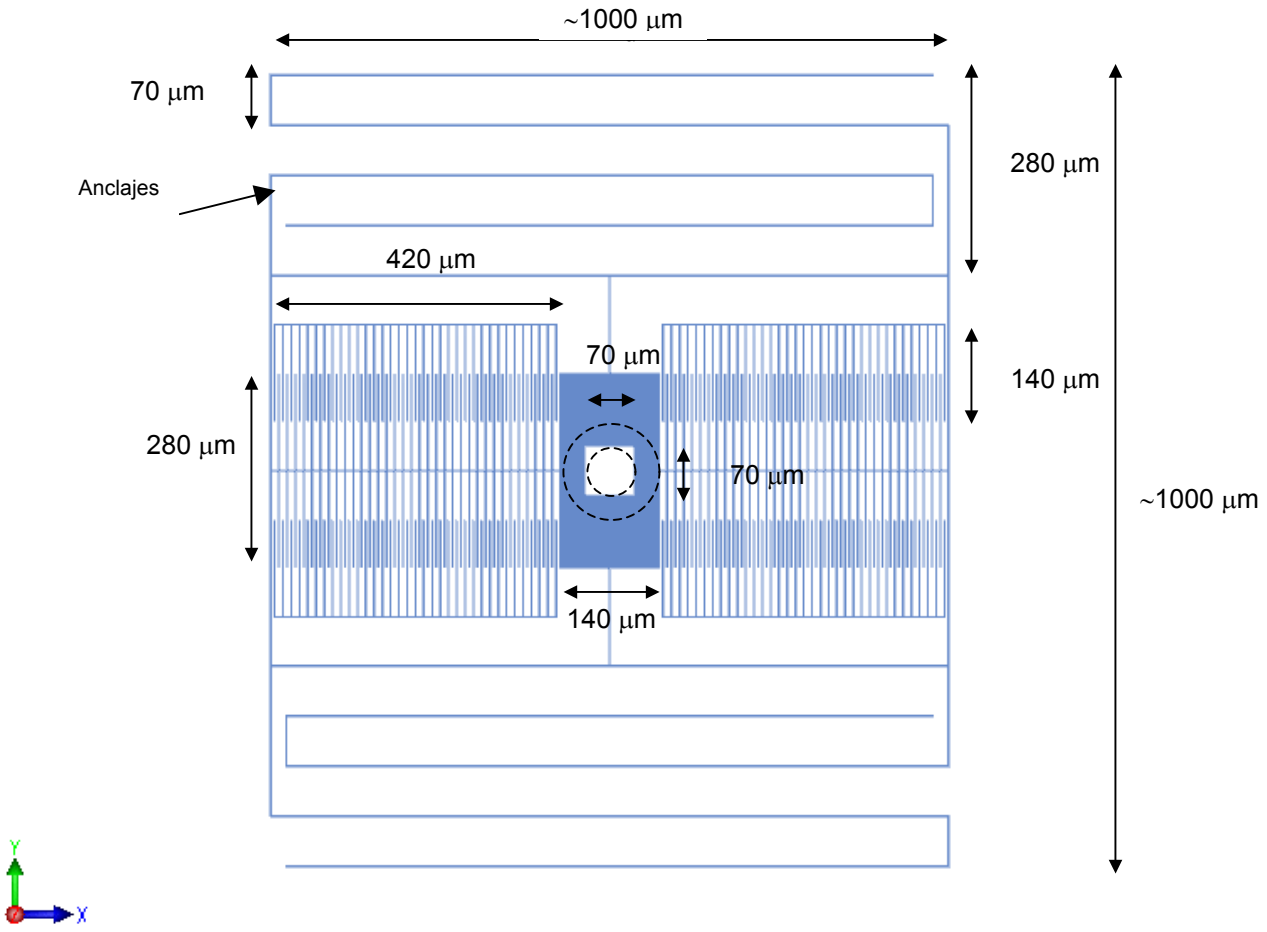


Fig.5.7 Dimensiones del MOEMS diseñado. Los círculos concéntricos representan la posición que tiene la fibra multimodo 62.5/125 μm en el obturador (núcleo y cubierta)

Se desea un desplazamiento lateral (sobre el eje Y) de ~65 μm debido a que se tiene un enlace multimodo con una fibra de 62.5 μm de diámetro. Se aprovecharon las estructuras propias del *comb-drive* para la construcción de una ventana (al centro de la imagen anterior) que permita la llegada de la luz en el estado apagado (transparente) del actuador hacia un fotodetector, la luz proviene de la fibra MM que se encuentra sobre el eje Z. La ventana que se desplazará junto con las partes móviles del actuador una distancia ~ 65 μm (hacia arriba y hacia abajo) cuando se aplique un voltaje ya sea en el par de electrodos fijos (estatores) de arriba (movimiento en el eje Y positivo) o en el par de electrodos fijos de abajo (permitiendo un movimiento en el eje Y negativo). Durante la fabricación, el obturador (la parte central del actuador) se cubre con una delgada capa de Au (o Ag) para reflejar la luz que choque contra el obturador cuando obstruya el paso de la luz hacia el fotodetector, con este implemento el MEMS se convierte en un MOEMS, con su parte óptica de reflexión. Ver Fig. 5.8.

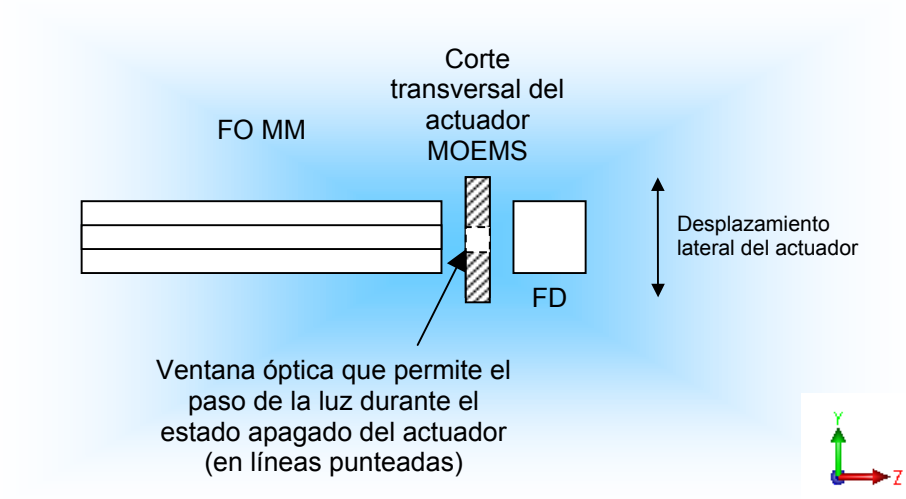


Fig. 5.8 Ubicación del MOEMS

Justificación de las dimensiones tomadas

La longitud de las vigas, sobre el eje Y, depende del desplazamiento lateral que se deseaba, en este caso ~ 70 μm, por lo que se usaron múltiplos de 70 μm para estas longitudes, la longitud de las vigas sobre el eje X dependía de las dimensiones a lo largo del eje X de la ventana y de los electrodos necesarios. Se escogieron 4 electrodos, que funcionan en realidad como dos, ya que a los dos electrodos superiores se les sometía al mismo voltaje, y a los dos electrodos inferiores también se les aplicaba un solo voltaje, de forma alternativa entre los superiores y los inferiores. Más adelante se hablará de estos voltajes. El grosor de las vigas es de 3 μm.

Los tamaños de la ventana de paso se escogieron de 70x70 μm^2, por el diámetro del núcleo de la fibra multimodo, los tamaños del obturador externos se escogieron de 140x280 μm^2, contemplando el diámetro externo de la fibra 125 μm y el desplazamiento lateral de 70 μm.

Los cuatro electrodos son exactamente iguales, las dimensiones de cada electrodo se escogieron de la siguiente manera. Cada electrodo tiene 30 “dientes” superiores, con una longitud de 140 μm para permitir el desplazamiento de 70 μm (tanto hacia arriba como abajo 70+70 μm). El grosor de cada diente se escogió de 3 μm, el espacio entre dientes también es de 3 μm, ya que entre menor sea este espacio mayor será la capacitancia producida por el electrodo. El grosor de los dientes y el espacio entre ellos no se escogieron menores a los 3 μm ya que por una parte nos limita la tecnología y aunque se han encontrado estructuras con dimensiones mínimas iguales a los 2 μm son las menos, por otra parte se quiso garantizar la rigidez de construcción que se ha obtenido con 3 μm.

La longitud (profundidad) a lo largo del eje Z de toda la estructura es de 10 μm, ya que se simuló una estructura con 5 μm de altura pero tenía inestabilidad en el eje Z. La distancia de separación entre las estructuras voladizas y el sustrato es de 5 μm.

En total, el modulador tiene dimensiones de 1 mm x 1 mm, que son dimensiones relativamente grandes para un MOEMS, pero que se debe, como se explica arriba, principalmente al número de "dientes" y al desplazamiento requerido.

5.4 Modelo Matemático del MOEMS

En el modelo matemático se calculan los parámetros característicos del actuador MOEMS que se ha diseñado.

5.4.1 Cálculo de los parámetros eléctricos del actuador

La capacitancia de platos planos paralelos es la versión simple del comb-drive de nuestro estudio, pero en primera instancia nos servirá para partir de ahí el estudio del comb-drive.

Asumiendo que los tamaños l y w de los platos, son mucho mayores que la separación g, tenemos que el valor de la capacitancia para un plato de placas planas paralelas (Fig. 5.1) está dado por [38]:

$$C = \frac{\varepsilon A}{g} \qquad ...(5.1)$$

donde ε es la permitividad dieléctrica del medio existente entre los platos, en este caso es aire, y A es el área de uno de los platos igual a (l x w). Correspondiendo a un voltaje V aplicado al capacitor existe una energía potencial electrostática, dada por [38]:

$$U = \frac{1}{2} C V^2 \qquad ...(5.2)$$

Esta energía potencial representa la energía requerida para prevenir la carga opuesta de los platos paralelos, del colapso entre ambos. La fuerza de atracción de Coulomb se expresa como el gradiente negativo de la energía potencial [38].

$$F = -\nabla U \qquad ...(5.3)$$

Y como,

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

Entonces,

$$F = \frac{\varepsilon_0 A V^2}{2g^2} \quad \ldots(5.5)$$

La fuerza F decae en una proporción de $1/g^2$. Si el plato superior está libre de movimiento, entonces la fuerza de Coulomb la hará aproximarse al plato inferior, y la brecha, g, decrecerá; esto es, la fuerza de atracción provocará que la brecha se cierre, hasta que esté balanceada por una fuerza producida por un resorte (*spring*) u otro tipo de soportes. Esto permite que los platos tengan un desplazamiento paralelo (Fig. 5.1).

A partir las expresiones anteriores, tenemos que la capacitancia de un solo "diente" del *comb-drive* es igual al de un capacitor de platos planos paralelos [38]:

$$C_{\sin gle} = \frac{\varepsilon A}{g} \quad \ldots(5.6)$$

Entonces de la Fig. 5.1 se tiene que las dimensiones y la notación utilizada para ellas es:

l = largo, sobre eje Y
g = separación, eje X
w = anchura, eje X
t = espesor, sobre el eje Z
L = largo total de un diente, eje Y

Como puede observarse, el área considerada en el estudio del *comb-drive* es el área de intersección entre dos dedos opuestos, es decir, $A = t(L\text{-}y)$, donde y, es la distancia de penetración de los "dientes" (está marcada en la Fig. 5.2)

Para un *comb-drive* de N-dientes se tienen $2N$-capacitores, con una capacitancia total de [38]:

$$C_{comb} = 2N\frac{\varepsilon_0 t(L-y)}{g} \qquad \ldots(5.7)$$

La fuerza electrostática de un *comb-drive* es [38]:

$$F_{comb} = N\varepsilon_0 \frac{t}{g} V^2 \qquad \ldots(5.8)$$

Tenemos los siguientes datos: ε_0 = 8.85x10^{-12} F/m, t = 10 μm, L = 140 μm, y = 70 μm, g = 3 μm, N = 70, entonces,

$$C_{\sin gle} = \frac{8.85\cdot 10^{-12}\left[\frac{F}{m}\right]\cdot 10\cdot 10^{-6}[m]\cdot(140-70)\cdot 10^{-6}[m]}{3\cdot 10^{-6}[m]}$$

$$C_{\sin gle} = 2.065\cdot 10^{-15}[F]$$

por lo tanto,

$$C_{comb} = 2NC_{\sin gle} \qquad \ldots(5.9)$$

$$C_{comb} = 2\cdot 70\cdot 2.065\cdot 10^{-15}[F]$$

$$C_{comb} = 289.1\cdot 10^{-15}[F]$$

La fuerza electrostática requerida depende de la constante de resorte, k_{sis}, que se calcula dentro de los parámetros mecánicos del actuador (más adelante), y de la distancia, D, que se espera se desplace el actuador, expresada en la siguiente relación [67], [74]

$$F = k_{sis}\cdot D \qquad \ldots(5.10)$$

k_{sis}, es la constante de resorte del sistema que se deriva de la siguiente expresión [73]:

$$k = \frac{24EI}{L^3} \qquad \ldots(5.11)$$

donde, k es la constante de resorte de un par de vigas móviles, E es el módulo de Young del material, I es el momento de inercia de las vigas, y L es la longitud de una viga suspendida móvil.

En el caso de cuatro vigas suspendidas, como lo es en este caso, se tiene otra expresión que se deriva de la anterior [75]:

$$k_{sis} = \frac{48EI}{l_1^3 + l_2^3} \qquad \ldots(5.12)$$

donde, l_1 y l_2 son las longitudes de dos vigas, y el momento de inercia de las vigas, I, es igual a:

$$I = \frac{1}{12} tw^3 \qquad \ldots(5.13)$$

entonces, de (5.12) y (5.13) tenemos:

$$k_{sis} = \frac{4Etw^3}{l_1^3 + l_2^3} \qquad \ldots(5.14)$$

Los datos que tenemos son los siguientes: E = 140 GPa, t = 10 μm, w = 3 μm, $l_1 = l_2$ = 986 μm, sustituyendo en (5.14):

$$k_{sis} = \frac{4 \cdot 140 \cdot 10^9 \left[\frac{N}{m^2}\right] \cdot 10 \cdot 10^{-6}[m] \cdot \left(3 \cdot 10^{-6}[m]\right)^3}{\left(0.986 \cdot 10^{-3}[m]\right)^3 + \left(0.986 \cdot 10^{-3}[m]\right)^3}$$

$$k_{sis} = 7.8866 \cdot 10^{-2} \left[\frac{N}{m}\right]$$

El desplazamiento, D, en nuestro caso, debe estar entre los valores $65 < D < 70$ μm, es decir, mayor que el diámetro de la fibra y menor que el valor máximo de desplazamiento del actuador. Por lo tanto, se escogió una D = 67 μm.

$$F = 7.8866 \cdot 10^{-2} \cdot \left[\frac{N}{m}\right] \cdot 67 \cdot 10^{-6} [m]$$

$$F = 5.2840 [\mu N]$$

Lo anterior significa que la fuerza electrostática necesaria para mover el actuador en una distancia de 67 μm es igual a 5.2840 μN. Ahora, considerando un voltaje V_{cc} igual a 51 V, tenemos que la fuerza electrostática Ec. (5.8) producida por el *comb-drive* es:

$$F_{comb} = 70 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{10 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6}} \cdot 51^2$$

$$F_{comb} = 5.3717 [\mu N]$$

Comparando ambas fuerzas tenemos que $F_{comb}>F$, la fuerza producida por el actuador es mayor que la necesitada para el desplazamiento, lo que significa que el voltaje de 51 V es suficiente en teoría para poder accionar el actuador diseñado.

5.4.2 Cálculo de los parámetros mecánicos del actuador

Cálculo de la frecuencia de resonancia, f_0.

La expresión analítica más aproximada para la frecuencia de resonancia lateral fundamental del actuador, f_0, puede ser encontrada utilizando el método de Rayleigh [73]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{k_{sis}}{m + 0.3714 m_v}\right]^{1/2} \quad \ldots(5.15)$$

donde, m_v y m, son las masas de las vigas suspendidas y del resto de la estructura resonante respectivamente, k_{sis}, es la constante de resorte del sistema.

Ahora es necesario calcular las masas m y m_v, a partir de la ecuación [76]:

$$m = \rho V \quad \ldots(5.16)$$

donde, ρ es la densidad por unidad de volumen del material, V es el volumen. Se considera que la $\rho = 2320$ kg/m^3 para el polisilicio, entonces:

$$m = 2320\left[\frac{kg}{m^3}\right]\cdot 1.07926\cdot 10^{-12}\left[m^3\right]$$

$$m = 2.5038\cdot 10^{-9}\left[kg\right]$$

y

$$m_v = 2320\left[\frac{kg}{m^3}\right]\cdot 0.2616\cdot 10^{-12}\left[m^3\right]$$

$$m_v = 0.6069\cdot 10^{-9}\left[kg\right]$$

Por lo tanto, ya es posible calcular la frecuencia de resonancia de nuestro actuador, f_0, a partir de la ecuación (5.15):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{7.8866\cdot 10^{-2}\left[\frac{N}{m}\right]}{\left[2.5038\cdot 10^{-9} + 0.3714\left(0.6069\cdot 10^{-9}\right)\right]\left[kg\right]}\right]^{1/2}$$

$$f_0 = 855.6\left[Hz\right]$$

<u>Cálculo del factor de calidad mecánico Q.</u>

El factor de calidad mecánico, Q, estimado por el flujo de aire (llamado flujo de Couette) debajo del actuador considerando las pérdidas de potencia en las vigas [73], [77], [85], [86] está determinado por:

$$Q = \omega_0 \frac{m_v}{b_{sis}} = \sqrt{\frac{m_v k_{sis}}{b_{sis}}} = \frac{d}{\mu A_p}\sqrt{m_v k_{sis}} \qquad \ldots(5.17)$$

donde, b_{sis} es la constante de amortiguamiento del sistema, μ es la viscosidad absoluta del aire ($1.8\text{x}10^{-5}$ $N{\cdot}s{\cdot}m^{-2}$), A_p es el área del actuador sin las vigas y d, es la distancia a lo largo del eje z entre el actuador y el sustrato (o espesor de flujo de aire).

Los datos que tenemos son: $d = 5$ µm, $A_p = 215.852\text{x}10^{-9}$ m^2. Entonces, de la Ec. (5.17):

$$Q = \frac{5\cdot 10^{-6}[m]}{1.8\cdot 10^{-5}\left[\frac{N\cdot s}{m^2}\right]\cdot 215.852\cdot 10^{-9}[m^2]}\cdot\sqrt{\left(0.6069\cdot 10^{-9}[kg]\right)\cdot\left(7.8866\cdot 10^{-2}\left[\frac{N}{m}\right]\right)}$$

$$Q = 8.90$$

También se pede definir Q en función de la frecuencia y el ancho de banda como sigue [79]. [80]:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{f_0}{(f_2 - f_1)_{3dB}} \qquad \ldots(5.18)$$

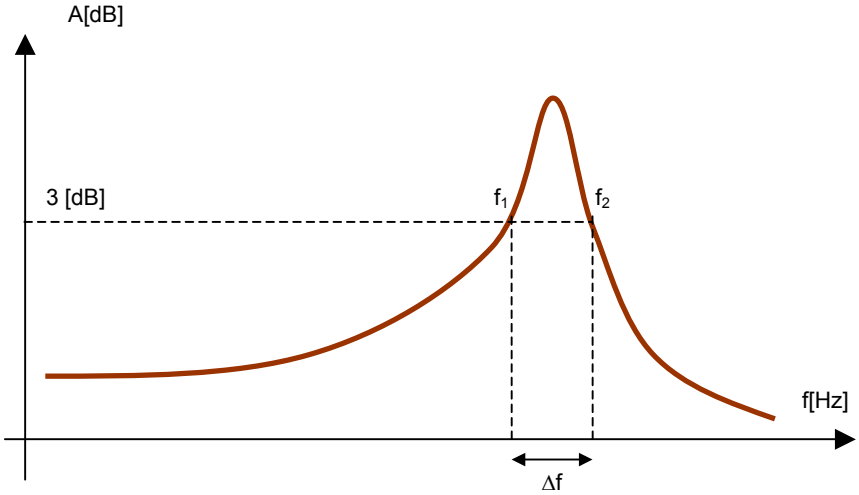


Fig. 5.9 Significado gráfico de factor de calidad, Q.

Entonces también podemos calcular el ancho de banda del modulador a partir de la Ec. (5.18):

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q} = \frac{855.6[Hz]}{8.90} = 96.1[Hz]$$

Bajo la condición de amortiguamiento cero para sistemas mecánicos con 1 grado de libertad, la Q se puede definir como [80]:

$$Q = \frac{A_0}{A_i} \qquad \ldots(5.19)$$

es decir, es la razón de magnitud de la amplitud de salida y la magnitud de entrada.

Entonces si requerimos un voltaje de 51 V a la salida, tenemos:

$$A_i = \frac{A_0}{Q} = \frac{51V}{8.9} = 5.7V$$

Por lo tanto, se obtiene un voltaje de entrada de 5.7 V (calculado), para el factor de calidad de 8.9 (calculado) bajo la condición de que la estructura se encuentre en resonancia.

Tabla 5.1. Tabla condensada de parámetros mecánicos y eléctricos calculados

C_{single} [F]	C_{comb} [F]	F_{comb} [N]	k_{sis} [N/m]	f_0 [Hz]	Q [1]	Δf [Hz]
$2.07 \cdot 10^{-15}$	$289.1 \cdot 10^{-15}$	$5.37 \cdot 10^{-6}$	$7.89 \cdot 10^{-2}$	855.6	8.9	96.1

Cálculo de la potencia disipada P_d.

Ahora, para calcular la potencia consumida por el MOEMS, partimos de la definición más general de Q. El factor de calidad, Q, es una cantidad adimensional. El valor de Q, está en proporción con la relación entre la energía máxima almacenada y la energía disipada [78].

$$Q = 2\pi \frac{EnergíaMáximaAlmacenada}{EnergíaDisipadaPorCiclo} \qquad \ldots(5.20)$$

donde la energía máxima alcanzada, $E_{alm.\ max.}$, es igual a la energía potencial máxima alcanzada por las vigas de la estructura, o igual a la energía cinética máxima de la masa:

$$E_{alm.máx} = E_{poten.máx.viga} = E_{cinét.máx.masa} \qquad \ldots(5.21)$$

Además, a partir de la ec. 5.2, la energía potencial máxima de las vigas en el comb-drive, es igual a:

$$E_{poten.máx.viga} = U_{comb} = \frac{1}{2} C_{comb} V^2 = \frac{2N\varepsilon_0 t(L-y)V^2}{2g} = \frac{N\varepsilon_0 t(L-y)V^2}{g} \qquad \ldots(5.22)$$

Entonces comparando la ec. 5.8 con la 5.22, tenemos que:

$$U_{comb} = F_{comb} \cdot (L-y) \qquad \ldots(5.23)$$

Además, sustituyendo la ec. 5.22 en la 5.20 podemos decir que el factor de calidad Q es igual a:

$$Q = 2\pi \frac{U_{comb}}{E_{disipada}} \qquad \ldots(5.24)$$

De esta última, únicamente se despeja la energía disipada por el MOEMS, finalmente la potencia consumida se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P_{consumida} = \frac{E_{disipada}}{T} \qquad \ldots(5.25)$$

donde $T = 1/f_0$.

Con estas ecuaciones se llena la siguiente tabla (5.2), comparando los parámetros obtenidos para el actuador MOEMS, considerando tanto un enlace SM, donde se necesita un desplazamiento menor por el diámetro de la fibra SM, como en un enlace MM.

Tabla 5.2

Parámetro calculado	SM	MM
Desplazamiento lateral requerido por el diámetro del núcleo de la fibra	10 μm	67 μm
Longitud de intersección entre dos dedos opuestos, (L-y)	(30-15) μm = 15 μm	(140-70) μm =70 μm
Constante de resorte, k_{sis}	0.35	0.008
Fuerza electrostática producida, F_{comb}*	3.5 μN	5.28 μN
Energía potencial del actuador, U_{comb}	52.5 pJ	0.37 nJ
Factor de calidad, Q	32.4	8.9
Energía disipada, $E_{disipada}$	10.2 pJ	0.261 nJ
Frecuencia de resonancia	2200 Hz	856 Hz
Período, T	0.455 ms	1.17 ms
Potencia consumida, $P_{consumida}$	22.4 nW	222 nW

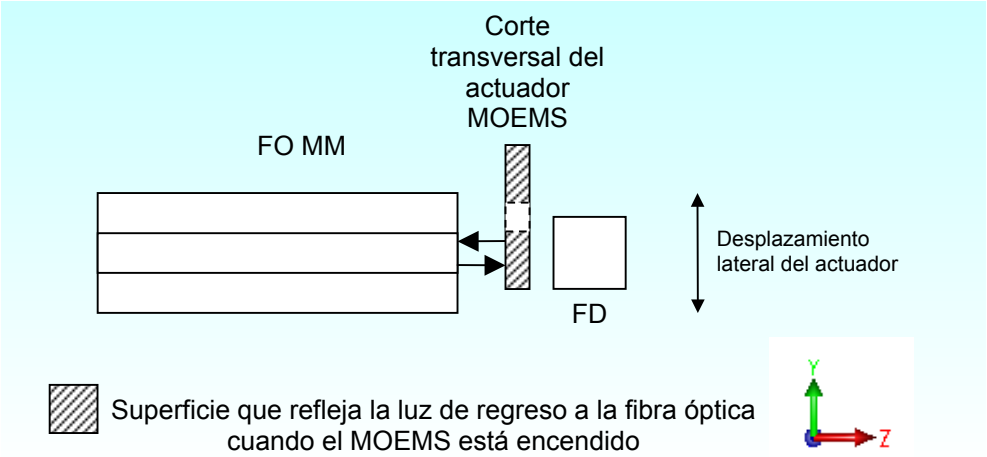
* En este caso igualamos la F_{comb} con la F necesaria para mover el MOEMS la distancia requerida, ya que es la fuerza mínima requerida.

Durante el diseño del modulador MOEMS, se encontraron las expresiones para calcular la fuerza electrostática necesaria para el desplazamiento de 67 μm del modulador electrostático en el enlace multimodo, F_e = 5.3 μN, una potencia de actuación P = 0.22 μW y una frecuencia de resonancia f_0 = 0.85 kHz. Se utilizaron las mismas expresiones para hallar los valores de los mismos parámetros pero para una distancia de desplazamiento de 10 μm, es decir una distancia que se requeriría para obstruir el paso de luz proveniente de una fibra monomodo, en este caso, F_e = 3.5 μN, P = 0.022 μW, y f_0 = 2.2 kHz.

Si se necesita un valor de calidad Q mayor (o una menor potencia consumida por el modulador MOEMS), se puede vaciar el aire contenido en el empaquetamiento, lo que disminuya la fricción de la estructura con el aire, y de esta manera, también se disminuya el voltaje de actuación aplicado.

5.4.3 Cálculo de los parámetros ópticos del actuador

Este tipo de parámetros son los que diferencian a un MEMS de un MOEMS. Se refieren a las propiedades ópticas (reflexividad, transmitividad) de ciertos materiales que se utilizaron durante la fabricación del actuador MEMS, y que pueden aprovecharse para el manejo de un haz de luz de acuerdo a dichas propiedades. En este caso, los parámetros ópticos del MOEMS están determinados por la fina capa de material que sirve como reflector de la luz en su estado “encendido”.



5.10 Actuador MOEMS "encendido"

Como se vio en el capitulo anterior, las texturas rugosas son útiles para aumentar la eficiencia de las celdas fotovoltaicas, sin embargo, en el caso de las superficies reflejantes del MOEMS se requiere que sean lo más lisas posible, ya que si existen irregularidades grandes (>>λ) se tienen pérdidas por concepto de esparcimiento.

Cualquier función periódica puede representarse por una serie de Fourier [81], siguiendo este razonamiento, podemos representar la función de irregularidades sobre una superficie rugosa, por una serie de Fourier, utilizando la forma compleja de las series de expansión de Fourier [82]:

$$h(x) = \sum_{m=-N}^{N} h_m \exp\left(2\pi x i / T_m\right) \qquad \ldots(5.26)$$

donde x es la coordenada a lo largo del perfil de la superficie rugosa (Ver Fig.5.11), $T_m = T_0/m$ son los periodos espaciales de las armónicas de Fourier, y h_m son las intensidades de las harmónicas espaciales correspondientes.

Entonces, se define como rugosidad *rms* [82]:

$$\sigma^2 = \sum_{m=-N}^{N} \left|h_m\right|^2 \qquad \ldots(5.27)$$

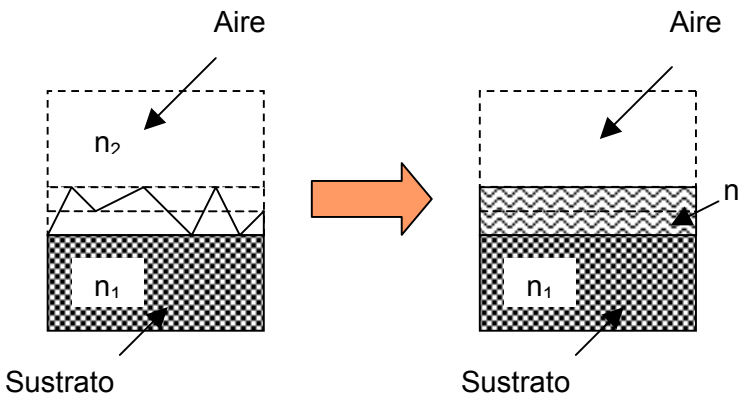


Fig. 5.11 Sustitución de una superficie rugosa por una tercera capa con índice de refracción n.

En el caso de que se tenga que $T_m >> \lambda$, se considera que se tienen rugosidades a gran escala, entonces los coeficientes de reflexión y transmisión son [82]:

$$r = r_0\left(1 - 2kn_1^2\sigma^2\right) \qquad \ldots(5.28)$$

$$t = t_0\left(1 - 0.5k^2\left(n_1 - n_2\right)^2\sigma^2\right) \qquad \ldots(5.29)$$

donde k, es el número de onda relacionado a la longitud de onda de la luz incidente en el vacío, λ, mediante la ecuación, $k = 2\pi/\lambda$, n, es el índice de refracción del medio, y r_0 y t_0 son los coeficientes de reflexión y transmisión de Fresnel, respectivamente, para el límite entre dos medios idealmente planos. Cabe mencionar que el coeficiente de reflexión t_0 es igual a 1-r_0. Sin embargo en el caso de los metales, el coeficiente de reflexión r_0, se define como [83]:

$$r_0 = \frac{\left(n_\lambda - 1\right)^2 + k_\lambda^2}{\left(n_\lambda + 1\right)^2 + k_\lambda^2} \qquad \ldots(5.30)$$

donde n_λ es el índice de refracción del metal (parte real) para una longitud de onda λ, y k_λ, es el coeficiente de extinción (parte imaginaria del índice de refracción) para una longitud λ. Nótese que $k \neq k_\lambda$.

Si en cambio, se tiene que $T_m << \lambda$, se considera que se tienen rugosidades a pequeña escala, por lo que se tiene que los coeficientes de reflexión y transmisión son [82]:

$$r = r_0\left(1 - 2k^2 n_1 n_2 \sigma^2\right) \qquad \ldots(5.31)$$

$$t = t_0\left(1 + 0.5k^2\left(n_1 - n_2\right)^2 \sigma^2\right) \qquad \ldots(5.32)$$

Entonces, si consideramos los índices de refracción de distintos metales y del polisilicio (material de construcción del MOEMS) a una longitud de onda λ = 830 nm (de la fuente), podremos comparar la reflexividad obtenida. Los valores de los coeficientes de refracción y de los coeficientes de extinción se obtuvieron de la Ref. [84]. Para esta comparación se utilizaron los siguientes metales: aluminio (Al), níquel (Ni), plata (Ag), y oro (Au). Por otra parte se consideró que se tienen rugosidades a pequeña escala ($T_m << \lambda$) por lo que se utilizó la Ec. (5.31) para calcular la reflexión en el material de filmes delgados (r), se tomó un valor de rugosidad de σ = 5 [nm].

Tabla 5.3 Reflexividad calculada de ciertos materiales

Material	n_λ	k_λ	r_0	r
Poli-Si	3.67	~ 0	0.327	0.324
Al	2.71	8.31	0.869	0.863
Ni	2.54	4.47	0.688	0.683
Au	0.189	5.39	0.975	0.974
Ag	0.146	5.50	0.981	0.981

Nota: Para el polisilicio si se utilizó la Ec.4.12.

Como se puede observar en la tabla anterior, se tiene que entre mayor sea la n_λ, mayor será la diferencia entre r_0 y r calculadas. Por otro lado, la reflexividad r_0 es el valor aproximado, mientras que r es el valor más exacto por considerar la rugosidad de la superficie de los filmes delgados de metal. Se concluye en esta parte que no es conveniente utilizar el MOEMS sin cubrir el polisilicio que forma el obturador en el que se reflejará la luz, por ello es conveniente depositar una fina capa de plata u oro, ya que son los metales que presentan la mayor reflexividad. La ventaja de utilizar aluminio o níquel es que el costo decrementa, pero a un precio de disminuir la reflexividad considerablemente.

5.5 Simulación por computadora

La simulación por computadora del actuador se realizó en el software Coventor, del cual se habló en el capítulo 2.

Los pasos para el diseño de MEMS en Coventor son los siguientes:

1. En primer lugar se define el proceso de fabricación utilizado, es decir, la secuencia de los materiales depositados sobre la oblea de silicio (oblea) y de los grabados realizados, así como los grosores de cada una de las capas y profundidades de grabados. Durante este paso es idóneo el cambio de las propiedades de los materiales que se desee. El cambio de las propiedades de los materiales, sirve para simular el resultado que se obtendría con determinado proceso de deposición. Este paso es análogo a los procesos de deposición y grabado de la microfabricación de superficie.
2. A continuación se dibujan las máscaras, esto es el modelo 2-D del diseño, habrá tanto número de máscaras como lo haya de grabados. Este proceso es análogo al diseño de máscaras de la litografía.
3. Combinando los pasos 1 y 2 se puede realizar un modelo 3-D. En él se nombran las superficies de interés para el diseño, como por ejemplo superficies fijas, también se especifican qué elementos serán necesarios para el análisis mecánico y eléctrico, así como el tipo de enrejado ("*mesh*") que se utilizará en el análisis.
4. Hasta el punto 3 se utiliza el "Diseñador" de Coventor. En seguida se utiliza el "Analizador", el cual realiza análisis de tipo mecánico y eléctrico (desafortunadamente está deshabilitada la opción óptica). El tiempo de corrida de cada simulación depende del tipo de enrejado que se utilice. Entre más denso sea el enrejado más tardará la simulación pero más precisos serán los resultados obtenidos.

FABRICACIÓN DEL MOEMS ELECTROSTÁTICO

Es necesario encontrar un método de fabricación sencillo para los actuadores electrostáticos. Primero se consideraron algunos ejemplos de fabricación de dos actuadores electrostáticos.

Tabla 5.4 Fabricación de actuadores electrostáticos de movimiento lateral

Características	Tipo 1 [67]	Tipo 2 [74]
Tipo de microfabricación	Microfabricación de superficie con Níquel, que es una técnica altamente desarrollada para fabricar estructuras de alto valor de radio de aspecto (*aspect-ratio, height to width*) fácilmente	Microfabricación con el proceso de *deep-etch shallow-diffusion* para obtener un alto radio de aspecto
Tipo de actuación	Fuerza electrostática (*comb-drives actuators*)	Fuerza electrostática (*comb-drives actuators*)
Pasos de fabricación	1. Se deposita una capa de SiO_2 2. Se forman los electrodos, así como una capa de material de sacrificio 3. Se deposita una cubierta de níquel 4. Se forma un molde de un grueso photoresist 5. El molde se llena con níquel mediante electroplating 6. Se remueve el molde y se obtienen las microestructuras de níquel 7. Posteriormente se remueve la capa de níquel producida en el paso 3, así como la capa de sacrificio del paso 2, para dar lugar a las estructuras voladizas (vigas voladizas)	El proceso de *deep-etch shallow-diffusion* es complicado y requiere condiciones específicas (altas temperaturas, potencia de microondas de 60 W, etc.).
Material del espejo	Níquel	Silicio cubierto con oro para incrementar reflexividad
Reflexividad alcanzada	63 %	85 %
Dimensiones	h = 19 μm, w = 50 μm, la longitud de los dientes del comb = 20 μm, y el espaciamiento entre dientes vecinos es = 2 μm, la longitud de la estructura suspendida =3.8 mm	N = 150 (no. dientes), espaciamiento = 3 μm, E = 175 GPa (módulo de Young), para vigas de suspensión de anchura ≤ 3 μm, y una longitud ≥ 700 μm
Desplazamiento lineal alcanzado	10 μm (la longitud de los dientes no permite más desplazamiento)	34 μm @ 30 V 50 μm @ 50 V
Voltaje de actuación	≈ 10 V	
Frecuencia de resonancia	---	987 Hz @ presión atmosférica
Frecuencia de switcheo		1.2 kHz
Aplicación	Filtro sintonizable para sistemas de comunicación de FO SM	Arreglo de espejos para switches ópticos

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos por el estudio [74], el desplazamiento del espejo incrementa con la longitud de la viga suspendida que sirve como soporte para la estructura móvil, y decrece con la anchura de la viga. Sin embargo, la frecuencia de resonancia incrementa con la anchura, pero decrece con la longitud, lo cual concuerda con los resultados experimentales [74]. Además se tiene que el reducir el espacio entre los dientes contiguos, es la mejor manera de reducir el alto voltaje de actuación mayor a 25 V que se requiere normalmente [11].

Los dos tipos de actuadores de la tabla 5.4 se fabricaron para determinadas aplicaciones, pero podemos tomar algunos parámetros de ambos diseños para adaptarlos a nuestra aplicación.

Un método de fabricación alternativo a los mencionados anteriormente, es el basado en microfabricación de superficie de silicio utilizando grabado (*etching*) de plasma, o mediante grabado mediante iones reactivos (RIE, *reactive ion etching*).

El grabado mediante plasma sobre un substrato de silicio, se realiza utilizando mezclas de gases basados en SF_6/O_2 y CF_4H_2. Es ventajoso debido a su alta selectividad para *fotoresist* de dióxido de silicio y máscaras de aluminio. Sin embargo cuando se utiliza el grabado mediante plasma se generalmente se produce un alto daño de la máscara. En contraste, el grabado mediante iones reactivos, de polisilicio, utilizando una combinación de gases *clorine-fluorine*, virtualmente no produce daño a la máscara, además de que produce perfiles de grabado prácticamente verticales, utilizando el *fotoresist* como un material de máscara. De esta manera, se pueden obtener estructuras MEMS rectangulares de silicio con altura mayor a 30 μm [11]. Se desea un proceso de grabado profundo (*deep-etching*) para microactuadores y así, el proceso RIE es una opción atractiva. Tomando en cuenta lo anterior, se tiene el siguiente método de fabricación para el MOEMS.

MÉTODO DE FABRICACIÓN PARA EL MICROACTUADOR [11], [73] (Fig. 5.12):

a. El proceso comienza con una cubierta de $POCL_3$ difusión n+, que define el plano de tierra del sustrato. Se deposita una capa de 5000 Å de dióxido de silicio (SiO_2) sobre el sustrato de Silicio (Si) mediante oxidación seca, para posteriormente depositar una capa de nitrato de silicio (Si_3N_4) de 1500 Å mediante LPCVD (implante de iones y "recocido" por 1 hr @ 1100ºC). Esto permite la pasivación de la oblea.
b. Se realiza un implante de iones n+ (*difussion*), utilizando una máscara de fotoresist.
c. Se obtiene una zona con implante de iones n+.
d. La zona n+ es retirada mediante grabado.
e. Se deposita una capa de polisilicio (también llamado silicio policristalino) de 3000 Å de grosor, dopado *in situ* con fósforo mediante LPCVD (@ 650ºC).
f. Posteriormente se realiza nuevamente el trazado de patrones. Esta capa sirve como segundo plano del electrodo, como interconexión con la difusión n+, y para evitar las protuberancias o irregularidades que podrían provocar que la segunda capa de polisilicio se adhiera al sustrato.
g. Se deposita una capa de 5 μm de PSG (*phosphosilicate glass*) mediante LPCVD, como capa de sacrificio, también puede ser sustituida por una capa de dióxido de silicio (SiO_2).
h. Se realiza el trazado de patrones y el grabado con la tercera máscara, de esta manera se definirán las "anclas" de la microestructura, es decir, las partes fijas al sustrato.
i. Se deposita una segunda capa de polisilicio de 10 μm de espesor mediante LPCVD (sin dopar, @ 605ºC), el cual servirá como material estructural.
j. Posteriormente se deposita una fina capa de oro (Au) de 100 nm de grosor mediante evaporación al vacío (*vacuum evaporation*).
k. Se traza el patrón del obturador reflexivo (de 140 μm x 280 μm, ver Fig. 5.7) utilizando una cuarta máscara.
l. Se deposita una capa de fotoresist para la realización de la última máscara.
m. Procediendo al trazado de patrones de la quinta máscara (Fig. 5.13).
n. Las estructuras del MOEMS son grabadas anisotrópicamente con CCl_4 mediante RIE (*reactive-ion etching*), en orden de alcanzar las paredes con la mayor verticalidad posible.

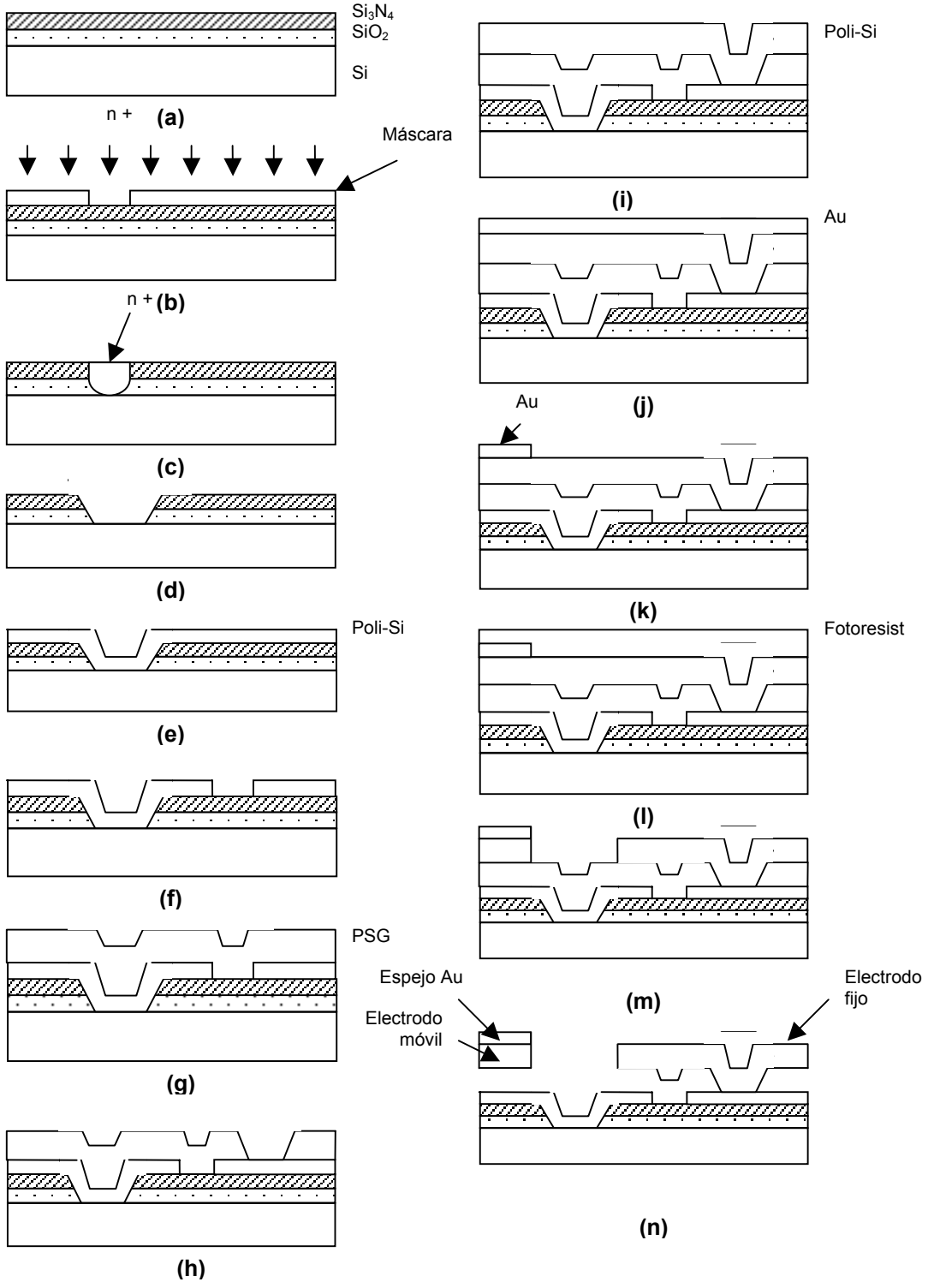


Fig. 5.12 Pasos en la fabricación del MOEMS

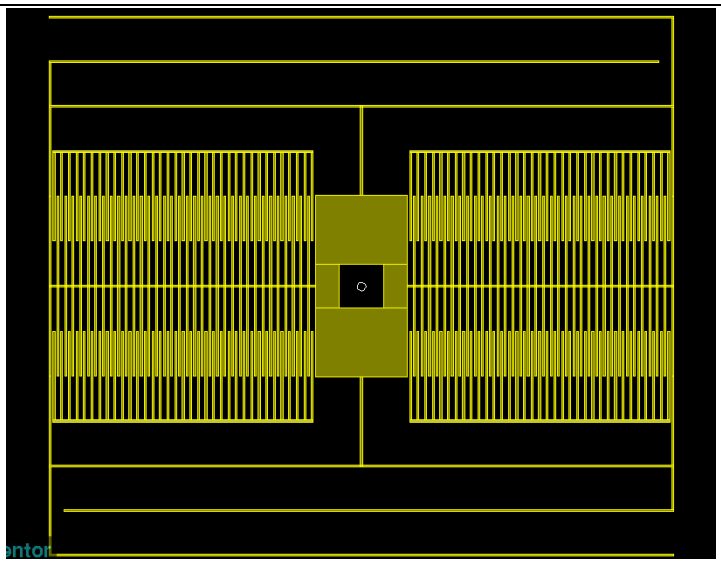


Fig. 5.13 Máscara de la estructura MOEMS realizada en Coventor

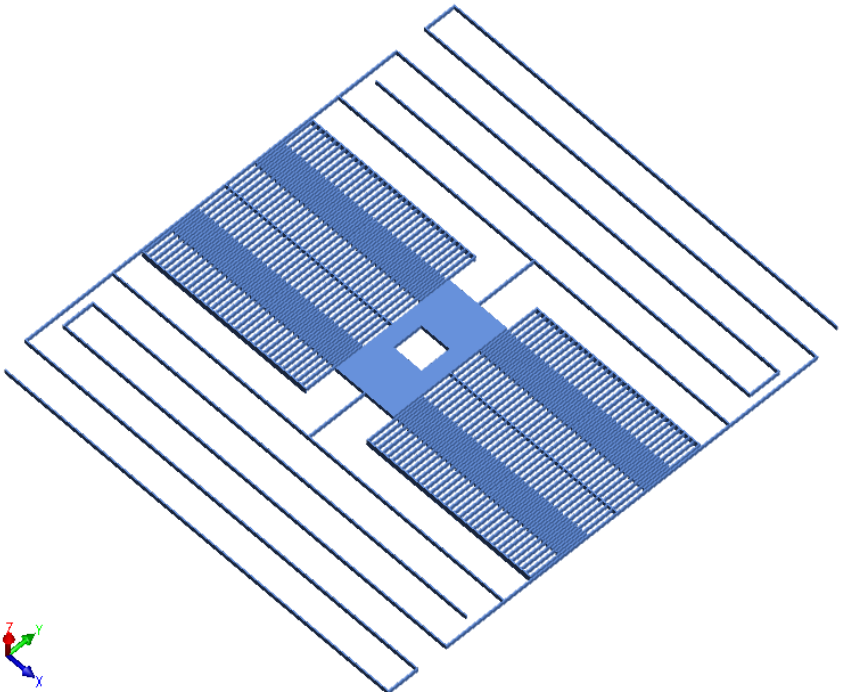


Fig. 5.14 Diseño realizado en Coventor, sus dimensiones se encuentran en la Fig. 5.7.

OBTENCIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS

El análisis mecánico se basa en el análisis eléctrico, así que éste último precede al anterior en orden de realización, en Coventor.

Lo que se hizo, fue simular un voltaje DC de 51 V sobre dos electrodos (los superiores), como lo señalaba el cálculo de parámetros que se realizó previamente, pero se tenía que para este voltaje existe un desplazamiento lateral más de lo necesario, por lo que se procedió a bajar el voltaje, hasta los 43 V. Ver tabla siguiente.

electroBCs

electroBCs	Voltage (V)	Charge (pC)
MOV	0.0	-3.383517E01
V2B	0.0	-2.535482E-02
V1B	4.300000E01	1.695471E01
V1A	4.300000E01	1.693103E01
V2A	0.0	-2.521649E-02

Close

Tabla 5.5 Elementos del actuador con sus respectivos valores de voltaje aplicado (en Volts) y carga (en picoCoulombs)

donde MOV, es la estructura móvil, V1A y V1B son los electrodos superiores, a los que se les aplicó el voltaje de 43 V, y V2A y V2B son los electrodos inferiores, a los cuales no se les aplicó ningún voltaje para observar una diferencia de potencial y por consiguiente un desplazamiento lateral.

Capacitance (pF)

Capacitance (pF)	MOV	V2B	V1B	V1A	V2A
MOV	9.131129E-01	-6.256076E-02	-3.937064E-01	-3.931587E-01	-6.368712E-02
V2B	-6.256076E-02	6.358669E-02	-4.311925E-04	-1.581451E-04	-4.365892E-04
V1B	-3.937064E-01	-4.311925E-04	3.944665E-01	-1.708732E-04	-1.580889E-04
V1A	-3.931587E-01	-1.581451E-04	-1.708732E-04	3.939158E-01	-4.280835E-04
V2A	-6.368712E-02	-4.365892E-04	-1.580889E-04	-4.280835E-04	6.470988E-02

Close

Tabla 5.6 Elementos del actuador con sus respectivos valores de carga (en picoCoulombs) de unos respecto a otros.

OBTENCIÓN DE PARÁMETROS MECÁNICOS

Durante el análisis mecánico, que se realiza en el "Analyzer", en la parte de "MemMech", se obtuvieron los siguientes parámetros:

mechDomain

mechDomain	Maximum	Minimum
Node Displacement	6.635668E01	0.0
Node X Displacement	3.857982E00	-2.553881E00
Node Y Displacement	6.626102E01	-9.946214E-35
Node Z Displacement	7.138437E-01	-7.421101E-02

Close

Tabla 5.7 Desplazamientos máximos y mínimos que se tienen en cada nodo.

modeDomain

modeDomain	Frequency	Generalized Mass	Damping
1	8.417359E02	2.402947E-09	0.0
2	1.675509E03	1.892908E-09	0.0
3	2.513508E03	7.079225E-10	0.0

Close

Tabla 5.8 Parámetros mecánicos: frecuencia de resonancia en este caso, la primera corresponde al eje Y, 842 Hz lo que casi concuerda con el calculado en teoría (856 Hz); la masa generalizada, y el amortiguamiento.

Displacements

Displacements	Step	Delta	Maximum	MaxX	MaxY	MaxZ	MinX	MinY	MinZ
step 0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
step 1	1.000000E00	6.635668E01	6.635668E01	3.857982E00	6.626102E01	7.138437E-01	-2.553881E00	-9.946214E-35	-7.421101E-0

Close

Tabla 5.9 El desplazamiento máximo neto de la estructura es de 66.4 μm, que corresponde al desplazamiento máximo en Y, siendo despreciable el desplazamiento en otros ejes. Este desplazamiento neto es similar al de diseño (67 μm).

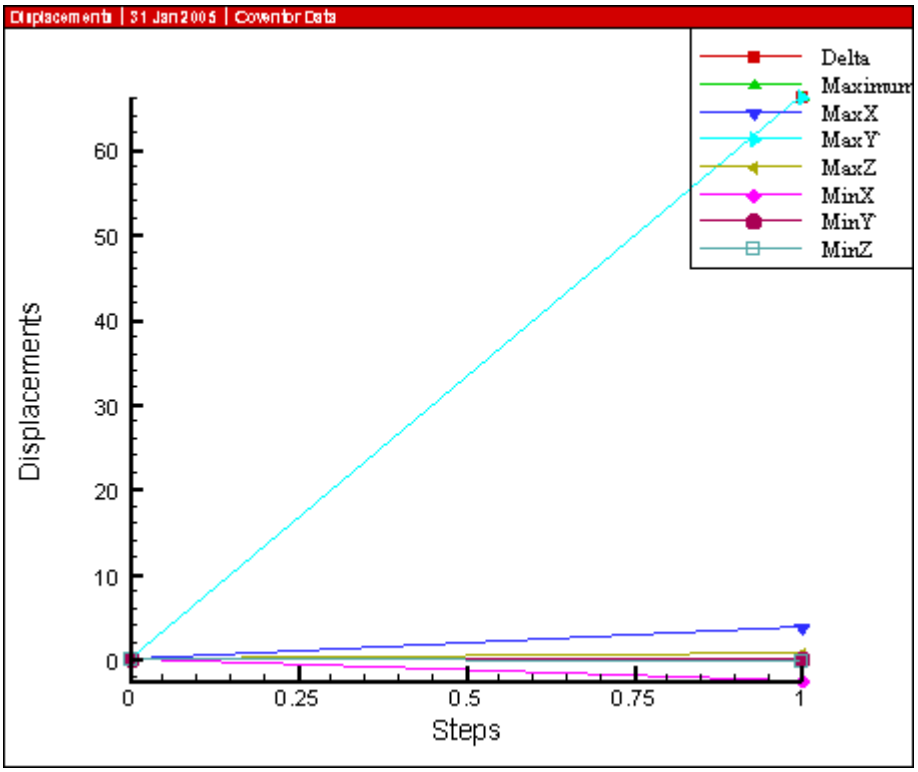


Fig. 5.15 Gráfico obtenido por Coventor de desplazamiento neto de la estructura.

Nota: Durante la elaboración del modelo 2-D es importante colocar adecuadamente el origen, por que de él dependerán los resultados de desplazamiento. Nuestro origen fue colocado en el centro de la ventana óptica, por lo que todos los desplazamientos mostrados aquí tienen como punto de referencia ese origen, lo cual es correcto, ya que cuando el actuador se desplaza hacia la dirección (+) de eje Y, tendremos desplazamientos positivos, y cuando aplicamos voltaje en los electrodos inferiores, provocamos un desplazamiento (-) en Y.

SIMULACIONES CON G

Coventor proporciona la posibilidad de agregar fuerzas de aceleración aplicados sobre diversos ejes

Simulación con 1G, sobre el eje Z.

Simulación para la aplicación de una aceleración sobre el eje z igual a -9.8e06 $\mu m/s^2$ (G), es decir, para ver el desplazamiento que tiene nuestro actuador al aplicarle una fuerza igual a la fuerza gravitatoria en el eje z.

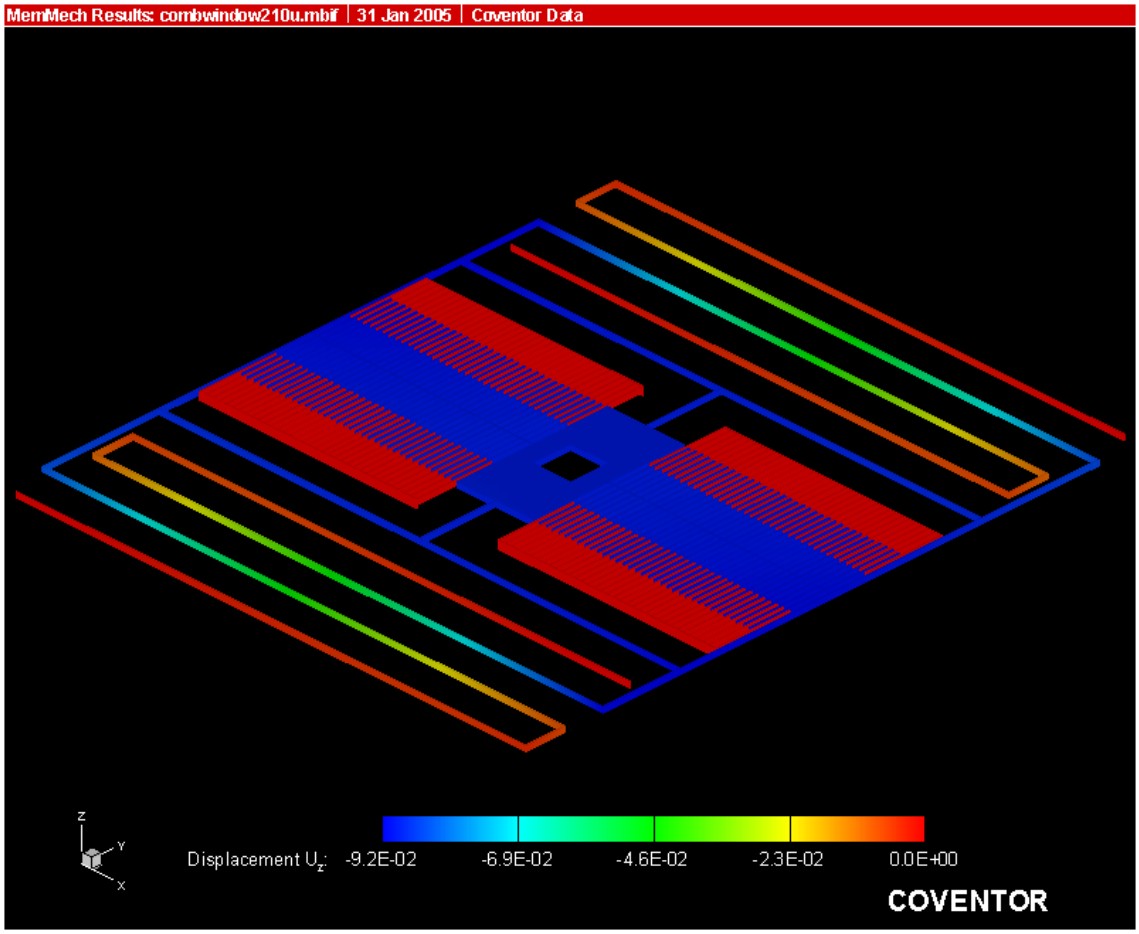


Fig. 5.16 Gráfico obtenido por Coventor de desplazamiento neto de la estructura.

Entonces como lo muestran los resultados (Fig. 5.16) de desplazamiento, en el eje z solo muestra un desplazamiento de -9.2e-02 μm (marcado en color azul rey), además en rojo se muestra que los dientes fijos no se mueven.

Simulación con 10G, eje Z.

En este caso, el desplazamiento simulado es de -9.2E-01 μm, esto significa que nuestro actuador tiene un desplazamiento mínimo si sufriera de alguna caída por ejemplo.

Simulación con 20G, eje Z.

Por último se considera el caso de que la aceleración de caída sea igual a los 20G, que se considera como el caso extremo de aceleración que puede sufrir en una caída.

El máximo desplazamiento en el eje z es de -1.8 μm, lo cual es aceptable, ya que se tiene una distancia entre las vigas de soporte y el sustrato de 5 μm, con lo cual se comprueba que no se tocan durante una caída de 20G. Este eje en especial es de interés para conocer la distancia mínima de separación entre fibra y modulador.

Simulaciones con g, para el eje X.

Otros estudios a continuación son considerados a lo largo de el eje x y el eje y ya que el actuador podría encontrarse en cualquiera de estos dos ejes durante su funcionamiento normal. Así que, primero se va a considerar el caso de cuando se tenga 1g en el eje x.

El desplazamiento neto a lo largo del eje x es de 1.0e-02 μm, entonces, como observamos en los casos anteriores, con este dato podemos deducir que para una aceleración de 10g a lo largo del eje x tendremos un desplazamiento de 1.0e-01 μm y para 20 g de 0.2 μm con lo que se concluye que en ningún momento se tocan los dientes fijos con los dientes móviles.

Simulaciones con g, eje Y.

Ahora, para el eje y también tenemos que concluir algo, por lo que, para 1G en el eje y, se tuvo un desplazamiento de 3.5e-0.1 μm para un valor de aceleración de 1G. Entonces para 10G tenemos 3.5 μm de desplazamiento y para 20G de 7 μm.

Por los resultados del simulador podemos concluir que, en cualquiera de los casos de desplazamiento sobre los ejes x, y, z, no se afecta el desempeño general de nuestro actuador. Aunque cabe señalar que el mayor desplazamiento se obtuvo en el eje y, lo cual era de esperarse, ya que el actuador se diseñó para facilitar el movimiento en el eje Y.

SIMULACIÓN DEL FACTOR DE CALIDAD, Q, Y PARÁMETROS ÓPTICOS.

Para obtener Q se debe obtener la respuesta en frecuencia del actuador, de tal manera que se tenga la gráfica de Frecuencia [Hz] vs. Atenuación en [dB], en la cual se puedan ubicar: la frecuencia de resonancia (f_0) que es la frecuencia para la cual se tienen las menores pérdidas, y el ancho de banda del modulador ($f_2 - f_1$), que se obtiene como la diferencia de las dos frecuencias que se encuentran a los 3 dB de pérdidas.

En general es posible simular la respuesta en frecuencia del MEMS en Coventor por medio de la aplicación llamada "*Arquitect*" pero desafortunadamente se tiene deshabilitada por el momento.

Al igual que la Q, los parámetros ópticos requieren la versión completa de Coventor, por lo tanto, no fue posible simular estos parámetros.

Los resultados obtenidos por Coventor se resumen en las siguientes tablas.

Tabla 5.10 Parámetros eléctricos y mecánicos simulados por Coventor.

Parámetro	Valor
Voltaje de actuación DC aplicado, v_d	43 V
Desplazamiento lateral sobre el eje Y	66.4 μm
Frecuencia de resonancia, f_0	842 Hz

Tabla 5.11 Simulaciones con G en Coventor.

	Eje X	Eje Y	Eje Z
1 G	1.0e-02 μm	3.5e-0.1 μm	-9.2e-02 μm
10 G	1.0e-01 μm	3.5 μm	-9.2E-01 μm
20 G	0.2 μm	7 μm	-1.8 μm

5.6 Señales de alimentación del "comb drive"

La figura 5.17 muestra de manera esquematizada la configuración del circuito de excitación del modulador MOEMS, para poder moverlo. La parte movible del actuador ("rotor") se conecta con tierra (0 V) y las dos partes fijas ("estator") se conectan con dos generadores.

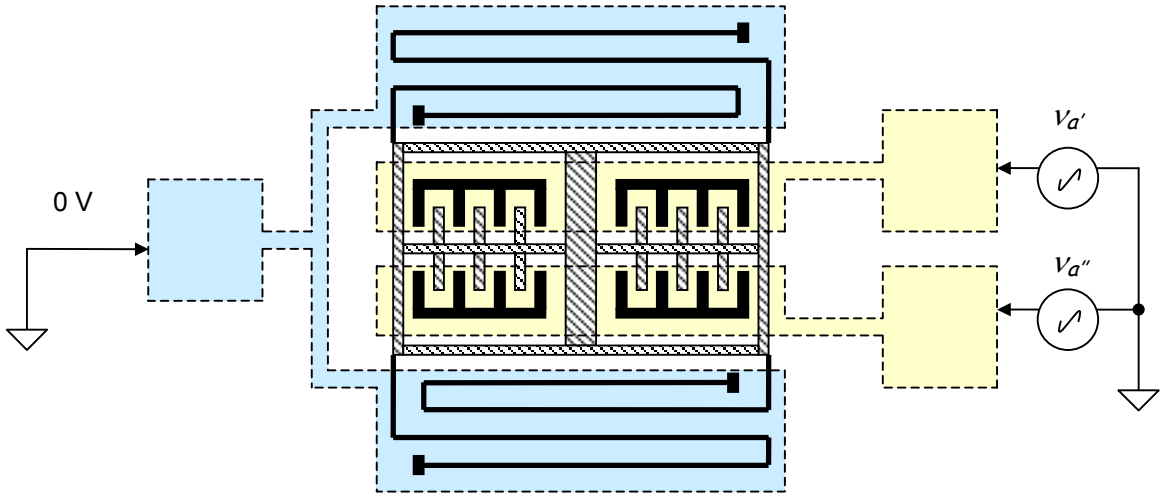


Fig. 5.17 Configuración del circuito de excitación del modulador MOEMS

5.6.1 Excitación en régimen de resonancia

En el caso de la excitación en resonancia los generadores son de función rectangular unipolar, con una frecuencia de f_0 y un voltaje de magnitud $V_a = V_d / Q \approx 4.8$ V, en contrafase v_a' y v_a''. Con esto, la potencia de señal óptica reflejada se modula con una frecuencia de $2f_0$. La ventana del modulador MOEMS se muestra en la Fig. 5.18. Los diagramas de las señales eléctricas aplicadas y de la señal óptica reflejada se muestran en la Fig. 5.19.

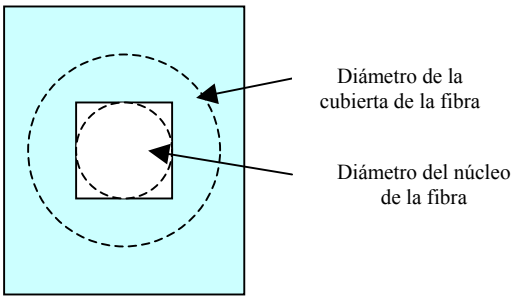


Fig. 5.18 Ventana del modulador MOEMS en resonancia

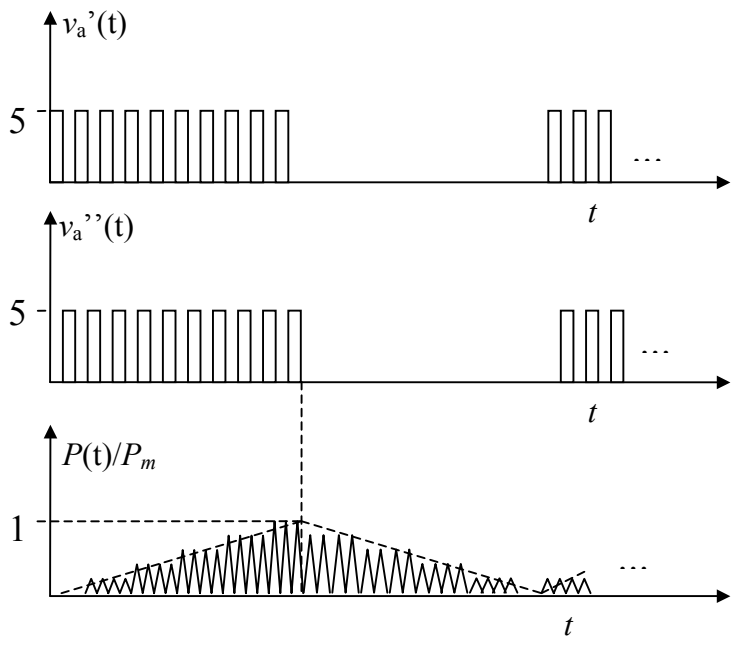


Fig. 5.19 Diagramas de las señales eléctricas aplicadas y de la señal óptica reflejada en régimen de resonancia.

Como se vea en los diagramas presentados el tiempo de subida de la envolvente de señal óptica modulada es de unos 9 periodos de la frecuencia de resonancia (según del valor de Q=8.9), es decir T_s=10ms, aproximadamente. Este valor del tiempo de subida es relativamente grande, lo que limita la banda de la señal modulada. A pesar esta desventaja del régimen de trabajo con frecuencia de resonancia, su ventaja es un bajo voltaje de actuación.

5.6.2 Excitación en régimen de modulación por pulsos

Es posible aumentar el ancho de banda de la señal modulada hasta $B = f_0$ usando el modulador en régimen de modulación por pulsos. En este caso se necesita voltaje de actuación de 43V y el uso de amortiguamiento activo. Con esto el tiempo de subida se puede calcular aproximadamente como

$$T_s \approx \frac{0.35}{f_0} = \frac{0.35}{842} \approx 0.42[ms].$$

En el caso de excitación por pulsos, los generadores proporcionan señales binarias codificadas, el segundo generador debe responder de acuerdo al código enviado por el primer generador (Ver Fig. 5.20). La Fig. 5.21 muestra la ventana del modulador MOEMS.

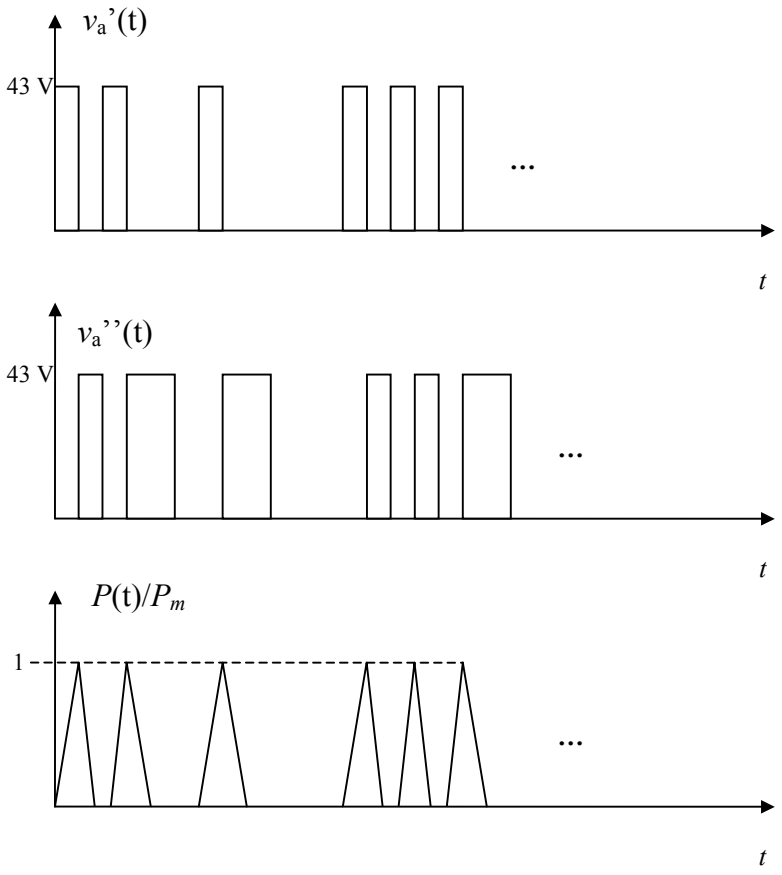


Fig. 5.20 Diagramas de las señales eléctricas aplicadas y de la señal óptica reflejada en régimen de modulación por pulsos

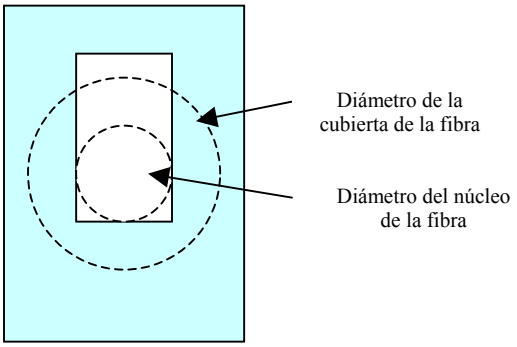


Fig. 5.21 Ventana del modulador MOEMS en régimen de modulación por pulsos

Conclusiones

El funcionamiento del modulador MOEMS se basó en el principio físico de un tipo de microactuador electrostático, llamado "comb drive", que en principio está formado de dos peinetas (una fija y una móvil) con sus hileras de "dientes"cada una, que se encuentran intercalados entre sí, y que al aplicar una diferencia de voltaje entre estas peinetas permite desplazamientos longitudinales relativamente grandes debido a la fuerza electrostática que se produce.

El requerimiento técnico principal del actuador es que lograra un desplazamiento igual a los 70 μm con la fibra MM de 62.5 μm, para tener un poco de discrepancia entre la simulación y la práctica si se llegará a implementar en un chip. El problema que presenta esta cantidad de desplazamiento es el voltaje de actuación. Según de la simulación por computadora, para lograr un desplazamiento de 66 μm el voltaje es de 43 V. Afortunadamente el factor de calidad Q es 8.9 (teórico), por lo que el voltaje que requiere a la entrada el actuador cuando se encuentra en resonancia (f_0 = 856 Hz) es tan solo de 4.8 [V]. El trabajo en régimen de frecuencia de resonancia del modulador por un lado limita la velocidad de transmisión, pero por otro lado permita mejorar la detección de la señal de datos en la unidad central utilizando detección de la señal modulada con una frecuencia subportadora. Comparando resultados, tenemos que la fuerza electrostática necesaria para mover un modulador para el enlace MM es casi el doble de la requerida para un enlace SM, debido a las características del núcleo de la fibra en cada uno de los casos. Pues en el primero, la distancia a desplazarse es casi siete veces mayor que la del enlace SM, además de que el modulador MOEMS para éste último tiene menor masa, es de una tercera parte del tamaño del modulador diseñado para el enlace MM. En consecuencia, la potencia consumida por un modulador diseñado para el enlace SM es un orden menor que la del enlace MM. Además, la frecuencia de resonancia que se puede conseguir con un modulador de menor tamaño, para el caso SM, es casi tres veces mayor a la alcanzada por el diseño MM.

Una desventaja que presenta el software Coventor en el análisis, es que no tiene la posibilidad de meter señales variables en el tiempo (pulsos o sinusoides) como señales de alimentación de las estructuras, es decir, sólo permite la entrada de señales de DC, lo que significa un análisis de alimentación estático. Sin embargo esto se compensa, con un análisis por pasos, donde en un número de pasos determinados por el usuario, se puede especificar el voltaje aplicado en cada paso, pudiendo decrementarlo e incrementarlo conforme sea necesario, simulando una sinusoidal, por ejemplo.

CONCLUSIONES GENERALES

En el diseño presente de la interfaz completa vía fibra óptica se escogió la configuración de una sola fibra que requiere un menor número de los componentes activos como fuentes ópticas y fotodetectores que son más caros en comparación con los componentes pasivos. Además, en la parte de la unidad remota (UR) se utilizó un modulador MOEMS. Esta solución es crucial para la integración total de los dispositivos de la UR en un solo chip de silicio porque permite quitar la fuente óptica que principalmente requiere otro material de semiconductor. Los principales elementos de la interfaz completa vía fibra óptica propuesta son la fuente óptica y el fotodetector de la unidad central (UC), fibra óptica, el modulador MOEMS reflexivo y el fotodetector-fotoconvertidor de la UR.

La elección óptima del tipo de fibra y fuente óptica a utilizar depende del valor máximo de la potencia óptica requerida para la alimentación de la UR y de la velocidad de transmisión requerida. Por ejemplo, para las aplicaciones de alto consumo y baja velocidad de transmisión la solución óptima es una fuente óptica potente y barata como un diodo superluminiscente (ELED) o un láser multimodo de altas potencias, y una fibra multimodo. Para las aplicaciones de bajo consumo y alta velocidad de transmisión la solución óptima es un láser monomodo de alta potencia y una fibra monomodo. En nuestro caso la velocidad de transmisión de datos esta limitada por el modulador MOEMS elegido, por eso se escogió la primera opción mencionada.

El fotodetector-fotoconvertidor es el elemento que determina la eficiencia de conversión O/E de la energía que llega a la UR, por esto la optimización de su tipo y construcción es crucial para obtener máxima eficiencia total del subsistema de alimentación. Se estudiaron varios métodos y dispositivos de conversión O/E incluyendo fotoconvertidores de muchas celdas en serie y de una celda con transformación de voltaje.

En el diseño del modulador MOEMS es importante tomar en cuenta la optimización de la velocidad de transmisión de datos y su consumo de energía. Según este aspecto se necesita balancear entre los valores de su velocidad de modulación y voltaje de actuación. Se estudiaron ambos regímenes de trabajo del modulador: modulación por pulsos y modulación de subportadora con frecuencia de resonancia. La elección de un modulador reflexivo opto-mecánico habilita la posibilidad de tener un enlace activo-pasivo de transmisión bidireccional, eliminando la fuente óptica en la unidad remota lo que facilita su integración en un solo chip de silicio. Se eligió un actuador electrostático tipo de peine por tener baja potencia disipada y realizar grandes desplazamientos requeridos para las fibras ópticas multimodo.

Como resultado del trabajo realizado se cumplieron los objetivos de esta tesis que son el análisis y diseño de la interfaz completa vía fibra óptica que utiliza el mismo canal de fibra óptica para la transmisión simultánea de las señales de datos y control entre las unidades central y remota incluyendo la alimentación de la unidad remota, además la aplicación de las tecnologías MOEMS que permiten integrar todos componentes de la unidad remota en un solo chip de silicio.

Las características principales de la interfaz completa vía fibra óptica diseñada:

Distancia de enlace	…	1 km
Tipo de fibra óptica de la interfaz	…	MM 62.5/125 μm
Longitud de onda de trabajo	…	830 nm
Eficiencia total de conversión O/E	…	40 %
Potencia eléctrica de alimentación de la unidad remota	…	35 mW
Velocidad binaria de transmisión de control	…	640 kbit/s
Velocidad binaria de transmisión de datos:		
- con modulación por pulsos	…	0.8 kbit/s
- con frecuencia de resonancia	…	35 bit/s

Las características principales del modulador MOEMS diseñado:

Perdidas de inserción para la señal reflejada	…	1 dB
Desplazamiento	…	67 μm
Frecuencia de resonancia	…	840 Hz
Voltaje de actuación:		
- en régimen de amortiguamiento	…	43 V
- en régimen de resonancia	…	4.8 V
Potencia disipada	…	220 nW

La versión del modulador diseñado para fibras ópticas monomodo tiene características diferentes en comparación con la versión para fibras ópticas multimodo debido a su menor tamaño y menor desplazamiento requerido. Por ejemplo, la potencia de consumo de este modulador es en 10 veces menor, lo que está a favor de su aplicación en interfaces completas de larga distancia y bajo consumo de unidad remota. Además, la frecuencia de resonancia de este modulador sería casi 3 veces mayor, lo que permite aumentar la velocidad de transmisión de datos.

La interfaz diseñada podría ser útil en muchas aplicaciones de redes sensoriales vía fibra óptica para las industrias petrolera y eléctrica, transporte, ingeniería civil, etc.

APÉNDICE I

Procesos de fabricación, pasos básicos en la fabricación: deposición, trazado de patrones y grabado.

Los pasos básicos en la fabricación de componentes de Si y componentes en tecnología MEMS son: deposición, trazado de patrones, grabado

1. Primer paso, procesos de deposición.

Deposición, es un proceso en el cual una capa delgada de un material cristalino es depositada sobre otra capa de material cristalino (sustrato).Se le conoce como "bonding", cuando la capa de material depositado ya está prefabricado, y sólo se procede a la unión de éste con el sustrato.

Tabla AI.1 Materiales depositados

Materiales para el micromaquinado de volumen	**Materiales para micromaquinado de superficie**
Semiconductores:	
• Si (silicio)	• SiO_2 (dióxido de silicio)
• GaAr (arsenuro de galio)	• Silicio policristalino (poli-Si)
	• Capas de metal (predominantemente Al)

Los métodos más comunes de deposición de materiales son:

- Deposición física de vapor (PVD).
- Oxidación.
- Epitaxia.
- Deposición mediante giro (spin-on)
- Pegado
- Además existen otros procesos avanzados, así como la combinación de algunos de ellos.

Deposición Física de Vapor (PVD)

Deposición Física de Vapor ó PVD, por sus siglas en inglés, *Physical Vapor Deposition.* Consiste en la deposición de material que es transferido desde la fuente hacia el sustrato, por medios físicos, es decir, sin cambios en su composición química. Es un Método común en la deposición de una capa delgada de metal (metalización). Los procesos PVD son la evaporación y deposición mediante chispa (*sputtering*).

I. PVD mediante Evaporación

- Técnica utilizada para la deposición de una capa fina de material (en su mayoría metales). El material que será depositado es calentado en una cámara al vacío (10-6 Torr - 10-7 Torr), hasta que se funde y comienza a evaporarse, posteriormente el vapor del material es condensado al contacto con el sustrato frío. Nota: 1 torr = 133.3 Pa
- No es conveniente para materiales con un punto de fusión alto.

ESQUEMA DEL PROCESO DE DEPOSICIÓN POR EVAPORACIÓN:

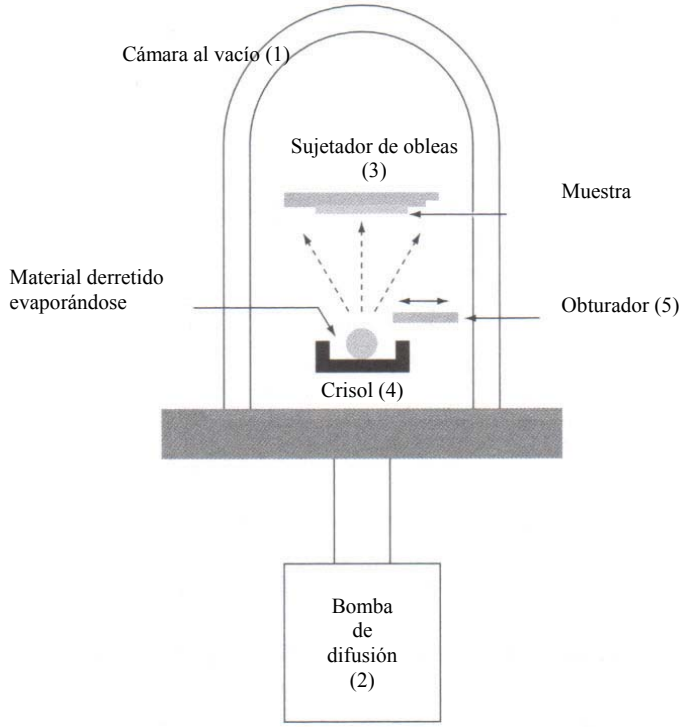


Fig. AI.1Esquema del proceso de fabricación por deposición

DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA:

Un sistema de evaporación consiste de: una cámara al vacío (1), una bomba (2), el contenedor de la oblea (3), el crisol (4), y el obturador (5).

Una muestra del metal a ser depositado se coloca en un crisol y la cámara se pone a una presión de 10-6 a 10-7 torr. El crisol es calentado utilizando un filamento de tungsteno ó por bombardeo de electrones (electron beam) hasta evaporar el metal, para luego condensarse al contacto con el sustrato (oblea) frío.

PARÁMETROS CONSIDERADOS EN LA EVAPORACIÓN.

- El grosor de la capa que se obtiene, está determinada por el tiempo en que se encuentre abierto el postigo y puede ser medido utilizando un medidor de grosor basado en microbalance de cuarzo (QMB, *quartz microbalance-based*).
- La tasa de evaporación está en función de la presión a la que se encuentre el metal en su forma de vapor. Así, metales que tienen un punto bajo de fusión, son evaporados fácilmente (660ºC para Al), mientras que los metales refractarios requieren temperaturas mucho más grandes (3422ºC para Tungsteno), causando daño a los sustratos de polímeros o plásticos.
- En general, las capas obtenidas por evaporación, tienen un alto desorden, y gran tensión residual. Sólo se pueden obtener capas delgadas de metal.
- La tasa de deposición es relativamente lenta, a unos cuantos nanómetros por segundo (nm/s).

II. PVD mediante chispa (*sputtering*)

Es un método PVD comúnmente utilizado para la deposición de metales y óxidos, consiste en el bombardeo de un material sólido (*target*) por medio de iones inertes, causando la expulsión de átomos de material que posteriormente son redepositados en la superficie del sustrato que se encuentra ubicado en la vecindad del material.

Existen principalmente 3 técnicas de deposición mediante chispa, que se clasifican de acuerdo al modo de excitación de los iones inertes:

- Mediante descarga luminiscente de DC (*DC glow discharge*)
- Mediante radiofrecuencias (*planar RF*)
- Mediante magnetrón (*planar & cilindrical magnetron*)

PRINCIPIO BÁSICO

La deposición mediante chispa se basa en un fenómeno físico, que implica la aceleración de iones a través de un gradiente de potencial y el bombardeo de un flujo de iones por medio de un cátodo (ó tarjeta del material que se desea depositar, generalmente metal). A través de la transferencia de momento, los átomos de la superficie del metal se vuelven volátiles y son transportados en forma de vapor hacia el sustrato. Así, una capa va creciendo en la superficie del sustrato.

La figura AI.2 muestra un sistema típico de deposición mediante chispa, que comprende de una cámara de vacío, una tarjeta de material que se desea depositar, un contenedor de muestras, y una fuente de poder, ya sea de alto voltaje (de corriente DC), o mediante radiofrecuencias (RF).

Después de bajar la presión en la cámara de 10-6 a 10-8 torr, se introduce a la cámara un gas inerte (como Helio) a pocos militorr de presión, El plasma del gas inerte hace ignición. Los iones energéticos del plasma bombardean la superficie de la tarjeta. La energía de los iones de plasma (~keV) es suficiente como para hacer que algunos de los átomos escapen de la superficie de la tarjeta. Algunos de los átomos 'aterrizan' en la superficie del sustrato (muestra), formando una delgada capa de material.

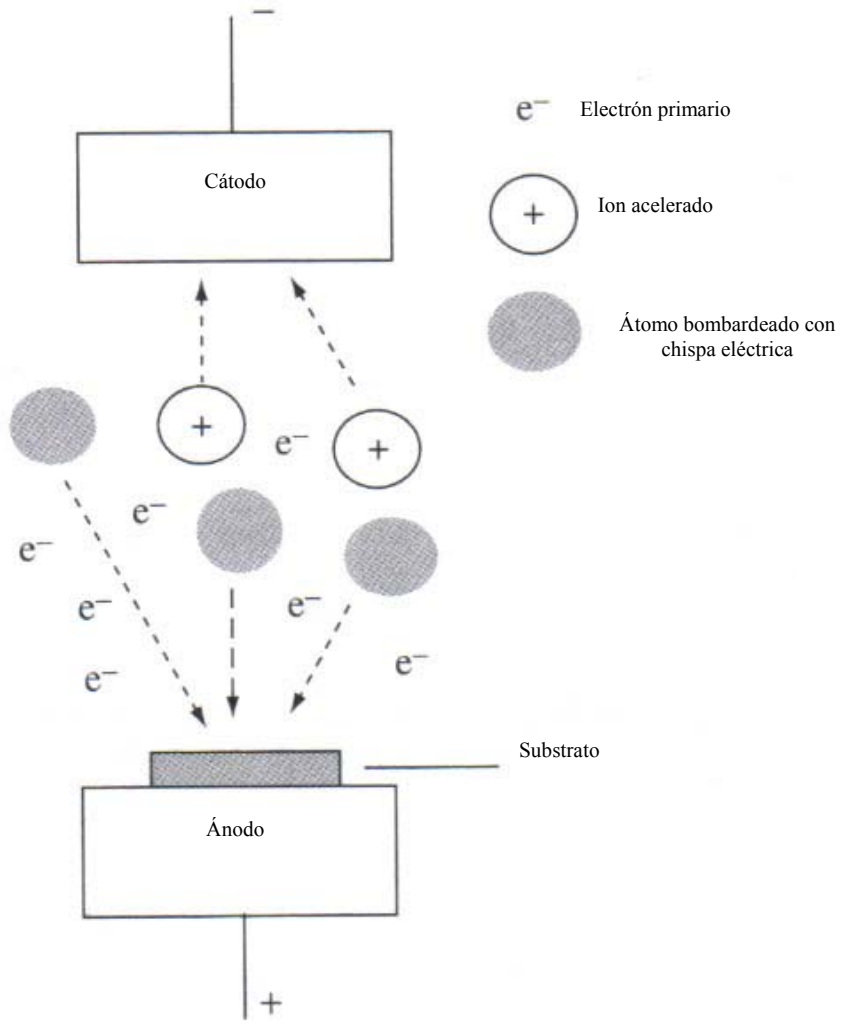


Fig. AI.2 Principio básico para la deposición mediante chispa

CARACTERÍSTICAS OBTENIDAS:

- Las capas obtenidas por la deposición mediante chispa tienden a tener mayor uniformidad que las obtenidas por evaporación.
- El plasma de alta energía, permite que se supere las limitaciones de temperatura de la evaporación.
- Se pueden utilizar muchos de los elementos de la tabla periódica como el aluminio, titanio, platino, entre otros, incluyendo compuestos orgánicos e inorgánicos.
- Materiales refractarios son fácilmente depositados, mientras que en la evaporación, es difícil depositar materiales con un punto de ebullición muy alto (preferentemente ≤ 150°C).
- Se pueden depositar materiales de varias tarjetas al mismo tiempo (cosputtering).
- La estructura de las capas o filmes obtenidos es principalmente amorfa.
- Las propiedades mecánicas y estructurales de las capas obtenidas, varían dependiendo de las condiciones en las que se realizó la deposición.

DEPOSICIÓN MEDIANTE DESCARGA LUMINISCENTE DE DC (*DC GLOW DISCHARGE*).

Es el que utiliza como medio de excitación de los iones inertes, una fuente de voltaje de corriente directa (DC).

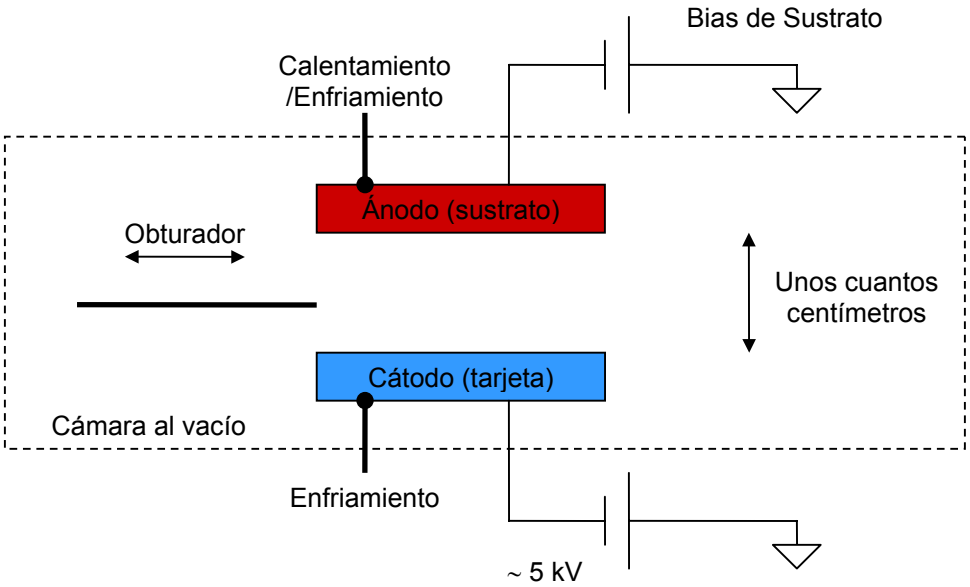


Fig. AI.3 Cámara para la deposición mediante descarga luminiscente de DC

DEPOSICIÓN MEDIANTE RADIOFRECUENCIAS (*RF SPUTTER DEPOSITION*)

Es la que tiene como medio de excitación de los iones inertes, una fuente de radiofrecuencias (RF).

Equipo para DC magnetrón.

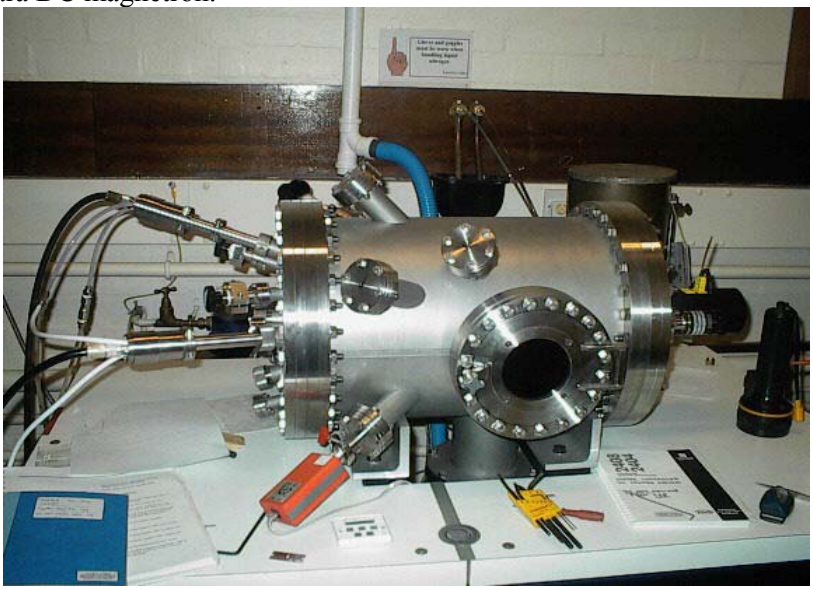


Fig. AI.4 Kurt J Lesker Ltd. DC magnetron system

Equipo para deposición mediante radiofrecuencias magnetrón.

Fig. AI.5 NORDIKO NM2000 RF magnetron sputter deposition system

Tabla AI.2 Comparación entre evaporación Vs. deposición mediante chispa.

Deposición por evaporación	**Deposición mediante chispa**
Átomos con baja energía	Átomos con alta energía
Alto vacío pocas colisiones	Bajo vacío muchas colisiones
Tamaño mayor de grano	Tamaño menor de grano
Menor orientación	Mayor orientación
Poca adhesión	Mejor adhesión

Oxidación del Silicio

La oxidación térmica es el método por el cual, se hace crecer una delgada capa de SiO_2 sobre una oblea de Si. Es el método clave en tecnología ICs (Integrated Circuits) moderna.

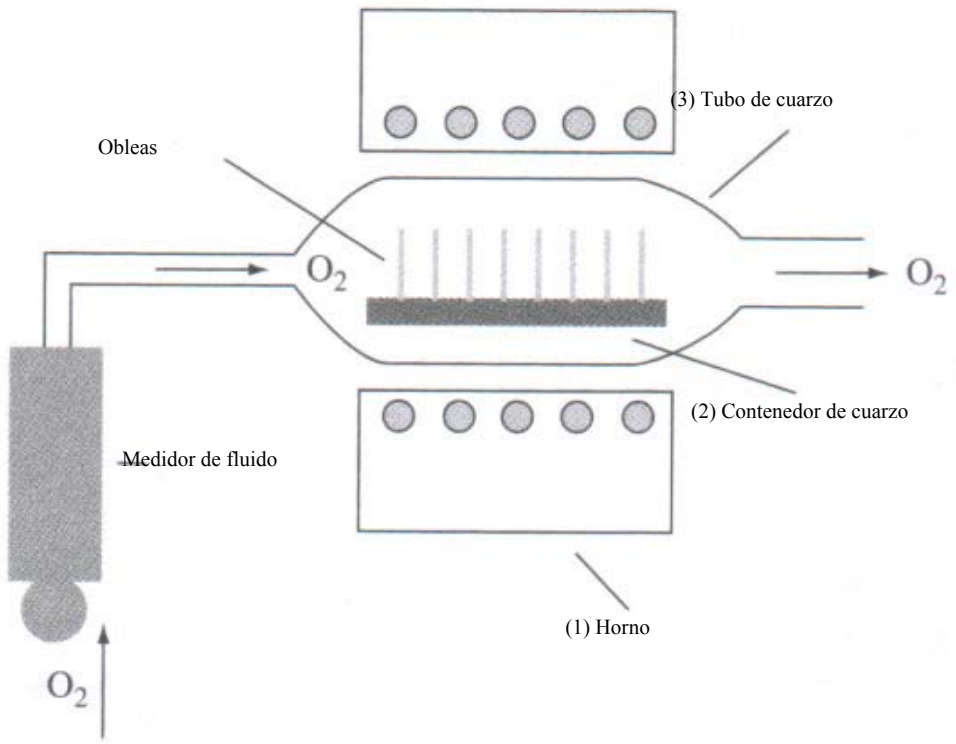


Fig. AI.6 El esquema del aparato que realiza la oxidación térmica

El aparato comprende: un horno calentado mediante resistencia (1), un tubo cilíndrico de cuarzo fundido (2) que contiene a las obleas de Si posicionadas verticalmente en un contenedor de cuarzo ranurado (3), y una fuente de oxígeno puro seco (*dry oxidation*) ó de vapor de agua pura (*wet oxidation*).

Tanto la oxidación térmica del Si con oxígeno seco ó con vapor de agua se pueden describir mediante las siguientes reacciones químicas:

$$Si(sólido) + O_2(gas) \xrightarrow{900-1200°C} SiO_2(sólido)$$

$$Si(sólido) + 2H_2O(gas) \xrightarrow{900-1200°C} SiO_2(sólido) + 2H_2(gas)$$

La capa de dióxido de Si (SiO_2) que se obtiene traspasa la interfaz Si-SiO_2, durante el proceso de oxidación. Utilizando las densidades y pesos moleculares del Si y el SiO_2 se puede mostrar que por cada x grosor de óxido que se obtiene, se consume $0.44x$ grosor de la oblea de Si.

Entonces la estructura atómica del SiO_2 que se obtiene es de la siguiente manera:

- La estructura básica del dióxido de silicio, que se obtiene mediante oxidación térmica, es un átomo de silicio rodeado de cuatro átomos de oxígeno, formando un tetraedro (a).

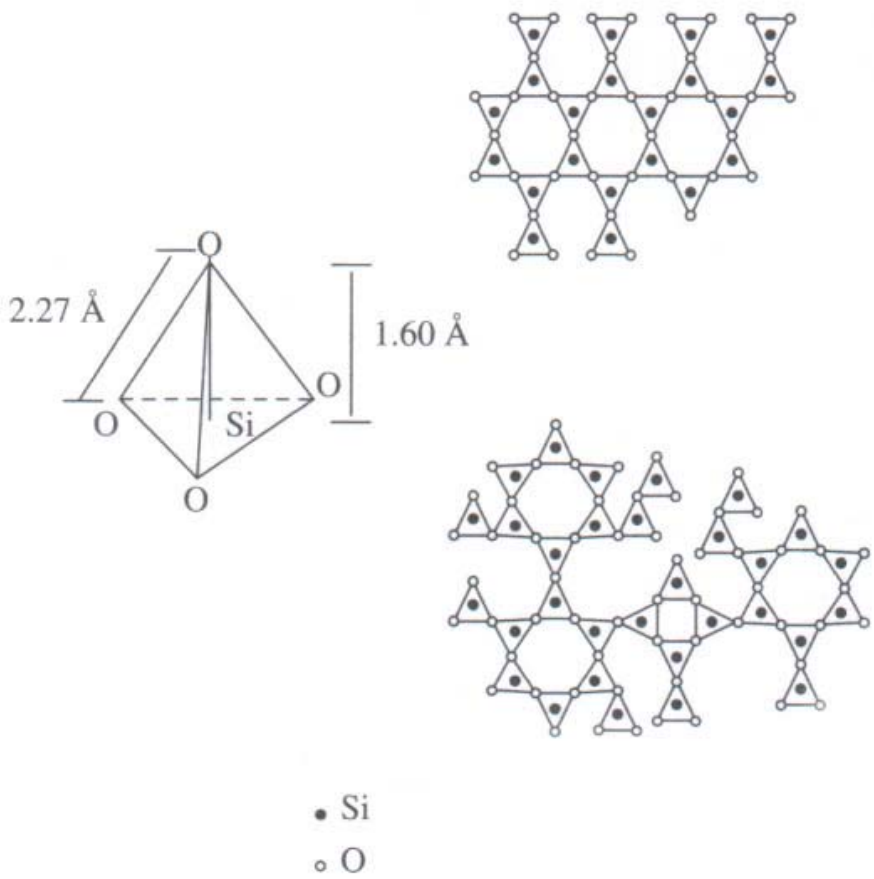


Fig. AI.7 Estructura atómica del átomo de Si

- La distancia interatómica entre el Si y el O es de 1.6 Å. Mientras que la del O-O es de 2.27 Å.
- El SiO_2 (cuarzo ó sílice) tiene tanto una estructura cristalina (b), como amorfa (c).
- Típicamente el SiO_2 amorfo tiene una densidad de ~2.2 g/cm^3, mientras que el cuarzo tiene una densidad de ~2.7 g/cm^3.
- SiO_2 obtenido por oxidación térmica usualmente es amorfo.

La tasa de oxidación del Si se puede observar en la siguiente gráfica. Esta gráfica nos da dos temperaturas 1000 y 1200ºC. Como se puede observar a mayor temperatura obtenemos mayor grosor en el óxido. La gráfica también nos muestra, los dos tipos de oxidación (húmeda y seca). La oxidación húmeda presenta una oxidación mayor, mientras que la densidad del óxido es usualmente menor.

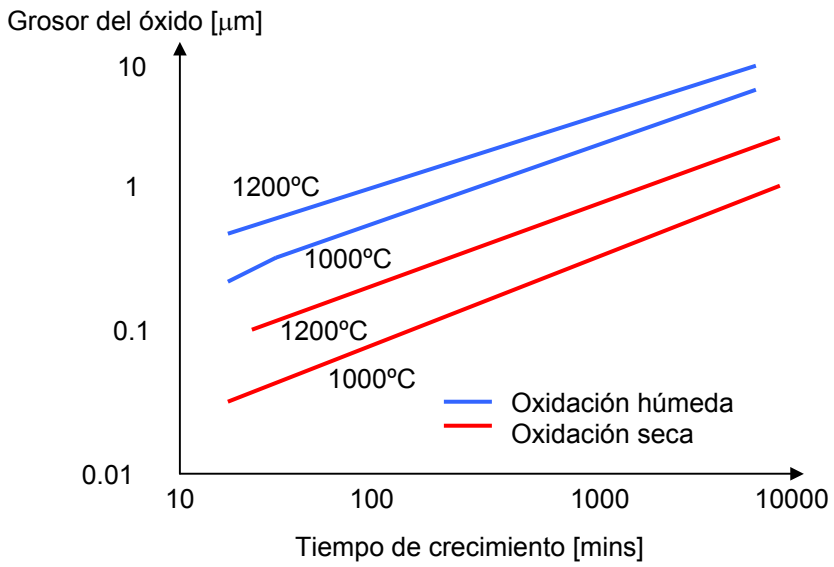


Fig. AI.8 Grosor del óxido como función del tiempo de crecimiento

En resumen, existen principalmente dos métodos para la oxidación del Silicio:

- Oxidación a temperatura ambiente, de la que se obtiene una capa cuyo grosor es de unos cuantos átomos, por lo que no se utiliza.
- Oxidación térmica (temperaturas superiores a los 800ºC – 1150°C):
  I. Húmeda (*Wet*).
  II. Seca (*Dry*)

I. Oxidación en seco

- Proceso lento, tasa de crecimiento de ~2.6 nm/min a 1200ºC y ~1.18 nm/min a 1000ºC.
- Se obtiene una mayor densidad en la capa de SiO_2.
- Se pueden obtener ~2.7 mm de óxido a 1200ºC y un grosor de 1.2 mm a 1000ºC (lo que tomaría 10,000 min. para ambos).
- Presenta mayor calidad en el SiO_2, ya que tiene una tasa de crecimiento del óxido mucho menor.

II. Oxidación húmeda

- Proceso relativamente rápido, tasa de crecimiento de ~9.5 nm a 1200ºC, y ~6.7 nm a 1000ºC
- Se obtiene una menor densidad de la capa de óxido
- Se puede obtener de 10 mm de óxido a 1200ºC, y de 7 mm a 1000ºC (10,000 min.)
- Usualmente se utiliza cuando se requiere una capa aislante de SiO_2, ó en la fabricación de máscaras.

Epitaxia

Se le conoce como deposición epitaxial (epi=sobre, taxis=orden), al proceso en el cual se deposita una capa delgada de material cristalino (material epi) sobre otra superficie (sustrato, oblea) con diferente tipo de dopante o concentración regularmente. El crecimiento de la capa ocurre de tal manera que la estructura cristalográfica del sustrato es reproducida en el material depositado con un anchor de 1 a 20 µm, este método es utilizado principalmente en la fabricación de circuitos y tecnología CMOS. Por la composición química del material, la epitaxia se puede clasificar en:

- Homoepitaxia, proceso en el cual, la composición química del material epi es la misma a la del sustrato.
- Heteroepitaxia, proceso en el que la composición química del material epi es diferente a la del sustrato. Es una importante técnica utilizada en microelectrónica (silicon-on-insulator SOI, silicon on glass SOG, silicon on sapphire SOS, nitruro de galio GaN).

Las técnicas de deposición más utilizados de epitaxia son:

- VPE (vapour-phase epitaxy).
- MBE (molecular beam epitaxy).
- CVD (Chemical Vapor Deposition).

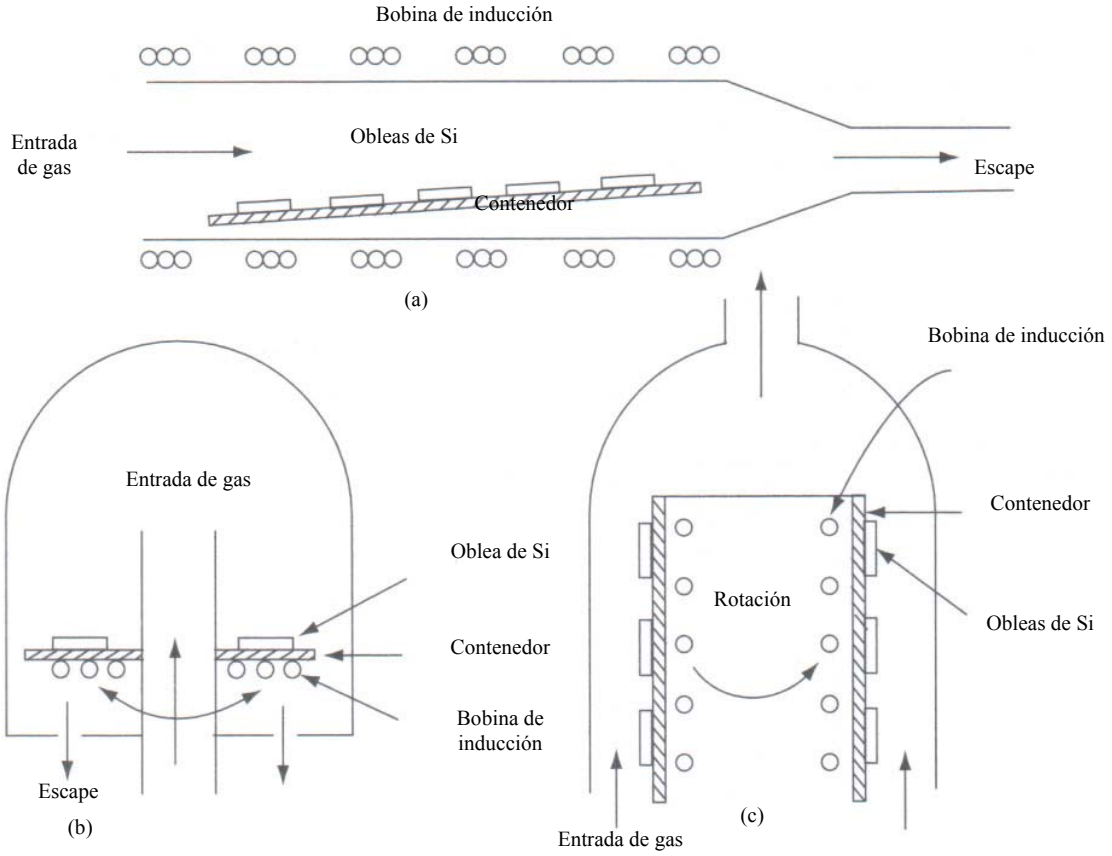


Fig. AI.9 Algunos tipos de reactores epitaxiales y sus estructuras.

Existen muchos diseños de reactores epitaxiales. La figura AI.9 muestra los 3 tipos más comunes: (a) un reactor horizontal, (b) uno vertical, (c) y uno en forma de barril (*barrel*).

En todos los casos anteriores, existe una cámara donde las reacciones químicas se efectúan, una fuente de calor acelera la reacción de un gas (fuente del sustrato).

I. Epitaxia en fase de vapor, VPE.

La epitaxia en fase de vapor, ó VPE (*vapour-phase epitaxy*) es el proceso que se utiliza comúnmente para el crecimiento de capas de Silicio sobre obleas del mismo Silicio. Se muestra en la figura un aparato VPE, contenedor horizontal, hecho de bloques de grafito, que sirve para sostener las obleas, y se le induce calor sirviendo como fuente de energía térmica durante la reacción.

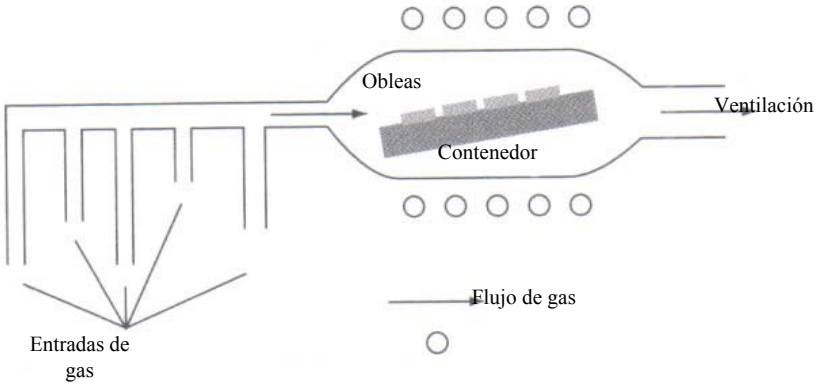


Fig. AI.10 Aparato utilizado en VPE

Entre las fuentes de Silicio utilizadas para este proceso se encuentran el:

- Tetracloruro de Silicio (SiCl4)
- Diclorosilán (SiH2Cl2)
- Triclorosilán (SiHCl3)
- Silán (SiH4)

Por ejemplo, en el caso del Silán la temperatura de reacción es ~1200 ºC, la reacción que se lleva a cabo es:

$$SiCl_4\,(gas) + 2H_2\,(gas) \rightarrow Si\ (sólido) + 4HCl\ (gas)$$

Otra reacción que ocurre es:

$$SiCl_4\,(gas) + Si\ (sólido) \rightarrow 2SiCl_2\,(gas)$$

En la primera reacción, el Si es depositado en la oblea, mientras que en la segunda reacción es removido.

II. Epitaxia por flujo molecular, MBE

En la MBE (*molecular beam epitaxy*), el sustrato de un material cristalino se mantiene a temperaturas de 400 a 800ºC y a un alto vacío (10^{-11} torr). El proceso de deposición es mucho más lento que en la epitaxia CVD, 0.2 nm/s y, provee un alto control en la precisión del grosor y en la proporción de dopantes agregados (si se desean). Su velocidad de deposición (demasiada lenta) lo hace un proceso muy caro, comparado con CVD.

Este es un método alternativo para el crecimiento de una capa de Si, es el MBE (molecular beam epitaxy), en el cual un haz de moléculas de Si, bombardean una oblea de Si, bajo condiciones de alto vacío ($\sim 10^{-8}$ a 10^{-10} torr). Con MBE se pueden alcanzar un control preciso tanto en la composición química como en la adición de dopantes (si se desea). También estructuras multicapa con dimensiones atómicas, se pueden fabricar utilizando MBE.

III. Epitaxia por deposición química de vapor, CVD

Deposición química de vapor, ó por sus siglas en inglés CVD, *Chemical Vapor Deposition*, consiste en el crecimiento epitaxial de un sustrato de material, mediante la reacción química de un gas fuente del material que se depositará, típicamente utiliza temperaturas mayores a los 1000ºC, pero con una preparación apropiada del sustrato y la correcta selección de reactantes, la temperatura puede disminuirse hasta los 500-600ºC. Existen básicamente tres tipos de procesos de deposición CVD utilizados comúnmente:

- APCVD, a presión atmosférica (*Atmospheric-Pressure*).
- LPCVD, a bajas presiones (*Low-Pressure*).
- PECVD, mediante plasma (*Plasma-Enhanced*)

DEPOSICIÓN QUÍMICA DE VAPOR A BAJAS PRESIONES, LPCVD

La figura AI.11 muestra un reactor LPCVD de "paredes calientes" (*hot-wall*), en el cual, un tubo de cuarzo es calentado por un horno, mientras tanto, se introduce un gas que pasa a través del tubo y es sacado por el otro extremo. Las obleas se mantienen en una posición vertical dentro del tubo.

En la cámara de reacción, se busca mantener los siguientes parámetros dentro de los rangos:

- Presión entre 0.2 y 2 torr.
- Flujo de gas entre 1 y 10 cm^3/s.
- Temperaturas entre los 300 y 900ºC.

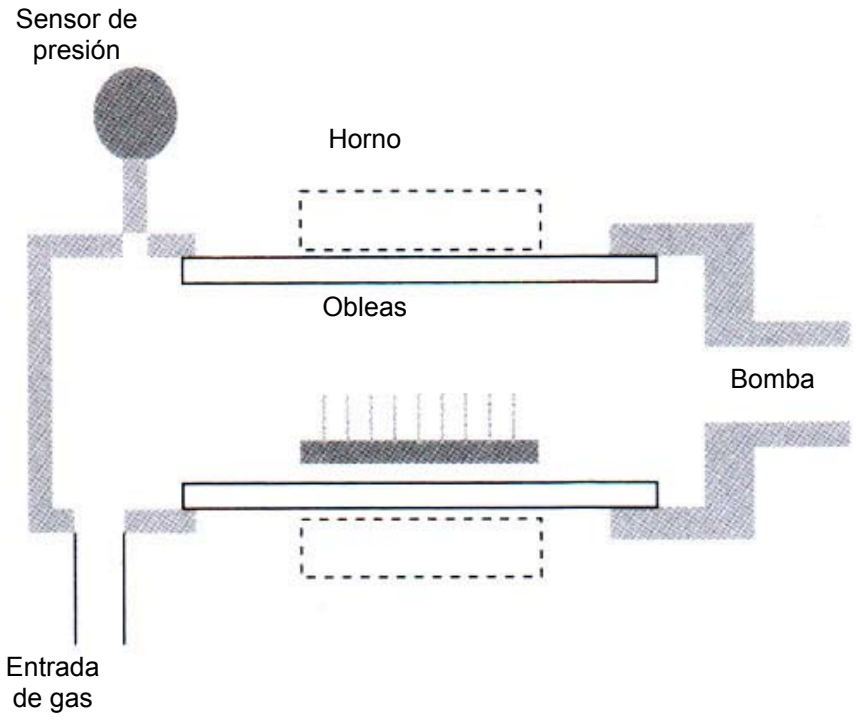


Fig. AI.11 Reactor LPCVD

DEPOSICIÓN QUÍMICA DE VAPOR MEDIANTE PLASMA, PECVD.

La figura AI.12 muestra un reactor PECVD de flujo radial, que comprime gas en una cámara sellada de forma cilíndrica. Se montan platos de aluminio paralelos, al de arriba se le aplica un voltaje RF, mientras que al de abajo se le monta a tierra. El voltaje RF causa una descarga de plasma entre los platos (electrodos). Las obleas se montan en el electrodo inferior, que es calentado a una temperatura entre 100 y 400ºC. Mientras tanto se permite el flujo de un gas.

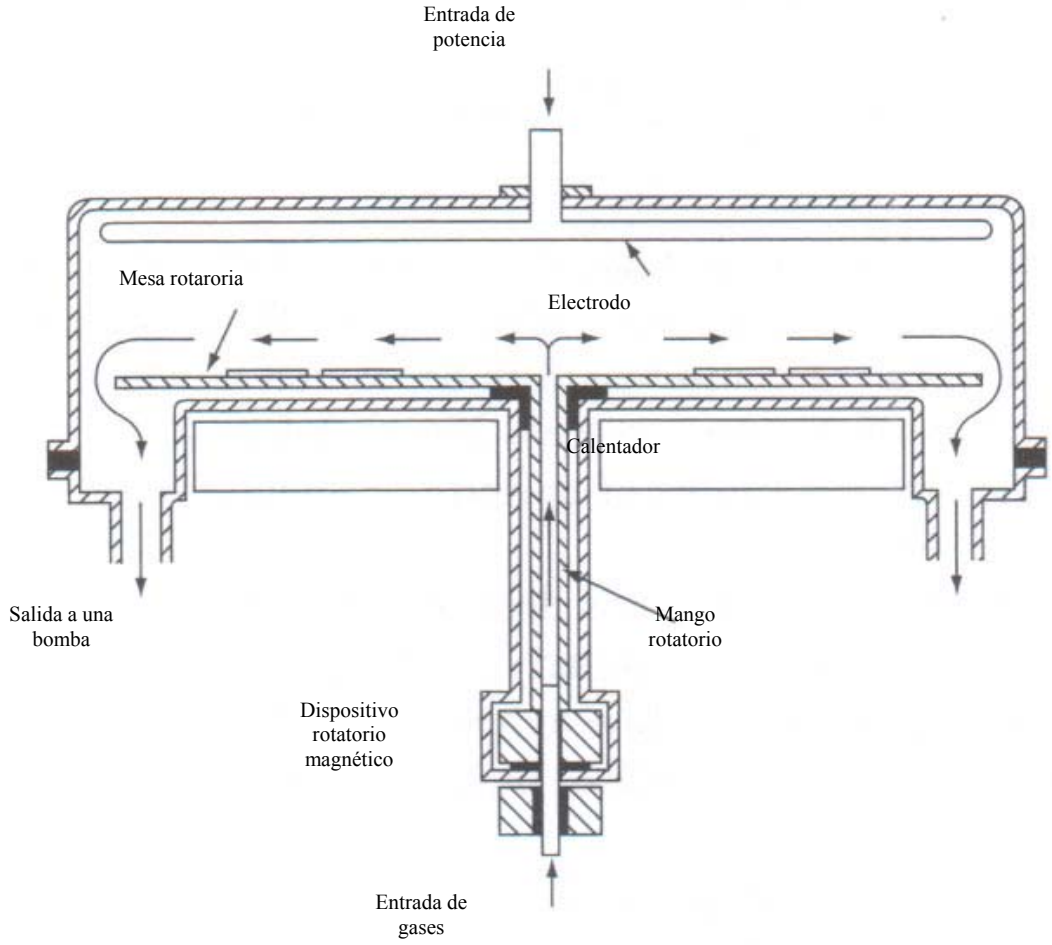


Fig. AI.12 muestra un reactor PECVD de flujo radial

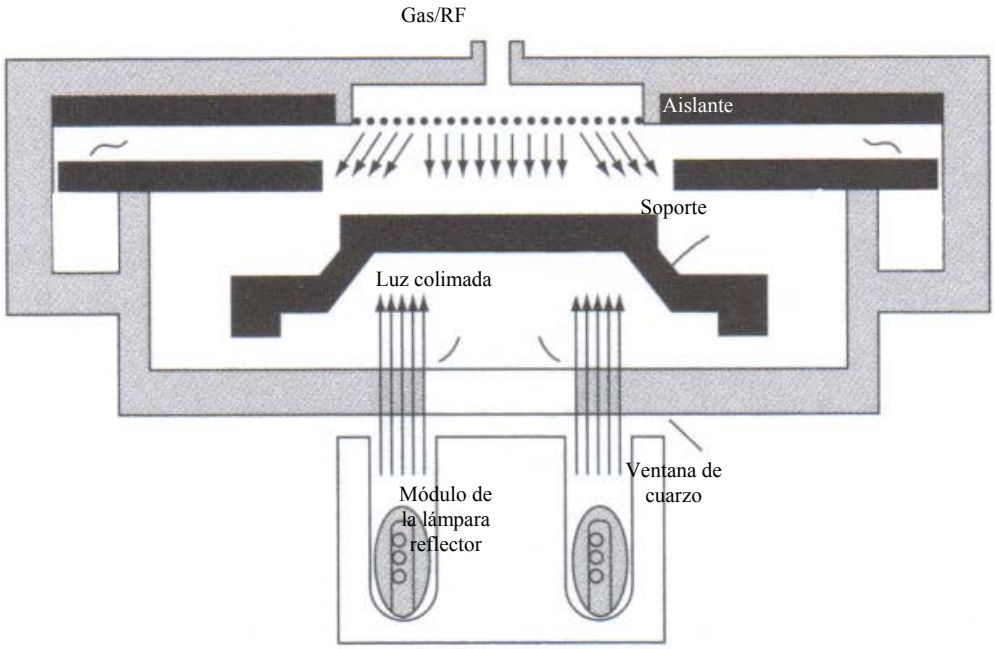


Fig. AI.12 Otro reactor PECVD que funciona bajo las mismas premisas que el anteriormente expuesto.

MATERIALES DEPOSITADOS POR CVD

El proceso CVD es ampliamente utilizado en la deposición de SiO_2 (dióxido de silicio), Si_3N_4 (nitruro de silicio) y polisilicio. El SiO_2 obtenido por CVD no reemplaza al que se obtiene mediante el método de oxidación térmica, ya que este último tiene propiedades eléctricas y mecánicas superiores, sin embargo, los óxidos obtenidos por CVD, son utilizados en muchos casos, para fabricar capas mucho más delgadas y en tiempos relativamente más cortos, a las capas obtenidas por oxidación térmica.

APCVD, LPCVD, PECVD. ¿CUÁL ES EL MÁS APROPIADO?

La selección del método más apropiado de estos tres, está determinado por la temperatura del sustrato, la tasa de deposición (velocidad), la uniformidad de la capa de material (film), la morfología, las propiedades eléctricas y mecánicas de las capas de material dieléctrico.

Deposición mediante giro

La deposición mediante giro (*spin-on*), es el proceso utilizado para cubrir la oblea con algún material que originalmente se encuentra en estado líquido, el líquido se distribuye en la superficie de la oblea en una cantidad determinada y posteriormente la oblea se sujeta a una rápida rotación (mayor a 6000 rpm) durante la cual, el líquido se distribuye uniformemente en la superficie mediante fuerzas centrífugas. A continuación se somete a temperaturas menores a 100ºC para la solidificación de la cubierta.

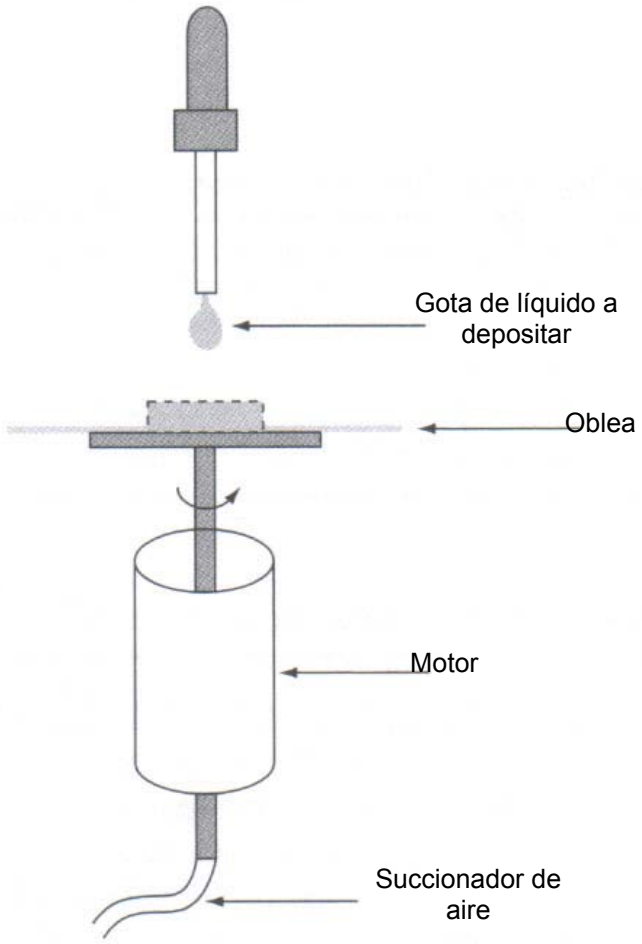


Fig. AI.13 Esquema básico de un dispositivo para la deposición de fotoresist mediante giro, sobre una oblea de Silicio.

Este proceso se utiliza mucho como paso anterior al trazado de patrones, al momento de necesitar obleas cubiertas de resist, para imprimirles un patrón mediante una máscara.

Entonces, una gota de líquido, generalmente resist, es depositado sobre la oblea que se encuentra "atada" a su contenedor, mediante agujeros conectados a una bomba al alto vacío, el contenedor está a su vez, unido a un motor que hará girar la oblea.

El grosor del material x se relaciona con la viscosidad η del líquido y el contenido sólido f de a solución, así como de su velocidad de giro ω:

$$x \quad \alpha \quad \frac{\eta f}{\sqrt{\omega}}$$

Las velocidades típicas de giro, se encuentran entre los 1000 – y los 10000 rpm. Para un grosor en el rango de 0.5 – 1 μm. Después de haber distribuido la solución sobre la oblea, se hornea a temperaturas en el rango de los 90 a los 450ºC, dependiendo del tipo de resist.

MATERIALES DEPOSITADOS MEDIANTE GIRO:

Tabla AI.3 Principales materiales depositados mediante giro

Material	Grosor [μm]	Temperatura de deposición [ºC]	Solvente
Fotoresist	0.1 – 10	90 – 150	Base débil
Poliamida	0.3 – 100	350 – 450	Base débil
Dióxido de silicio	0.1 – 0.5	500 – 900	HF
Titanato	0.1 – 0.3	650	HNO_3

Características de la deposición mediante giro:

- Este método desperdicia mucho líquido, ya que tan sólo un 1% de la solución distribuida permanece en la superficie.
- Se utiliza comúnmente para aplicar fotorresisit.
- También utilizado en la deposición de otros materiales disponibles en su forma líquida.

2. Segundo paso, trazado de patrones

El trazado de patrones, en inglés *patterning* ó *pattern transfer*, es el proceso posterior a la deposición de el (los) material(es) que se desea(n) forme(n) la microestructura. Es el proceso de imprimir patrones geométricos de una máscara hacia una capa fina de material, llamado resist, el cual es un material fotosensible a la radiación. El patrón deseado se obtendrá mediante una máscara (que puede utilizarse varias veces) y radiación sobre ella, que dejará impreso el patrón en el resist. Se realiza mediante técnicas litográficas, la más conocida y utilizada es LIGA (*Lithographie, Galvanoformung and Abformung*).

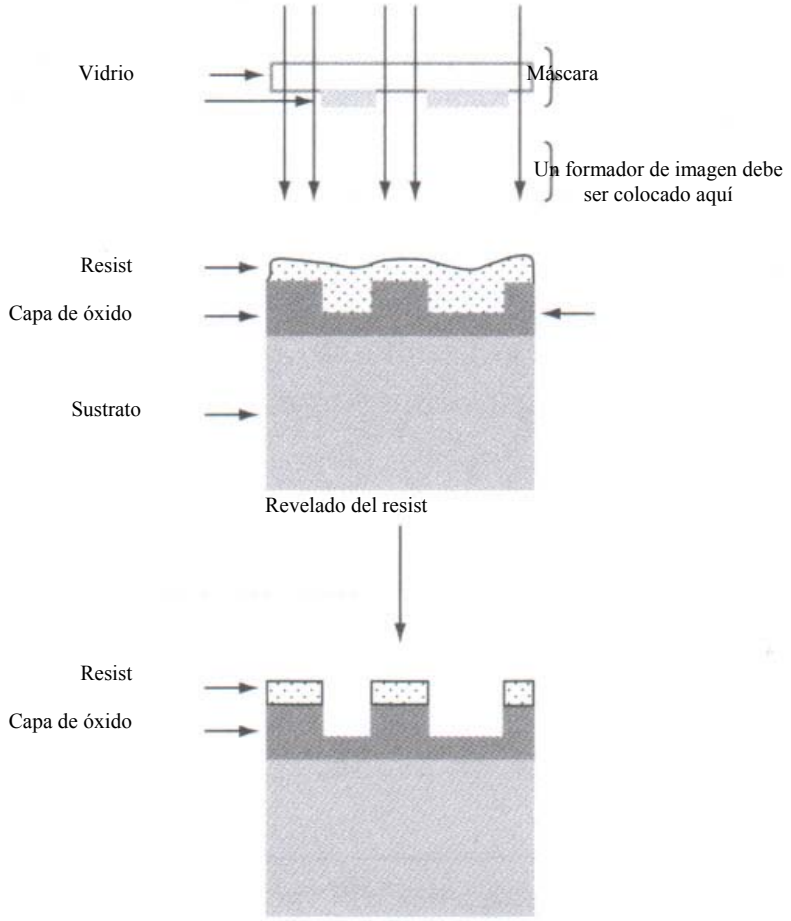


Fig. AI.14 Esquema del proceso litográfico.

PROCEDIMIENTO DEL TRAZADO DE PATRONES:

- Primero, el resist es depositado sobre la oblea, ya sea mediante giro (spin-on), o rociándolo a manera de spray, y luego la máscara se coloca sobre la oblea.
- Segundo, sobre la máscara se aplica la radiación seleccionada, por lo que quedan áreas sin exposición (protegidas por la máscara).
- La radiación se utiliza para cambiar la solubilidad del resist en un solvente conocido (grabado).

MÉTODOS MÁS UTILIZADOS PARA EL TRAZADO DE PATRONES

El tipo de litografía utilizada, se clasifica dependiendo de la longitud de onda de la radiación a la que es expuesto el resist:

- Fotolitografía ó Litografía Óptica.
- Litografía mediante flujo de electrones (*EBL, electron beam litography*).
- Litografía mediante exposición de rayos X
- Litografía por ambos lados

HERRAMIENTAS DE EXPOSICIÓN (LITOGRAFÍA).

Las herramientas de exposición litográficas, son las encargadas de emitir la radiación. El desempeño de las herramientas está determinado por tres propiedades:

- Resolución: se define como el tamaño mínimo que se puede transferir (con alta fidelidad) a la capa de resist.
- Alineación (*registration*): es la medida de la precisión con la que los patrones se colocan respecto a patrones previos.
- Rendimiento neto (*throughput*): es el número de obleas que pueden ser expuestas por hora para un nivel de máscara dada.

Dependiendo de la resolución, muchos tipos de radiación, incluyendo la electromagnética (ej. UV, rayos X) y por partículas (electrones, iones) pueden ser utilizadas en litografía.

Tabla AI.4 Tipos de litografía y propiedades de la herramienta de exposición

	Resolución alcanzada	**Alineación de patrones sucesivos**	**Rendimiento neto**
Litografía óptica (radiación UV, λ~0.2-0.4 mm)	1 mm	0.5 mm	50 – 100 obleas por hora
Litografía mediante flujo de electrones (electron-beam)	0.5 mm	0.2 mm	Utiliza máscaras complicadas
Litografía mediante rayos X	0.5 mm	0.2 mm	Utiliza máscaras complicadas

I. Litografía Óptica

La inmensa mayoría del equipo litográfico utilizado para la fabricación de IC's (Integrated Circuits), es óptico. La litografía óptica utiliza dos métodos para imprimir los patrones deseados sobre el fotoresist.

Existen 2 tipos de litografía óptica:

- Impresión de sombra
- Impresión de proyección

LITOGRAFÍA ÓPTICA POR IMPRESIÓN DE SOMBRA

En la impresión de sombra, la máscara y la oblea se encuentran en contacto directo durante la exposición óptica (*contact printing*), ó se separan mediante un espacio muy pequeño (10-50 μm).

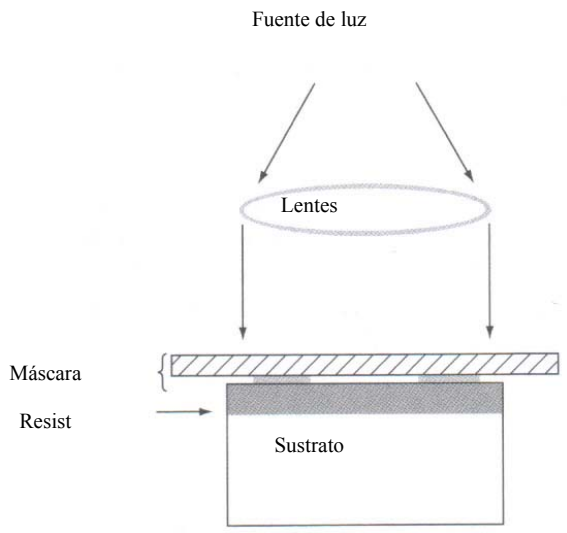


Fig. AI.15 Esquema del proceso de litografía por impresión de sombra.

VENTAJA: El contacto directo entre oblea y máscara, ofrece la posibilidad de una resolución muy alta, usualmente mejor que 1 μm.

DESVENTAJA: El contacto directo provoca daños en la máscara.

LITOGRAFÍA ÓPTICA POR IMPRESIÓN POR PROYECCIÓN

La impresión por proyección, es un método alternativo de exposición de rayos UV (litografía óptica). En el cual, el daño a la máscara, es mínimo. La impresión por proyección se utiliza para proyectar las imágenes marcadas en las máscaras patrón, sobre una oblea cubierta de resist, a varios centímetros lejos de la máscara. La resolución típica es del orden de 1 μm.

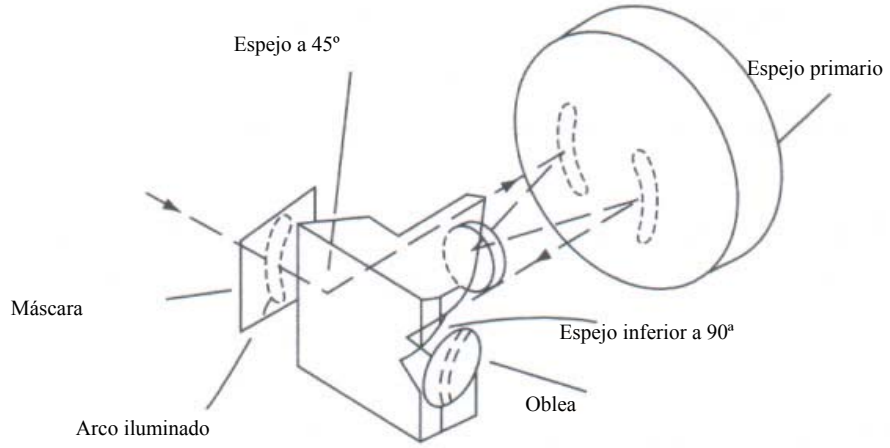


Fig. AI.16 Arreglo para protección de máscara

FORMACIÓN DE LAS MÁSCARAS UTILIZADAS

Para dispositivos IC's de pequeña a mediana escala (arriba de 1000 componentes por chip), primero, el diseño de la máscara es dibujado, el tamaño original del diseño es de unos cientos a unos miles de veces, lo que será su tamaño final. Posteriormente, es dividido en niveles de máscara, que corresponden al proceso IC, como p.ej. una región de aislamiento en un nivel, una de metalización en otro, etc.

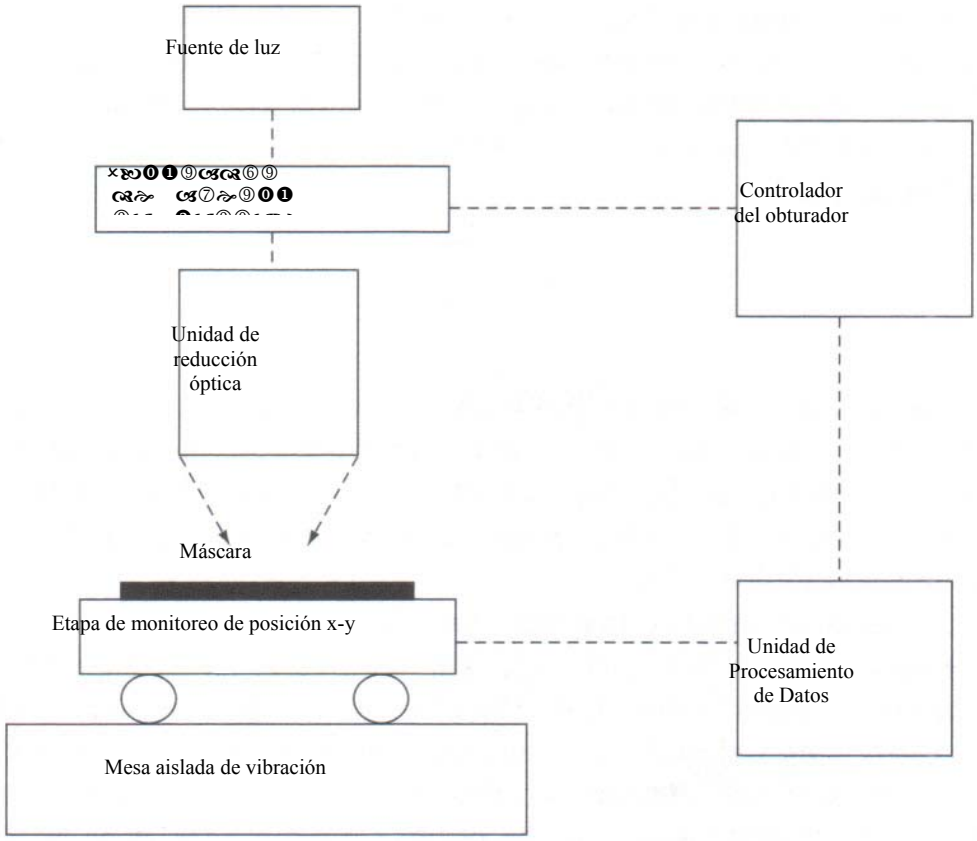


Fig. AI.17 Formación de máscaras

Se reduce el diseño por capas 10x veces a una retícula de vidrio, mediante una cámara de reducción. La máscara final se hace utilizando un sistema de proyección.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE MÁSCARAS

El arreglo esquemático de una máquina que fabrica máscaras se muestra en la figura AI.17. Consiste de una fuente de luz UV, una mesa donde se encuentra una etapa motorizada x-y, y accesorios ópticos. La máquina es controlada por computadora. La información que contiene las figuras correspondientes a una máscara en particular, entra mediante software editor. Luego el diseño es dividido en regiones rectangulares de dimensiones fijas. Esta información es guardada en un dispositivo de memoria, que se lleva a la máquina.

La máscara es fabricada con una placa de vidrio cubierta por un material bloqueador de la luz (p.ej.cromo), a su vez cubierto por fotoresist.

La información del dispositivo de memoria es leída por el equipo y de acuerdo con ella, se especifican las dimensiones y el tiempo de exposición. La elección del material utilizado, así como el tipo de radiación depende de la resolución deseada. Para figuras de 5 μm o mayores, las máscaras se hacen de vidrio cubierto de un material suave, como una emulsión. Para dimensiones menores, las máscaras se fabrican de vidrio de baja expansión, cubierto de un material de superficie dura, como cromo o dióxido de hierro.
Resist.

El método usado para la formación de la capa de resist es llamado "vaciado mediante giro" (*spin-on deposition*), que se ha mencionado con anterioridad.

El material resist puede ser de dos tipos: positivo ó negativo, dependiendo de cómo responda a la radiación.

Así, después de la etapa de radiación, el resist positivo es fácilmente removido en el proceso de revelado (disolución del resist en un solvente apropiado, a veces llamado revelador). El efecto total, es que, los patrones formados en el resist positivo, son los mismos que los de la máscara. El resist negativo, es menos soluble, al exponerse a la radiación. Los patrones formados por el resist son los inversos que los marcados por las máscaras.

RESIST POSITIVO Y NEGATIVO

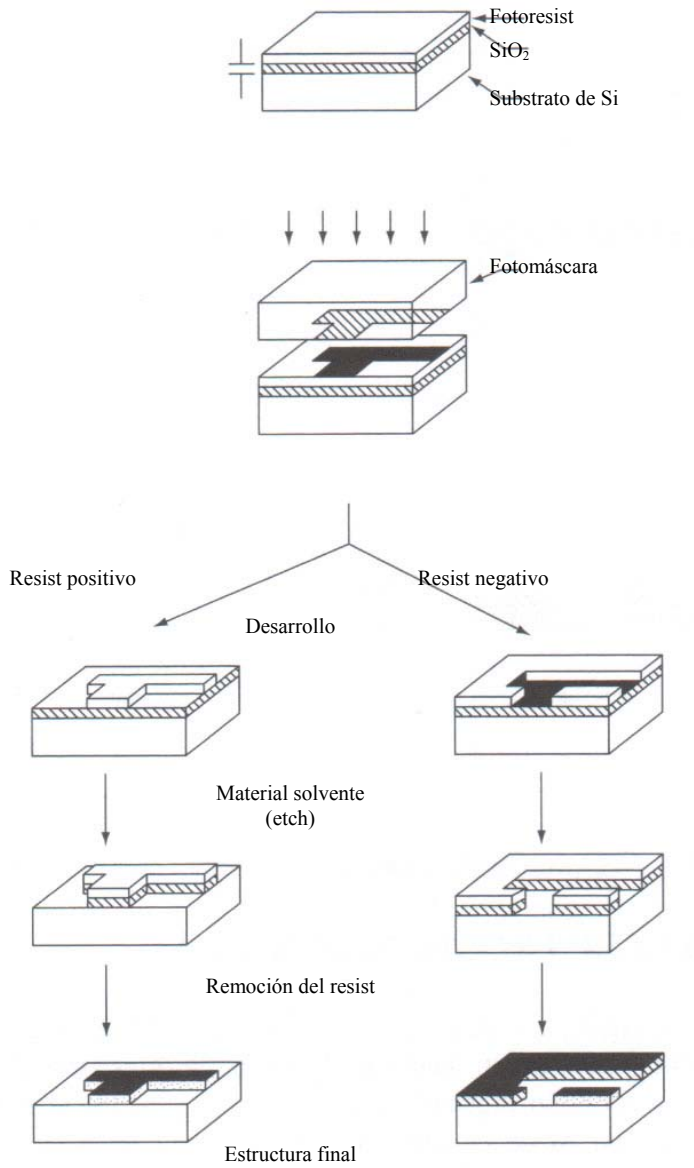


Fig. AI.18 Comparación de estructuras realizadas mediante resist positivo y negativo

Dentro de los materiales depositados mediante giro, se consideran varios tipos de resist (ó fotoresist) con su tipo de litografía (como se ve más adelante) y el tipo de resist.

Tabla AI.5 Diferentes tipos de resist (positivos y negativos)

Tipo de resist	**Litografía**	**Tipo**
Kodak 747	Óptica	Negativa
AZ – 1350J	Óptica	Positiva
PR102	Óptica	Positiva
Poli (metil metacrilato) PMMA	Bombardeo de electrones (E-beam) y Rayos X	Positiva
Poli [(glicidil metacrilato) –co – etilacrilato] COP	Bombardeo de electrones (E-beam) y Rayos X	Negativa
Dicloropropil acrilato y glicidil metacrilato – co – etil acrilato (DCOPA)	Rayos X	Negativa

Técnica de despegue "*lift-off*"

La técnica de trazado de patrones conocida como de despegue, utiliza resist positivo, para formar un patrón de resist en el sustrato, los pasos, se describen en la figura.

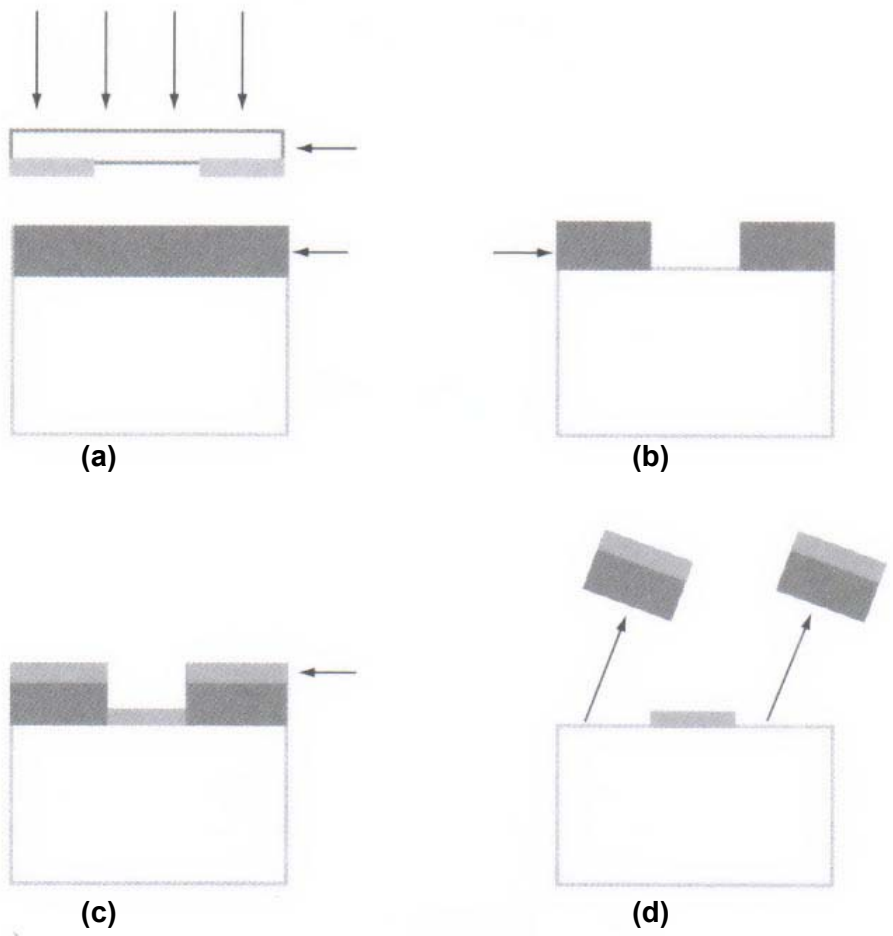


Fig. A1.19 Pasos utilizados en la técnica de "despegue"

El resist se expone a radiación a través de una máscara (a), y se revelan las áreas expuestas del resist (b). Después, se deposita un film sobre el resist y el sustrato, cuyo grosor debe ser menor al del resist, (c) y, utilizando un solvente apropiado, las partes que contienen resist son "despegadas", (d), esta técnica tiene una alta resolución.

3. Tercer Paso: Grabado

El grabado (etching) es el proceso de remoción o extracción selectiva del material del sustrato. Los métodos básicos para el grabado de sustratos o de descomposición del material no deseado se dividen en:

- Grabado húmedo, el material se disuelve mediante líquidos.
- Grabado en seco, el material se convierte en un compuesto gaseoso.

Los cuales juegan un papel muy importante en el grabado, ya que son de costo muy bajo y se pueden llevar a cabo cerca de 20 a 25 extracciones de manera simultánea, ya sea de forma isotrópica o anisotrópica.

Por el tipo de grabado que se obtiene se dividen en:

- Grabado isotrópico, en el material removido es uniforme en todas direcciones.
- Grabado anisotrópico, con una dirección preferente sobre las demás, especiales para realizar cavidades y surcos bien delimitados y definidos, las cuales no pueden ser perpendiculares a la oblea de silicio.

Por el método empleado, se divide en:

- Grabado químico, que se obtiene mediante la descomposición química del sustrato (grabado mediante plasma).
- Grabado físico (grabado mediante bombardeo de electrones).

I. Grabado químico húmedo.

Es utilizado para obtener, superficies completamente planas y libres de daños y remover contaminación que resulta del manejo de la oblea. También se utiliza en la fabricación de estructuras tridimensionales. Es un proceso químico en el cual el material es removido por una reacción química entre los solventes (etchants) y el material que será disuelto (etched material).

PRINCIPALES PASOS DEL GRABADO QUÍMICO HÚMEDO:

- Los reactantes son transportados mediante difusión hacia la superficie que será disuelta.
- Las reacciones químicas toman lugar sobre la superficie.
- Los productos de las reacciones son trasportados fuera de la superficie nuevamente mediante difusión.

PARÁMETROS DEL GRABADO QUÍMICO HÚMEDO.

- Velocidad de grabado.
- Selectividad del material disuelto.
- Uniformidad del grabado.

II. Grabado Seco

Una descarga es utilizada para generar especies químicas reactivas (átomos, radicales e iones) a partir de un gas molecularmente inerte. El gas se selecciona de manera que produzca especies que reaccionen químicamente con el material que será eliminado.

APÉNDICE II

GLOSARIO DE TÉRMINOS

λ Longitud de onda

Actuador térmico. Un tipo de actuador que obtiene su movilidad de efectos electro-térmicos.

ADC. *Analog-to-Digital Converter*. Convertidor analógico a digital. Un dispositivo electrónico, usualmente un circuito integrado, que convierte un voltaje analógico a un número digital.

BiDi. Módulo bidireccional.

BioMEMS. MEMS con aplicaciones en los segmentos biológicos y/o químicos.

CMOS *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*. Un tipo de proceso para la fabricación de ICs.

Comb Drive. Es un dispositivo MEMS (actuador electrostático) que consiste de elementos interdigitados (llamados dientes o dedos) similar a un peine. Sus principales aplicaciones son de resonadores, o como actuador para el desplazamiento lateral.

CVD Chemical Vapor Deposition. Deposición química de vapor. Ver Anexo I.

Dispersión óptica. Causa de la limitación en banda en un enlace de fibra óptica. La dispersión causa el ensanchamiento de pulsos de luz conforme viajan a través de la fibra. Los tres tipos principales de la dispersión son la modal, la cromática y la de guía de onda.

Dopado. Proceso mediante el cual se introducen impurezas (átomos) en un semiconductor para modificar sus propiedades eléctricas.

DRIE, *Deep Reactive Ion Etching*. Una tecnología de fabricación.

EDP *Ethylene Diamine Pyrocatechol*. Una sustancia solvente del Silicio como el KOH ó el TMAH, pero altamente tóxico.

EM Electro-Magnético

Enlace activo-activo. En aplicación de sistemas sensoriales remotos o de comunicaciones, algunos enlaces operan con fuentes activas de luz en ambos extremos del enlace de comunicación para permitir la transmisión de la información de un punto a otro en el enlace. A este tipo de enlaces se les conoce como "activo-activo".

Enlace activo-pasivo. Son enlaces en los cuales la terminal central provee de potencia óptica a través de una fuente activa a una ó varias terminales.

Epitaxial ó epi. Se le llama así a la capa cristal semiconductor que se deposita sobre otra capa de cristal. También se le conoce así al método de deposición de este tipo de capas.

FEM *Finite Element Method*. Método de elementos finitos, es el que utilizan muchos softwares especializados para la elaboración de MEMS, como Coventor.

Fibra Monomodo. Fibra óptica en la cual la señal trabaja en un solo modo. Típicamente tiene un núcleo de diámetro de 8-10 μm y una cubierta de 125 μm.

FO. Fibra óptica

Fotodiodo Dispositivo que recibe potencia óptica y la convierte a potencia eléctrica.

Fotolitografía Ver Apéndice I.

Fotónica de silicio. El silicio tiene una variedad de atributos que lo convierten en un material deseable para fabricar componentes ópticos pequeños y de bajo costo. Es un material relativamente barato, abundante y bien comprendido para la producción de dispositivos electrónicos. Además, debido al uso prolongado del silicio en la industria de semiconductores, normalmente ya se cuenta hoy con las herramientas de fabricación con las que se puede procesar en componentes pequeños.

Fotónica. La fotónica es el campo de estudio que se encarga de la luz, en especial el desarrollo de componentes para las comunicaciones ópticas. Éste es el aspecto de hardware de las fibras ópticas y, gracias a la demanda comercial de ancho de banda, ha recibido una expansión y un desarrollo considerables en la última década.

HPLD. High-Power Laser Diode

ICs. Circuitos Integrados

Índice de refracción. Es el radio de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de a luz en un material específico. Utilizando el 1.0 como referencia base, entre mayor sea el valor, menor será la velocidad de la luz que viaja en el material.

Interfaz completa vía fibra óptica. Adicionalmente una interfaz *completa* vía fibra óptica incluye la alimentación, lo que significa que está directamente relacionada con sistemas alimentados ópticamente.

Interfaz vía fibra óptica. Se refiere, al medio de transmisión de datos en un sistema, en este caso, la fibra óptica, pueden existir interfaces unidireccionales y bidireccionales, el tipo de información que puede transmitir la interfaz es de dos clases: datos y señales de control.

Lab-on-chip. Laboratorio en chip. Tecnología MEMS aplicada a la instrumentación analítica, ofreciendo análisis químico inmediato o cuasi-inmediato, y gran portabilidad.

LD. Laser Diode

LED. Light Emitter Diode

LIGA Un tipo de micromaquinado de alto aspecto de radio, es el acrónimo alemán de *Lithographie, Galvanofomung, Abformung*, que significa Litografía, Electroformación, y Modelación.

MEMS Ópticos. *Micro electro-mechanical systems,* que incorporan elementos ópticos.

MEMS. *Micro-electro-mechanical systems*. Una tecnología enfocada a la construcción de microestructuras mecánicas sobre obleas de Si utilizando las técnicas de procesamiento de los ICs.

Microfluídicos. Estudio del movimiento de los fluidos a microescala.

Micromaquinado de superficie. Proceso de fabricación en el cual se obtienen dispositivos en la superficie de la oblea.

Micromaquinado de volumen. *Bulk Technology*. Tecnología basada en la manipulación de átomos y moléculas en bloques o grandes volúmenes, en vez de individualmente.

Micrón. Unidad de medida de longitud equivalente a 1/1,000,000 de un milímetro.

MMF. MultiMode Fiber

MOEMS *Micro-optical-electro mechanical system*s. Sistemas micro-opto-electro-mecánicos, también conocidos como MEMS ópticos.

MOS *Metal Oxide Semiconductor.*

MOSFET *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.*

MST *Microsystems Technology*. Un término más general refiriéndose a los MEMS. Término comúnmente utilizado en Europa.

MST. Micro Systems Technology (Europa)

Nanometer (nm) Unidad de medida de longitud equivalente a una billonésima parte de un metro.

Nanotecnología. La Nanotecnología es una tecnología relativamente reciente para la creación de estructuras MEMS con dimensiones en el rango de los nanometros, lo que significa que produce estucturas menores en tres órdenes de magnitude, ó mil veces más pequeños que los MEMS fabricados en la actualidad. Produce dispositivos en el rango de 1 nm a 1 μm.

NEMS *Nano-electro-mechanical systems*. MEMS a nanoescala.

Nitruro de Silicio *Nitride.* Combinación del silán y el nitrógeno en un proceso CVD para formar una capa delgada de material aislante.

NMOS *N-Channel Metal Oxide Semiconductor*. Tecnología de transistor donde las cargas primarias son electrones cargados negativamente.

O/E, E/O. Opto-eléctrico, Electro-óptico. Generalmente se refiere a la conversión entre estos tipos de energías.

OFS. Optical Fiber Sensors

Pasivación. Usualmente es una capa de dioxide de silicio o de nitruro de silicio, que se deposita al finalizar el proceso de microfabricación para sellar el circuito y protegerlo de la humedad y/o contaminación. Se traza un patrón en la capa de pasivación y se realize el grabado para abrir los contactos eléctricos.

PAT *Packaging, Assembly and Testing*. Etapa de empaquetamiento, ensamblaje y prueba de MEMS o de ICs

Pegado. Proceso mediante el cual un tipo de sustrato es unido a otro tipo de sustrato.

Piezoactuador Un tipo típico de actuador que produce una fuerza o un desplazamiento en respuesta a una señal eléctrica.

PoF. Power over fiber.

Polisilicio Silicio polocristalino. Utilizado como material estructural para dispositivos MEMS.

PV cells. Celdas fotovoltáicas

PVD *Plasma Vapor Deposition*. Ver Apéndice I.

Radio de aspecto (*aspect ratio*). El lateral, es la división (o radio) de la longitud de la estructura en un plano de la oblea y su anchura en ese plano. El vertical, es el radio entre la altura de la estructura (perpendicular a la superficie de la oblea) y su profundidad en el plano de la oblea.

Redes sensoriales. Consiste en varias URs enlazadas a una (o más) UC.

Revelado. Tercer paso en el proceso litofotográfico, durante el cual, se aplican químicos sobre obleas cubiertas por máscaras, para remover áreas expuestas de fotoresist, dejando en la oblea el patrón del fotoresist. Es análogo al grabado utilizado en el micromaquinado de superficie o de volumen.

RIE *Reactive Ion Etch*

SAS *Sensors, Actuators, and Subsystems*

sc-Si. Single Cristaline Silicon

Sensor Dispositivo que responde a estímulo físico (calor, luz, sonido, presión, movimiento, flujo, etc.), y produce una respuesta medible correspondiente a una señal eléctrica.

Si. Silicio

Sistema alimentado ópticamente. Los sistemas "alimentados ópticamente", tienen la característica de que la potencia que se provee a un módulo lejano es mediante una fuente óptica (HPLD, LD, ó LED) y puede utilizar diferentes medios de transmisión de esa potencia, por ejemplo: una fibra óptica, el aire, el vacío (p.ej. en estaciones espaciales) ó hasta la piel (p.ej. en aplicaciones médicas).También son conocidos como *Optically powered systems*, ó por sus siglas en inglés PoF, *Power over Fiber*.

SMA *Shaped Memory Alloy*

SMF. SingleMode Fiber

SOI *Silicon-on-Insulator*

Terminales. Módulos extremos de los enlaces de comunicación. En este estudio se consideran dos terminales, la UC y la UR.

UC. Unidad de control o unidad central.

Unidad de control o unidad central (UC). También se encuentra como *Optical Line Termination* (OLT) en textos y artículos técnicos en inglés. Nosotros adoptamos el término de unidad de control, por que principalmente se encarga de funciones de control de la unidad remota (UR). En nuestro caso también es la encargada de alimentar con potencia óptica a la UR.

Unidad remota (UR). Es la terminal que se encarga de recopilar datos del medio externo en el que se encuentra y manda datos a la unidad de control (UC).

Unión. Es el área donde se unen los materiales tipo N y P en un semiconductor

UR. Unidad remota.

VSM *Very Small Machines*

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ***"MEMS and MOEMS technology and applications"*** / P. Rai-Choudhury, editor – Bellingham, Washington: SPIE Optical Engineering, 2000. 520 p. ISBN 0819437166.

[2] ***"The MEMS handbook"*** / edited by Mohamed Gal-el-Hak – Boca Raton, Florida: CRC, 2002. ISBN 0849300770.

[3] ***"Intel extiende la ley de Moore a nuevas tecnologías y aplicaciones"***, http://developer.intel.com , 2002.

[4] ***"Supera México a China en minisistemas"***, http://mural.com, 2003.

[5] A.J. Higgins & I.K. Hook, ***"Optically Powered Isolated Sensors"***, Electronic Technology Directions to the Year 2000, May 1995, pp. 301-305.

[6] Y. Trisno et.al., ***"Optically Powered Sensor Signal Telemetry System"***, Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC-89, Conf. Record, 6th IEEE, April 1989, pp.425-431.

[7] Y. Liu et.al., ***"Optically Powered Optical Interconnection System"***, Photonic Technology Letters, IEEE, vol. 1, no.1, Jan. 1989, pp. 21-23.

[8] C.R. Giles, A. Dentai, C.A. Burrus, L. Kohutich & J. Cetanni, ***"Microwatt-Power InGaAs Photogenerator for Lightwave Networks"***, IEEE Photon. Tech. Lett., vol.9, no.5, pp. 666-668, 1997

[9] T. Dellin. ***"Overview of Micro-Technologies and Micro-Systems"***. Sandia National Laboratories. MESA Learning Microsystems Series. SAND Report 2003-1526. Ver. 1, May 30, 2003.

[10] N. Maluf. ***"An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering"***. Artech House Inc., 2000. Norwood, MA. 265 p. Artech House MEMS Library.

[11] Julian W. Gardner. ***"Microsensors, MEMS, and Smart Devices"***. John Wiley & Sons. Ltd. West Sussex, England, 2001.

[12] ***"Material Properties. Synthetic Fused Silica"***. http://www.mellesgriot.com

[13] ***"Training Guide".*** CoventorWare Version 2003

[14] C. Maxer, M. A. Grétillat, N. F. de Rooj, R. Bättig, O. Anthamatten, B.Valk, & P. Vogel. ***"Reflexive Duplexer Based on Silicon Micromechanics for Fiber- Optic Communication"***. Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, No. 1, January 1999.

[15] T. Tamura, T. Togawa & P. A. Öberg. ***"Fiber Optic Power-Feed System"***. Institute for Medical and Dental Engineering. Tokyo Medical and Dental University. 91CH2817-5/91/0000-0828. 1991, IEEE.

[16] Y. Sai. ***"Optimization of Optically Powered Sensors"***. Toshiba Co. IECON'91. CH2976-9/91/0000-2439. 1991, IEEE.

[17] A. K. M. Shamsuddin, T. Tamura, K. Nakajima & T. Togawa. ***"Preliminary Study of Transcutaneous Optical Coupling for Implantable Devices using GaAs Solar Cell"***. Institute for Medical and Dental Engineering. Tokyo Medical and Dental University. Proceedings RC IEEE – EMBS & 14th BMESI – 1995.

[18] S. Weiss, J. Werthen & A. Andersson. ***"Optically Powered Sensor Technology".*** Photonic Power Systems Inc. ISA'97 paper. May 4-8, 1997 in Orlando Florida.

[19] R. Peña, I. R. Matías, C. Algora & M. López-Amo. ***"Optical Fiber-based Power Delivery System for Optoelectronic Sensor Modules"***. 0-7803-4947-4/98. 1998, IEEE.

[20] T. Yasui, J. Ohwaki, M. Mino & T. Sakai. ***"A Stable 2-W Supply Optical- Powering System".*** NTT Photonics Laboratories. 0-7803-5772-8/00. 2000, IEEE.

[21] H. Miyakawa, E. Herawaty, M. Yoshimoto, Y. Tanaka & T. Kurowa. ***"Power-over-optical Area Network Systems"***. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. May 11-18, 2003 Osaka, Japan.

[22] H. Miyakawa, Y. Tanaka & T. Kurokawa. ***"Photovoltaic Cell Characteristics for High Intensity Laser Light"***. 0-7803-7766-4/03. 2003 IEEE.

[23] M. Suster, W. H. Ko & D. J. Young. ***"An Optically Powered Wireless Telemetry Module for High-Temperature MEMS Sensing and Communication"***. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 13, No. 3, June 2004. 2004 IEEE.

[24] J. A. Walker, K. W. Goossen & S. C. Arney. ***"Fabrication of a Mechanical Antireflection Switch for Fiber-to-the-Home Systems"***. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 5, No. 1, March 1996. 1057-7157/96. 1996 IEEE.

[25] J. A. Walker, J. E. Ford & N. Basavanhally. ***"Performance and Packaging Implications of a MEMS Based Optical Modulator for WDM Fiber-To-The-Home Systems***". 1997 Electronic Components and Technology Conference. 0-7803-3857-X/97. 1997 IEEE.

[26] C. Marxer & N. F. de Rooij. ***"Reflective Modulators and By-Pass- Switches: Two MEMS Components for Fiber Optic Communication"***. 0-7803-4953-9/98. 1998 IEEE.

[27] S. J. Pember, C. M. France & B. E. Jones. ***"Optical Powering of a Multiplexed Network of Hybrid Sensors"***. 1996, The Institution of Electrical Engineers. Printed and published by IEE, Savoy Place, London WC2R OBL, UK.

[28] ***"Sensors"***, http://www.vision.ethz.ch/antifako/sensors.html

[29] ***"Honeywell"***, http://www.honeywell.com/sites/honeywell/
[30] ***"Analog Devices"***, http://www.analog.com/

[31] ***"Freescale Semiconductor. Launched by Motorola"***, http://www.mot-sps.com/index.html

[32] ***"Colibrys. MEMS Products and Solutions"***, http://www.colibrys.ch/e/page/1/

[33] ***"Sennheiser"***, http://www.sennheiser.com/sennheiser/icm.nsf

[34] ***"The Sennheiser MKE 2 P-C"***, http://www.dj-store.com

[35] ***"Shure: Audio, Microphones"***, http://www.shure.com

[36] M. Tabib–Azar, G. Beheim. ***"Modern trends in microstructures and integrated optics for communication, sensing, and actuation"***. Opt. Eng. 36(5) 1307 – 1318 (May 1997). Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.

[37] Wayne Tomasi. ***"Sistemas de comunicaciones electrónicas"***. Edit. Prentice-Hall. 4ta Edición. México, 2003.

[38] T. S. Yu, Jutamulia Suganda, Yin Shi Zhuo. ***"Introduction to Information Optics"***. Academic Press, U.S.A., 2001.

[39] ***"Optical Fiber Sensors: Principles and Components"***. Edited by Brian Culshaw & John Dakin. Volume One. Artech House Inc. 1988, 685 Canton Street, Norwood, MA 02062. Artech House Telecommunication Library. ISBN: 0-89006-317-6 (v.1)

[40] ***"Intel revela importante descubrimiento en fotónica de silicio: Modulación de silicio de alta velocidad"***, http://www.intel.com/espanol/update/contents/si02041.htm. Dr. Mario Paniccia, Victor Krutul y Sean Koehl. Revista Technology@ Intel. Innovaciones y tendencias de la tecnología.

[41] Ilene J. Busch – Vishniac. ***"Electromechanical Sensors and Actuators"***. Ed. Springer.

[42] K. W. Gossen, J. A. Walker and S. C. Arney. ***"Silicon Modulator based on mechanically active anti-reflection layer with 1 Mbit/s capability for fiber-in-the-loop applications".*** IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 6, pp. 1119 – 2, Sept. 1994.

[43] C. Marxer, M. A. Gretillat, V. P. Jaecklin, R. Baetting, O. Anthamatten, P. Vogel & N. F. de Rooij, ***"Megahertz opto-mechanical modulator"***, Sensors and Actuators A, vol.52, pp. 46-50, 1996.

[44] Eric Udd. ***"Fiber Optic Sensors. An Introduction for Engineers & Scientists"***.

[45] ***"Comparison between LEDs and lasers"***, http://www.fiber-optics.info/articles/laser-diode.htm#Table_1

[46] ***"FAQ"***, http://www.photonicpower.com/faq.html

[47] P. Karioja, R. Jurvam, et. al. ***"All – optical fiber optic interface for sensors and actuators".*** Opt. Eng. 39 (4) 1032- 1037 (April 2000).

[48] ***"Transmitting power to sensor circuitry via modulated light"***, http://www.nasatech.com

[49] ***"Transmitting data signals via fiber-optic power lines"***, http://www.nasatech.com

[50] ***"Boston Electronics. Optical Choppers and Shutters"***, http://www.boselec.com/pdf/SI%20300C%20350C%20OEM%20Wiring%20Notes.pdf

[51] R. Peña & C. Algora. ***"The influence of Monolithic Series Connection on the Efiiciency of GaAs Photovoltaic Converters for Monochromatic Illumination"***. IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 48, No. 2, February 2001. 0018-9383/01, 2001 IEEE.

[52] R. Peña & C. Algora. ***"GaAs Photovoltaic Converters For Power-By-Light Systems"***. Instituto de Energía Solar. E.T.S.I. Telecomunicación-UPM, Ciudad Universitaria s/n 28040, Madrid – SPAIN.

[53] Derickson, D. ***"Fiber Optic. Test and Measurement"***. Prentice Hall PTR. Upper Saddle River, New Jersey, 1998.

[54] ***"Fiber Optics Basics and Standards"***, http://www.wg.com

[55] Hoss, R.J. ***"Fiber Optic Communications. Design Handbook"***. Prentice Hall, Inc. U.S.A., 1990.

[56] Allard, F.C. "***Fiber Optics Handbook. For Engineers and Scientists".*** Mc-Graw Hill Publishing Co. Optical and Electro-Optical Engineering Series. U.S.A., 1990.

[57] Senior, J.M. ***"Optical Fiber Communications"***. Second Edition. Prentice Hall. International Series in Optoelectronics. Great Britain, 1992.

[58] Baltazar Rubio Martínez. ***"Introducción a la ingeniería de la fibra óptica"***, 1994

[59] J. Schroeder, R. Mohr, P.B. Macedo & C.J. Montrose. ***"Rayleigh and Brillouin scattering in K2O-SiO2 glasses"***, J. Am. Ceram. Soc., 56, pp. 510-514, 1973.

[60] Vladimir A. Svirid Kuzmenko. ***"Apuntes de la clase de comunicaciones ópticas"***. Semestre 2004 – 1.

[61] ***Hojas de especificaciones*** de fibras ópticas multimodo. 62.5/125 Corning Optical Fiber, Corning 50/125 CPC6 Multimode Optical Fiber. ISO 9001.

[62] ***"Tablas de estándares de Fibras Opticas"***, www.ozoptics.com

[63] ***Hojas de especificaciones de la interfaz comercial, OPM-800***, de Photonic Power Systems Inc.

[64] ***"El Diafragma y el Obturador"***, http://www.difo.uah.es/curso/c05/cap05.html

[65] Peter K. Cheo. ***"Fiber Optic and Optoelectronics"***. 2nd Ed. Prentice Hall. Series in Solid State Physical Electronics.

[66] J. B. Lee, Z. Chen, et. al. ***"A miniaturized High-Voltage Solar Cell Array as an Electrostatic MEMS Power Supply"***. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.4, No.3, September 1995. 1057-7157/95. 1995 IEEE.

[67] K. Akimoto, Y. Uenishi, et. al. ***"Optical Reflective Filter with Comb-drive Nickel Micromirror for Optical Fiber Comunication"***. 1997 Electronic Components and Technology Conference- 0-78-03-3857/97.

[68] Jianhua Zhao, et. al. ***"22.7% Efficient Silicon Photovoltaic Modules with Textured front Surface"***. IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 46, No. 7, July 1999.

[69] A. G. Dentai, C. R. Giles & E. Burrows. ***"A long Wavelength 10V Optical–To–Electrical InGaAs Photogenerator".*** 11th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. 16 -20 May 1999. Davos, Switzerland.

[70] Martin A. Green, et. al. ***"45% Efficient Silicon Photovoltaic Cell Under Monochromatic Light"***. IEEE Electron Device Letters, Vol. 13, No. 6, June 1992.

[71] Martin A. Green, et. al. ***"Very High Efficiency Silicon Solar Cells – Science and Technology"***. IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 46, No. 10, October 1999.

[72] Seri Lee. ***"How to Select a Heat Sink"***. Advanced Thermal Engineering Aavid Thermal Technologies, Inc. Laconia, New Hampshire 03247.

[73] W. C. Tang, T. H. Nguyen & R. T. Howe. ***"Laterally Driven Polysilicon Resonant Microestructures"***. TH249-3/89/0000/0012. 1989 IEEE.

[74] W. H. Juan & S. W. Pang. ***"High-Aspect-Ratio Si Vertical Micromirror Arrays for Optical Switching"***. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 7, No.2, June 1998.

[75] T. Hirano, T. Furujata, et. al. ***"Design, Fabrication & Operation of Submicron Gap Comb-drive Microactuators"***. Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 1 No. 1, March 1992. 1057-7157/92. 1992 IEEE.

[76] Frederick J. Bueche. ***"Física General"***. 3ra Ed. Mc-Graw Hill. Series Schaum. México, 1991.

[77] X. Zhang & W. C. Tang. ***"Viscous Air Damping in Laterally Driven Microresonators".*** 0-7803-1833-1/94. 1994 IEEE.

[78] ***"Quality Factor Function"***, http://fourier.eng.hmc.edu/e84/lectures/ch3/quality.html

[79] W. C. Tang, et. al. ***"Electrostatic Comb-Drive of Lateral Polysilicon Resonators"***. Sensors and Actuators, A21- A23 (1990) 328-331.

[80] Eronini-Umez-Eronini. ***"Dinámica de sistemas y control"***. Thomson Learning. México, 2001.

[81] Hwei P. Hsu. ***"Análisis de Fourier"***. Ed. Prentice Hall. Primera reimpresión, México, 1998.

[82] A. V. Tikhonravov. M. K. Trubetskov, et. al. ***"Effects of Roughness on the Spectral Properties of Thin Films and Multilayers"***. Applied Optics. Vol. 42, No. 25, 1 September 2003.

[83] Hecht Eugene. ***"Óptica"***. Ed. Addison Wesley Iberoamericana. Tercera Edición. España, 2000.

[84] ***"Refractive index and extinction coefficient of materials"***, http://www.rpi.edu/~schubert/Educational resources/Materials - refractive index and extinction coefficient of materials. pdf

[85] K. B. Lee & Y. H. Cho. ***"An Electrostatic Quality Factor Control For Surface-Micromachined Lateral Resonators"***. 7th International Symposium On Micro Machine and Human Science. 0-7803-3596-1/96. 1996 IEEE.

[86] Marc Madou. ***"Fundamentals of Microfabrication. The Science of Miniaturization"***. CRC Press. Second Edition. USA, 2002. ISBN 0-8493-0826-7.

[87] C. L. Bellew, S. Hollar & K. S. Pister. ***"An SOI Process for Fabrication of Solar Cells, Transistors and Electrostatic Actuators"***. Transducers '03. The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston June 8 – 12, 2003. 0-78-03-7731-1/03, 2003 IEEE.

[88] ***"GaAs Wafers Specifications"***, http://www.wafertech.com.uk

[89] M. Kimura, N. Miyakoshi & M. Daibou. ***"A miniature Opto-Electric Transformer"***. CH2957-9/91/0000-0227. 1991 IEEE.

[90] Paul B. Koeneman, Ilene J. Busch-Vishniac, and Kristin L. Wood. ¨***Feasibility of Micro Power Supplies for MEMS***¨.

[91] Hojas de especificaciones del convertidor de potencia fotovoltaica "***PPC-6ME***", Photonic Power Systems Inc.

[92] Hojas de especificaciones del fotodiodo de silicio 18K, "***S2383 Series***", Hamamatsu Solid State Division.

[93] Joseph E. Ford & James A. Walker. ***"Dynamic Spectral Power Equalization Using Micro-Opto-Mechanics"***. IEEE Photonics Technology Letters, Vol.10, No.10, October 1998.

[94] Ph.D. Thesis, Ilya V. Avdeev. ***"New formulation for finite element modeling electrostatically driven microelectromechanical systems"***. University of Pittsburg. School of Engineering. It was defended and approved on November 20, 2003.