



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
A R A G O N

FABRICACION Y CARACTERIZACION DE
ACOPLADORES DE FIBRA OPTICA UNIMODO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

JOSE ALFREDO ALVAREZ CHAVEZ

ASESORES:

DR. FERNANDO MARTINEZ PIRON

M.C. SEBASTIAN HECTOR SANCHEZ GUERRERO

M.J. ELEAZAR MARGARITO PINEDA DIAZ



SAN JUAN DE ARAGON, EDO. DE MEXICO

1994

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

Ha sido para mí un gran honor y privilegio el poder contar con la invaluable amistad, la asesoría y los consejos del Dr. Fernando Martínez Piñon; a quien le agradezco infinitamente y con quien siempre me sentiré en deuda.

Por sus conocimientos, su tiempo y sus valiosas observaciones, les agradezco profundamente al M.C. Sebastián Sánchez Guerrero y al M.C. Eduardo Rioja Fernández.

Agradezco al profesor M.I. Margarito Pineda por su asesoría, paciencia y dedicación a este trabajo.

Quiero expresar mi agradecimiento por la amistad y la valiosa ayuda que me brindaron todos mis compañeros del laboratorio de Comunicaciones del IIE; en particular al M.C. Cuauhtemoc González, al M.C. Julio Montero y a los señores Juan Flores e Isaac Salgado.

Estoy profundamente agradecido con el Instituto de Investigaciones Eléctricas por el apoyo y las facilidades que me otorgó para la realización de este trabajo.

Dedico este trabajo a:

Mis padres Tomasa Chávez y Miguel Alvarez por inspirar con su ejemplo el concepto del trabajo, la honestidad y el respeto por todo lo que nos rodea y por haberme otorgado la oportunidad de mirar la luz.

Mis hermanos Martha, Javier, Miguel, María, José Luis y Jesús por ofrecerme su cariño, comprensión y apoyo en los momentos en que más lo he necesitado.

Mi abuela Demetria en donde quiera que se encuentre, que de todas maneras siempre estará en nuestro corazón.

Mis sobrinos Nancy, Cesar, Sandra, Adrian, Alberto, Miguel y Michelle por la alegría de su sonrisa y la esperanza en su futuro.

Mis amigos Ruben y Jorge por todo lo que hemos vivido juntos, los buenos y los malos momentos.

A mi compañera, a quien debo la motivación, el cariño y el amor a la vida; quien me impulsa instensamente a superarme y a corregir mis errores. A quien me entrega todo su amor y confianza, a mi esposa Patricia.

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivo	5
1.3 Desarrollo	5
Bibliografía	8
 Capítulo 2. Conceptos básicos y aplicaciones de acopladores de fibra óptica unimodo	 9
2.1 Introducción	9
2.2 Conceptos básicos	9
2.2.1 Fibra óptica	9
2.3 Propagación	11
2.3.1 Propagación en fibras ópticas	11
2.3.2 Frecuencia normalizada	14
2.3.3 Radio de campo modal	16
2.3.4 Atenuación	17
2.3.4.1 Atenuación	18
2.3.4.2 Absorción intrínseca y extrínseca	19
2.3.4.3 Esparcimiento Rayleigh	20
2.3.5 Dispersión	21
2.3.5.1 Dispersión por guía de onda	22
2.3.5.2 Dispersión por material	22
2.3.5.3 Dispersión modal	23
2.3.5.4 Dispersión total	23
2.4 Tipos de perfiles de índice de refracción	24
2.4.1 Índice escalonado	24
2.4.1.1 Fibra multimodo de índice escalonado	25
2.4.1.2 Fibra unimodo de índice escalonado	25

2.4.2	Indice gradual	26
2.5	Sistemas de comunicación óptica	29
2.5.1	Fuentes	30
2.5.1.1	Diodos emisores de luz	31
2.5.1.2	Lasers	32
2.5.2	Fotodetectores	32
2.5.3	Evolución de los sistemas de telecomunicación por fibra óptica	34
2.5.3.1	Generaciones	34
2.5.3.2	Amplificación óptica	37
2.6	Acopladores de fibra óptica	39
2.6.1	Acopladores por aproximación mecánica	40
2.6.1.1	Modelo.....	41
2.6.1.2	Fabricación	44
2.6.2	Acopladores por fusión	45
2.6.2.1	Modelo	46
2.6.2.2	Cantidad de acoplamiento	50
2.6.2.3	Fabricación	57
2.6.3	Otros tipos de acopladores	57
2.6.4	Aplicaciones de acopladores	59
	Bibliografía	63
Capítulo 3.	Fabricación de acopladores	66
3.1	Introducción	66
3.2	Métodos de fabricación de acopladores	67
3.3	Sistema de fabricación empleado	71
3.3.1	Equipo utilizado	71
3.3.1.1	Materiales	72
3.3.1.2	Dispositivo de estirado	73
3.3.1.3	Bases y componentes ópticos	74
3.3.1.4	Diodo laser	76
3.3.1.5	Controlador de diodos laser	77

3.3.1.6	Analizador de forma de onda	77
3.3.2	Sistema de fusión	79
3.3.2.1	Gases	79
3.3.2.2	Diagrama de conexión de gases	81
3.3.2.3	Quemador	82
3.3.2.4	Boquilla	82
3.4	Proceso de fabricación	84
3.4.1	Descripción del proceso de fabricación	85
3.4.1.1	Parámetros de control	85
3.4.1.2	Preparación de las fibras	86
3.4.1.3	Trenzado	87
3.4.1.4	Sujeción	87
3.4.1.5	Control de la flama	87
3.4.1.6	Fusión y estirado	89
3.4.2	Problemas presentados y alternativas	91
3.5	Procedimiento de encapsulado	92
3.5.1	Encapsulado prototipo	93
3.5.2	Mejoras al encapsulado prototipo	95
3.5.3	Encapsulado comercial	96
	Bibliografía	99
Capítulo 4.	Caracterización de acopladores	100
4.1	Introducción	100
4.2	Parámetros ópticos básicos	100
4.2.1	Atenuación en exceso	103
4.2.2	Tasa de acoplamiento	103
4.2.3	Atenuación por inserción	103
4.2.4	Directividad	104
4.3	Método Cut-Back	105
4.3.1	Descripción general del método Cut-Back	105
4.3.2	Equipo de caracterización espectral	107

4.3.2.1	Monocromador	107
4.3.2.2	Rejilla de difracción	109
4.3.2.3	Detector de germanio	110
4.3.2.4	Fuente de luz blanca	111
4.3.2.5	Fuente de corriente estabilizada	112
4.3.2.6	Modulador	113
4.3.2.7	Preamplificador de corriente	114
4.3.2.8	Convertidor analógico digital	115
4.3.3	Descripción detallada del método Cut-Back	116
4.3.4	Ecuación de atenuación espectral	119
4.4	Resultados	119
4.4.1	Parámetros ópticos básicos	119
4.4.2	Atenuación espectral	122
	Bibliografía	135
5.	Conclusiones	136

Lista de abreviaturas

[]	Referencia bibliográfica.
dB/Km	Unidad de atenuación.
Ghz/Km	Gigahertz por cada kilómetro. Giga= 10^{18}
nm	Nanómetro. Nano= 10^{-9}
FEB	Fusión y estiramiento bicónico (Fused Biconical Taper, FBT).
Cut-Back	Técnica de caracterización de la respuesta espectral en dispositivos ópticos.
n_1	Índice de refracción del núcleo de la fibra óptica.
n_2	Índice de refracción del revestimiento de la fibra óptica.
β	Constante de propagación.
μm	Micrómetro. Micra= 10^{-6}
TDM	Multiplexaje por división en el tiempo. Time Division Multiplexing.
LED	Diodo emisor de luz. Light Emitting Diode.
Mb/s	Megabits en cada segundo.
LASER	Amplificación de luz por emisión de radiación estimulada. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.
mW	Miliwatt= 10^{-3} Watts.
S/N	Relación señal a ruido (Signal Noise).
BER	Tasa de bits erróneos. (Bit Error Rate).
k	Número de onda en el espacio libre. $k=2\pi/\lambda$.
$C_{(z)}$	Coefficiente de acoplamiento de luz entre las fibras ópticas.

\mathcal{E}_1	Campo eléctrico o magnético de la guía transmitida.
\mathcal{E}_i	Campo eléctrico o magnético de la guía acoplada.
a	Radio del núcleo de la fibra óptica.
V	Frecuencia normalizada.
U, W	Parámetros característicos de los modos transversales, eigenvalores de la ecuación característica.
M	Número de modos propagados en una fibra óptica.
γ_R	Coefficiente de esparcimiento Rayleigh.
RCM	Radio de campo modal.
β_e	Constante de propagación del modo par ó simétrico de menor orden.
β_o	Constante de propagación del modo impar ó antisimétrico de menor orden.
ν	Coefficiente de Poisson. Para el vidrio en fusión $\nu=1/2$.
LAN	Red de computadoras de área local. Local Area Network.
WDM	Multiplexaje por división en longitud de onda. Wavelength Division Multiplexing.
OTDR	Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo. Optical Time Domain Reflectometer.
NA	Apertura numérica.
IEEE	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos. Institute of Electric and Electronic Engineers.
dB_m	Decibeles referidos a 1 miliwatt.
γ	Factor de adelgazamiento.

Introducción.

1.1 Antecedentes:

Desde la propuesta inicial de las fibras ópticas como medio de transmisión [1] y la fabricación de la primera fibra óptica con una atenuación de 20 dB/Km, por la compañía Corning Glass en 1970; esta tecnología ha evolucionado rápidamente hasta constituirse en una opción aplicable a los sistemas de comunicación actuales. Se puede asegurar que se trata, hoy en día, de una tecnología madura y con suficientes aplicaciones, principalmente en el Sector Telefónico y en algunos otros como el Sector Eléctrico del país.

La tecnología de fibras ópticas ofrece muchas ventajas a la industria de las comunicaciones entre las que se incluye un amplísimo ancho de banda y bajas pérdidas. Por ejemplo, el producto ancho de banda-distancia para fibras ópticas unimodo, es de 100 Ghz.Km, mientras el de los cables coaxiales es de 40 Mhz.Km, aproximadamente [2]. Con esta capacidad de transmisión, los sistemas de fibra óptica ofrecen la capacidad de transmitir comercialmente hasta 30720 canales a 2.5 Gbits/s en un sólo par de fibras con un espaciamiento típico de 70 Km entre repetidores.

Además de la aplicación a Telefonía, las fibras ópticas tienen aplicaciones importantes en redes de distribución de información, figura 1.1, (redes de área local, sistemas de distribución de televisión por cable, "fibre to the home") y sensores.

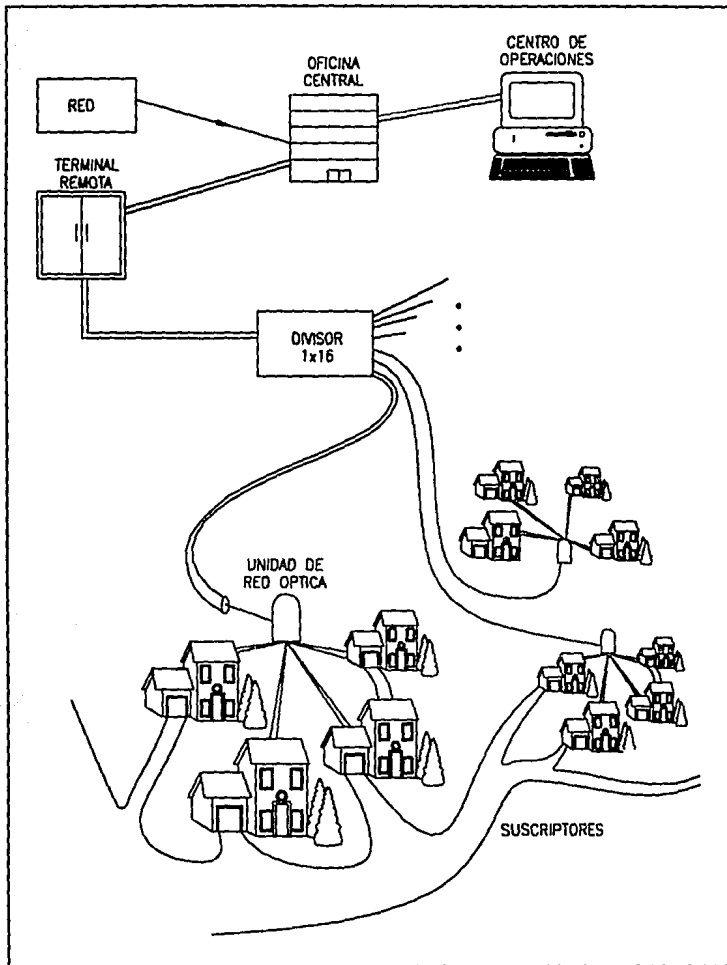


Figura 1.1 El acoplador direccional aplicado en la última milla de fibra óptica, "fibre to the home"; (Telefonía, TV por cable, Redes de área local, etc.).

Existen diversos dispositivos basados en fibras que permiten la realización de novedosas aplicaciones como las ya mencionadas. Estos dispositivos pueden ser activos o pasivos. Un dispositivo pasivo es aquel que está construido con elementos ópticos que no generan señal y su función se limita a direccionar, enfocar o reflejar la luz que viaja a través de él. Algunos ejemplos son: espejos, lentes, rejillas de difracción y acopladores de fibra óptica. Los dispositivos activos son aquellos que requieren alguna entrada externa de energía para realizar una operación, como ejemplo se encuentran los moduladores y amplificadores ópticos.

En particular, para el Sector Eléctrico del País, cada día se hace más necesario construir una red de comunicaciones eficiente capaz de soportar la intercomunicación y sensado necesarios en los sistemas eléctricos de potencia para el monitoreo y comunicación de los parámetros importantes de la red como son: Voltaje, Corriente y Temperatura, entre otros; que son esenciales para la adecuada generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía. Por lo anterior, la tecnología y los dispositivos de fibra óptica serán valiosos en la medida en que se utilicen para la implementación de las facilidades de comunicación y sensado mencionadas.

En esta tesis se estudia un tipo de dispositivo pasivo de fibra óptica que se conoce como *acoplador direccional* cuya función es dividir, mezclar o combinar las señales ópticas que se le transmiten, hacia sus salidas.

Actualmente, se han desarrollado las técnicas para compartir las capacidades de las fibras y los equipos entre varios usuarios, tendientes a mejorar la tecnología y superar barreras económicas. Muchas de estas técnicas se basan en acopladores de fibras ópticas para dividir las señales de luz transmitidas y proporcionar servicios a una gran cantidad de usuarios.

Recientemente, en el Instituto de Investigaciones Eléctricas se trabajó con éxito en el análisis y fabricación de acopladores de fibra óptica *multimodo*, los que son factibles de aplicarse en equipos terminales de comunicación. El próximo reto es contar con la técnica, los equipos y la reproducibilidad de los resultados de baja atenuación en la fabricación de acopladores de fibra óptica *unimodo*.

Los acopladores de fibra óptica unimodo son de interés debido a que se pueden utilizar en instalaciones de gran capacidad y larga distancia en los sistemas de segunda y tercera generación [3] a 1300 y 1550 nm de longitud de onda, respectivamente. Por lo anterior, se decidió realizar el estudio y fabricación de acopladores unimodo ya que además, existen otras aplicaciones de estos dispositivos, por ejemplo en instrumentación y en sensores interferométricos. Adicionalmente, los acopladores son dispositivos que ahorran cable de fibra óptica en los sistemas punto-multipunto debido a que el uso de éstos, aunado a otros dispositivos como multiplexores divisores de longitud de onda, pueden duplicar la capacidad del cable de fibra óptica disponible, al derivar la luz que proviene de un transmisor, hacia varios receptores.

En un sistema de comunicación óptica convencional, un circuito transmisor-receptor utiliza dos fibras ópticas. Con el uso de acopladores, se puede establecer una comunicación por una sola fibra; esto nos lleva a incrementar la capacidad en una fibra y liberar la otra para posibles crecimientos en la capacidad del sistema.

1.2 Objetivo General.

El objetivo de este trabajo de tesis es realizar un estudio experimental sobre la fabricación de acopladores de fibras ópticas unimodo, utilizando el método de fusión y estiramiento bicónico y un sistema automatizado de medición de la atenuación con respecto a la longitud de onda (atenuación espectral), para determinar su factibilidad en aplicaciones a sistemas de telecomunicación.

1.3 Desarrollo.

Para obtener acopladores unimodo a 1300 nm, la técnica de fabricación empleada en este trabajo se conoce como *fusión y estiramiento bicónico* ó FBT (Fused Biconical Taper). Este método consiste básicamente en fusionar los núcleos de los tramos de fibra por medio del calentamiento de los mismos con una flama muy pequeña de alta pureza, al tiempo que se les aplica una fuerza de tensión ó alargamiento, hasta lograr una forma longitudinal ligeramente cónica, que facilita el acoplamiento óptico entre sus núcleos.

Se decidió utilizar una técnica de caracterización espectral llamada *respuesta espectral por el método Cut-Back*, que se aplica primero al acoplador y después a un tramo corto de fibra para tomarla como referencia. Este método consiste en inyectar luz de diferentes longitudes de onda al acoplador por medio de una fuente de luz blanca muy estable. La señal que se obtiene de los puertos de salida del acoplador se detecta, amplifica y digitaliza por medio de un detector de germanio, un preamplificador de corriente y un convertidor analógico-digital para enviarla a una computadora que registra la potencia propagada en el dispositivo, obteniéndose la gráfica de potencia contra longitud de onda, la cual es útil para determinar su atenuación espectral.

En el capítulo 2 se establecen los conceptos básicos de los sistemas de comunicación por fibra óptica, tipos de fibras, transmisores y receptores, capacidad de transmisión y uso potencial de amplificación óptica. Se presentan así mismo, los diferentes tipos de acopladores, métodos de fabricación, parámetros ópticos básicos y sus principales aplicaciones en sistemas de comunicación y sensado.

El método de fabricación de los acopladores que se utiliza en este trabajo, es el llamado FBT, que ha sido implementado en el laboratorio de óptica del Departamento de Comunicaciones del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), el cual está descrito en el capítulo 3, así como el método de encapsulado.

Existen diversos métodos de caracterización de los acopladores entre los cuales destaca el que analiza su respuesta en longitud de

onda por medio del método Cut-Back, de 1000 a 1600 nm, aunado a la medición de sus características de atenuación básicas, cuyo equipo necesario y funcionamiento se describe en el capítulo 4.

Para finalizar, en el capítulo 5 se hace el resumen con las conclusiones finales que se obtuvieron del presente trabajo, así como las perspectivas y sugerencias para trabajos futuros.

Bibliografía

- [1] Kao, K.C., y Hochman, G.A.: "Dielectric-fibre surface waveguide for optical frecuencies", IEE Proceedings, 1966, Vol. 113, pp. 1151-1158.
- [2] Keizer, G.: "Optical fiber communications", (McGraw-Hill, Japan, 1983).
- [3] Desurvire, E.: "Lightwave communications: The fifth generation", Scientific American, January 1992, pp. 114-121.

Conceptos básicos y aplicaciones de acopladores de fibra óptica unimodo.

2.1 Introducción.

En este capítulo se describe la estructura de una fibra óptica y los parámetros básicos que determinan la propagación de luz a través de éstas. Además se estudian brevemente los conceptos básicos que afectan la propagación de la señal como atenuación, esparcimiento y absorción; se describe la forma como han evolucionado las fibras ópticas como medio de transmisión a consecuencia de la continua mejora en la operación de transmisores, detectores y los diferentes tipos de fibras. También se estudian los tipos de acopladores, el principio de operación y las principales aplicaciones de los acopladores de fibra óptica unimodal.

2.2 Conceptos Básicos.

2.2.1 Fibra óptica.

Una fibra óptica es una guía de onda dieléctrica que consiste de un cilindro sólido interno de radio a llamado núcleo con un índice de refracción n_1 , al núcleo lo rodea otro cilindro sólido llamado revestimiento que tiene un índice de refracción n_2 , ligeramente menor que n_1 , como se muestra en la figura 2.1.

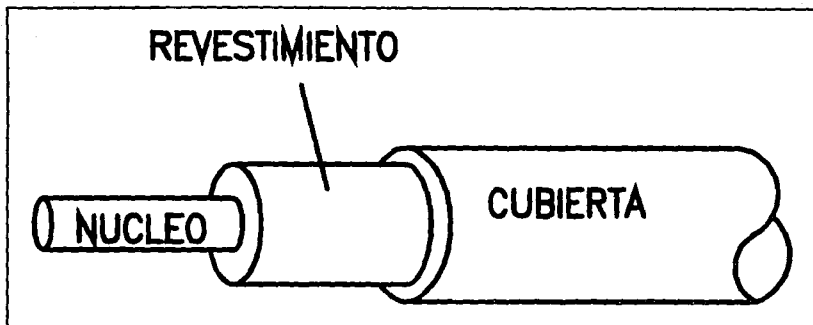


Figura 2.1 Fibra óptica.

Ambos cilindros se fabrican generalmente de vidrio con alto contenido de silicio (SiO_2) ó plástico [1]. Las fibras ópticas se emplean para transmitir señales electromagnéticas en la gama de frecuencias ópticas (luz visible e infrarroja). Los materiales con que se fabrican las fibras las convierten en guías de onda inmunes a la interferencia electromagnética. Esto representa una gran ventaja para su utilización en ambientes en cuyo entorno se establecen campos magnéticos que pueden inducirse en los medios tradicionales como cables metálicos o coaxiales, por ejemplo, en centrales generadoras de electricidad y subestaciones.

Cabe aclarar, que en este trabajo no se explican los fundamentos de la teoría de propagación en fibras ópticas debido a que salen del objetivo planteado para este trabajo; sin embargo, el lector puede apoyarse en las referencias [2,3,4] en caso de requerir mayor información al respecto.

2.3 Propagación.

2.3.1 Propagación en fibras ópticas.

En general, se dice que la propagación de ondas electromagnéticas dentro de las fibras ópticas, se presenta en forma de *modos*, entendiéndose que un modo de propagación resulta de las interferencias constructivas del campo eléctrico que se presentan a lo largo de la guía de onda, que en este caso es cilíndrica, los cuales se guían dentro de éstas en forma de patrones estables de luz. Además, también existen modos guiados débilmente por el núcleo y una parte de estos se guía por el revestimiento.

La solución exacta de las ecuaciones de Maxwell para guías de onda dieléctricas de núcleo cilíndrico homogéneo, como las fibras ópticas, implica un desarrollo matemático profundo y extenso que sale de los objetivos planteados para este trabajo; sin embargo, podemos encontrarla en las referencias [2,3,4] para dar una idea de los modos que se propagan en las fibras ópticas.

Para la guía de onda cilíndrica, son necesarios dos números enteros para identificar los modos de propagación, debido a que los grados de libertad [3] para la propagación aumentan con respecto a la guía de onda plana, en la que sólo es necesario un número; es decir, el campo magnético y el eléctrico pueden tener componentes en las tres direcciones: X, Y, Z .

Usualmente, los números con que se identifican los modos que se propagan en una fibra óptica, se representan con las letras l y m .

En una guía de onda cilíndrica, se dice que un modo es transversal eléctrico TE [2] cuando cumple las dos condiciones siguientes:

- Que su componente de campo eléctrico en el eje X forme interferencia constructiva, en otras palabras, que el campo eléctrico se suma o refuerza en ese punto.
- Que su componente de campo eléctrico en la dirección de propagación, en el eje Z, sea igual a cero, $E_z=0$ mH.

Para un modo transversal magnético TM su componente de campo magnético en el eje X forma las interferencias constructivas, mientras que la componente del mismo, en la dirección de propagación es cero $H_z=0$ [5,6].

En una fibra óptica los modos TE y TM en general, se puede pensar que son análogos a los rayos meridionales, es decir, aquellos rayos que cruzan el eje longitudinal u óptico de la fibra [6]. Para una especificación particular de estos modos, es necesario utilizar la nomenclatura TE_{1m} y TM_{1m} . También existen modos que viajan muy cerca del revestimiento y que son análogos a los rayos que nunca cruzan el eje de la fibra, conocidos como rayos oblicuos; las componentes de campo eléctrico y magnético E_z y H_z , de estos modos no son cero por lo que se denominan HE_{1m} y EH_{1m} [1,5,6], ya que la componente transversal al eje de la fibra de campo magnético es predominante en el primer caso y, en el segundo, predomina la componente transversal de campo eléctrico.

Para una guía de onda de núcleo cilíndrico homogéneo, bajo la condición de guiado débil es decir, $n_1 \ll n_2$, se puede escribir

la ecuación de onda escalar [2] de la siguiente forma:

$$\frac{d^2\psi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2\psi}{d\phi^2} + (n_1^2 k^2 - \beta^2) \psi = 0 \quad 2.1$$

Donde: ψ es el campo (E o H), β es una constante de propagación de la luz y r, ϕ son las coordenadas cilíndricas.

Para que la onda se propague, se debe cumplir que las constantes de propagación de los modos guiados estén en el rango:

$$n_2 k < \beta < n_1 k$$

Las soluciones de la ecuación de onda para las fibras se pueden separar resultando la ecuación [2,7]:

$$\psi = E(r) \left\{ \frac{\cos l\phi}{\text{Sen} l\phi} e^{i(\omega t - \beta z)} \right\} \quad 2.2$$

Donde ψ en este caso representa la componente de campo eléctrico transversal dominante; la dependencia periódica que tienen los modos sobre ϕ siguiendo $\text{Sen} l\phi$ o $\text{Cos} l\phi$, dan un modo radial de orden l .

Si empleamos la ecuación 2.2 para sustituir en la ecuación de onda escalar, tenemos [1,2,5]:

$$\frac{d^2 E}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE}{dr} + [(n_1 k^2 - \beta^2) - \frac{l^2}{r^2}] E = 0 \quad 2.3$$

La ecuación 2.3 es una ecuación de Bessel y sus soluciones son funciones en coordenadas cilíndricas, por lo tanto representan modos dentro de una fibra óptica [8,9]. Estas funciones Bessel descritas por J_l cuando la onda se propaga en el núcleo es decir, $r=0$ y $J_l=J_0$; sin embargo, conforme la onda se aleja hacia el recubrimiento, la función es una Bessel modificada descrita por K_l

que decae exponencialmente con respecto a r , desvaneciéndose el campo de la misma forma.

Por lo anterior, se puede describir el campo eléctrico tanto en el núcleo como en el revestimiento de la forma [8,9]:

$$E(r) = G J_1(UR) \quad \text{Para } R < 1 \quad 2.4$$

$$E(r) = G J_1(U) \frac{K_1(WR)}{K_1(W)} \quad \text{Para } R > 1 \quad 2.5$$

Ya que:

$$U = a(n_1^2 k_1^2 - \beta^2)^{1/2} \quad 2.6$$

$$W = a(\beta^2 - n_2^2 k_2^2)^{1/2} \quad 2.7$$

Donde G es el coeficiente de amplitud y $R = r/a$ es la coordenada radial normalizada cuando a es el radio de la fibra. U y W representan los eigenvalores para el núcleo y para el revestimiento, respectivamente.

2.3.2 Frecuencia Normalizada.

El parámetro V ó *frecuencia normalizada* de una fibra óptica es el que determina el número de modos que se pueden propagar a través de ella. Está definido de la siguiente manera:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad 2.8$$

Donde:

λ :Es la longitud de onda de operación.

a :Es el radio del núcleo de la fibra.

n_1 :Es el índice de refracción del núcleo.

n_2 :Es el índice de refracción del revestimiento.

Para que una fibra se considere unimodo únicamente debe transmitir o propagar el modo fundamental, esto se logra eliminando la capacidad de propagación de los múltiples modos mediante el estrechamiento del diámetro del núcleo de las fibras y la disminución de la diferencia de índices de refracción; por ejemplo, llegando a valores de $a = 9 \mu\text{m}$ para $\lambda = 1300 \text{ nm}$. De acuerdo a la ecuación 2.8, si se fijan correctamente los parámetros a , λ , n_1 , n_2 , se puede fijar la frecuencia normalizada V a un valor de 2.405, que es el valor al que se cortan todos los modos de propagación con excepción del modo fundamental [3,6,9].

Por último, en el laboratorio, se puede confirmar la propagación de modos por medio de una observación directa de los patrones de modo que resultan de la superposición de las distribuciones de campo eléctrico de los diferentes modos dentro de una fibra, pero estos patrones sólo dan una aproximación visual de los modos predominantes dentro de la guía de onda cilíndrica, como se muestra en la figura 2.2.

Figura 2.2 Patrones de modos predominantes en una fibra óptica.

2.3.3 Radio de Campo Modal.

El radio de campo modal RCM en una fibra óptica unimodo es el ancho de la función de distribución de amplitud del campo cercano cuando la amplitud cae a un valor determinado, según la convención tomada en cuenta, cuando se opera a una longitud de onda cercana a la de corte [10]. En la figura 2.3, se ilustra la distribución de amplitud de campo cercano para una fibra unimodo.

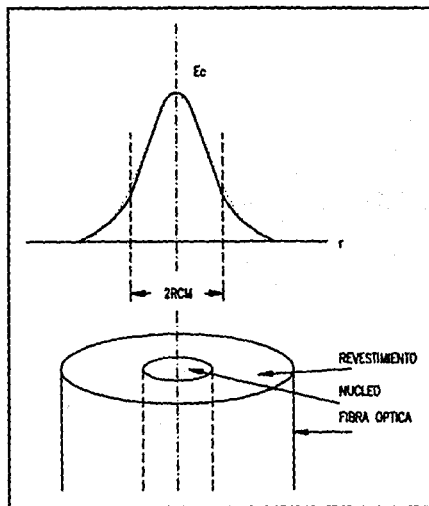


Figura 2.3 Distribución de amplitud del campo cercano para una fibra unimodo (RCM).
___ Modelo exacto ... Modelo Gaussiano.

En otras palabras, el RCM es el ancho del radio del modo fundamental que se propaga en una fibra unimodo. En una fibra de este tipo, una pequeña porción de la luz se propaga en el revestimiento, es decir, la mayor parte viaja en el núcleo, pero la porción que viaja por el revestimiento aumenta cuando se incrementa la longitud de onda de operación con respecto a la longitud de onda de corte.

Las técnicas de medición del RCM se dividen en dos principalmente [10]: técnica de campo cercano, que se detecta a la salida de la fibra y de campo lejano, a una distancia mayor que 10 veces el radio de la fibra. Este parámetro es un factor que determina las pérdidas por empalme y las pérdidas por microcurvaturas.

Debemos visualizar que si existe una gran diferencia entre los radios de campo modal de dos fibras a empalmar, las pérdidas esperadas son grandes [8,9], por otro lado, mientras más grande es el RCM es posible mayor eficiencia en los empalmes aunque las pérdidas por microcurvatura aumentan.

2.3.4 Atenuación.

Existen dos mecanismos básicos que afectan la propagación de una señal en una fibra óptica: atenuación y dispersión. A continuación se explican brevemente estos mecanismos, junto con otros fenómenos que perturban la transmisión.

2.3.4.1 Atenuación.

La atenuación es uno de los parámetros por los cuales las fibras ópticas han sido aceptadas ampliamente como medio de comunicación, ya que superan ampliamente a los medios tradicionales como el cable coaxial.

La atenuación de la señal dentro de las fibras ópticas, al igual que en los conductores metálicos, se expresa en decibeles. Un decibel se define como la tasa logarítmica, en base 10, de la potencia de entrada P_i entre la potencia de salida P_o , como se indica en la ecuación 2.9.

$$(dB) = 10 \text{ LOG}_{10} \frac{P_i}{P_o} \quad 2.9$$

Para una fibra óptica la atenuación se expresa en decibeles por unidad de longitud, normalmente en kilómetros de acuerdo a la ecuación 2.10:

$$\alpha_{dB} (L) = 10 \text{ LOG}_{10} \frac{P_i}{P_o} \quad 2.10$$

Donde: α_{dB} : es la atenuación por unidad de longitud en dB.

L: es la longitud de la fibra en Km.

La absorción del material, que es uno de los fenómenos que afectan la propagación en las fibras ópticas, está relacionada con la composición y fabricación de éstas, la cual da como resultado la disipación de energía en forma de calor.

2.3.4.2 Absorción Intrínseca y Extrínseca.

La absorción intrínseca es inevitable y se debe al comportamiento natural del material con respecto a la longitud de onda transmitida. Para longitudes de onda en el infrarrojo [11], el vidrio puro muestra atenuación muy baja, pero como se puede observar en la figura 2.4, se presenta un pico de absorción en la región ultravioleta. Esto se debe a la estimulación que reciben los electrones para pasar a niveles de energía superiores, absorbiendo la energía que lleva la luz transmitida, que posteriormente se disipa en forma de calor [5,9].

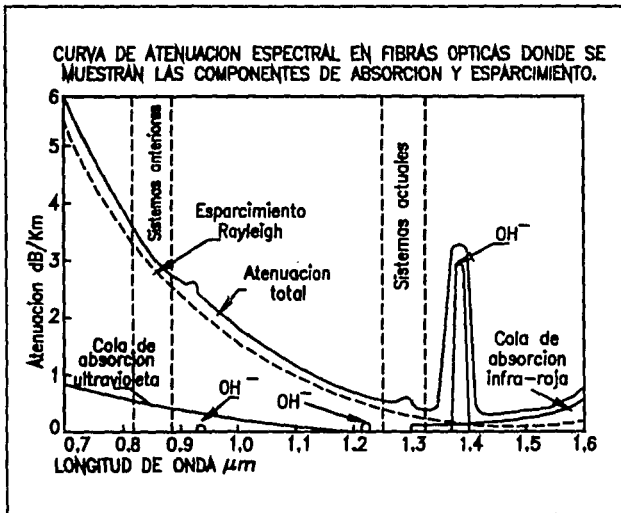


Figura 2.4 Atenuación en fibras ópticas en función de la longitud de onda.

Así mismo, en la región del infrarrojo lejano, por encima de $7 \mu\text{m}$, se presentan bandas de absorción debidas a la interacción de los fotones con las vibraciones moleculares que ocurren dentro del vidrio. Esto da como resultado picos de absorción ubicados dentro de la ventana de transmisión [8,9].

La absorción extrínseca se debe a la presencia de agua en forma de oxidril, también llamado ion ó radical OH^{\cdot} , que se encuentra disuelta en el vidrio adherido a su estructura, cuya frecuencia fundamental de vibración origina varios picos de absorción a 1400, 1240 y 950 nm [9], como se observa en la figura 2.4.

Esta absorción también se debe, aunque en menor grado, a la presencia de metales de transición en los equipos empleados durante la fabricación de las fibras.

2.3.4.3 Esparcimiento Rayleigh.

Las pérdidas por esparcimiento tienen dos comportamientos básicos, uno que se manifiesta en forma lineal preferentemente en la dirección de propagación y otro que observa un comportamiento no lineal usualmente cuando los niveles de potencia transmitida son altos. Este esparcimiento se puede presentar en la dirección de propagación o en la dirección contraria provocando fenómenos de retrodispersión [12].

El esparcimiento lineal se produce cuando la potencia óptica que se está propagando en un modo determinado, se acopla ó transfiere a otro modo que puede ser un modo débilmente guiado que

viaja por el revestimiento y que fácilmente se puede radiar al exterior de la fibra, provocando pérdidas.

El esparcimiento Rayleigh es un fenómeno de esparcimiento lineal que se presenta en la ventana entre los extremos de absorción ultravioleta e infra-rojo. Resulta de las inhomogeneidades de naturaleza aleatoria cuyas dimensiones son más pequeñas que la longitud de onda. Estas inhomogeneidades se manifiestan como fluctuaciones del índice de refracción, que surgen de la variación en la composición de los materiales al momento del enfriado de las fibras.

La componente fundamental del esparcimiento Rayleigh se reduce cuando se opera a la mayor longitud de onda posible. Como se puede observar en la ecuación 2.11, el esparcimiento Rayleigh es inversamente proporcional a la longitud de onda [3,5,9]:

$$\gamma_R = \frac{1}{\lambda^4} \quad 2.11$$

Donde:

γ_R es el coeficiente de esparcimiento Rayleigh.

2.3.5 Dispersión.

El fenómeno de dispersión en las fibras ópticas causa distorsión de las señales. Existen tres tipos básicos de dispersión: dispersión de guía de onda, dispersión del material y dispersión modal. Los mecanismos de dispersión causan el espaciado de los pulsos a lo largo de la fibra. La cantidad del espaciado o separación temporal de los pulsos depende de la distancia que el pulso viaje. La cuantificación de las propiedades

de dispersión se establece usualmente como el espaciamiento temporal de los pulsos ópticos por unidad de longitud de la fibra en ns/Km.

2.3.5.1 Dispersión por Guía de Onda.

Esta dispersión se debe a que de la luz que se inyecta a una fibra unimodo, una parte se distribuye en el revestimiento y otra se propaga por el núcleo. La característica que se presenta es que la luz que viaja por el revestimiento, tiene que viajar más rápido que la que se propaga por el núcleo, ya que recorre más distancia. Este fenómeno se presenta de acuerdo a las dimensiones del núcleo y revestimiento, y a la longitud de onda que se transmite, de ahí que, a mayor longitud de onda, mayor parte de la señal viaja por la cubierta. Es representativa solamente para fibras unimodo, ya que en éstas, al propagarse un solo modo ó rayo de luz, si afecta la cantidad de luz que viaja por el revestimiento, representando pérdidas en la señal.

2.3.5.2 Dispersión por Material.

Esta dispersión se presenta en ambos tipos de fibras, multimodo y unimodo. Se debe principalmente a que el índice de refracción es función de la longitud de onda que se propaga. Es decir, un material no responde con el mismo índice de refracción para diferentes longitudes de onda transmitidas; por lo que λ 's cortas viajan más lento que λ 's largas, dentro de la fibra, causando dispersión.

En fibras multimodo, la dispersión del material es mucho menor que la dispersión modal.

A la suma de la dispersión de guía de onda y la dispersión del material, se le conoce como dispersión cromática. En fibras ópticas unimodo, la dispersión de guía de onda contribuye junto con la dispersión del material en las pérdidas totales por cada kilómetro.

2.3.5.3 Dispersión Modal.

Esta dispersión se presenta únicamente en fibras multimodo, a causa de la diferencia en tiempo que existe entre el recorrido de los rayos meridionales y los rayos axiales. Los rayos axiales siguen un camino recto paralelo al eje de la fibra; los rayos meridionales recorren la fibra a través de múltiples reflexiones en la interface núcleo-revestimiento, sin cruzar por el eje de la fibra.

2.3.5.4 Dispersión Total.

El efecto neto de todas las formas de dispersión dentro de las fibras ópticas, causa el ensanchamiento de los pulsos de luz transmitidos.

La ecuación que define la dispersión total es:

$$\Delta_t = (\Delta_{mat}^2 + \Delta_{mod}^2 + \Delta_g^2)^{1/2} \quad 2.12$$

Donde:

Δ_{mat} : Es la dispersión por material.

Δ_{mod} : Es la dispersión modal.

Δ_g : Es la dispersión por guía de onda.

El ancho del pulso recibido se obtiene de:

$$t_r = t_w + \Delta_t \quad (\text{seg}) \quad 2.13$$

Donde:

t_w : Es el ancho del pulso original.

Δ_t : Dispersión total del pulso.

Como se mencionó, para las fibras unimodo los efectos dispersivos que afectan son los de dispersión de guía de onda y los de dispersión del material; para las fibras multimodo, los que más afectan son los de dispersión modal y dispersión del material.

2.4 Tipos de Perfiles de Índice de Refracción.

Debido a las variaciones de la cantidad de material empleado en la composición de las fibras, se pueden fabricar dos tipos básicos según el perfil de índice de refracción diseñado. Los más simples son: perfil de índice de refracción escalonado y perfil de índice de refracción gradual. Existen fibras con perfiles especiales como el perfil de revestimiento en depresión, perfil tipo W, corbata de moño (Bow Tie), perfil tipo panda, etc., cuyas aplicaciones son muy específicas, por lo que se recomienda recurrir a la literatura propuesta [13].

2.4.1 Índice Escalonado.

En una fibra de índice escalonado, el índice de refracción del núcleo es uniforme a lo largo de la fibra. Al pasar al revestimiento, se registra un cambio abrupto ó escalón hacia un índice de refracción menor, por lo que ésta se llama fibra de

índice escalonado. Con las ecuaciones 2.14 y 2.15, se puede representar la variación de índice de refracción que ocurre en las fibras de índice escalonado.

$$n(r) = n_1, \text{ para } r < a \text{ (núcleo)} \quad 2.14$$

$$n(r) = n_2, \text{ para } r \geq a \text{ (revestimiento)} \quad 2.15$$

2.4.1.1 Fibra Multimodo de Índice Escalonado.

En una fibra óptica multimodo de índice escalonado, el núcleo puede medir, por ejemplo, 80 μm por lo que su tamaño es suficiente para permitir la propagación de muchos modos dentro del núcleo de la fibra. El número de modos guiados depende de los parámetros físicos: diferencia relativa de índices, diámetro del núcleo, y de la longitud de onda de la luz inyectada.

El número de modos propagados en una fibra óptica se determina con la ecuación 2.16:

$$M_v = \frac{V^2}{2} \quad 2.16$$

2.4.1.2 Fibra Unimodo de Índice Escalonado.

Una fibra óptica unimodo de índice escalonado permite la propagación únicamente de un solo modo transversal electromagnético TEM [2]. La frecuencia de corte normalizada para una fibra óptica

unimodo ocurre a $V_c=2.405$ [2], por lo que el modo fundamental se puede propagar en el rango de $0 < V < 2.405$.

Una ventaja que tienen estas fibras es que no existe dispersión o diferencia en el retardo de la señal en diferentes modos de propagación, fenómeno que en las fibras multimodo se le conoce como dispersión modal [9].

2.4.2 Índice Gradual.

Una fibra óptica cuyo índice de refracción del núcleo desciende en forma gradual en función de la distancia radial a partir del eje de la misma, se conoce como fibra óptica de índice gradual. Esta variación del índice de refracción se representa en la ecuaciones 2.17 y 2.18 :

$$n(r) = n_1 (1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha)^{1/2} \text{ para } r < a \quad (n_1) \quad 2.17$$

$$n(r) = n_1 (1 - 2\Delta)^{1/2} = n_2, \text{ para } r \geq a \quad (n_2) \quad 2.18$$

Donde Δ es la diferencia relativa de índices de refracción y α es el parámetro del perfil que da la característica del perfil de índice de refracción del núcleo. Para una $\alpha = \infty$, el núcleo tiene un perfil de índice escalonado, para $\alpha = 2$ el perfil de índice es parabólico y para $\alpha = 1$ el perfil del núcleo es triangular como se muestra en la figura 2.5. Los perfiles que producen los mejores resultados en propagación multimodo tienen un núcleo con perfil de

índice parabólico. El decrecimiento gradual del índice de refracción a partir del centro del núcleo, crea refracciones de los rayos debido a que inciden en un largo número de interfaces formadas por capas de alto índice hacia capas de bajo índice de refracción.

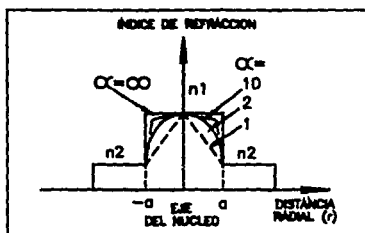


Figura 2.5 Perfiles de índice de refracción permitidos para diferentes valores de α .

Se pueden diseñar fibras de índice gradual para operación unimodo partiendo de la ecuación de frecuencia de corte normalizada para fijar la propagación de un solo modo:

$$V_c = 2.405 \left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)^{1/2} \quad 2.19$$

De la ecuación 2.19 se pueden determinar los parámetros de la fibra que aseguran operación unimodo. Se puede notar que el valor crítico de frecuencia normalizada para una fibra de índice gradual de perfil parabólico se incrementa con un factor de $\sqrt{2}$ en comparación con las de índice escalonado. Esto da un incremento del diámetro del núcleo en un factor similar. El número V mayor que permite operación unimodo se puede incrementar aún más utilizando

un perfil de índice triangular. Generando un incremento de aproximadamente $\sqrt{3}$ en el valor de V así como del diámetro del núcleo [2]. Tales fibras unimodo se utilizan en sistemas de transmisión a una longitud de onda de 1550 nm.

2.5 Sistemas de comunicación óptica.

Las empresas líderes de los sistemas de comunicación óptica, han establecido enlaces comerciales de hasta 2.5 Gbits/s por un par de fibras y a corto plazo se introducirán sistemas de 10 Gbits/s en los que se utiliza tecnología de multiplexaje por división en el tiempo (TDM).

Los sistemas de comunicación óptica se pueden dividir básicamente en dos categorías: sistemas con detección directa y sistemas con detección coherente.

En un sistema de comunicación digital con detección directa, la luz de la fuente se codifica directamente aplicando la corriente de codificación a la fuente. La señal de luz modulada en intensidad viaja a través de la fibra hacia un receptor donde un fotodetector convierte la señal óptica en señal eléctrica, de la cual se extrae la información codificada original realizando una serie de operaciones como: Amplificación, Filtrado y Temporización [14].

Para sistemas con detección coherente se puede codificar en la amplitud, frecuencia o fase del haz. La señal recibida se mezcla con la luz de un oscilador laser local, generando una señal reforzada que cae en el rango de las microondas. El transmisor y el oscilador laser local deben emitir a longitudes de onda centradas en un ancho espectral pequeño (menor a 10 Mhz.) y deben ser sintonizables en longitud de onda. Estos sistemas ofrecen mucho más alta sensibilidad del receptor y amplia selección de canales en sistemas que utilizan multiplexaje por división de longitud de onda.

En la figura 2.6 se pueden observar los diagramas a bloques de estas dos categorías de sistemas de comunicación por fibra óptica.

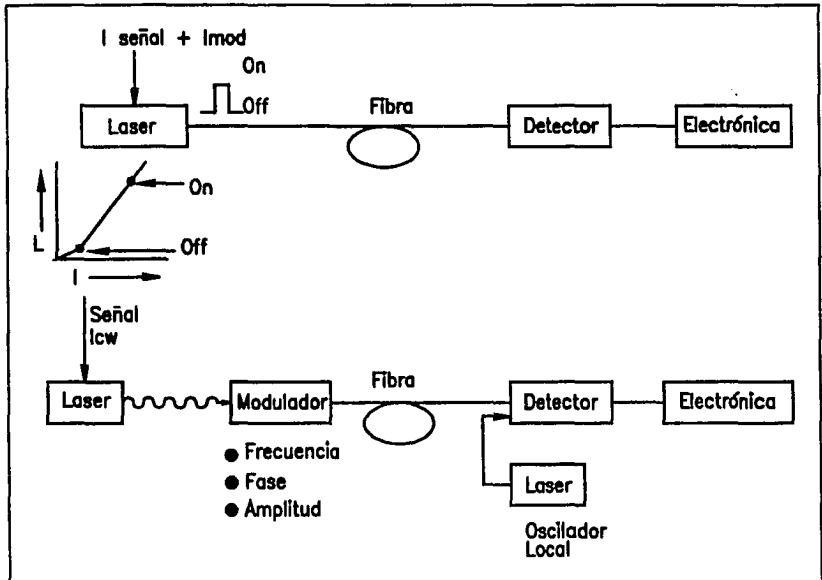


Figura 2.6 Esquemas de detección directa y detección coherente.

2.5.1 Fuentes.

Las fuentes de luz que más se utilizan son los LED y los LASERS. Su función es convertir la señal eléctrica de un canal de voz o datos, en señal óptica. Estos dispositivos se fabrican a partir de estructuras semiconductoras multicapa sobre un sustrato de cristal único previamente crecidas en forma epitaxial. El proceso de crecimiento epitaxial conserva la simetría cristalina a todo lo largo de la estructura multicapa.

2.5.1.1 Diodos Emisores de Luz.

Los Diodos Emisores de Luz (LEDs - Light Emitting Diodes) se utilizan en aplicaciones de enlaces ópticos con tasas de datos menores a 500 Mb/s y distancias que no pasan de unos cuantos kilómetros. Los leds que emiten a 850 nm se fabrican generalmente con AlGaAs (Arseniuro de Galio Aluminio) así como los leds que emiten a 1300 nm se fabrican con InGaAsP (Fosfato de Arseniuro de Galio Indio) y se utilizan en sistemas con fibra de muy baja pérdida, donde la dispersión cromática es cercana a cero.

Cuando se utiliza fibra óptica unimodal en el diseño de sistemas de comunicación, se prefieren los diodos laser de semiconductor por sus características de reducido ancho espectral [14] y su gran potencia óptica acoplada a la fibra.

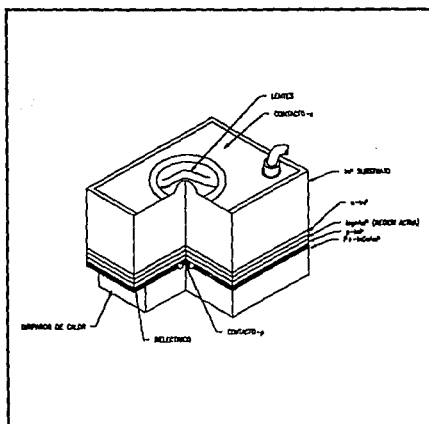


Figura 2.7 Superficie emisora de un LED.

2.5.1.2 Lasers.

Los lasers fabricados con InGaAsP se usan como fuentes para sistemas de tasas de datos mayores a los sistemas con leds debido a que los lasers cuentan con la linealidad óptica, estabilidad temporal y larga vida [15] necesarias para estas aplicaciones.

Se encuentran comúnmente en el mercado varios tipos de lasers los cuales son fabricados usando técnicas de crecimiento epitaxial en fase líquida o en fase de vapor. Algunos lasers emiten en longitudes de onda separadas por el espaciamiento de modos de la cavidad, operan a altas temperaturas ($> 120\text{ }^{\circ}\text{C}$), tienen capacidad de modulación de alta frecuencia ($> 9\text{ Ghz.}$) y emiten altas potencias ($> 50\text{ mW}$). Además existen lasers disponibles con diferentes especificaciones de salida óptica, velocidad de operación y longitud de onda. Estos son utilizados en paquetes de lasers para cableado submarino, cables troncales telefónicos y distribución.

2.5.2 Fotodetectores.

los fotodetectores realizan la importante función de transformar con fidelidad la señal óptica en señal eléctrica, en los receptores. El fotodetector ideal no debe adicionar ruido al sistema de detección. Existen dos tipos básicos: el fotodiodo PIN (Positive-Intrinsic-Negative) y el fotodiodo APD (Avalanche-Photodiode).

Los sistemas de comunicación que operan en 1300 y 1550 nm utilizan tanto fotodiodos PIN como APD fabricados con InGaAsP con

una región absorbente de InGaAs. Estos sistemas también utilizan germanio y elementos de los grupos III-V de la tabla periódica en su fabricación. En la figura 2.8 se muestran los esquemas de las estructuras de un fotodiodo PIN y de un APD.

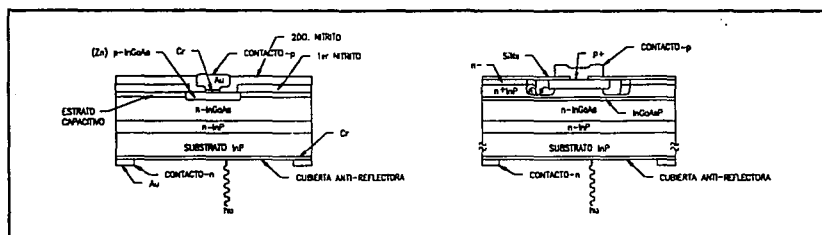


Figura 2.8 Esquema de las estructuras de los fotodiodos PIN y APD.

En seguida se describen los parámetros asociados a los fotodetectores [16]:

Eficiencia cuántica: Es la relación del número de pares electrón-hueco producidos al número de fotones incidentes.

Responsividad: Es la relación de la corriente eléctrica producida a la potencia óptica incidente.

Corriente de oscuridad: Es la corriente que se genera en el fotodiodo en ausencia de potencia óptica incidente. En fotodiodos PIN el nivel de corriente de oscuridad es bajo, mientras que en los APD se presentan niveles altos que adicionan ruido al receptor; especialmente cuando se trata de fotodiodos de germanio.

Capacitancia: es la capacitancia de agotamiento que presenta la unión cuando se aplica una tensión inversa determinada.

Existen otros parámetros de importancia como:

Velocidad de respuesta: Esta depende de la longitud de onda de radiación del material, del espesor del fotodiodo y del voltaje de operación. La respuesta del APD generalmente es menor que la de un fotodiodo PIN.

Sensitividad: Es la mínima potencia óptica recibida para lograr una relación señal a ruido (S/N) o tasa de error (BER) deseada. En las comunicaciones digitales por fibra óptica es común una BER de 10^{-9} .

2.5.3 Evolución de los sistemas de telecomunicación por fibra óptica.

Puede decirse que desde su aparición, la tecnología de comunicación óptica ha avanzado rápidamente debido al gran trabajo científico que se realiza en todo el mundo para desarrollar sistemas que transmitan mayor cantidad de información a tasas de datos cada vez más altas.

2.5.3.1 Generaciones.

Durante los últimos 20 años, los investigadores en esta rama han mejorado la tecnología de tal forma que se pueden identificar 5 etapas o generaciones de sistemas de comunicación óptica [17], cada una de ellas representando mejoras notables en capacidad de transmisión y economía.

La 1ª generación de equipos pudo transmitir más información que el tradicional par trenzado de cobre. Estos sistemas y algunos subsecuentes cuentan con equipos como: Transmisor, codificador, fibras ópticas de silicio, decodificador y receptor. En esta primera generación el transmisor es un diodo emisor de luz de radiación infra-roja a una longitud de onda de 850 nm y diámetro del núcleo de 50 micras. La fibra es de índice gradual con 3 dB/Km de atenuación. Las tasas de transmisión son de 1 Gb-Km/s los receptores son fotodiodos PIN basados en silicio.

En la 2ª generación, se disminuye el diámetro de la fibra hasta unas cuantas micras, se transmite a 1300 y 1550 nm (El SiO₂ es casi transparente en estas ventanas de transmisión) con diodos laser de semiconductor. La fibra es monomodo y se llega a tasas de transmisión de 100 Gb/Km.

Para 1982 la tercera generación comenzó con la mejora en la pureza de la fabricación de las fibras ópticas, utilizando las ventanas que se presentan entre 1200 y 1600 nm. En particular, se pone énfasis en los lasers de semiconductor que emiten a 1550 nm (longitud de onda a la cual el sílice o vidrio es más transparente) con los que se logra mejorar la capacidad de transmisión hasta alrededor de 600 Gb-Km/s.

La 4ª generación se caracteriza porque se modula la frecuencia y la fase de la luz, teniendo control de éstas en forma precisa. Por tal motivo, estos sistemas se llaman coherentes. Los detectores pueden convertir señales ópticas en eléctricas con mayor precisión, ya que no dependen de la intensidad de la luz. Esta tecnología

tiene problemas para desarrollar en gran escala los chips transmisores necesarios.

La tecnología de amplificación óptica utilizando fibras dopadas con tierras raras como el erbio, constituyen el avance más importante que marca el inicio de la 5ª generación de sistemas de comunicación óptica.

Con esta tecnología, se utilizan diodos laser que excitan con una radiación infrarroja a 1480 o 980 nm al tramo de fibra óptica dopada con erbio. La luz laser es absorbida por los átomos de erbio, que ascienden a niveles mayores de energía. Cuando una señal debilitada se transmite por un tramo de esta fibra, los átomos excitados de erbio le transfieren su energía a la señal a través de un proceso que Einstein llamó *emisión estimulada*. Se obtiene así una señal amplificada sin afectarla en fase o longitud de onda.

Para poder observar como han ido evolucionando los sistemas de comunicación óptica recurrimos a la gráfica de la figura 2.9, donde se observa cual ha sido la contribución de cada generación de equipos desarrollados.

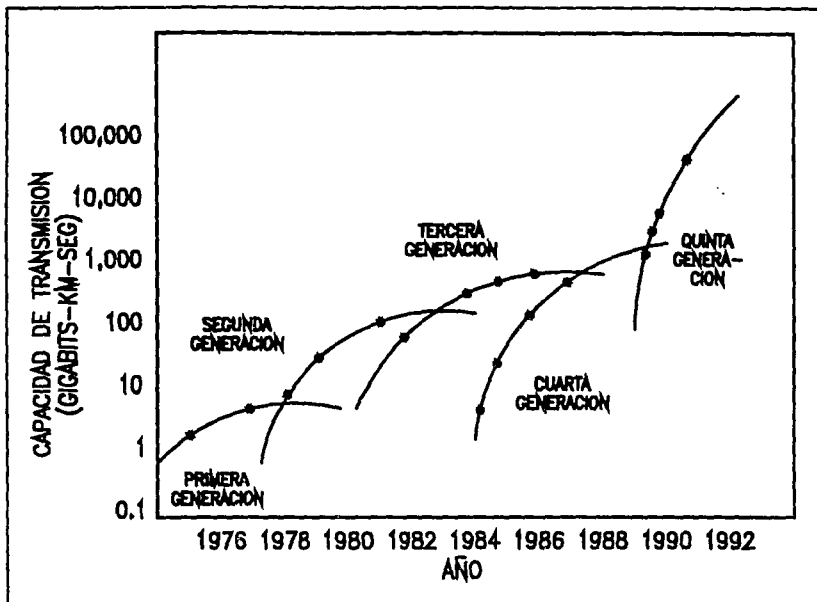


Figura 2.9 Evolución de la capacidad de transmisión de las fibras ópticas

2.5.3.2 Amplificación óptica.

A lo largo del viaje que realiza la luz a través de una fibra óptica, ésta señal decae y sufre distorsión. Por lo anterior, se usan regeneradores electrónicos de señal para restablecer los pulsos ópticos originales. La idea de amplificar la luz directamente por medio de fibras dopadas con tierras raras inició en la década de los 60's con fibras dopadas con neodimio, con las que se llegó a tener señales con una ganancia de varios decibeles.

Temporalmente se abandonó el estudio de la amplificación óptica con este proceso hasta que en 1985 en la Universidad de Southampton, Gran Bretaña, el Dr. David Payne y sus colaboradores demostraron que una fibra dopada con erbio puede amplificar luz a 1550 nm que es la ventana de mayor transmisión de la fibras ópticas [18]. En la figura 2.10 se muestra un amplificador de fibra óptica dopada con erbio. La amplificación óptica es posible empleando fibras dopadas con erbio en un rango de ganancia entre 30 y 40 dB, bombeando a 980 o 1480 nm, inyectándoles únicamente 10 mW de potencia. Los diodos actuales sobrepasan esta cantidad ya que emiten alrededor de 200 mW a 980 y 1480 nm.

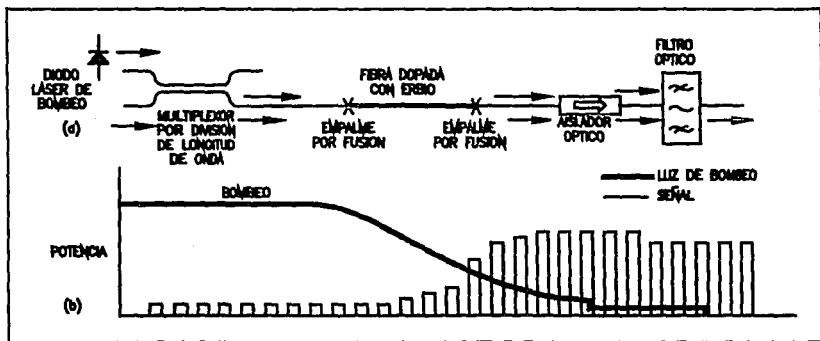


Figura 2.10 Implementación de un amplificador de fibra óptica dopada con erbio

En 1989 la compañía NTT probó con éxito un sistema de comunicación con fibras dopadas con erbio que transportó casi 2 Gb/seg a lo largo de 212 Km [19].

A mediados de ese mismo año NTT y Bell Communications Research, reportaron tasas de transmisión de 10 Gb/seg sobre distancias de 150 Km, con lo que la máxima capacidad de transmisión se elevó hasta 1500 Gb-Km/seg.

La amplificación con fibras dopadas con erbio está teniendo una tremenda influencia en sistemas de comunicación de larga distancia. En esta década tendrán un mayor desarrollo estos sistemas, con aplicaciones en transmisión de canales de video, redes de área local, videoteléfono, etc., por lo que se espera tenga un impacto profundo en la tecnología de fibras ópticas del siglo 21.

2.6 Acopladores de Fibra Optica.

La capacidad de transferir luz de una fibra hacia otra es el objetivo esencial por el que se trabaja para estudiar y fabricar acopladores de fibra óptica.

Un acoplador de fibra óptica es un dispositivo óptico pasivo capaz de dividir, mezclar o combinar la(s) señal(es) óptica(s) que se le inyecten en su(s) rama(s) de entrada, y dirigirlas hacia su(s) ramas de salida.

Existen principalmente dos técnicas de fabricación de acopladores. Una de ellas es mecánica y se realiza por medio del

pulido lateral de dos fibras para obtener proximidad de sus núcleos. La otra consiste en realizar una fusión y adelgazado de dos o más fibras ópticas hasta que compartan la energía luminosa que se les transmita. Los mecanismos de acoplamiento en los que se basa la fabricación de estos dos tipos de acopladores de fibra óptica son: Acoplamiento evanescente y Acoplamiento por batimiento modal. Este último es el mecanismo en el que se basó la fabricación de los acopladores de este trabajo, por lo que se da énfasis en su estudio.

2.6.1 Acopladores por aproximación mecánica.

En este caso, el acoplador consiste de dos guías de onda separadas por una distancia "d", como se muestra en la figura 2.11, en el que se involucra el fenómeno de pulsación óptica entre los campos electromagnéticos de las fibras.

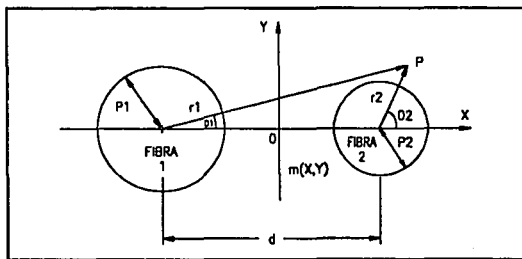


Figura 2.11 Sección transversal de un acoplador por aproximación mecánica.

2.6.1.1 Modelo.

Por intuición se establece que al aproximar dos guías de onda ocurrirá pulsación óptica o transferencia de luz de una hacia otra, si la constante de propagación β de algún modo de la fibra transmitida es decir, en la que se inyecta la luz, es aproximada o se asemeja a alguna constante de propagación de la fibra acoplada.

Se puede descomponer la constante de propagación β en sus dos componentes β_x y β_z , para una guía de onda plana; mientras que para una guía de onda cilíndrica esta constante tiene dos componentes de propagación asociadas con el campo eléctrico y con el campo magnético β_E y β_H [19], respectivamente. De acuerdo a la figura 2.11 para una separación infinita, las constantes se igualan de la siguiente forma [18]:

$$\beta_x = \beta_z = \beta + C_z$$

$$C_z = \frac{K \int_{A_0} (n - n_1) \Psi_1 \Psi_2 dA}{\int_{A_0} \Psi_1^2 dA} \quad 2.21$$

Donde:

C_z : Es el coeficiente de acoplamiento de luz entre las fibras.

A_0 : Es la sección transversal infinita del acoplador.

n : Es el perfil de índice de refracción de la guía acoplada.

Ψ_1 : Es el campo de la guía transmitida.

Ψ_2 : Es el campo en la guía acoplada.

k : Es el número de onda en el espacio libre ($k = 2\pi/\lambda$).

De la ecuación 2.20 Cz es el coeficiente de acoplamiento que tiene un comportamiento tendiente a cero exponencialmente conforme se incrementa la separación entre las fibras.

Si tomamos en cuenta el campo eléctrico transversal [20] que está dado por:

$$E = b^+ \Psi^+ e^{i(\beta z)} + b^- \Psi^- e^{i(\beta z)} \quad 2.22$$

Donde b^+ y b^- son las amplitudes de los modos que se propagan en cada fibra, si existe una separación infinita entre las dos guías de onda, la potencia que se inyecta en la fibra transmitida se considera unitaria y la que se transmite por la fibra acoplada es cero, es decir, el campo de la fibra transmitida se desvanece totalmente, debido a la gran separación, antes de poder interactuar con la fibra acoplada.

Se pueden escribir entonces las ecuaciones de campo correspondientes a la fibra transmitida y acoplada, teniendo una z infinita [19,20]:

$$E_1 = 2b + \Psi_1 e^{i(\beta z)} \cos C(z) \quad 2.23$$

$$E_2 = 2b + \Psi_2 e^{i(\beta z)} \operatorname{sen} C(z) \quad 2.24$$

Si integramos el módulo o intensidad de los campos E_1 y E_2 , para obtener el flujo de potencia en cada fibra sobre la sección transversal infinita, teniendo en cuenta la consideración de que $P_{1(0)}=1$ y $P_{2(0)}=0$, obtenemos:

$$P_1(z) = \text{Cos } C(z) \quad 2.25$$

$$P_2(z) = \text{Sen } C(z) \quad 2.26$$

Por lo que se puede decir que la potencia luminosa oscila de una guía hacia otra de manera análoga al comportamiento de un par de péndulos idénticos.

La variable z denota la longitud a lo largo de las fibras en la cual se presenta una transferencia total de potencia de una fibra a otra. De las ecuaciones 2.20, 2.25 y 2.26 se deduce [20]:

$$Z = \frac{2\pi}{C(z)} = \frac{4\pi}{\beta^+ \beta^-} \quad 2.27$$

Empleando coordenadas polares para los ejes de las fibras, además de utilizar las relaciones que existen entre las funciones de Bessel y la ecuación de eigenvalores [20], se puede expresar el coeficiente de acoplamiento evanescente como:

$$\text{Donde:} \quad C(z) = \frac{(2\gamma)^{1/2}}{\rho} \frac{U^2}{V^3} \frac{k_0 \left(\frac{\omega d}{\rho} \right)}{k_1^2 \omega} \quad 2.28$$

$$\rho = (1 - n_2/n_1)$$

a : Es el radio de los núcleos.

d : Es la distancia entre los ejes ópticos de las fibras.

k_0, k_1 : Son funciones de Bessel modificadas de 2° orden.

U, W : Son los parámetros de los modos transversales donde se cumple que: $U^2 + W^2 = V^2$

V : Es la frecuencia normalizada.

Para que la energía se distribuya uniformemente en la nueva guía de onda, es necesario que sean similares las constantes de propagación de las fibras y la longitud de interacción necesaria es pequeña. Por otro lado, cuando la luz está bien confinada en los núcleos, se hace grande la longitud de interacción que debe participar en el acoplamiento para que se presente el intercambio de energía.

En la figura 2.12, se muestra la dependencia del coeficiente de acoplamiento con respecto a la frecuencia normalizada V [2,20].

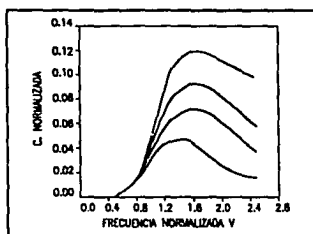


Figura 2.12 Dependencia del coeficiente de acoplamiento normalizado con el parámetro V o frecuencia normalizada.

2.6.1.2 Fabricación.

Los acopladores por aproximación mecánica se fabrican fijando firmemente las fibras con algún adhesivo en bloques de cristal, para después pulir estos bloques hasta descubrir el área que está en contacto con el núcleo de ellas. Los dos bloques se ponen en contacto y se ajustan haciendo coincidir los núcleos para optimizar

el acoplamiento. La tasa de acoplamiento usual es del 50% (3 dB), pero se pueden mejorar el pulido y el alineamiento de los dos bloques para lograr otras tasas de acoplamiento. La atenuación en exceso típica puede ser hasta de 0.2 dB, en los mejores casos.

Este tipo de acopladores se pueden fabricar con fibra que mantiene la polarización para lograr dos objetivos: mantener la polarización de la señal y seleccionar la polarización [21]. En el primer caso, se igualan las constantes de propagación de las dos polarizaciones a lo largo de la fibra y en el segundo caso, sólo una de las constantes de propagación se mantiene mientras se trata de lograr un desalineamiento lo mayor posible, en la otra polarización. Con estos acopladores se puede lograr selectividad en longitud de onda utilizando fibras de dimensiones y características diferentes de tal forma que las constantes de propagación se igualen [21] a una sola longitud de onda.

2.6.2 Acopladores por Fusión.

El acoplador por fusión se fabrica entrelazando dos o más fibras, después de retirarles el recubrimiento, para posteriormente estirarlas y fusionarlas por medio de una flama de alta pureza, para producir un acoplador de cuatro puertos como el que se muestra en la figura 2.13. El método de fabricación convencional, así como los equipos y materiales empleados en particular en este trabajo, se describen en el capítulo 3.

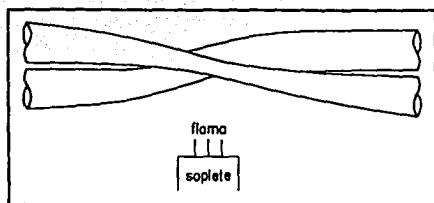


Figura 2.13 Geometría de un acoplador de 2 x 2 puertos.

2.6.2.1 Modelo.

Para los acopladores por fusión, el mecanismo por el que se logra acoplamiento óptico entre las fibras involucradas consiste en lograr que los núcleos de éstas mantengan un contacto físico estrecho, aunque en realidad, debido al ensanchamiento del pulso ó haz luminoso observado en la figura 2.14, los núcleos se desvanecen y la potencia óptica se transmite por el revestimiento de las fibras, que forma una guía de onda con el medio que la rodea, que comúnmente es el aire. La geometría resultante de la fusión de dos fibras se explica en el modelo de fusión, encontrado en la literatura y descrito posteriormente en este capítulo.

Para que se presente este mecanismo de acoplamiento, las fibras que compondrán el acoplador se funden y se estiran, hasta formar una nueva guía de onda, como se muestra en la figura 2.15.

El método de fabricación utilizado en este trabajo, se presenta en el capítulo 3.

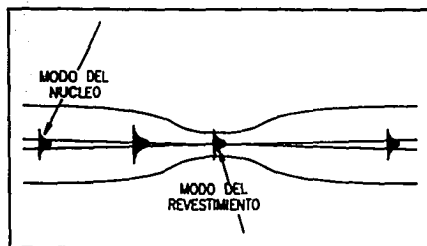


Figura 2.14 Ensanchamiento del campo a través de la región de fusión de un acoplador unimodo.

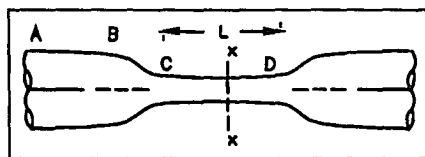


Figura 2.15 Diagrama esquemático de un acoplador unimodo por fusión.

Si analizamos por secciones la estructura ideal del acoplador por fusión, mostrada en la figura 2.15, podemos observar que en la sección AB se encuentran las entradas de las fibras. En la sección BC, las fibras están fundidas y adelgazadas con un ángulo tal que no existen pérdidas, idealmente. En la región CD, la sección transversal de las fibras tienen la forma mostrada en la figura 2.16, cuyas dimensiones típicas aproximadas son de $10 \times 20 \mu\text{m}$.

Una señal óptica que se propaga a lo largo de la fibra transmitida en la sección AB, sufre una expansión del campo, es decir, se expande mientras avanza por la sección BC hasta que se convierte en un modo propagándose por el revestimiento, que forma una guía de onda con el aire, cuyo índice de refracción es unitario. Cuando este modo alcanza la sección CD, excita los modos simétrico y antisimétrico de menor orden [22], de la nueva guía de onda formada, como ya se dijo, por el revestimiento de las fibras, cuyo índice de refracción es n_2 y el aire n_3 .

De acuerdo a la simetría mostrada en la figura 2.16, se puede obtener la potencia a la salida de una de las ramas de la siguiente forma [22]:

$$P = P_0 \cos^2 C(z) \quad 2.29$$

Donde $C(z)$ es el coeficiente de acoplamiento que depende de la distancia Z de interacción de las fibras, dado por [22,23]:

$$C(z) = \int_0^z |\beta_e - \beta_o| dz \quad 2.30$$

Donde:

β_e : Es la constante de propagación del modo par ó simétrico de menor orden.

β_o : Es la constante de propagación del modo impar ó antisimétrico de menor orden.

Se puede intuir de la ecuación 2.29 y de la figura 2.15, que el coeficiente de acoplamiento es función de la longitud de interacción Z , es decir, es función de la longitud de la región CD en la cual se fusionan las fibras. Cuando esta región se alarga lo

suficiente, digamos $z > 20$ mm, se presenta el fenómeno de defazamiento de la polarización de la luz, en consecuencia la luz se separa en sus dos polarizaciones X y Y, cuyos coeficientes de acoplamiento son:

$$C(z)_{x,r} = \int |\beta_s^{x,r} - \beta_o^{x,r}| dz \quad 2.31$$

En tanto más se alarga la región de fusión del acoplador, el defazamiento se refuerza, pudiendo llegar hasta un defazamiento completo de las dos polarizaciones, resultando que a la salida, una polarización se transfiera en un 100% hacia la fibra acoplada y la otra polarización no se transfiera.

Una característica importante de observar en los acopladores es que para longitudes de la región de fusión menores a 20 mm, el defazamiento de polarización no se presenta y la respuesta espectral es cuasisenoidal debido únicamente a las variaciones de las dimensiones físicas del acoplador y a las consecuentes variaciones de la frecuencia normalizada V, que se presentan durante el estirado, como se podrá observar en el capítulo 4 de este trabajo, en el que se estudia la respuesta en función de la longitud de onda aplicada a los acopladores fabricados.

Se pueden fabricar acopladores que aprovechen este fenómeno, estos son utilizados como polarizadores en aplicaciones de sensado e interferometría. Sin embargo, en los acopladores fabricados durante este trabajo, la región de fusión nunca sobrepasó los 20 mm de longitud por lo que el estudio del defazamiento de polarización no es fundamental.

2.6.2.2 Cantidad de acoplamiento.

El acoplamiento por batimiento modal se puede modelar para dos condiciones básicas: acoplamiento por fusión fuerte y acoplamiento por fusión débil.

El comportamiento del acoplador por fusión, donde se presenta el batimiento modal, se puede describir completamente una vez que se encuentra el coeficiente $C(z)$ ó en su caso, los coeficientes C_z^x y C_z^y . Pero desafortunadamente es muy difícil calcular la integral de las ecuaciones 2.30 y 2.31. Sin embargo, si la región de fusión en donde se transmite el modo fundamental por el revestimiento mostrada en la figura 2.15, tiene una longitud mayor a 5 mm, aproximadamente, su sección transversal toma naturalmente una forma tal que se asemeja a un rectángulo, como se ilustra en la figura 2.16, que permite aproximar el coeficiente $C(z)$ integrando únicamente para un sólo modo propagado.

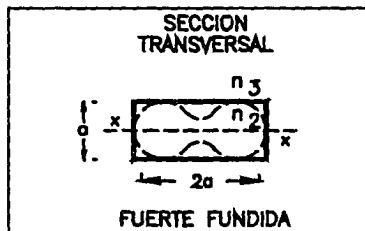


Figura 2.16 Geometría resultante de la sección transversal de un acoplador por fusión.

Para un acoplador con *fusión fuerte*, la sección transversal puede medir hasta $4 \times 8 \mu\text{m}$; con estas dimensiones el valor de la frecuencia normalizada V es alta ($V=20$ aprox., $\lambda=1300 \text{ nm}$), por lo que según las referencias [4,22,23], las constantes de propagación β_0 y β_1 no toman en cuenta la sección transversal detallada en forma de doble campana mostrada en la figura 2.17, pudiéndose aproximar por medio de una guía de onda rectangular, representada en la figura 2.16, cuya constante de acoplamiento se denota:

$$C(z) = \frac{3\pi\lambda}{32n_2a^2} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{1}{V}\right)^2} + \frac{1}{\left(1 + \frac{n_3^2}{n_2^2} \frac{1}{V}\right)^2} \right] \cdot Z \quad 2.32$$

Donde la potencia de salida está dada por la ecuación 2.29 y V es la frecuencia normalizada. Un modelo similar a la guía de onda rectangular lo constituye la aproximación a una guía de onda elíptica propuesta por algunos investigadores [23], ilustrada en la figura 2.18.

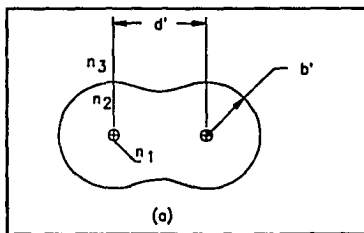


Figura 2.17 Sección transversal "doble campana" de un acoplador unimodo.

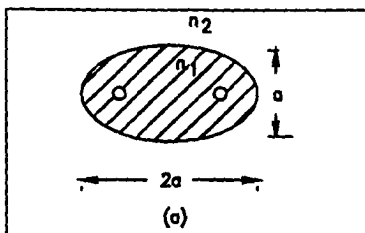


Figura 2.18 Modelo de fusión de guía de onda elíptica de un acoplador unimodo.

En algunos acopladores, el proceso de fusión no logra acercar demasiado las secciones transversales de las fibras, por lo que se considera *fusión débil* ya que la sección resultante queda en forma de dos cilindros tocándose, como se muestra en la figura 2.19.

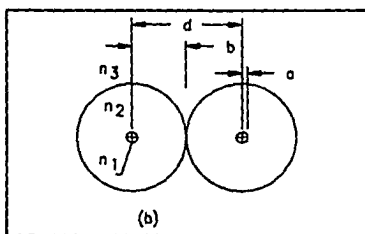


Figura 2.19 Sección transversal de la región de acoplamiento débil de un acoplador unimodo.

Para tal caso, el coeficiente de acoplamiento $C(z)$ está dado por [9,22]:

$$C_x + C_y = \frac{2^{7/2} (n_2^2 - n_3^2)^{1/2} U_m^2}{n_2^3 a \pi^{1/2} \nu^{5/2}} \quad 2.33$$

$$C_x - C_y = \frac{2^{5/2} (n_2^2 - n_3^2)^{3/2} U_m^2}{n_2^3 a \pi^{1/2} \nu^{5/2}} \quad 2.34$$

En la que $U_m=2.405$ se le llama frecuencia de corte normalizada del modo fundamental [2,6].

Para los modelos anteriores, en la literatura se propone que la energía pasa alternadamente de un lado a otro, y que la periodicidad del fenómeno depende de las diferencias de las constantes β , de propagación. En otras palabras, consecuencia de la resultante de los modos superpuestos que intervienen en el acoplamiento. En la región de acoplamiento, las fibras se funden hasta el punto donde ocurre el corte de los modos del núcleo y los modos de la estructura fusionada son excitados adiabáticamente ó sin pérdidas; en otras palabras, la luz que entra por un puerto, excita los modos simétrico y antisimétrico de menor orden como se ilustra en la figura 2.20.

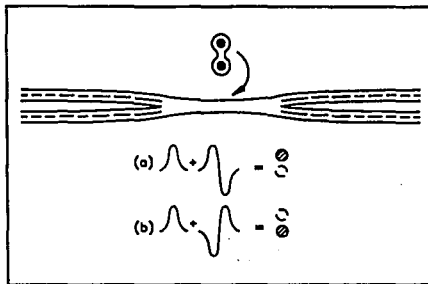


Figura 2.20 Proceso de acoplamiento por batimiento de modos.

En el caso a) los modos excitados se refuerzan.

En el caso b) los modos excitados se debilitan.

Otro fenómeno importante que le ocurre al acoplador fabricado por fusión, es el estiramiento que sufre en forma simultánea a la fusión. Para explicar lo que ocurre, también se propone un *modelo de estirado* [23], en el que se explica que durante el calentamiento de las fibras, en donde se forma la sección cuasi-elíptica que se propone mediante el modelo de fusión, éstas se estiran simultáneamente y debido al adelgazamiento que sufren, se tiene una estructura resultante como la mostrada en la figura 2.21.

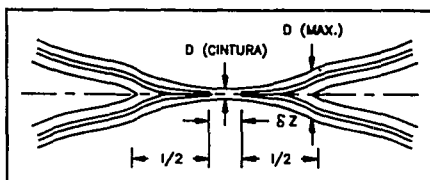


Figura 2.21 Modelo de estirado de un acoplador unimodo.

El modelo de estirado nos permite establecer que la estructura del acoplador conserva sus razones dimensionales. Por ejemplo, en la figura 2.17, la razón b'/d' es constante y de la misma forma para las dos guías circulares de la figura 2.19, la razón $d(z)/b(z)=2$, donde el valor inicial de b es igual al radio inicial de la fibra.

Como primera aproximación, se ha reportado que los parámetros dimensionales transversales del acoplador, siguen una ley parabólica [23]. Empleando este criterio, el núcleo de la fibra estirada es:

$$a(z) = a_0(1 + \gamma z^2) \quad 2.35$$

Donde a es el radio del acoplador en la cintura.

Podemos emplear el coeficiente de Poisson ν , que nos permite determinar el factor γ , así:

$$\frac{dD}{D} = -\nu \left(\frac{dz}{z} \right) \quad 2.36$$

Donde dD/D es la disminución relativa del diámetro de la cintura. dl/z es la elongación relativa de la longitud de calentamiento Δz .

Se conoce que para el vidrio en fusión, $\nu = 1/2$, por lo que integrando la ecuación 2.36, se tiene:

$$D = D_{inc} e^{\left(-\frac{l}{2\Delta z}\right)} \quad 2.37$$

D_{inc} : es el diámetro inicial de la fibra.

l : es el estiramiento total.

Empleando las ecuaciones 2.36 y 2.37, obtenemos γ que permite calcular en todos los puntos de z , las variables geométricas transversales, D y a .

$$\gamma = \frac{4 \left[e^{\left(-\frac{l}{2\Delta z}\right)} - 1 \right]}{(\Delta Z + l)} \quad 2.38$$

En donde: $\Delta Z = Z_f - Z_i$.

El empleo de los modelos descritos en esta sección, tanto el de fusión como el de estirado, nos permiten un mejor entendimiento del análisis y control del acoplamiento óptico ocurrido en dos fibras durante la fabricación de acopladores unimodo.

2.6.2.3 Fabricación.

La técnica de fabricación de acopladores por el método de fusión y estiramiento bicónico, consiste básicamente en entorchar las fibras ópticas, fijarlas y estirarlas mediante el efecto combinado de la aplicación de una tensión mecánica y de una fuente de calor controladas. La potencia óptica de una o ambas ramas se monitorea hasta alcanzar la tasa de acoplamiento deseada, aprovechando el fenómeno de acoplamiento modal que ocurre en la región de fusión. Las fibras a acoplar se pueden cubrir con sustancias sólidas de índice de refracción bajo, para que obtengan mayor estabilidad mecánica. Además, las fibras se entrelazan (o entorchan) y además, se mantienen fijas y estiradas hasta alcanzar la tasa de acoplamiento deseada. Finalmente, el acoplador se protege mediante un encapsulado especial. El método de fabricación se explica con más detalle en el capítulo 3 de este trabajo.

2.6.3 Otros tipos de acopladores.

Existen otros tipos de acopladores que se fabrican con utilidades específicas en redes de área local (LAN). Por ejemplo, se puede establecer una LAN en topología bus, conectando los equipos a través de acopladores tipos T. Así mismo, para la interconexión de las terminales en un sólo nodo, como en las LAN con topología estrella.

Un acoplador T está formado por tres puertos, como se muestra en la figura 2.22, los cuales toman una señal de una rama para manejar un dispositivo terminal. Generalmente se construyen

acoplando una fibra externa a una fibra guía en una configuración perpendicular o tipo T. Es usual en este tipo de acoplador que las tasas de acoplamiento no sean iguales en las diferentes ramas de salida, ya que se utiliza la señal de la rama de menor tasa de acoplamiento únicamente como muestreo ó control de algún dispositivo.

Los acopladores en estrella cuentan con más de tres puertos y en algunos casos pueden llegar a tener decenas de estos. En este tipo de acoplador, la luz de entrada se mezcla en un elemento central y la luz de salida emerge de éste, pasando a través de las fibras. Formalmente se representan en forma de estrella aunque de manera real no conserven ésta geometría.

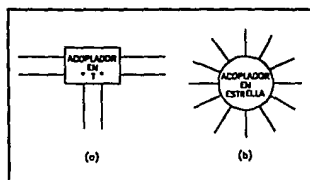


Figura 2.22 Acoplador en "T" (a) y acoplador en estrella (b).

En seguida se enlistan las variables que es necesario conocer para poder identificar los tipos de acopladores existentes:

- Tipo de fibra.
- Mecanismo de acoplamiento.
- Atenuación por Inserción.
- Tasa de acoplamiento.
- Número de puertos.

Existen varios tipos de acopladores que se pueden identificar en base a estas variables. Algunos de estos son:

- Acoplador en estrella.
- Acoplador en T.
- Acoplador direccional.
- Acoplador bidireccional.
- Divisor.
- Mezclador.
- Multicanalizador por división de longitud de onda.
- Acoplador pasivo.
- Acoplador activo.
- Acoplador NxM.

2.6.4 Aplicaciones de Acopladores.

Los acopladores de fibra óptica en general, tienen diversas aplicaciones en telefonía, distribución de señal de TV de alta definición, sensores, instrumentación, etc. Se puede decir que entre sus principales funciones se encuentran: reducir la cantidad de componentes en un sistema óptico, interconexión de todos los nodos en una red, dividir, mezclar y combinar diferentes señales para reducir el costo de construcción y optimizar el funcionamiento de sistemas de comunicación óptica.

En algunas ocasiones son utilizados para dividir una señal óptica de entrada en dos ó más señales de salida para controlar varios dispositivos al mismo tiempo, en otras aplicaciones, su función consiste en combinar dos o más entradas que provengan de

dispositivos separados para proporcionar señal a otros que se conecten en sus salidas; funciones que se ilustran en la figura 2.23. Algunas de sus aplicaciones especializadas son las de multiplexaje y demultiplexaje por división de longitud de onda. Estos acopladores son análogos a los equipos llamados Multiplexores por División en Longitud de Onda (WDM), son empleados para combinar o dividir señales de diferentes longitudes de onda hacia ó desde una sola fibra óptica unimodo.

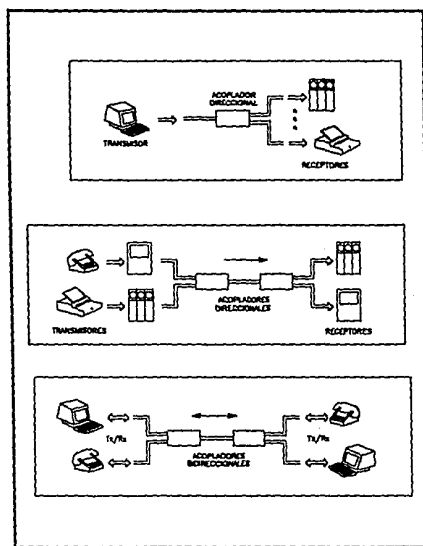


Figura 2.23 Aplicaciones de acopladores en comunicaciones ópticas.

1. Control de dispositivos.
2. Enlace direccional.
3. Enlace bidireccional.

En la figura 2.24 se observa un ejemplo de sistema de comunicación que utiliza acopladores unimodo, donde se logra la multicanalización por división de longitudes de onda. En estas aplicaciones, una sola fibra guía dos señales viajando en la misma dirección (λ_1, λ_2) producidas por fuentes diferentes. En el extremo de recepción, las dos longitudes de onda guiadas se separan mediante un acoplador diseñado y fabricado para ser selectivo a éstas. Con este tipo de acopladores se implementan enlaces bidireccionales de datos y se incrementa la capacidad de transmisión de sistemas ya establecidos al reducir la longitud de fibra necesaria para establecer un sistema de comunicación Full-Duplex.

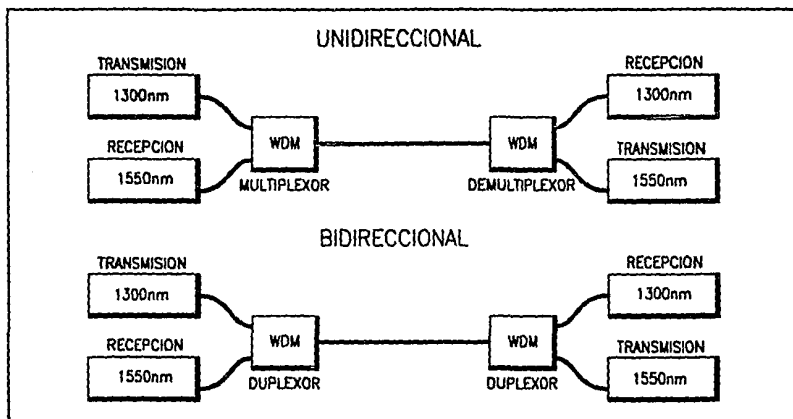


Figura 2.24 Sistema de comunicación Full-Duplex en el que se emplean acopladores WDM.

Los acopladores unimodo también se aplican en sistemas de medición y sensado formando parte de equipos como reflectómetros ópticos en el dominio del tiempo (OTDR) y en sensores interferométricos de fibra óptica.

Bibliografía

- [1] Lenrow, C.M. y Bhagavatula, V.A. : "Advanced fiber designs", Laser Focus Electrooptics, 1985, pp. 82-92.
- [2] Senior, J.: "Optical fiber communications, principles and practice", (Prentice-Hall, 1985).
- [3] Jeunhomme, L.B. "Single-mode fiber optics", (Marcell Dekker, New York, 1983).
- [4] Payne, F.P. y Hussey, C.D.: "Fibre-taper devices", Department of electronics and information engineering, Southampton University, 1985.
- [5] Kao, K.C. y Hochman, G.A.: "Dielectric-fibre surface waveguide for optical frequencies", IEE Proc., 1966, Vol. 113, pp. 1151-1158.
- [6] Cherin, A.H.: "An introduction to optical fibers". (McGraw - Hill, New York, 1982).
- [7] Kraus, J.D.: "Electromagnetics", (McGraw-Hill, México, 1989).
- [8] Snyder, W.A.: "Coupled-mode theory for optical fibres", Journal of the Optical Society of America, 1972, Vol. 62, pp. 1267-1277.
- [9] Marcuse, D.: "Light transmission optics", (Van Nostrand Reinhold Co., U.S.A. 1972).
- [10] Sánchez, G.S. y Martínez, P.F.: "Medición del radio de campo modal en fibras ópticas unimodo". Optica, 1993, pp.3-13.
- [11] Ayres, F.: "Optics", (McGraw-Hill, México, 1980).
- [12] Cetto, A.M.: "La Luz", (La Ciencia, México, 1987).

- [13] Reed, W.A., Cohen, L.G. y Shang, Hen-Tai.: "Tailoring optical characteristics of dispersion-shifted lightguides for applications near 1.55 μm ", AT&T Technical Journal, 1986, pp.105-122.
- [14] Dutta, N.K.: "III-V Device technologies for lightwave applications", AT&T Technical Journal, 1989, Vol. 68, pp. 5-18.
- [15] "Optics Guide 5", (Melles Griot Co., 1993).
- [16] Martínez, P.F., Toledo Alvarez, J.A. y Ramírez Niño, J.T.: "Análisis y fabricación de acopladores de fibras ópticas", Boletín IIE, 1992, Vol. 16, pp. 19-22,27-28.
- [17] Desurvire, E.: "Lightwave communications: the fifth generation", Scientific American, 1992, pp. 114-121.
- [18] Zyskind, J.L., Giles, C.R. y Simpson, J.R.: "Erbium-doped fiber amplifiers and the next generation of lightwave systems", AT&T Technical Journal, 1992, pp. 52-62.
- [19] Kawasaki, B.S., Kawachi, M. y Hill, K.O.: "A single mode-fiber coupler with a variable coupling ratio", IEEE/OSA Journal Lightwave Technology, 1983.
- [20] Toledo Alvarez, J.A.: "Análisis y fabricación de acopladores con fibras ópticas para sistemas de comunicaciones", Tesis de Maestría, CENIDET, 1991.
- [21] Kawakami, S. y Nishida, S.: "Characteristics of a doubly clad optical fiber with a low-index cladding", Quantum Electronics, 1974.

- [22] Payne, F.P., Hussey, C.D. y Yataki, M.S.: "Modelling fused single mode fibre couplers", Electronics Letters, In press.
- [23] Bures, J., Lacroix, S. y Lapierre, J.: "Analyse d'un coupleur bidirectionnel à fibres optiques monomodes fusionnées", Applied Optics, 1983, pp. 1918-1922.

Fabricación de acopladores.

3.1 Introducción.

En este capítulo se describe la técnica de fusión y estiramiento bicónico que se utilizó para la fabricación de los acopladores unimodo, así como la forma en que se obtuvo la flama necesaria para fusionar las fibras. Se explican las ventajas que presenta el método FEB y se describe el encapsulado prototipo que se empleó para proteger los acopladores.

El fabricar acopladores de fibra óptica unimodo a 1300 nm, representa un reto considerable debido a las dimensiones tan pequeñas del núcleo y del revestimiento, de 8 y 125 μm , respectivamente. Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación sobre dispositivos de fibra óptica, desarrollado por el grupo de fibras ópticas del Departamento de Comunicaciones del IIE; del que se espera obtener la suficiente reproducibilidad para transferirlos a la industria.

El tipo de acoplador que se decidió fabricar es el acoplador de fibra óptica unimodo a 1300 nm de 2 puertos de entrada y 2 de salida.

En la figura 3.1 se muestra un esquema de un acoplador 2 x 2.

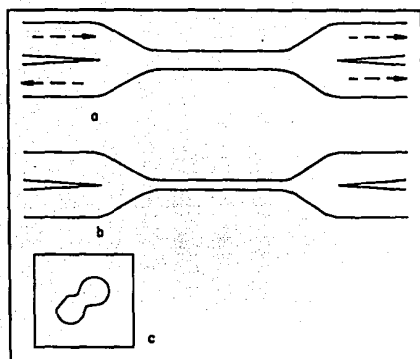


Figura 3.1 Esquema de un acoplador 2x2.

El número de puertos obedece a la inquietud de probar un enlace bidireccional (Full-Duplex) con acopladores selectivos en longitud de onda. Como se explica posteriormente, se eligió el método de fusión y estiramiento bicónico para la fabricación por las ventajas que presenta respecto a otros métodos.

3.2 Métodos de fabricación de acopladores.

Se han utilizado en otros centros de investigación varios métodos de fabricación de acopladores como: ataque químico y aproximación mecánica; el sistema de fabricación utilizado en este trabajo es el método de Fusión y Estiramiento Bicónico (FEB), que se explica en el punto 3.3.

La técnica de ataque químico emplea el dispositivo mostrado en la figura 3.2 y consiste en retirar el acrilato que cubre a las fibras para ponerlas en contacto al trenzarlas, después se introducen en un contenedor de cuarzo cuyas entradas 1 y 2 son selladas posteriormente.

La entrada 3 se bloquea temporalmente para vertir en el contenedor, por la entrada 4, una solución corrosiva de $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}$ compuesta por ácido fluorhídrico y fluoruro de amonio en proporción 1:4. El contenedor tiene una tapa con rosca a través de la que se puede dar tensión controlada a las fibras para mantenerlas en contacto, mientras la solución corrosiva reduce los diámetros de los revestimientos hasta lograr poner en contacto los núcleos de las fibras para provocar el acoplamiento de campos evanescentes [1].

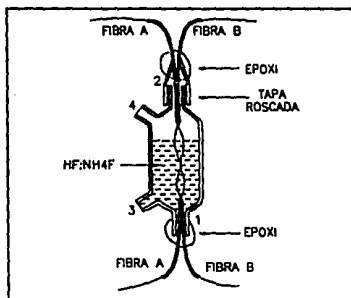


Figura 3.2 Diagrama esquemático de la técnica de ataque químico.

Se logra un monitoreo del acoplamiento óptico al inyectar el modo fundamental [2] en cualquiera de las fibras y detectándolo en los extremos de salida. El proceso se detiene cuando se alcanza la tasa de acoplamiento deseada, que se define en el capítulo 4, para liberar la solución corrosiva y lavar el contenedor.

La técnica de *aproximación mecánica*, consiste en el acercamiento mecánico de los núcleos de las fibras para que compartan la energía aplicada a la entrada de una de ellas, proceso llevado a cabo por desgaste mecánico lateral de las fibras a acoplar, para retirar el material del revestimiento hasta lograr poner en contacto los núcleos. Es necesario aproximar los núcleos de tal forma que solamente exista una separación entre ellos de unas cuantas longitudes de onda, para que se presente el acoplamiento de la energía transportada por acoplamiento evanescente. Las fibras se fijan en un bloque de cuarzo como se muestra en la figura 3.3 a) insertándolas en una hendidura de radio de curvatura predeterminado para facilitar el control del proceso de pulido y de longitud de la región de acoplamiento.

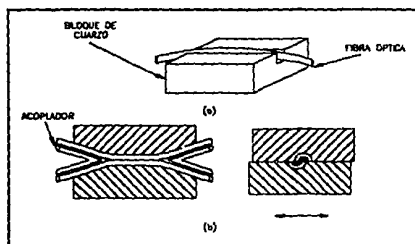


Figura 3.3 Acoplador por Aproximación Mecánica.

Inmediatamente se comienza a desgastar la superficie de la fibra para dejar al descubierto la región a acoplar, repitiéndose este procedimiento para las dos fibras. Se monitorea la tasa de potencia necesaria, al inyectar luz por uno de los extremos de la fibra y con un fotodetector se mide la señal para detener el pulido en el punto exacto. Para formar el acoplador, se colocan frente a frente las dos fibras pulidas por medio de dos microposicionadores que le dan precisión al armado del mismo y, en seguida, se pegan firmemente los dos bloques; adicionando la cantidad necesaria de aceite de igualación de índice de refracción en la región acoplada para disminuir las pérdidas.

La técnica de *fusión y estiramiento bicónico* se ilustra en la figura 3.4 y se eligió debido a las siguientes ventajas:

- No se emplea desgaste del material con que son fabricadas las fibras, reduciéndose al mínimo la posibilidad de que se presenten pérdidas por impurezas en el núcleo o fracturas.
- Es posible regular la fuerza de estirado por medio del voltaje aplicado al dispositivo empleado para ello.
- La presión y pureza de los gases empleados es adecuada para no modificar las características químicas de los núcleos de las fibras.
- El procedimiento es sencillo y las medidas de seguridad necesarias son fáciles de implementar.
- El proceso toma alrededor de 20 minutos para la fabricación y caracterización de cada acoplador.

3.3 Sistema de Fabricación Empleado.

3.3.1 Equipo Utilizado.

En el IIE se ha implementado la técnica de fusión y estiramiento biónico (FEB) con la cual se trata de reducir las pérdidas por atenuación, reduciendo al mínimo las variables sin controlar y utilizando equipo especializado, como lo muestra la figura 3.4.

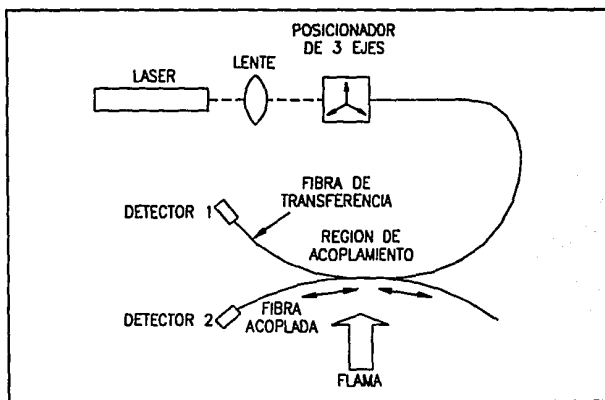


Figura 3.4 Diagrama esquemático del Método FEB.

Los materiales y el equipo requeridos para la fabricación son:

- Materiales: Fibra óptica unimodo a 1300 nm, solución solvente de diclorometano y acetona, dispositivo de encapsulado y sellador de silicón tipo acético.
- Dispositivo de estirado.
- Bases y componentes ópticos: Microposicionadores y objetivos de

microscopio.

- Diodo laser de semiconductor.
- Controlador de diodos laser.
- Analizador de forma de onda.
- Quemador tipo microsoplete y accesorios (reguladores y mangueras).
- Boquilla del quemador.
- Equipo de medición: Osciloscopio, multímetro digital y medidor de potencia óptica.

El quemador y la boquilla se describen en la sección 3.3.2.3 y 3.3.2.4., respectivamente. Las especificaciones del monocromador y del detector de germanio se describen en el capítulo 4 debido a que se utilizaron en la caracterización de los acopladores.

3.3.1.1 Materiales.

Los materiales empleados básicamente para la fabricación de caopladores fueron los que se muestran en la figura 3.5 y se enlistan a continuación:

- Fibra óptica unimodo a 1300 nm, cuyas características aparecen en el apéndice A.
- Cortador de punta de diamante tipo pluma.
- Dispositivo de encapsulado.
- Sellador de silicón tipo acético.

Figura 3.5 Materiales básicos en la fabricación de acopladores.

- a) Fibra óptica, b) Cortador, c) Dispositivo de encapsulado,
- d) Sellador de silicón.

3.3.1.2 Dispositivo de Estirado.

Las fibras se estiran en forma horizontal uniformemente de manera que el área de contacto de éstas con la flama es amplia y se puede controlar la longitud de estirado.

La técnica de estirado usada en el IIE consiste de un estiramiento por campo magnético, como se ilustra en la figura 3.6, que cumple con las necesidades de estiramiento uniforme y control de la longitud deseada, así como la disminución de disturbios ocasionados por elementos mecánicos en el desplazamiento. Esta etapa del proceso consiste en la creación de un campo magnético alrededor de un núcleo [3] que sujeta uno de los extremos de las

fibras a acoplar. Su funcionamiento es sencillo debido a que cuando las fibras se comienzan a calentar, su oposición mecánica al estirado disminuye y el campo generado atrae el núcleo y estira las fibras provocando la fusión.

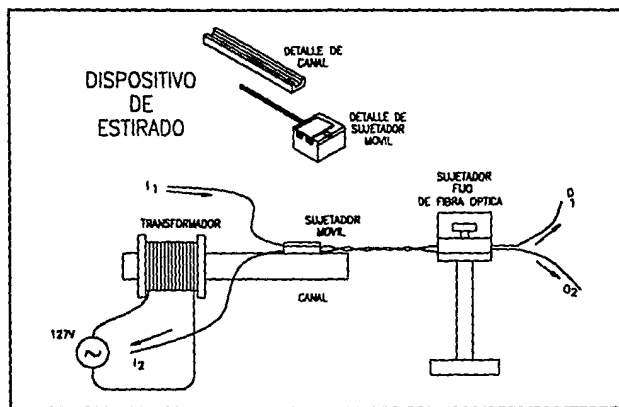


Figura 3.6 Dispositivo de estirado por campo magnético.

3.3.1.3 Bases y Componentes Ópticos.

Se utilizaron varios elementos ópticos para la sujeción de las fibras y del sistema de estirado tales como: Postes, bases, etapas de traslación, microposicionadores, objetivos de microscopio y sujetadores de las marcas Newport Co. y Melles Griot Inc. Estos dispositivos se muestran en la figura 3.7

Figura 3.7 Bases y componentes ópticos que se emplearon en la sujeción de las fibras ópticas.

Todos los experimentos de fabricación se realizaron sobre una mesa óptica de suspensión de aire que cuenta con entradas para montar firmemente atornillados los elementos ópticos como: Microposicionadores, postes, etapas de traslación (con la cual se aleja o aproxima la flama a las fibras entorchadas y descubiertas), quemador y elementos de sujeción utilizados para armar el dispositivo de estirado y el de encapsulado. Además se utilizaron instrumentos de medición como: Osciloscopio y multímetro digital.

3.3.1.4 Diodo Laser.

La operación del diodo laser se puede resumir en la gráfica de voltaje aplicado contra corriente de emisión que se obtuvo experimentalmente durante la puesta en operación del equipo Controlador de Diodos Laser Melles Griot DLD0165, mostrada en la figura 3.8. El elemento utilizado fué un diodo Fujitsu FLD130D4BJ-R operando a una longitud de onda de 1300 nm, a una corriente típica de 25 mA y a una potencia óptica acoplada a la fibra óptica de 1.25 mW.

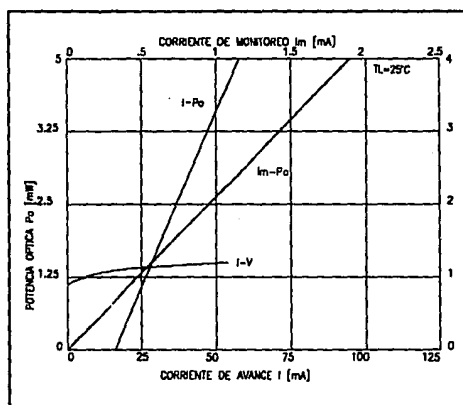


Figura 3.8 Curva experimental de operación del diodo laser Fujitsu.

3.3.1.5 Controlador de Diodos Laser.

Se empleó el controlador de diodos laser Melles Griot DLD0165, el cual consiste de una fuente de corriente de bajo ruido y un controlador muy preciso de enfriadores termoelectricos que puede realizar graficas de comportamiento de lasers y se le pueden introducir senales para modular la corriente inyectada. El control de temperatura nos permiti6 estabilizar y sintonizar tanto la longitud de onda como la frecuencia de emision para no disminuir el tiempo de vida del laser.

La retroalimentacion del voltaje del laser, es el unico parametro del control de temperatura que usa el voltaje de avance del diodo como la senal de error en el lazo de estabilizacion. Se logro alcanzar una gran estabilizacion con esta facilidad del instrumento, ya que en realidad se monitoreo y controlo la temperatura de la juntura del diodo, representada por el voltaje de avance, en vez de controlar la temperatura del disipador.

3.3.1.6 Analizador de Forma de Onda.

Este dispositivo es un transductor Marca Photodyne modelo 1600XP que convierte senales opticas en electricas. Puede ser usado para detectar senales de la segunda y tercera ventanas de transmision [2,4] ubicadas dentro de la curva de atenuacion espectral de las fibras opticas. El rango correspondiente de longitud de onda de las senales que se pueden convertir es de 800 a 1600 nm. La respuesta en frecuencia del dispositivo va desde DC (0 Hz) hasta 150 MHz.

Cuenta con un conector Amphenol tipo SMA que permite el acoplamiento de fibras ópticas conectorizadas; está equipado con una salida de conector BNC macho para conexión coaxial con osciloscopio.

El instrumento está calibrado para su máxima transmisión a 1300 nm. Se alimenta con una fuente de poder de 12 VDC.

Sus especificaciones aparecen en la siguiente tabla:

Sensor	APD Germanio
Apertura de entrada	Lente de 18 mm diam. 0.3 NA
Respuesta espectral	800 - 1600 nm
Longitud de onda de calibración	1300 nm
Precisión	± 15% a 1300 nm
Interface de salida	BNC 50 Ω
Fuente de poder	+ 12 DVC, 150 mA max.
Temperatura de operación	10 a 40°C
Humedad	0 a 95% No condensada
Dimensiones	94 x 122 x 38 mm
Peso	0.5 Kg

Tabla 3.1 Características del analizador de forma de onda.

3.3.2 Sistema de Fusión.

El sistema de fusión es un sistema experimental basado en la obtención de una flama fina de dimensiones 6x1x6 mm a partir de la combustión de dos gases: Oxígeno y Propano. Este sistema utiliza un microsoplete para la mezcla de los gases y una boquilla para obtener una flama de las características mencionadas.

3.3.2.1 Gases.

Como se estudió en el capítulo 2, existen mecanismos de atenuación al propagarse señales normalmente dentro de una fibra óptica; estos mecanismos se presentan igualmente cuando se fusionan fibras ópticas [5], aunado a otros fenómenos que provocan pérdidas debido al adelgazamiento de la guía de onda resultante de la fusión de las dos fibras. Además, existe la absorción extrínseca producida por la contaminación con impurezas y humedad debido a los radicales OH⁻ que existen en suspensión en los gases y en el ambiente, que degradan las fibras reduciendo su vida útil, aparte de volverlas muy frágiles a la vibración mecánica. Por lo anterior, se requiere utilizar gases de alta pureza libres de contaminantes para obtener una flama estable y pura. La conexión existente entre los tanques de los gases empleados se muestra en la figura 3.9. Los gases utilizados son extrasecos, de grado instrumental, que cumplen los requisitos mencionados, cuyas características son:

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

3.3.2 Sistema de Fusión.

El sistema de fusión es un sistema experimental basado en la obtención de una flama fina de dimensiones 6x1x6 mm a partir de la combustión de dos gases: Oxígeno y Propano. Este sistema utiliza un microsoplete para la mezcla de los gases y una boquilla para obtener una flama de las características mencionadas.

3.3.2.1 Gases.

Como se estudió en el capítulo 2, existen mecanismos de atenuación al propagarse señales normalmente dentro de una fibra óptica; estos mecanismos se presentan igualmente cuando se fusionan fibras ópticas [5], aunado a otros fenómenos que provocan pérdidas debido al adelgazamiento de la guía de onda resultante de la fusión de las dos fibras. Además, existe la absorción extrínseca producida por la contaminación con impurezas y humedad debido a los radicales OH⁻ que existen en suspensión en los gases y en el ambiente, que degradan las fibras reduciendo su vida útil, aparte de volverlas muy frágiles a la vibración mecánica. Por lo anterior, se requiere utilizar gases de alta pureza libres de contaminantes para obtener una flama estable y pura. La conexión existente entre los tanques de los gases empleados se muestra en la figura 3.9. Los gases utilizados son extrasecos, de grado instrumental, que cumplen los requisitos mencionados, cuyas características son:

Figura 3.9 Fotografía de los tanques que contienen Oxígeno y Propano. Se muestran también los reguladores de presión.

Oxígeno (O₂):

Cilindro de acero al carbón, tipo BT-20 con 0.5 m³ de gas de 140 kg/cm², con regulador de dos pasos tipo HPT-270-B-540 y con diafragma de acero inoxidable con intervalo de salida de 0.4 - 5.5 kg/cm².

Extraseco.

99.75% de pureza mínima.

10 ppm de H₂O máximo.

Propano (C_3H_8):

Cilindro de acero al carbón con 1.3 kg de producto a 7.5 kg/cm² de presión, con regulador de 2 pasos tipo GPT-281-B-510, con diafragma de nylon reforzado e intervalos de salida de 0.4 - 8.5 kg/cm².

Grado instrumental.

99.5% de pureza mínima en estado líquido.

3.3.2.2 Diagrama de conexión de gases.

En la figura 3.10 se muestra el diagrama de conexión de los gases empleados para la fusión de las fibras durante la fabricación de acopladores.

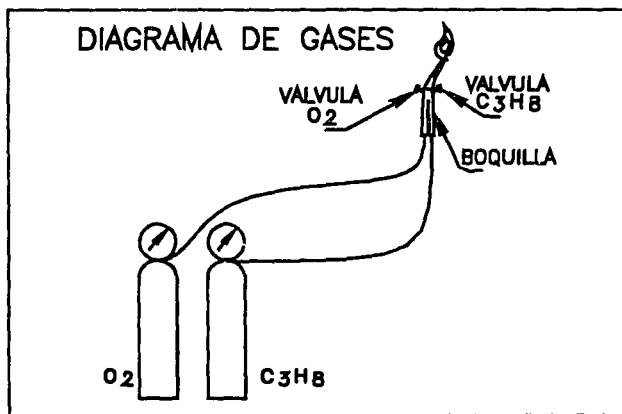


Figura 3.10 Diagrama de conexión de los gases empleados en la fusión.

3.3.2.3 Quemador.

El quemador tiene como propósito formar una cámara de mezcla, que uniformice e impida el retorno del gas, por tal motivo, se utilizó el microsoplete de la marca Veriflo Co., que se ilustra en la figura 3.11, ya que permite el control de la cantidad de gas de salida por medio de 2 válvulas de ajuste. Sus características son:

Presión de gas: 1/4 PSI.

Presión del oxígeno: 3 PSI.

Temperatura de la flama: 1100°C.

Velocidad de transferencia de calor: Alta.

3.3.2.4 Boquilla.

La boquilla nos proporciona una flama de 6x1x6 mm aproximadamente, necesaria para el calentamiento del área descubierta de las fibras a acoplar. Se utiliza una flama que toca un área longitudinal de 6 mm, para que con ésta longitud se optimizen las dimensiones finales del acoplador. El material de la boquilla es cobre de 1/4 de pulgada, con una apertura plana de 1x4 mm. En la figura 3.12 se muestra la boquilla con sus dimensiones.

Figura 3.11 Fotografía del quemador.

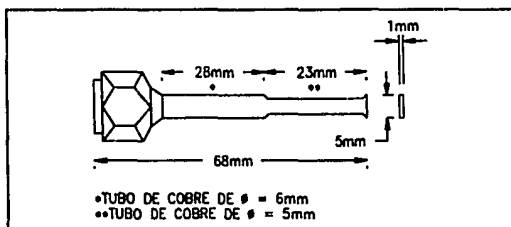


Figura 3.12 Boquilla del quemador.

3.4 Proceso de Fabricación.

La figura 3.13 que se muestra a continuación ilustra el diagrama esquemático del método FEB empleado para fabricar acopladores de fibra óptica unimodo a 1300 nm.

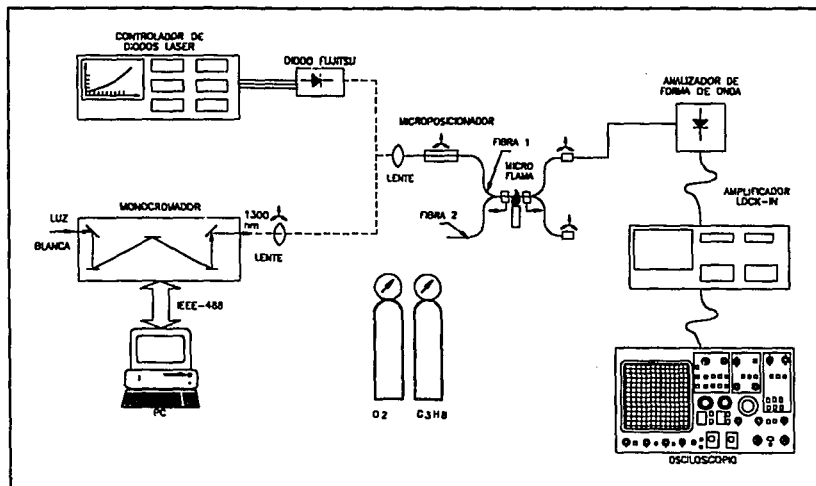


Figura 3.13 Método FEB para la fabricación de acopladores unimodo.

3.4.1 Descripción del Proceso de Fabricación.

El proceso de fabricación de los acopladores se puede dividir en 6 etapas fundamentales que son: Definición de los parámetros de control, preparación de las fibras, trenzado, sujeción, preparación de la flama y fusión-estirado. En seguida se explica paso a paso cada una de las etapas.

3.4.1.1 Parámetros de control.

Los parámetros de control involucrados en la fabricación se determinaron en base a las características que se quería obtener de los acopladores; el primero de los parámetros es la tasa de acoplamiento deseada, que se controla en la parte de fusión y estirado, al detener el proceso de fusión cuando el acoplador alcanza la tasa requerida; el segundo es la longitud de estirado, que se controla por medio del dispositivo de estirado, en el cual se determinaron longitudes fijas hasta obtener la curva de atenuación contra longitud de estirado, que se presenta en el capítulo 4. El tercero es la fuerza aplicada al dispositivo, con la cual se controla el grado de adelgazamiento de la región de fusión; con los datos obtenidos se trazó la curva de atenuación contra fuerza de estirado en el capítulo 4. El cuarto parámetro de control que se tomó en cuenta es la forma y características de la flama, ya que de ella dependen las impurezas que se introduzcan al acoplador afectando los resultados de atenuación, como se explica en la sección 3.3.2.1.

3.4.1.2 Preparación de las fibras.

Las fibras se preparan retirándoles la envoltura primaria de acrilato, que es el material que cubre al revestimiento, proporcionándole a la fibra la primera protección ambiental y mecánica. Esto se logra sumergiendo la región a descubrir en una solución solvente formada por diclorometano y acetona, que se ilustra en la figura 3.14, que no ataca las fibras sino únicamente al acrilato. Una vez disuelto el acrilato, se limpia la región para evitar contaminantes que aumenten la atenuación en los acopladores.

Figura 3.14 Preparación de las Fibras Ópticas.

3.4.1.3 Trenzado.

El trenzado tiene como objetivo incrementar el área de contacto de las fibras de manera homogénea y junto con la tensión aplicada, asegurar un contacto uniforme a lo largo de la sección longitudinal que será calentada; así mismo, proporciona una mejor distribución promedio de temperatura a lo largo de las fibras. Se entiende que a mayor sección de contacto longitudinal de las fibras deseado, corresponde un número mayor de vueltas de trenzado necesario.

3.4.1.4 Sujeción.

Uno de los extremos de las fibras está acoplado a la fuente de luz por medio de una lente ya sea al monocromador o al diodo laser. En ese mismo extremo, se sujetan las fibras ya trenzadas en el núcleo magnético (descrito en este trabajo como dispositivo de estirado), para la aplicación de la fuerza de estirado. En el otro extremo, se colocan las fibras por medio de un sujetador y uno de los puertos está conectado al detector o al analizador de forma de onda; con lo anterior se deja frente a la boquilla la región libre de acrilato preparada para la fusión.

3.4.1.5 Encendido de la flama.

Este es uno de los puntos más delicados en el proceso de fabricación de los acopladores debido a que es necesario obtener una microflama de alta temperatura y pureza. Los gases utilizados, como ya se mencionó son oxígeno y propano y un quemador tipo

microsoplete que usa una boquilla de cobre.

Se puede resumir el control de la flama a través de los siguientes pasos:

1° El operador del equipo se debe cerciorar de que no existe fuga en ninguno de los tanques de gas, verificando la lectura del manómetro de salida del mezclador y comparándola con la lectura del día anterior. En caso de existir diferencia, se verifica que las válvulas de los tanques estén bien cerradas y se observa la variación de los manómetros por 5 minutos. Se debe tener en cuenta que el propano no despidе un olor característico.

2° Si no existe cambio en las lecturas de los manómetros se asegura el cierre de las válvulas de mezcla de los gases que van hacia el quemador.

3° Este paso consiste en abrir la válvula de salida de gases hasta llegar a una presión constante, que en las condiciones normales en que se usan los tanques de este equipo en particular es de: 120 y 800 PSI para el propano y oxígeno, respectivamente.

4° Se procede a abrir lentamente la válvula de propano, acercándole simultáneamente un encendedor largo tipo casero hasta lograr una flama de propano pequeña y amarilla.

5° A continuación se abre muy lentamente la válvula de salida del oxígeno para que mezcle con el propano, reduciéndose más el tamaño de la flama hasta obtener una flama azul de propano y oxígeno.

El proceso anterior toma 8 minutos aproximadamente.

3.4.1.6 Fusión y Estirado.

El siguiente paso en el proceso de fabricación es el de fusión y estirado. Este inicia cuando se energiza la bobina de estiramiento, con el voltaje de corriente alterna deseado y se procede a acercar lentamente la flama ya preparada a la región descubierta de las fibras, por medio de un microposicionador hasta que la flama toca las fibras y las comienza fundir. Este proceso se ilustra en la figura 3.15. Durante el calentamiento de las fibras, estas se ablandan y estiran en el momento en el que el dispositivo de estirado aplica la fuerza sobre ellas, debilitándose su oposición mecánica; por lo que se logra fusionar y estirar los dos tramos de fibra hasta la longitud requerida. De inmediato se retira de la región de acoplamiento la flama, procediendo después a la protección y encapsulado del acoplador.

Figura 3.15 Fotografía del proceso de fusión y estirado.

Existen algunas limitantes que se deben de observar:

- * Se requiere que el área descubierta de las fibras no sea mayor a 4 cm, para evitar que quede fuera del espacio que puede cubrir el dispositivo de encapsulado y además que una longitud grande de fibra quede al descubierto durante el proceso de fabricación, ya que a la intemperie la fibra óptica sufre degradación en sus propiedades mecánicas y ópticas.
- * Se debe tener un control adecuado de la longitud de estirado.
- * Es importante contar con una flama estable y controlada debido a que las variaciones en la temperatura de fusión ocasionan poca reproducibilidad en los resultados.

3.4.2 Problemas Presentados y Alternativas.

Al inicio de este trabajo se encontraron varios problemas para fabricar los acopladores, uno de ellos consistió en que el diodo laser de semiconductor cuenta con un pigtail de fibra óptica de 40 cm tipo *multimodo*, lo cual fué determinado mediante un microscopio óptico.

Para poder evitar las altas pérdidas que se presentaron al tratar de acoplar el pigtail multimodo a la rama de inyección de los acopladores de fibra óptica *unimodo*, se instaló un arreglo óptico con objetivos de microscopio, sujetadores de fibra, chopper y amplificador Lock-In, como se ilustra en la figura 3.16, con el que las pérdidas disminuyeron.

Figura 3.16 Arreglo óptico para controlar el diodo laser.

Por otro lado, un aspecto delicado durante la fabricación de los acopladores es la flama, porque la magnitud de la potencia acoplada así como la tasa de acoplamiento, varían abruptamente si las fibras entorchadas se acercan muy rápidamente a la flama, por lo que se tuvieron que realizar varios ensayos para monitorear en forma precisa la potencia de la rama en que conecta la fuente óptica.

También se probaron varios ensayos de acopladores que inicialmente se pulieron en lijas con rugosidades periódicas de 5, 1 y 0.3 μm , fijadas sobre una superficie lisa para después fusionarlas y estirarlas por el método FEB empleado normalmente pero se encontró que los valores de los parámetros básicos de atenuación en exceso, atenuación por inserción y atenuación por tasa de acoplamiento, se elevaron en un 200% en promedio por lo que se descartó este procedimiento para la fabricación de los acopladores.

3.5 Procedimiento de Encapsulado.

Cuando se ha logrado proteger al acoplador con el silicón, y se ha realizado la caracterización espectral y de cut-back, el paso siguiente consiste en liberar del núcleo de la bobina el extremo de las fibras que se encuentra acoplado a la fuente de luz, para ir jalando y recorriendo el acoplador hasta que quede totalmente dentro del dispositivo de encapsulado. El dispositivo de encapsulado tiene como propósito fundamental, el proteger mecánicamente la región acoplada de las fibras y proporcionar un

nuevo revestimiento a la nueva guía de onda, formada en la fusión. Una vez que se logra esto, los extremos del dispositivo de encapsulado son sellados con un silicón mas resistente y menos flexible, para proteger mecánicamente y asegurar que la región acoplada no estará en contacto con sustancias que puedan provocar pérdidas en el dispositivo como agua, polvo, solventes, etc.

3.5.1 Encapsulado Prototipo.

El material utilizado en el departamento de comunicaciones del IIE es experimental, consiste de una funda plástica que permite que el nuevo revestimiento de la región adelgazada sea el aire, la cual es montada sobre una guía de plástico rígido que le proporciona buena protección mecánica y posibilidad de un empaquetado presentable a nivel laboratorio. Este dispositivo se muestra en las figuras 3.17 y 3.18.

Figura 3.17 Encapsulado prototipo.

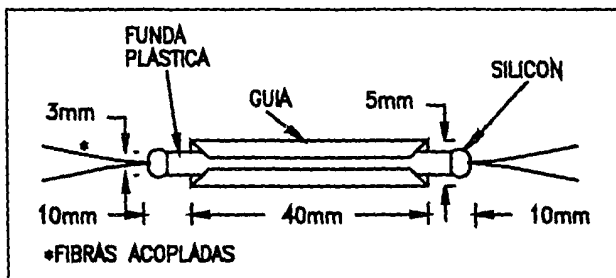


Figura 3.18 Dispositivo de encapsulado empleado en el IIE.

3.5.2 Mejoras al Encapsulado Prototipo.

Con el propósito de mejorar la protección del acoplador, se probaron varias opciones de protección de la región de acoplamiento, previas al encapsulado; debido a que se observó que el diámetro de ésta región es muy delgado y delicado, provocando que varios acopladores se rompieran al tratar de encapsularlos directamente y sin protección previa.

Una de las primeras técnicas fué tratar de sumergir la región acoplada en gel óptico. Se observó que debido a la viscosidad del mismo gel, la región acoplada se rompe con mucha facilidad. Se probaron entonces varias sustancias como: esmalte, plástico en aerosol, etc., encontrándose como mejor opción al sellador de silicón de uso general tipo acético.

Las propiedades principales del silicón con el que se protegieron los acopladores son:

- Sellador de silicón monocomponente.
- Alta adherencia sobre vidrio, aluminio, materiales vitrificados, y otros metales y materiales no porosos.
- Tiempo de secado al tacto: 5 a 10 minutos a 25 °C.
- Tiempo de vulcanización total: 24 horas.
- Alto módulo de elasticidad.
- Utilizable en un rango de temperatura de -50°C a 150°C.
- Temperatura de aplicación: 5°C a 40°C.

Figura 3.19 Protección del acoplador por medio de silicón.

La protección con este silicón se realizó como se observa en la figura 3.19, ya que cumple con el objetivo de darle resistencia mecánica al acoplador, para poderlo manejar con cierta facilidad en el proceso de encapsulado.

3.5.3 Encapsulado Comercial.

Se investigó acerca del material utilizado por las compañías extranjeras fabricantes de acopladores y se encontró que, para el encapsulado de los acopladores, utilizan una aleación de hierro y níquel llamada INVAR [5]. Esta aleación tiene un coeficiente de

expansión muy bajo [6] (cercano al de las fibras ópticas de vidrio). El acoplador comercial está recubierto con un material dieléctrico de poliéster de la que se obtiene una superficie no corrosiva y no conductiva, además puede ir protegido con un empaquetado plástico especial para manejo rudo.

En la figura 3.20, se puede observar un dispositivo de encapsulado comercial ampliamente utilizado.

Figura 3.20 Encapsulado comercial.

En este capítulo, se describieron 2 de los principales métodos que se emplean en la fabricación de acopladores; así como las ventajas que presenta el método FEB empleado en este trabajo. Se proporcionaron en forma detallada los pasos que se siguieron en el procedimiento de fabricación, encapsulado y el equipo empleado junto con algunas de las características principales de los instrumentos utilizados. También se realizó una comparación entre el encapsulado comercial y el encapsulado prototipo empleado en este trabajo. En el capítulo 4 se describirá el método de caracterización espectral, con el que se analizó la atenuación de los acopladores en función de la longitud de onda de operación; así como las características del equipo necesario y también se definen los parámetros ópticos básicos medidos en los acopladores. Se presentarán los resultados obtenidos de la caracterización así como las gráficas de transmisión contra λ para observar la selectividad en longitud de onda que se obtuvo en algunos acopladores, cumpliendo con uno de los objetivos planteados.

Bibliografía

- [1] Sheem, S.K., Taylor, H.F., Moeller, R.P. y Bums, W.K.: "Propagation characteristics of single-mode evanescent field couplers", . Applied Optics, 1981, Vol. 20, pp 29-35.
- [2] Senior, J.: "Optical fiber communications, principles and practice", (Prentice-Hall, 1985).
- [3] Kraus, J.D.: "Electromagnetics", (McGraw-Hill, México, 1989).
- [4] Desurvire, E.: "Lightwave communications: the fifth generation", Scientific American, 1992, pp. 114-121.
- [5] Koester, W.: "Low-loss biconical tapered single-mode wavelength division multiplexer", . Standard Elektrik Lorenz AG, Research Center. W. Germany. 1982.
- [6] Mantell, Ch. L.: "Engineering materials handbook", (McGraw-Hill, New York, 1978).

Caracterización de acopladores.

4.1 Introducción.

Existen varias técnicas para caracterizar los dispositivos fabricados con fibra óptica de acuerdo a su atenuación, geometría y respuesta espectral. Durante el desarrollo de este capítulo, se explican las técnicas con las que se caracterizaron los acopladores unimodo según sus parámetros ópticos básicos: atenuación en exceso, atenuación por inserción, atenuación por tasa de acoplamiento y directividad. Además se utilizó un método de caracterización muy confiable llamado "Cut-Back" con el que se analiza el comportamiento del dispositivo con respecto a la longitud de onda, es decir, se determinó su atenuación espectral.

Con las pruebas anteriores se pudo obtener información completa de parámetros ópticos, atenuación espectral y selectividad en longitud de onda, mediante el uso de instrumentos ópticos como: monocromador, filtros selectivos en longitud de onda, detector de germanio, etc. y el equipo de cómputo necesario para la adquisición de los datos y caracterización de los acopladores fabricados.

4.2 Parámetros Ópticos Básicos.

Para medir los parámetros ópticos básicos, primero se toma una medida de referencia de la potencia que se inyectará a los acopladores como lo muestra la figura 4.1, esto se logra inyectando

la señal de un diodo laser a un metro de fibra del mismo tipo que se va a utilizar en la fabricación de los acopladores y se cuantifica la luz de salida, en dBm ó en miliwatts, por medio del medidor de potencia óptica, posteriormente se inyecta luz de la misma fuente al acoplador para realizar lecturas en cada uno de sus puertos de salida; las lecturas obtenidas se usan para calcular los parámetros de atenuación en exceso, atenuación por inserción, tasa de acoplamiento y directividad, aplicando las ecuaciones 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5, descritas posteriormente.

El proceso de medición de los parámetros ópticos, toma un promedio de 10 minutos para cada acoplador, por lo que se realiza al final de la caracterización espectral de los acopladores, sin interferir en el proceso de encapsulado.

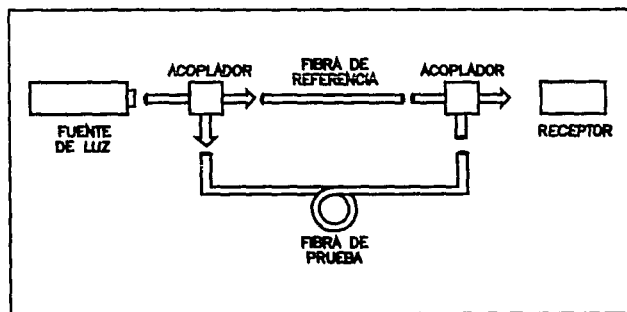


Figura 4.1 Medición de referencia de potencia óptica.

Los cuatro parámetros básicos empleados para la caracterización de los acopladores se definen de acuerdo a la nomenclatura asignada a sus puertos, como se muestra en la figura 4.2.

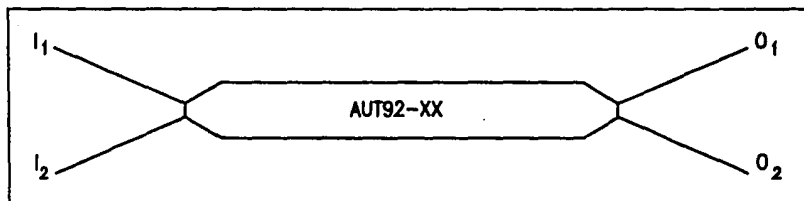


Figura 4.2 Acoplador con nomenclatura de los puertos.

Donde:

- I_1 : Potencia de entrada al acoplador por el puerto 1 (referencia inyectada a 1 metro de fibra).
- I_2 : Potencia que se regresa por el puerto 2 de entrada.
- O_1 : Potencia del puerto 1 de salida.
- O_2 : Potencia del puerto 2 de salida.

Esta nomenclatura se aplica en todos los casos en que se hace referencia a los puertos de los acopladores.

4.2.1 Atenuación en Exceso.

Es la tasa de la potencia de salida total de un acoplador pasivo con respecto a la potencia de entrada, expresada en decibeles (dB).

$$ATT.EX. = 10 \text{ Log } \left[\frac{(O_1+O_2)}{I_1} \right] \text{ (dB)} \quad 4.1$$

ATT. EX.:Atenuación en exceso.

4.2.2 Tasa de Acoplamiento.

Es la cantidad de luz transferida a cada puerto con respecto a la potencia total de salida, se puede expresar en porcentaje ó en dB.

$$T. ACOP. = \frac{O_2}{(O_1+O_2)} \quad (\%) \quad 4.2$$

$$T. ACOP. = - 10 \text{ Log } \frac{O_2}{O_1+O_2} \text{ (dB)} \quad 4.3$$

T. ACOP.:Tasa de acoplamiento.

4.2.3 Atenuación por Inserción.

Es la medida de atenuación de cada rama del acoplador que consiste en la suma de la atenuación en exceso más la atenuación por tasa de acoplamiento.

$$ATT. INS. = ATT. EX. + ATT. T. ACOP. \quad 4.4$$

ATT. INS.:Atenuación por inserción.

4.2.4 Directividad.

Es la cantidad de potencia que se regresa a un puerto de entrada con respecto a la potencia total inyectada.

$$DIRECTIVIDAD = 10 \text{ Log } \left(\frac{I}{I_1} \right) \text{ (dB)} \quad 4.5$$

Para la obtención de los parámetros ópticos, se empleó también el arreglo óptico mostrado en la figura 4.3 donde un disco giratorio (chopper) con ranuras, utilizado como modulador, es colocado en el camino que la luz recorre antes de transmitirse en el acoplador, para que a la salida se obtenga una señal cuadrada de aproximadamente 1 khz, la cual se detecta por medio de un amplificador amarrado en fase (Lock-In) a la frecuencia de referencia que envía el chopper. La señal obtenida de este amplificador, se puede desplegar utilizando un osciloscopio para así poder medir la potencia en cada rama del acoplador.

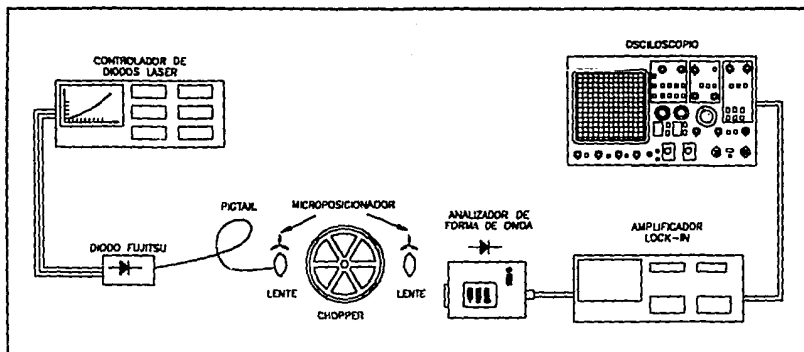


Figura 4.3 Medición parámetros ópticos con chopper.

4.3 Método Cut-Back.

4.3.1 Descripción General del Método Cut-Back.

El proceso de caracterización de atenuación espectral de los acopladores se basó en una técnica de medición de la transmisión del dispositivo, contra la longitud de onda aplicada. Esta técnica es conocida como "Cut-Back" debido a que primero se realizan las mediciones de atenuación al dispositivo que puede ser una fibra óptica, un taper (fibra óptica adelgazada por el método FEB) [1] ó un acoplador, junto con todos los elementos del sistema tales como lentes, monocromador, fuente de luz, etc. y luego se corta la fibra óptica a una longitud menor y conocida, para después repetir el proceso y determinar el comportamiento del sistema únicamente;

después se restan de cada uno de los valores de la primer medición, los valores correspondientes de la segunda medición y así se obtiene el comportamiento espectral del dispositivo sin interferencias del sistema. Posteriormente, los valores se pueden operar logarítmicamente para obtener su atenuación espectral en decibeles. En la figura 4.4 se muestra el diagrama esquemático del método de caracterización Cut-Back.

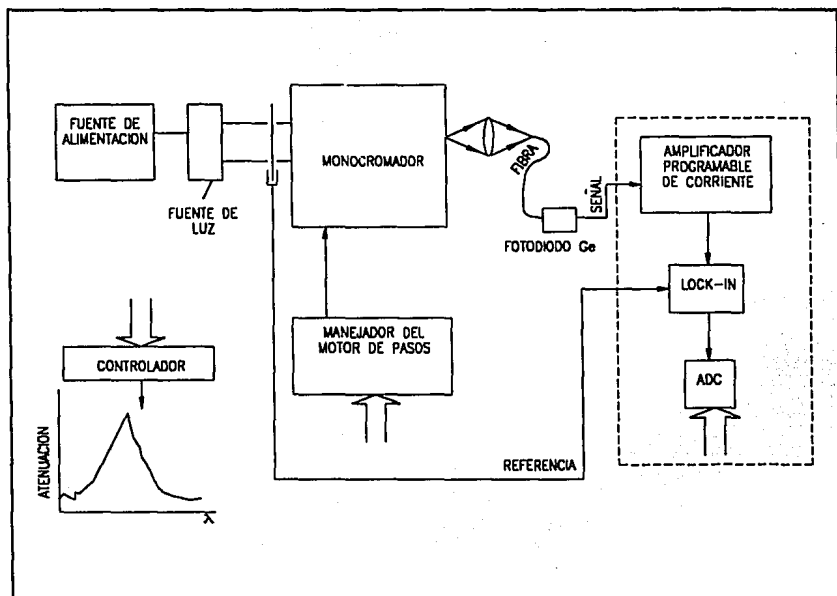


Figura 4.4 Diagrama esquemático del método de caracterización espectral Cut-Back.

4.3.2 Equipo de Caracterización Espectral.

A continuación se describen las características más importantes del equipo empleado en la caracterización de los acopladores. Inicialmente la lista de equipo es:

- Monocromador.
- Rejilla de difracción: 900 líneas por milímetro (1/mm).
- Detector de Germanio para el rango de 1000 a 1600 nm.
- Fuente de Luz Blanca.
- Fuente de Corriente Estabilizada.
- Modulador (Chopper).
- Preamplificador de corriente.
- Convertidor Analógico-Digital con interface de acuerdo a la norma IEEE-488.
- Computadora personal, Impresora y Programa

En la figura 4.4 anterior, se muestra un diagrama esquemático donde se observa la conexión existente entre los equipos para realizar las pruebas de atenuación espectral por el método "Cut-Back".

4.3.2.1 Monocromador.

El monocromador es un instrumento óptico de alta calidad cuya función principal consiste en difractar la luz blanca que se le inyecta en todas sus componentes por medio de una rejilla de difracción, para después filtrar luz a la longitud de onda deseada empleando varios filtros colocados en su interior. El tipo de monocromador empleado se conoce como Czerny-Turner [2] que está

diseñado para operar en las regiones: Ultravioleta, Visible e Infrarrojo.

La difracción de la luz blanca se logra cuando se la hace incidir en una rejilla de difracción de 902 l/mm que la descompone en todos sus colores en un rango de 1000 a 1600 nm del que se filtra y extrae la luz a la longitud de onda deseada.

La configuración óptica de este equipo se muestra en la figura 4.5, donde se ilustra el camino que recorre la luz blanca hasta que se selecciona la longitud de onda requerida.

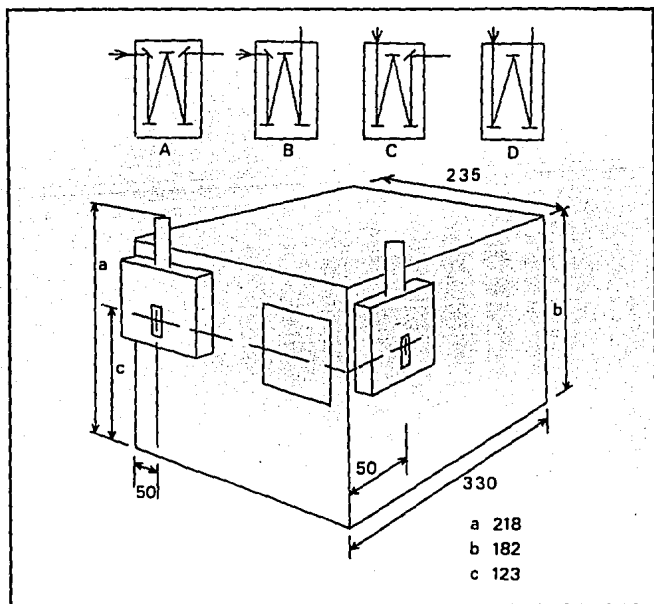


Figura 4.5 Configuración Monocromador.

Este equipo se puede conectar a una computadora personal, por medio de la que se controlan dos motores de pasos, uno de ellos se encarga del movimiento de la rejilla para la selección de la longitud de onda y el otro se encarga del movimiento de los filtros que eliminan las longitudes de onda diferentes a la seleccionada evitando la mezcla de colores.

4.3.2.2 Rejilla de Difracción.

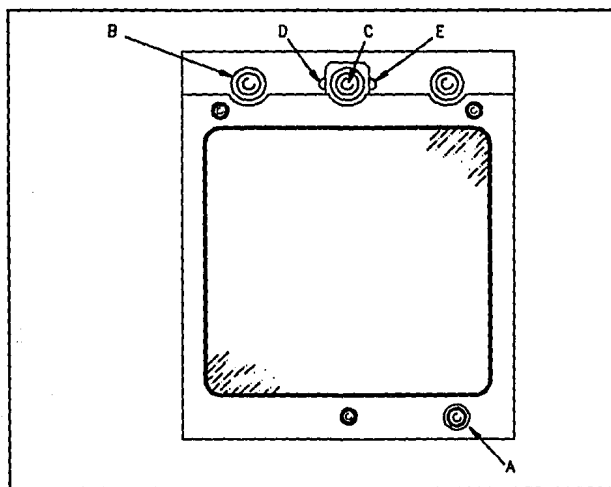


Figura 4.6 Rejilla de difracción.

La rejilla de difracción utilizada es una superficie metálica corrugada, con perfil senoidal. Esta superficie sirve para descomponer luz blanca en todas sus componentes espectrales o colores.

Teóricamente se encontró que la luz obtenida a partir de una superficie senoidal como ésta, se distribuye básicamente en tres órdenes o conos de luz [3]: El orden cero, que es un cono de luz puntual donde todavía existe la luz con todos sus componentes (luz blanca). El orden +1, que es el cono de luz dividido en colores que se utiliza para seleccionar el color deseado y por último el orden -1 que no es utilizado. Los parámetros de las rejillas son: período a y altura h cuyas magnitudes deben ser del orden de $1\mu\text{m}$ para a y de $0.1\mu\text{m}$ para h .

En la figura 4.6 se presenta la rejilla de difracción utilizada cuyas características son:

- Período: 900 l/mm.
- Orden Cero a 1.9 μm .
- Superficie: 69 X 69 mm.

4.3.2.3 Detector de Germanio.

El detector utilizado para la caracterización de los acopladores en el rango de 1000 a 1600 nm fué un fotodiodo de Germanio de ventana amplia con un área activa de 20 mm^2 . Sus parámetros ópticos más importantes son:

- Rango de operación: 500 a 1800 nm.
- Responsividad Máxima: 0.4 A/W a 1500 nm.
- Dimensiones: 110 x 60 x 30 mm.

La figura 4.7 muestra la curva característica de transmisión contra longitud de onda del detector de germanio utilizado en este trabajo.

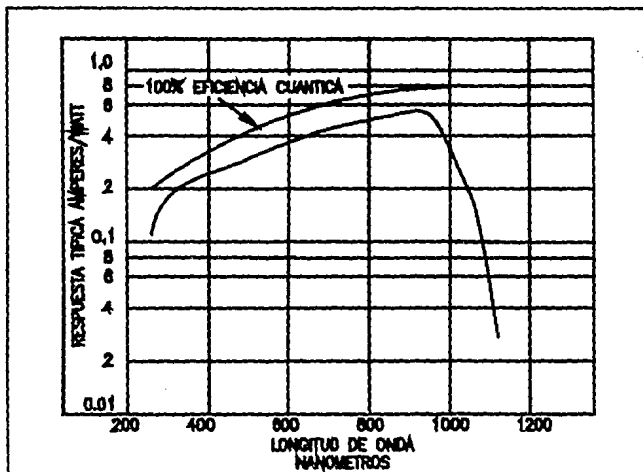


Figura 4.7 Respuesta Típica del Detector de Ge.

4.3.2.4 Fuente de Luz Blanca.

La fuente de luz que se utilizó es una lámpara de halógeno de 100 Watts controlada por una fuente de corriente estabilizada. Esta lámpara contiene un lente de cuarzo que condensa la luz para abarcar completamente a lo largo y ancho la abertura de entrada del monocromador. Además es una de las fuentes de luz de mayor estabilidad disponibles para este tipo de experimentos. Sus características principales se enlistan en seguida:

- Estabilidad de salida: 0.1% en un período de 8 horas.
- Posicionamiento vertical y horizontal ajustable.
- Soporte para montaje de disco modulador o Chopper.
- Led indicador de falla.

La figura 4.8 corresponde a la curva de radiancia [4] contra longitud de onda de la lámpara de halógeno utilizada en la caracterización espectral de acopladores unimodo.

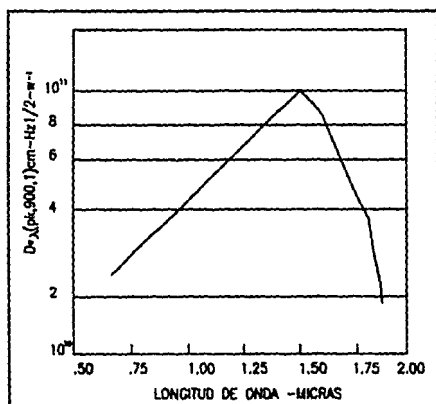


Figura 4.8 Radiancia contra λ .

4.3.2.5 Fuente de Corriente Estabilizada.

Las características básicas de esta fuente que alimenta a la lámpara de luz blanca son:

- 3 puntos fijos de corriente de operación de 1.6, 4.0 y 8.5 A. Un rango variable de corriente desde 1.2 hasta 12 A.
- Corriente estabilizada con un voltaje de entre 216 y 264 V y una estabilidad de 0.3%.

- Protección contra sobrecargas.

4.3.2.6 Modulador.

El modulador (Chopper) utilizado para cortar la luz que se inyecta a una cierta frecuencia a los acopladores en la caracterización espectral, consiste de un disco metálico que cuenta con varias ranuras iguales separadas a intervalos regulares alrededor del disco, a través de las cuales pasa la luz con una cierta frecuencia, este dispositivo se controla en forma remota como se muestra en la figura 4.9.

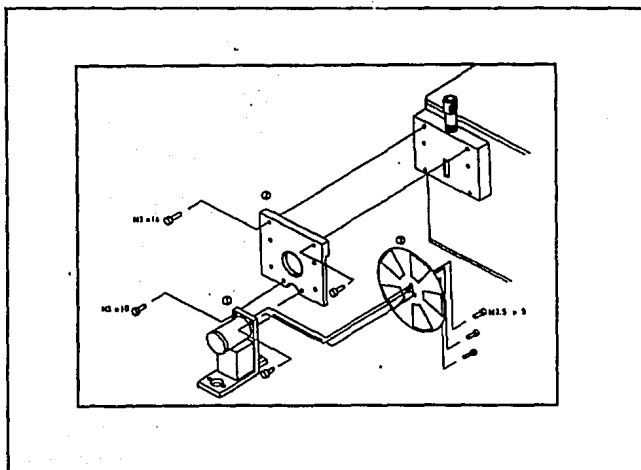


Figura 4.9 Chopper Bentham.

La unidad controladora del chopper puede entregar una señal eléctrica cuadrada a través de un conector BNC, que tiene la misma frecuencia que la luz modulada por el disco. Esta sirve como señal de entrada de referencia para el amplificador amarrado en fase (Lock-In). También cuenta con una pantalla o display donde se puede leer la frecuencia de modulación directamente en Hertz. El rango de frecuencia varía según el número de ranuras del disco, en los siguientes tres intervalos:

- Disco de 2 ranuras, de 10 hasta 200 Hz.
- Disco de 5 ranuras, de 25 hasta 500 Hz.
- Disco de 10 ranuras, de 50 hasta 1000 Hz.

4.3.2.7 Preamplificador de Corriente.

Se utilizó un preamplificador de corriente que cuenta con una entrada de tierra virtual (muy alta impedancia de entrada), que nos sirve para poder conectarle detectores de muy alta impedancia, sin resistencia de carga y se puede conectar a la salida de fotodiodos de semiconductor como el de InGaAs (Arseniuro de galio-indio) para longitudes de onda de 600 a 1000 nm y el de Germanio para longitudes de 1000 a 1600 nm. Se puede controlar en forma manual y automática por medio de la conexión que existe entre la computadora, el convertidor analógico digital, el amplificador Lock-In y él mismo, empleando el estándar IEEE-488 [5]. Cuenta con 6 etapas de amplificación para detectar la señal del fotodiodo que van desde 10^3 V/A hasta 10^8 V/A. En este trabajo, de acuerdo a la potencia óptica que se puede acoplar a las fibras del acoplador

debido al reducido diámetro de su núcleo, $8\mu\text{m}$ aproximadamente, se utilizó preferentemente la etapa de amplificación R para los barridos espectrales de la fibra corta y P para los barridos espectrales de los puertos del acoplador (fibra larga).

La salida del preamplificador se conecta a la entrada del amplificador Lock-In que se encarga de amplificar únicamente la señal que viene a la misma frecuencia que la señal que recibe en su entrada de referencia o sea, la señal de la frecuencia del "chopper", con lo que se amplifica la luz que viene del monocromador y se evita la luz en forma de ruido que pudiera introducirse al sistema.

4.3.2.8 Convertidor Analógico-Digital.

Es un convertidor analógico-digital que emplea un conversor de voltaje a frecuencia cuya función se realiza en intervalos de 100ms. El convertidor envía información hacia la computadora para indicar si existe sobrecarga por transitorio en la señal analógica de voltaje, durante el período de conversión. La salida digital se envía por medio de una interface de acuerdo a la norma IEEE-488 como un tren de pulsos de 5 caracteres.

Este convertidor cuenta con varias opciones de calibración del voltaje de referencia (Off-Set), programación y detección sincronizada que no se utilizaron en la caracterización por lo que no se describen en este trabajo. Para ampliar la información se recomienda referirse al manual del equipo enlistado en la bibliografía.

La computadora que se utilizó es una PC compatible con IBM del Laboratorio del Departamento de Comunicaciones sin tener características de memoria especiales. El programa de adquisición de los datos y manejo del monocromador, está escrito en lenguaje Basic y forma parte integral del equipo marca Bentham y la impresora es de la marca Epson también sin características de velocidad de impresión ó gráficas especiales.

4.3.3 Descripción Detallada del Método Cut-Back.

Para caracterizar los acopladores con respecto a la longitud de onda transmitida, se usó el método "Cut-Back". El proceso inicia exactamente al término del proceso de fabricación de cada acoplador con las ventajas de ahorro de tiempo, además se evita la descalibración de los equipos, y se obtienen acopladores fabricados y caracterizados en su atenuación espectral, sin modificar el arreglo experimental utilizado en la fabricación.

Inicialmente, la luz de una lámpara de halógeno de 100W, que es controlada por la fuente de corriente constante altamente estabilizada, se enfoca e inyecta en un punto donde es interrumpida por el disco con ranuras (Chopper) para obtener un haz modulado.

Después, la luz modulada se introduce al monocromador para seleccionar la longitud de onda de operación de las fibras (1300 nm).

La luz que entra en el monocromador se difracta al incidir sobre la rejilla de difracción [3] que descompone la luz en la gama de colores del espectro por lo que se utilizan espejos y filtros

para dirigir la luz cuya longitud de onda sea la seleccionada, hacia la ranura de salida del monocromador.

El acoplamiento de la luz modulada hacia la fibra se logra utilizando una lente de alta calidad ó objetivo de microscopio de apertura numérica grande $NA=0.3$. Una de las ramas del acoplador a caracterizar, se coloca en el foco del objetivo por medio de un microposicionador y se le implementa un filtro modal enrollándolo en un cilindro de 2 cm e insertándolo en aceite de igualación de índice de refracción, lo anterior tiene el objetivo eliminar los modos que se propagan por el revestimiento y que a final de cuentas pueden ser recuperados parcialmente por los detectores, por lo que representarían lecturas erróneas en el sistema.

La potencia que se propaga en el acoplador se recupera con un fotodetector de Germanio, colocando enfrente del detector, el extremo contrario del acoplador por medio de un sujetador de fibra.

La salida del fotodetector está en sincronía con el tren de pulsos que se obtiene después del "Chopper" y es recuperada por medio del amplificador amarrado en fase (Lock-In), que cuenta con varios factores de amplificación, con lo cual se recupera una señal sin problemas de ruido.

La última parte del método consiste en realizar, por medio de la computadora, la medición de la transmisión espectral del dispositivo en el rango de longitud de onda deseado, guardando los datos en la memoria e inmediatamente después, sin modificar el acoplamiento de la fibra en la salida del monocromador, cortar la fibra hasta una longitud conocida pero mucho menor a la original

para acoplarla al detector y realizar la misma medición de transmisión. Las dos mediciones son comparadas y tratadas matemáticamente para determinar la atenuación en dB ya que la primera medición representa la transmisión del acoplador junto con la del sistema y la segunda medición representa la transmisión de un tramo muy corto de fibra, es decir, representa el comportamiento del sistema. Por lo que la resta de las dos mediciones representa el comportamiento espectral del acoplador, libre de los errores de medición o el ruido que pueda introducir el sistema.

El proceso de caracterización espectral se puede resumir en los pasos siguientes:

- 1.- Seleccionar en el programa el barrido del monocromador en longitud de onda de 1000 a 1600 nm, con intervalos de 10 nm.
- 2.- Ajustar la fuente de corriente hasta el máximo (12 A).
- 3.- Fijar la frecuencia del modulador a un valor cercano a 200 Hz.
- 4.- Seleccionar la ganancia del preamplificador ($P=10^8$ V/A).
- 5.- Calibrar el amplificador lock-in a un voltaje de referencia cercano a cero volts.
- 6.- Ejecutar la opción del programa con la que inicia el barrido espectral (procedimiento para fibra larga).
- 7.- Grabar la información en disco magnético.
- 8.- Imprimir la gráfica de transmisión contra longitud de onda.
- 9.- Repetir los pasos 1, 6, 7 y 8 para cada puerto del acoplador.
- 10.- Cortar el puerto 1 a una longitud de 1.5 m y realizar con éste los pasos 1, 6, 7 y 8 (procedimiento para fibra corta).
- 11.- Seleccionar en el programa la opción de operación matemática

para obtener la curva de atenuación espectral del acoplador por el método Cut-Back.

12.- Grabar e imprimir la gráfica.

4.3.4 Ecuación de Atenuación Espectral.

La atenuación espectral se calcula en dB por medio de la siguiente ecuación:

$$ATT. (dB) = -10 \text{ Log } (P. f. corta/P. f. larga) \quad 4.6$$

Donde:

P. f. corta: representa la potencia detectada en el tramo de fibra de longitud conocida, menor a la longitud del acoplador. En este caso se cortó el extremo del acoplador a una longitud de 1.5 m.

P. f. larga: representa la potencia total detectada en el acoplador.

4.4 Resultados.

4.4.1 Parámetros Ópticos Básicos.

Durante el desarrollo de este trabajo se etiquetó a los acopladores fabricados de la siguiente forma:

AUT92-XX: Acoplador Unimodo número XX. Correspondiendo el 92 al año de fabricación. Donde XX es el número consecutivo de cada acoplador fabricado. En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos de la caracterización de los parámetros ópticos básicos de algunos acopladores.

ACOPLADOR	ATT. EXCESO	TASA		ATT.		DIRECTIVIDAD
		ACOPLAMIENTO		INSERCIÓN		
		P3	P4	P3	P4	
AUT92-09	17.6	95.1	4.9	17.9	30.7	53.6
AUT92-10	10.0	94.2	5.8	10.2	22.4	50.9
AUT92-11	8.5	87.2	12.8	9.1	17.4	45.2
AUT92-12	6.7	60.7	39.3	8.9	10.8	41.7
AUT92-13	3.5	88.8	11.2	4.0	14.7	43.9
AUT92-14	5.1	61.0	38.0	7.3	9.2	48.1
AUT92-15	3.2	49.9	50.1	6.2	6.2	56.3
AUT92-16	2.5	86.9	13.1	3.1	11.3	50.7
AUT92-17	8.4	31.2	68.8	13.5	9.1	53.3
AUT92-18	4.8	50.4	49.6	7.8	7.8	55.6
AUT92-19	9.6	97.0	3.0	9.7	25.1	52.5

Tabla 4.1 Resultados de la medición de los parámetros ópticos básicos.

Como puede observarse en la tabla 4.1, los valores de atenuación en exceso resultaron altos comparados con los valores que aparecen en las hojas de especificación de los acopladores comerciales, ya que el promedio de atenuación en exceso es de 8 dB mientras los comerciales especifican 1 a 2 dB.

La tasa de acoplamiento promedio para el puerto P_3 es de 80.25 y para P_4 es de 29.75 lo cual indica que no existe un control preciso en la obtención de la tasa de acoplamiento, esto se debió en parte a que no se cuenta con dos etapas de monitoreo de potencia (detector de germanio y amplificador lock-in) para poder detener el experimento de fabricación en el instante preciso. En cuanto a la atenuación por inserción el promedio de los valores leídos en P_3 fué de 9.77 y para P_4 fué de 14.73, es decir, son muy parecidos entre ellos pero altos, si se les compara con los valores comerciales que son de 3 dB.

Uno de los acopladores que mostraron los mejores resultados fué el *AUT92-18*. Los datos de este acoplador muestran una atenuación en exceso de 4.77 dB, una tasa de acoplamiento de 50.4% en P_3 y de 49.6% en P_4 (se cumple la atenuación del 50% deseada) y lo más importante, muestra tres valores de λ para los cuales es selectivo en longitud de onda, como lo muestra la curva de transmisión espectral de la figura 4.12.

Los valores de directividad son lo suficientemente altos en general, lo que nos permite considerar que no se presentarán problemas de diafonía en aplicaciones de comunicación bidireccional, ya que la sensibilidad máxima de los detectores comerciales es de 35 dB mientras el valor promedio de directividad de los acopladores fabricados, que se muestra en la tabla 4.1, es de 55.2 dB, es decir, la potencia que se regresa por el puerto 2 es mínima.

4.4.2 Atenuación espectral.

En las gráficas que a continuación se presentan, se pueden observar los resultados obtenidos tanto de atenuación espectral como de selectividad en longitud de onda.

De acuerdo al análisis teórico que se estudia en el capítulo II de este trabajo, y al trabajo que reportan varios autores, cuando se monitorea la luz que se propaga por una fibra óptica y se adelgaza por medio de la aplicación de calor, ocurre un fenómeno oscilatorio en forma senoidal de transmisión de la potencia [6,7], es decir, la potencia aumenta y disminuye senoidalmente conforme se va adelgazando la guía. En este trabajo, durante la fabricación de acopladores, se presentó el mismo fenómeno, el cual se pudo controlar parcialmente en el laboratorio después de consultar los trabajos que se han realizado en otros centros de investigación [8]. Todos los reportes consultados coinciden en que los modos en que se distribuye la luz varían de acuerdo a las variables de control y a las condiciones de la guía, tales como índice de refracción, diámetro del núcleo, y λ de operación [6]. Por lo anterior, si las características de la guía están cambiando debido al calentamiento, al estirado y a la fusión, entonces la cantidad de luz que se propaga por las ramas del acoplador, sufre oscilaciones.

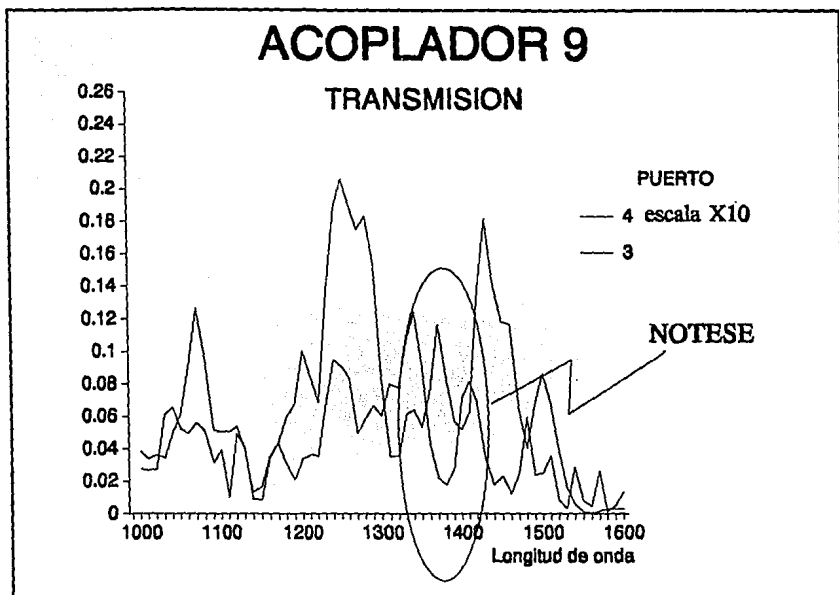


Figura 4.10 Curva de transmisión del acoplador 9.

En la figura 4.10 puede observarse la curva de transmisión del acoplador 9 donde se observa el fenómeno de oscilación de la potencia acoplada en las ramas de salida. Este fenómeno es de mucha importancia debido a que presenta la posibilidad de controlar la tasa de acoplamiento y en menor grado, la atenuación.

Para el puerto 3, la potencia comienza este comportamiento oscilatorio desde $\lambda=1070$ nm y termina en $\lambda=1500$, teniendo su valor máximo de 0.2 en UR (unidades relativas) a una $\lambda=1250$ nm y su valor mínimo en $\lambda=1150$ con 0.02 en unidades relativas (UR). El puerto 4 transmite la luz a 1340 y 1400 nm por lo que el fenómeno de

selectividad que se propuso en los objetivos se puede observar claramente.

Es importante recalcar que el puerto 3 tiene buena transmisión de energía a 1250 y 1370 nm, y el puerto 4 tiene un comportamiento inverso a esas longitudes de onda por lo que estas ramas seleccionarían tales colores. Desgraciadamente, no se cuenta con la curva de atenuación espectral, debido a que el acoplador se rompió al empezar la medición.

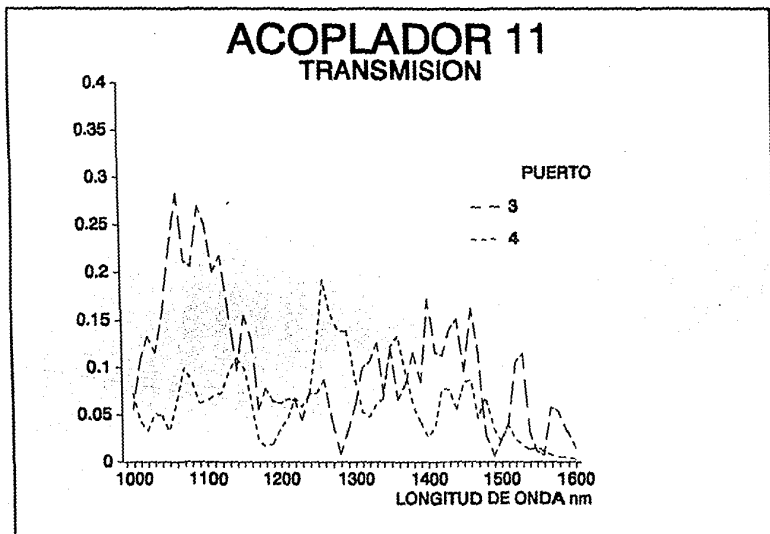


Figura 4.11 Curva de transmisión del acoplador 11.

El acoplador 11 muestra selectividad en longitud de onda entre el puerto 3 y 4 a las longitudes de onda de 1100, 1260 y 1400 nm,

selectividad que se propuso en los objetivos se puede observar claramente.

Es importante recalcar que el puerto 3 tiene buena transmisión de energía a 1250 y 1370 nm, y el puerto 4 tiene un comportamiento inverso a esas longitudes de onda por lo que estas ramas seleccionarían tales colores. Desgraciadamente, no se cuenta con la curva de atenuación espectral, debido a que el acoplador se rompió al empezar la medición.

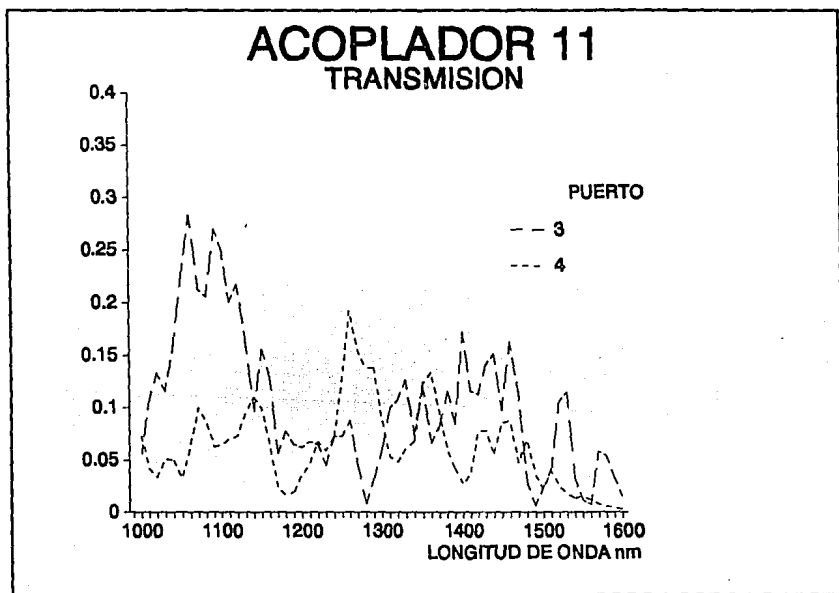


Figura 4.11 Curva de transmisión del acoplador 11.

El acoplador 11 muestra selectividad en longitud de onda entre el puerto 3 y 4 a las longitudes de onda de 1100, 1260 y 1400 nm,

según se muestra en la figura 4.11.

Para $\lambda=1100$ nm, el puerto 3 alcanza una transmisión de 0.26 ur y el puerto 4 alcanza un valor máximo de 0.05 ur, es decir, el puerto 3 transmite y el puerto 4 atenúa a esta λ .

El fenómeno de acoplamiento de potencia, se presenta en forma inversa para $\lambda=1260$ nm, ya que ahora el puerto 4 transmite 0.18 ur y el puerto 3 transmite con una pequeña amplitud de 0.01, es decir, atenúa la señal óptica a esa longitud de onda.

Para la longitud de onda de 1400 nm, nuevamente se invierte el comportamiento de transmisión de ambos puertos de salida. El puerto 3 ahora transmite 0.16 ur, mientras que el puerto 4 transmite 0.03; aunque en general los dos puertos transmiten menos que en 1260 y 1100 nm, la selectividad de color es apreciable.

ACOPLADOR 18 SELECTIVO EN LONGITUD DE ONDA

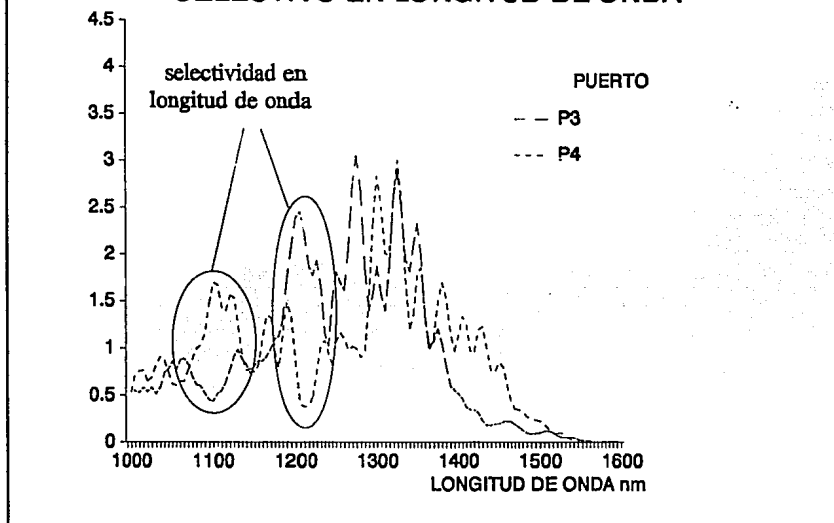


Figura 4.12 Curva de transmisión del acoplador 18.

En la figura 4.12, que corresponde a la transmisión del acoplador 18, se pueden observar tres valores de longitud de onda para los cuales el acoplador es selectivo. El primero se presenta a 1100 nm donde en unidades relativas, el puerto 4 transmite 1.7 mientras el puerto 3 transmite 0.5, es decir, por el puerto 4 se propaga la luz a esa longitud de onda y por el puerto 3 se atenúa. El segundo valor donde se presenta oscilación es 1200 nm donde lo más importante es observar que se tiene un comportamiento inverso a lo que ocurre en 1100 nm. Como se puede observar, el puerto 3

permite la transmisión de esa longitud de onda con un valor de 2.5 y el puerto 4 no la propaga bien ya que solo tiene un valor de 0.4 en transmisión. Para $\lambda=1280$ nm el puerto 3 tiene un valor 3 y el puerto 4 tiene un valor de 1, por lo que se podría emplear este acoplador en comunicación bidireccional por una sola fibra para transmitir luz a 1300 nm por el puerto 3 y recibir a 1100 nm por el puerto 4. Con acopladores como el anterior, se cumple el objetivo de fabricar acopladores selectivos en longitud de onda ya que se observa claramente este comportamiento para tres valores de λ .

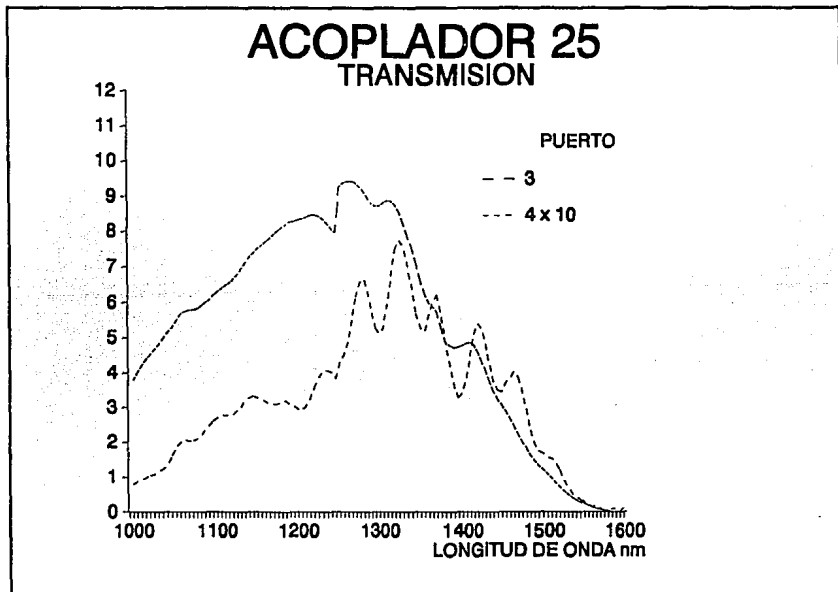


Figura 4.13 Curva de transmisión del acoplador 25.

En la curva de transmisión del acoplador 25 que se ilustra en la figura 4.13, se puede observar que el acoplamiento del puerto 3 alcanza un valor máximo de 9 y el puerto 4 alcanza un valor de 0.75 como máximo, por lo que se puede ver que un alto porcentaje de luz se propagó por el puerto 3 (85%) y un porcentaje muy bajo por el puerto 4 (10%), esto se manifiesta en la baja potencia leída en el puerto 4 ya que se tuvo que multiplicar por 10 para graficarla. El problema se presentó debido a que se probó la idea de tratar de reducir la cantidad de materia del recubrimiento para poner en contacto estrecho los núcleos ya que la fibra está compuesta por un cilindro de 9 μm de núcleo y 125 μm de revestimiento. La reducción se trató de lograr rebajando ambas fibras utilizando una lija de perfil triangular de 5 μm de período. Esto ocasionó que al aplicarle la fricción sin tener un control gradual, la rebaja de material no fué homogénea, se introdujo contaminación por los residuos de lija que se desprendieron y resultó que una de las ramas siempre guió mejor la luz. Sin embargo, en el puerto 3 sí se presentó la oscilación de la transmisión a intervalos de 70 nm.

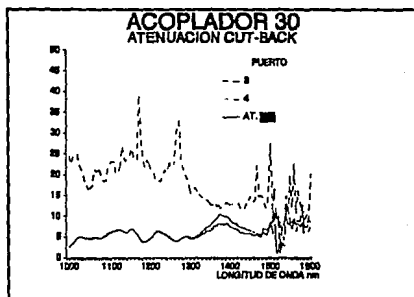


Figura 4.14 Curva de atenuación Cut-Back del acoplador 30.

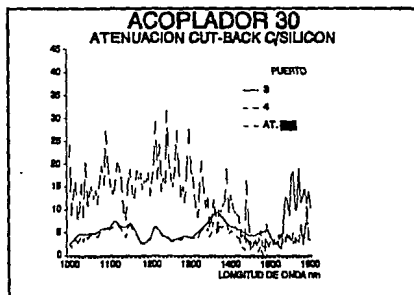


Figura 4.15 Curva de atenuación Cut-Back del acoplador 30 con la región de acoplamiento protegida con silicón.

En las figuras 4.14 y 4.15 se ilustran las curvas de atenuación del acoplador AUT92-30, con el objeto de mostrar la diferencia que significó el adicionar epóxico tipo acético al momento de proteger la región de fusión. Las características de este silicón y las otras sustancias que se probaron, se encuentran en la sección de mejoras al encapsulado del capítulo 3.

La curva de atenuación del acoplador AUT92-30, para el puerto 4, mostrada en la figura 4.14, indica un valor máximo de atenuación de 40 dB a 1180 nm. Esta curva varía entre 15 y 25 dB para λ 's entre 1000 y 1300 nm y varía entre 5 y 25 dB para λ 's entre 1300 y 1600 nm. A diferencia de la anterior, la atenuación del puerto 4 disminuyó cuando se le agregó el silicón a la región de acoplamiento, como se puede comprobar en la figura 4.15. Para esta condición, el valor máximo es de 33 dB a 1250 nm, y para los mismos intervalos, la atenuación varía entre 10 y 15 dB, y entre 3 y 20 dB; entonces se puede decir que el silicón no incrementó las pérdidas del acoplador y en cierta forma, contribuyó a la mejora del acoplamiento en alguna de las ramas.

ATENUACION ACOPLADORES EN FUNCION DEL VOLTAJE DE ESTIRADO

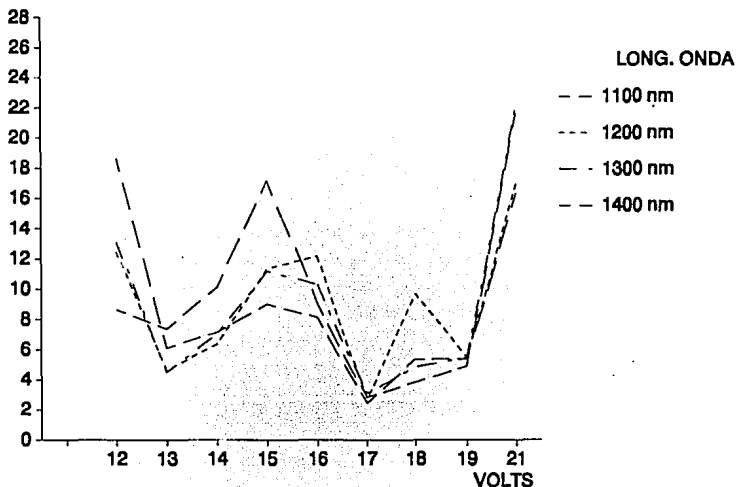


Figura 4.16 Atenuación de acopladores en función del voltaje de estirado.

La figura 4.16 ilustra gráficamente la curva de atenuación en función del voltaje que se le aplicó al dispositivo de estirado al momento de fabricación de los acopladores, para 1100, 1200, 1300 y 1400 nm.

El dispositivo de estirado se alimenta con voltaje de corriente alterna como se describe en el capítulo 3. Con este dispositivo experimental, es difícil realizar la conversión de voltaje contra fuerza debido a que al momento de estirado, cuando

el núcleo de hierro se recorre hacia adentro jalando las fibras, la fuerza decrece, es decir, la fuerza aplicada no es constante; por lo que se prefirió medir el voltaje aplicado al dispositivo, el cual se varió en pasos de 1 Volt, desde 12 hasta 19 Volts, y luego se dió un salto de 19 a 21 Volts, para llegar al máximo voltaje posible en el dispositivo.

Como se puede observar en la figura 4.16, se obtuvieron los valores más bajos de atenuación de 3 dB, cuando se le aplicó al dispositivo un voltaje de 17 Volts C.A.

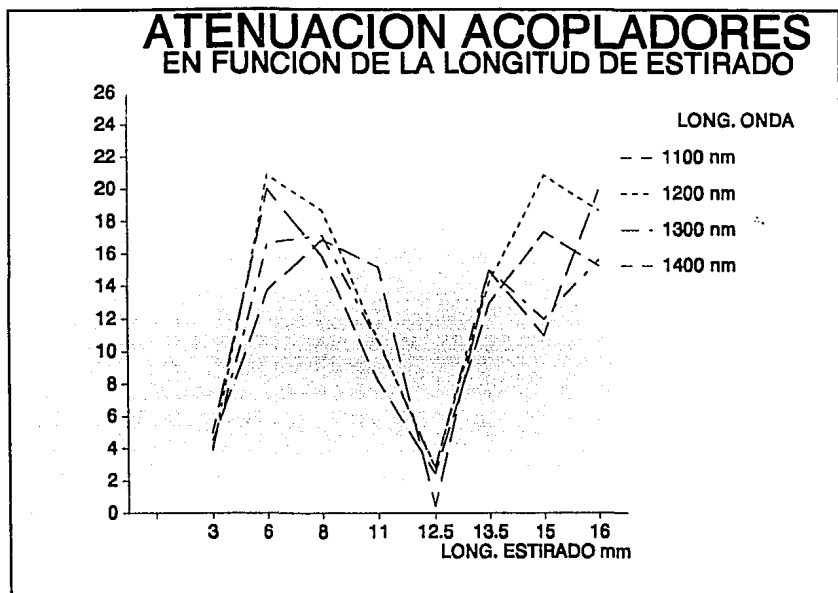


Figura 4.17 Curva de atenuación de acopladores en función de la longitud de estirado.

La figura 4.17 muestra la curva de atenuación en función de la longitud de estirado con respecto a cuatro longitudes de onda inyectadas a los acopladores, o sea, para 1100, 1200, 1300 y 1400 nm.

Los datos que forman esta curva se obtuvieron de las gráficas de atenuación contra longitud de estirado de cada acoplador. Además, dentro de la caracterización espectral, se obtuvo un registro de la longitud de que mejor se transmite para cada acoplador por lo que se construyó esta gráfica con los valores de

atenuación en función de la longitud de onda comparándolos con el estirado de la región de fusión. Se inició el proceso con un estirado de 3 mm, los valores de 6, 8, 11, 12.5, 13.5, 15 y 16 mm, se deben a que se tomó en cuenta el trabajo reportado por otros autores, para comprobar la longitud óptima reportada por ellos. Siendo en la mayoría de los trabajos, de 1 cm. Además, este valor corresponde con otro trabajo realizado en el laboratorio de Comunicaciones del IIE, donde la longitud óptima está en el intervalo de 0.8 a 1.4 cm [9].

En la figura 4.17 se observa que la longitud de estirado que dió mejores resultados fué de 12.5 mm. Algunos acopladores que tuvieron un estirado de 12.5 mm, fueron el AUT92-18, AUT92-16, AUT92-15 y el AUT92-14, los cuales tuvieron algunos de los valores más bajos de atenuación en exceso, como se observa en la tabla de parámetros ópticos básicos de la tabla 4.1. Por otro lado, algunos de los acopladores mencionados, también mostraron selectividad en longitud de onda como se muestra en la figura de atenuación contra λ del acoplador AUT92-18.

En este capítulo se explicó la técnica de caracterización espectral y de parámetros ópticos, aplicadas a los acopladores unimodo fabricados durante este trabajo. Se describió el procedimiento de éstas técnicas, así como las características del equipo empleado. Se presentaron las gráficas de los resultados obtenidos de la caracterización de atenuación espectral y las curvas de transmisión, donde se pudo observar la selectividad en longitud de onda que se presentó en varios acopladores fabricados.

Bibliografía

- [1] Lenrow, C.M. y Bhagavatula, V.A. : "Advanced fiber designs", Laser Focus Electrooptics, 1985, pp. 82-92.
- [2] Manual de operación del Monocromador Bentham.
- [3] Sánchez, G.S.: "Estudio del comportamiento de las curvas de dispersión de los plasmones de superficie utilizando la técnica de reflexión total atenuada", Tesis de Maestría, CICESE, 1989.
- [4] Manual de operación de la fuente de luz Bentham.
- [5] Rioja, F. E. : "Automatización de instrumentos mediante la interface del estandar IEEE-488", Tesis de Maestría, CENIDET, Junio 1987.
- [6] Payne, F.P. y Hussey, C.D.: "Fibre-taper devices", Department of electronics and information engineering, Southampton University, 1985.
- [7] Payne, F.P., Hussey, C.D. y Yataki, M.S.: "Modelling fused single mode fibre couplers", Electronics Letters, In press.
- [8] Kawasaki, B.S., Kawachi, M. y Hill, K.O.: "A single mode-fiber coupler with a variable coupling ratio", IEEE/OSA Journal Lightwave Technology, 1983.
- [9] Toledo Alvarez, J.A.: "Análisis y fabricación de acopladores con fibras ópticas para sistemas de comunicaciones", Tesis de maestría, CENIDET, 1991.

Conclusiones.

En este trabajo de tesis se revisaron los conceptos básicos y aplicaciones tanto de los sistemas de telecomunicación por fibra óptica unimodo como de los dispositivos acopladores basados en esta misma tecnología.

Se utilizó el método por fusión y estiramiento bicónico para fabricar diversas muestras, las cuales se caracterizaron mediante un sistema automático de medición de atenuación y se detectaron aquellas características en las que se puede basar el desarrollo de novedosos sistemas de telecomunicación por fibra óptica. Cumpliendo así, básicamente, el objetivo propuesto al inicio de esta tesis.

Las conclusiones principales que se obtuvieron son las siguientes:

1. Los sistemas de telecomunicación basados en fibra óptica unimodal para aplicaciones de larga distancia y gran capacidad constituyen una tecnología madura de uso extensivo en telefonía, en todo el mundo incluyendo a nuestro país.
2. La longitud de onda de trabajo de los sistemas de fibra óptica unimodo que primero se desarrolló fué de 1300 nm. Sin embargo, existe cada vez un mayor número de sistemas que operan a 1550 nm donde la atenuación es menor y la separación entre repetidores se incrementa.

3. Existe un nuevo desarrollo tecnológico denominado amplificación óptica el cual permite alcanzar una separación entre equipos terminales de hasta 300 Km sin repetidores, transmitiendo a velocidades de hasta 2.5 Gbits/s. Actualmente, esta tecnología se encuentra en la transición de los laboratorios de investigación hacia las aplicaciones en sistemas comerciales.
4. El acoplador de fibra óptica unimodo es un dispositivo esencial en algunas aplicaciones, por ejemplo, en la construcción de los amplificadores ópticos así como en sistemas de multiplexaje por longitud de onda (WDM), en las que bajo ciertas condiciones es posible duplicar la capacidad de un sistema de 1300 nm mediante la adición de un nuevo sistema a 1550 nm, utilizando el mismo par de fibras ópticas unimodo.
5. El acoplador de fibra óptica unimodo es un dispositivo costoso, en particular, los acopladores WDM pueden costar alrededor de 700 USA dólares, por lo que es atractivo desarrollar su fabricación en México a un precio reducido.
6. De la revisión de los modelos teóricos efectuada en la literatura se establece que el acoplador unimodo presenta un comportamiento selectivo con respecto a la longitud de onda de operación. Esto se debe a que el mecanismo de acoplamiento, por batimiento modal, es una función de la longitud de onda.

7. Se considera que el método de fabricación empleado es adecuado para la producción de acopladores unimodo, factibles de utilizarse en sistemas de telecomunicación. Sin embargo, requiere de trabajo adicional para minimizar las pérdidas por atenuación en exceso que presentaron nuestros acopladores experimentales y llevarlos al nivel de los dispositivos comerciales.
8. En el método de fusión y estiramiento biconico se utilizó una técnica de estirado horizontal producido por el deslizamiento de un núcleo ferromagnético en el interior de una bobina. Se encontró que el valor óptimo del potencial aplicado a dicha bobina fué de 17 V.
9. Se realizaron diversos ensayos de longitud de estirado de los que se determinó como valor óptimo 12.5 mm.
10. Se probó el uso del silicón tipo acético como material de protección alrededor de la región de fusión, encontrándose que éste proporciona mejora considerable en la resistencia mecánica y flexibilidad del acoplador sin un deterioro apreciable de sus características ópticas de transmisión.
11. Se comprobó que el uso de un sistema automático de caracterización de la atenuación espectral, en fibras ópticas, es una técnica excelente para la obtención del comportamiento de los acopladores con respecto a la longitud de onda. Las características de este sistema tales como estabilidad de la fuente luminosa, sistema de recuperación de señales muy débiles inmersas en ruido con la técnica de

amplificación "amarrada en fase", diversos rangos de amplificación, alta selectividad del monocromador, barrido espectral automático y adquisición de datos por medio de la interface IEEE 488 a una computadora personal es esencial para este trabajo ya que el pequeño núcleo de las fibras ópticas unimodo y la pequeña cantidad de potencia que se puede acoplar a este tipo de fibras hacen prácticamente indispensable el uso de este equipo especializado.

12. Los resultados obtenidos en cuanto a los parámetros básicos de atenuación, muestran que los acopladores fabricados tienen una atenuación en exceso alta comparada con los dispositivos comerciales. Se considera que esto se debió a que no se contó con un sistema automatizado para el monitoreo de la potencia acoplada en los dos puertos de salida, así como del control preciso de todas las variables involucradas en el proceso de fabricación como la temperatura y acercamiento de la flama que produce la fusión.
13. Del estudio experimental de la caracterización de acopladores de fibra óptica unimodo se determinó que efectivamente se presenta el fenómeno de selectividad en acopladores unimodo, es decir, que la tasa de acoplamiento depende de la longitud de onda transmitida y además en forma complementaria en los puertos de salida. Esto último se refiere a que cuando el máximo de transmisión se tiene en un puerto de salida simultáneamente se obtiene un mínimo en

- la otra rama del acoplador para esa misma longitud de onda.
14. Aunque se demostró el efecto de selectividad de longitud de onda, el comportamiento exacto no fué el esperado por aplicaciones de multiplexaje a 1300 y 1550 nm ó de 980/1480/1550 nm requerido en amplificación óptica debido también a la falta de un control preciso sobre los parámetros de fabricación ya mencionados.
 15. Se considera que es perfectamente factible la fabricación de acopladores unimodo con tecnología desarrollada en México competitivos, en especificaciones técnicas y costo, con los productos comerciales provenientes del extranjero con las mejoras que se proponen al sistema de fabricación utilizado en este trabajo.

Tendencias de Automatización.

Las necesidades básicas de automatización de un laboratorio óptico dedicado a la fabricación de acopladores de fibra óptica unimodo, que busque reducir el número de variables controladas manualmente, así como disminuir los valores de atenuación en exceso, lograr selectividad en múltiples longitudes de onda y obtener máxima reproducibilidad, se pueden resumir de la siguiente forma:

1° Se requiere tener motores a pasos con avances del orden de micras por cada paso, para controlar: a) La longitud de estirado y b) El acercamiento de la flama. Existen en el mercado, dispositivos muy precisos, llamados nanomotores, con los que se

puede establecer el control mencionado, ya que se evita el "brinco" brusco que se presenta en los motores de pasos normales.

Estos dispositivos cuentan con las características de resolución, repetibilidad y precisión necesarias para el control fino del estirado de las fibras y del acercamiento y retiro de la flama para la fusión.

La marca Melles Griot fabrica motores de este tipo, que se pueden conectar a una interface para insertarla a una computadora personal y con el software adecuado, lograr la automatización del estirado y acercamiento de la flama.

Las especificaciones de estos motores son:

- Resolución: 50 nm.
- Repetibilidad: ± 100 nm
- Precisión: ± 1 μ m.
- Velocidad máxima: 2.5 mm/seg.
- Aceleración máxima: 1.25 m/seg².
- Carga máxima: 10 Kg.
- Dimensiones: 44.3 mm x 44.3 mm x 158.4 mm.
- Peso: 370 gr.

2° Se requiere un monitoreo preciso de la cantidad de potencia acoplada a cada rama de salida, por lo que es necesario contar con 2 analizadores de forma de onda a la λ de operación, para enviar la señal hacia un osciloscopio.

3° Se debe tener un sistema de graficación de la potencia de las ramas de salida del acoplador, con rangos grandes en amplitud y en tiempo.

4° Se necesita contar con un controlador digital y programable de los motores, que se encargarían del estirado y acercamiento de la flama, así como de los programas, que serían codificados para poder seleccionar longitud y velocidad de estirado, fuerza de estirado, tiempo de acercamiento y retiro de la flama, etc. Una opción es el empleo del estandar IEEE-488, para desarrollar el controlador de instrumentos y los programas.

5° Es necesario tener controlada la cantidad de humedad del laboratorio donde se fabriquen los acopladores, debido a que las fibras se degradan fácilmente con la humedad del aire y con el polvo del ambiente ya que se descubre una porción de la fibra al retirar el recubrimiento exterior o acrilato, presentando atenuación a causa de los radicales OH^\cdot del agua contenida en el ambiente.