Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada



ESTUDIO DE ACOPLADORES DE FIBRA OPTICA PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES

TESIS MAESTRIA EN CIENCIAS

MARCO ANTONIO FELIX LOZANO

Ensenada, Baja California, Septiembre de 2001.

. . *



TESIS DEFENDIDA POR

Marco Antonio Félix Lozano

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. David Salazar Miranda Director del Comité Jarala U Heriberto Márquez Becerra Dr. Alfonso García Weidner Miembro del Comité Miembro del Comité Yaiv Dr. Horacio Soto Ortiz Esparza Dr. Francisco Javier Hernández Miembro del Comité Miembro del Comité Dr. Jesús Enrique Rivera Garibaldi Miembro del Comité

Dr. Eugenio Rafael Méndez Méndez

Jefe del Departamento de Óptica

Dr. Luis Alberto Delgado Argote

Director de Estudios de Posgrado

14 de septiembre del 2001

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA



División de Física Aplicada

Departamento de Óptica

"Estudio de acopladores de fibra óptica para sistemas de comunicaciones"

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS presenta:

Marco Antonio Félix Lozano

Ensenada, Baja California, México. Septiembre del 2001

RESUMEN de la Tesis de **MARCO ANTONIO FÉLIX LOZANO**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** en **ÓPTICA** con especialidad en **OPTOELECTRÓNICA**.

Ensenada, Baja California, México. Septiembre del 2001.

ESTUDIO DE ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES

Resumen aprobado por:

Daniel Maley v

Dr. David Salazar Miranda Director de Tesis

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo el diseño, la fabricación y la caracterización de acopladores de fibra óptica a partir del adelgazamiento y fusión de fibras ópticas. El trabajo comprende un estudio sobre los parámetros que determinan la transferencia de potencia entre dos núcleos que comparten una misma cubierta (fibras fusionadas), un trabajo experimental de dichos parámetros en un proceso térmico para el control de las potencias de salidas en los dos brazos del acoplador y la tarea de encapsular los acopladores para su posterior manejo.

Estudios sobre la tensión necesaria para adelgazar las fibras y su relación con las propiedades de guiado de la fibra fueron la parte inicial de un trabajo experimental. De igual manera, el control sobre las dimensiones de la región de contacto entre las dos fibras hizo posible la fabricación de acopladores cuyas perdidas en la región de acoplamiento son inferiores al 10% (0.4 dB) dentro de un intervalo de transferencia de potencia que va desde porcentajes bajos hasta la transferencia total de potencia de una fibra a otra.

Un problema que merece especial atención es el encapsulado de las fibras, al cual se le dedicó una buena parte del tiempo y que fue resuelto de manera satisfactoria.

Palabras clave: acopladores de fibra óptica, adelgazamiento, transferencia de potencia.

ABSTRACT of the Thesis of **MARCO ANTONIO FÉLIX LOZANO**, presented as partial requirement to obtain the **MASTER IN SCIENCES** grade in OPTICS with specialty in **OPTOELECTRONICS**.

Ensenada, Baja California, México. September 2001.

STUDY OF FIBER OPTIC COUPLERS FOR COMMUNICATION SYSTEMS

Abstract approved by:

Dand Alay r

Dr. David Salazar Miranda Thesis Advisor

ABSTRACT

The objective of this work is the design, fabrication and characterization of fiber optic couplers by the means of fusion and tapering of optical fibers. The work includes a study about the parameters that determine the optical power transfer between two cores that share the same cladding (fused fibers), an experimental work of those parameters in a thermal process in order to control the optical power at the output ports of the fabricated coupler, and the work that is needed to encapsulate the fabricated couplers for further handling.

Studies about the pulling force needed to taper the fibers and it's relation with the waveguide properties of the fiber were the starting point of the experimental work. In the same way, the control of the dimensions of the contact region of the two fibers made possible the fabrication of couplers with excess power loses of less than 10% (0.4 dB), inside a power transfer interval from low percentages to total power transfer from one fiber to the other.

A problem that deserves special attention is the encapsulation of the coupler, which took a great part of the time and was resolved in a satisfactory manner.

Keywords: fiber optic couplers, tapering, power transfer.

CONTENIDO

CAPÍTULO I: Introducción	1
I.1 Acopladores de fibras ópticas I.2 Objetivo I.3 Organización de la Tesis	1 3 4
CAPÍTULO II: Conceptos básicos de fibras ópticas	6
 II.1 Definición II.2 Principio de funcionamiento II.3 Abertura numérica II.4 Perfil de índice de refracción II.5 Propagación de la luz en una fibra con perfil de índice escalón II.6 Parámetro V II.7 Modos de propagación II.8 Fibras monomodales II.9 Pérdidas en las fibras ópticas II.9.1 Curva de atenuación en las fibras ópticas II.9.2 Medición de pérdidas en fibras ópticas II.9.3 Pérdidas por curvatura 	7 8 9 12 14 17 17 18 20
CAPÍTULO III: Teoría de acoplamiento en fibras ópticas adelgazadas y fusionadas	21
 III.1 Principio de acoplamiento III.2 Análisis de los supermodos de un acoplador de fibras fusionadas III.3 Teoría de modos acoplados para fibras con dos núcleos III.4 Fibras ópticas "adelgazadas" III.4.1 Proceso de adelgazamiento III.4.2 Evolución del campo eléctrico en las fibras ópticas adelgazadas III.5 Grado de fusión 	21 24 28 34 35 35 37
CAPÍTULO IV: Fabricación de acopladores de fibras ópticas adelgazadas y fusionadas	39
 IV.1 Selección de fibras utilizadas IV.2 Descripción de material y equipo utilizado para medición de pérdidas IV.2.1 Conectores temporales IV.2.2 Fuente de luz y detectores IV.3 Preparación de cables de fibra óptica para hacer acopladores IV.3.1 Corte y desforrado fibras ópticas IV.3.2 Pulido y revisión de conectores 	39 40 41 42 42 43

<u>Página</u>

CONTENIDO (continuación)

Página

IV.3.3 Prueba final con fuente de luz y detector IV 4 Selección de fuente térmica para reblandecimiento y fusión de fibras		
ópticas	44	
IV.5 Adelgazamiento de fibras ópticas	46	
IV.5.1 Arregio experimental utilizado para adelgazar fibras ópticas	47	
retícula graduada	51	
IV.6 Fusión lateral de dos fibras ópticas	54	
IV.6.1 Arreglo experimental utilizado	54	
IV.6.2 Proceso de preparación de fibras ópticas previo a fusión	57	
IV.6.3 Sistema para monitorear potencia de salida	58	
IV.6.4 Fusión de fibras ópticas para fabricar acoplador	59	
IV.6.4.2 Determinación de tiempo de calentamiento por	60	
monitoreo de potencia de salida	61	
IV.6.4.3 Final de la fusión	62	
IV.7 Obtención de gráficas de coeficiente de acoplamiento	64	
IV.8 Encapsulado de acopladores	70	
IV.9 Caracterización de acoplador fabricado	/1	
CAPÍTULO V: Análisis de resultados y discusión	73	
V.1 Acopladores fabricados	73	
V.2 Análisis de pérdidas en fibras ópticas adelgazadas	78	
V.3 Análisis de gráficas obtenidas con el sistema de adquisición de datos	79	
V.4 Obtención de la cantidad de estiramiento necesario para transferir		
totalmente la potencia de un puerto de salida hacia el otro en un	00	
V 5 Puntos de posibles problemas	89	
	00	
CAPÍTULO VI: Conclusiones	92	
BIBLIOGRAFÍA	94	
Apéndice A: Proceso de desforrado de fibras ópticas	97	
Apéndice B: Preparación de conectores temporales	98	
Apéndice C: Prueba de cables con fuente de luz y detector	101	
Apéndice D: Proceso de preparación de fibras ópticas previo a fusión	102	
Apéndice E: Pasos a seguir para encapsular un acoplador	105	
Apendice F: Proceso de caracterización de un acopiador	106	

LISTA DE FIGURAS

Figura:		Página:
1	Acoplador de fibra óptica funcionando como divisor de potencia.	2
2	Estructura de una fibra óptica.	6
3	Esquema de rayos para explicación de la ley de Snell.	7
4	Abertura numérica de una fibra óptica.	8
5	Perfiles de índice de refracción.	9
6	Sistema de coordenadas cilíndricas.	10
7	Distribución Gaussiana.	14
8	Curva de atenuación en la fibra óptica de Silicio.	18
9	Descripción esquemática de un acoplador de fibras ópticas.	21
10	Batimiento entre dos modos.	22
11	Distribuciones de campo de los supermodos en un acoplador de fibras ópticas de dos modos.	25
12	Representación esquemática de la transferencia total de potencia de una fibra a otra en la región de acoplamiento.	27
13	Sistema de coordenadas utilizado para analizar acoplamiento de potencia óptica entre dos núcleos de fibras ópticas.	28
14	Propagación del campo electromagnético a través de una fibra	35
15	Grado do fusión coro (f - 0)	37
15	Grado de fusion cero ($r = 0$).	37
16	Grado de fusión de alto orden (f \rightarrow 1).	38
17	Conectores temporales.	40
18	Módulo de fuente de luz de diodo láser y módulo de fotodetector.	. 41

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<u>Figura:</u>	Pa	ágina:
19	Arreglo experimental para medición de temperatura dentro del tubo cerámico utilizado.	45
20	Medición de la máxima temperatura alcanzada.	45
21	Esquema del arreglo experimental utilizado para adelgazar fibras ópticas.	47
22	Gráfica de adelgazamiento de fibra por medio de tensión con peso de 4.4 gramos.	48
23	Gráfica de adelgazamiento de fibra por medio de tensión con peso de 7.5 gramos.	49
24	Gráfica de adelgazamiento de fibra por medio de tensión con peso de 11.4 gramos.	50
25	Fotografía de microscopio utilizado para medición y análisis de fibras ópticas fusionadas y adelgazadas.	52
26	Fotografía de una fibra sin adelgazar.	53
27	Fotografía de una fibra adelgazada.	53
28	Esquema del arreglo experimental utilizado para fabricar acopladores.	55
29	Fotografía del arreglo experimental mencionado.	55
30	Medición de potencia previa a fusión.	59
31	Región fusionada sin adelgazar.	63
32	Región fusionada y adelgazada.	63
33	Diagrama a bloques del sistema de adquisición de datos utilizado para obtener gráficas de coeficiente de acoplamiento.	65
34	Fotografía del sistema de adquisición de datos que se conecta a la PC.	66

LISTA DE FIGURAS (continuación)

<u>Figura:</u>		<u>Página:</u>
35	Fotografía de monitor en el que se muestra una ventana abierta del programa para adquisición de datos WinDaq.	66
36	Fotografía de la tarjeta de adquisición de datos utilizada.	67
37	Fotodetector utilizado en el sistema de adquisición de datos.	69
38	Fotografía de varios acopladores encapsulados y removidos del arreglo experimental.	70
39	Identificación de puertos de un acoplador fabricado.	71
40	Gráfica esquemática del punto en que se detuvo el estiramiento en el acoplador 1.	74
41	Gráfica esquemática del punto en que se detuvo el estiramiento en el acoplador 2.	75
42	Gráfica esquemática del punto en que se detuvo el estiramiento en el acoplador 3.	76
43	Gráfica esquemática del punto en que se detuvo el estiramiento en el acoplador 4.	77
44	Gráfica de pérdidas de potencia luminosa que se producen en una fibra óptica al ser adelgazada.	78
45	Gráfica de monitoreo de potencia de salida por brazo 3 de un acoplador durante el proceso de fabricación.	80
46	Gráfica de monitoreo de potencia de salida por brazo 4 de un acoplador durante el proceso de fabricación.	81
47	Dimensiones iniciales de la región de la fibra que se va a estirar.	84
48	Obtención de la velocidad de estiramiento de una fibra óptica.	85
49	Dimensiones iniciales de la región de la fibra que se estira en la sección de la gráfica analizada.	86
50	Dimensiones finales de la región de la fibra que se estira en la sección de la gráfica analizada.	86

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura:		<u>Página:</u>
51	Obtención de longitud Z final.	87
52	Obtención de tiempo de estiramiento para calcular Lc.	88
53	Fotografía de montura en donde se produce la curvatura en las fibras.	90
54	Región en que se desforra el tramo de fibra.	97
55	Desforrado de los extremos de las fibras para agregar conectores temporales.	98
56	Plancha utilizada para pulir las caras de los conectores temporales de fibras ópticas.	99
57	Cara de conector mal pulido, observado con el amplificador.	100
58	Cara de conector correctamente pulido, observado con el amplificador.	100
59	Dibujo utilizado para describir un punto de torsión.	103

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla:</u>		Página:
I	Nivel de pérdidas en dB y su equivalente porcentaje de potencia luminosa que permanece en la fibra.	19
П	Especificaciones de la fuente de luz y detector utilizados para medición de pérdidas.	41
Ш	Características del acoplador 1 (aproximadamente 90/10).	74
IV	Características del acoplador 2 (aproximadamente 70/30).	75
V	Características del acoplador 3 (aproximadamente 40/60).	76
VI	Características del acoplador 4 (50/50).	77

ESTUDIO DE ACOPLADORES DE FIBRA ÓPTICA PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

I.1 Acopladores de fibras ópticas

Poco a poco los cables de fibras ópticas han venido ocupando el lugar de los cables metálicos en los sistemas de transmisión de datos. Las ventajas que ofrecen las fibras, las colocan en la posición de ser la opción más viable para formar las redes de información que cubren todo el mundo. Sin embargo, si bien es cierto que las fibras tienen una mayor capacidad y una mayor velocidad de transmisión, todavía existen problemas para acoplar la señal que sale de la fibra a dispositivos mecánicos u optoelectrónicos. Así, tareas como dividir la señal en varias salidas, controlar sus respectivas potencias, seleccionar las frecuencias, entre otras, están siendo atacadas por diversos grupos de investigación y desarrollo en el mundo.

Los acopladores de fibras ópticas fusionadas son componentes muy útiles en los sistemas de comunicaciones. Con un diseño apropiado, este tipo de acopladores puede ser utilizado como divisores de potencia, filtros y multiplexores.

Si bien es cierto que los primeros acopladores hechos por fusión de fibras ópticas fueron producidos en 1977 por Kawasaki (1981), es ahora que renace el interés por los mismos debido a su potencial aplicación en el multiplexado de señales. Los sistemas de multiplexado por división de longitud de onda (WDM) permiten la transmisión simultanea de un gran número de señales desplazadas ligeramente en longitud de onda. A la entrada y salida de una misma fibra óptica que propague simultáneamente múltiples longitudes de onda, se requieren dispositivos que las concentren o separen, según sea el caso, con un mínimo de pérdidas.

En este trabajo se plantea realizar un estudio teórico-experimental de acopladores ópticos divisores de potencia obtenidos fusionando fibras ópticas usadas en las líneas de comunicaciones ópticas (1330 y 1550 nm). Se tiene como un antecedente directo el estudio de acopladores por el grupo de Óptica Integrada de CICESE [Paez, 1998; Paez et al., 2000].



Figura 1.- Acoplador de fibra óptica funcionando como divisor de potencia.

El acoplador más sencillo, y del cual se basará esta tesis, es un divisor de potencia. En el caso de un acoplador de fibras ópticas fusionadas, al final las fibras están separadas y los coeficientes de la división de la potencia provienen del funcionamiento de la sección fusionada (región de acoplamiento). En teoría debe ser posible transferir la potencia total de una salida a la otra variando la configuración de la zona de fusión. Así, es posible calcular la potencia de salida en función del coeficiente de acoplamiento, el cual depende de los siguientes parámetros: longitud de fusión, longitud de onda, longitud de acoplamiento, índices de refracción, diámetros de las fibras, entre otros. El funcionamiento del acoplador depende además del grado de fusión y configuración de las fibras ópticas en la región de acoplamiento.

Si bien es cierto que estos dispositivos se encuentran comercialmente, existe en la literatura poca información relacionada con los detalles técnicos sobre su elaboración, y en el mercado es casi imposible tener acceso a un sistema de fabricación debido, en primer punto, su alto precio, y después, debido a restricciones estratégicas que imponen quienes controlan los mercados internacionales en dicha área.

I.2 Objetivo

Estudio teórico-experimental sobre dispositivos acopladores de fibras ópticas fusionadas. Fabricación de acopladores de fibras ópticas fusionadas controlando la división de potencia en los brazos de salida y con perdidas bajas.

I.3 Organización de la Tesis

El capítulo I consiste en una introducción al tema del que trata la Tesis, así como los antecedentes que se tienen y el planteamiento del trabajo a realizar para alcanzar los objetivos.

En el capítulo II se presenta la teoría fundamental de fibras ópticas, la cual es necesaria para conocer los parámetros físicos de las fibras ópticas y la forma en que se propaga la luz a través de éstas.

El capítulo III consiste en una explicación de los factores por los que se logra el acoplamiento de luz de una fibra a otra. Esto se debe al acoplamiento modal entre las dos fibras utilizadas. Aquí se describe el planteamiento teórico y lo que se necesita realizar físicamente para lograr el acoplamiento modal entre dos fibras ópticas.

El capítulo IV describe todo el proceso para fabricar un acoplador de fibras ópticas fusionadas. Incluye la preparación de las fibras a utilizar, los procesos de estiramiento, fusión y control de la potencia de salida. Se describe el sistema utilizado para monitorear en tiempo real la potencia de salida de un acoplador durante el proceso de fabricación. También se describe el proceso de encapsulado y caracterización del acoplador fabricado.

En el capítulo V se presenta un análisis de los resultados obtenidos experimentalmente. Aquí se incluye la caracterización de los acopladores fabricados obteniendo el valor de los parámetros que se indican en los acopladores comerciales.

Finalmente en el capítulo VI se presentan las conclusiones que se derivan de este trabajo de Tesis.

~

CAPÍTULO II

CONCEPTOS BÁSICOS DE FIBRAS ÓPTICAS

II.1 Definición

La fibra óptica es una guía de onda dieléctrica fabricada mayormente con sílice fundida y vidrios ópticos diversos. La estructura básica de una fibra óptica (ver la figura 1), consiste en una parte central llamada núcleo, que tiene un índice de refracción n_1 , que se encuentra rodeada por un material llamado cubierta, que tiene un índice de refracción n_2 (el cual es menor que n_1). Las ondas electromagnéticas viajan por la fibra al ser confinadas en la región del núcleo.



Figura 2.- Estructura de una fibra óptica.

II.2 Principio de funcionamiento.

La forma en que la luz es guiada a través de una fibra óptica es gobernada por la ley de Snell. La ley de Snell define el paso de un rayo de luz desde un medio con índice de refracción n_1 , hacia un medio con índice de refracción n_2 , con un ángulo de incidencia *i* (ver figura 3).

$$n_1 \operatorname{sen}(i) = n_2 \operatorname{sen}(r) \tag{1}$$



Figura 3.- Esquema de rayos para explicación de la ley de Snell.

Donde *r* es el ángulo del rayo refractado en el medio con índice de refracción n_2 . Existe un valor del ángulo de incidencia i_c , llamado ángulo crítico, para el cual la onda incidente es reflejada totalmente en la interfaz de los dos medios, el cual está dado por

$$i_c = \arcsin(n_2/n_1) \quad \text{para} \quad n_2 < n_1 \tag{2}$$

Si el ángulo de incidencia i es mayor que el ángulo crítico, la onda incidente será reflejada de forma total.

II.3 Abertura numérica.

Es una medida del poder colector de luz de un sistema óptico, en este caso la fibra. La fórmula para calcularla es:

$$NA = n_{aire} \operatorname{sen} \theta_a = \sqrt{(n_1)^2 - (n_2)^2}$$
 (3)

Donde n_{aire} , n_1 y n_2 son los índices de refracción del aire, núcleo y cubierta, respectivamente. θ_a se define como el ángulo máximo con respecto a la normal de la interfaz aire-núcleo con el que la luz incidente que entra al núcleo experimenta reflexión total interna dentro de la fibra en la interfaz núcleo-cubierta (ver figura 4).



Figura 4.- Abertura numérica de una fibra óptica.

II.4 Perfil de índice de refracción.

El índice de refracción del núcleo n_1 , con respecto al de la cubierta n_2 juega un papel importante en la propagación de la luz a través de la fibra óptica. Los dos tipos de perfiles más importantes son los de índice escalón e índice gradiente. En las siguientes gráficas se muestran estos dos perfiles, siendo a el punto de frontera núcleo-cubierta.



Figura 5.- Perfiles de índice de refracción.

II.5 Propagación de la luz en una fibra con perfil de índice escalón.

Para analizar la propagación de la luz a través de una fibra óptica se hace uso de la teoría electromagnética. El objetivo es determinar los campos eléctrico y magnético de las ondas que se propagan, los cuales satisfacen las ecuaciones de Maxwell en la regiones de frontera del cilindro dieléctrico formado por el núcleo y cubierta.

Cada una de las componentes de los campos eléctrico y magnético deben de satisfacer la ecuación de Helmholtz en coordenadas cilíndricas

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 U = 0$$
(4)

donde $n = n_1$ en el núcleo (r < a) y $n = n_2$ en la cubierta (r > a), y $k_0 = 2\pi/\lambda_0$. a es el radio del núcleo y b es el radio de la cubierta, pero se asume que es lo suficientemente grande para considerarse como infinito. La amplitud compleja $U = U(r, \phi, z)$ representa cualquier componente cartesiana de campo eléctrico o

magnético, o las componentes axiales E_z y H_z en coordenadas cilíndricas. En la figura 6 se muestra el sistema de coordenadas cilíndricas utilizado en este caso.



Figura 6.- Sistema de coordenadas cilíndricas.

Se debe de buscar una solución que tome la forma de una onda viajando en dirección *z* con una constante de propagación β para que la dependencia de *U* con respecto a *z* sea de $e^{-j\beta z}$. Como *U* debe de ser una función periódica del ángulo ϕ , con periodo 2π , asumimos que la dependencia con respecto a ϕ es armónica de la forma $e^{-jl\phi}$, donde *l* es un número entero. Por lo tanto tenemos

$$U(r,\phi,z) = u(r) e^{-jl\phi} e^{-j\beta z}$$
(5)

donde $l = 0, \pm 1, \pm 2,...,$ que al sustituirlo en la ecuación de Helmholtz da una ecuación diferencial ordinaria para u(r):

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{du}{dr} + \left(n^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2}\right)u = 0$$
(6)

La onda que se propaga por la fibra es confinada siempre y cuando la constante de propagación sea más pequeña que el número de onda en el núcleo

 $0(\beta < n_1k_0)$, y más grande que el número de onda de la cubierta ($\beta > n_2k_0$), por lo tanto es conveniente definir

$$k_T^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2$$
(7a)
$$y$$
$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2$$
(7b)

de manera que las ondas confinadas k_T^2 y γ^2 sean positivas, y por lo tanto k_T y γ sean reales. Entonces se tienen ecuaciones para núcleo y cubierta separadas:

$$\frac{d^{2}u}{dr^{2}} + \frac{1}{r}\frac{du}{dr} + \left(k_{T}^{2} - \frac{l^{2}}{r^{2}}\right)u = 0 \qquad r < a \text{ (núcleo)}$$
(8)

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{du}{dr} + \left(\gamma^2 + \frac{l^2}{r^2}\right)u = 0 \qquad r > a \text{ (cubierta)}$$
(9)

Las soluciones a estas ecuaciones diferenciales son en forma de funciones Bessel;

$$u(r) = J_l(k_T r)$$
 para el núcleo (10)

$$u(r) = H_l^{(1)}(\gamma r)$$
 para la cubierta (11)

 $J_l(x)$ es la función Bessel de primer tipo y orden *l*, la cual oscila como las funciones seno y coseno pero con un decaimiento en amplitud; y $H_l^{(1)}(x)$ es la función de Bessel modificada del segundo tipo y orden *l* (función de Hankel), la cual decae en amplitud exponencialmente al incrementarse *x*.

Este importante parámetro conjunta los parámetros estructurales de la fibra con los de la frecuencia. Se utiliza para determinar las condiciones de corte de los modos, constantes de propagación y la capacidad de confinamiento de la luz en la fibra.

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda_0} NA \tag{12}$$

Donde

a = Diámetro del núcleo de la fibra. λ_0 = Longitud de onda de la luz utilizada. NA = Abertura numérica.

II.7 Modos de propagación.

La propagación de la luz a lo largo de fibras ópticas se describe generalmente por los modos guiados de la fibra. Cuando se introducen las condiciones de frontera en la interfaz núcleo-cubierta, se permite sólo un número discreto de soluciones a la ecuación de onda. Los modos de la fibra son aquellas distribuciones del campo en el plano transversal que no se ven alterados al viajar la luz a lo largo de ésta. Cada modo tiene su propia constante de propagación. Por lo tanto, un número finito de modos aparece como resultado de las condiciones de frontera en la interfaz núcleo-cubierta.

En el sistema de coordenadas cilíndricas, todas las componentes transversales de los campos eléctrico y magnético E_r , E_{ϕ} , H_r , H_{ϕ} , donde *r* denota la

dirección radial y ϕ la dirección azimutal, no se hacen cero al mismo tiempo en ningún momento. Estas componentes se pueden expresar por medio de las ecuaciones de Maxwell en términos de las componentes E_z y H_z como:

$$E_{r} = \frac{-j}{\gamma^{2}} \left(\beta \frac{\partial E_{z}}{\partial r} + \omega \mu_{0} n \frac{1}{r} \frac{\partial H_{z}}{\partial \phi} \right)$$
(13)

$$E_{\phi} = \frac{-j}{\gamma^2} \left(\beta \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \omega \mu_0 n \frac{\partial H_z}{\partial r} \right)$$
(14)

$$H_{r} = \frac{-j}{\gamma^{2}} \left(\beta \frac{\partial H_{z}}{\partial r} - \omega \varepsilon_{0} n \frac{1}{r} \frac{\partial E_{z}}{\partial \phi} \right)$$
(15)

$$H_{\phi} = \frac{-j}{\gamma^2} \left(\beta \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + \omega \varepsilon_0 n \frac{\partial E_z}{\partial r} \right)$$
(16)

 $\gamma = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}$ (17)

Si el número de ceros del campo eléctrico en la dirección azimutal ϕ es el número entero *l* antes definido, entonces los modos de propagación para *l* = 0 son *TE* (transverso eléctrico) cuando $E_z = 0$ y *TM* (transverso magnético) cuando $H_z = 0$. Para designar el número de cada modo se utiliza la nomenclatura $TE_{0,m}$ y $TM_{0,m}$. Para $l \neq 0$, E_z y H_z son diferentes de cero, y entonces los modos se hacen híbridos y se designan $HE_{l,m}$ y $EH_{l,m}$. En estos últimos el subíndice m (m = 0, 1, 2,...) representa el número de ceros en la dirección radial.

para r < a (núcleo) y:

II.8 Fibras monomodales.

Las fibras ópticas monomodales soportan uno o dos modos de transmisión, pero principalmente el fundamental. Una fibra que tiene un radio de núcleo *a* y una abertura numérica *NA* opera en el modo fundamental siempre y *cuando V* = $2\pi(a/\lambda_0)NA$ sea menor que 2.405. Esto se logra utilizando un diámetro de núcleo y abertura numérica pequeños, o trabajando con una longitud de onda lo suficientemente grande. El modo fundamental radial tiene una distribución de intensidad de campo eléctrico en forma de campana similar a la de la distribución Gaussiana, como se muestra en la figura 7.



Figura 7.- Distribución Gaussiana. *I* es la intensidad de campo eléctrico en unidades normalizadas y *r* es el radio de la fibra.

Este modo es el que tiene el mayor confinamiento de potencia luminosa dentro del núcleo de la fibra y siempre está presente en la distribución modal del campo eléctrico que viaja a través de la fibra.

Para analizar la propagación de la luz a través de una fibra monomodal se determina la solución de los campos eléctrico y magnético para el núcleo y la cubierta, aplicando las condiciones de frontera entre estos dos, de tal forma que ambas soluciones sean continuas para r = a. Esto se representa con la ecuación de valores propios para cada modo propagado, en especial el fundamental, y de esta manera se puede determinar la potencia transmitida por el núcleo y la cubierta.

Se introducen las componentes de campo eléctrico y magnético, E_z y H_z en la ecuación de Helmholtz en coordenadas cilíndricas, y se encuentran las siguientes soluciones para el núcleo r < a:

$$E_{z} = \frac{jAk'}{2\beta_{l}} \left[J_{l+1}(k'r) \begin{cases} \sec(l+1)\phi \\ -\cos(l+1)\phi \end{cases} + J_{l-1}(k'r) \begin{cases} \sec(l-1)\phi \\ -\cos(l-1)\phi \end{cases} \right]$$
(18)

$$H_{z} = \frac{-jAk'}{2k} \left(\frac{\varepsilon_{0}}{\mu_{0}}\right)^{1/2} \left[J_{l+1}(k'r) \begin{cases}\cos(l+1)\phi\\\sin(l+1)\phi\end{cases} - J_{l-1}(k'r) \begin{cases}\cos(l-1)\phi\\\sin(l-1)\phi\end{cases}\right]$$
(19)

donde

$$A = \text{Constante.}$$

$$k = \omega(\varepsilon_0 \mu_0)^{1/2}$$
(20)

$$k' = (n_l^2 k^2 - \beta_l^2)^{1/2}$$
(21)

Y para la cubierta r > a:

$$E_{z} = \frac{-jA\gamma}{2\beta_{l}} \frac{J_{l}(k'a)}{H_{l}^{(1)}(j\gamma a)} \left[H_{l+1}^{(1)}(j\gamma r) \begin{cases} \operatorname{sen}(l+1)\phi \\ -\cos(l+1)\phi \end{cases} + H_{l-1}^{(1)}(j\gamma r) \begin{cases} \operatorname{sen}(l-1)\phi \\ -\cos(l-1)\phi \end{cases} \right]$$
(22)

$$H_{z} = \frac{A\gamma}{2k} \left(\frac{\varepsilon_{0}}{\mu_{0}}\right)^{1/2} \frac{J_{l}(k'a)}{H_{l}^{(1)}(j\gamma a)} \left[H_{l+1}^{(1)}(j\gamma r) \begin{cases} \cos(l+1)\phi \\ \sin(l+1)\phi \end{cases} - H_{l-1}^{(1)}(j\gamma r) \begin{cases} \cos(l-1)\phi \\ \sin(l-1)\phi \end{cases}\right]$$
(23)

donde

$$\gamma = \left(\beta_l^2 - n_2^2 k^2\right)^{1/2}$$
(24)

Para determinar los valores propios que surgen al aplicar las condiciones de frontera, es necesario igualar las componentes de E_z en la frontera de núcleo y cubierta por medio de los coeficientes que son función de seno y coseno. Al hacer esto se obtienen en la frontera r = a las siguientes ecuaciones:

$$k' \frac{J_{l+1}(k'a)}{J_{l}(k'a)} = j\gamma \frac{H_{l+1}^{(1)}(j\gamma a)}{H_{l}^{(1)}(j\gamma a)}$$
(29a)

 $k' \frac{J_{l-1}(k'a)}{J_{l}(k'a)} = j\gamma \frac{H_{l-1}^{(1)}(j\gamma a)}{H_{l}^{(1)}(j\gamma a)}$ (29b)

Al resolver estas ecuaciones, se encuentran los valores propios. Sin embargo, estas ecuaciones muestran que los modos son una superposición del híbrido *E* (*HE*) y el híbrido *H* (*EH*), esto es, $HE_{l+1,m}$ y $EH_{l-1,m}$, además de los *TE* y *TM* convencionales. Los modos híbridos son iguales en el límite $n_1 = n_2$.

y

El modo *l* de transmisión corresponde a un $HE_{l+1,m}$ y a un $EH_{l-1,m}$. El modo dominante es el HE_{11} que se caracteriza por l = 0. El índice *m* se utiliza para distinguir los diferentes valores propios para una *l* dada. El modo dominante HE_{11} corresponde al modo linealmente polarizado LP_{01} . En general, los modos linealmente polarizados LP_{lm} corresponden a la superposición de $HE_{l+1,m}$ y $EH_{l-1,m}$.

II.9 Pérdidas en las fibras ópticas.

II.9.1 Curva de atenuación en las fibras ópticas.

Debido a las diferentes causas que provocan atenuación en la señal al propagarse por la fibra, se tiene una curva de atenuación en la que se incluyen todos estos factores. En esta, resaltan dos ventanas, entre 1270 y 1350 nm, llamada la ventana de los 1310 nm, y entre 1480 y 1600 nm, llamada la ventana de los 1550 nm. Estas dos ventanas son las más ampliamente utilizadas en las comunicaciones ópticas. Las fibras ópticas de vidrio de Silicio son las más utilizadas. En la figura 8 se muestra una curva típica de atenuación para este tipo de vidrio.



Figura 8.- Curva de atenuación en la fibra óptica de Silicio.

II.9.2 Medición de pérdidas en fibras ópticas.

Cuando se hace medición de pérdidas en fibras ópticas, generalmente se utilizan los decibeles (dB). El decibel es una razón logarítmica entre la potencia que entra a un sistema o componente individual y la potencia que se tiene a la salida, expresando ganancia o pérdida.

La utilidad de este tipo de medición radica en el hecho de que los efectos de ganancia o pérdida producidos por un componente individual (p. ej. un acoplador de fibra óptica) pueden ser fácilmente determinados antes de ser insertados en un enlace de fibra óptica. Esto hace que el cálculo de pérdidas totales en un sistema se realice simplemente sumando las pérdidas producidas por cada componente en forma individual.

Además, una vez que ha sido determinado el nivel de pérdidas totales, se puede predecir con exactitud el porcentaje de potencia de la señal de entrada que se tiene a la salida, sin importar las unidades de medición. La fórmula para calcular los decibeles es:

$$dB = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{SALIDA}}{P_{ENTRADA}}\right)$$
(30)

Tabla I.- Nivel de pérdidas en dB y su equivalente porcentaje de potencia luminosa que permanece en la fibra.

PÉRDIDAS EN dB Y PORCEN QUE PERMANI	ITAJE DE POTENCIA LUMINOSA ECE EN LA FIBRA.
PÉRDIDAS (dB)	% DE POTENCIA EN LA FIBRA
0.0	100
0.1	97.7
0.2	95.5
0.3	93.3
0.4	91.2
0.5	89.1
0.6	87.1
0.7	85.1
0.8	83.2
0.9	81.1
1	79.4
3	50.1
5	31.6
10	10
20	1
30	0.1
40	0.01
50	0.001
60	0.0001
70	0.00001

II.9.3 Pérdidas por curvatura.

Al aplicar un esfuerzo sobre una fibra óptica que provoque una cierta curvatura en la fibra, se produce el fenómeno de conversión de modos. Esto es que al ya no ser la frontera núcleo-cubierta una superficie plana con respecto al eje *z*, cambia el ángulo para el que se logra la reflexión total interna, dando como resultado que los modos se recorran a un orden más alto, provocando pérdidas en la transmisión.

Existen dos tipos de pérdidas por curvaturas. Las primeras son llamadas macrocurvaturas, las cuales son asociadas con curvaturas de radio relativamente grande (del orden de 1 mm o mayores). Las segundas son denominadas microcurvaturas; estas involucran pérdidas acumuladas que se originan en rugosidades de pequeña magnitud en una fibra que se instala en línea recta. Estas se forman por pequeños desplazamientos de la fibra en direcciones transversas a su eje, que son del orden de micrómetros. Este efecto puede ocurrir cuando se coloca la fibra sobre superficies rugosas, filos o dobleces pronunciados.

CAPÍTULO III

TEORÍA DE ACOPLAMIENTO EN FIBRAS ÓPTICAS ESTIRADAS Y FUSIONADAS

III.1 Principio de acoplamiento.

El acoplador se puede considerar como una estructura compuesta en la cual, las regiones de entrada y la salida son fibras individuales separadas, mientras que en la cintura (zona de fusión) la luz es guiada entre la cubierta y el medio externo (ver figura 9).





El principio de operación del acoplador de fibras ópticas fusionadas se puede entender considerando la luz guiada como un batimiento de modos [Shou et al., 1999]. Si consideramos dos modos ortogonales E_a y E_b que forman un estado de polarización lineal, los cuales son inyectados a una fibra óptica, una pequeña diferencia en sus constantes de propagación β_a y β_b provocará una dependencia espacial de la diferencia entre fases de los dos modos, lo que corresponde a una periodicidad espacial del estado de polarización lineal (ver figura 10). A esta periodicidad se le denomina longitud de batimiento entre dos modos (L_p).



Figura 10.- Batimiento entre dos modos.

La descripción de acopladores ópticos, fabricados de fibras ópticas u óptica integrada, es comprendida por el uso de ecuaciones de modos acoplados. Sin embargo, es también conocido que entre más cercanas están las guías
individuales que constituyen al acoplador, menos precisos son los resultados de la teoría de modos acoplados [Payne et al., 1985]. En el caso de acopladores de fibras fusionadas, las guías individuales, separadas en las regiones de entrada y salida, pierden sus formas originales en la región de intercambio de potencia (región de acoplamiento), haciendo difíciles de calcular sus modos.

El cálculo de los supermodos está relacionado con la sección transversal del acoplador y varias aproximaciones han sido propuestas. En algunos modelos [Payne et al., 1985; Burns et al., 1987], los cuales predicen las características esenciales de un acoplador de fibra fusionada, las fibras no son fusionadas y los núcleos son despreciados.

Para predecir la influencia del grado de fusión, varios autores aproximan la sección transversal del acoplador por el uso de un rectángulo [Payne et al., 1985; Love et al., 1985] o por el uso de dos círculos interceptándose [Wright, 1985; Zheng, 1986], posiblemente incluyendo la influencia de guiado del núcleo. Varios métodos (la mayoría de ellos escalares) han sido también usados para calcular los modos de esas estructuras [Marcuse, 1991; Vasallo, 1991].

Algunos métodos proporcionan la evolución del campo para una excitación dada (p. ej. método de propagación de haz BPM, método de índice efectivo, elemento finito, transformada de Fourier, diferencias finitas, etc.) y pueden proveer los parámetros de los supermodos (constante de propagación y forma del campo) haciéndolos más adecuados como herramientas de diseño. Algunos métodos son simples, pero no lo suficientemente precisos, p. ej. para derivar las correcciones de polarización desde sus formas de campo. Otros métodos son más confiables pero, o convergen demasiado lento o carecen de flexibilidad para ser prácticos para el cálculo de los supermodos de un perfil longitudinal no-uniforme de un acoplador direccional [Renner, 1992; Gonthier et al., 1994].

En las referencias anteriores, algunos aspectos particulares de la respuesta de un acoplador fusionado se explican por el uso de geometrías de aproximación y los modos son, más o menos, calculados. Sin embargo, no se han realizado estudios extensivos sobre el problema del acoplador de fibras fusionadas, y en particular de la birrefringencia del acoplador, el cual requiere de modelado cuidadoso de la geometría y cálculos del modo con precisión.

III.2 Análisis de los supermodos de un acoplador de fibras fusionadas.

En un acoplador de fibras ópticas fusionadas los núcleos de las fibras son significativamente reducidos en la región de la cintura, por lo que pueden ser despreciados. Por este motivo, la distribución del campo eléctrico que se propaga ocurre a través del batimiento espacial de los supermodos a lo largo de la cintura [Gonthier, 1998; Lacroix, 1999; Gafsi et al., 1998].

Considerando dos fibras ópticas monomodales paralelas que se encuentran muy cerca una de otra, si los campos evanescentes de las dos fibras se traslapan, se pueden obtener dos posibles soluciones para la propagación de los modos a través de la estructura formada por las dos fibras. A estos modos propagados se les denomina supermodos. Estas dos soluciones obtenidas tienen distribuciones de energía simétricas y antisimétricas (ver figura 11), así como diferente valor de constante de propagación.



Figura 11.- Distribuciones de campo de los supermodos en un acoplador de fibras ópticas de dos modos [Shou et al., 1999].

En la aproximación de guiado débil, una fibra óptica de dos modos puede soportar dos modos de polarización ortogonales LP_{01} y cuatro modos degenerados LP_{11} , llamados LP_{01}^{x} , LP_{01}^{y} , LP_{11}^{ox} , LP_{11}^{oy} , LP_{11}^{ex} y LP_{11}^{ey} . Considerando que la propagación de la luz en ambas direcciones es independiente, nosotros solamente consideramos tres modos en una dirección de polarización. En la terminal de entrada, en *z* = *0*, la luz es inyectada por una fibra de dos modos. Este campo

inicial es la sumatoria del campo de los modos de la fibra individual LP_{01}^{x} , LP_{11}^{ox} y LP_{11}^{ex} , los cuales pueden ser aproximados por la superposición de los supermodos SLP_{01} , $SLP_{11}^{(impar)}$, SLP_{02} , SLP_{12} , $SLP_{11}^{(par)}$ y SLP_{21} , que son mostrados en la figura 11.

Los supermodos son identificados por su correspondencia a los modos de la guía de onda individual de una guía aire-cubierta (limite de desvanecimiento del núcleo). Es conocido que la potencia de transferencia en un acoplador es un resultado de un batimiento de los supermodos. Por ejemplo, LP_{01} puede ser expresado como la suma o diferencia del supermodo SLP_{01} y $SLP_{11}^{(impar)}$, cada uno de ellos propagándose con una constante de propagación ligeramente diferente β_{01} y β_{11}^{0} . Esos campos superpuestos pueden cambiar su fase relativa cuando viajan a lo largo del acoplador. Si los campos están en fase en z = 0, ellos estarán fuera de fase por primera vez en z = L, la diferencia de fase debe satisfacer la integral

$$\int_{0}^{L} (\beta_{01} - \beta_{11}^{o}) dz = \pi$$
(31)



Figura 12.- Representación esquemática de la transferencia total de potencia de una fibra a otra en la región de acoplamiento.

En apariencia, la potencia de la luz que inicialmente comenzó en la fibra 1 se mueve a la fibra 2 después de viajar una distancia *L* (ver figura 12). Un caso similar ocurre para LP_{11}^{ox} , p. ej. batimientos de SLP_{02} y SLP_{12} con las constantes de propagación β_{02} y β_{12} , respectivamente; y para batimientos LP_{11}^{ex} , $SLP_{11}^{(impar)}$ y SLP_{21} con constantes de propagación β_{11}^{e} y β_{21} , respectivamente.

Para conocer las potencias de salida en los brazos del acoplador es necesario tener un amplio conocimiento del perfil geométrico longitudinal y el perfil de índice de refracción del acoplador después de la fusión y elongación, que originan la región de acoplamiento. Esto es debido a que las variaciones de fase entre SLP_{01} y $SLP_{11}^{(par)}$, entre SLP_{02} y SLP_{12} y entre $SLP_{11}^{(impar)}$ y SLP_{21} , son las que originan los cambios en la distribución de potencia de salida de las fibras.

III.3 Teoría de modos acoplados para fibras con dos núcleos

Cuando se tiene interacción entre los campos de dos fibras, existe un intercambio de potencia óptica entre las dos fibras. Una de las fibras puede ser considerada como la fibra perturbada, que es por la que no se inyecta luz, y la otra se considera como la fibra perturbadora, que es por la que se inyecta la luz.

Si se consideran dos fibras que se encuentran muy cercanas una de otra, como se muestra en la figura 13,



Figura 13.- Sistema de coordenadas utilizado para analizar acoplamiento de potencia óptica entre dos núcleos de fibras ópticas.

el acoplamiento se puede representar por dos ecuaciones diferenciales acopladas. Las soluciones de los campos eléctricos son construidas a partir de soluciones de la ecuación de onda escalar. Estas son:

$$E_{x1}(x, y, z) = \frac{a_1(z)}{\sqrt{N_1}} \Psi_1(x, y) \exp(-j\beta z) = \frac{b_1(z)}{\sqrt{N_1}} \Psi_1(x, y)$$
(38)

$$E_{x2}(x, y, z) = \frac{a_2(z)}{\sqrt{N_2}} \Psi_2(x, y) \exp(-j\beta z) = \frac{b_2(z)}{\sqrt{N_2}} \Psi_2(x, y)$$
(39)

Donde los coeficientes *a* y *b* representan las amplitudes modales con dependencia de *z*. Los factores N_1 y N_2 son parámetros de normalización para modos ortogonales, y se representan para q = 1, 2 como:

$$N_q = \frac{n_{co}}{2} \sqrt{\frac{\mathcal{E}_0}{\mu_0}} \int_{A_{\infty}} \Psi_q^2 dA$$
(40)

Aquí n_{co} es el índice de refracción del núcleo. El límite de integración A_{∞} es porque se considera la cubierta infinita.

La ecuación diferencial-integral acoplada que representa el proceso de perturbación de una fibra a la otra es

$$\frac{db_1}{dz} - j\beta_1 b_1 = \frac{jk}{4} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{N_1 \mu_0}} \int_{A_\infty} (n^2 - \overline{n_1}^2) \Psi \overline{\Psi}_1 dA$$
(41)

aplicando el principio de superposición, bajo la aproximación de que los campos en la fibra son una suma lineal del campo en las fibras individuales y aisladas una de otra. Además esta aproximación asume que las fibras se encuentran muy cerca entre sí ópticamente, y que son similares. Entonces podemos aproximar el campo total en la guía de onda como:

$$\Psi(x, y, z) = \frac{b_1(z)}{\sqrt{N_1}} \Psi_1(x, y) + \frac{b_2(z)}{\sqrt{N_2}} \Psi_2(x, y)$$
(42)

Sustituyendo la ecuación (42) en la ecuación (41), obtenemos las ecuaciones en las que se considera que una fibra perturba a la otra:

$$\frac{db_1}{dz} - j(\beta_1 + C_{11})b_1 = jC_{12}b_2$$
(43a)

$$\frac{db_2}{dz} - j(\beta_2 + C_{22})b_2 = jC_{12}b_1$$
(43b)

Los coeficientes C_{lm} son los coeficientes de acoplamiento definidos como

$$C_{lm} = \frac{k}{4} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{N_i N_j \mu_0}} \int_{A_{\infty}} (n^2 - n_1^2) \Psi_l \Psi_m dA$$
(44)

donde l, m = 1, 2. Para que la transferencia de potencia se lleve a cabo, las fibras deben de ser idénticas o casi idénticas, lo que se considera una condición de resonancia. Esta condición de resonancia significa que los coeficientes de acoplamiento cruzados sean iguales, y por lo tanto:

$$C_{12} \cong C_{21} = C = \frac{k}{4} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{N_1 \mu_0}} \int_{A_{\infty}} (n^2 - \overline{n}^2) \Psi_1 \Psi_2 dA$$
(45)

Sustituyendo la ecuación (45) en las ecuaciones (43a) y (43b) da como resultado las siguientes expresiones para la condición de que cuando z = 0, los coeficientes de amplitud son $b_1(z) = b_1(0)$ y $b_2(z) = b_2(0)$:

$$b_1(z) = \left\{ b_1(0) \cos\left(\frac{C}{M}z\right) + jM \left[b_2(0) + \frac{\overline{\beta}_1 - \overline{\beta}_2}{2C} b_1(0) \right] \operatorname{sen}\left(\frac{C}{M}z\right) \right\} \exp(j\overline{\beta}z)$$
(46)

$$b_2(z) = \left\{ b_2(0) \cos\left(\frac{C}{M}z\right) + jM\left[b_1(0) + \frac{\overline{\beta}_1 - \overline{\beta}_2}{2C}b_2(0)\right] \operatorname{sen}\left(\frac{C}{M}z\right) \right\} \exp(j\overline{\beta}z) \quad (47)$$

donde

$$\overline{\beta} = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}$$

$$y$$

$$M = \left[1 + \frac{(\overline{\beta}_1 - \overline{\beta}_2)^2}{4C^2}\right]^{-1/2}$$
(48)
(48)

Las amplitudes modales muestran una dependencia sinusoidal con respecto a *z*. Para examinar el flujo de potencia a través de esta guía de onda compuesta, consideramos la distribución de intensidad como el vector de Poynting promediado en el tiempo. La representación del campo electromagnético en función de todos los parámetros de interés es:

$$E_1(x, y, z) = e_1(x, y)e^{-j\beta_1 z} = [e_{ij}(x, y) + e_{zj}(x, y)\overline{z}]e^{-j\beta_z}$$
(50)

$$H_1(x, y, z) = h_1(x, y)e^{-j\beta_1 z} = [h_{ij}(x, y) + h_{zj}(x, y)\overline{z}]e^{-j\beta_z}$$
(51)

El valor de la constante de propagación β es diferente para cada modo. Por lo tanto, el vector de Poynting promediado en el tiempo está dado por:

$$S_{1} = \frac{|a_{1}|^{2}}{2} \operatorname{Re}\left\{E_{1} \times H_{j}^{*} \cdot \bar{z}\right\} = \frac{|a_{1}|^{2}}{2} e_{1} \times h_{1}^{*} \cdot \bar{z}$$
(52)

donde S_1 es la intensidad de potencia óptica. De las ecuaciones (52), (38) y (39), tenemos que la potencia correspondiente a cada modo es

$$P_1(z) = |b_1(z)|^2$$
 (53)
y
 $P_2(z) = |b_2(z)|^2$ (54)

Las cantidades $b_1(z)$ y $b_2(z)$, provenientes de las ecuaciones (46) y (47), cuando son sustituidas en las ecuaciones (53) y (54), dan origen a las siguientes ecuaciones:

$$P_1(z) = P_1(0) + M^2 \left\{ P_2(0) - P_1(0) + \frac{\beta_1 - \beta_2}{C} \sqrt{P_1(0)P_2(0)} \right\} \operatorname{sen}^2 \left(\frac{C}{M}z\right)$$
(55)

$$P_{2}(z) = P_{2}(0) + M^{2} \left\{ P_{1}(0) - P_{2}(0) - \frac{\overline{\beta}_{1} - \overline{\beta}_{2}}{C} \sqrt{P_{1}(0)P_{2}(0)} \right\} \operatorname{sen}^{2} \left(\frac{C}{M} z \right)$$
(56)

Si se establece la condición inicial de que toda la potencia es inyectada a una sola fibra, forzosamente esta fibra contendrá toda la potencia en z = 0, y por lo tanto:

$$P_1(0) = 1$$
 (57)
y
 $P_2(0) = 0$ (58)

Al irse propagando la distribución de potencia en dirección *z*, se comenzará a presentar el acoplamiento entre los dos núcleos, dando lugar a que la potencia en cada uno de ellos en función de *z*, esté dada por:

У

$$P_1(z) = 1 - M^2 \operatorname{sen}^2\left(\frac{C}{M}z\right)$$
 (59)

$$P_2(z) = M^2 \operatorname{sen}^2\left(\frac{C}{M}z\right)$$
(60)

donde

$$M = \left[1 + \frac{(\beta_1 - \beta_2)^2}{4C^2}\right]^{-1/2}$$
(61)

De aquí resulta obvio que una porción M^2 de la potencia en la primera fibra es transferida hacia la segunda fibra, y viceversa al ir variando *z*. Para fibras idénticas, la transferencia total de potencia de una fibra a otra ocurre a la longitud de batido definida como:

$$z_b = \frac{2\pi M}{C} \tag{62}$$

III.4 Fibras ópticas "adelgazadas"

La función de un acoplador es la de transferir energía de una fibra a otra. Para que los campos electromagnéticos puedan ir del núcleo de una fibra óptica al núcleo de una segunda fibra, es necesario que los dos núcleos se encuentren muy cercanos y puedan capturar las ondas evanescentes, las cuales decaen rápidamente. Una manera de acercar los núcleos es la de pulir las cubiertas hasta que tengan un espesor de aproximadamente una micra [Payne et al., 1996]. Colocando dos fibras pulidas en contacto se obtiene un acoplador de fibras ópticas [Cryan et al., 1992; Cryan et al., 1993]. Las grandes desventajas de este método son que es muy costoso y requiere de mucho tiempo. Un método más simple y mucho menos costoso para lograr la interacción de los campos entre dos fibras es el de adelgazamiento de la fibra (tapering) y su posterior fusión.

III.4.1 Proceso de adelgazamiento.

Una fibra óptica se estira calentándola hasta reblandecerla y aplicando una tensión controlada en los extremos de la fibra. Para lograr esto, se puede utilizar el calor producido por un arco eléctrico o la flama producida por un microsoplete que utiliza mezcla de gas oxígeno-butano. Para estirar la fibra, se utilizan sujetadores que jalan la fibra en direcciones contrarias. Las tensiones pueden ser controladas por varios medios, pesas, resortes, o motores de pasos.

III.4.2 Evolución del campo eléctrico en las fibras ópticas adelgazadas.

El estiramiento tiene un efecto bastante significativo en el campo eléctrico cuando se propaga por la fibra. La evolución del campo eléctrico que viaja a través de una fibra adelgazada se muestra en la figura 14.



Figura 14.- Propagación del campo electromagnético a través de una fibra adelgazada [Payne et al., 1996].

Inicialmente el campo es guiado por el núcleo. Conforme el diámetro del núcleo se decrementa, el campo comienza a salirse del núcleo. Se llega a un punto en el cual el campo ya no es guiado por el núcleo, sino que es guiado efectivamente por la guía de onda formada por la cubierta de la fibra y el medio exterior. Esta guía de onda formada es multimodal debido a que el diámetro del medio por el que se propaga la luz (cubierta) es grande.

Este punto de transición de modo de núcleo a modo de cubierta está dado en términos del parámetro V de la fibra, ya que éste es modificado al aplicar el estiramiento por estar en función del diámetro del núcleo. Este valor del parámetro V es [Fielding, 1999]:

$$V_{corte} = \sqrt{\frac{2}{Ln(S)}} \left(1 + \frac{0.26}{Ln(S)} \right)^{-\frac{1}{2}} \qquad S = \frac{r_{cubierta}}{r_{nucleo}}$$
(63)

Si la razón entre los diámetros de la fibra en las secciones estirada y no estirada es muy grande, o en otras palabras que el adelgazamiento en la fibra sea muy abrupto, se producirá un acoplamiento entre los modos de más alto orden en la frontera cubierta-aire [Snyder et al., 1983], lo que provocará que escape la luz en la sección de la fibra donde termina el estiramiento.

La condición de variación del diámetro de la fibra con respecto a la sección de la fibra que es adelgazada, que debe ser cumplida para que el campo sea guiado efectivamente por la sección estirada de una fibra tipo SMF-28, operando como monomodal a una longitud de onda de 1550 nm es [Snyder et al., 1983; Stewart et al., 1985]:

$$\frac{dr_{nucleo}}{dz} \ll \frac{(2\Delta)^{1/2} W^2}{4\pi V}$$
(64)

Donde W = 1.632 para un parámetro V = 2.32 [Snyder et al., 1983], y Δ es la diferencia entre índices de refracción de núcleo y cubierta. Toda sección estirada que cumpla con esta condición tendrá pérdidas despreciables debidas al acoplamiento entre modos en la frontera cubierta-aire.

III.5 Grado de fusión.

Un parámetro experimental importante que determina el desempeño del acoplador es el grado de fusión. Se dice que el grado de fusión tiene un valor de cero si las dos fibras se encuentran paralelas, tangentes, conservando cada una de ellas su geometría original; el grado de fusión es 1 si la fusión ha sido completa, es decir, si se ha creado una geometría nueva cuya sección transversal se aproxima a una circunferencia. Existe una relación entre las dimensiones del nuevo núcleo y las variables del proceso de fusión.



Figura 15.- Grado de fusión cero (f = 0).



Figura 16.- Grado de fusión de alto orden (f \rightarrow 1).

Al tener un grado de fusión igual a cero, las características geométricas de las fibras y los valores de los índices de refracción del núcleo y la cubierta no son modificados después del proceso de fusión, por lo que la propagación del campo eléctrico que viaja a través de las fibras es similar a la de una fibra con perfil de índice de refracción tipo escalón (ver capítulo II.5). Sin embargo, la distancia entre los núcleos de las fibras es muy grande, lo que hace muy difícil lograr el acoplamiento de luz entre fibras.

Cuando el grado de fusión es alto, el perfil de índice de refracción tipo escalón de las fibras pasa a ser de tipo gradiente [Shou et al., 1999]. Debido a esto, es necesario hacer un análisis de propagación de campo eléctrico a través de una fibra con perfil de índice de refracción tipo gradiente, el cual es más complicado que el de tipo escalón. Sin embargo, en este caso la distancia entre los núcleos de las fibras es menor.

Se debe de encontrar el grado de fusión que se adapte mejor al método que se utilice para fabricar acopladores.

CAPÍTULO IV

FABRICACIÓN DE ACOPLADORES DE FIBRAS ÓPTICAS ADELGAZADAS Y FUSIONADAS

En este capítulo, se describe paso a paso el método utilizado para fabricar acopladores de fibras ópticas. Se inicia con la selección de las fibras con las que se fabricarán los acopladores, continuando con la descripción del material y equipo utilizado. Después se describe todo el proceso necesario para hacer la fusión de las fibras para lograr el acoplamiento, y se concluye con la caracterización del acoplador fabricado.

IV.1 Selección de las fibras utilizadas.

Los acopladores que vamos a fabricar serán principalmente utilizados en el área de comunicaciones ópticas, por lo que las fibras seleccionadas para fabricarlos cumplirán con las características que se requieren dentro de esta área. Por este motivo fue que se optó por utilizar fibras del fabricante Corning del tipo SMF-28, las cuales son monomodales para longitud de onda de 1550 nm, que será la que utilizaremos. Estas tienen los siguientes parámetros:

Atenuación: \leq 0.3 dB/km Diámetro del núcleo: 8.2 µm Diámetro de la cubierta: 125 µm Δ n = 0.36 % Abertura numérica (NA): 0.14

Pérdidas por curvatura (r = 32 mm): \leq 0.5 dB

IV.2 Descripción de material y equipo utilizado para medición de pérdidas.

IV.2.1 Conectores temporales.

Para lograr una correcta inyección de luz a las fibras, se utilizan conectores temporales tipo FC del fabricante Fiber Instrument Sales (FIS).



Figura 17.- Conectores temporales.

El hecho de utilizar conectores temporales en vez de permanentes se debe a que, aunque éstos pueden introducir un mayor error en las mediciones, su fabricación es mucho mas rápida, y además se deben de estar quitando y volviendo a colocar en la fibra. Esto es debido a las características del arreglo utilizado para fabricar los acopladores.

IV.2.2 Fuente de luz y detectores.

La fuente de luz y detectores utilizados son los modelos OV-DLS y OV-PM, respectivamente, del fabricante FIS. Estos tienen sus respectivas entradas o salidas tipo FC para ser conectados a cables de fibra óptica que cuenten con este tipo de conectores.



Figura 18.- Módulo de fuente de luz de diodo láser y módulo de fotodetector.

Las especificaciones de estos equipos se muestran en la tabla II.

Tabla II.- Especificaciones de la fuente de luz y detector utilizados para medición de pérdidas.

FUENTE DE LUZ	DETECTOR
Diodo láser	Fotodiodo de unión PIN de Germanio
Longitud de onda de operación	Rango dinámico
1550 nm	70 dB (+5 dBm a –65 dBm)
Potencia luminosa	Longitudes de onda de operación
1 mWatt	850, 1300 y 1550 nm
Ancho espectral	Precisión: ± 0.3 dB para rango dinámico
2 nm	entre +5 dBm y -65 dBm

IV.3 Preparación de cables de fibra óptica para hacer acopladores.

Para lograr tanto una correcta inyección de luz, como un monitoreo confiable en las fibras con las que se fabricarán los acopladores, se preparan dos cables de fibra óptica similares de aproximadamente 1 m de longitud que cuentan con conectores tipo FC temporales en cada una de sus puntas.

Los conectores deben de ser pulidos correctamente para que al inyectar luz al cable con la fuente luminosa, nos entregue una medición con pérdidas pequeñas o sin pérdidas en el detector.

IV.3.1 Corte y desforrado de fibras ópticas.

La región donde se calentarán las fibras para adelgazarse y fusionarse debe ser desforrada de su cubierta de plástico, pues de otra manera este material producirá impurezas en la región fusionada y no se logrará un acoplamiento de luz correcto. En el apéndice A se describe el proceso de corte y desforrado de fibras ópticas que se utilizarán para fabricar los acopladores.

Una vez realizado este proceso, se procede a colocar conectores temporales en cada uno de los extremos de las fibras para que de esta manera, puedan ser conectados la fuente de luz y detector, con el fin de verificar pérdidas en los cables preparados.

IV.3.2 Pulido y revisión de conectores.

La fabricación de conectores temporales es muy importante, pues la luz además de que tiene que ser inyectada con la menor cantidad de pérdidas posible debe de conservar esta misma cantidad después de que el conector haya sido conectado y desconectado en varias ocasiones.

Para lograr que la cara de la fibra en el conector, o en otras palabras la sección transversal de la fibra, quede libre de ralladuras o fracturas y que muestre un perfil plano sin ángulo con respecto al conector, se debe de pulir con lijas de diferentes grosores. En el apéndice B se describe este proceso.

IV.3.3 Prueba final con fuente de luz y detector.

Ya que se tienen los dos cables fabricados se procede a inyectar luz en uno de los conectores y detectarla en el otro para que cuando sean iguales las lecturas en los dos cables fabricados, asegurarnos que los dos cables son similares. De esta manera al fusionar, estaremos seguros de que la potencia luminosa registrada en los medidores será puramente afectada por la región fusionada. Para lograr esto se utiliza un cable de fibra óptica de referencia. Los pasos a seguir se muestran en el apéndice C. Éstos dos cables fabricados quedan listos para ser introducidos al arreglo para fabricar los acopladores.

IV.4 Selección de fuente térmica para reblandecimiento y fusión de fibras ópticas.

La temperatura necesaria para que se pueda deformar una fibra óptica de SiO₂ al aplicar una fuerza externa, como la tensión por medio de pesos que vamos a aplicar para adelgazar las fibras, es de 900 °C, y para fundirla es de 1713 °C, por lo que necesitamos utilizar una fuente térmica que alcance temperaturas de éstos órdenes. Además el calentamiento debe de ser uniforme en una región de las fibras de aproximadamente 1 cm para que la fusión de las fibras no sea muy puntual, y así tener una mayor región en la que se acerquen los núcleos de las fibras para que se logre el acoplamiento de luz de una fibra a otra.

La fuente térmica seleccionada fue un soplete que utiliza gas propano, pues la temperatura que alcanzó esta flama al medirla fue de 1236 °C, la cual no es suficiente para fundir totalmente las fibras, pero si las reblandece y fusiona lateralmente muy bien.



Figura 19.- Arreglo experimental para medición de temperatura dentro del tubo cerámico utilizado.



Figura 20.- Medición de la máxima temperatura alcanzada.

Con el fin de uniformizar el calentamiento de la fibra con la flama del soplete, se optó por utilizar un tubo cerámico de 7.5 cm de longitud, diámetro interno de 1.6 mm, y diámetro externo de 3.2 mm. Este tubo funciona como un horno para que la flama no se aplique directamente a las fibras sino que se aplique al tubo cerámico con las fibras contenidas en el interior de éste, colocadas exactamente en el centro. Además este tubo se utiliza también para encapsular el acoplador una vez que se fusionaron y adelgazaron las fibras.

IV.5 Adelgazamiento de fibras ópticas.

Como se mencionó antes en el capítulo III.4, para poder interactuar con el campo eléctrico que se propaga a través de una fibra óptica, se tiene que adelgazar la cubierta para estar cerca del núcleo de la fibra. O bien, adelgazar suficientemente la fibra para que la luz se guíe efectivamente por la frontera cubierta-aire.

Para lograr esto se utilizó un arreglo experimental armado sobre la mesa óptica, en el cual se calienta una sección de la fibra y al mismo tiempo se aplica tensión por medio de un peso amarrado a la fibra.

IV.5.1 Arreglo experimental utilizado para adelgazar fibras ópticas.

El arreglo experimental utilizado para adelgazar las fibras se muestra en la figura 21.



Figura 21.- Esquema del arreglo experimental utilizado para adelgazar fibras ópticas.

Se inyecta luz con el diodo láser a uno de los conectores de fibra óptica previamente fabricado y se detecta a la salida del otro cuando se conecta al detector. El microposicionador utilizado cuenta con una pinza que presiona y sostiene un extremo de la fibra. Al amarrar un peso en el otro extremo, y éste quede colgando (ver figura 21), se ejerce una tensión sobre la fibra. Cuando se aplique la flama del soplete, se producirá el adelgazamiento de la fibra.

Este arreglo, además de hacer posible el adelgazamiento de las fibras, permite medir la cantidad de desplazamiento del peso cuando se aplica la flama del soplete. Con esto se toma la medición de la velocidad con que se estira la fibra al calentar por un periodo de tiempo determinado. Es importante conocer la velocidad de adelgazamiento de la fibra al utilizar un peso determinado para tener control sobre el proceso de adelgazamiento.

Se estiraron fibras con 3 diferentes pesos para determinar cual es el peso con el que se estira la fibra de una manera más controlada y uniforme. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 22, 23 y 24.



Figura 22.- Gráfica de adelgazamiento de fibra por medio de tensión con peso de 4.4 gramos.



Figura 23.- Gráfica de adelgazamiento de fibra por medio de tensión con peso de 7.5 gramos.





Figura 24.- Gráfica de adelgazamiento de fibra por medio de tensión con peso de 11.4 gramos.

Los diámetros de las fibras fueron medidos utilizando el método descrito en el capítulo IV.5.2. Los puntos en forma de estrella en las gráficas marcan cuándo se rompió la fibra al estarla adelgazando. El punto anterior a esto es el último que se pudo medir antes de que se rompiera la fibra. Podemos ver que la velocidad de adelgazamiento es muy similar para los dos primeros pesos, pero en la gráfica de la figura 23 se observa que se rompe la fibra después de haber alcanzado un diámetro de aproximadamente 40 micras. Con esto encontramos que en los siguientes dos segundos de calentamiento, la velocidad de adelgazamiento fue demasiado rápida. Para el peso de 11.4 gramos la velocidad de estiramiento fue mayor, y de igual manera que para el caso del segundo peso, después de las 40 micras se rompió la fibra. Debido a que los diámetros que debemos alcanzar en las fibras adelgazadas sin que se rompan deben de ser entre 10 y 20 micras para poder interactuar con el campo que viaja por la fibra, necesitamos utilizar un peso no mayor que 4.4 gramos por fibra. Así la tensión aplicada por este peso producirá una velocidad de adelgazamiento controlable.

Después de haber hecho el análisis de velocidad de adelgazamiento, se procedió a adelgazar otra fibra, pero esta vez se hizo la medición de potencia para diferentes cantidades de adelgazamiento. Con esto se obtiene una gráfica que muestra la relación que existe entre las pérdidas y la cantidad de adelgazamiento en la fibra. Esta gráfica se muestra en el capítulo V.2.

IV.5.2 Análisis de fibras ópticas adelgazadas con microscopio y retícula graduada.

Para analizar las fibras ópticas adelgazadas de una manera más precisa se utilizó un microscopio con objetivo de 20x y un ocular que contenía una retícula graduada.



Figura 25.- Fotografía de microscopio utilizado para medición y análisis de fibras ópticas fusionadas y adelgazadas.

La retícula contiene una línea que se desplaza para hacer mediciones al girar una perilla graduada en 100 pasos. Para establecer el valor en micrómetros que tiene el desplazamiento de un paso, se coloca sobre el portaobjetos del microscopio un pedazo de fibra desforrada, y se cuenta el número de pasos que necesita recorrer la línea al mover la perilla para abarcar el diámetro de la fibra, que es de 125 µm.



Figura 26.- Fotografía de una fibra sin adelgazar.

Ya establecido el valor de cada paso, se coloca sobre el portaobjetos la fibra adelgazada a analizar, y de igual manera que con la fibra desforrada, se cuenta el número de pasos de su diámetro. Por regla de tres se determina el valor del diámetro de la fibra adelgazada.



Figura 27.- Fotografía de una fibra adelgazada.

IV.6 Fusión lateral de dos fibras ópticas.

Ahora empezamos con la parte más importante en la fabricación de un acoplador, la fusión lateral de dos fibras ópticas, ya que en esta zona fusionada es donde se lleva a cabo la transferencia de potencia de una fibra a otra. Con este método de fabricación utilizado se realiza en un mismo paso la fusión lateral y el adelgazamiento de las fibras. Todo se lleva a cabo en un arreglo experimental montado sobre una mesa óptica.

IV.6.1 Arreglo experimental utilizado.

El arreglo experimental utilizado para fabricar acopladores de fibras ópticas se muestra en las figuras 28 y 29.



Figura 28.- Esquema del arreglo experimental utilizado para fabricar acopladores.



Figura 29.- Fotografía del arreglo experimental mencionado.

Para diseñar este arreglo, partimos del arreglo utilizado para adelgazar fibras e hicimos las modificaciones necesarias para poder fabricar los acopladores.

Este arreglo cuenta con un láser para inyectar luz a una de las fibras y dos detectores para monitorear potencia transferida por la fibra que se inyecta luz, y potencia acoplada hacia la otra fibra que se fusiona. El otro extremo de las fibras queda desconectado.

La flama se aplica sobre el tubo cerámico que funciona como horno. Este se encuentra sobre una montura y un vástago atornillado a la mesa óptica. Un tornillo sujeta el tubo cerámico para que de esta manera pueda ser removido posteriormente.

Los dos microposicionadores que se encuentran colocados a un lado de cada uno de los extremos del tubo cerámico son para alinear las fibras en el centro del tubo cerámico y así se calienten uniformemente. También sirven para sujetar y mantener juntas las fibras por medio de las pinzas que tienen. Esto es la parte fundamental para realizar el precalentado de las fibras.

Para aplicar tensión a las fibras y que al calentarse se estiren, se utilizan dos pesos similares de 7 gramos que quedan suspendidos en el aire colgando de monturas formadas por vástagos. Estas monturas se encuentran sujetas a la mesa óptica y tienen dimensiones similares para que no se cargue mas peso hacia un lado. Al igual que en el arreglo para adelgazar fibras, se puede medir la cantidad de adelgazamiento en las fibras.

El fin de utilizar este tipo de arreglo con dos pesos es que la región donde se aplica el calentamiento se quede en el mismo lugar todo el tiempo. Esto se debe a que al calentar, las fibras se comienzan a adelgazar; como tenemos dos pesos similares a la misma distancia del punto de fusión, y aplicando fuerza en direcciones contrarias, el desplazamiento de la fibra será igual en ambas direcciones dejando el punto donde se fusionan sin movimiento alguno.

En este arreglo también se lleva a cabo el proceso de encapsulado una vez que se termina el proceso de fusión gracias a que el tubo cerámico sirve para encapsular el acoplador y además es removible.

IV.6.2 Proceso de preparación de fibras ópticas previo a fusión.

Antes de fusionar las fibras ópticas para obtener la región de acoplamiento es necesario hacer todo un proceso de colocación de las fibras exactamente en el lugar en donde se llevará a cabo la fusión. Siempre se debe de cuidar la total limpieza de las partes donde se colocan y por donde pasan las fibras al ser colocadas para evitar un error en la fusión debido a impurezas.

La técnica que estamos utilizando requiere que las dos fibras a fusionar se encuentren en contacto fuertemente, por lo que este proceso de preparación incluye un proceso de torsión de las fibras para lograr un buen contacto. Esto es debido a que al no utilizar una fuente térmica que funda completamente las fibras, debe de existir una fuerza que presione las fibras lateralmente para que tiendan a acercarse los núcleos.

Los pasos a seguir para la preparación de las fibras previos a la fusión se explican en el apéndice D. Así quedan en el arreglo dos puertos de entrada y dos de salida para formar el acoplador listos para conectarse al láser y los detectores para realizar el monitoreo de la potencia en cada una de las fibras.

IV.6.3 Sistema para monitorear potencia de salida.

Para la fabricación de un acoplador, el punto en el que se removerá la flama para detener el proceso de fusión estará dado por la lectura indicada en los dos medidores de potencia luminosa colocados en las salidas de las fibras con luz inyectada y luz acoplada. Estos serán los puertos de salida del acoplador.

Para utilizar el sistema solo se requiere conectar los extremos de los cables de fibra óptica al láser y los detectores, encenderlos dejando calentar el láser por 5 minutos y comenzar a tomar las lecturas. No es necesario calibrarlos ya que esto fue realizado antes al fabricar los cables de fibra óptica.

Al principio, cuando no se ha iniciado la fusión, los medidores deben de indicar 0 dB y -70 dB. La medición de 0 dB corresponde a la salida de la fibra por la que es inyectada la luz al acoplador y corresponde al 100 % de la potencia luminosa entregada por el láser. La medición de –70 dB corresponde al 10⁻⁵ % de la potencia luminosa del láser, lo que es prácticamente 0 % ya que no hay luz inyectada a esa fibra.


Figura 30.- Medición de potencia previa a fusión.

Al comenzar a aplicar la flama para fusionar las fibras, las lecturas en los medidores comenzarán a variar de una manera oscilatoria, como lo predice la teoría en el capítulo III.3. Cuando se llegue a los porcentajes de potencia deseados a las salidas de las fibras, se removerá la flama para detener la fusión.

Por ejemplo, si se quiere fabricar un acoplador 50/50, esto es 50 % del total de luz inyectada al acoplador en cada uno de los puertos de salida, se deberá detener el proceso de fusión cuando la lectura en ambos medidores sea de –3 dB (ver Tabla I).

IV.6.4 Fusión de fibras ópticas para fabricar acoplador.

El proceso de fusión se lleva a cabo en dos pasos, el precalentado y la fusión adelgazando a la vez las fibras. Ambos se llevan a cabo con monitoreo de potencia en los puertos de salida del acoplador todo el tiempo. Cuando se termina

la fusión se deben de hacer ajustes en el arreglo para que el acoplador no sufra daños al enfriarse.

IV.6.4.1 Precalentado.

Antes de que se ejerza la tensión por medio de los dos pesos, las fibras deben de estar en contacto a una temperatura cercana a la máxima que puede alcanzar la flama del soplete. Al hacer esto, las dos fibras se fusionarán en la región calentada, con lo que se establecerá la sección en la que se llevará a cabo la transferencia de potencia en el acoplador.

Para hacer el precalentado se enciende la flama del soplete y se gira la perilla totalmente para obtener la mayor flama posible. Se aplica la flama sobre la marca que indica donde se encuentra el punto de torsión dentro del tubo cerámico. Es importantísimo calentar exactamente en el punto de torsión para obtener un buen acoplamiento. En este momento las fibras se encuentran en el centro del tubo tensionadas por las pinzas de los microposicionadores, como se había mencionado antes.

Después de haber calentado por un tiempo de aproximadamente 45 segundos, cuando se ha alcanzado una temperatura de aproximadamente 1200 °C, la sección calentada se encuentra de color naranja y las fibras ya no se encuentran centradas en el tubo cerámico. Este es nuestro indicador de que el precalentado se llevó a cabo porque al ya no estar rectas las fibras, la tensión aplicada por las pinzas fue liberada por el reblandecimiento al ser calentadas.

Además se nota una ligera variación en la lectura del medidor colocado en el puerto de salida de la fibra a la que se acoplará la luz, de -70 dB a aproximadamente -68 y -66 dB. Esto se debe a un muy pequeño acoplamiento de luz a esta fibra porque aunque ya están unidas las fibras, la distancia entre núcleos es muy grande.

Después de haber logrado este paso, se liberan las fibras de las pinzas de los microposicionadores y al ya estar amarrados los pesos previamente, se comienza con el adelgazamiento. Todo se lleva a cabo sin dejar de aplicar la flama del soplete.

IV.6.4.2 Determinación de tiempo de calentamiento por monitoreo de potencia de salida.

Como se había mencionado antes, el tiempo que se aplicará la flama para adelgazar las fibras estará dado por las mediciones tomadas en los dos detectores de potencia transferida y potencia acoplada, de acuerdo al porcentaje en cada puerto de salida que se esté buscando.

Después de que se llevó a cabo el precalentado, los pesos al estar colgando en las monturas, comenzarán a bajar por la fuerza de la gravedad, adelgazando así simétricamente la región donde se aplica la flama del soplete. Las lecturas en los dos medidores comenzarán a variar de una manera oscilatoria.

La lectura en el puerto de salida de la fibra por la que se inyecta la luz, que inició en 0 dB, cambiará de manera oscilatoria aumentando cada vez mas el nivel de pérdidas.

En cambio, la lectura en el puerto de salida de la fibra a la que se acopla la luz, que inició en –70 dB, varía también oscilatoriamente, pero disminuyendo cada vez mas el nivel de pérdidas.

Entonces, después de haber transcurrido un tiempo de aproximadamente 4 minutos, y que los pesos hayan recorrido una distancia de aproximadamente 1 cm cada uno, la lectura en el puerto de salida de la fibra con luz acoplada estará en el orden de –20 dB. En este momento la región fusionada ya se encuentra muy adelgazada, del orden de 100 μm, por lo que disminuimos la flama del soplete para tener una temperatura de aproximadamente 1050 °C. De esta manera el proceso de estiramiento será más lento para evitar que se rompa el acoplador. También al hacer esto, disminuye la velocidad de adelgazamiento, haciendo más sencilla la detención de la fusión en el momento que se llegue al acoplamiento deseado.

IV.6.4.3 Final de la fusión.

El final del proceso de fusión es determinado por la lectura registrada en el puerto de salida de la fibra a la que se acopla la luz. Esto es debido a que la lectura a la salida de la fibra que esta perdiendo la luz oscila varias veces por el porcentaje de potencia deseado, pero no es hasta que obtenemos el porcentaje de luz acoplada a la otra fibra cuando podemos remover la flama del soplete para detener el adelgazamiento de la región fusionada.

Cabe mencionar que se necesita finalizar la fusión en cuanto se llegue por primera vez al porcentaje de luz deseado en los dos brazos con el fin de que ya no se siga adelgazando la región de fusión y quede demasiado frágil como para ser encapsulada. El diámetro de la zona de fusión para obtener los porcentajes de acoplamiento de los principales acopladores comerciales (90/10 a 50/50) es del orden de 20 a 30 µm, por lo que esta zona es extremadamente frágil.



Figura 31.- Región fusionada sin adelgazar.



Figura 32.- Región fusionada y adelgazada.

Entonces se detiene la fusión cuando los dos medidores nos dan las lecturas requeridas. Inmediatamente después de esto, el tubo comenzará a tomar de nuevo su color blanco original al comenzar a enfriarse. En este momento se fibras deben de sujetar las del acoplador con las pinzas de los microposicionadores, de igual manera que como estaban cuando se hizo el precalentado. Esto es con el fin de que ya no se muevan. Después es necesario ajustar la posición de los microposicionadores desplazándolos en dirección del tubo cerámico para de esta manera liberar un poco la tensión en la región fusionada que se está enfriando, ya que podría quebrarse al enfriarse totalmente si se encuentra muy tensionada.

Este desplazamiento debe de ser de entre 1 y 2 µm por microposicionador, pues si se desplaza mucho, la región se doblará y esta curvatura producirá una variación en el porcentaje de acoplamiento, o si es demasiado se comenzará a escapar la luz produciendo pérdidas por curvatura en esta región de acoplamiento.

Se deja enfriar el acoplador por aproximadamente 20 minutos y así ya tenemos la región de acoplamiento lista para ser encapsulada.

IV.7 Obtención de gráficas de coeficiente de acoplamiento.

Para comprobar la teoría de acoplamiento de luz de una fibra a otra obtuvimos las gráficas de las potencias en cada uno de los puertos de salida, por separado. Esto se hizo por medio de un sistema de adquisición de datos conectado a una PC. El diagrama a bloques del sistema utilizado se muestra en la figura 33.



Figura 33.- Diagrama a bloques del sistema de adquisición de datos utilizado para obtener gráficas de coeficiente de acoplamiento.







Figura 35.- Fotografía de monitor en el que se muestra una ventana abierta del programa para adquisición de datos WinDaq.

A continuación se da la descripción y función de cada uno de los bloques del sistema.

La PC utilizada cuenta con microprocesador AMD K6-2 con velocidad de 450 MHz, utilizando sistema operativo Windows 98. En el puerto serial del CPU se conecta la tarjeta de adquisición de datos, la cual es controlada por medio de un programa instalado previamente llamado WinDag.

TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La tarjeta de adquisición de datos utilizada es el modelo DI-194 del fabricante DATAQ. Ésta se conecta al puerto serial de la PC y cuenta con un canal de entrada para medir señales analógicas. Tiene una resolución de 8 bits dentro de un rango de medición a escala completa de ±10 Volts. La tasa de muestreo máxima es de 240 muestras por segundo, por lo que se pueden medir con muy buena calidad señales de hasta 24 ciclos por segundo.



Figura 36.- Fotografía de la tarjeta de adquisición de datos utilizada.

PC

CIRCUITO ACONDICIONADOR DE SEÑAL

El circuito acondicionador de señal es básicamente un circuito amplificador inversor hecho con un amplificador operacional LM741 y resistencias. Las resistencias están ajustadas para que a la salida del amplificador se tenga un voltaje mínimo de 0 Volts y un máximo de 5 Volts.

FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Se utiliza una fuente de voltaje de corriente directa para alimentar el circuito acondicionador de señal. El voltaje de salida es +10V y - 10V.

FOTODETECTOR

El fotodetector utilizado es del fabricante Thor Labs. Éste convierte la potencia luminosa (proporcional a la intensidad de campo eléctrico) incidente en una señal de voltaje. Tiene alta sensibilidad en la región espectral del infrarrojo donde se incluye la longitud de onda de 1550 nm, que es la que se necesita detectar. Es insensible a la polarización de la luz incidente.



Figura 37.- Fotodetector utilizado en el sistema de adquisición de datos.

Para obtener las gráficas que se muestran en las figuras 45 y 46 del capítulo V.3, se hizo dos veces todo el proceso de fabricación, dejando que la flama del soplete fusionara y adelgazara las fibras hasta que la región de acoplamiento se rompiera. Además, en vez de monitorear la potencia de salida en los puertos 3 y 4 con los detectores, se utilizó el fotodetector Thor Labs primero monitoreando el puerto 3, y después monitoreando el puerto 4.

Se trató de que los dos procesos de fabricación fueran lo más iguales posible para que las gráficas fueran complementarias. Lo ideal hubiera sido haber contado con dos fotodetectores conectados a una tarjeta de adquisición de datos con dos canales de entrada para tener en una misma gráfica los dos puertos de salida.

IV.8 Encapsulado de acopladores.

El acoplador fabricado no puede ser removido del arreglo experimental hasta que haya sido encapsulado porque la región fusionada se puede quebrar muy fácilmente. Para encapsular el acoplador se utiliza epoxy de titanio que es formado por una mezcla de dos componentes, y al secarse queda en estado sólido. Los pasos a seguir para escapsular un acoplador se describen en el apéndice E.



Figura 38.- Fotografía de varios acopladores encapsulados y removidos del arreglo experimental.

Al ser encapsulado y removido del arreglo experimental, se ha concluido con el proceso de fabricación de un acoplador de fibras ópticas fusionadas y adelgazadas.

IV.9 Caracterización de acoplador fabricado.

Para caracterizar un acoplador fabricado primero se identifican y marcan cada uno de los puertos de la siguiente manera:



Figura 39.- Identificación de puertos de un acoplador fabricado.

PUERTO 1: Puerto de entrada por el que se inyectó la luz.

PUERTO 2: Puerto de entrada que quedó sin conexión.

PUERTO 3: Puerto de salida de la misma fibra por la que se inyectó la luz.

PUERTO 4: Puerto de salida al que se acopló la luz.

La caracterización se lleva a cabo tomando como referencia los parámetros que se especifican en los principales acopladores comerciales. A continuación se define cada una de éstos.

PORCENTAJE DE ACOPLAMIENTO

Razón de la división de los porcentajes de potencia luminosa en los puertos de salida del acoplador. Se especifica en fracciones.

FÓRMULA:

$$P_{A} = [P_{4} / (P_{3} + P_{4})] X 100 [\%]$$

$$P_{B} = [P_{3} / (P_{3} + P_{4})] X 100 [\%]$$

$$P_{A} / P_{B}$$
(64)

PÉRDIDAS EN LA REGIÓN DE ACOPLAMIENTO

Proporción de la señal que se encuentra presente a la entrada del acoplador pero no en los puertos de salida.

FORMULA:

$$-10 \log \left[\left(P_3 + P_4 \right) / P_1 \right] \quad [dB] \tag{65}$$

DIRECTIVIDAD

Proporción de la señal transmitida por el acoplador que se refleja hacia el otro puerto de entrada. Se obtiene haciendo medición de potencia en el puerto 2.

El proceso que se sigue para caracterizar un acoplador se describe en el apéndice F.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se resumen los resultados más importantes de nuestro trabajo, analizando con detalle todas y cada una de las características de los acopladores fabricados, así como resultados preliminares que ayudaron a la consecución de los objetivos planteados al inicio de esta tesis.

De igual manera, se reflexiona sobre los puntos que pueden tomarse en el futuro para optimizar el proceso de fabricación de acopladores, y se presenta al final, una serie de conclusiones derivadas del trabajo realizado y los resultados obtenidos.

V.1 Acopladores fabricados.

Durante este trabajo de tesis se fabricaron un gran número de acopladores, la fabricación de algunos de ellos sirvieron, en la parte inicial, para lograr controlar todos los parámetros involucrados en los procesos de adelgazamiento y fusión de las fibras.

Al final, controlado el proceso de fabricación, se elaboró una serie de acopladores que incluyen cocientes de potencias que van desde 90/10 hasta 50/50 y que demuestran que es posible cubrir casi cualquier relación de potencia entre los puertos de salida. Los resultados obtenidos en esta serie los podemos considerar como típicos, y a continuación se muestran en las tablas 3 a 6, las características más importantes.

Tabla III.- Características del acoplador 1 (aproximadamente 90/10).

POTENCIA EN PUERTO 3	-0.5 dB = 89.13 %
POTENCIA EN PUERTO 4	-9.9 dB = 10.23 %
POTENCIA TOTAL TRANSFERIDA	99.36 %
PORCENTAJE DE ACOPLAMIENTO	90.3 / 9.7
PÉRDIDAS EN LA REGIÓN DE ACOPLAMIENTO	0.03 dB = 0.64 %
DIRECTIVIDAD	-22 dB = 0.63 %



Figura 40.- Gráfica esquemática del punto en que se detuvo el estiramiento en el acoplador 1.

Tabla IV.- Características del acoplador 2 (aproximadamente 70/30).

POTENCIA EN PUERTO 3	-1.8 dB = 66.07 %
POTENCIA EN PUERTO 4	- 5.7 dB = 26.97 %
POTENCIA TOTAL TRANSFERIDA	92.99 %
PORCENTAJE DE ACOPLAMIENTO	71 / 29
PÉRDIDAS EN LA REGIÓN DE ACOPLAMIENTO	0.3 dB = 7.01 %
DIRECTIVIDAD	-23 dB = 0.5 %



Figura 41.- Gráfica esquemática del punto en que se detuvo el estiramiento en el acoplador 2.

Tabla V.- Características del acoplador 3 (aproximadamente 40/60).

POTENCIA EN PUERTO 3	-4.1 dB = 38.90 %
POTENCIA EN PUERTO 4	-2.2 dB = 60.26 %
POTENCIA TOTAL TRANSFERIDA	99.16 %
PORCENTAJE DE ACOPLAMIENTO	39.2 / 60.8
PÉRDIDAS EN LA REGIÓN DE ACOPLAMIENTO	0.04 dB = 0.84 %
DIRECTIVIDAD	-22 dB = 0.63 %



Figura 42.- Gráfica esquemática del punto en que se detuvo el estiramiento en el acoplador 3.

Tabla VI.- Características del acoplador 4 (50/50).

POTENCIA EN PUERTO 3	-3.7 dB = 42.66 %
POTENCIA EN PUERTO 4	-3.7 dB = 42.66 %
POTENCIA TOTAL TRANSFERIDA	85.32 %
PORCENTAJE DE ACOPLAMIENTO	50 / 50
PÉRDIDAS EN LA REGIÓN DE ACOPLAMIENTO	0.7 dB = 14.68 %
DIRECTIVIDAD	-21 dB = 0.8 %



REGIÓN FUSIONADA

Figura 43.- Gráfica esquemática del punto en que se detuvo el estiramiento en el acoplador 4.

V.2 Análisis de pérdidas en fibras ópticas adelgazadas.

La gráfica que muestra la cantidad de pérdidas que se producen en una fibra óptica al ser adelgazada, obtenida al realizar el experimento mencionado en el capítulo IV.5.1, se muestra en la figura 44.



ADELGAZAMIENTO vs PERDIDAS

Figura 44.- Gráfica de pérdidas de potencia luminosa que se producen en una fibra óptica al ser adelgazada.

La gráfica inicia en un punto donde no se tienen pérdidas al no haber sufrido la fibra adelgazamiento alguno. Al empezar a adelgazarse, el nivel de pérdidas se incrementa, siguiendo una razón lineal hasta aproximadamente los 3 mm de desplazamiento del peso. Después de éste punto, las pérdidas se incrementan a una razón muy grande, llegando a cerca de 3 dB (50%) de pérdidas cuando solamente se desplazaron los pesos 5 mm. Posteriormente a éste último punto, el valor de las pérdidas en la fibra presenta una variación oscilatoria que se va incrementando cada vez más.

En un principio las pérdidas en la fibra presentan una variación que tiende a lineal producida por la deformación que sufre la estructura de ésta. Después de que ya se tiene una cantidad considerable de adelgazamiento en la fibra es cuando comienza a producirse el acoplamiento de los modos que viajan por la cubierta de la fibra hacia el medio externo, en este caso el aire (ver capítulo III.4.2). Este acoplamiento en la frontera cubierta-aire sigue el mismo principio que en la frontera núcleo-cubierta (ver capítulos II.7 y II.8), el cual presenta variaciones oscilatorias.

Las pérdidas que presentan una variación oscilatoria son las que se necesitan para poder acoplar luz de una fibra a otra, ya que si ponemos en contacto a nuestra fibra adelgazada otra fibra que presente pérdidas con las mismas variaciones, obtendremos la condición de resonancia mencionada en el capítulo III.3, necesaria para lograr el acoplamiento deseado.

V.3 Análisis de gráficas obtenidas con el sistema de adquisición de datos.

Las últimas muestras capturadas de los dos procesos de fabricación de acopladores que se realizaron, que fueron obtenidas por medio del sistema mencionado en el capítulo IV.7, se muestran en las gráficas de las figuras 45 y 46.

El motivo de mostrar solamente esta parte es porque aquí es donde suceden los fenómenos importantes en la transferencia de potencia entre fibras.

La tasa de muestreo utilizada fue de 240 muestras por segundo, que es la máxima que soporta la tarjeta de adquisición de datos.



POTENCIA EN PUERTO 3

Figura 45.- Gráfica de monitoreo de potencia de salida por puerto 3 de un acoplador durante el proceso de fabricación.

POTENCIA EN PUERTO 4





En las gráficas se puede observar que en los puntos donde inician las gráficas se tiene un máximo de potencia en el puerto 3 y un mínimo de potencia en el puerto 4. Esto define las condiciones de potencia de salida previas a fusión (lecturas en los medidores de 0 dB para la salida de la fibra que cederá luz y -70 dB para la salida de la fibra a la que se acoplará la luz). Estas condiciones se mantienen hasta que avanza el proceso de fusión y adelgazamiento de las fibras. Conforme el proceso avanza, los núcleos de las fibras comienzan a acercarse para así vencer las pérdidas y lograr el acoplamiento de luz entre fibras.

En la gráfica de potencia en el puerto 3 se tiene un máximo de aproximadamente 0.9, mientras que en la del puerto 4 el máximo es de aproximadamente 1.15. Esta diferencia entre máximos se debe a que como se había mencionado antes, las gráficas no fueron obtenidas en el mismo experimento. El punto del arreglo experimental en el que se produjo esta diferencia fue donde se acopla la salida del puerto 3 ó 4 (según el experimento) al fotodetector, ya que éste no contaba con entrada en forma de conector tipo FC. De cualquier manera, lo importante en estas gráficas es la obtención de la variación de potencia de salida conforme avanza el proceso de fusión y adelgazamiento del acoplador que se está fabricando.

Las oscilaciones mayores en las gráficas, que van de un punto máximo a un mínimo y viceversa, corresponden al punto en que se transfiere totalmente la potencia luminosa de una fibra a otra. Puede notarse que en esta primera transferencia, la potencia en la fibra a la que se acopla la luz llega a ser igual al valor máximo en toda la gráfica, por lo que en esta primera oscilación se obtiene la mayor cantidad de potencia acoplada. Esto indica que lo más conveniente es detener el proceso de fusión cuando se llegue por primera vez al porcentaje de acoplamiento deseado.

Posteriormente a la oscilación mayor, continúa un comportamiento oscilatorio en la transferencia de potencia entre fibras (como lo predice la teoría), pero se puede notar que las oscilaciones ya no llegan a valores máximos y mínimos. Esto indica que se está escapando la luz en la región fusionada y adelgazada, aumentando el nivel de pérdidas en la región de acoplamiento. Esto es de esperarse, ya que en la teoría sobre fibras adelgazadas se menciona que al adelgazarse demasiado la región estirada, se produce acoplamiento de modos en la frontera cubierta-aire, produciendo así que la luz escape.

El punto donde terminan las oscilaciones en las gráficas es donde se fractura la región fusionada porque ya ha sido demasiado adelgazada. La resistencia mecánica de ésta región fusionada es vencida por la fuerza ejercida por los pesos. El diámetro de la región de acoplamiento en el punto donde se rompió es de entre 9 y 10 µm, por lo que los dos núcleos y las dos cubiertas de las fibras fusionadas ya tenían un diámetro comparable con el núcleo de una sola de las dos fibras.

V.4 Obtención de la cantidad de estiramiento necesario para transferir totalmente la potencia de un puerto de salida hacia el otro en un acoplador (Lc).

Para obtener la cantidad de estiramiento necesario en la región fusionada para que sea transferida totalmente la potencia de una fibra hacia la otra (Lc) fue necesario utilizar un método indirecto, ya que no contábamos con el equipo necesario para monitorear el diámetro de la región fusionada del acoplador que se encontraba en proceso de fabricación dentro del tubo cerámico opaco, a una temperatura mayor a los 1000 °C. El método utilizado no es muy exacto, pero si nos da un valor aproximado al real.

Iniciamos estableciendo los valores de cada una de las dimensiones de la sección de fibra que se va a adelgazar, considerando que la región de la fibra que se va a estirar tiene una longitud de 5 mm. Esta longitud se obtiene al considerar una región efectiva de estiramiento en la fibra, ya que aunque la sección del tubo que se calienta para estirar la fibra es de 10 mm aproximadamente como se menciona en el capítulo IV.4, donde se tiene la mayor temperatura es en el centro de la región calentada, siendo ésta la que sufre una mayor cantidad de estiramiento.



Figura 47.- Dimensiones iniciales de la región de la fibra que se va a estirar.

En la figura 47, r es el radio de la fibra y Z es la longitud de la región efectiva de estiramiento. Con la información que tenemos de las dimensiones podemos determinar el volumen de ésta sección.

$$Volumen = \pi * r^2 * Z \tag{65}$$

Analizando la gráfica de la figura 22, obtenida en el capítulo IV.5.1, podemos obtener la velocidad de estiramiento de una fibra óptica. Este análisis se muestra en la figura 48.



PESO DE 4.4 gr

Figura 48.- Obtención de la velocidad de estiramiento de una fibra óptica.

El análisis se lleva a cabo en una sección de la gráfica donde el diámetro de la fibra se encuentra bastante reducido. Esto se debe a que en un punto cercano a este es donde se lleva a cabo la transferencia total de potencia.

Tenemos la cantidad de adelgazamiento que se produce en una fibra durante un lapso de tiempo de calentamiento. El diámetro de la fibra en el punto de inicio de la sección de la gráfica que estamos analizando tiene un valor de 0.065 mm aproximadamente, lo que corresponde a un radio de 0.0325 mm, por lo que las dimensiones de la región calentada son las mostradas en la figura 49.



Figura 49.- Dimensiones iniciales de la región de la fibra que se estira en la sección de la gráfica analizada.

Con estas dimensiones obtenemos un volumen en la región estirada de 0.0166 mm³.

Ahora tomamos el diámetro de la fibra en el punto final de la sección de la gráfica analizada, obteniendo 0.040 mm aproximadamente, y de nuevo establecemos las dimensiones de la región de estiramiento.



Figura 50.- Dimensiones finales de la región de la fibra que se estira en la sección de la gráfica analizada.

Para obtener la cantidad de estiramiento en esta región, aplicamos la ley de la conservación de materia. Tenemos un volumen inicial de 0.0166 mm³ en la sección de análisis. Si dejamos fijo este volumen, al modificarse el valor del radio en la parte final de la sección de la gráfica analizada, tendremos una variación en



Figura 51.- Obtención de longitud Z final.

Restando este valor de Z obtenido menos el inicial de 5 mm de la sección analizada, obtenemos una cantidad de estiramiento en la región analizada de 8.2 mm.

Para obtener la velocidad de estiramiento, analizamos de nuevo la gráfica de la figura 48. En esta ocasión obtenemos la cantidad de tiempo transcurrido durante el estiramiento en la sección analizada, el cual es de 2 segundos.

Dividiendo la cantidad de estiramiento entre el tiempo de calentamiento, obtenemos una velocidad de estiramiento igual a 4.1 mm/seg.

Teniendo entonces la velocidad a la que se estira una sección muy adelgazada de fibra óptica, si tenemos el tiempo que tarda en realizarse la transferencia total de potencia de una fibra a otra, podremos obtener *Lc*.

Para obtener este tiempo, analizamos la gráfica de la figura 46 mostrada en el capítulo V.3, obtenida por medio del sistema de adquisición de datos mencionado en el capítulo IV.7.

POTENCIA EN PUERTO 4



Figura 52.- Obtención de tiempo de estiramiento para calcular Lc.

De la figura 52 obtenemos que se tomaron 360 muestras durante la transferencia total de potencia entre fibras. La velocidad (ó tasa) de muestreo utilizada fue de 240 muestras por segundo. Dividiendo la cantidad de muestras tomadas entre la velocidad de muestreo, obtenemos el tiempo transcurrido

durante la transferencia total de potencia entre fibras. El valor obtenido es de 1.5 segundos.

Para obtener *Lc* multiplicamos la velocidad de estiramiento de una fibra muy adelgazada por el tiempo transcurrido durante la transferencia total de potencia entre fibras, obteniendo *Lc* = 6.15 mm.

V.5 Puntos de posibles problemas.

El objetivo de obtener la transferencia de potencia luminosa de una fibra a otra por medio de fusión lateral de las fibras, así como la implementación de un método para fabricación de acopladores se lograron. Sin embargo hay ciertos problemas en el método de fabricación, y se puede pensar que a futuro el método se puede optimizar.

El primer problema que se encontró fue que se debe calentar con la flama del soplete exactamente en el punto de torsión, y al ser el torcido de las fibras hecho manualmente, nunca queda en un mismo lugar. Esto produce pérdidas en la región fusionada y además incrementa el tiempo de fabricación por las torsiones y mediciones que se deben de hacer.

Otro problema que se encontró fue en el sistema de pesos para aplicar tensión a las fibras. Al amarrar los pesos a las fibras y quedar éstos colgando en la montura del arreglo experimental, se forma dos macrocurvaturas de 14 mm de diámetro cada una. Las consecuencias de éstas son pérdidas por 1.9 dB en las fibras antes de ser fusionadas. Esto es lógico, ya que en las especificaciones de la fibra se mencionan pérdidas menores o iguales a 0.5 dB para curvatura con diámetro de 32 mm. Al ser menor de la mitad el diámetro de la curvatura que tenemos, las pérdidas se pronuncian.



Figura 53.- Fotografía de montura en donde se produce la curvatura en las fibras.

Además esta curvatura produce una variación en la distribución modal de la luz que viaja en la fibra, ya que la estructura física de ésta es bastante afectada. Esto tiene como consecuencia una variación en el coeficiente de acoplamiento cuando se remueven los pesos de un acoplador recién fabricado.

Una manera propuesta para superar este problema es la de utilizar motores de pasos con pinzas para sujetar las fibras similares a las utilizan los microposicionadores. Este tipo de pinzas no produce pérdidas en las fibras y sin embargo, las sujeta fuertemente. Así, controlando el desplazamiento de los motores de pasos, se podrá aplicar la tensión necesaria para lograr el adelgazamiento en las fibras sin necesidad de utilizar el sistema de pesos que produce las curvaturas en éstas.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

Como parte final, se presentan las conclusiones más importantes sobre el trabajo realizado.

Se realizó un estudio experimental sobre la propagación de la luz en fibras ópticas adelgazadas, en particular, se realizó un estudio sobre la relación que existe entre las perdidas y las dimensiones de la fibra cuando se adelgaza, lográndose encontrar los puntos óptimos para realizar la fusión de dos fibras adelgazadas.

Se diseñó y construyó un arreglo experimental que permite de manera simultanea estirar y fusionar fibras. Este sistema, a pesar de su sencillez, proporciona la estabilidad y control suficiente sobre la zona de fusión.

Se diseñó y se elaboró un sistema de adquisición de datos que permiten seguir de manera instantánea y con precisión el proceso de transferencia de potencia de una fibra a otra en el momento de la fabricación de un acoplador. Por medio de este sistema de detección (medición en tiempo real de las potencias en los puertos de salida de un acoplador en proceso de fabricación), se mostró el comportamiento de todos los factores que influyen en el acoplamiento de luz entre dos fibras (pérdidas por separación entre núcleos, transferencia total de potencia, comportamiento oscilatorio, pérdidas por exceso de adelgazamiento en las fibras, límite de resistencia mecánica de la región fusionada). La suma de lo anterior hizo posible desarrollar un método para fabricación de acopladores que funcionan como divisores de potencia luminosa que nos permite controlar los cocientes de potencias de los puertos de salida.

En los resultados que aquí se presentan, queda de manifiesto que tanto los porcentajes de acoplamiento (90/10, 70/30, 40/60 y 50/50) como las pérdidas (entre 1 y 15 %) de los acopladores fabricados, pueden ser comparables con los que presentan los acopladores comerciales, y en algunos casos superados.

Uno de las etapas críticas en la fabricación de un acoplador, es la de encapsularlo. Esto permite su posterior manejo sin riesgo de fractura. El método de encapsulado obtenido presenta muy buenas características de robustez a nivel prototipo, y lo más importante, conserva la relación de potencia de los puertos de salida.

Por otro lado, se tienen bien identificadas las causas que producen pérdidas y variación en el coeficiente de acoplamiento en la región fusionada, lo cual nos permite pensar que nuestro método puede ser mejorado, y hasta automatizado, sólo que hacerlo sobrepasa en mucho nuestra disponibilidad de tiempo y los objetivos de este trabajo de tesis.

BIBLIOGRAFÍA

- Bahaa E., Saleh A. and Teich Malvin Carl, "Fundamentals of Photonics", (John Wiley & Sons, Canada, 1991).
- Buck John A., "Fundamentals of Optical Fibers", (John Wiley & Sons, Canada, 1995).
- Bures J., Lacroix S., Lapierre J., App. Opt. 22(12), pp 1918-1927, (1983).
- Burns W. K., Abebe M., "Coupling model for fused fiber couplers with parabolic taper shape", Appl. Opt. 26, 4190-4192, (1987).
- Cryan C. V. and Hussey C. D., "Fused polished singlemode fibre couplers", Electron. Lett. vol. 28, no. 2, 204-205, (January 1992).
- Cryan C. V., Lonergan J. M. and Hussey C. D., "Overcoming the effects of polishing induced stress when fabricating fused polished couplers", Electron. Lett. vol. 29, no. 14, 1243-1244, (July 1993).

Dataq Instruments, "WinDaq starter kit, user's manual".

Diamond GmbH, "Datasheet, Fusion Couplers Basic Information", (2000).

- Fielding Alexander J., Edinger Klaus and Davis Christopher C., "Experimental Observation of Mode Evolution in Single-Mode Tapered Optical Fibers", Journal of Lightwave Technology, 1649-1656, vol. 17, no. 9, (September 1999).
- FIS Power meter & light source instruction manual.
- Gafsi R., Lecoy P. and Malki A., "Stress optical fiber sensor using light coupling between laterally fused multimode optical fibres", Appl. Optics, vol. 37, no.6, 3417-3425, (1998).
- Gonthier F., Lacroix S., Bures J., "Numerical calculations of modes of optical waveguides with two-dimensional refractive index profiles by a field correction method", Optical and Quantum Electronics vol. 26, S135-S149, (1994).
- Gonthier F., "Fused couplers increase system design options", Laser Focus Word, 83-88, (June 1998).
- Kakarantzas G., Dimmick T. E., T. Birks A., Russell St. J., "Fused taper fibre microcoupler", Dept. of Physics, University of Bath, U. K.
BIBLIOGRAFÍA (continuación)

- Kawasaki B. S., "Biconical-taper single-mode fiber coupler", Optics Letters, 327-328, vol. 6, no.7, (1981).
- Lacroix S., Gonthier F., Bures J., "Modeling symmetric 2x2 fused fiber couplers", App. Optics, vol. 33, 8361, (1994).
- Lacroix S., "Fused bitapered fiber devices", Critical Review, vol. CR53 (1999).
- Lacroix S., "Fused bitapered fiber devices for telecommunication and sensing systems", Critical Reviews, Glass Integrated Optics and Optical Fiber devices, 253-274, vol. CR53, (1999).
- Love J. D., Hall M., "Polarisation modulation in long couplers", Electron.Lett. 21, 519-520, (1985).
- Lundquist Paul B., "Notes on the Computation, Dual Core", University of Iowa, 1996.
- Marcuse D., Dielectric Optical Waveguides (Academic Press, San Diego, CA., 1991).
- Midwinter John. E., "Optical Fibers for Transmission", (John Wiley & Sons, Canada, 1979).
- Paez G., "Diseño de un acoplador direccional simétrico de 2x2 con potencia de salida 50/50", Tesis de Maestría, CICESE, 1998.
- Paez G., Valles N., Márquez H., "Diseño de un acoplador direccional simétrico de 2x2 con potencia de salida 50/50 obtenido por difusión de iones de cobre", Ópt. Pur. Aplic., (2000, en prensa).
- Payne F. P., Hussey C. D., Yataki M. S., "Modeling fused single-mode-fibre couplers", Electron.Lett.21, 461-462 (1985).
- Payne F. P., Hussey C. D., Yataki M. S., "Polarisation analysis of strong fused and weakly fused tapered couplers", Electron. Lett. 21, 524-526, (1985).
- Payne F. P., Hussey C. D., "Fibre-Taper Devices", University of Southampton Optoelectronics Research Centre Research Review, (1996).
- Renner Hagen, "Supermodes of optical fibre couplers", Optics Communic. vol. 94, no. 6, 574-588, (December, 1992).

BIBLIOGRAFÍA (continuación)

- Salmerón Domínguez María José, López Navarro Daniel, "Sistemas de Transmisión", (Trillas, México, 2000).
- Shou Y., Bures J., Lacroix S., "Mode separation in fused fiber coupler made of two mode fibers", Opt. Fiber Tech. 5, 92-104, (1999).
- Snitzer E., "Cylindrical Dielectric Waveguide Modes", Journal of the Optical Society of America, 491-498, vol. 51, no. 5, (May, 1961).
- Snyder A. W. and Love J. D., "Optical Waveguide Theory", Academic NY, p. 412, (1983).
- Stewart W. J. and Love J. D., ECOC, 559-562, (1985).
- Suematsu Yasuharu and Ken-Ichi Iga, "Introduction to Optical Fiber Communications", (John Wiley & Sons, Canada, 1982).

Ungar Serge, "Fibre Optics", (John Wiley & Sons, England, 1990).

Vasallo C., Optical Waveguide Concepts (Elsevier, Amsterdan, 1991).

- Velayudhan Nirmalkumar, "Analysis of Thermally Diffused Single Mode Optical Fiber Couplers", Master of Science in Electrical Engineering Thesis, Virginia Polytechnic Institute, (February 1997).
- Wright J. V., "Variational analysis of fused taper couplers", Electron.Lett.21, 1064-1065, (1985).
- Yokohama I., Okamoto K., Noda J., "Analysis of fiber-optic polarizing beam splitters consisting of fused-taper couplers", J. Lightwave Technol. 4, 1352, (1986).
- Zheng X. H., "Finite-element analysis for fused coupler", Electron. Lett.22, 804-805, (1986).

APÉNDICE A

CORTE Y DESFORRADO DE FIBRAS ÓPTICAS

- Cortar un par de tramos de fibra de una longitud de aproximadamente 1 m cada uno con las pinzas especiales para fibras ópticas.
- Marcar en la parte central de cada tramo un área de desforro que mida 4.5 cm de longitud.



Figura 54.- Región en que se desforra el tramo de fibra.

- Se deja remojando en acetona grado técnico, fórmula (CH₃)₂CO, el área marcada durante un lapso de 2 minutos.
- Remover con pinzas especiales el forro de plástico exterior de la fibra (Jacket) en la región marcada.
- 5. Limpiar la región desforrada con un pedazo de tela y alcohol.

APÉNDICE B

PREPARACIÓN DE CONECTORES TEMPORALES

1. Se desforran aproximadamente 2 cm los extremos de las fibras antes cortadas.



Figura 55.- Desforrado de los extremos de las fibras para agregar conectores temporales.

- 2. Se introduce al conector temporal uno de los extremos de la fibra hasta que salga la fibra desforrada y tope el recubrimiento de plástico en el conector.
- 3. Con un clivador de fibras tipo lápiz se corta el pedazo de fibra que sale del conector, dejando aproximadamente 1 mm de fibra fuera del conector.
- 4. Se introduce y atornilla el conector en la plancha metálica para pulir fibras.



Figura 56.- Plancha utilizada para pulir las caras de los conectores temporales de fibras ópticas.

- 5. Comenzamos el pulido de la fibra. El pulido se realiza colocando sobre una pequeña mesa de vidrio la lija con la que se va a pulir; sujetando con la mano la placa pulidora que contiene el conector, y asegurándonos que la cara de la fibra hace contacto con la lija, se mueve la placa pulidora como si se estuvieran dibujando números 8 sobre ésta. Esto se realiza con el fin de que el pulido sea en todas direcciones. Se comienza con la lija de 5µm, la cual desgasta muy rápidamente la cara de la fibra. Después se utiliza la lija de 1µm para quitar la rugosidad provocada por la lija anterior. Por último se utiliza la lija de 0.3µm para dar un terminado final.
- 6. Utilizando un amplificador 100x modelo FF-394 del fabricante Panasonic, se inspecciona la cara de la fibra en el conector. Si la fibra aún muestra fracturas,

ralladuras o rugosidad, se debe de volver a realizar el proceso de pulido. Las figuras 57 y 58 muestran conectores mal y bien fabricados.



Figura 57.- Cara de conector mal pulido, observado con el amplificador.



Figura 58.- Cara de conector correctamente pulido, observado con el amplificador.

 Se repite el proceso de fabricación de conectores para los 3 extremos de las fibras ópticas que faltan.

APÉNDICE C

PRUEBA DE CABLES CON FUENTE DE LUZ Y DETECTOR

- Se encienden la fuente de luz láser y los detectores. El láser se deja calentar por 5 minutos para que se estabilice.
- Se conecta un cable de referencia con parámetros especificados por el fabricante y que cuenta con conectores tipo FC permanentes al primer detector. En este momento aparecerá una lectura en la pantalla del medidor.
- Se presiona la tecla [ZERO SET] para ajustar la medición en la pantalla a 0 dB, y que esto signifique 100 % de potencia luminosa.
- 4. Se repiten los pasos 2 y 3 para el segundo detector.
- 5. Ya calibrados los detectores, se conecta un extremo del primer cable fabricado al láser, el otro extremo, primero a uno de los detectores y después al otro. La lectura en los dos detectores debe de ser 0 dB. En caso de ser otra la lectura, se debe de revisar si las conexiones son correctas e inspeccionar de nuevo la cara de la fibra para ver si no sufrió algún daño. Si se dañó es necesario volver a pulir.
- 6. Se repite el paso 5 para el segundo cable fabricado.

APÉNDICE D

PROCESO DE PREPARACIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS PREVIO A FUSIÓN

- Se toma uno de los cables y se remueve el conector temporal en uno de los extremos.
- Se limpia con un pedazo de tela para limpieza de muestras y alcohol la región de fibra desforrada que quedará en el interior del tubo cerámico.
- Tomando el extremo de la fibra sin conector, se pasa a través del arreglo, introduciendo la fibra en el tubo cerámico para que la región desforrada quede en el interior de éste.
- Se limpia la punta de la fibra para volver a colocar el conector temporal y se revisa de nuevo con láser y detector el cable de fibra óptica para confirmar que el conector se colocó bien.
- 5. Se repite el proceso con el otro cable de fibra óptica. Así ya tenemos las dos secciones desforradas de los cables de fibra óptica dentro del tubo cerámico para que se puedan fusionar.
- 6. Amarrando con un pedazo de cinta adhesiva dos secciones de los cables de fibra óptica en el lado del tubo cerámico en que se encuentra conectado el láser, se comienzan a entrelazar los otros dos extremos del cable que se encuentran del otro lado del tubo cerámico, en el lado que se encuentran conectados los detectores.
- 7. Cuando se tiene un punto de torsión a cada centímetro de distancia después de que se han entrelazado muchas veces las fibras, se sujetan con otro

pedazo de cinta adhesiva otras dos secciones de los cables, con el fin de que no se pierdan las torsiones ya realizadas.

DEFINICIÓN DE PUNTO DE TORSIÓN.

Cuando se entrelazan en repetidas ocasiones dos fibras ópticas, en ciertos puntos las fibras tienden a unirse con mayor fuerza, como si se les estuviera aplicando una fuerza lateral que las mantiene en contacto fuertemente; mientras que en otros puntos las fibras tienden a separarse aún mas, originando que exista una capa de aire de aproximadamente 10 µm de espesor que separe las dos fibras y no permita que estén en contacto. En la figura 59 se ilustra lo explicado anteriormente.



Figura 59.- Dibujo utilizado para describir un punto de torsión.

Se denomina como punto de torsión a un punto en el que las fibras tienden a unirse más fuertemente. Es muy importante calentar exactamente en un punto de torsión, pues de no ser así, existirá una capa de aire entre las dos fibras y no se realizará correctamente la fusión al no estar en contacto las fibras.

- 8. Midiendo con una regla, se toma la distancia a la que se encuentra el punto de torsión que queda más centrado en la región desforrada del cable, y al tener como referencia que la región desforrada y el tubo cerámico miden 4.5 y 7.5 cm respectivamente, se marcan las secciones de la fibra y del tubo cerámico para saber en qué parte del tubo se debe de aplicar la flama del soplete para que caliente exactamente el punto de torsión seleccionado.
- Se sujetan las fibras entrelazadas con las pinzas de los microposicionadores para remover los pedazos de cinta adhesiva que se habían colocado.
- 10. Se desplazan los microposicionadores en direcciones contrarias paralelas al tubo cerámico con el fin de aplicar tensión a las fibras para cuando se realice el precalentado.
- 11. Con pedazos de cinta adhesiva, se amarran a las fibras los pesos a 25 cm de distancia con respecto al punto marcado en el tubo cerámico que será donde se realice la fusión.
- 12. Se colocan las monturas para sostener los pesos a 20 cm con respecto al punto de fusión. Esto permite que los pesos queden a aproximadamente 2 cm de distancia con respecto a la superficie de la mesa óptica, y así se pueda estirar la región fusionada para lograr el acoplamiento sin que se detenga al topar con la superficie de la mesa.

APÉNDICE E

PASOS A SEGUIR PARA ENCAPSULAR UN ACOPLADOR

- Centrar las fibras en el tubo cerámico con pequeños desplazamientos de los microposicionadores.
- Mezclar en cantidades iguales los dos componentes del epoxy sobre una superficie plana. La complexión del epoxy debe de ser como una pomada viscosa de color gris.
- 3. Utilizando una espátula pequeña, colocar pequeñas cantidades de epoxy en las dos puntas del tubo cerámico tratando de no hacer contacto con las fibras para evitar que se quiebre el acoplador. Debido a que el diámetro del tubo es muy pequeño, al resbalarse el epoxy colocado, comenzará a hacer contacto con las fibras, rellenándose así las puntas del tubo para sujetar las fibras.
- 4. Se deja que seque el epoxy por 6 horas.
- 5. Se afloja el tornillo de la montura que sujeta el tubo cerámico y se remueve el acoplador completamente fabricado para ser caracterizado.

APÉNDICE F

PROCESO DE CARACTERIZACIÓN DE UN ACOPLADOR

- 1. Se encienden láser y detectores, dejando calentar el láser por 5 minutos.
- 2. Se conecta el láser al puerto 1 y los detectores a los puertos 3 y 4.
- 3. Para medir porcentaje de acoplamiento y las pérdidas en la región de acoplamiento, se toman las mediciones de potencia en los puertos 3 y 4.
- Para medir la directividad se quita el detector en el puerto 4, colocando la tapa al conector, y se conecta el detector al puerto 2 para tomar la medición de potencia.

