

51  
2ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



FACULTAD DE QUIMICA

PROCESOS DE FABRICACION  
DE FIBRAS OPTICAS

TRABAJO MONOGRAFICO  
DE ACTUALIZACION

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
**PRESENTA:**

JOEL GARCIA SANCHEZ

MEXICO D. F.

1993

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN





Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## Indice General

Introducción .....	1
--------------------	---

### Capítulo I

1.- Generalidades .....	4
-------------------------	---

1.1.- Antecedentes históricos .....	4
-------------------------------------	---

1.2.- Definición .....	8
------------------------	---

1.3.- Estructura .....	8
------------------------	---

1.4.- Clasificación .....	8
---------------------------	---

1.4.1.- Fibras ópticas de modo-simple .....	11
---	----

1.4.2.- Fibras ópticas de modo-múltiple .....	13
---	----

1.4.2.1.- Fibras ópticas de modo-múltiple del tipo índice-escalonado .....	13
---	----

1.4.2.2.- Fibras ópticas de modo-múltiple del tipo índice-graduado .....	14
---	----

1.5.- Otros tipos de fibras ópticas .....	15
---	----

1.5.1.- Tipo W .....	15
----------------------	----

1.5.2.- Eutécticas .....	15
--------------------------	----

### Capítulo II

2.- Materiales .....	16
----------------------	----

2.1.- Características .....	16
-----------------------------	----

2.2.- Fibra óptica con núcleo y revestido de vidrio .....	17
---	----

2.3.- Fibra óptica con núcleo de vidrio y revestido de plástico .....	20
--	----

2.4.- Fibra óptica con núcleo y revestido de plástico .....	21
2.5.- Dopantes .....	21
2.6.- Importación y Exportación de fibras ópticas en México .....	24

### Capítulo III

3.- Parámetros de caracterización de las fibras ópticas ...	26
3.1.- Atenuación .....	26
3.2.- Número de apertura (NA) .....	30
3.3.- Amplitud de banda y/o dispersión de pulso .....	35
3.4.- Tensión .....	35
3.5.- Fátiga estática .....	35

### Capítulo IV

4.- Procesos de manufactura de fibras ópticas .....	37
4.1.- Por fundición directa .....	37
4.1.1.- Proceso de varilla en tubo .....	39
4.1.2.- Proceso del doble-crisol .....	43
4.2.- Por depósito de vapor químico (Chemical Vapor Deposition CVD) .....	37
4.2.1.- Principios generales .....	46
4.2.2.- Proceso del CVD .....	47
4.2.3.- Fundamentos .....	48
4.2.4.- Nucleación y modos de crecimiento .....	50

4.2.4.1.- Crecimiento en forma de isla tridimensional .....	50
4.2.4.2.- Crecimiento de película-a-película .....	52
4.2.4.3.- Crecimiento de película-isla .....	52
4.2.5.- Equilibrio químico .....	54
4.2.6.- Equilibrio químico de la fase gaseosa .....	54
4.2.7.- Equilibrio químico de la fase sólida .....	55
4.2.8.- Reacción química, mecanismos y cinética .....	57
4.2.9.- Rapidez de reacción de la fase gaseosa .....	58
4.2.10.- Reacción en la superficie, mecanismo y cinética ..	60
4.2.11.- Fenómenos de transporte en el proceso CVD .....	60
4.2.12.- Descripción del proceso CVD para fabricar fibras ópticas .....	63
4.3.- Proceso de depósito de vapor químico modificado (MCVD) .....	70
4.3.1.- Descripción del proceso MCVD, en la manufactura de fibras ópticas .....	70
4.3.2.- Etapa de sinterización .....	74
4.3.3.- Etapa de contracción .....	77
4.3.4.- Control del proceso (MCVD) .....	79
4.4.- Proceso de depósito de vapor químico fase-axial (VAD) .....	82
4.4.1.- Operación para la fabricación de fibras ópticas por este método .....	82
4.4.2.- Etapa de sinterización v deshidratación .....	89
4.5.- Proceso de depósito de vapor químico externo (OVD) .....	94

4.5.1.- Desarrollo de la manufactura de fibras ópticas empleando el proceso OVD .....	94
4.5.2.- Reacciones químicas .....	96
4.5.3.- Geometría .....	99
4.6.- Proceso de depósito de vapor químico por plasma (PCVD) .....	101
4.6.1.- Descripción de la fabricación de fibras ópticas por medio de este método .....	101
4.6.2.- Ventajas .....	104
4.7.- Proceso de depósito de vapor químico por plasma mejorado (PEMCVD) .....	106
4.7.1.- Operación de este método para la elaboración de fibras ópticas .....	106

## Capítulo V

5.- Etapa de hiladura .....	110
5.1.- Tipos de hornos de calentamiento .....	112
5.2.- Control del diámetro de la fibra óptica .....	115

## Capítulo VI

6.- Caracterización óptica y mecánica .....	118
6.1.- Caracterización óptica .....	118

6.1.1.- Atenuación .....	118
6.1.2.- Amplitud de banda y/o dispersión de pulso .....	121
6.1.2.1.- Dispersión en fibras ópticas de modo-simple ....	121
6.1.2.2.- Amplitud de banda en fibras ópticas de modo-múltiple .....	122
6.1.3.- Tamaño del modo de pulso .....	125
6.1.4.- Modo límite de longitud de onda .....	125
6.1.5.- Geometría .....	126
6.1.6.- Perfil de índice de refracción .....	127
6.1.7.- Efectos No-lineales .....	130
6.1.8.- Pérdidas No-lineales por dispersión de Brilloin estimulada .....	130
6.1.9.- Propagación del pulso No-lineal ( Modificación de longitud de banda ) .....	131
6.2.- Caracterización mecánica .....	132
6.2.1.- Tensión .....	132
6.2.1.1.- Método de peso-constante .....	133
6.2.1.2.- Método de estiramiento-constante .....	135
6.2.2.- Fatiga estática .....	137

## Capítulo VII

7.- Cableado .....	139
7.1.- Funciones del cableado .....	139
7.2.- Empalme .....	140
7.2.1.- Empalme por fusión .....	140
7.2.2.- Empalme conectado .....	142

7.3.- Aplicaciones de las fibras ópticas .....	142
7.3.1.- Telecomunicaciones .....	144
7.3.2.- Redes .....	144
7.3.3.- Industriales .....	145
7.3.4.- Computación .....	145
7.3.5.- Militares .....	146
7.3.6.- Medicina .....	147
Conclusiones .....	149
Bibliografía .....	152



## Indice de Figuras

Figura 1. Tipos de fibras ópticas .....	9
Figura 2a. Paso de un rayo de un medio de mayor densidad a otro de menor densidad .....	31
Figura 2b. Angulos básicos incidente y refractado .....	32
Figura 3. Angulo mínimo crítico .....	34
Diagrama de Flujo 1. Etapas características de cada tipo de proceso .....	38
Figura 4. Proceso de varilla en tubo .....	40
Figura 5. Formación de núcleo y revestido .....	41
Figura 6. Proceso del doble-crisol .....	44
Figura 7. Transporte y reacción en el proceso de depósito de vapor químico (CVD) .....	49
Figura 8. Tipos de crecimiento en el CVD .....	51
Figura 9. Proceso CVD para fibras ópticas .....	64
Figura 10. Esquema de un sistema "burbujeador" .....	65
Figura 11. Depósito y sinterización en el CVD .....	69
Figura 12. Proceso MCVD .....	71
Figura 13. Representación de la temperatura en el proceso MCVD .....	73
Figura 14. Etapa de contracción en el MCVD .....	78
Figura 15. Proceso VAD .....	83
Figura 16. Proceso VAD para fibras ópticas .....	84
Figura 17. Función de los quemadores separados .....	85

Figura 18. Variación del ángulo del quemador .....	88
Figura 19. Etapa de deshidratación en el VAD .....	90
Figura 20. Proceso OVD .....	95
Figura 21. Sinterización y contracción en el OVD .....	98
Figura 22. Proceso PCVD .....	102
Figura 23. Proceso PEMCVD .....	107
Figura 24. Etapa de hiladura .....	111
Figura 25. Tipos de hornos ( A y B ) .....	113
Figura 25. Tipos de hornos ( C y D ) .....	114
Figura 26. Aparatos para medir el diámetro de las fibras ópticas .....	116
Figura 27. Sistema para medir la atenuación .....	120
Figura 28. Aparatos para medir la dispersión .....	123
Figura 29. Forma de evaluar la amplitud de banda .....	124
Figura 30. Sistema de la técnica de campo-cercano .....	129
Figura 31. Método del peso-constante .....	134
Figura 32. Método de estiramiento-constante .....	136
Figura 33. Embalme por fusión .....	141
Figura 34. Emplame conectado .....	143

## Índice de Gráficas

Gráfica 1. Variación del índice de refracción por la concentración del dopante .....	23
Gráfica 2. Curva de atenuación de fibras ópticas de sílica .....	29

Gráfica 3. Concentración de OH en función de la temperatura .....	92
--	----

### Indice de Tablas

Tabla 1. Reseña histórica de los procesos y compañía que los desarrolla .....	7
Tabla 2. Parámetros característicos de las fibras ópticas .....	10
Tabla 3. Comparación de fibras por experimentos realizados por McClymer .....	11
Tabla 4. Composiciones características de las fibras ópticas .....	18
Tabla 5. Composiciones para fibras con núcleo y revestido de vidrio .....	19
Tabla 6. Composiciones para fibras con núcleo de vidrio y revestido de plástico .....	20
Tabla 7. Composiciones para fibras con núcleo y revestido de plástico .....	22
Tabla 8. Importación de fibras ópticas .....	25
Tabla 9. Exportación de fibras ópticas .....	25
Tabla 10. Grupos dimensionales en el CVD .....	61
Tabla 11. Ecuaciones en el transporte durante el proceso CVD .....	62
Tabla 12. Parámetros del proceso MCVD .....	81

Tabla 13. Crecimiento y rapidez obtenidos variando el ángulo del quemador .....	89
Tabla 14. Parámetros típicos del proceso VAD .....	93
Tabla 15. Parámetros del proceso OVD .....	100
Tabla 16. Parámetros característicos en el PCVD .....	105
Tabla 17. Parámetros representativos en el PEMCVD .....	109
Tabla 18. Parámetros de caracterización óptica .....	119

## Introducción

El progreso científico y tecnológico ha propiciado la generación de bienes y servicios que elevan el nivel de vida de la humanidad.

El crecimiento de la demanda de servicios ocasiona nuevas búsquedas como en el área de las comunicaciones. Estas evolucionan continuamente, por ejemplo, el teléfono alámbrico cuyos cambios desde su aparición hasta los modernos teléfonos uncelurares son resultado de la tecnología.

La perspectiva en el avance tecnológico en las telecomunicaciones que ha causado mayor impacto en los últimos años es la aparición de la fibra óptica, filamento compuesto básicamente de dos partes: núcleo y revestido. Se fabrica con materiales plásticos ó vidrio y puede transportar información en forma de rayos de luz en su núcleo.

Su importancia es tan grande en telecomunicaciones que no tiene competencia en funcionalidad en cualquiera de sus aplicaciones. Al emplearla se obtiene mayor potencia de transmisión de información, menor pérdida de ésta y menor interferencia.

Por tal motivo, el presente trabajo tiene el objetivo de enfatizar la forma de fabricarlas y describir los procesos industriales que en la actualidad se emplean para ello. Sin incluir los aspectos físicos ó matemáticos de estos materiales y procesos.

También se muestra que en estos procesos la participación del ingeniero químico ó del químico es muy importante.

Esta revisión se inicia con una reseña histórica desde la aparición de la fibra óptica hasta la actualidad: se presentan sus aspectos generales para comprender mejor la parte funcional de estos materiales.

Se describen las materias primas empleadas para su fabricación, las distintas combinaciones que se pueden lograr, así como las restricciones y ventajas que ofrecen cada tipo de materia prima.

Los procesos estudiados se clasifican en dos grupos, de acuerdo a su forma de operación. El primer grupo incluye los procesos " por fundición directa " y el segundo los de " depósito de vapor químico ".

Cada proceso se describe y se discuten sus ventajas, desventajas y rendimiento.

También se explica la etapa de hiladura parte fundamental en el proceso ya que es donde se obtiene la fibra óptica como producto final. Se mencionan las diferencias en esta etapa para cada grupo de proceso, las opciones para su mejoramiento, así como las premisas para su optimización.

La caracterización óptica y mecánica de las fibras ópticas es tan importante como la etapa de hiladura, ya que establece las propiedades que tendrá la fibra para cualquier aplicación, así como la forma de evaluar dichas propiedades.

Por último, se comentan temas importantes como son el cableado, empalme y algunas aplicaciones de las fibras ópticas.

Se incluyen datos de importación y exportación.

## Capítulo I

### 1.- Generalidades

#### 1.1.- Antecedentes Históricos

Desde los más remotos tiempos, la humanidad ha usado la luz como un medio de comunicación. Ejemplos primitivos son las señales por medio de hogueras ó maderos encendidos que se utilizaban en tierra, así como señales de faroles, lámparas de petróleo ó reflejos de espejos en el mar, utilizados con el fin de establecer un vínculo de comunicación. La idea de aprovechar la luz para este fin propició diferentes estudios (1).

Sin embargo, no fué sino hasta 1870 cuando el físico británico John Tyndall (2) demostró ante la Sociedad Real de Londres el hecho de que la luz podía ser guiada, y para ello realizó un experimento de luz reflejada en un arroyo.

En 1880 Alexander Graham Bell (3) inventó un teléfono (4) por medio del cual el mensaje se convertía en un rayo de luz, esto era posible porque la luz del sol era reflejada a través de un sistema de lentes que vibraban en respuesta al mensaje. La intensidad de la vibración era variable, lo que permitía que el receptor por medio de un detector de selenio transformara esas variaciones en corriente eléctrica para recrear el mensaje a través de un teléfono receptor.

Desafortunadamente el proyecto de Graham Bell estaba limitado por las condiciones ambientales y esto repercutía en las distancias que los rayos de luz podían recorrer.



Los primeros estudios teóricos relativos al problema de guiar ondas electromagnéticas por reflexión interna por conducto de largos cilindros dieléctricos aparecen en 1910 (5).

El primer experimento cuantitativo de estas investigaciones se realizó en 1920 (6). En 1930 físicos como F. Urbach, K. A. Stacey y B. Szigety estudiaron la transmitividad en distintos materiales, y observaron que existían máximos en la absorción de luz en la región del infrarojo, lo cual sugería la existencia de una banda con baja absorción, así como, una pérdida-mínima en la transmisión entre las regiones del infrarojo y el ultravioleta (7).

Los estudios acerca de la propagación de luz dentro de varilla de vidrio continuaron su desarrollo. La invención del laser en 1960 (8) despertó nuevas inquietudes respecto a la comunicación por medio de ondas de luz y con ello los científicos dislumbraron el potencial de la transmisión de información por medio del láser (9) (10).

Con este descubrimiento surgió el interés mundial por la optoelectrónica iniciándose los primeros estudios sobre dispositivos ópticos y medios de transmisión.

En 1966 K. C. Kao y G. A. Hockhan (11) propusieron que las fibras de vidrio (llamadas después fibras ópticas) de alta pureza en el núcleo y con un revestido de un material con un índice de refracción menor que del núcleo podían ser usadas para transmitir mensajes por medio de luz a grandes distancias.

En 1968 S. Kawakami y J. Nishizawa (12) propusieron que una varilla de vidrio denominada fibra óptica con índice de refracción homogéneo, similar al de los lentes podía ser usada eficientemente como un medio de alta capacidad de transmisión.

La generación de pulsos de luz producidos en períodos definidos y reproducirlos lo mejor posible representa un avance tecnológico en los años 70's, pero al mismo tiempo requiere el mejorar los procesos de fabricación de fibras ópticas a fin de lograr calidad y alta pureza (13). Esto trae como consecuencia el desarrollo de diferentes procesos por las industrias que proyectaron la utilidad de las fibras ópticas como medio de transmisión las cuales se presentan en la tabla 1. Lo que da como resultado que en la década de los 80's se desarrolle la optoelectrónica (10) (14) y se industrialice la fabricación de las fibras ópticas (13).

Tabla 1. Reseña histórica de los procesos y compañía que los desarrolla.

AÑO	COMPANIA	PROCESO
1970	CORNING GLASS WORKS	DEPOSITO DE VAPOR QUIMICO (CVD) (15)
1973	CORNING GLASS	DEPOSITO DE VAPOR QUIMICO EXTERNO (OVD) (16)
1974	LABORATORIOS BELL	DEPOSITO DE VAPOR QUIMICO MODIFICADO (MCVD) (18)(19)
1975	PHILIPS COMPANY	DEPOSITO DE VAPOR QUIMICO POR PLASMAS (PCVD)(PENCVD) (19)(21)
1977	CORPORACION JAPONESA DE TELEFONOS Y TELEGRAFOS	DEPOSITO DE VAPOR QUIMICO FASE-AXIAL (VAD) (17)
1979	WORKERS AT BRITISH TELECOM.	DOBLE-CRISOL (DC) (20)
---	-----	VARILLA EN TUBO (VT) (22)

## 1.2.- Definición

La fibra óptica es un filamento flexible hecho de algún tipo de vidrio ó plástico, que es capaz de transportar rayos de luz en su interior en ambos sentidos.

## 1.3.- Estructura

La fibra óptica consiste en un núcleo envuelto por una capa denominada revestido que tiene un índice de refracción menor y con un coeficiente de expansión mayor que el del material del núcleo, como lo muestra la figura 1 (23) (25).

El material usado en la construcción del núcleo define las propiedades del material que se usa en el revestido (24).

## 1.4.- Clasificación

Por su modo de transmisión, las fibras ópticas se clasifican en (7):

### 1.4.1.- Fibras ópticas de modo-simple

### 1.4.2.- Fibras ópticas de modo-múltiple

[ de índice-escalonado  
de índice-graduado

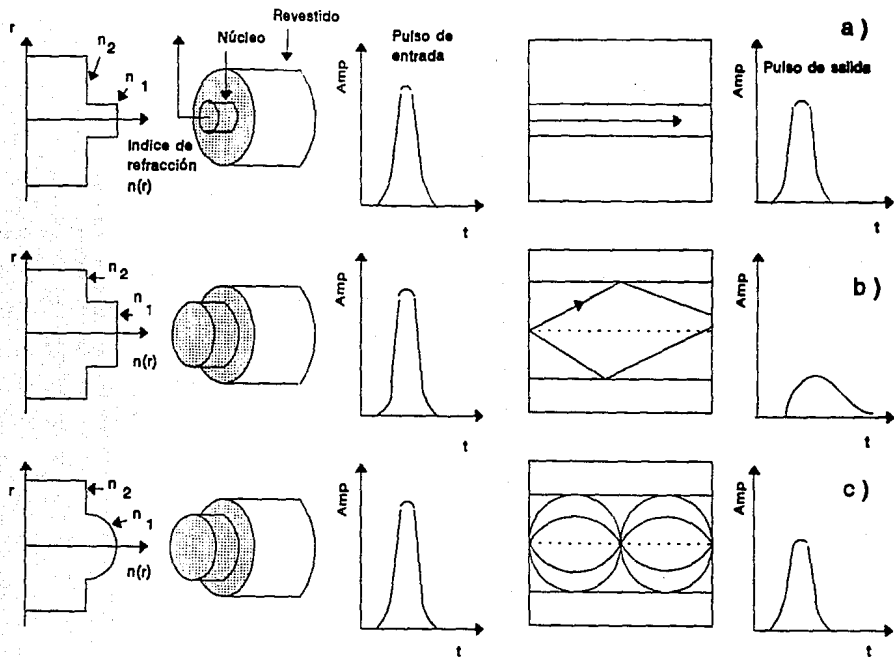


Figura 1. Diagrama esquemático que muestra las características de los tipos de fibras ópticas: a) modo-simple, b) índice-escalonado y c) índice-graduado (27)

Las tablas 2 y 3, muestran parámetros típicos de cada tipo de fibra óptica, así como resultados de experimentos efectuados por McClymer (26) utilizando los diversos tipos de fibras ópticas.

Tabla 2. Parámetros característicos de las fibras ópticas (7)			
	Nodo-Múltiple		Nodo-Simple
	índice-escalonado	índice-graduado	
Díámetro del núcleo (µm)	50-100	30-50	1-8
Díámetro del revestido (µm)	125-140	115-125	= 125
Diferencia entre los índices de refracción del núcleo y revestido (%)	1-2	1	0.3
Amplitud de banda (MHz·Km)	ca. 20	200-2000	ca. 10000

Tabla 3.- Comparación de fibras ópticas  
por experimentos de McClymer (26)

	MODO-SIMPLE			MODO-MULTIPLE		
Angulo (deg)	45	90	135	45	90	135
Tamaño (nm)	94.4	94.7	88.2	89.5	95.6	93.6
Coherencia	0.894	0.862	0.898	0.776	0.679	0.813
Rapidez de Cálculo $10^3/s$	0.11%	0.04%	0.02%	0.11%	0.04%	0.02%
<u>Área de la fibra</u> Área coherente	413	87.6	413	2.8	58.7	2.8

1.4.1.- Fibras ópticas de modo-simple. La transmisión es multitrayectoria y se linealiza por medio de un núcleo de diámetro muy pequeño que esencialmente permite la propagación parcial de un sólo rayo, como lo muestra la figura 1a. Por esta razón, las fibras ópticas de este tipo son óptimas para dispositivos que requieran de una mayor amplitud de banda. esta longitud de banda es limitada solamente por la dispersión que el material presenta (27).

La fibra óptica de modo-simple puede ser considerada como una fibra óptica dieléctrica en la cual sólo el rayo fundamental puede propagarse porque el radio del núcleo  $a_1$ , tiene que estar por debajo del valor crítico de operación, calculado por la siguiente ecuación (22):

$$a_1 = \left[ \frac{1.202}{\pi} \right] \left[ \frac{\frac{\delta}{n_1}}{\left[ 2 \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \right]^{1/2}} \right] \dots \dots \dots 1$$

donde:

- $a_1$  = radio del núcleo
- $\delta$  = longitud de onda de la luz
- $n_1$  = índice de refracción del núcleo
- $n_2$  = índice de refracción del revestido

Esta condición impone severas restricciones en los procesos de manufactura, ya que si no es considerada, la fibra óptica transportaría más de un rayo y presentaría una severa degradación de la amplitud de banda. Así, tenemos que las fibras ópticas de modo-simple son las más difíciles de fabricar y sus aplicaciones se limitan a unos cuantos usos (28).



#### 1.4.2.- Fibras ópticas de modo-múltiple.

1.4.2.1.- De índice-escalonado. Consiste de un núcleo con un índice de refracción homogéneo,  $n_1$ , rodeado por un revestido de índice de refracción,  $n_2$ , menor que del núcleo, como lo muestra la figura 1b. La diferencia entre índices de refracción es usualmente del orden de 1% ó menor, y se calcula por medio de la ecuación (22):

$$\zeta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_2} \dots\dots\dots 2$$

donde:

- $\zeta$  = diferencia entre los índices de refracción
- $n_1$  = índice de refracción del núcleo
- $n_2$  = índice de refracción del revestido

En este tipo de fibras ópticas, la luz es guiada por reflexión total dentro del núcleo, con diferencias parciales en la propagación de los rayos de luz y en sus ángulos, como se muestra en la figura 1b. Por consiguiente exhiben diferentes tiempos de recorrido, lo que impone una restricción en el uso, debido a que la amplitud de banda es limitada (29).

1.4.2.2.- De índice-graduado. En éstas el índice de refracción del núcleo no es uniforme, por lo que el centro presenta un índice de refracción mayor que va decreciendo en forma radial: lo que ocasiona que la luz no sea guiada por reflexión total, sino por una distribución, debida a la difracción interna de la luz en el núcleo.

La disminución radial del índice de refracción del eje de la fibra da como resultado un incremento en la velocidad parcial de salida de los rayos de luz del núcleo y con esto se compensa la larga trayectoria seguida por la luz. Como las trayectorias son diferentes, se busca que los tiempos de recorrido sean iguales para todos los rayos y para ello se establece un perfil deseado de índice de refracción.

El perfil del índice de refracción óptimo es casi parabólico, con pequeñas desviaciones que son causas de distorsión en la transmisión (28). Por lo tanto se requiere un estricto control del perfil del índice de refracción, lo que es difícil de lograr en la fabricación. Este tipo de fibras representadas en la figura 1c, son descritas por la ecuación siguiente, en forma general (22):

$$n(r) = n_0 \operatorname{sech} \epsilon r \dots\dots\dots 3$$

donde:

$n_0$  = índice de refracción del eje de la fibra

$r$  = distancia del centro de la fibra

$\epsilon$  = variación radial de la constante relacionada  
a la distancia focal

### 1.5.- Otros tipos de fibras ópticas

Existen otros tipos de fibras ópticas en desarrollo y de las cuales no se tiene información precisa. por tal motivo solo se mencionan y son:

1.5.1- Tipo W (22). son una derivación de las fibras de modo-simple.

1.5.2- Eutécticas (30). se proponen mezclas de metales para la fabricación de este tipo.

Estos tipos ofrecen una alternativa para aprovechar distintas clases de materiales. diferentes a los tradicionales. en su fabricación.

La literatura que se logro consultar muestra que estos tipos de fibras presentarían características semejantes a las convencionales. aunque por la dificultad de obtener más información acerca de dichas fibras ya que éstas se encuentran en desarrollo nos restringe el opinar que logros se obtendrían en su producción industrial.

## Capítulo II

### 2.- Materiales

2.1.- Características de los materiales. Las fibras ópticas para su fabricación requieren de materiales ó materias primas que deben satisfacer los siguientes requisitos básicos (1):

I.- El material usado como núcleo debe tener un alto índice de refracción comparado con el del material usado como revestido para asegurar que la estructura de la fibra óptica transporte la luz.

II.- Los materiales y procesos de fabricación deben ser capaces de producir una graduación seleccionada en el núcleo de la fibra óptica, para obtener una alta amplitud de banda, disminuyendo la atenuación.

III.- Deben ser compatibles en sus propiedades térmicas y mecánicas.

IV.- Debe ser transparente para propagar eficientemente al rayo luminoso.

V.- Adicionalmente debe ofrecer propiedades adecuadas para formar un cable como son flexibilidad, grosor y longitud.

Los materiales que satisfacen estos requerimientos son los plásticos y el vidrio (29) (30), que se pueden combinar y dar forma a los grupos básicos siguientes de estructuras de fibras ópticas, mismas que permiten obtener una amplia variedad de combinaciones en sus propiedades (1).

## 2.2.- Fibra óptica con núcleo y revestido de vidrio

Es el tipo de fibra óptica más difundido y de mejores características ópticas logradas en la actualidad.

El núcleo y el revestido pueden ser del mismo tipo de vidrio, con la adición de algún dopante para variar el índice de refracción de uno de ellos.

El requerimiento para fibras ópticas usadas en transmisión a grandes distancias, por ejemplo, de 50 a 100 Km., necesita de este tipo de fibras ópticas con ultra-alta-pureza y transparencia.

Las tablas 4 y 5, presentan las composiciones más comunes usadas en la manufactura de este tipo de fibras ópticas (7).

Tabla 4. Composiciones Características  
de las Fibras Ópticas

Tipo de Fibra Óptica	Núcleo	Revestido
Modo-múltiple	$\text{GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{B}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ (33)
	$\text{GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$	$\text{B}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ (34)
	$\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$	$\text{F-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ (35)
		$\text{SiO}_2$ (36)
Modo-simple	$\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$	$\text{F-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ (37)
		$\text{SiO}_2$ (38)
		$\text{P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ (36)
		$\text{F-SiO}_2$ (39)
	$\text{SiO}_2$	$\text{F-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ (40)
		$\text{F-SiO}_2$ (41)

Tabla 5. Composiciones de fibras ópticas  
con núcleo y revestido de vidrio

Tipo de Fibra Optica	Núcleo	Revestido
Indice-graduado (42)	$R_2O-GeO_2-CaO-SiO_2$ $R_2O-B_2O_3-SiO_2$ $Na_2O-B_2O_3-SiO_2$ $Na_2O-B_2O_3-SiO_2$	$Na_2O-B_2O_3-SiO_2$  Resina de silicio
Indice-escalonado (43) (44) (45)	$Na_2O-B_2O_3-SiO_2$ $Na_2O-Li_2O-CaO-SiO_2$ $Na_2O-CaO-SiO_2$ $P_2O_5-Ga_2O_3-GeO_2$ $Tl_2O-Na_2O-B_2O_3-GeO_2-BaO-CaO-SiO_2$ $Na_2O-BaO-GeO_2-B_2O_3-SiO_2$	$Na_2O-B_2O_3-SiO_2$ $Na_2O-Li_2O-CaO-SiO_2$ $Na_2O-CaO-SiO_2$ $P_2O_5-Ga_2O_3-SiO_2$ $Na_2O-B_2O_3-SiO_2$ $Na_2O-B_2O_3-SiO_2$

### 2.3.- Fibra óptica con núcleo de vidrio y revestido de plástico

Es el tipo más común de fibra óptica fabricada. Se pueden obtener en diámetros entre 50  $\mu\text{m}$  hasta 1 mm. y cualquier longitud, por lo es posible eliminar los empalmes entre las fibras ópticas, que son difíciles de realizar y reducen el costo del proceso.

El núcleo en este tipo de fibras ópticas puede ser cualquier composición de vidrio como las mencionadas en la sección 2.2. y con un revestido de algún material plástico.

Algunos de estos materiales se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Materiales utilizados en la fabricación de fibras ópticas con núcleo de vidrio y revestido de plástico.

Watanabe [1990]	epoxi-silano y tetra-alkoxi-silano (46)
Kondo e Hirata [1991]	metil-acrilato (47)
Terence B. P. [1990]	resinas poliméricas (poliuretano) (48)
Arai y Kunitoshi [1990]	amino-acril-silano (49)
Kurita y Masanori [1990]	difenil-silaxano y dimetil-silaxano (50)
Izutsa y Yamaguchi [1990]	polisulfuro de fenileno (51)
Kohei e Inoe [1990]	perfluoronato-etilen-propileno (52)
Hiroaki y Okuda [1989]	dodecilpentanil-metacrilato (53)
F. K. Drain [1989]	polibutileno-tereftalato y politiofenilenos (54)



#### 2.4.- Fibra óptica con núcleo y revestido de plástico

Se caracterizan por presentar una mayor atenuación y una pérdida grande en el poder de transmisión debido a la absorción de los materiales empleados para su elaboración (59).

Se utilizan en aplicaciones donde las condiciones ambientales son muy drásticas y por ende las fibras de vidrio u otro material no serían adecuadas. Su flexibilidad permite obtener núcleos grandes. Su uso se restringe a distancias menores ó igual a 100 m. Por presentar una mayor pérdida en la información que la de fibras ópticas de materiales inorgánicos.

En la actualidad se trabaja con sistemas de polímeros con los que se elaboran fibras ópticas y si bien han logrado importantes avances, no se ha logrado mejorar la calidad en la transmisión de la luz, es decir, sin disminuir la atenuación. En la tabla 7, se presentan algunos de los materiales empleados en la actualidad.

#### 2.5.- Dopantes

Son las sustancias que se adicionan en cantidades determinadas durante la manufactura de fibras ópticas (64) (66), para mejorar propiedades y obtener las especificaciones para un uso determinado.

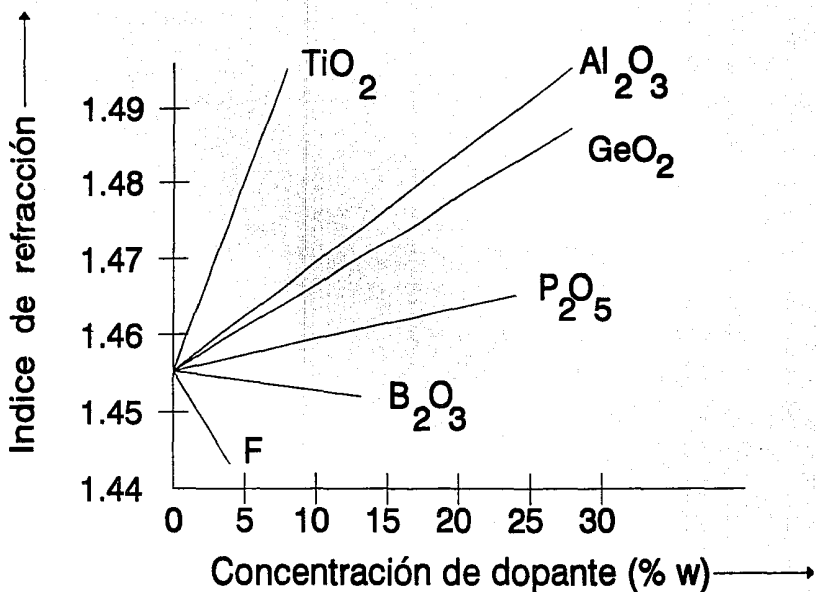
Tabla 7. Materiales empleados para la manufactura de fibras ópticas con núcleo y revestido de plástico.

Rooks y Rousell [1990]	poli(metil-metacrilato) (55)(56)
Yoshino y Kuwabara [1990]	poli(p-fenilen-vinileno) (57)
Osawa [1990]	poli(uretano) (58)
Abe y Oda [1990]	poli(dimetil-silaxano) (59)
Sugihura [1990]	poli(etileno) (60)
Ozawa y Seki [1989]	poli(succinatos) (61)
Yagya y Seki [1989]	poli(etilen-tetrafluoruro-etileno-cloro-fluoro-etileno) (62)
Yokoshima y Sasahara [1990]	poli(etileno-polieter) (63)
	poli(tereftalato de etilo) (63)

Así mediante  $Ge_2O_3$  ó  $P_2O_5$  se modifica el índice de refracción (67) (68) (69), en el núcleo ó revestido y el coeficiente de expansión térmica (65). La adición de  $B_2O_3$  disminuye la viscosidad del tubo de sílica (70). El fluoruro decrece el índice de refracción (73).

También existen aditivos que se adicionan para disminuir la temperatura ó la presión en el proceso (71) (72).

La gráfica 1, muestra los dopantes más usados en la actualidad y la variación del índice de refracción vs la concentración del dopante.



Gráfica 1. Relación entre concentración del dopante y del índice de refracción (7)

## 2.6.- Importación y Exportación de Fibras Ópticas.

Las tablas 8 y 9, presentan el comercio internacional de fibras y cables ópticos englobados en la misma fracción arancelaria. esto se debe a que en algunos países como en el caso de México sólo se empalman las fibras ópticas pero no se producen.

Al observar los valores reportados en las tablas nos damos cuenta de la importancia que cada día adquieren dichas fibras. No sólo en México sino a nivel mundial. ya que como principales importadores tenemos a los Estados Unidos, Alemania, Japón y Suecia, y en un nivel secundario a los siguientes países Canadá, Yugoslavia, Suiza y a Inglaterra.

En calidad de principales exportadores tenemos a Estados Unidos y Alemania, y como exportadores secundarios tenemos a Suiza, Panamá y Venezuela. Estos últimos presentan ser una sorpresa en el panorama mundial ya que como México son países que no habían previsto la importancia y notable ventaja que representan en cualquiera de sus aplicaciones las fibras ópticas.

**Tabla 8. Estadística de Importaciones de Fibras Ópticas (74)**

ANO	VOLUMEN (toneladas)	MONTO ( millones de dólares )
1987	4.256	1.101.511
1988	6.928	1.320.892
1989	10.367	1.434.132
1990	1.541.682	2.613.521
1991	1.309.996	2.587.941

**Tabla 9. Estadística de Exportaciones de Fibras Ópticas (74)**

ANO	VOLUMEN (toneladas)	MONTO ( millones de dólares )
1987	0.897	13.231
1988	1.090	22.875
1989	0.500	9.070
1990	0.100	2
1991	21.700	2.262

### Capítulo III

#### 3.- Parámetros de caracterización de las fibras ópticas.

Los procesos de fabricación de fibras ópticas son condicionados por las propiedades que debe cumplir la fibra óptica para una adecuada aplicación (25), y estas son:

3.1.- Atenuación

3.2.- Número de Apertura

3.3.- Amplitud de Banda y/o Dispersión de Pulso

3.4.- Tensión

3.5.- Fátiga Estática

3.1.- Atenuación. Se refiere a la disminución de la transmisión de una fibra óptica, por unidad de longitud (dB/Km ). Está directamente relacionada con la distancia entre las repetidoras en los sistemas de comunicación (7) (75).

La atenuación para la fibra óptica está dada por:

$$\alpha (\delta) = \frac{A}{\delta^4} + B + C (\delta) \dots\dots\dots 4$$

donde:

$\alpha (\delta)$  = atenuación

$\delta$  = longitud de onda de la luz ( m )

A = coeficiente de Rayleigh de dispersión  
( dB/Km\* m<sup>2</sup> )

B = pérdidas de transmisión debido a  
imperfecciones estructurales (dB/Km)

C (  $\delta$  ) = pérdidas de transmisión debido a  
impurezas y a la absorción intrínseca  
( dB/Km )

La pérdida de transmisión debido a la dispersión de Rayleigh (78) es influenciada por las fluctuaciones en la densidad y composición del material. Li (78), Miya y Terumuna (76) y Hanawa y Sudo (77) lograron determinar el valor del coeficiente de Rayleigh para sílica con dopantes como GeO<sub>2</sub> y B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reportando A= 0.7 dB/Km· $\mu$ m.

Los defectos estructurales tales como burbujas ó fuerzas entre el núcleo y revestido debidos a la falta de fusión que convierten a los pulsos guiados en fugas e incrementan la pérdida de transmisión.

La utilización de fibras ópticas en longitudes de onda definidas permite reducir a un mínimo la atenuación. Estas longitudes de onda se designan con el nombre de ventanas.

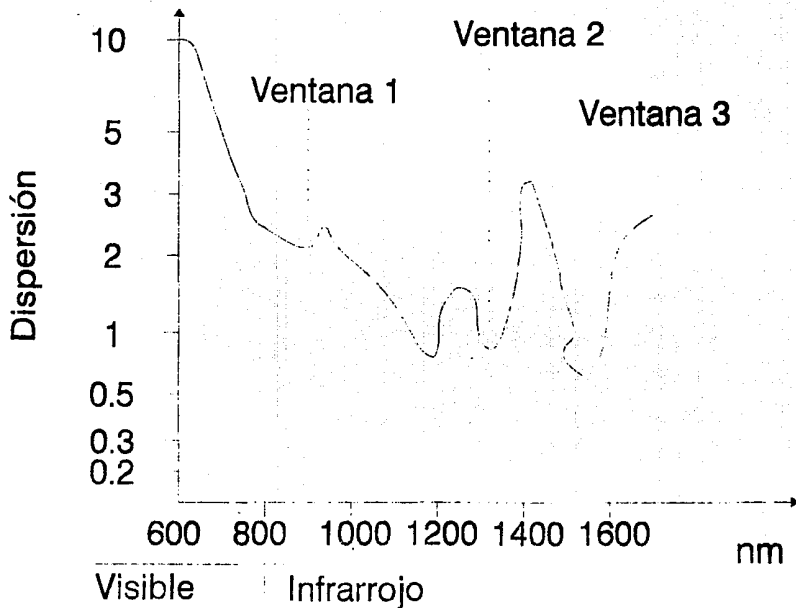
La primera ventana trabaja en la longitud de onda aproximada a 850 nm y se usa en fibras ópticas del tipo modo-múltiple para distancias cortas.

La segunda ventana opera en la longitud de onda de 1300 nm, funcionando también en fibras ópticas modo-múltiple para distancias medias que no sobrepasen los 12 Km. De igual modo para este tipo de ventana se utilizan las fibras ópticas del tipo modo-simple para distancias grandes, con repetidoras cada 30 Km., pero existe la ventaja de que a esta longitud de onda la dispersión queda prácticamente anulada.

La tercera ventana actúa en la longitud de onda de 1500 nm, y esta en etapa experimental, aunque las pruebas efectuadas a nivel laboratorio permiten suponer que mediante el uso de fibras ópticas modo-simple sería posible aumentar la distancia entre las repetidoras (1).

Los factores que influyen en la atenuación son muy variados, debiendo considerarse en primer término la difusión de la luz, las deformaciones mecánicas y las absorciones a causa de impureza del material. La suma de todas ellas determina una curva en función de la longitud de onda de la luz transmitida (200). En la gráfica 2 se presenta una curva de atenuación para fibras ópticas de sílica pudiéndose observar en ella la existencia de longitudes de onda en las cuales la dispersión es mínima. Se trata de las ventanas de transmisión anteriormente descritas y corresponden a las regiones utilizadas para telecomunicaciones (84).





Gráfica 2. Curva de atenuación de fibras ópticas de silca (1)

3.2.- Número de apertura ( NA ), la figura 2a. muestra que cuando un rayo luminoso pasa de un medio de alta densidad a otro de menor densidad. para este caso con diferentes índices de refracción. se desvía de su trayectoria. apártandose de la normal en la superficie de separación y de manera contraria. cuando el rayo pasa de un medio de menor densidad a otro más denso. el fenómeno es inverso. es decir. el rayo refractado se aproxima a la normal en la superficie de separación se puede observar en la figura 2b (1).

A cada ángulo de incidencia corresponde un ángulo de refracción. el cual varía en función de la diferencia de índices de refracción entre los dos medios. La refracción y la reflexión se expresan según la ecuación 5. conocida como Ley de Snell:

$$\text{sen } \theta_{n_1} = \text{sen } \theta_{n_2} \dots\dots\dots 5$$

que en su forma más sencilla explica que la relación de los índices de refracción es igual a la relación de los senos del ángulo de incidencia y el ángulo de refracción.

Aplicando esta ley y sabiendo que el núcleo tiene un índice de refracción mayor que el revestido. se explica que la luz transmitida (rayo) se mantenga y propague a través del núcleo. lo que constituye el principio de reflexión total interna.

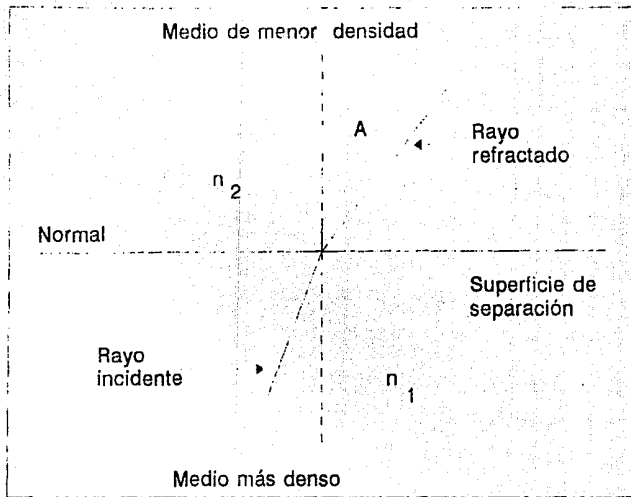


Figura 2a. Paso de un rayo luminoso de un medio más denso a otro de menor densidad óptica ( 23 )

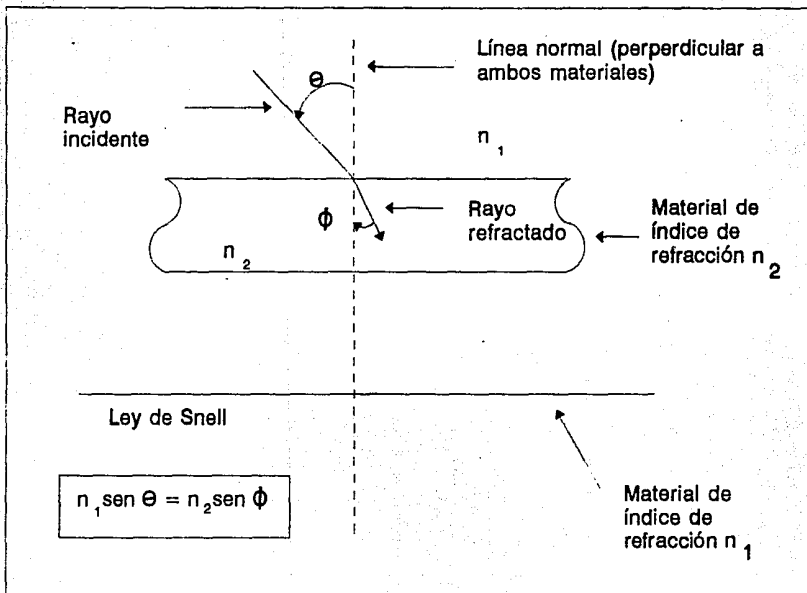


Figura 2b. Angulos básicos incidente y refractado ( 1 )

El rayo luminoso puede entrar al núcleo de la fibra óptica si esta dentro de cierto ángulo de aceptación, que se define como número de apertura (NA), siendo éste la función de los índices de refracción de los elementos de la fibra óptica, núcleo y revestido (1).

El (NA) es una medida de la eficiencia para la transmisión de luz (7) por la fibra óptica y está dado por la ecuación 6 :

$$NA = n_1 \sin \Omega_{max} = n_1 \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \dots\dots\dots 6$$

donde:

- $n_1$  = índice de refracción del núcleo
- $n_2$  = índice de refracción del revestido
- $\Omega_{max}$  = máximo ángulo admisible
- $\theta_c$  = ángulo máximo de refracción total de la interfase núcleo-revestido

Como el (NA) es función de los índices de refracción se debe considerar el ángulo crítico ó ángulo de Brewster, ya que si el ángulo del rayo propagado dentro del núcleo es menor a 45.58', parte de la luz saldrá del núcleo produciendo pérdidas. En la figura 3, se observa que los ángulos están medidos desde la normal al rayo, por tanto si el ángulo del rayo propagado es de 90° será paralelo a la pared del núcleo y por ende permanecerá en su interior, con lo que se concluye que se requieren ángulos de propagación mayores a 45.58' para una adecuada reflexión total del rayo como lo muestra la figura 3 (79) (80).

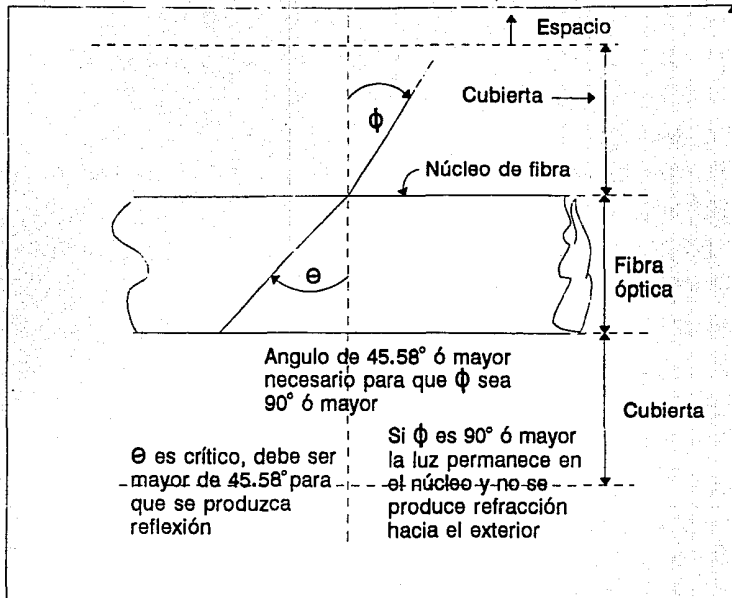


Figura 3. Angulo mínimo crítico ( 1 )

**3.3.- Amplitud de banda y/o dispersión de pulso.** La amplitud de banda en una fibra óptica se define como su capacidad para transmitir información.

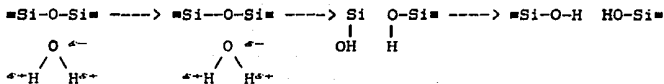
Un rayo luminoso conforme va pasando por la fibra óptica va ensanchándose, este fenómeno recibe el nombre de dispersión de pulso, y es función del índice de refracción y del diametro del núcleo de la fibra óptica.

Este parámetro determina la cantidad de potencia luminosa que se pierde en la fibra óptica por unidad de distancia ( dB/Km ) (81).

**3.4.- Tensión.** Es la propiedad que tienen las fibras ópticas para resistir las fracturas ó rupturas en su hiladura y posteriormente en su colocación para grandes distancias, y esta determinada por el tamaño y la geometría de la fibra óptica (82).

**3.5.- Fátiga estática.** En contraste a la tensión que se prevee en la fabricación y uso, la fatiga estática es influenciada por la fragilización de la fibra óptica debido a las condiciones ambientales que gradualmente la deterioran produciendo rupturas ó fracturas por corrosión (81).

La fragilización es producida normalmente por la presencia de agua en el medio ambiente, afectando las fuerzas de enlace de la sílica en la fibra óptica (83), según la reacción 1 (22):



Por tal motivo la vida útil de la fibra óptica, depende de la tensión aplicada y las condiciones ambientales (7).



## Capítulo IV

### 4.- Procesos de Manufactura de Fibras Ópticas

Los procesos de fabricación de fibras ópticas que existen en la actualidad, a nivel industrial se pueden dividir en dos grupos:

#### 4.1.- Por fundición directa

4.1.1.- Proceso de varilla en tubo

4.1.2.- Proceso del doble crisol

Este tipo de métodos permite la obtención directa de la fibra óptica. El diagrama de bloques 1a, muestra las etapas características para este tipo de procesos.

#### 4.2.- Por depósito de vapor químico

Estos métodos se usan para fabricar la preforma y los más representativos son:

4.3.- Depósito de vapor químico modificado ( MCVD )

4.4.- Depósito de vapor fase axial ( VAD )

4.5.- Depósito de vapor externo ( OVD )

4.6.- Depósito de vapor químico por plasma ( PCVD )

4.7.- Depósito de vapor químico modificado por plasma (PEMCVD)

El diagrama de bloques 1b, muestra las etapas características en estos métodos.

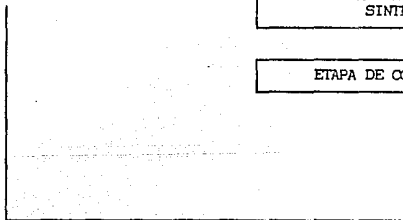
Diagrama de bloques de los Procesos de Producción de  
fibras ópticas.

1a

MATERIALES  
MULTICOMPONENTES Y PLÁSTICOS

FORMACIÓN DE NÚCLEO Y  
REVESTIDO (MEZCLAS DE POLVOS  
DE ULTRA PUREZA Y FUNDIDOS  
O POR EXTRUSIÓN PARA  
PLÁSTICOS)

PROCESOS DE FUNDICIÓN  
DIRECTA (OBTENCIÓN DE  
FIBRA ÓPTICA)



ETAPA DE HILADURA

CARACTERIZACIÓN ÓPTICA Y MECÁNICA

CABLEADO, EMPALME Y USOS

1b

MATERIALES  
LÍQUIDOS Y GASES DE ULTRA PUREZA

TRANSPORTE DE REACTIVOS  
(MEZCLAS DE MATERIAS PRIMAS)

PROCESOS DE DEPÓSITO DE  
PARTÍCULAS, LLAMADAS POLVO  
(OBTENCIÓN DE PREFORMA)

DESHIDRATACIÓN Y  
SINTERIZADO

ETAPA DE CONTRACCIÓN

#### 4.1.1.- Proceso de varilla en tubo (VT)

Este método como se muestra en la figura 4, es el más simple pero su uso está limitado a unas cuantas aplicaciones, en las que la calidad de la fibra óptica es de importancia secundaria (26) (22).

Este proceso requiere de la formación del núcleo y del revestido de manera independiente. Los reactivos que normalmente se utilizan son polvos multicomponentes y plásticos (20) (89), éstos últimos son colocados después de verificar su composición. Como los multicomponentes son polvos y pueden formar mezclas y los plásticos tienen también esta característica, es posible formar mezclas homogéneas de composición definida. La figura 5 muestra un aparato para ello.

A continuación se calienta la mezcla hasta fundirla, y se forma un líquido de alta viscosidad, entonces se introduce el extremo de una varilla de alta pureza para extraer la mezcla logrando de esta forma varillas sólidas que conformarán el núcleo y otras en forma de tubo hueco que formarán el revestido, ambas formas tienen composiciones definidas.

Posteriormente la varilla sólida se introduce en el tubo, y ambos son colocados dentro de una fuente calorífica para calentarlos a temperaturas entre 1000 - 1200°C, para efectuar la fusión del núcleo con el revestido, con lo cual se obtiene la fibra óptica. Como se observa en la figura 4.

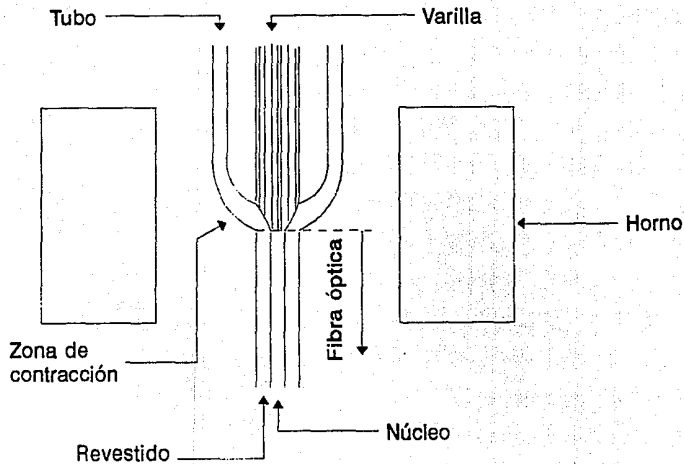


Figura 4. Ilustración del proceso de varilla en tubo ( 22 )

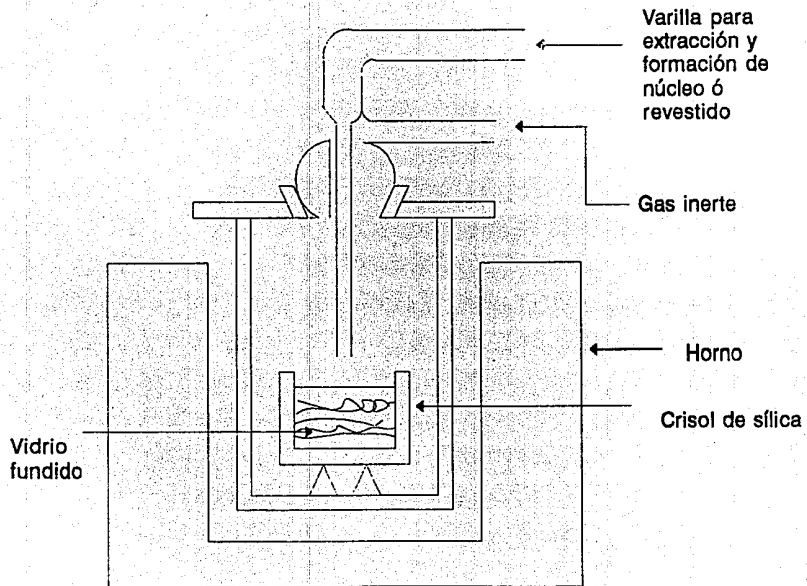


Figura 5. Esquema del aparato para formación del núcleo y revestido ( 89 )

La mayor desventaja en este método son las imperfecciones en el interior de la superficie del tubo y la superficie exterior del núcleo, lo cual da como resultado irregularidades en esa interfase que causan pérdidas en la transmisión debidas a la dispersión (86). Pero por otro lado ofrece una perspectiva de manufactura de fibras ópticas prometedora.

Tanaka y Suganama (87) (88), utilizando este proceso y materiales inorgánicos, lograron fibras ópticas con muy bajo valor de atenuación. Harrison (94) obtuvo los mismos resultados. Barbosa y Farias (166) utilizando la manufactura de preformas por medio del plasma de radio-frecuencia obtuvieron varillas y tubos para producir fibras ópticas de muy baja atenuación.

#### 4.1.2.- Proceso del doble-crisol (DC)

Este proceso es semejante al de varilla en tubo, como se puede apreciar en la figura 6. La técnica descrita en el proceso de varilla en tubo, se usa para formar el núcleo y el revestido, con la diferencia que estos elementos son varillas sólidas. En este procedimiento se usan dos crisoles, normalmente de platino de alta pureza, pero en algunas ocasiones se utilizan crisoles de materiales refractarios, que tienen orificios concéntricos en su parte inferior (90).

Una vez que se obtienen las varillas con las composiciones deseadas, éstas se introducen en los crisoles, la varilla que servirá de núcleo es colocada en el crisol central y la que servirá de revestido en el crisol circundante, como lo muestra la figura 6, (81).

El sistema del doble crisol está rodeado por una fuente calorífica, con la cual se obtienen temperaturas en el rango de 1100 - 1300°C, suficiente para fundir las varillas y hacer que fluyan por los orificios, efectuándose la fusión del núcleo y revestido a la salida de los crisoles, con lo que se obtiene la fibra óptica (81).

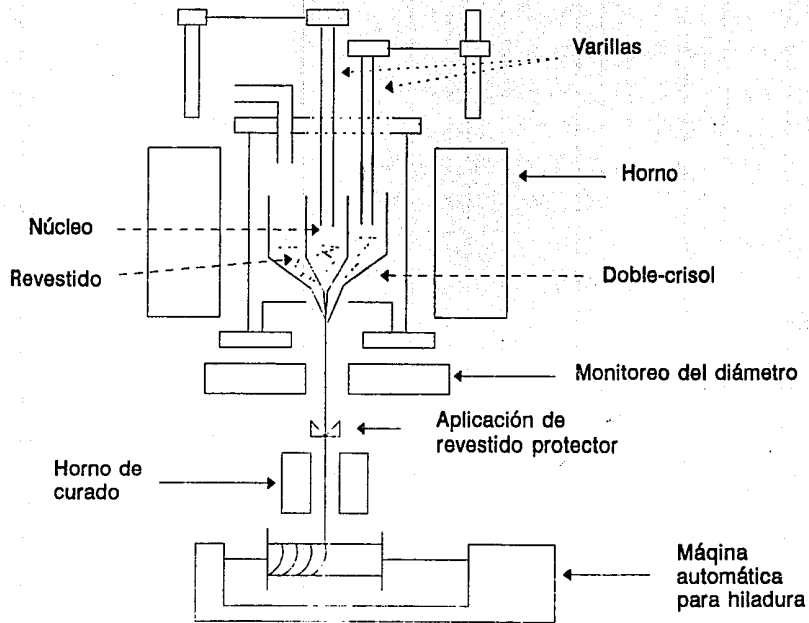


Figura 6. Proceso esquematizado del doble-crisol ( 24 )



A pesar del uso de materiales multicomponentes y plásticos (20) (89), de ultra pureza, la fibra óptica se ve seriamente contaminada por impurezas, lo que favorece que la atenuación aumente. Los requerimientos de alta pureza se ven afectados también por el tiempo de espera. Para ser procesada la materia prima a gran escala, requiere de 5 hrs aproximadamente, lo que trae como consecuencia que la materia prima este expuesta durante largo tiempo a las condiciones ambientales que producen alteraciones en sus especificaciones de pureza originales (92).

Si a esto, se agrega la dificultad de distribución homogénea en la interfase del núcleo y revestido que ocasiona una difusión defectuosa en las fibras ópticas, la utilización de este método a nivel industrial es limitada (91) (90).

Ishikawa (93), realizó experimentos para mejorar el proceso resguardando la materia prima en lugares de extrema limpieza, debiendo dar mantenimiento al equipo utilizado en el proceso cada dos meses para eliminar cualquier impureza que pudiera existir en dicho equipo, haciendo énfasis en la limpieza de los crisoles, donde él descubre existen las mayores impurezas durante el proceso (89) (93).

## 4.2.- Depósito de vapor químico

### 4.2.1.- Principios Generales

Este método utiliza reactivos en estado gaseoso para formar sólidos, a través de películas muy finas. El uso de distintos gases para el depósito físico de las películas finas imparte una versatilidad a esta técnica de depósito.

Las reacciones fundamentales en el CVD ( chemical vapor deposition ), ocurren tanto en la fase gaseosa como en la superficie del sustrato, tubo, en el caso de fabricación de fibras ópticas. La energía requerida para las reacciones se obtiene por calentamiento del sustrato ó por calentamiento previo de los gases. Alternativamente se utilizan fuentes de luz ultravioleta, láseres, así como también energía electrónica en procesos que utilizan plasma y que se utilizan para lograr depósitos a temperaturas bajas.

Para la producción de películas finas se usan diferentes procesos de depósito basados en reacciones de pirólisis, reducción, oxidación e hidrólisis de los reactantes (95).

#### 4.2.2.- Proceso del CVD

El proceso del CVD. debe producir películas finas reproducibles y propiedades controladas. incluyendo pureza, composición. variedad en el grosor de las películas, adhesión. y estructura cristalina. La rapidez de crecimiento debe ser adecuada y el depósito no debe tener una influencia significativa en las microestructuras formadas en el sustrato. El tiempo de depósito debe ser corto y la temperatura lo suficientemente baja para que el sólido formado no interfiera en los resultados de etapas subsecuentes en el proceso (149).

Los límites aceptables en las propiedades de las películas varía con la aplicación, pero las demandas en sus características de cableado son críticas para algunas aplicaciones como en microelectrónica. El grosor de las películas es de gran importancia y deben ser igual en todas para evitar variaciones en las concentraciones de las películas.

La pureza de los reactivos es de alta relevancia, ya que de ella depende el que no se incorporen impurezas durante el crecimiento de las películas (148).

#### 4.2.3.- Fundamentos

El depósito de vapor químico de películas finas involucra reacciones en fase gaseosa y de adsorción, combinadas con un proceso de transporte, que se esquematiza en la figura 7 (149). Y comprenden las siguientes etapas:

1.- Transporte de masa de la región del flujo a la zona de depósito.

2.- Reacciones en la fase gaseosa para la formación de películas precursoras y de subproductos.

3.- Transporte de masa de los precursores de las películas a la superficie de crecimiento.

4.- Adsorción de precursores por las películas en la superficie de crecimiento.

5.- Difusión superficial de los precursores en los sitios de crecimiento.

6.- Incorporación de constituyentes dentro de las películas de crecimiento ( islas ).

7.- Desorción de productos secundarios de reacciones en la superficie.

8.- Transporte de masa de los productos secundarios en la región del flujo gaseoso hacia la salida de la zona de depósito.

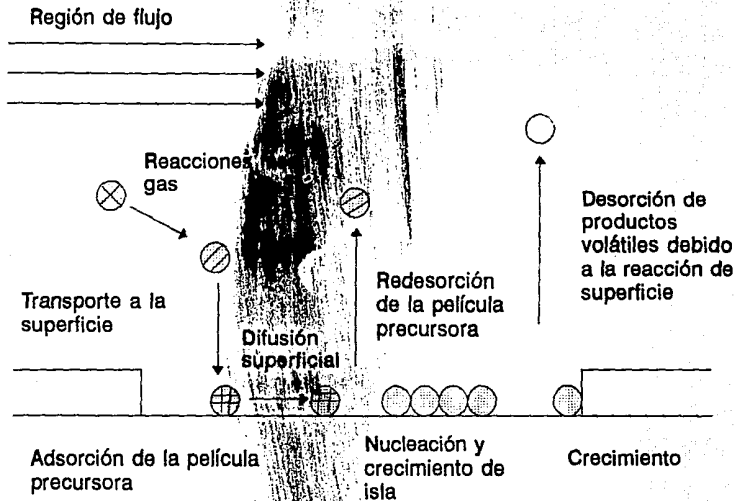


Figura 7. Esquema del transporte y reacción en el proceso CVD ( 149 )

Secuencias de reacción similares han sido identificadas en otros sistemas de reacción química, especialmente combustión catalítica (150) (151); del combustible (152); transporte y reacción a alta temperatura con lámparas incandescentes (153) y catálisis heterogénea (154).

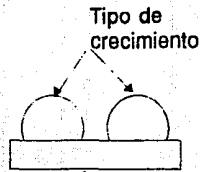
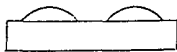
Sin embargo, las reacciones elementales en la combustión de hidrocarburos, son mejor conocidas en sus mecanismos que las reacciones en fase gas que se producen en el CVD. Los mecanismos de reacción superficial en la catálisis de hidrocarburos son más conocidos que las reacciones de superficie. El método CVD es de amplio uso en obtención de materiales de uso electrónico.

#### 4.2.4.- Nucleación y modos de crecimiento

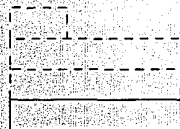
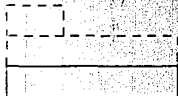
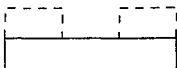
Existen tres modos de crecimiento primario para películas, como lo muestra la figura 8, (155).

4.2.4.1.- Crecimiento en forma de isla tridimensional. Pequeños grupos son nucleados directamente en la superficie del sustrato. Los grupos crecen entre las islas de la película que eventualmente prevén la forma de una película continua. Este modo de crecimiento se efectúa cuando en la película los átomos están ligados fuertemente unos con otros con respecto al sustrato (156) (157).

a ) Crecimiento en forma de isla-tridimensional



b ) Crecimiento en forma de capa a capa



c ) Crecimiento en forma de capa-isla

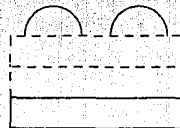
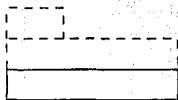
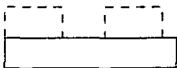


Figura 8. Tipos de crecimiento propuestos ( 149 )

4.2.4.2.- Crecimiento película-a-película en dos dimensiones. Ocurre cuando en la película los átomos no están tan fuertemente ligados unos con otros con respecto al sustrato (155) (158).

4.2.4.3.- Crecimiento de película-isla, es una combinación de los dos modos anteriores de crecimiento. Después del crecimiento de varias mono-películas, subsecuentemente el crecimiento es desfavorable, y las islas se forman sobre las mono-películas iniciales.

Esta transición de crecimiento de dos dimensiones a tridimensional, no es aún entendida claramente. Este modo de crecimiento ocurre muy frecuentemente en los materiales conocidos como superredes (159) (160).

La temperatura durante el crecimiento influye fuertemente en la estructura de la película.

A baja temperatura y alta rapidez de crecimiento, la difusión es relativamente lenta para lograr películas precursoras (168). En esta situación la molécula precursora de absorción esta probablemente interactuando con factores desconocidos a nivel molecular antes de tener la oportunidad para difundirse en la superficie y así poder formar la película precursora (169).



A alta temperatura y baja rapidez de crecimiento la difusión es relativamente rápida.

La adsorción de las especies puede entonces variar la rapidez de crecimiento (170).

A temperatura media y rapidez media de crecimiento la nucleación ocurre en distintos puntos de la superficie, las especies adsorbidas y difundidas en islas, las cuales crecen y previenen una película de forma policristalina (161) (171).

La teoría clásica de nucleación es descrita en términos del cambio de energía libre de Gibbs, incluyendo la formación del núcleo y del cambio de energía necesario para incrementar el área superficial del llamado grupo. El balance entre esos términos conduce a un tamaño crítico de grupo (L) bajo el cual el grupo continuará creciendo.

El valor crítico está relacionado con la tensión superficial ( $\beta$ ), volumen atómico ( $V$ ) y la supersaturación ( $p/p_{\infty}$ ) (161) de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$L = \frac{2 \beta V}{k T \ln (p/p_{\infty})} \dots\dots\dots 7$$

Para la mayoría de las reacciones en el CVD, la supersaturación es tan alta que los valores calculados de L son del orden de dimensiones atómicas.

Para estas reacciones, la teoría clásica no es explícita y los tratamientos atómicos detallados deben ser considerados, porque el interés fundamental de la nucleación y su aplicación para películas muy finas influyen en el modelo de adsorción y de difusión superficial, los cuales son detallados en la literatura (96) (97) (98) (99) (100).

#### 4.2.5.- Equilibrio químico

Si bien el CVD es un proceso de equilibrio no controlado por la cinética química y fenómenos de transporte. El análisis de este equilibrio es útil para comprender el proceso. Las reacciones químicas y el equilibrio en la fase determinan la factibilidad para un proceso particular y su estado final (95).

#### 4.2.6.- Equilibrio químico de la fase gaseosa

Las temperaturas de operación en el CVD son altas y los flujos molares y rapidez de depósito son generalmente bajos en condiciones cercanas al equilibrio.

Por lo que la composición en este punto es calculada normalmente por alguna de las dos opciones siguientes: 1) minimización de la energía libre de Gibbs del sistema propuesto para distribución elemental y número de moles homogéneo. 2) Transformación de las especies en número de moles variables dentro de un nuevo establecimiento de variables en reacción extendida para minimizar la energía libre de Gibbs en términos de esas nuevas variables (101) (102), por que la relativa facilidad de determinación del sistema por cálculos al equilibrio en experimentos ó modelos cinéticos y/ó análisis químico han sido el tradicional acceso en el modelo del proceso en el CVD (103).

#### 4.2.7.- Equilibrio químico de la fase solida

Para el crecimiento de películas por multicomponentes la composición de la película solida debe ser precedida de la composición en la fase gas.

En general, esta predicción requiere información detallada acerca de la composición del flujo alimentado y porcentajes individuales de las especies incorporadas en la superficie, pero los datos cinéticos necesarios son raramente los precisos.

Por otro lado, el análisis al equilibrio sólo requiere datos termodinámicos. En el análisis la fase gas es considerada como mezcla ideal, así:

$$\mu_i(p) = \mu_i(p_i^o) + RT \ln (p_i/p_i^o) \dots\dots\dots 8$$

donde  $\mu_i$  y  $p_i$  son el potencial químico y la presión parcial, respectivamente de los componentes  $i$ ,  $R$  es la constante de los gases y  $T$  es la temperatura en grados Kelvin. Los subíndices superiores  $g$  y  $o$  se refieren al estado gaseoso y al estado estándar, respectivamente (95).

Dos modelos frecuentemente utilizados para predecir los coeficientes de actividad del sólido son: el modelo de volúmenes regulares (104) y el DLP (parámetro de rejilla delta) (105). Con ambos modelos el coeficiente de actividad del componente  $i$ ,  $\beta_i$  es calculado en términos de parámetros de iteración  $\Omega$ , por medio de la ecuación:

$$\ln \beta_i = (1 - x_i)^2 \Omega / RT \dots\dots\dots 9$$

donde  $x_i$  es la fracción mol del componente  $i$  en la fase sólida.

El potencial químico del componente i en la fase sólida

$$\mu_i^{(s)} = \mu_i^{(s)0} + RT \ln (x_i \Gamma_i) \dots\dots\dots 10$$

El parámetro iterativo  $\Omega$ , es conveniente en la solución del modelo que puede ser obtenido en el equilibrio líquido-sólido (104).

Con el modelo DLP, la iteración de n será calculada por los parámetros de rejilla para mezclas binarias.

El análisis termodinámico es una herramienta útil para comprender el proceso CVD, pero debe ser usado con precaución y mucha atención con los fundamentos apropiados para su aplicación, ya que como este proceso no tiende al equilibrio, las predicciones termodinámicas frecuentemente sólo son semicuantitativas y normalmente sirven para preveer compresión dentro del proceso (95).

#### 4.2.8.- Reacción química, mecanismos y cinética

La química en el CVD es compleja, involucrando reacciones en fase gaseosa y en la superficie. La función de las reacciones en la fase gas es la expanderse al incrementar la temperatura y la presión parcial de los reactivos.

A altas concentraciones de reactivos, las reacciones en la fase gas pueden eventualmente guiar la nucleación y provocar el crecimiento de una película fina.

Al producir películas precursoras por las reacciones en la fase gas, éstas pueden verse influenciadas por especies que son potencialmente fuentes de impurezas (106).

Tradicionalmente los datos de reacción en el CVD son reportados de términos de rapidez de crecimiento y su dependencia en función de la temperatura. Los datos son muchas veces confundidos con los efectos de transferencia de masa por lo cual no son apropiados para su análisis que conllevará a su aplicación.

Además, los datos de reacción en el proceso del CVD causan un poco de confusión, si cualquier impureza esta presente durante su evaluación ó estudio. Por consiguiente, el reemplazo de los estudios tradicionales de depósito macroscópico por investigaciones mecánicas más profundas y detalladas de la reacción en el CVD es una área de fundamental importancia (95).

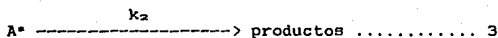
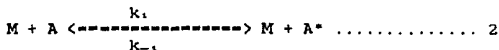
#### 4.2.9.- Rapidez de reacción de la fase gaseosa

La rapidez de reacción en el proceso CVD sólo ha sido investigada para un reducido número de reacciones.

A causa de las altas temperaturas y presiones bajas usadas en este proceso, el uso de las constantes de rapidez reportadas debe ser usadas con mucha precaución.

Además, la transferencia de masa y los efectos en la pared del tubo, así como la presión del proceso son factores que influyen en la rapidez de reacción, siendo esta presión la que influye más significativamente.

La activación colisional, desactivación y descomposición fundamental de esas reacciones puede ser resumida cualitativamente (107), por las siguientes reacciones:



donde A representa al reactivo y M es la colisión asociada, incluyendo A.

Un estado meta-estable supuesto para la molécula energizada A\* por Lindemann-Hinshelwood (95), permite obtener la siguiente ecuación para calcular la velocidad de reacción:

$$-\frac{dp_A}{dt} = \left[ \frac{k_1 k_2 p_M}{k_1 + k_{-1} p_M} \right] p_A \dots\dots\dots 11$$

donde  $p_A$  es la presión del reactante A,  $p_M$  es la presión total,  $k$  es la constante de velocidad y  $t$  es el tiempo.

Existen algunas teorías propuestas (108), para predecir las especies intermediarias, pero de aplicación común es la teoría RRKM ( Rice-Ramsherger-Kasel-Marcus ) (107) (109) (110).

#### 4.2.10- Reacción en la superficie, mecanismo y cinética

Del mismo modo que para las reacciones en fase gas, la más estudiada reacción de superficie es el crecimiento del Si sobre sustratos de Si por medio de silanos, los mejores resultados son los obtenidos por Jasinski (111).

#### 4.2.11.- Fenómenos de transporte en el proceso CVD

Como en otros sistemas de reacción química, como combustión y catálisis heterogénea, el proceso de transporte empleado durante el CVD puede ser caracterizado por grupos de parámetros dimensionales que surgen de las ecuaciones que gobiernan al transporte.

En las tablas 10 y 11, se presentan un grupo de estas ecuaciones y su interpretación física así como el orden típico de magnitud en el proceso. Su dependencia con la temperatura y la importancia de los fenómenos de transporte han sido discutidos en términos generales por Rosenberger (112), para el CVD.



Tabla 10. Grupos Dimensionales en las Ecuaciones  
Modelo del CVD (168).

Número	Nombre	Definición
1	Knudsen	$Kn = \frac{\delta}{L}$
2	Mach	$Ma = \frac{\langle v \rangle}{U_{cr}}$
3	Prandtl	$Pr = \frac{\sigma}{\alpha}$
4	Schmidt	$Sc = \frac{\sigma}{D}$
5	Reynolds	$Re = \frac{\langle v \rangle L}{\sigma}$
6	Peclet (térmico)	$Pe_{th} = RePr$
7	Peclet (mésico)	$Pe_m = ReSc$
8	Grashof (térmico)	$Gr_t = \frac{g\beta_c L^3 (\Delta T)}{\sigma^{1/2}}$
9	Grashof (de solución)	$Gr_c = \frac{g\beta_c L^3 (\Delta c)}{\sigma^{1/2}}$
10	Rayleigh (térmico)	$Ra_t = Gr_t Pr$
11	Rayleigh (de solución)	$Ra_c = Gr_c Sc$
12	Dámkohler (fase gas)	$Da_g = \frac{R(C; T)_{cr} L}{C_{cr} \langle v \rangle}$
13	Dámkohler (superficie)	$Da_s = \frac{R(C; T)_{cr} L}{C_{cr} D}$

Tabla 11. Grupos Dimensionales en las Ecuaciones  
Modelo del CVD (168).

Número	Interpretación Física	Orden Típico de Magnitud
1	medio libre / longitud característica	$\leq 1$
2	velocidad lineal / velocidad del sonido	$< 10^{-2}$
3	difusividad de momentum / difusividad térmica	0.7
4	difusividad de momentum / difusividad térmica	1 - 10
5	flujo de momentum por convección / flujo de momentum por difusión	$10^{-1} - 10^2$
6	flujo térmico por convección / flujo térmico por difusión	$10^{-1} - 10^2$
7	flujo de masa por convección / flujo de masa por difusión	$10^{-1} - 10^2$
8	fuerza / viscosidad	1 - $10^2$
9	fuerza / viscosidad	1 - $10^2$
10	fuerza / viscosidad	1 - $10^2$
11	fuerza / viscosidad	1 - $10^2$
12	tiempo característico para fluir / tiempo característico para reacción en la fase gas	$10^{-2} - 10^2$
13	tiempo característico para difusión en la superficie / tiempo característico para la reacción en la superficie	$10^{-2} - 10^2$

#### 4.2.12.- Proceso de depósito de vapor químico (CVD) aplicado a fibras ópticas.

Este proceso fué desarrollado por Corning Glass Works (15) y se esquematiza en la figura 9. Las materias primas utilizadas son  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{GeCl}_4$ ,  $\text{POCl}_3$ ,  $\text{BCl}_3$ , etc. grado ultra-alta-pureza. lo que permite la obtención de una preforma, que se puede definir como una fibra óptica de dimensiones variables e impura y que posteriormente se transformara en una fibra óptica (18).

La figura 10. presenta un sistema estándar de transporte y control de alimentación de los reactivos, conocido como burbujeador.

Este burbujeador tiene un controlador de flujo de masa (MFC) que asegura un control estricto en los flujos del sistema.

El flujo de oxígeno es burbujeador en los recipientes, donde se encuentran los reactivos en estado líquido, que se logra por medio de un sistema criogénico para evitar su evaporación debido a sus altas presiones de vapor. Con ello se favorece la formación de una mezcla de gases, reactivos y oxígeno, la cual es enviada a la fuente calorífica, que comúnmente es un soplete ó quemador.

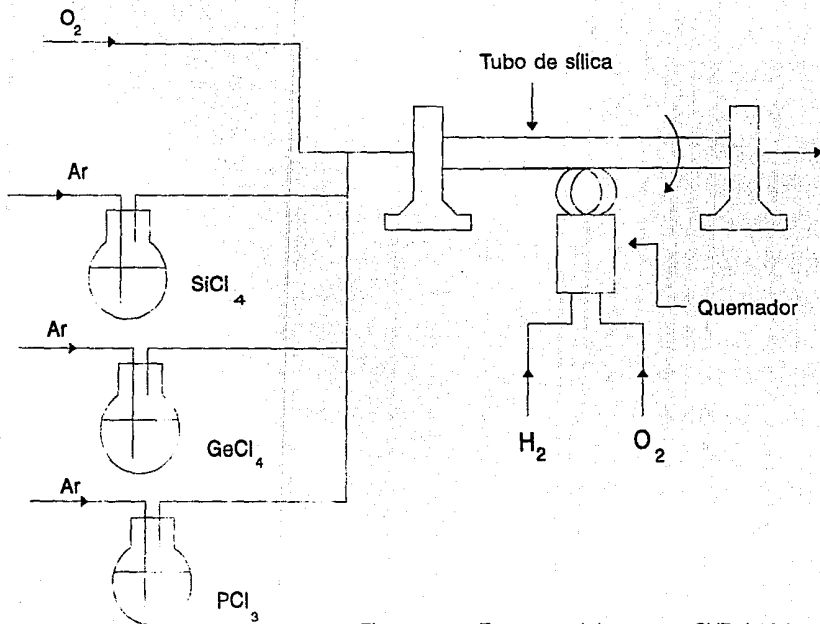


Figura 9. Esquema del proceso CVD ( 18 )

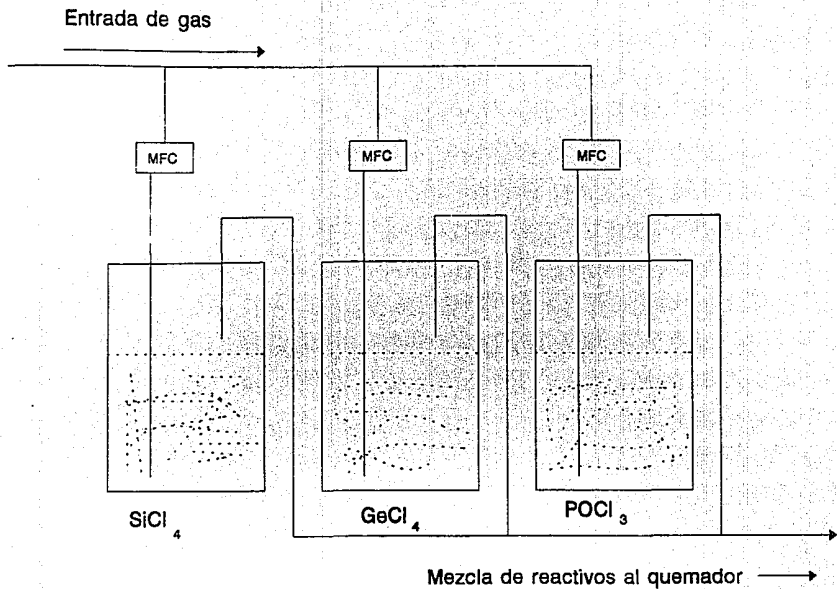


Figura 10. Diagrama esquemático de un sistema de burbujeo ( 19 )

En la etapa de transporte de reactivos, los parámetros relevantes a considerar son:

1.- La elección del gas a ser burbujeado. La sustancia a emplear debe favorecer la vaporización de los reactivos y existen dos posibilidades. Una es la utilización de oxígeno que requiere de flujos volumétricos pequeños. La segunda consiste en el empleo de gases inertes, como argón, helio, nitrógeno, etc. Esta opción es aplicable por posibles reacciones o probable corrosión del equipo por el oxígeno.

2.- El control del flujo del gas ( cantidad de masa ó relación presión-volumen ) alimentado al recipiente.

3.- Un estricto control de temperatura en el burbujeador, normalmente los burbujeadores tienen una temperatura menor a 5°C por encima de la temperatura ambiente para mejorar su control. El rango de temperaturas de operación está comprendido en los 30 - 50°C, típicamente.

4.- Control de saturación, es particularmente importante puesto que la cantidad del flujo de reactivos está controlada por el flujo de gas burbujeado.

En la actualidad los burbujeadores tienen un tubo insertado cerca del fondo a través del cual se hace pasar al gas, asegurando un flujo de mezcla del reactante y oxígeno. Existe una alternativa, si la saturación no es satisfactoria, se propone el empleo de columnas de saturación que se colocan encima de los burbujeadores obteniéndose una saturación óptima (21).

Para efectuar el depósito de finas películas se utiliza un tubo, comúnmente de sílica, con diámetro interior de 17 mm y diámetro exterior de 20 mm. Además servirá posteriormente como revestido, conectado al sistema de alimentación y calentado por el soplete que utiliza como combustible una mezcla de oxígeno e hidrógeno, formando una zona caliente en el interior del tubo. Esta zona caliente, por la posición del soplete que esta en un punto determinado en la longitud del tubo, pero el flujo de vapores reactivos pasaran a lo largo del interior del tubo, esto es entran a la zona caliente, produciéndose las reacciones de oxidación y formándose pequeñísimas partículas de óxidos como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , etc., llamados polvo (114).

Como el soplete se mueve transversalmente y es el que induce la zona caliente, y tomando en cuenta que el flujo de reactivos se mueve a lo largo del tubo, el depósito del polvo es a lo largo de la pared del tubo, como lo muestra la figura 11, formándose una fina película amorfa.

Como consecuencia del movimiento transversal del soplete y por ende de la zona caliente, la película amorfa es sinterizada, es decir, adquiere una estructura cristalina, transparente y homogénea como se esquematiza en la figura 11 (114) (115).

Después de que se ha efectuado el depósito del número de películas deseado, el sistema de alimentación es cerrado y la temperatura del tubo se incrementa por medio del aumento en el combustible que fluye hacia el soplete, efectuándose así una contracción del tubo, lo que produce una varilla sólida que se llama preforma, y que será utilizada para obtener la fibra óptica, en la etapa del proceso denominada hiladura que será posteriormente descrita (113).

Este proceso tiene eficiencias entre 20 - 30 %, y altos costos (19). En experimentos efectuados por Komura y Takenchi (113) utilizando materiales inorgánicos han reportado notables avances en la disminución del valor de la atenuación en las fibras ópticas producidas por este método aunando a ello un importante incremento del 60-70% en la eficiencia.



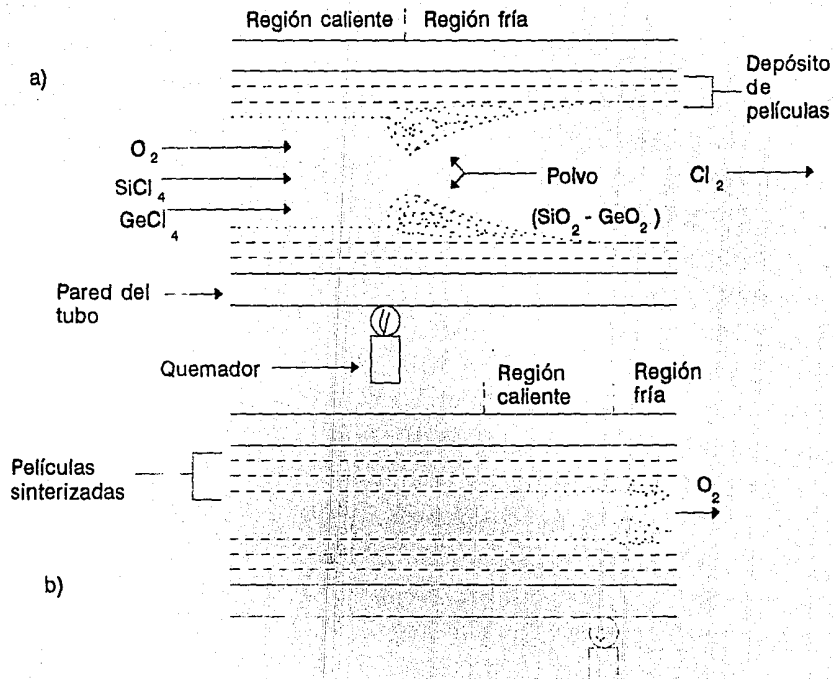


Figura 11. a) depósito y b) sinterización ( 114 )

#### 4.3.- Proceso de depósito de vapor químico modificado ( MCVD )

4.3.1.- Descripción. Este método es más completo que el CVD. Si bien está basado en los principios de este último, la función del proceso ha sido mejorada. La figura 12, muestra esquemáticamente el proceso del MCVD (19).

Cuenta con un sistema de alimentación, como el detallado en el CVD, los reactivos usados son:  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{POCl}_3$ , etc., y forma finas películas sobre la superficie de un sustrato.

El sustrato ó tubo, que normalmente se usa, es de sílica, con un diámetro exterior de 25 mm y paredes de un grosor de 3 mm. que es cuidadosamente tratado con una solución ácida, (mezclas de  $\text{HNO}_3$  y  $\text{HCl}$ ) para limpiar cualquier impureza de grasa presente en su superficie interior y exterior (116).

Una vez limpio el sustrato se coloca entre los cabezales de un torno especial para esta función, como se ve en la figura 12, una vez conectado herméticamente, el tubo tendrá una rotación concéntrica, con respecto al eje rotacional de los cabezales y éstos se conectan por un extremo al sistema de alimentación de los reactivos y por el otro se conecta a un sistema de desfogue (118). Este arreglo provee condiciones ambientales estables para la realización de las reacciones químicas a efectuarse (117).

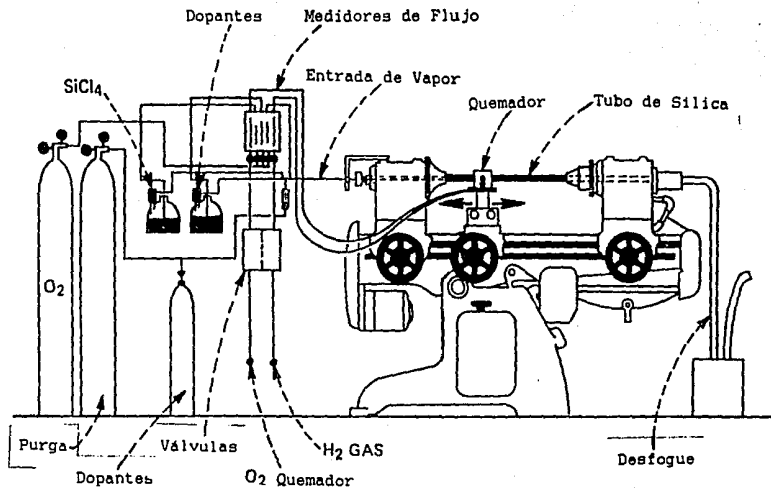
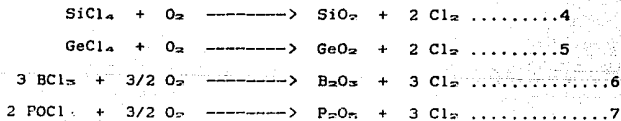


Figura 12. Proceso de Depósito de Vapor Modificado (118)

El tubo, que servirá para el revestido, es calentado a 1800°C por medio de una fuente calorífica, que casi siempre es un soplete ó quemador y que utiliza como combustible, una mezcla de oxígeno e hidrógeno. El soplete se mueve transversalmente a lo largo del tubo, con lo que se eliminan impurezas y burbujas en el área exterior del tubo (119). Al mismo tiempo favorece el calentamiento interior para mejorar el rendimiento de las reacciones que se efectúan.

El flujo de reactivos en estado gaseoso se alimenta al tubo y entran a una zona caliente, con temperaturas en el intervalo de 1300 - 1500 °C, que produce las reacciones, homogénea (fase gas) y heterogénea (fase gas y sólida). Las reacciones homogéneas que se proponen (90) son:



La reacción heterogénea produce una fina película de partículas que se deposita sobre la superficie del tubo, como lo muestra la figura 13.

La reacción homogénea es una oxidación que produce las partículas que se denominan polvo.

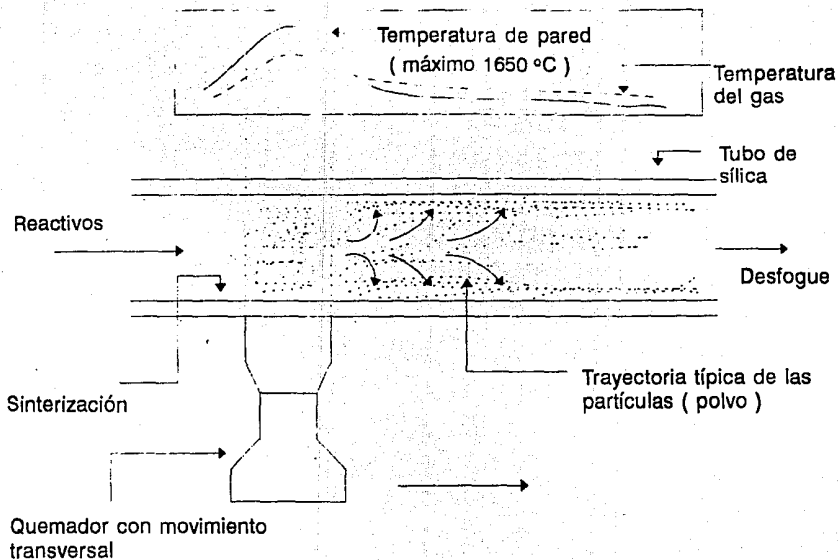


Figura 13. Ilustración del depósito con temperaturas en el proceso MCVD ( 32 )

Este polvo fluye en dirección radial a lo largo del tubo formando una fina película porosa inducida por la diferencia de temperaturas entre el centro del tubo y la pared, como lo muestra la figura 13. La película porosa se sinteriza por medio del soplete durante su movimiento transversal. La temperatura del soplete se incrementa hasta 1600°C. El polvo no sinterizado y los gases de reacciones secundarias son eliminados por el sistema de desfogue en el otro extremo del tubo (118).

Esta forma de depósito de película tras película se repite hasta que se alcanza el número adecuado de películas que formarán el núcleo, que normalmente varía entre 50 - 100 películas (117).

4.3.2.- Sinterización. Esta etapa es muy importante, ya que en esta etapa el polvo depositado que forma la capa porosa adquiere por calentamiento una estructura homogénea, cristalina y transparente, con lo que se asegura que podrá guiar los rayos de luz eficientemente (120). Además de esta forma se logra que el número de películas depositadas tengan las mismas propiedades durante todo el proceso (121).

La sinterización se explica por medio de un mecanismo de consolidación.

La rapidez de consolidación ha mostrado ser inversamente proporcional al número capilar C (12) y está dada por:

$$C = \frac{\phi f (1 - \epsilon)}{\sigma t..} \dots\dots\dots 12$$

donde:

- $\phi$  = viscosidad del vidrio
- $f$  = tamaño de las regiones anulares iniciales
- $\sigma$  = tensión superficial del tubo
- $\epsilon$  = fracción anular inicial, dada por:

$$\epsilon = 1 - \frac{\phi}{\phi_{..}} \dots\dots\dots 13$$

donde:

- $\phi_{..}$  = densidad de la fase sólida
- $\phi$  = densidad total

$t..$  = tiempo de sinterización característico, dado por:

$$t.. = \frac{L_{..}}{W} \dots\dots\dots 14$$

donde:

- $L_{..}$  = longitud de la zona caliente
- $W$  = velocidad transversal del soplete

La velocidad de sinterización es sensible a la temperatura y a la composición en las películas, debido a la fuerte dependencia de la viscosidad del vidrio sobre estas variables y también en las propiedades térmicas del gas (117).

Los estados iniciales de la consolidación proceden por la formación y crecimiento de las partículas adjuntas, donde el radio de curvatura es pequeño y por tanto la densificación resulta en redes, las cuales crecen lentamente formando a la película de vidrio cristalina (19).

La formación irregular de los poros en la consolidación demuestra que la difusión del gas sobre ellos es muy rápida en comparación al transporte del vidrio mientras los poros se contraen.

La formación de burbujas en esta etapa puede ser resultante de la consolidación incompleta o temperaturas excesivas de operación. En ambos casos las burbujas causan degradación en las fibras ópticas obtenidas de preformas con alto índice de burbujas (117).

La sensibilidad para la formación de burbujas esta en función del material, en el tamaño de poro y de la temperatura. Por consiguiente, la consolidación requiere una optimización de las condiciones de operación en los regímenes anulares donde se propone que ocurre la formación de las burbujas. Esta formación limita la temperatura del proceso, sin embargo se ha logrado incrementar el tiempo de sinterizado utilizando una zona de calentamiento amplia (19).



4.3.3.- Contracción. Después de lograr el depósito de películas. el flujo de alimentación se cierra. y sólo un pequeño flujo de oxígeno se introduce con el fin de arrastrar los vapores y polvo residual que pudieran estar aún presentes dentro del tubo. enseguida se cierran tanto el sistema de desfogue como el pequeño flujo de oxígeno, con lo cual se conserva una presión baja dentro del tubo. La temperatura se incrementa aproximadamente hasta 1900°C en el tubo disminuyendo la velocidad transversal del soplete y aumentando el flujo de combustible, con esto se logra que la viscosidad del tubo decrezca y su tensión superficial disminuya logrando una contracción en las dimensiones del tubo y produciendo una varilla sólida. resultado de la cohesión del tubo (revestido) y las películas (núcleo) y que se denomina preforma como se muestra en la figura 14 (122).

La etapa de contracción en el proceso MCVD, tiene las siguientes implicaciones prácticas:

La velocidad de contracción afecta directamente la formación de la preforma y esto repercute en el costo del proceso. La estabilidad en esta etapa afecta también el diseño dimensional de la fibra óptica. Además, la alta temperatura influye sobre el perfil del índice de refracción en el centro de la fibra óptica debido a la vaporización de componentes tales como  $GeO_2$  ó  $P_2O_5$ ; y por tanto resulta en una degradación en la amplitud de banda de la fibra (123).

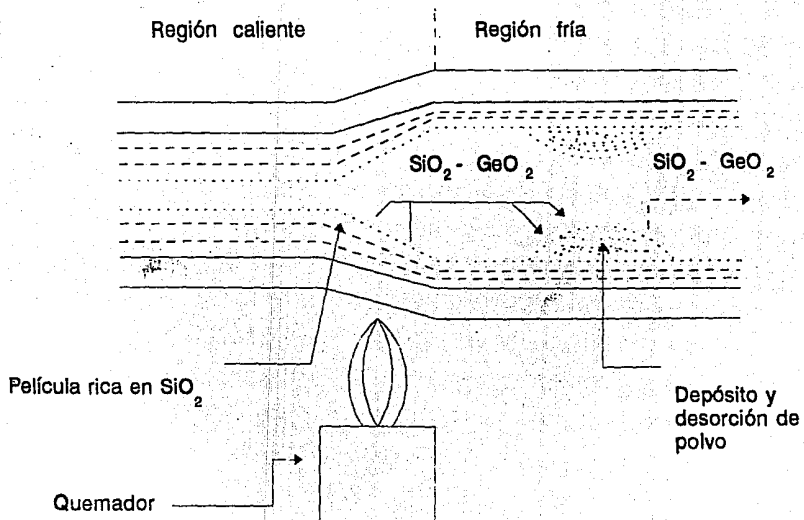


Figura 14. Etapa de contracción durante el proceso MCVD ( 32 )

Lewis (124) y Kirchoff (125) realizaron estudios referentes a la etapa de contracción, encontrando que la velocidad está relacionada con la viscosidad de los materiales que forman el núcleo y revestido, las dimensiones del tubo, la tensión superficial de los materiales y la diferencia de presión en el interior y exterior del tubo (126).

La velocidad de contracción  $R_n$  es aproximadamente proporcional a:

$$Re \propto \frac{p_i - p_e + (\sigma / R_{in}) + (\sigma / R_{out})}{\theta (T, C, t)} \dots\dots\dots 15$$

donde:

- $p_i$  = presión interna del tubo
- $p_e$  = presión externa del tubo debido al soplete
- $\sigma$  = tensión superficial del vidrio
- $R_{in}$  = diámetro interno del tubo
- $R_{out}$  = diámetro externo del tubo
- $\theta$  = viscosidad como función de la temperatura T, de la composición C, y del tiempo t

#### 4.3.4.- Control del proceso MCVD

La optimización en el proceso MCVD en la manufactura de fibras ópticas, requiere de un control adecuado. Para ello, Runk (127) propone monitorear los siguientes parámetros de control:

#### a) Geometría

- 1.- Geometría del tubo considerando grosor, ovalidad y tamaño.
- 2.- Distribución ó arreglo óptimo del equipo.
- 3.- Eliminación de la posible tensión del tubo.
- 4.- Efectos de expansión térmica.
- 5.- Variaciones de temperatura.
- 6.- Alineamiento y funcionamiento de la fuente calorífica.

#### b) Óptica

- 1.- Pureza de la película precursora.
- 2.- Utilización de dopantes ( tipo y cantidad ).
- 3.- Variación del perfil del índice de refracción debido a los dopantes.
- 4.- Velocidad de depósito.
- 5.- Relación tubo / interfase de depósito.
- 6.- Estado final de la preforma.

#### c) Mecánica

- 1.- Calidad del tubo.
- 2.- Manejo del tubo, ya como preforma.
- 3.- Condiciones ambientales durante el proceso.

El proceso MCVD ofrece una alternativa en la obtención de fibras ópticas con especificaciones adecuadas para telecomunicaciones, ya que permite obtener fibras de grado de ultra-alta-pureza y mínima atenuación. El calentamiento previo, de la mezcla de reactivos aumenta la velocidad de depósito, produciendo una mayor eficiencia aproximadamente del 80% (128).

Los parámetros típicos de este proceso se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Parámetros típicos del proceso MCVC (19)	
Número de apertura	
típico	0.23
máximo reportado	0.38
Rapidez de depósito ( g/min )	
típico	0.35 - 0.5
máximo reportado	1.3
Eficiencia	50%
Máxima longitud reportada ( Km )	40
Amplitud de banda ( GHz-Km )	5
ppb OH ( mínima reportada )	3

#### 4.4.- Proceso de depósito de vapor químico en fase-axial ( VAD )

4.4.1.- Operación. Este método del VAD (17), se desarrollo basado en los fundamentos del MCVD, y permite mejorar la calidad del producto, así como también reducir el número de etapas en la fabricación de preformas. La figura 15, describe este proceso (17) (138).

El VAD se compone de etapas similares al MCVD. El sistema de alimentación es semejante, sin embargo, existe una separación de los flujos. El flujo de reactivos que se usará para el núcleo y el que se usará como revestido, se alimentan a dos distintos sopletes ó quemadores (134). Las reacciones de pirólisis, ocurren a temperaturas en el rango de 1300 - 1500°C, lo que producirá el polvo que formará el depósito en el extremo de una varilla, que se coloca en forma vertical y dentro de una cámara cerrada y conectada hermeticamente a los quemadores y que gira sobre su eje en forma continua durante el proceso (17), como se muestra en la figura 16 (26).

El primer quemador producirá el polvo para el núcleo, como un depósito amorfo. El segundo realiza el depósito del polvo que formará el revestido sobre la película amorfa, como se ve en la figura 17 (27).

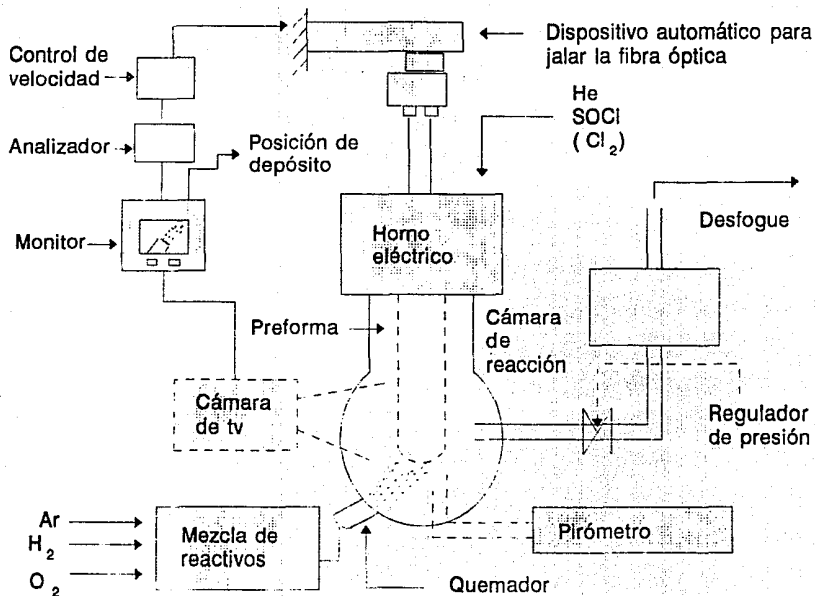


Figura 15. Esquema representativo del proceso VAD ( 117 )

Preforma transparente

Horno de carbón

Preforma porosa

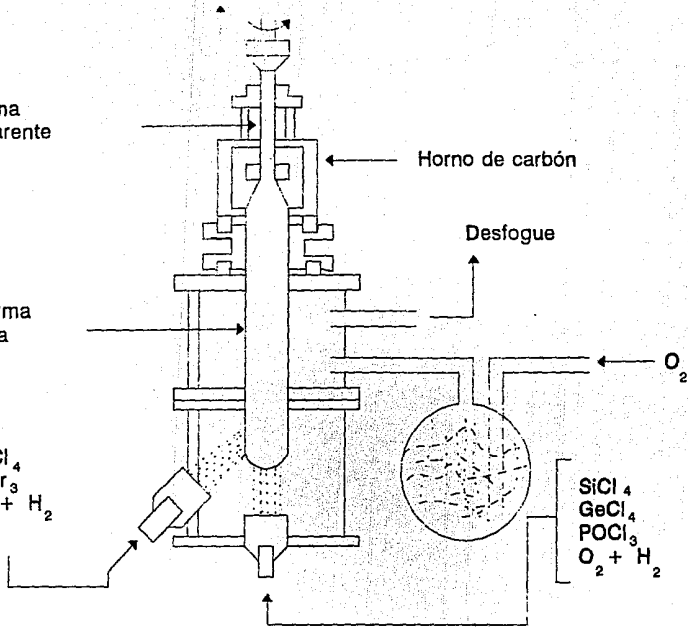
Desfogue

O<sub>2</sub>

SiCl<sub>4</sub>  
BBr<sub>3</sub>  
O<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>

SiCl<sub>4</sub>  
GeCl<sub>4</sub>  
POCl<sub>3</sub>  
O<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>

Figura 16. Proceso de fabricación de fibras ópticas por medio de VAD ( 23 )





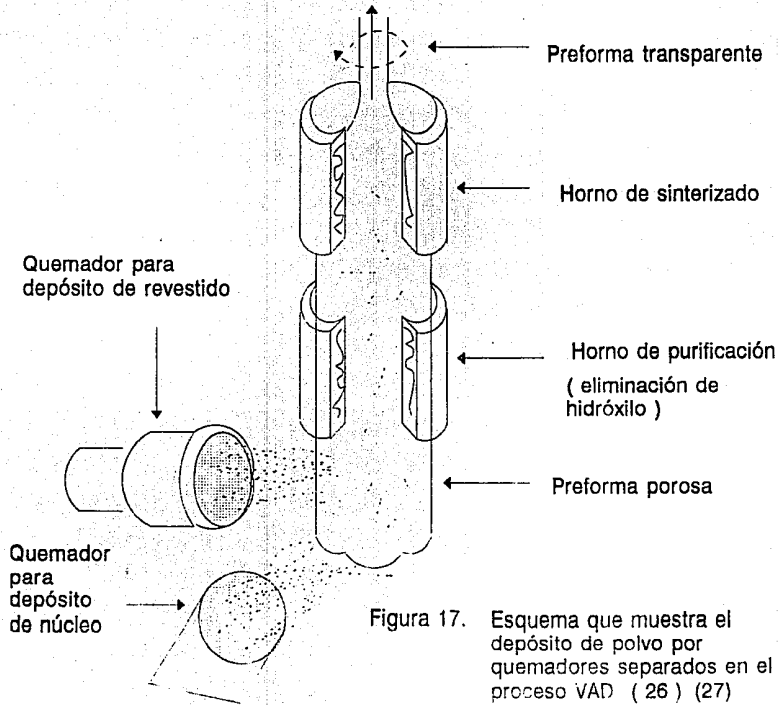


Figura 17. Esquema que muestra el depósito de polvo por quemadores separados en el proceso VAD ( 26 ) ( 27 )

Conforme el depósito va aumentando, es decir, el crecimiento de la preforma se hace mayor, la varilla de cerámica es jalada hacia arriba manteniendo su rotación, preservando así la simetría del depósito y produciendo una preforma de diámetro constante (129), que es vigilado rigurosamente por un circuito integrado de televisión en la cámara cerrada, como se observa en la figura 15 (17).

Parámetros claves en el proceso son las condiciones estables en algunas etapas, como son la regulación de los flujos de alimentación de reactivos, la eficiencia de reacción, la temperatura de flama, la velocidad de rotación de la varilla, la temperatura en el área de depósito y la posición final de la preforma (129).

Las fluctuaciones de posición en la preforma final causan variaciones en el diámetro y diferencias en el contorno. Para evitar estas fluctuaciones, el final de la preforma se coloca en una posición reajustada por medio de señales programadas y ejecutadas por el circuito de televisión integrado en la cámara cerrada (17).

La posición de los quemadores también afecta la estabilidad en la fabricación y en el control del perfil del índice de refracción, así como también la velocidad de crecimiento de la preforma (133).

La configuración en el depósito es un parámetro importante para producir una preforma uniforme, porque las partículas enviadas a la varilla siguen una trayectoria definida a causa de los efectos aerodinámicos. La figura 18, ilustra varios arreglos de los quemadores, variando los ángulos de inclinación del quemador donde se produce el polvo para el núcleo y, manteniendo el segundo quemador en posición fija, elegida en el rango de  $70 - 78^\circ$  (198).

Así variando el ángulo ( $\theta$ ) de la posición del quemador para  $\theta = 0$ , el flujo del polvo proveniente del quemador es dispersado por el choque directo con la varilla como se ve en la figura 18a, y se produce un depósito en las cercanías del centro del área del sustrato. Esto induce inestabilidad y una fase lenta en el crecimiento de la preforma.

Cuando  $\theta = 15^\circ$ , el depósito del polvo muestra un cambio, desaparece el depósito en las cercanías al centro y se nota una mayor distribución en el depósito y por ende la estabilidad y rapidez de crecimiento se incrementan lo que produce una preforma de diámetro exterior uniforme, como lo muestra la figura 18b, (138).

Estudios experimentales han encontrado que para una velocidad de crecimiento y un depósito adecuado, el ángulo ( $\theta$ ) del quemador debe seleccionarse en el rango de  $30 - 40^\circ$  (138), basados en los resultados de la tabla 13 (184).

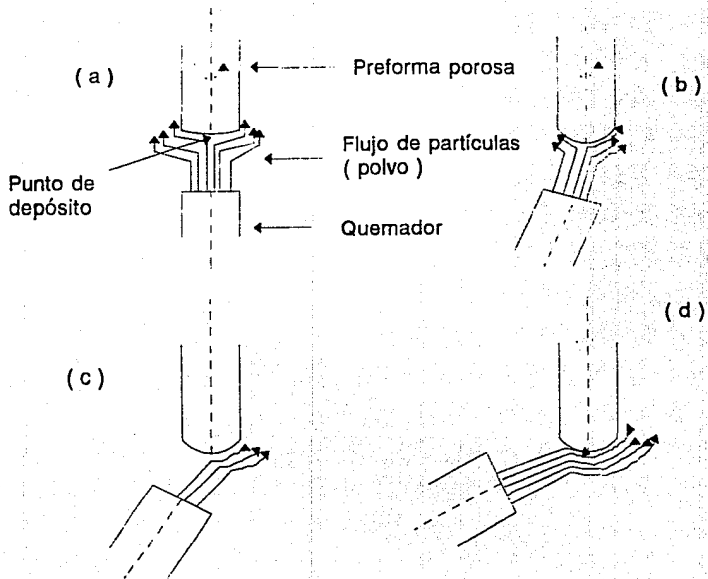


Figura 18. Ilustración de depósito variando el ángulo del quemador: (a)  $0^\circ$ , (b)  $15^\circ$ , (c)  $30^\circ$ , (d)  $60^\circ$  ( 184 )

Tabla 13. Relación entre el ángulo de inclinación con la fluctuación en el diámetro externo de la preforma y la velocidad de crecimiento en el proceso VAD (184).

Angulo $\theta$	Fluctuación del diámetro exterior de la preforma (mm)	velocidad de crecimiento (mm/h)
0	5 - 10	5 - 20
10	2 - 5	20 - 30
20	1 - 2	40 - 45
30	0.5 - 1	70 - 75
40	0.5	100
50	0.5 - 1	60 - 65
$\geq 60$	crecimiento no realizable	5
60	—	40 - 50

4.4.2.- Sinterización y deshidratación. La preforma obtenida debe ser deshidratada y sinterizada, por lo que se introduce a un horno a una temperatura de 1100°C, como el que muestra la figura 19. Por medio de un flujo de gas, que en este caso es el  $\text{SOCl}_2$  (130), aunque se puede utilizar  $\text{Cl}_2$  (131), se elimina al hidróxido.

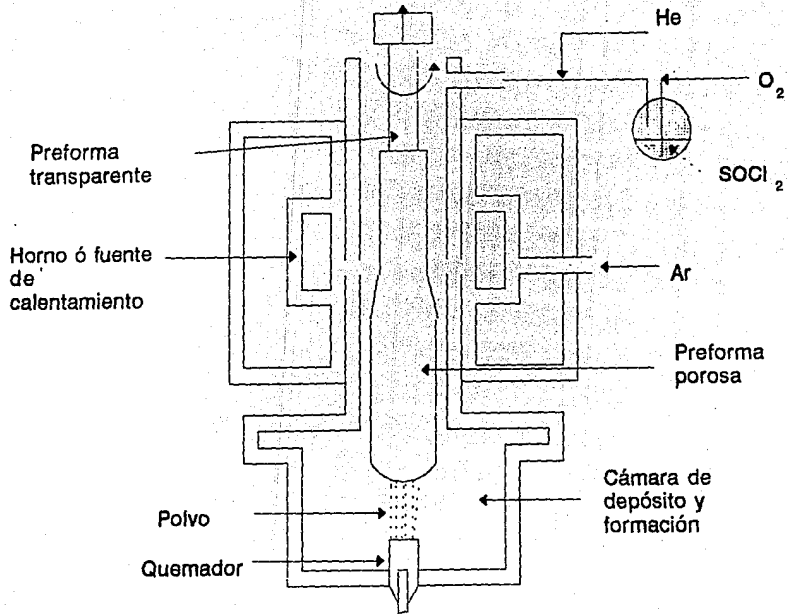
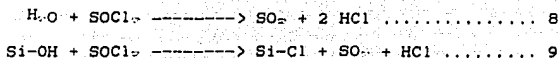


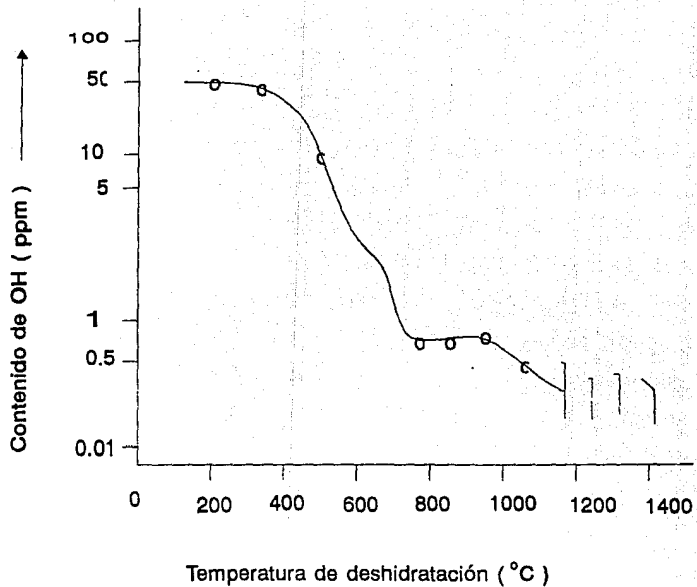
Figura 19. Aparato para purificación de fibras ópticas ( deshidratación )  
 ( 9 )

La descomposición térmica del  $\text{SOCl}_2$  debida a la alta temperatura, produce iones  $\text{Cl}^-$  que reaccionan con el hidróxilo según las reacciones:



La reacción 9, tiene un rango crítico de temperatura, 700 - 1200°C, como lo muestra la gráfica 3. Este rango limita la reacción entre los iones  $\text{OH}^-$  y  $\text{SOCl}_2$ . A la máxima temperatura, 1200°C se logran eliminar casi completamente los grupos  $\text{OH}^-$  y en el mismo paso se realiza el sinterizado de la preforma, dando una uniformidad en el diámetro y en el perfil de índice de refracción (16).

Este método ofrece la ventaja de ser un proceso continuo con grandes posibilidades de mejoramiento, como por ejemplo, realizar un crecimiento previo en el área de depósito incrementando las dimensiones y formas de las preformas (132). Oga y Yokota (134) proponen un flujo controlado de gas inerte sobre la varilla de depósito durante el crecimiento de la preforma previniendo fallas en la estructura por depósito excesivo de partículas de  $\text{GeO}_2$ . Experimentos de Takagi y Yokota (135) con varillas amorfas para el depósito y un flujo de gas inerte a través de ellas, permite incrementar la longitud efectiva de la preforma.



Gráfica 3. Contenido de OH contra temperatura de deshidratación ( 9 )



Saito Masahide (136) ha logrado aumentar la velocidad de adhesión de las partículas de 63 a 80% utilizando una neblina de gas inerte en la cámara de depósito. Danzuka y Yocota proponen un precalentamiento de la mezcla de reactivos, ya que este precalentamiento incrementa la velocidad de depósito en 80% (137). Los parámetros de este proceso se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Parámetros típicos del proceso VAD (17) (136)

Rápidez de depósito	0.5 - 1.0 g/min [ máximo 2.0 g/min ]
Eficiencia	60 - 80%
Diámetro	
preforma ( porosa )	50 mm * 350 mm; 60 mm; 70 mm 52 mm * 300 mm
preforma ( transparente )	23 mm * 24 mm; 25mm; 30 mm
Tamaño de preforma para la hiladura	20 - 50 Km/pieza
Longitud de fibra óptica obtenida	100 Km, 21 Km, 30 Km

#### 4.5.- Proceso de depósito de vapor químico externo ( DVD )

4.5.1.- Desarrollo. La figura 20, muestra esquemáticamente el proceso de depósito externo de vapor (16), que es muy flexible y se usa con buen éxito para fabricar una amplia variedad de preformas, de las cuales se obtienen las fibras ópticas, con una amplia variedad de tamaños. El proceso DVD, es una derivación del MCVD.

En este método se utiliza un sistema de alimentación como el de los anteriores procesos, para el flujo de reactivos a un quemador donde se efectuará una combustión, figura 20.

El quemador tiene una tapa con orificios concéntricos. El orificio central es para las partículas que forman el llamado polvo, que no es otra cosa que partículas finisimas de los óxidos de los reactivos, y el orificio adyacente es usado como una protección, para prevenir las reacciones prematuras que podrían ocurrir en los reactivos que formarían paulatinamente una película en el frente del quemador y obstruir la salida del polvo.

Una mezcla de oxígeno e hidrógeno, se usa como combustible y la temperatura se eleva hasta 1500°C, lo que ocasiona que el oxígeno y los reactivos en estado gaseoso reaccionen para producir partículas de óxidos del orden de micrones de los reactivos que forman al que llamamos polvo (139) (140).

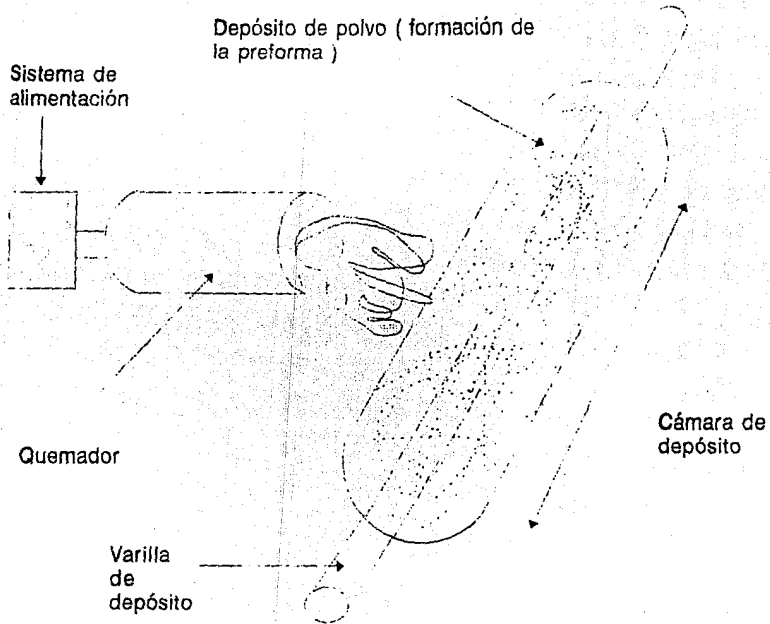
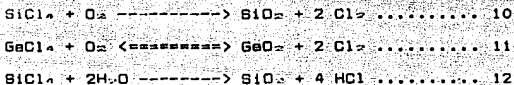


Figura 20. Diagrama del depósito de vapor externo (16)

4.5.2.- Reacciones químicas. Son complejas, ya que no sólo se tienen reactivos sino también combustible, algunas reacciones típicas son:



También se obtiene agua formada durante la combustión y que reacciona según:



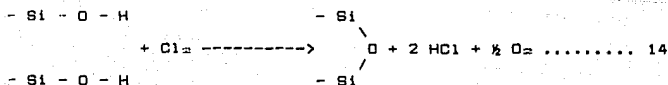
La función de esta reacción es consumir una gran cantidad de cloro producido en las reacciones 10 y 11.

Conforme el polvo es producido se envía a una cámara cerrada la cual tiene en el centro una varilla de cerámica, como se observa en la figura 20. Esta varilla es utilizada como sustrato para que el depósito del polvo. Las partículas producidas tienen un diámetro de 0.1  $\mu\text{m}$  aproximadamente, pero al efectuarse choques entre ellas alcanzan los diámetros de 0.25  $\mu\text{m}$ . En apariencia la cámara semejaría un cilindro de compresión de polvo.

Cuando se ha alcanzado el depósito deseado, la varilla es colocada en otro quemador donde se procede a deshidratar y sinterizar, como lo muestra la figura 21a (16).

Para ello el quemador tiene una temperatura entre 1400 - 1500°C, y en una atmósfera seca, la etapa de deshidratación se logra cuando se hace pasar por la varilla un flujo de algún gas, que normalmente es Cl<sub>2</sub> (141) (142), con esto se elimina al hidróxido que es una impureza introducida en la preforma durante la combustión inicial, al mantenerse la temperatura la preforma se sinteriza formando una película uniforme, cristalina y transparente, figura 21b.

La reacción de deshidratación que ocurre es:



Con esto se obtiene una preforma con cantidades mínimas de hidróxido y con una eficiencia en el depósito entre 50 - 60% aproximadamente (7).

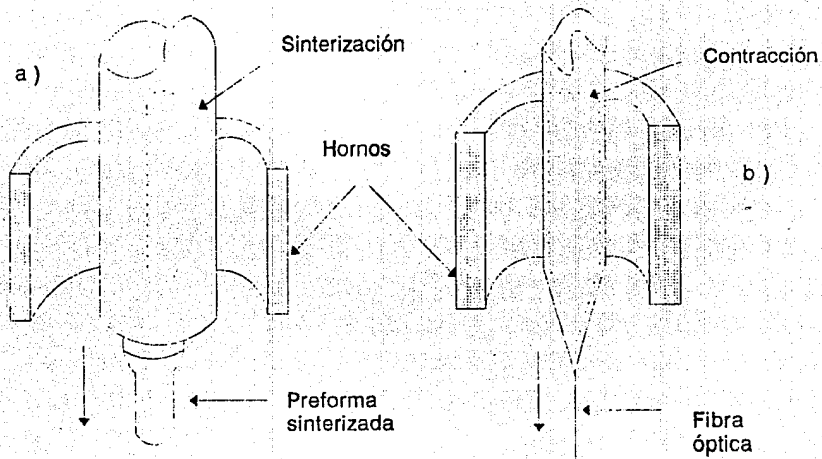


Figura 21. a) Sinterización de la preforma porosa y b) etapa de contracción para obtener la fibra óptica (139)

4.5.3.- Geometría. La preforma tiene una geometría típicamente cilíndrica, el rango de velocidad del depósito entre 1.3 - 4 g/min. Se pueden obtener preformas grandes de 1800 g, 11 cm de diámetro y 80 cm de longitud con aproximadamente 1000 películas en el depósito. Este número tan grande de películas permite muchas variedades en la composición, en las dimensiones del núcleo y revestido, y un control adecuado sobre el índice de refracción (16).

Al aumentar la velocidad de alimentación del quemador, alrededor de 400 - 600 mm/h, y manteniendo la temperatura exterior del tubo entre 600 - 620°C, hasta lograr una preforma de diámetro exterior de 205 - 500 mm, permite lograr fibras ópticas con mínima atenuación (143). Kondo (144) propone la formación de un campo magnético para la mejor distribución del polvo en la formación de la preforma, con este campo magnético se pretende guiar al polvo en una sección requerida de la preforma. Las investigaciones realizadas por Nemoto y Yabaki (145) utilizando una varilla de depósito que cambia su posición angular y horizontal por medio de contenedores móviles que sostienen a esta varilla y logrando por tanto una variedad en la forma y tamaño de la preforma. Los parámetros característicos se presentan en la tabla 15.

Tabla 15. Parámetros típicos del proceso OVD (16) (7)

Muestra	A	B	C	D
Diámetro del núcleo ( $\mu\text{m}$ )	50	50	100	100
Diámetro de la fibra óptica ( $\mu\text{m}$ )	125	125	150	150
Composición del núcleo	$\text{GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{GeO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$	$\text{GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$
Composición del revestido	$\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$
Atenuación ( dB/Km )				
820 ( nm )	3.0	2.5	4.0	4.0
1200 "	1.0	0.6	2.0	1.5
1300 "	3.0	0.7	3.0	1.5
1500 "	20.0	0.8	—	2.0
1600 "	—	0.3	—	2.5
ppm OH	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Amplitud de banda ( MHz·Km )	> 1000	> 1000	> 200	> 20



### 4.6.- Proceso de depósito de vapor químico por plasma ( PCVD )

4.6.1.- Descripción. Mediante la modificación al proceso MCVD empleando diversos tipos plasmas (84) (180) se ha logrado el incrementar la eficiencia en el depósito de vapor químico, y esto ha permitido a la industria utilizar fibras ópticas en aplicaciones cada vez más sofisticadas (175). El proceso PCVD se muestra en la figura 22.

Para la colocación del tubo de sílica que normalmente tiene un diámetro exterior entre 44 - 46 mm y de diámetro interior de 40 mm, que servirá de revestido, se utiliza un plasma de radio-frecuencia que es alineado por los cabezales, que conforman un torno especial, semejante al utilizado en el MCVD. El tubo al quedar alineado está rodeado por una fuente de calor, que comúnmente es un horno ó un soplete que se mueva transversalmente en toda la longitud del tubo. El anillo de radio-frecuencia circunda al tubo y sirve para que el plasma se mueva transversalmente, también a lo largo del tubo (14) (84) (174).

Asegurando que la pared del tubo no roce al plasma, se da paso al flujo de alimentación en el interior del tubo, que se hace rotar a la temperatura de 1000°C por lo que reacciones se efectúan al pasar por la zona del plasma y producen lo que se denomina polvo, dichas reacciones ya han sido presentadas en los anteriores procesos. El plasma opera comúnmente a 2.45 - 3.2 GHz y presión baja entre 10 - 30 torr (26) (84).

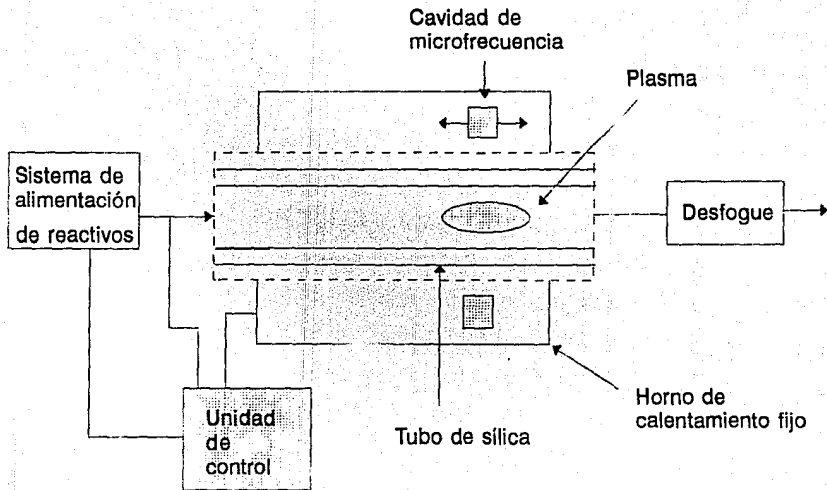


Figura 22. Proceso PCVD esquematizado ( 9 )

La función del plasma es la de inducir el depósito del polvo en la pared del tubo lo que imparte uniformidad a las películas formadas, que a su vez son sinterizadas por el paso del soplete a una velocidad de 8 cm/seg ó por el horno fijo elevando su temperatura hasta 1150°C.

El plasma no tiene funciones de catalizador u otro tipo, sólo induce el depósito por cambio de temperatura de las partículas al chocar contra él (180).

La eficiencia en el depósito es alta, aproximadamente 95% y el rango en la velocidad de depósito es 2 - 3 g/min, y por el alto número de películas que pueden generarse, hasta 2000 películas individuales se obtienen depósitos que presentan perfiles de índices de refracción excelentes, y alta pureza. Por lo que la etapa de deshidratación no es necesaria (14) (180).

Cuando se ha terminado el depósito el tubo es trasladado y colocado en otro horno para efectuar la etapa de contracción a una temperatura de 1800°C, que es la etapa donde se fusionan el núcleo formado por un número de películas depositadas dado, y el revestido que lo conforma el tubo. La preforma de ultra-alta pureza para la obtención de fibras ópticas (14) (84).

1.6.2.- Ventajas. Este proceso ofrece muchas ventajas (174), como son:

El perfil del índice de refracción puede ser controlado en cada película depositada, aún en gran número (176).

Las velocidades de reacción y de depósito son casi independientes de la temperatura (177).

Se obtienen altos rendimientos de reacción (177).

La estructura dentro del tubo se forma a temperaturas relativamente bajas (176).

La energía que se suministra a la cavidad es transmitida al plasma virtualmente sin pérdida, y no es influenciada por las características térmicas del tubo (178).

Las condiciones de operación no cambian significativamente durante el proceso (178).

El empleo de nuevos plasmas a llevado al mejoramiento en la manufactura de fibras ópticas (189) (182), por lo cual investigadores proponen el uso de sistemas de vacío para mejorar el depósito del polvo y de sistemas de enfriamiento (181). Los parámetros del proceso se presentan en la tabla 16.

Tabla 16. Parámetros del Proceso PCVD (26) - (84)

Eficiencia	≈ 95%
Velocidad de depósito ( g/min ):	
típica	0.05
máxima	2-3
Diámetro de la preforma ( mm ):	
típico	10 mm OD * 8 mm RD
máximo	22 mm OD * 26 mm RD
Longitud máxima de preforma ( cm ):	80
Longitud de fibra óptica:	200 - 300 m/cm de preforma
Longitud total de fibra óptica:	15 - 25 Km

#### 4.7.- Proceso de depósito de vapor químico por plasma-mejorado ( PEMCVD )

4.7.1.- Operación. Este proceso es una derivación de los procesos por plasma, descritos anteriormente y se basan en el depósito de polvo, como se observa en la figura 23. (14).

En un tubo de sílica de diámetro interior de 50 - 70 mm. que se coloca como se menciona en secciones precedentes, se ha introducido un plasma en su interior que opera a 3.5 MHz. y que se alinea cuidadosamente en el centro del tubo para evitar cualquier roce con la pared, quedando el tubo rodeado por un anillo ó cavidad de radio-frecuencia, que a su vez en la parte superior lleva un sistema de enfriamiento y por abajo un soplete, como se muestra en la figura 23. (147) (84).

El flujo de reactivos llegan al tubo que tiene una temperatura de 1100°C, efectuándose las reacciones homogéneas en la fase gas que producen al polvo, este polvo viaja en dirección transversal hasta cruzar la zona del plasma enfriador que induce el depósito del polvo sobre la pared del tubo de una manera uniforme (117) (179).

El depósito del polvo que forma la película es sinterizado por el paso del soplete.

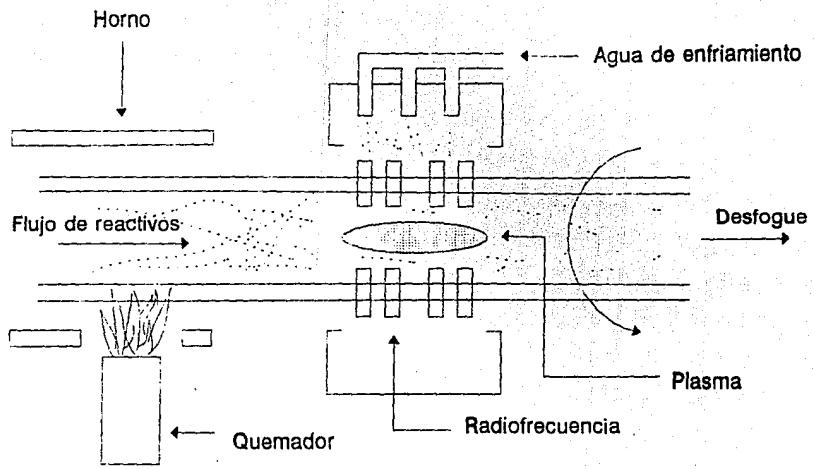


Figura 23. Diagrama del proceso PECVD (14)

La zona del plasma enfriador sólo sirve para inducir el depósito por el cambio de temperatura que sufren las partículas llamadas polvo producidas en las reacciones de oxidación, teniendo en cuenta que el plasma no sirve para iniciar la oxidación ni tampoco la sinterización.

El rango de velocidad de depósito es de 5 - 10 g/min. La eficiencia es alta aproximadamente 98%. El grosor de las películas alcanzan entre 45 - 79  $\mu\text{m}$  (26).

Después de que el depósito ha finalizado se cierra el flujo de alimentación y sólo una pequeña cantidad de oxígeno se hace pasar a través del tubo par arrastrar los vapores que aún queden presentes, la zona del plasma se coloca al final del tubo y se incrementa la temperatura del soplete entre 1500 - 2000°C, efectuándose la contracción del tubo, fusionándose con el núcleo y produciendo una preforma de muy buena calidad para la obtención de fibra óptica (84) (179).

Aún siendo el más novedoso de los procesos descritos se han propuesto algunas mejoras (180), como la reducción de la presión de operación y la utilización de ultra-alta frecuencia en los plasmas (183). La explotación a escala industrial es muy atractiva debido a la eliminación de varias etapas y los costos inherentes y se obtiene alta calidad en las fibras ópticas lo que permite aplicaciones para transmisión de información (177) (178). Los parámetros del proceso se presentan en la tabla 17.



Tabla 17. Parámetros del Proceso PEMCVD (179)

Eficiencia	90 - 100%
NA	0.23
Velocidad de depósito ( g/min ):	
típica	3.5
máxima	5.0
Diámetro del núcleo ( $\mu\text{m}$ ):	45-79
Longitud de fibra óptica ( Km ):	> 20
ppb OH ( mínima reporda ):	10

## Capítulo V

### 5.- Hiladura

En la etapa de hiladura es donde se obtiene el producto final, fibras ópticas y se efectúa la caracterización óptica y mecánica (210).

El esquema del proceso de hiladura de la fibra óptica se presenta en la figura 24 (205).

Los aparatos que se usan en este proceso varían en sus componentes, según el proceso de manufactura de la fibra. Así por ejemplo en el caso de procesos por depósito de vapor se requiere de la alimentación de la fibra a una fuente calorífica para su hablandamiento. Para los procesos de fundición directa se realiza la hiladura directamente como se ve en la figura 24, usando los siguientes equipos, aplicador de revestido protector, aparato de cura del revestido protector, guía para estirar la fibra y mecanismo de enrollamiento de la fibra (205) (9). Además se incluyen aparatos automáticos para centrar la fibra óptica durante la aplicación del revestido protector (118) (206).

La etapa de hiladura es un paso continuo en las fibras fabricadas por fundición directa y un paso intermitente en las fabricadas por depósito de vapor químico (185).

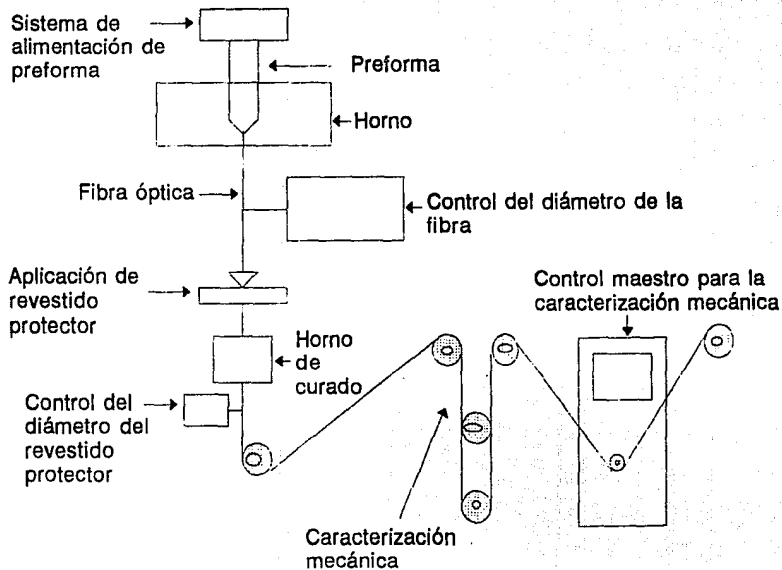


Figura 24. Esquema del proceso de hilatura de fibras ópticas (9)

Una vez formada la preforma se coloca en un horno y se calienta a 2200°C hasta que se produzca el reblandecimiento y empieza a fluir en forma de "hilo". Este "hilo" es conectado a un tornillo guía que lo va jalando y dirigiendo a las etapas subsiguientes, bajo una atmósfera controlada, usualmente de gas inerte, para evitar cualquier alteración ambiental que pudiera afectar los parámetros de la fibra óptica (90).

5.1.- Hornos. Actualmente se usan cuatro tipos de hornos para esta etapa como puede verse en la figura 25. Estos hornos deben suministrar temperaturas entre 1500 - 2500°C, y su construcción requiere de materiales de alta pureza para que no reaccionen con los materiales usados en la fabricación de fibras ópticas ó entre ellos mismos. (90).

Los hornos tipo 1, que se ilustran en la figura 25a se utilizan sopletes que usan una mezcla de oxígeno e hidrógeno. Si bien estos no introducen contaminantes, si producen variaciones en el diámetro debidas a la turbulencia de la flama (194).

El segundo tipo usa láseres de CO<sub>2</sub>, figura 25b. La energía producida por el laser es absorbida por la superficie de la preforma y produce una re-radiación en su interior con conducción, produciendo hablandamiento de la preforma para la hiladura (188).

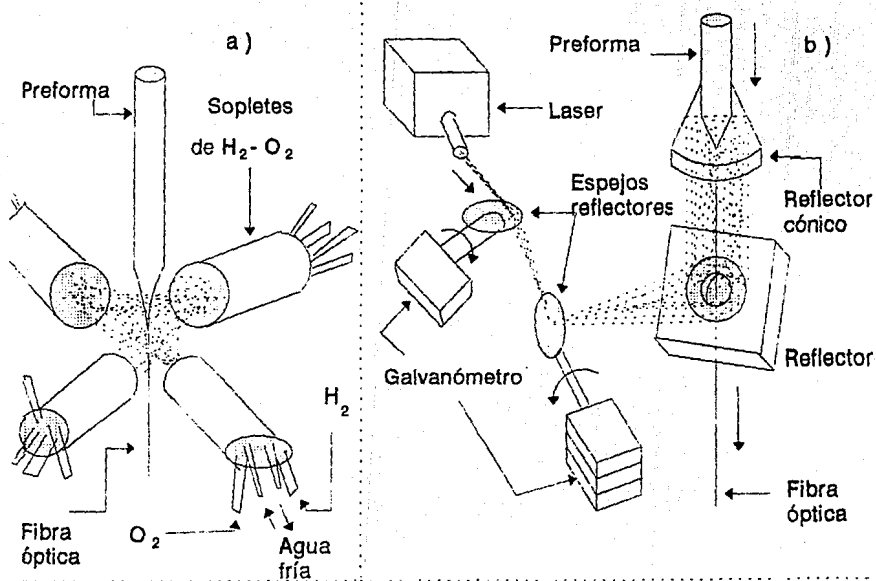


Figura 25. Tipos de hornos propuestos para calentamiento en la actualidad: a) Soplete de H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> y b) Laser de CO<sub>2</sub> (90)

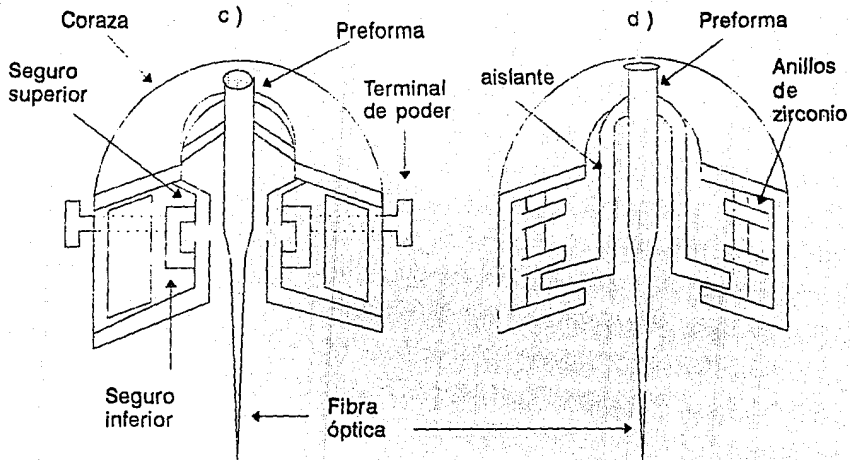


Figura 25. Tipos de hornos de calentamiento: c) horno de gráfito y d) horno de zirconio (90)

Los hornos de grafito ó tungsteno, esquematizados en la figura 25c, se usan para calentar la preforma por radiación. Presentan una desventaja como la temperatura es alta, podrían contaminar el área superficial de la preforma y por tanto a la fibra óptica que se traduce en cambios en la resistencia a la tensión (193).

Los hornos de inducción de zirconio, también usan el calentamiento por radiación y presentan la ventaja de no requerir atmósfera inerte. Lo que favorece que la preforma esté libre de turbulencias y de contaminación ambiental, obteniéndose fibras de ultra-alta-pureza. La figura 25d, presenta un esquema de este tipo de horno (195).

5.2.- Control del diámetro del "hilo" ( fibra óptica ). Es controlado por un monitor programado, pero se pueden usar otros dispositivos como los presentados en las figuras 26a (189) y 26b, respectivamente (90).

El control preciso en las especificaciones del diámetro del hilo se basa en el modelo de conservación de masa (187) y esta dado por:

$$V = \frac{D^2}{d^2} \dots\dots\dots 16$$

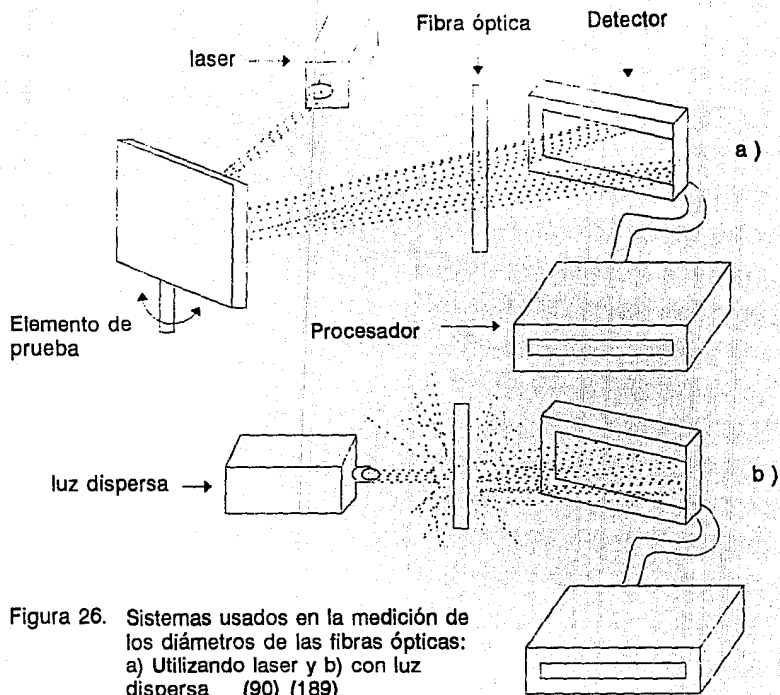


Figura 26. Sistemas usados en la medición de los diámetros de las fibras ópticas:  
 a) Utilizando laser y b) con luz dispersa (90) (189)



donde:

V = velocidad de alimentación

D = diámetro de la preforma

d = diámetro de la fibra óptica

El revestido protector se aplica a la fibra una vez salida del horno (190) (192) y tiene la función de suministrarle propiedades plásticas y protección contra la abrasión mecánica.

Para ello se hace pasar la fibra óptica a través de horno para curar la primera capa de revestido protector, evitando la introducción de cualquier impureza ó imperfecciones en la superficie de la fibra óptica, una segunda capa (191) se aplica después del horno de curado, para proteger a la fibra obtenida del polvo y de la humedad que pudieran existir en el ambiente (207), nuevamente es curada en otro horno. Al terminar de la segunda aplicación la fibra óptica es enrollada en un tambor especial (205).

## Capítulo VI

### 6.- Caracterización óptica y mecánica

#### 6.1.- Caracterización óptica

Las relaciones de los tipos de fibras, sus propiedades ópticas y los parámetros medidos se presentan en la tabla 18 (208) (219).

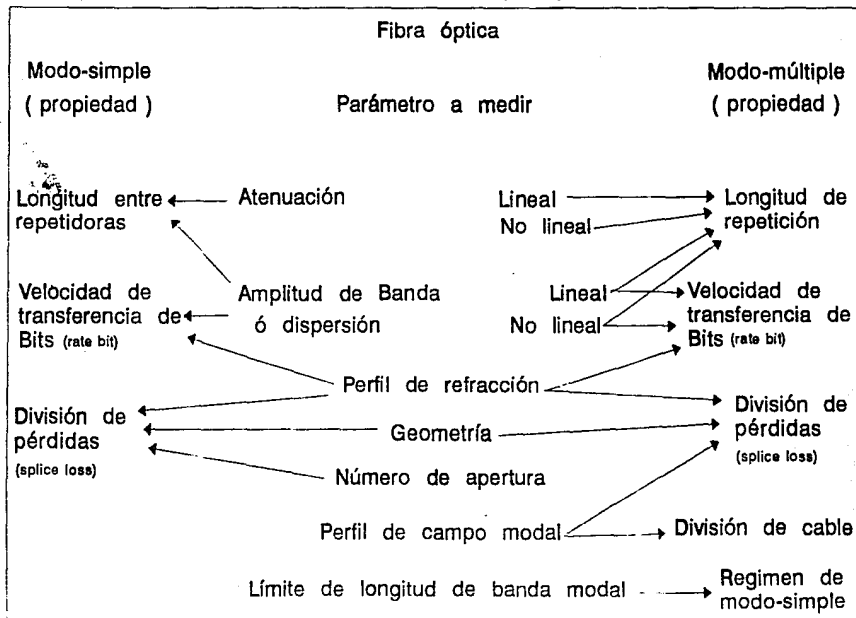
##### 6.1.1.- Atenuación

La caracterización por atenuación es aplicable a los dos grupos de fibras ópticas, pero es la más difícil de realizar.

En la figura 27, se presenta el diagrama del aparato que se emplea para efectuar la medición de la atenuación (208).

La atenuación representa la disminución en la transmisión óptica por unidad de longitud (dB/Km). Por esto se mide la transmisión a una determinada longitud de onda en un determinado segmento de la fibra óptica. Normalmente este segmento es de 1 - 2 Km. A continuación el segmento se reduce a una longitud entre 10 - 12 m y se repite la transmisión. De esta manera se efectúan distintas transmisiones a diferentes longitudes de onda obteniéndose el valor de la atenuación por las diferencias que reportan los datos en las mediciones (211) (212).

Tabla 18. Parámetros a medir de la fibra óptica y la relación entre propiedades de ambos tipos ( 208 )



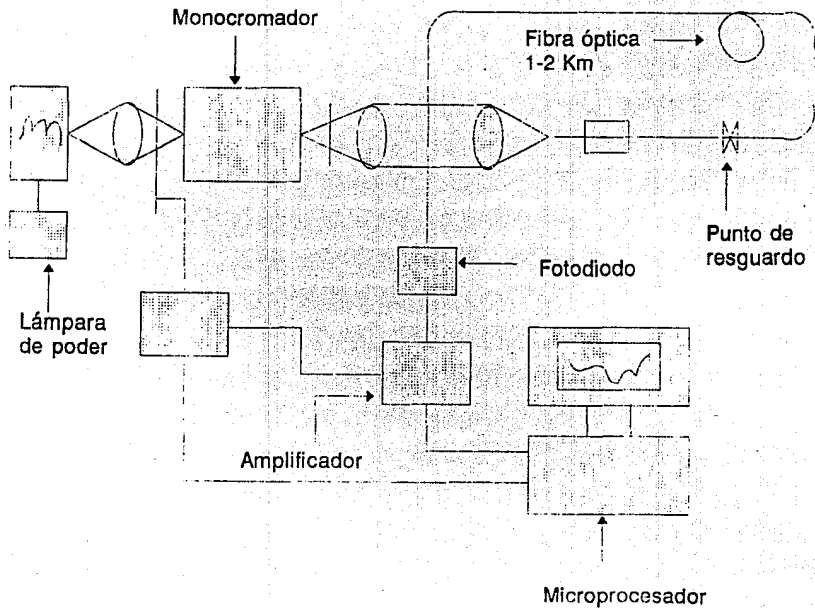


Figura 27. Diagrama que muestra el aparato para medir la atenuación en fibras ópticas (208)

El equipo empleado es una lámpara de tungsteno con fuente de poder adicional para su estabilización, monocromador con distintos filtros para seleccionar correctamente el orden de difracción, fibras ópticas con diferentes tamaños y varios lentes para el acoplado de éstas. La señal es detectada por un fotodiodo de grandes y pequeñas longitudes de onda. Las señales provenientes del amplificador y del monocromador son enviadas a la computadora para su procesamiento y obtención del valor de la atenuación (20B).

#### 6.1.2.- Amplitud de banda y/o Dispersión de pulso

Existen diferencias en la medida de la dispersión en las fibras de modo-simple y modo-múltiple por lo que se tratarán separadamente.

##### 6.1.2.1.- Dispersión en fibras ópticas de modo-simple

Mach-Zehnder (223) las determinaron por la analogía con una onda plana limitada transversalmente. Tomaron 1 m de fibra óptica y dedujeron la variación del índice de pulso efectivo como una función de la longitud de onda y determinaron el grado de dispersión que presenta la fibra óptica.

Se calcula en segmentos pequeños ya que el índice de refracción depende de las fluctuaciones presentes en el núcleo lo que ocasiona resultados erróneos para segmentos grandes.

En la actualidad se utiliza la técnica denominada fuente de Raman (208) figura 28, donde se hace pasar pulsos que son transportados por la fibra a lo largo de 1-2 Km, para después segmentar esta longitud y volver hacer pasar los mismos pulsos logrando el valor de dispersión que presentará la fibra óptica (231).

#### 6.1.2.2.- Amplitud en fibras ópticas de modo-múltiple

En la figura 29, se presenta un esquema del aparato para definir la amplitud. Su principio de funcionamiento se basa en la división de un rayo que pasa por un láser y una fibra óptica que transportan el pulso a medir. La fibra óptica es colocada de tal manera que el pulso saliente sea medido por el mismo detector que el pulso saliente del láser; los pulsos son comparados en un osciloscopio, obteniéndose el valor de la amplitud de banda.

Frantzen y Day (232) y posteriormente Day(233) presentan nuevas técnicas alternativas para medir la amplitud de banda en las fibras ópticas de modo-múltiple, usando la técnica de modulación de láseres y amplitud del pulso saliente. También proponen el reemplazo del osciloscopio por un generador y amplificador de espectros para efectuar la medición (222).

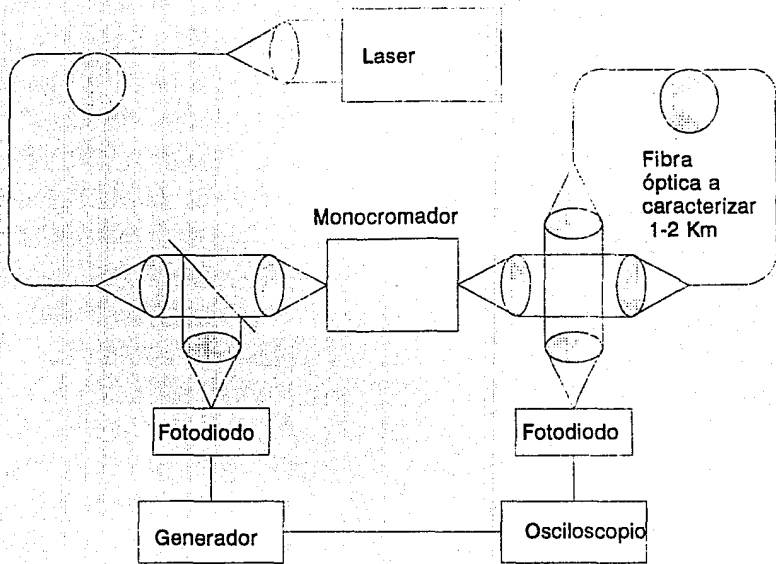


Figura 28. Diagrama esquemático de aparato para medir la dispersión en fibras ópticas ( 208 )

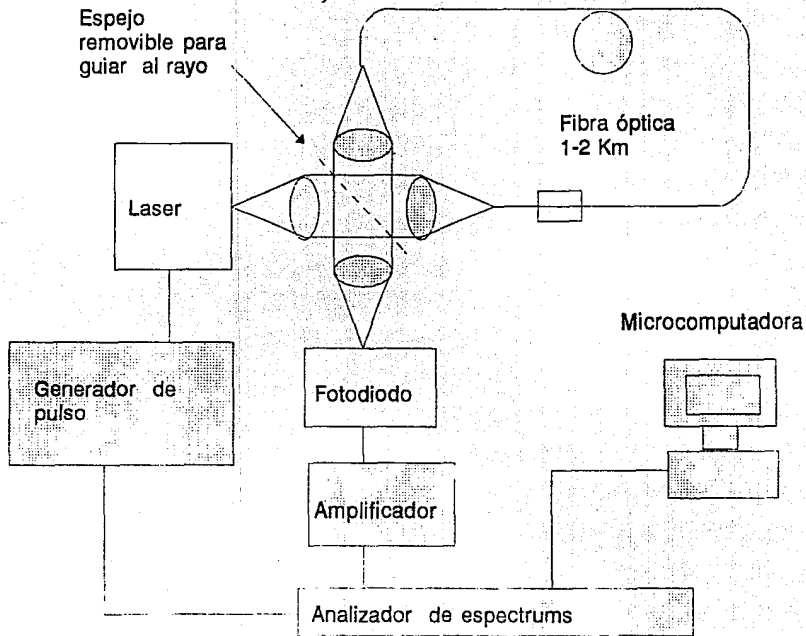


Figura 29. Diagrama de aparatos para la medición de la amplitud de banda ( 208 )



### 6.1.3.- Tamaño del modo de pulso

El modo de pulso (220) es una característica que influye en el tamaño del diámetro ya que como se sabe, la atenuación es consecuencia de este y otros factores como fluctuaciones o microdesviaciones que puede tener la fibra. Es importante el conocer el tipo de fibra a utilizar para conocer la forma de propagación de la luz (información) durante su trayectoria.

Numerosas técnicas han sido propuestas para la medición del modo de pulso, y la más común es la técnica llamada límite del campo-cercano, así como por variación del poder de transmisión con número de apertura operacional (234) y/o examinación transversal de una fibra óptica con respecto a otra (235).

### 6.1.4.- Modo límite de longitud de onda

Es la longitud de onda bajo la cual sólo el pulso fundamental se propaga (221). Las siguientes técnicas se utilizan para determinar esta propiedad e incluyen mediciones espectrales:

- (1) Atenuación
- (2) Atenuación debida a las curvaturas en los segmentos cortos de las fibras ópticas.

- (3) Poder transmitido por un segmento corto de fibra óptica
- (4) Poder no guiado por la fibra óptica
- (5) Campo-cercano
- (6) Campo-lejano, a longitudes de onda simple más allá del límite
- (7) Perfil del campo modal transversalmente compensado

La selección de la técnica más apropiada, depende de la extensión de la fibra (235). Así por ejemplo para unificar especificaciones y para pruebas de aceptación, la opción 2 es la adecuada. Se realiza usando 2 m de longitud de fibra óptica con un diámetro de 0.28 m; y utilizando un aparato para medir atenuación como el esquematizado por la figura 27 (221).

#### 6.1.5.- Geometría

Los parámetros de geometría como son los diámetros del núcleo y revestido, concentricidad del núcleo y la ovalidad, pueden ser obtenidos por un perfil, empleando una prueba denominada reflejo de imagen total (189) de la fibra óptica.

Esta técnica es sólo una comparación de las características de una fibra con las que presentaría si fuese ideal.

Se efectúa por medio de placas impresas que se obtienen al hacer pasar un rayo laser transversalmente a la fibra. éstas son registradas y enviadas a una computadora y con ello realizar la comparación. por ejemplo la placa que se obtiene del diámetro se sobreponen ambas la ideal con la examinada y donde se abvierten desviaciones de la linealidad u otro factor el perfil reportado presentara fallas y éstas aumentan la atenuación (199)(189). Así sucesivamente para cada parámetro que es observado y medido.

Otra tecnica es la imagen-cortada microscópicamente puede ser usada también para medidas geometricas (199).

#### 6.1.6.- Perfil de índice de refracción

La variación del índice de refracción, tanto en el núcleo como, en el revestido de la fibra óptica y su forma, determina las trayectorias de la luz que se propaga en su interior. Sus características de transmisión tales como atenuación y amplitud de banda, determinan también la cantidad de modos que propaga la fibra optica en su núcleo, de acuerdo con la ecuación:

$$\frac{2\pi a}{\delta} \left[ (2n)(dn) \right] \leq 2.41 \dots \dots \dots (17)$$

donde:

$a$  = radio del núcleo

$\delta$  = longitud de onda

$\Delta n$  = diferencia entre los índices de refracción

$n$  = índice de refracción del núcleo

lo que significa que cuando la ecuación 17 tiene un valor igual ó menor a 2.41 la fibra óptica se comporta de modo-simple y a un valor mayor de éste se comporta de modo-múltiple (32).

Otra forma de verificar el perfil de índice refracción en el núcleo consiste en pasar rayos láseres a la salida de la formación de la fibra óptica, éstos al pasar por la fibra óptica llegan a un detector que procesa y calcula el máximo error del índice de refracción del núcleo por comparación de gráficas parabólicas (184).

Para la medición del índice de refracción del revestido la técnica más empleada es la del campo-cercano (189) figura 30. La fibra óptica es colocada en una celda que se llena de un líquido con un índice de refracción conocido, un rayo láser enfocado detenidamente pasa a través del diámetro de la fibra, la luz no guiada por la fibra óptica emerge como un cono, y la punta de éste es bloqueada por un disco. La parte exterior del cono se proyecta a un detector que registra la energía y la relaciona automáticamente con el índice de refracción del revestido (199).

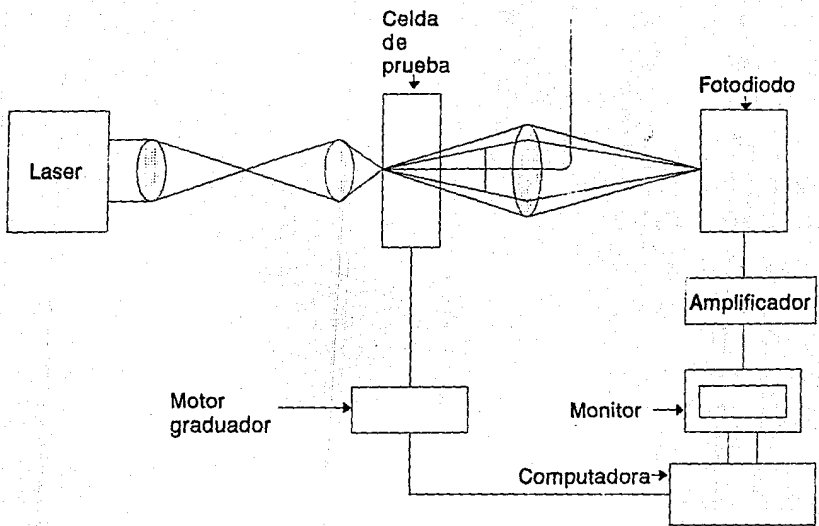


Figura 30. Aparato para medir el índice de refracción por campo-cercano ( 208 )

#### 6.1.7.- Efectos No-lineales

Las fibras ópticas de modo-simple para sistemas de telecomunicación a grandes distancias tienen un funcionamiento cercano al óptimo; sin embargo, esos sistemas sólo explotan una pequeña fracción de su potencial de amplitud de banda.

La combinación en los rangos de repetición, llamadas repetidoras, y el porcentaje de datos transmitidos pueden mejorar la fuente de transmisión y la fuente de recepción. También las altas energías incrementan el rango de repetición, pulsos cortos favorecen el incremento del porcentaje de transmisión de datos y la amplitud de banda de líneas (208).

#### 6.1.8.- Pérdidas No-lineales por dispersión de Brillouin estimulada.

La dispersión influye en la atenuación por lo que es de suma importancia su estudio, los estudios realizados a la fecha reportan que los efectos no-lineales causan una dispersión aún no calculada pero que presenta según lo previsto gran repercusión en la atenuación (215).

Estas pérdidas se analizan mediante un aislante preferentemente un aparato óptico-magnético que permite medir la retro-dispersión de luz en una retro-alimentación al laser y distribuir la frecuencia de operación (213).

La luz pasa a través de un dispersor antes de ser utilizada en la prueba, siguiendo por fotodiodos medidores de la transmisión y un monitor de la señal introducida y por último a la retro-dispersión de los rayos reflejados por el dispersor.

Aunque la pérdida en este tipo de prueba es reducida, como se tiene sólo el pulso saliente a longitudes de onda grandes reduce la intensidad de esta dispersión.

Para telecomunicaciones la modulación de la frecuencia requiere de transmisiones de información suspendiendo el refuerzo de la onda (213) (214).

#### 6.1.9.- Propagación del pulso No-lineal ( Modificación de longitud de onda ).

La relación entre la dispersión y el índice de refracción no-lineal puede incrementar la amplitud de banda ó degradarla, a esta relación se le llama propagación del pulso no-lineal.

Este parámetro es muy complicado en su evaluación, se propone la técnica llamada autocorrelación (216), que es la medición del tiempo de traslado de un pulso mínimo a través de la fibra hasta llegar a unos fotodiodos receptores (217).

A grandes rasgos se procede de la siguiente manera: se alimenta un pulso mínimo que es dividido y dirigido hacia dos cristales no-lineales que están colocados de tal manera para evitar efectos armónicos que pueden interferir en la medición, uno de éstos rayos en su trayectoria es demorado intencionalmente en su trayectoria y cuando logran llegar a los fotodiodos ambos pulsos se produce una onda armónica que reporta el valor de este parámetro (216) (218).

## 6.2.- Caracterización mecánica

Tiene como función primordial la caracterización de los parámetros de tensión y fátiga estática en las fibras ópticas.

### 6.2.1.- Tensión

La tensión de las fibras ópticas utilizadas en telecomunicaciones a grandes distancias permite gran variedad de diseño e instalación en el cableado.

Los problemas de fragilización en las fibras ópticas se deben a imperfecciones ó a la falta de compresión causadas generalmente por el área y el tamaño del cable.



La posibilidad de mantener uniforme la tensión en grandes distancias decrece significativamente conforme las distancias aumentan, es por ello que los parámetros del procesamiento de las fibras ópticas requieren de un control cuidadoso para obtener la tensión adecuada para cada tipo de aplicación (9).

La calidad de la varilla donde se efectúa el depósito para obtener la preforma tiene un efecto significativo sobre la tensión, así como la limpieza y la capacidad de calentamiento de la fuente calorífica en la etapa de hiladura.

El desarrollo de métodos para la determinación de la tensión es un tema de investigación en los últimos años. Los métodos más usados comercialmente son:

#### 6.2.1.1.- Método de peso-constante

La figura 31, es una representación esquemática del aparato utilizado. Este está diseñado para aplicar a un segmento de la fibra óptica un peso-constante, utilizando para ello una pesa determinada por las características de la fibra óptica.

En un brazo mecánico con un movimiento libre se coloca el peso-constante; este brazo está unido a una polea por donde pasa la fibra óptica, impartiendo de esta manera una fuerza de tensión homogénea (7).

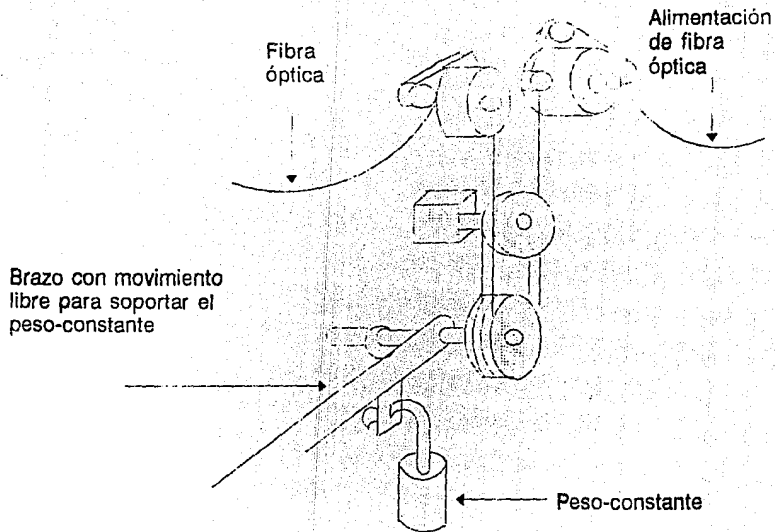


Figura 31. Aparato para caracterización de la tensión en fibras ópticas, método llamado peso-constante (226)

La tensión está determinada por la magnitud del peso que soporta el segmento de la fibra óptica.

Este método se aplica a lo largo de toda la longitud de la fibra óptica proveniente de un carrete.

Este método presenta algunos errores en las mediciones de la tensión, ya que la inercia del brazo en su movimiento libre puede producir medidas erráticas más allá del punto de referencia. También en esta prueba el peso-constante es sensible a las variaciones en el diámetro que la fibra óptica pudiera tener.

Se sabe empíricamente que 1% de variación en el diámetro produce 2% de variación en el valor de la tensión (226).

En algunas ocasiones esas variaciones e inestabilidades producen la ruptura de la fibra óptica. Por lo que se requiere de condiciones de alta estabilidad, difíciles de lograr para que la fibra óptica sea examinada correctamente por este método.

#### 6.7.1.2.- Método de estiramiento-constante

Es una alternativa de medición de la tensión para la fibra óptica, diseñado para condiciones estables y con una menor sensibilidad a las variaciones en el diámetro de la fibra óptica.

La aplicación del peso-constante en este método, se realiza por medio de un arrendo denominado estiramiento-constante, como se ve en la figura 32.

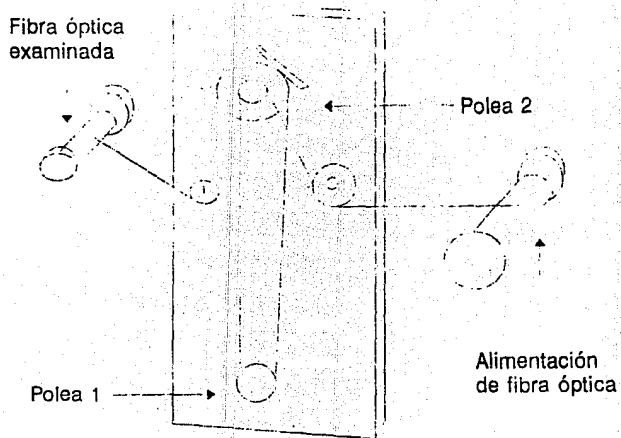


Figura 32. Ilustración del método de estiramiento-constante para caracterizar la tensión en fibras ópticas ( 226 )

El avance de la fibra óptica se efectúa mediante dos poleas. La primera tiene una velocidad menor que la segunda a fin de asegurar que no ocurran deslizamientos entre ellas. La segunda polea debido a su mayor velocidad estira la fibra óptica de manera controlada y con ello se produce una tensión uniforme sobre la fibra óptica (7) (226).

Si  $V_2$  es la velocidad de la segunda polea y  $V_1$  es la velocidad de la primera polea, entonces la tensión (T) en la fibra óptica es igual a la diferencia de velocidades entre las poleas dividida por la velocidad inicial y expresada por:

$$T = \frac{(V_2 - V_1)}{V_1} \dots\dots\dots 18$$

### 6.2.2.- Fátiga estática

La fátiga estática en las fibras ópticas es un parámetro muy importante pero su medición es difícil, ya que además de los factores perturbadores en la manufactura como son tensiones no controladas y fricciones con otras fibras ópticas, etc., se debe tomar en cuenta los factores ambientales, calidad de la materia prima, etc.

La fatiga estática es relacionada con el tiempo de vida útil de una fibra óptica. A partir de datos experimentales se han construido modelos matemáticos que permiten determinar el tiempo de vida útil ( $t_f$ ), considerando las variables fundamentales de las cuales depende (9) (184), de acuerdo a la expresión:

$$\ln t_f = - n \ln \sigma_a + \ln k_a \dots\dots\dots 19$$

donde:

$\sigma_a$  = tensión del cable óptico requerido en su aplicación

$n$  = constante dependiente del tipo de material

$k_a$  = constante dependiente de las condiciones ambientales

## Capítulo VII

### 7.- Cableado

En cualquier aplicación individual de las fibras ópticas, éstas necesitan ser incorporadas en algún tipo de cable.

La estructura del cable varía ampliamente dependiendo de su colocación, ya sea subterránea, en edificios, en postes ó cableado submarino.

Los avances en la manufactura de los cables ópticos han logrado que se facilite su instalación y manejo como si fuesen cables convencionales (9).

Como las fibras ópticas formarán un cable se debe tener en cuenta una propiedad mecánica importante que restringe el uso de cualquier cable, la carga axial permisible. Este factor determina la longitud del cable que puede ser instalado sin riesgo de ruptura.

7.1.- Las funciones del cableado óptico, se pueden resumir:

1.- Protección de la fibra óptica. La principal función del cableado es la de proteger la estructura de la fibra óptica contra daños y rupturas durante la instalación y hasta el fin del ciclo de vida útil de la fibra óptica (22).

2.- Estabilidad en la transmisión. El cableado minimiza la atenuación, ya que evita la deformación que sufre la fibra óptica por la tensión que soporta durante sus aplicaciones (22).

3.- Tensión del cable. Limita la longitud del cable y por tanto sus aplicaciones, ya que prevé las condiciones mecánicas de compresión y de elasticidad adecuadas para cada instalación (167).

4.- Identificación y conexión. Esto es especialmente importante para un cable que utiliza un número grande de fibras ópticas.

## 7.2.- Empalme

Esta etapa es muy relevante debido a que la protección que se debe de dar a la cantidad de información transmitida en forma de rayos de luz que será transportada por un cable empalmado a otro. Para ello se requiere que sean compatibles en sus características como tamaño del núcleo, índice de refracción, etc. lo que permite una transmisión uniforme aún en las uniones (163).

El empalme se puede efectuar en dos formas:

7.2.1.- Empalme por fusión. Se realiza por la fusión de los extremos de los cables ópticos a empalmar por medio de una descarga eléctrica de dos electrodos, como se muestra la figura 33 (19).



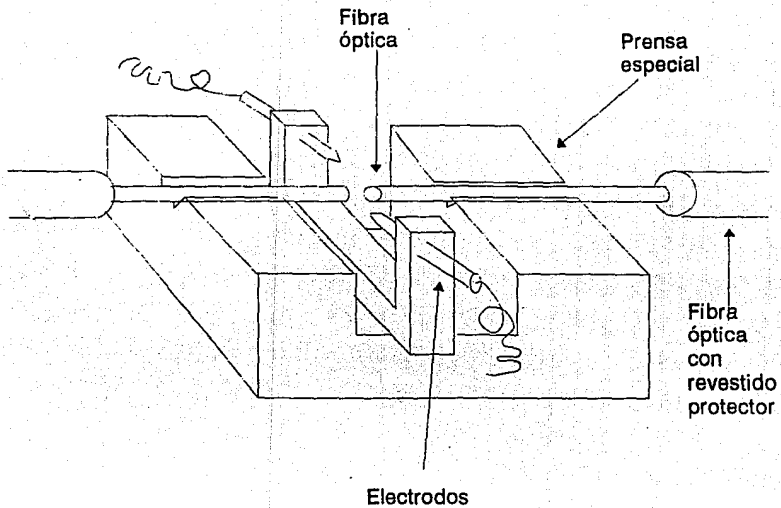


Figura 33. Aparato para la conexión de fibras ópticas por medio de fusión ( 7 )

7.2.2.- Empalme conectado. Los extremos de los cables ópticos a unirse son colocados y sellados herméticamente por una especie de cople especial por lo que se debe tener sumo cuidado en el alineamiento de los extremos. La figura 34 ilustra este procedimiento que normalmente no se utiliza por la razón de que los sellos a pesar de ser herméticos presentan ciertas fugas lo que degrada la señal provocando pérdidas en la información transmitida (7).

### 7.3.- Aplicaciones de las fibras ópticas

Las fibras ópticas tienen diversas ventajas sobre los medios convencionales de transmisión metálicos, como son sus diámetros pequeños, flexibilidad, capacidad de transmisión, mínima interferencia electromagnética y mínima atenuación. Por consiguiente, son rápidamente aprovechadas en diversas áreas de la comunicación (201).

Actualmente las fibras ópticas hechas de sílica, son usadas primordialmente en sistemas de transmisión a grandes distancias, transmisión submarina y telefonía por permitir una alta capacidad de transmisión de información. Por otro lado, las fibras ópticas hechas de plástico y de multicomponentes son utilizadas en aplicaciones para cortas distancias (164) (201).

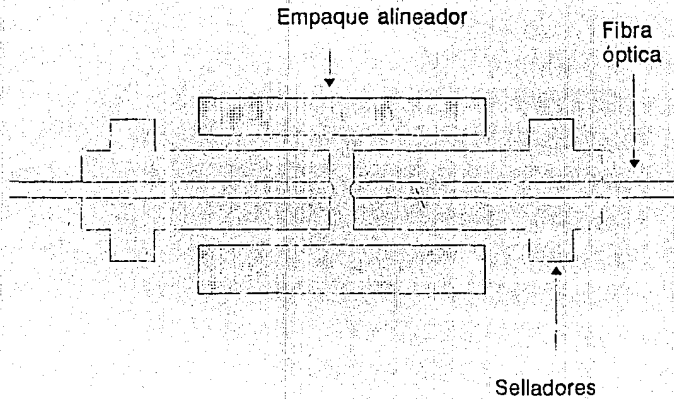


Figura 34. Tipo de cople especial para la conexión de fibras ópticas ( 7 )

**7.3.1.- Telecomunicaciones.** Las aplicaciones en telecomunicaciones han sido la más exitosas en términos del volumen de producción e ingresos.

La necesidad de utilizar cada día circuitos de comunicación con alta capacidad de alcance en ciudades congestionadas y con espacios cada vez más reducidos permitió la aplicación inicial del cableado óptico para comunicación en inter-oficinas (203), desarrollándose rápidamente para otras aplicaciones como lo son alarmas (196), teléfonos, telefacsimil y varias clases de control remoto (203).

Como la fibra óptica tiene una gran capacidad de transmisión de datos, de voces y de videos. Con lo que su aplicación en el hogar se hizo común.

**7.3.2.- Redes.** El cable óptico se emplea también para formar redes de sistemas llamados áreas de redes locales (LANs). Por razones económicas, en la actualidad el uso de LANs puede mejorar la comunicación reduciendo el volumen de cableado metálico. Y aumentando la eficiencia en equipos por ejemplo en instalaciones computarizadas que trabajan a control remoto (7).

Los LANs han sido exitosamente instalados en oficinas, en edificios, la industria y defensas militares.

7.3.3.- **Industriales.** Las aplicaciones industriales son diversas, control de procesos, automatización y manejo de energía ó combustibles, etc.

Las aplicaciones para control de procesos son en petroquímica, nuclear y en alimentos.

Las aplicaciones para automatización de manufactura son para máquinas de control numérico y de los sistemas de datos en grandes cantidades (9).

Las aplicaciones para administración de energía ó combustibles tanto en aviones, carrateras, muelles, ferrocarriles, transportación y distribución de gas y gasolina.

Si bien, los porcentajes de información necesarios para cada tipo de aplicación son bajos en comparación con la capacidad de transmisión de la fibra óptica, en estas aplicaciones ofrecen mejores ventajas utilizarlas que emplear sistemas de cable electrónico (9) (7).

7.3.4.- **Computación.** La aplicación en computación es la otra parte de las aplicaciones industriales de las fibras ópticas, ya que el cableado óptico es adaptado para enlaces internos que demandan una alta capacidad de transmisión de datos ó videos (165).

Equipos auxiliares demandan un porcentaje menor de transmisión y por consiguiente se pueden ser utilizados ya sea cable óptico ó metálico. sin embargo, el cable óptico ofrece una ventaja adicional en la red a larga distancia por su operación casi libre de error, porque la disminución en el tamaño del cable óptico no es afectado por disturbios electromagnéticos, por tal razón es usado para la fabricación de microcircuitos para computadoras (197).

7.3.5.- Militares. Esta aplicación es reciente pero muy efectiva en defensas militares de los países industrializados.

Se basa en tres atributos que son: seguridad, mínima interferencia debido a ondas electromagnéticas y cantidad ó carga de luz.-

Las fibras ópticas son usadas para adaptaciones a equipos de comunicación de aviones, reduciendo enormemente su peso por la sustitución de cableado metálico por cableado óptico, con lo cual se incrementa el poder de transmisión de datos, señales, etc., con un mínimo error que casi desaparece.

Por tal razón su uso se ha extendido para la fabricación de aviones espías, aviones de combate, vehículos espaciales y aviones de bombardeo (165) (7).

La comunicación entre submarinos, aviones y vehículos tanto terrestres como espaciales con centrales (165) de mando y entre ellos mismos, es coordinando por medio de LANs, así como también las bases de misiles.

7.3.6.- Medicina. En el campo de la medicina hay dos tipos de aplicación de fibras ópticas.

El primero, es un sistema LANs que satisface la comunicación necesaria en los hospitales, y va desde la conservación de datos de pacientes, hasta el manejo de energía y recursos financieros.

El segundo, es el uso en equipo de diagnóstico y como detectores (162).

En general los sistemas de detectores consisten de un modulador electrónico, cabeza del detector y un cable óptico.

La cabeza del detector sensible al parámetro especificado influye en la señal óptica que transporta el cable, produciendo un cambio el cual es registrado y decodificado por la unidad de control que lo realiza automáticamente, dando el resultado en una pantalla (197) (162).

La flexibilidad mecánica y tamaño pequeño que se puede lograr en las fibras ópticas permite su incorporación en detectores disminuyendo el tamaño y con lo cual se pueden efectuar determinadas mediciones de parámetros dentro de tejidos, órganos y venas, que serían muy difíciles de lograr por detectores utilizando cableado metálico (9) (197).

Las aplicaciones más importantes en biomedicina son:

- 1.- Detectores para temperaturas, presión y flujo de sangre.
- 2.- Detectores para monitorear saturación de oxígeno, pH y concentraciones de dióxido de carbono.
- 3.- Detectores para reacciones de pruebas ó ensayos de inmunidad.

Otros usos son en endoscopios (202) y rayos laseres (204).



## Conclusiones

Las fibras ópticas del tipo de índice-graduado son las adecuadas en la actualidad para los sistemas de telecomunicaciones, ya que ofrecen las mejores propiedades para este uso por los altos rendimientos obtenidos de su poder de transmisión, lo que aún en los otros tipos de fibras no se ha logrado explotar de manera semejante.

La fabricación de fibras ópticas eutécticas ofrece una alternativa poco probable, ya que sus propiedades para transportar la información en rayos de luz produce alteraciones en su constitución provocando la pérdida de información, además de su costosa manufactura.

El empleo del vidrio en la elaboración de fibras ópticas se ha preferido por la gran calidad y funcionalidad obtenida. Actualmente la propuesta de emplear materiales plásticos proporciona una alternativa promisoriosa ya que, si no son tan eficaces como las elaboradas con vidrio, abaten los costos en producción. Y logran mayores avances para mejorar su funcionalidad. Esto se basa en las combinaciones de nuevos materiales que pudieran, en dado caso, sustituir a los materiales inorgánicos.

La elección del proceso para la fabricación de fibras ópticas debe basarse en criterios científicos y administrativos, porque todas las alternativas existentes ofrecen ventajas y desventajas en su empleo. Por tal motivo, es necesario asesorarse de las personas idóneas para elegir el proceso conveniente pues cualquiera de ellos ha demostrado ser rentable.

Una propuesta surgida de esta investigación, es el empleo de procesos de depósito de vapor químico utilizando plasmas. Estos son los más eficaces para la elaboración de este tipo de fibras; si bien son costosos, la alta eficiencia obtenida provoca que sean muy rentables.

Con la sustitución del cable metálico por el cable óptico, se ha logrado mejorar satisfactoriamente la alta demanda en las redes de comunicación, ello eleva la cantidad de líneas por cable y reduce las pérdidas en la transmisión de información, menor peso en las instalaciones y conexiones en cualquier aplicación.

Su empleo se recomienda en la manufactura de aparatos complicados o donde por el tamaño necesario para la ejecución de algún tipo de examen, hace que sea preferido en lugar del cable metálico.

Los procesos de fabricación de fibras ópticas avanzan cada día más tratando de disminuir el costo alto de productividad. Para mejorar las telecomunicaciones también se han empleado para otros usos; en medicina, por ejemplo, se usan como detectores para medir cantidad de oxígeno en la sangre, eliminar trombos en la corriente sanguínea, etcétera, donde el empleo de cable metálico no ofrece las ventajas del cable óptico.

México es usuario de la tecnología de fibras ópticas a pesar de que la producción nacional es pequeña. Los procesos de fabricación de otros materiales electrónicos son poco conocidos en cuanto a su diseño y manejo por el ingeniero químico, a pesar de su importancia, lo que se explica por lo incipiente de la industria electrónica nacional; sin embargo, se deben formar recursos humanos en este campo, representativo de un sector industrial importante desde el punto de vista técnico y comercial.

## Bibliografía

- (1) J. T. Turr; Ma. R. M. Jiménez, Todo sobre Las Fibras Opticas  
Editorial: Marcombo. Impreso en España (1989), pp. 1-45
- (2) J. Tyndall, Proc. R. Inst. G. B., 1,446 - 449(1854)
- (3) A. G. Bell, Electrician, 5,214-220(1880)
- (4) U. S. patente 235199, 7,diciembre,1880
- (5) D. Hondros; P. Debye, Annu. Phys. 32,3 - 25(1910)
- (6) O. Schriever, Ibid., 63,7-13(1920)
- (7) Enciclopedia de la Industria Química, A10,433 - 450(1987)
- (8) T. H. Maiman, Nature (london), 187, 493 - 495(1960)
- (9) Enciclopedia de Ciencia Física y Tecnología,  
Vol. 9, 605 - 629(1987)
- (10) W. A. Gambling, IEE Proc. Part. J, 133[3],205 - 210(1986)
- (11) K. C. Kao; G. A. Hockham, Proc. IEE, 133[7], 1151-1158(1966)
- (12) S. Kawakami; H. Nishizawa, IEEE Trans. MTT-16[10], 814-818  
(1968)
- (13) M. E. Lines, Science 226, 663-668(1984)
- (14) Enciclopedia de la Ciencia de Polimeros e Ingeniería,  
Editorial: John Wiley & Sons. Impreso en Estados Unidos  
(1990). Vol. 1, 392-393
- (15) F. P. Kapron; D. B. Keck; R. D. Maurer, Appl. Phys. Lett.  
17, 423-426(1970)
- (16) P. C. Schultz, Proc. of the IEEE, 68[10], 1187-1190(1980)
- (17) T. Izawa; N. Inayagi, Proc. of the IEEE, 68[10], 1184-1186  
(1980)
- (18) J. B. MacChesney; P. B. O'Conner; H. M. Presby, Proc. of  
the IEEE, 62, 1280-1281(1974)

- (19) J. B. MacChesney, Proc. of the IEEE, 68, 1181-1184(1980)
- (20) K. J. Beales; C. R. Day; A. G. Dunn; S. Portington, 68, 1191-1194(1980)
- (21) J. W. Fleming, Phys. S. Fiber Opt. Adv. Ceram. Vol. 2, 21-35 (1981).
- (22) F. Wolf, Handbook of the Fiber Optics. Editorial: Granada. Impreso en Estados Unidos (1979). pp. 6-122
- (23) B. H. Stewart, Glass, 67[7], 260-262(1990)
- (24) P. D. Stewart, Fiber Optics. Editorial: Plenum Press, New York. Impreso en Estados Unidos (1985). pp. 10-33
- (25) M. Monorie, Phys. Scripta, T-29, 218-222(1989)
- (26) J. C. Daly. Fiber Optics. Editorial: CRC Press. Inc. Impreso en Estados Unidos (1986). pp. 22-48
- (27) J. Bronw, Appl. Opt. 26, 4846-4849(1987)
- (28) Y. Manaba; N. Suzuki; T. Suzuki, Jpn. J. Appl. Phys. 21[3], 539-542(1982)
- (29) J. D. Parsons; A. S. Yue, J. of Cryst. Growth, 55, 470-476(1981)
- (30) J. M. Senior. Optical Fiber Communications. Editorial: Prentice-Hall Internacional. Impreso en Estados Unidos (1985). pp. 112-132
- (31) J. P. McClymer, Rev. Sci. Inst. 61[7], 2001-2002(1990)
- (32) E. L. Safford, Introducción a la Fibra Optica y al Laser. Editorial: Paraninfo. Impreso en España (1988). pp. 28-30
- (33) G. A. C. M. Spierings; C. M. G. Jochem; T. P. M. Meeuwsen; G. E. Thomas, J. Am. Ceram. Soc. 67[10], 657-663(1984)

- (34) R. Yamauchi, Jpn. patente 02,133,333[90,133,333] (1990)
- (35) Y. Komura, Jpn. patente 02,153,836[90,153,836] (1990)
- (36) Y. Oga, Jpn. patente 02,145,449[90,145,449] (1990)
- (37) T. Sato, Jpn. patente 02 34,535[90 34,535] (1990)
- (38) M. Saito, Jpn. patente 02,129,039[10,129,039] (1989)
- (39) T. Kitagawa, Jpn. patente 02,199,033[90,199,033] (1991)
- (40) R. Yamauchi, Jpn. patente 02,113,205[90,113,205] (1991)
- (41) T. Miller, U.S.A. patente 4968339 (1989)
- (42) H. Nagai, Jpn. patente 02 80,344[90 80,344] (1990)
- (43) K. Uchida, PCT Int. Appl. WD 90,01,020 (1990)
- (44) K. Yoshikawa, Jpn. patente 02 38,343[90 38,343] (1989)
- (45) H. Hasegawa, Jpn. patente 01,261,243[89,261,243] (1989)
- (46) A. Watanaba, Jpn. patente 02 88,448[90 88,448] (1990)
- (47) O. Kondo, Eur. Pat. Appl. EP 396,566 (1991)
- (48) T. Purser, PCT Int. Appl. WD 89 09,889 (1990)
- (49) T. Arai; K. Taniguchi, Sumitomo Kinzoku, 42[4], 384-393  
(1990)
- (50) A. Kurita, Jpn. patente 02,153,970[90,153,970] (1990)
- (51) H. Izutsu, Jpn. patente 02 75,662[90 75,662] (1990)
- (52) K. Tsamura, Jpn. patente 02,158,631[90,158,631] (1990)
- (53) H. Nishimoto, Jpn. patente 01,313,506[89,313,506] (1989)
- (54) F. K. Drain, U.S.A. patente 4837295 (1989)
- (55) M. J. Rooks; H. V. Rousell, Appl. Opt. 29[27],  
3880-2882(1990)
- (56) T. Yamamoto, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 122( Fiber  
Mater. Proc. ), 235-245(1990)

- (57) K. Yoshino; T. Kuwabara, Jpn. J. Appl. Phys. Part. 2  
29[8], L1515-L1516(1990)
- (58) O. Saito, Jpn. patente 01,286,940[89,286,940] (1990)
- (59) T. Abe, Jpn. patente 02,111,903[90,111,903] (1990)
- (60) K. Sugihara, Jpn. patente 02 46,401[90 46,401] (1990)
- (61) K. Ozawa, Jpn. patente 02 32,174[90 32,174] (1989)
- (62) H. Yagya, Jpn. patente 01,267,604[89,267,604] (1989)
- (63) M. Yokoshima, Jpn. patente 02 38,409[90 38,409] (1990)
- (64) A. Kawachi, Jpn. patente 01 76,933[89 76,933] (1989)
- (65) R. Yamauchi, Jpn. patente 02,133,333[90,133,333] (1990)
- (66) Ch. Le Sergent, U.S.A. patente 1952225 (1989)
- (67) H. Osanai, Extended Abstr., Fall Meet. Electrochem. Soc.  
367-369(1978)
- (68) D. N. Payne, Electron. Lett., 10, 289-290(1974)
- (69) R. G. Sommer, Electron. Lett., 12[16], 408-409(1976)
- (70) L. G. VanUitert, Mat. Res. Bull., 8, 469-476(1973)
- (71) J. B. MacChesney; J. R. Simpson, Proc. 10<sup>th</sup> Int.  
Congr. Glass, 6-44(1974)
- (72) J. B. MacChesney; H. M. Presby, Proc. IEEE 62[9],  
1278-1279(1974)
- (73) A. Mahlick, 1<sup>st</sup> European Conf. Opt. Fiber Commun.,  
235-576(1975)
- (74) Anuario estadístico del Comercio Exterior de los Estados  
Unidos Mexicanos. ( Datos obtenidos de Secofi ).
- (75) T. Izawa; N. Shibata, Appl. Phys. Lett. 31[11], 33-35  
(1977)

- (76) T. Miya; C. Teranuma, Electron. Lett. 75[4], 106-108  
(1979)
- (77) F. Hanawa; B. Sudo, Electron. Lett. 16[18], 699-700  
(1980)
- (78) P. Borshchagouski, Sverkhprovodimost : Fiz. Khim., Tekh,  
2[11], 28-30(1989)
- (79) M. Bedarida, J. of Cryst. Growth, 79, 43-46(1986)
- (80) B. Elwenspoek, J. of Cryst. Growth, 87, 375-377(1988)
- (81) G. Keiser, Optical Fiber Communications. Editorial:  
McGraw-Hill. Impreso en Estados Unidos (1984). pp. 182-233
- (82) A. Olshansky, J. Appl. Phys. 47, 4497-4499(1976)
- (83) P. M. Millar, J. Chem. Edu. 57[8] 574-579(1980)
- (84) P. Buchmann, Pure & Appl. Chem. 57[9], 1299-1310(1985)
- (85) W. C. Fernelius; W. Harold, J. Chem. Edu. 59[3],  
198-200(1982)
- (86) D. W. Schicketans, Appl. Opt. 29[27], 3916-3920(1990)
- (87) G. Tanaka, Jpn. patente 01 93,433[89 93,433] (1989)
- (88) G. Tanaka; H. Sugauma, Jpn. patente 01 93,434[89 93,434]  
(1990)
- (89) G. A. C. M. Spiering, J. Am. Cer. Soc. 65[9],  
245-250(1982)
- (90) A. Cherin. Introduction to Optical Fiber. Editorial:  
McGraw-Hill. Impreso en Estados Unidos (1983). pp. 159-265
- (91) K. Koizumi, Appl. Opt. 13, 225-228(1974)
- (92) Enciclopedia del Vidrio, Cerámica y Cemento (1985)  
Vol. 3, 264-286



- (93) Y. Oga; S. Ishikawa, Jpn. patents 02,153,835[90,153,835]  
(1991)
- (94) A. Harrison, U. S. A. patents 4602926 (1990)
- (95) Microelectronics Proc. Chem. Eng. Asp. J. Klaus;  
D. W. Hess. (1989)
- (96) J. A. Venables, M. Rep. Prog. Phys. 47, 399-459(1984)
- (97) G. H. Gilmer, J. G. Anna. Rev. Mater. Sci.  
46, 487-516(1986)
- (98) R. Kern, J. J. Curr. Topics Mater. Sci.  
3, 139-419(1979)
- (99) M. Vander Eerden, Crystals 9, 115-144(1983)
- (100) A. Malhukan, Rev. Solid. State Mater. Sci.  
14, 1-130(1988)
- (101) W. R. Smith, Ind. Eng. Chem. Fund. 19, 1-10(1980)
- (102) C. W. White, AIChE J. 27, 466-471(1981)
- (103) J. Bloem, Current. Topics in Mater. Sci.  
1, 147-242(1978)
- (104) M. B. Panish, Prog. Solid. State Chem. 7, 39-83(1972)
- (105) G. B. Stringfellow, J. of Cryst. Growth 27, 21-34(1974)
- (106) M. K. Alam, Aerosol Sci. Tech. 5[2], 237-248(1986)
- (107) B. S. Magerson, Appl. Phys. 61, 785-787(1987)
- (108) J. Troe, J. Phys. Chem. 83, 114-126(1979)
- (109) K. F. Roenigk, J. Phys. Chem. 91, 5731-5732(1987)
- (110) K. F. Roenigk, J. Phys. Chem. 92, 4254-4259(1988)
- (111) J. M. Jasinski, Anna. Rev. Phys. Chem. 38, 109-140(1987)
- (112) M. Rosenberger, Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. on CVD (1987)

- (113) Y. Komura; K. Tekenchi, Jpn. patents  
02,153,836[90,153,836] (1990)
- (114) A. Takeshi; U. Yoichi, Appl. Phys. Lett. 31[3],  
174-176(1977)
- (115) A. Takeshi; U. Yoichi, Appl. Phys. Lett. 31[8],  
515-517(1977)
- (116) H. Tamonori, Jpn. patente 02 88,445[90 88,445]  
(1989)
- (117) R. Suzanne; J. B. Nagel; J. McCheesney, J. of Quant. Elect.  
QE-18[4], 459-474(1982)
- (118) D. L. Myers; F. P. Partue, The Bell Syst. Tech. J.  
57[6], 1735-1744(1978)
- (119) T. Wakita, Jpn. patente 01 76,926[89 76,926] (1989)
- (120) W. G. French, Anna. Rev. Mater. Sci. 5, 373-394(1975)
- (121) H. Walker, J. Am. Cer. Soc. 63[1-2], 96-102(1980)
- (122) X. Feng, Ceram. Trans. 9(Nucl. Waste Manage 3),  
457-468(1990)
- (123) D. Marcuse, Appl. Opt. 18[12], 2073-2080(1979)
- (124) J. A. Lewis, J. Fluid Mech., 81[1], 129-135(1977)
- (125) J. Kirchoff, Phyu. Status Solidi, 60, 127-131(1980)
- (126) F. T. Gayling, J. Appl. Mech., (submitted to)
- (127) R. B. Runk, Extended Abstr., Fall Meet Electrochem.  
Soc., 365-366(1978)
- (128) V. V. Vysochin, Steklo Keram. 19[7], 13-15(1990)
- (129) R. B. Feigelson, J. of Cryst. Growth 79, 669-680(1986)
- (130) Y. Ouchi, Jpn. patents 02,157,135[90,157,134] (1990)

- (131) K. Yokagawa; K. Kanya Jpn. patente 02,192,426[90,192,426]  
(1990)
- (132) K. Ooki, Jpn. patente 02,124,735[90,124,735] (1990)
- (133) K. Shimoto, Jpn. patente 02,124,736[90,124,736] (1990)
- (134) Y. Oga; H. Kamumori, Jpn. patente  
02,145,449[90,145,449] (1990)
- (135) M. Takagi; H. Yakota, Jpn. patente  
02,160,636[90,160,636] (1990)
- (136) M. Saito, Jpn. patente 02,129,040[90,129,040] (1991)
- (137) T. Danzuka, Jpn. patente 02,102,146[90,102,146] (1990)
- (138) S. Fukutami, Nippon Seramikhua Kyokai Gakajutsu  
Ronbunshi 98[7], 679-686(199)
- (139) D. R. Powers, J. Amer. Ceram. Soc. 61[7-8], 295-297(1978)
- (140) W. G. French; L. J. Pace, Proc. Int. Conf. Integ. Opt.  
C 1-2, 379-382(1977)
- (141) R. D. DeLuca, U. S. A. patente 3932454 (1976)
- (142) R. D. Power, U. S. A. patente 4165223 (1976)
- (143) H. Okano, Jpn. patente 01,111,747[89,111,747] (1989)
- (144) I. Kondo, Jpn. patente 02 55,241[90 55,241] (1991)
- (145) S. Nemoto, Jpn. patente 02 51,438[90 51,438] (1991)
- (146) P. Jaeger; J. McChesney, The Bell Syst. Tech. J.  
57[11], 205-210(1978)
- (147) P. C. Schultz, Appl. Opt. 18[21], 3684-3693(1979)
- (148) A. Shermann, CVD for Elect : Noyes : Park Ridge, NJ. (1987)
- (149) D. W. Hees, Rev. Chem. Eng. 3, 97-186(1985)
- (150) C. M. Ablow, Combust. Sci. Tech. 22, 107-117(1980)
- (151) L. D. Pfeffate, Catal. Rev. Sci. Eng. 24, 219-264(1987)

- (152) S. V. Botirchov, Rev. Chem. Eng. 2, 175-237(1984)
- (153) D. E. Roemer, Electrochemical Soc. 88-84, 111-138(1988)
- (154) J. J. Carberry, Chemical Reaction & Reactor Eng. New York (1986)
- (155) G. D. T. Spiller, Rep. Prog. Phys. 47, 399-459(1984)
- (156) M. J. Cooke, Solid. State Tech. 25[12], 62-65(1982)
- (157) R. A. Levy, J. Electrochem. Soc. 134, 37C-49C(1987)
- (158) B. A. Joyce, Rep. Prog. Phys. 37, 363-399(1974)
- (159) R. M. Brefeld, J. of Cryst. Growth 77, 392-399(1986)
- (160) J. W. Matthews, J. Vac. Sci. Tech. 14, 989-994(1977)
- (161) J. Bloem, J. of Cryst. Growth 50, 581-604(1980)
- (162) Y. Sai, Keiso 27[4], 10-16(1984)
- (163) C. R. Kurkjian, Proc. Int. Conf. Lasers. (1985)
- (164) T. Bakai, Keiso 27[4], 34-39(1984)
- (165) P. Klima, Chem. Listy 79[12], 1256-1273(1985)
- (166) L. C. Barbosa, Cerámica 31[189], 197-200(1985)
- (167) M. Ogai; H. Hiramatsu, Proc. Int. Wire Cable Symp. 34<sup>th</sup> 92-96(1985)
- (168) P. J. Wells, PCT Int. Appl. 90 (1989)
- (169) J. Bluege, U. S. patente 4927790 (1988)
- (170) H. Zheng, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 172( Opt. Fiber Mater. Proc.), 265-270(1990)
- (171) R. Yamauchi, Jpn. patente 01 37,429[89 37,429] (1989)
- (172) G. F. William, J. Phys. Chem. 82[20], 2191-2194(1978)
- (173) K. Masao, Jpn. J. of Appl. Phys. 19[2], L69-L71(1980)
- (174) P. Guittner, Philips Tech. Rev. 44[8,9,10], 241-249(1989)

- (175) P. Geittner; M. Kuppers, Appl. Phys. Lett. 28, 645-646  
(1976)
- (176) P. Geittner; M. Kuppers, Proc. Conf. Opt. Fiber Comm.  
WG2, 90-91, New Orleans (1983)
- (177) P. Geittner; N. Hagemann, J. Lighthwave Tech. LT-4,  
818-822(1986)
- (178) H. Lydtin, J. Lighthwave Tech. LT-4, 1034-1038(1986)
- (179) E. R. Lory, Ceram. Trans. 11( Ceram. Thin Thick Films ),  
3-9(1990)
- (180) T Yoshida, Combust. Plasma Synth. High-Temp-Mater,  
328-329(1990)
- (181) R. Parosa, Proc. Anna. Int. Conf. Plasma Chem. Tech. 4<sup>th</sup>,  
159-163(1989)
- (182) Ch. LeBargent, Eur. Pat. Appl. EP 401742 (1990)
- (183) V. G. Artyushenko, Izu. Akad. Nauk. SSSR, Ser. Fiz.  
54[83], 1570-1573(1990)
- (184) P. J. Li, Optical Fiber Commun. Editorial: Tingye.  
Impreso en Estados Unidos (1988). pp. 179-209
- (185) M. Kawakami, Jpn. patente 02,153,848[90,153,848] (1990)
- (186) T. Yabuki, Jpn. patente 02 83,233[90 83,233] (1990)
- (187) H. Papamichael; I. Miaculis, Mater. Res. Soc. Symp. Proc.  
172(Opt. Fiber Mater. Proc.), 43-48(1990)
- (188) N. Uetsuka, Jpn. patente 02,197,804[90,197,804] (1990)
- (189) R. E. Frazee, Eur. Pat. Appl. EP 385623 (1989)
- (190) M. Mikami, Jpn. patente 02,145,460[90,145,460] (1990)
- (191) H. Hara, Jpn. patente 02 48,604[90 48,604] (1990)

- (192) H. Matsuda; T. Nonaka, Jpn. patente  
02 48,435[90 48,435] (1990)
- (193) W. G. French; A. D. Pearson, Ann. Rev. Mater. Sci.  
5, 373-393(1975)
- (194) R. F. Jeager, Ceram. Bull. 53[3], 270-273(1976)
- (195) F. V. DiMarcello; A. C. Hart, Electron. Lett. 14[8],  
578-579(1978)
- (196) J. Cholin, Chem. Eng. Prog. 85[7], 62-68(1989)
- (197) H. Vanghaus, Glastechn. Ber. 62[5], 175-181(1989)
- (198) R. H. Clark, J. Am. Ceram. Soc. 73[10], 2987-2991(1990)
- (199) L. V. Borisyuk, Opt. Mekh. Prom. St. [2], 47-49(1990)
- (200) G. Martini; S. Donati, J. Opt. Commun. 11[1], 22-25(1990)
- (201) L. Trasatti, Nucl. Inst. Methods Phys. Res., Sec. A.  
279[1-2], 354-358(1989)
- (202) V. G. Artyushenko, Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz,  
54[8], 1574-1580(1990)
- (203) H. Nishida; S. Shimomichi, Jpn. patente  
02,161,407[90,161,407] (1990)
- (204) V. I. Ofer, Fiz. Khim. Obrab. Mater. [3], 138-139(1990)
- (205) P. Pavlovic, Sklar Keram, 39[3], 71-74(1989)
- (206) U. Sakaguchi, Jpn. patente 01 24,045[89 24,045] (1989)
- (207) P. Lyons; L. Looney, Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.  
1174(Fiber Opt. Reliab. : Benign Adverse Environ. 3), 2-19  
(1989)
- (208) K. I. White. J. Phys. E : Sci. Instrum. 18, 813-820(1985)
- (209) G. Martini; S. Donati, J. Opt. Commun. 1[1], 22-25(1990)

- (210) M. E. Mills, Diss. Abstr. Int. B, 50(12, Pt. 1)  
5768-5769(1989)
- (211) E. W. Taylor; E. Joseph, J. Lightwave Tech. 8[6],  
967-976(1990)
- (212) E. Friebale; E. Joseph, J. Lightwave Tech. 8[6],  
977-989(1990)
- (213) R. G. Harrison, Phys. Rev. Lett. 65[2], 167-170(1990)
- (214) M. Dhadwal, Rev. Sci. Instrum. 60[5], 845-853(1989)
- (215) B. Cotter, J. Opt. Commun. 1, 10-19(1983)
- (216) E. J. Greer, Opt. Lett. 15[15], 851-853(1990)
- (217) B. V. Chernikov, Opt. Lett. 15[19], 1076-1078(1990)
- (218) B. Leache, Phys. Lett. A. 148[1-2], 84-88(1990)
- (219) M. Tateda, Kagaku Kogaku 54[7], 505-508(1990)
- (220) V. Da Silva; C. H. Cruz, J. Opt. Soc. Am. B : Opt. Phys.  
7[5], 750-753(1990)
- (221) G. Ghosh, Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng. 1230 ( Int.  
Conf. Optoelectron. Sci. Eng. ), 499-502(1990)
- (222) D. W. Schickelanz, Appl. Opt. 29[27], 3916-3920(1990)
- (223) B. Malo; K. A. Vinberg, Opt. Lett. 15[17], 953-955(1990)
- (224) S. Sakaguchi; Y. Hibino, J. of Mater. Sci. 19,  
3416-3420(1984)
- (225) J. E. Ritter; K. Jakus, J. Appl. Phys. 49[9], 4779-4782  
(1977)
- (226) D. L. Browning; R. Iyengo, J. Am. Ceram. Soc. 72[4],  
702-703(1989)
- (227) R. E. Madrano; G. Camilo, Cerámica 35[231], 39-41(1989)
- (228) M. F. Kirunko, Fiz. Khim. Stekla 16[4], 571-579(1990)

- (229) T. P. Dabbs; B. R. Lawn, J. Am. Ceram. Soc. 68[11],  
563-569 (1985)
- (230) M. J. Matthewson, J. Am. Ceram. Soc. 70[9],  
662-668 (1987)
- (231) R. A. Modavia; W. F. Love, NBS Special Publication 683,  
115-118 (1984)
- (232) D. L. Frantzen; G. W. Day, NBS Special Publication 643,  
213-215 (1982)
- (233) G. W. Day, NBS Special Publication 637[2], 122-126 (1983)
- (234) F. Alard, Electron. Lett. 17, 958-960 (1981)
- (235) L. A. Millar, Electron. Lett. 17, 458-462 (1981)