



**PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN ESPECTROSCÓPICA
EN PREFORMAS DE FOSFATO Y TELURIO DOPADOS CON Er^{3+}
PARA LA FABRICACIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS
AMPLIFICADORAS EN $1.55 \mu\text{m}$.**

Como Requisito Para Obtener el Grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS (OPTICA)

Presenta:
ING. HAGGEO DESIRENA ENRRIQUEZ

Asesor:
Dr. ELDER DE LA ROSA CRUZ

León Guanajuato, México 2004.



DEDICATORIA

A mi dador de vida, DIOS
A mi querido padre, Hernán Desirena Estudillo
A la familia Martínez García

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de llegar hasta esta etapa de mi vida y ser lo que soy hasta ahora.

Agradezco en gran manera a mi padre que me brindo todo el apoyo moral, económico y religioso, durante todo momento.

A mi asesor el Dr. Elder de la Rosa por haberme dirigido en el trabajo de tesis, por su paciencia, comprensión y su camaradería.

A Sandra Martínez por su amistad y por gran apoyo moral e incondicional que me brindo, durante mis estudios de maestría.

A la familia Martínez García por el apoyo incondicional que me brindaron en realización de mi tesis durante mi estancia en la ciudad de León.

Agradezco al sistema de becas CONACyT por el apoyo económico durante mis estudios de maestría en el CIO.

Al proyecto de grupo con numero G34629-E.

Al Dr. Rafael Espinosa por su gran apoyo incondicional y amistad que obtuve de él.

A mis compañeros José Luis Cabellos, Mauricio flores, Claudio Narciso, Daniel Aguayo, Cornelio Álvarez, con quienes pase momentos agradables.

A mis profesores, Luis Armando, Gonzalo Páez, Zacarías Malacara, Daniel Malacara Doblado, Ramón Rodríguez, Joel Villatoro, Alejandro Martínez, Uladzimir Minkovich, Amalia Martínez, Moisés Cywiak, Ricardo Flores, Antonio Meneses, Sergio Calixto,

A todos los compañeros y amigos con quienes tuve la fortuna de convivir en mi estancia en el CIO.

RESUMEN

En el presente trabajo se describe el procedimiento para obtención de preformas de fibras ópticas amplificadoras dopados con Er^{3+} . Haciendo énfasis en la matriz en donde se encuentra inmersa esta tierra rara, ya que de ella depende que este sea mas eficiente y un buen medio amplificador. En particular trabajamos con vidrios de fosfato y telurio dopados con Er^{3+} , en donde se analiza la emisión en $1.55 \mu\text{m}$, longitud de onda que corresponde al mínimo de atenuación en una fibra de sílice. La matriz de fosfato ofrece la gran ventaja de reducir el upconversion, y por consiguiente presenta mayor eficiencia. En el caso del telurio ofrece un mayor ancho de banda espectral, lo que se traduce en mayor capacidad de información por una fibra.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	v
INDICE DE GRAFICAS Y FIGURAS	viii
INDICE DE TABLAS	x
INTRODUCCION	1
CAPÍTULO 1: LAS FIBRAS ÓPTICAS	
1.1 Introducción	3
1.2 Composición	3
1.3 Propiedades	6
1.4 Reflexión interna total	8
1.5 Clasificación	11
1.6 Propagación de un señal.....	13
1.6.1 Las Ecuaciones de Maxwell	14
1.6.2 La Ecuación de onda.....	15
1.6.3 La Ecuación de onda en fibras de índice escalonado.....	17
1.6.4 Atenuación de la señal	20
1.6.5 Dispersión intermodal	22
1.6.6 Dispersión material o cromática.....	23
Referencia Bibliográfica	25
CAPÍTULO 2: FIBRAS ÓPTICAS DE SÍLICE	
2.1 Introducción	26
2.2 FO basadas en SiO ₂	26
2.3 Métodos de fabricación	27
2.3.1 Deposición Externa de Vapores (OVPO).....	28
2.3.2 Deposición Axial de Vapores (VAD)	28
2.3.3 Deposito modificada de vapores químicos (MCVD).....	29
2.3.4 Método Doble Crisol.....	30
2.4 Amplificadores a 1.55 um de SiO ₂ :Er ³⁺	32
2.5 Láseres de fibra dopadas con Nd ³⁺ , Yb ³⁺ , Er ³⁺	35

2.6 Emisión Visible con Fibras de Sílice	37
Referencia Bibliográfica.....	39

CAPÍTULO 3: FIBRAS ÓPTICAS ESPECIALES

3.1 Introducción.	41
3.2 Fibras ópticas a base de Halogenuros activadas con Er^{3+} , Nd^{3+} , Tm^{3+} , Pr^{3+}	41
3.3 Fibras ópticas a base de Calcogenuros activadas con Er^{3+} , Nd^{3+} , Tm^{3+} , Pr^{3+}	44
3.4 Fibras ópticas a base de Fosfato activadas con tierras raras.....	45
3.5 Fibras ópticas a base de Telurio activadas con tierras raras.....	47
Referencia bibliográfica	49

CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN ESPECTROSCÓPICA EN VIDRIOS DE FOSFATO Y TELURIO DOPADOS CON Er^{3+}

4.1 Introducción	51
4.2 Preparación de las muestras de Fosfato y Telurio con Er^{3+}	51
4.2.1 Matriz de Fosfato	52
4.2.2 Matriz de Telurio	57
4.3 Teoría de Judd-Ofelt	58
4.4 Calculo de los parámetros de Judd-Ofelt	61
4.4.1 Espectroscopia del Er^{3+} en matrices de fosfatos	62
4.4.2 Espectroscopia del Er^{3+} en matrices de telurio	79
4.5 Espectros de emisión.....	89
Referencia bibliográfica	94

CAPÍTULO 5: PREPARACIÓN Y FABRICACIÓN DE PREFORMAS

5.1 Introducción	95
5.2 Fabricación y composición de la preforma.....	95
5.3 Efectos de la temperatura y presión sobre la preforma.....	97

CONLUCIONES.....	101
------------------	-----

TRABAJO A FUTURO.....	101
-----------------------	-----

INDICE DE GRAFICAS Y FIGURAS

	Página
Figura 1.1 Figura de la estructura de una fibra óptica	3
Figura 1.2 Reflexión y refracción en una interfase con diferentes índices de refracción	8
Figura 1.3 Grafica del cambio de fase en la reflexión de las componente perpendicular (δ_{sn}) y paralela (δ_{pn}).....	9
Figura 1.4 Propagación de luz a través de una fibra óptica	10
Figura 1.5 Las tres principales configuraciones de fibra óptica y sus perfiles de índice a) Fibra de índice escalonado monomodo, b) Fibra de índice escalonado multimodo, c) Fibra de índice graduado multimodo....	12
Figura 1.6 Graficas de la funciones de Bessel utilizadas para calcular la condición de cortes de modos	19
Figura 1.7 Ensanchamiento y atenuación de dos pulsos adyacente viajando a través de una fibra	22
Figura 1.8 Variación de n en el índice de refracción como una función de la longitud de onda del cuarzo	23
Figura 2.1 Preparación de una preforma por el proceso OVPO	28
Figura 2.2 Maquina para el proceso de VAD	29
Figura 2.3 Diagrama esquemático del proceso de MCVD	30
Figura 2.4 Método del doble crisol.....	31
Figura 2.5 Diagrama de un amplificador básico.....	32
Figura 2.6 Figura de un láser de 3 niveles	32
Figura 2.7 Proceso de conversión hacia arriba en un fibra de sílice.....	34
Figura 2.8 Proceso de transferencia de energía del Yb^{3+} - Er^{3+}	34
Figura 2.9 Niveles de energía para el Nd^{3+}	35
Figura 2.10 Espectro de fluorescencia de una fibra de doble recubrimiento.....	36
Figura 3.1 Abertura numérica de una fibra de fosfato.....	46
Figura 3.2 Comparación de los espectros de fluorescencia del Er^{3+} en matrices de fosfato telurio, fluor y sílice	47
Figura 4.1 Figura 4.1 Espectro de absorción de las muestras de fosfato dopadas a distintas concentraciones de Er^{3+}	62

Figura 4.2 Diagrama de energías para los estados de absorción del Er^{3+} en una matriz de fosfato	62
Figura 4.3 Factor de calidad espectroscópica como función de la concentración de Er^{3+} en vidrios de fosfato.....	68
Figura 4.4 Espectro de absorción del telurio a diferentes concentraciones de Er^{3+}	79
Figura 4.5 Diagrama de energías para los estados de absorción analizadas del Er^{3+} en una matriz de telurio	79
Figura 4.6 Factor de calidad espectroscópica como función de la concentración de Er^{3+} en vidrios de telurio	82
Figura 4.7 Fotografía de la disminución de conversión hacia arriba en un vidrio de fosfato dopado con Er^{3+} , a) Dopado al 0.5%, b) Dopado al 3%	89
Figura 4.8 Espectro de fluorescencia a 1.55 μm en matriz de fosfato.....	90
Figura 4.9 Fotografía de la conversión hacia arriba en un vidrio de telurio dopado con Er^{3+} a) Dopado al 0.5%, b) Dopado al 3%	91
Figura 4.10. Proceso de conversión hacia arriba	91
Figura 4.11 Espectro de fluorescencia a 1.55 μm en matriz de telurio.....	92
Figura 4.12 Comparación de los Espectros de Emisión normalizados en fosfato y Telurio dopado con Er^{3+}	92
Figura 5.1 proceso de fabricación de la preforma.	96
Figura 5.2 Fotografía del horno que produce el calentamiento del molde de latón ...	96
Figura 5.3 Proceso final para el acabado de una preforma.....	97
Figura 5.4 Fotografías de preformas a) Aplicación de una temperatura de 410 °C, b) temperatura adecuada de 310 °C a la cual puede liberarse la preforma	98
Figura 5.5 Burbujas en el interior de la preforma	98
Figura 5.6 Cristalización y burbujas alrededor de la preforma	99
Figura 5.7 Disminución de burbujas en la preforma de fosfato	99
Figura 5.8 Preformas libres de burbujas, aplicando el efecto de temperatura y presión.....	100

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1 Parámetros que caracterizan a las fibras ópticas.....	4
Tabla 1.2 Comparación de la distancia entre repetidores para diferentes. medios de comunicación.....	6
Tabla 1.3 Ancho de banda en los diferentes tipos de cable	7
Tabla 1.4 Características y aplicaciones de los tipos de fibras	13
Tabla 1.5 Ceros de funciones de Bessel.....	20
Tabla 2.1 Dopantes utilizados en la fabricación de fibras	27
Tabla 3.1 Características de fibras láser fluoradas de ZBLAN dopadas con tierra rara. i: incidente, e: emitida y a: potencia de de bombeo por absorción uc: bombeo por upconversion.....	42
Tabla 3.2 Características de fibras ópticas amplificadoras de fluoruros y sulfuros. LD: diodo laser	43
Tabla 3.3 Composición química y propiedades físicas de algunos vidrios fluoruros, sulfuros y calcogenuros. Los índices de refracción están dados por (a):línea D del sodio, (b): 500 nm, (c): 10 μm	44
Tabla 3.4 Principales características de las fibras ópticas dopadas con tierra rara.....	46
Tabla 4.1 a) Compuestos disponibles para la formación de la matriz del fosfato. b) Compuestos principales de la red vítrea del fosfato.....	53
Tabla 4.2 Cantidad en gramos de cada compuesto para formar el vidrio de fosfato dopado al 0.5 mol % de Er^{3+}	56
Tabla 4.3 Código de Composición vítrea	56
Tabla 4.4 Cantidad de gramos de cada compuesto utilizado para formar el vidrio dopado al 1% Er^{3+} , 2% Er^{3+} , 3% Er^{3+}	56
Tabla 4.5 Código de composición vítrea para el telurio	57
Tabla 4.6. a) Compuestos disponibles para la formación de la matriz del telurio. b) Compuestos principales de la red vítrea	57
Tabla 4.7 Cantidad de gramos de cada compuesto utilizado para formar el vidrio dopado al 0.5% Er^{3+} , 1% Er^{3+} , 2% Er^{3+} , 3% Er^{3+}	58
Tabla 4.8 Parámetros ópticos e intensidad de las líneas observadas inducidas por transiciones dipolares eléctricas, medida experimentalmente	

y calculadas mediante los parámetros de Judd-Ofelt, para cada una de las muestras de fosfato bajo estudio a)PE05, b)PE1, c)PE2, d)PE3	63
Tabla 4.9 Elementos de la matriz reducida para transiciones posibles y su respectivo índice de refracción ajustado por la ecuación de Sellmeier	65
Tabla 4.10 Calculo de los parámetros de Judd-Ofelt a diferentes concentraciones de Er^{3+}	67
Tabla 4.11 Parametros de Judd-Ofelt para algunas matrices	68
Tabla 4.12 Intensidad de las transiciones posibles, probabilidad de decaimiento radiativo y razón de fluorescencia ramificada de líneas un estado superior a uno inferior observadas en las distintas muestras bajo estudio.....	69
Tabla 4.13 Tiempos de vida radiativo de los principales estados excitados del Er^{3+} de las muestras bajo estudio	78
Tabla 4.14 Parámetros ópticos e intensidad de las líneas observadas inducidas por transiciones dipolares eléctricas, medida experimentalmente y calculadas mediante los parámetros de Judd-Ofelt, para cada una de las muestras de telurio a)TE05, b)TE1, c)TE2, d)TE3	80
Tabla 4.15 Calculo de los parámetros de Judd-Ofelt a diferentes concentraciones de Er^{3+} en matriz de telurio	81
Tabla 4.16 Líneas de fuerza y probabilidades de decaimiento radiativo a)TE05, b) TE1, c)TE2, d)TE3	82
Tabla 4.17 Tiempos de vida radiativo de los estados excitados en vidrio de telurio a diferentes concentraciones Er^{3+}	88

INTRODUCCION

Con la invención de fibras ópticas de bajas pérdidas como medio de comunicación compitieron fuertemente con la tecnología de sistemas eléctricos. Sin embargo los amplificadores ópticos fueron esenciales para que este sistema de comunicación sea tan poderoso. En este tipo de amplificadores, los iones de tierra rara son introducidos como dopantes en el interior del núcleo de la fibra proporcionando dos niveles de energía (niveles inferior y superior de la transición láser) entre los que se producen transiciones de absorción y emisión, a la longitud de onda para la que se quiere conseguir amplificación. Para ello es preciso que domine la emisión estimulada frente a la absorción, lo que, en términos de niveles no degenerados, significa que en el nivel superior de la transición láser la población debe ser mayor que la que existe en el nivel inferior. La tierra rara más utilizada en amplificadores ópticos es el Er^{3+} debido a su emisión en $1.55 \mu\text{m}$, que corresponde a una ventana de comunicación donde existen menores pérdidas.

Actualmente existe el interés por elaborar amplificadores con mayor eficiencia ya que al ser excitados los iones Er^{3+} en el nivel $^4\text{I}_{11/2}$ nm, algunos electrones decaerán al estado base emitiendo a $1.55 \mu\text{m}$. Sin embargo otros subirán a un estado superior para después decaer y emitir en otra longitud de onda, típicamente en 546 nm . Este fenómeno es llamado *conversión hacia arriba* (Upconversion) y depende fuertemente de la matriz en el que se encuentre. Otro fenómeno a tener en cuenta, para conseguir un funcionamiento óptimo del amplificador, es la influencia de la concentración del dopante. A primera vista, parece más cómodo (por problemas de espacio) utilizar fibras cortas altamente dopadas, que fibras largas débilmente dopadas. Sin embargo esta opción deja de ser válida cuando se tiene en cuenta que las altas concentraciones provocan *quenching*, lo cual disminuye eficiencia del amplificador. Introduciendo iones de Er^{3+} en una matriz de fosfato, se logra disminuir conversión hacia arriba y a su vez aumentar la solubilidad de iones de tierras raras.

Por otra parte tenemos que la matriz de telurio logra aumentar el ancho de banda en los amplificadores ópticos, pero también presenta más conversión hacia arriba. Tomando en cuenta las características especiales de cada matriz es necesario hacer un compromiso para la elaboración del mejor amplificador.

En el capítulo I se menciona la teoría básica de las fibras ópticas, como su composición, propiedades y clasificación. En el capítulo II se describe ampliamente a las fibras de sílice, así como el método de fabricación, fibras dopadas con tierras raras y el fenómeno de conversión hacia arriba. El capítulo III se describe las fibras ópticas especiales, como los halogenuros, y los calcogenuros. Finalmente el capítulo IV y V se menciona la preparación y caracterización espectroscópica de las muestras de fosfato y telurio dopados con Er^{3+} , así como la fabricación de preformas para la elaboración de fibras ópticas amplificadoras.

CAPITULO 1

LAS FIBRAS OPTICAS

1.1 Introducción

La comunicación dio un gran paso con la invención de las fibras ópticas, ya que este tiene excelentes propiedades debido a las bajas pérdidas, su gran capacidad para transportar información, su pequeño tamaño y peso, su inmunidad a la interferencia electromagnética, su inigualable seguridad en la señal así como la abundante disponibilidad de las materias primas necesarias. El principio de funcionamiento de esta se basa en la reflexión total interna.

Las fibras podemos clasificarlas en monomodal y multimodal, las cuales se pueden distinguir fácilmente ya que el núcleo de la fibra multimodal es relativamente más grande que su revestimiento, esto lo hace que sea más sencillo introducir la luz, propagándose a través de toda la fibra con sucesivas reflexiones en el interior de la fibra.

1.2 Composición

Las fibras que son utilizadas para comunicación óptica son guías de onda hechas de dieléctricos transparentes, en donde su función principal es guiar la luz a través de grandes distancias. Una fibra óptica consiste de un cilindro interno llamado núcleo con un índice de refracción n_1 , rodeado por un cilindro de vidrio o de plástico de índice de refracción más bajo llamado revestimiento con índice de refracción n_2 , esto se puede observar en la figura 1.1

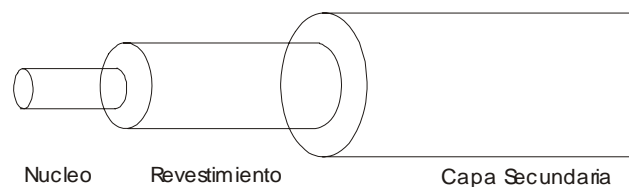


Figura 1.1 Figura de la estructura de una fibra óptica.

La diferencia entre los índices de refracción es lo que hace mantener la luz en su interior, siempre que el índice del núcleo sea mayor que la del revestimiento.

La fibra óptica esta caracterizada por dos parámetros, el diámetro y el índice de refracción del núcleo. Estos parámetros más las características de la señal guiada determinan la forma en que se propaga una señal luminosa a lo largo de la fibra óptica. En general, la capacidad que tiene una fibra óptica para transmitir información depende de tres características fundamentales:

1. Diseño geométrico de la fibra: determina el diámetro del núcleo y distribución o perfil del índice de refracción.
2. Propiedades de los materiales empleados en su elaboración: determinado por el índice de refracción del material utilizado.
3. Anchura espectral de la fuente de luz utilizada: depende del tipo de láser utilizado, cuanto más angosto mejor.

Existen diversos parámetros que caracterizan la calidad de las fibras ópticas y con ello su capacidad para transmitir información, estos parámetros se clasifican en la siguiente Tabla 1.1:

Tabla 1.1 Parámetros que caracterizan a las fibras ópticas.

Parámetros Estáticos	Ópticos	Apertura numérica Perfil del índice de refracción
	Geométricos	Diámetro del núcleo Diámetro del revestimiento Excentricidad No circularidad del núcleo No circularidad del revestimiento
Parámetros Dinámicos	Atenuación	Intrínseca a la fibra Por causas extrínsecas
	Dispersión Temporal	Dispersión modal Dispersión del material Dispersión por efecto de guiado

Parámetros Estáticos: Varían a lo largo de la fibra, pero son constantes en el sentido de que no cambian con el tiempo, dependen del proceso de fabricación y se refieren a las características ópticas y geométricas de la misma.

Entre las características ópticas figuran:

1. El perfil del índice de refracción, define el valor de índice de refracción en sentido radial y siendo la velocidad de la luz en cada punto función de dicho índice, dará lugar a diversas velocidades en diferentes puntos. Así, un perfil de índice de refracción constante (escalón) puede producir una mayor dispersión o ensanchamiento del pulso que transporta la información, con ello se reduce la calidad del sistema al reducir la velocidad de transmisión y aumentar el ruido en la información. El perfil del índice de refracción da lugar a una forma de clasificar a las fibras ópticas, fibras ópticas escalonadas y fibras ópticas con índice graduado o perfil parabólico.
2. La apertura numérica especifica la cantidad de luz que puede ser aceptada a un ángulo de incidencia determinado en una fibra, no necesariamente está ligada con la calidad de información correspondiente. La apertura numérica depende de la geometría, del diámetro del núcleo, del perfil del índice de refracción del núcleo y del valor del índice de refracción del recubrimiento, así como de la longitud de onda de la señal guiada.

Los parámetros geométricos (diámetros y excentricidades) están en función de la tecnología usada en la fabricación de las fibras, y las tolerancias correspondientes serán una consecuencia de la misma.

Parámetros Dinámicos: son características de la fibra que afectan la propagación de la señal a lo largo de la misma, son:

La atenuación, depende de la longitud de onda de la luz portadora de la información.

Esta atenuación puede ser:

- a. Intrínseca: Las pérdidas se presentan en el material puro cuando se ha alcanzado un estado de equilibrio térmico.
- b. Pseudointrínseca: Pérdidas debido a que no alcanzo el estado de equilibrio y al efecto de terminación molecular.
- c. Externa: Las pérdidas debido a las impurezas en la principal materia prima.
- d. Fabricación: Pérdidas atribuibles a la técnica de la formación de la fibra.

Las aplicaciones son muy diversas, desde la transmisión de datos hasta la conducción de la luz solar hacia el interior de edificios, o hacia donde pudiera ser peligroso utilizar la iluminación convencional por presencia de gases explosivos. También es utilizada en medicina para transmitir imágenes desde dentro del cuerpo humano y también para amplificadores y fibras láser.

1.3 Propiedades

Las principales ventajas de los sistemas de comunicación por fibras ópticas se pueden enumerar de la siguiente manera:

1. *Baja pérdida por absorción en un amplio rango de longitudes de onda ($<0.1\text{dB/Km}$).* Este hecho hace que la señal se pueda propagar una mayor distancia antes de requerirse la introducción de un repetido, es decir, la distancia entre repetidores será mayor que en los sistemas tradicionales, ver Tabla 1.2. Al tener menos repetidores se logra una mayor confiabilidad del sistema ya que se eliminan posibles puntos de error así como gastos de mantenimiento.

Tabla 1.2 Comparación de la distancia entre repetidores para diferentes medios de comunicación.

Medio	Distancia Entre Repetidores	Velocidad
Cable multipar	2-4 Km.	2 Mb/s
Cable coaxial	4-5 Km.	140 Mb/s
Cable óptico	25 Km.	140 Mb/s

2. *Ancho de banda amplio.* Esto implica que mediante el uso de fibras ópticas, más información puede ser enviada, de 200 MHz-Km. hasta 3 GHz-Km. en fibras ópticas multimodales y mayores de 3 GHz-Km. para fibras ópticas monomodales. La tabla 1.3, presenta una comparación entre anchos de banda.

Tabla 1.3 Ancho de banda en los diferentes tipos de cable.

Tipo de cable	Ancho de Banda	Conversaciones Simultaneas
Par sencillo	1 MHz-Km.	300
Coaxial	100 MHz-Km.	30,000
Óptico	100 GHz-Km.	30,000,000

- Tamaño y peso pequeños.* Con dimensiones entre 4-10 μm de diámetro para el núcleo en fibras ópticas monomodales, 50-200 μm de diámetro para el núcleo en fibras multimodales, 125 μm de diámetro para el revestimiento, para ambos tipos de fibra, y 1-3 mm de diámetro total con plástico de protección, las fibras ópticas son fáciles de manejar, caben en poco espacio además de resultar ligeras.
- Inmunidad a interferencias.* Una característica especialmente importante de las fibras ópticas se relaciona con su naturaleza dieléctrica. Como están hechas de vidrio resultan inmunes a la interferencia electromagnética, obteniendo así seguridad de alta calidad de transmisión, reducción de costos de protección contra ruido e instalación cercana a líneas de alta tensión.
- Aislamiento eléctrico.* Bajo esta característica, las fibras ópticas eliminan problemas de tierra, su instalación es segura en zonas peligrosas tales como en refinerías, además de otorgar seguridad contra descargas eléctricas.
- Abundancia del material base.* El principal componente de las fibras es la sílice o silicatos que se obtienen de la arena.
- Gran capacidad de crecimiento.* Por el poco espacio que ocupan, es posible utilizar cables con un alto número de fibras lo que da estos sistemas una gran versatilidad en cuanto a crecimiento del sistema.

Sin duda alguna, la mayor desventaja de las fibras ópticas son los costos en los procesos de terminación o conectorización de los sistemas, que están directamente relacionados al diámetro tan pequeño de las fibras. Los altos costos de los sistemas de comunicación óptica hacen inviable utilizarlos en redes pequeñas o por ejemplo en redes domésticas. Esta situación actualmente se intenta resolver con la utilización de

fibras de plástico que son de más baratas, aunque ciertamente de menor capacidad pero útiles para ciertas aplicaciones.

1.4 Reflexión total interna

Cuando un haz de luz que se propaga en un dieléctrico de índice de refracción mayor n_2 e incide sobre otro dieléctrico de índice de refracción menor n_1 forma un ángulo θ_i con la normal a la superficie entre ambos medios, parte del haz retorna al primer medio (haz reflejado) formando un ángulo θ_i con la normal (ley de la reflexión) y parte pasa al segundo medio, formando un ángulo θ_t con la normal (Ley de la Refracción), tal y como se observa en la figura 1.2. Conforme se va aumentando gradualmente el ángulo de incidencia θ_i respecto a la normal se llega al ángulo θ_c , con el cual todos los rayos son reflejados hacia el dieléctrico de índice mayor n_2 , a esto se le llama reflexión total interna.

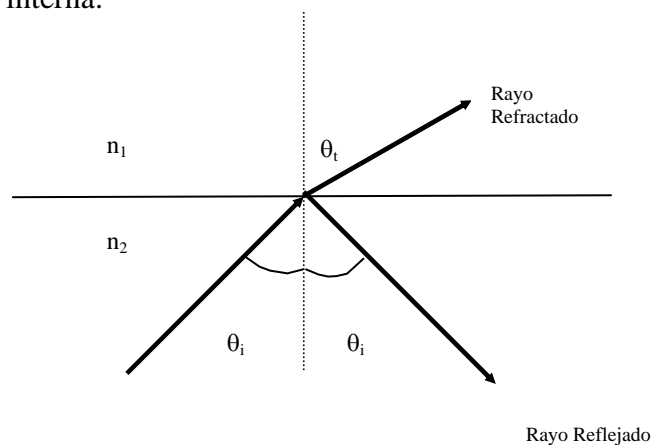


Figura 1.2 Reflexión y refracción en una interfase con diferentes índices de refracción

Así pues al crecer θ_i el rayo transmitido se aproxima gradualmente a la tangencia con la frontera conforme lo va haciendo, una mayor cantidad de la energía disponible va apareciendo en el haz reflejado. En el caso particular cuando el ángulo $\theta_t = \pi/2$ no existe un haz transmitido propiamente, sino que este se propagara en la interfase del dieléctrico. El ángulo de incidencia para el cual $\theta_t = \pi/2$ se llama ángulo crítico y viene dado por la fórmula.

$$\theta_c = \arcsen(n_1 / n_2) \quad (1)$$

En adición cuando la luz es totalmente reflejada un cambio de fase δ ocurre en la onda reflejada. Este cambio de fase depende del ángulo $\theta_i < \theta_c$ de acuerdo a la relación dada por:

$$\tan \frac{\delta_{Sn}}{2} = \frac{\sqrt{\frac{n_1^2}{n_2^2} \cos^2 \theta_i - 1}}{\frac{n_1}{n_2} \operatorname{sen} \theta_i}, \quad (2)$$

$$\tan \frac{\delta_{Pn}}{2} = \frac{\sqrt{\frac{n_1^2}{n_2^2} \cos^2 \theta_i - 1}}{\operatorname{sen} \theta_i}. \quad (3)$$

Donde δ_{Sn} y δ_{Pn} son los cambios de fase de la componente perpendicular y paralela de la onda a la superficie reflectora, respectivamente, la derivación de estas ecuaciones pueden ser encontradas en Klein¹. Este fenómeno se puede observar en la figura 1.3, donde los índices de refracción están dados por $n_1=1.000$ y $n_2=1.5151$.

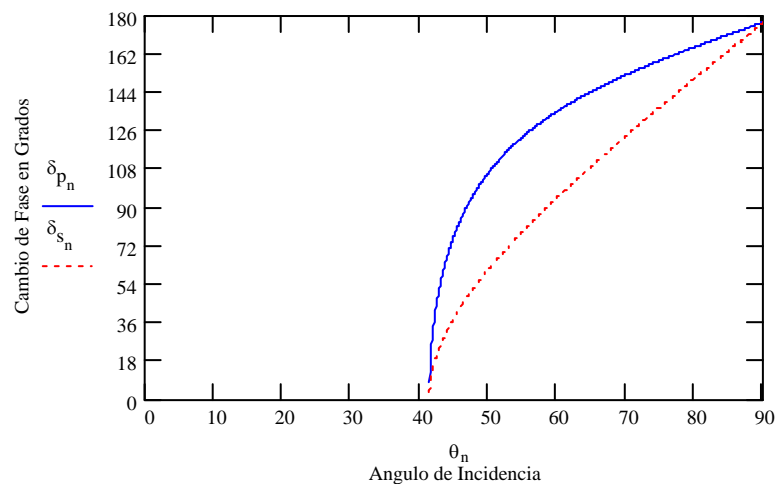


Figura 1.3 Gráfica del cambio de fase en la reflexión de las componentes perpendicular (δ_{Sn}) y paralela (δ_{Pn})

La propagación de luz a lo largo de la fibra óptica está basada justamente en el proceso de reflexión interna total. Es por eso que se puede obtener una buena descripción de la propagación de una señal con la teoría de rayos de la óptica geométrica, aunque una descripción completa se logra únicamente con la ecuación de

onda de la teoría electromagnética. La luz que viaja por el centro o núcleo de una fibra e incide sobre la superficie interna (interfase núcleo-revestimiento) con un ángulo igual o mayor que el ángulo crítico, de modo que toda la luz se refleja, sin pérdidas por transmisión al recubrimiento, hacia el interior del núcleo de la fibra, ver Fig. 1.4. Así, la luz puede transmitirse a largas distancias reflejándose miles de veces. Cuando la luz incide a ángulos menores que θ_c parte de la señal se transmitirá al recubrimiento a lo largo del cual se propagará hasta perderse totalmente.

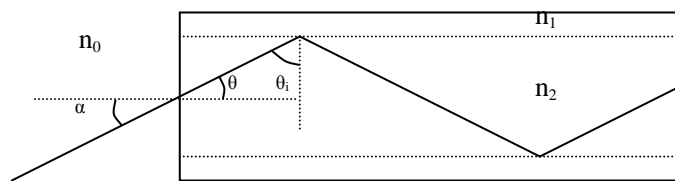


Figura 1.4 Propagación de luz a través de una fibra óptica

De la figura 1.4 se puede observar que hay un valor máximo de α para el cual el rayo interno incidirá con el ángulo crítico. Por lo tanto α_{\max} , denominado el ángulo de aceptación, define el semiángulo del cono de aceptación de la fibra. Partiendo de la ley de Snell en el interior de la fibra obtenemos.

$$n_1 \text{sen} \theta_i = n_2 \text{sen} \theta_t \quad (4)$$

para $\theta_i \geq \theta_c$

$$\theta_t = \pi / 2 \quad (5)$$

$$\text{sen} \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (6)$$

Para la parte exterior de la fibra tenemos que.

$$n_0 \text{sen} \alpha = n_1 \text{sen} \theta \quad (7)$$

Si

$$\theta = 90 - \theta_i \text{ y } \text{sen}(90 - \theta_i) = \cos \theta_i$$

$$n_0 \operatorname{sen} \alpha = n_1 \cos \theta_i \quad (8)$$

y utilizando la identidad $1 = \cos^2 \theta_i + \operatorname{sen}^2 \theta_i$

$$n_0 \operatorname{sen} \alpha = n_1 (1 - \operatorname{sen}^2 \theta_i)^{1/2} \quad (9)$$

Despejando $\operatorname{sen}(\alpha)$ y sustituyendo la Ecu. 6 en la Ecu. 9 obtenemos.

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{n_1}{n_0} \left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Donde $n_o = 1$, que es el índice de refracción del aire. Haciendo las operaciones correspondientes, obtenemos la ecuación resultante conocida como apertura numérica NA.

$$NA = \operatorname{sen} \alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (11)$$

Ya que la apertura numérica depende del índice de refracción del núcleo, depende también del perfil del mismo. Por lo tanto la apertura numérica depende del tipo de fibra o perfil del índice de refracción del núcleo.

1.5 Clasificación

La propagación de la luz a lo largo de una guía de onda puede ser descrita en términos de una onda electromagnética llamada modos. Cada modo guiado es un modelo de líneas de campo eléctrico y magnético que son repetidos a lo largo de la fibra en intervalos iguales. Solo un cierto número discretos de modos son capaz de propagarse a lo largo de la guía.

Las fibras ópticas pueden clasificarse en términos del perfil de índice de refracción en el núcleo, y si además existe un solo modo o muchos propagándose a través de la guía.

La variación en la composición en el núcleo da lugar a dos tipos de fibras comúnmente utilizados tal y como se muestra en la figura 1.5. El primero de los casos el índice de refracción del núcleo es uniforme a lo largo y experimenta cambio abrupto o escalón en la frontera del revestimiento, este es llamado *fibra de índice escalonado*. En el segundo caso el índice de refracción del núcleo está hecho de tal forma que varía como una función de la distancia radial del centro de la fibra, este tipo es llamado *fibra de índice graduado*². En ambos casos las fibras de índice graduado y escalonado son divididas en monomodal y multimodal.

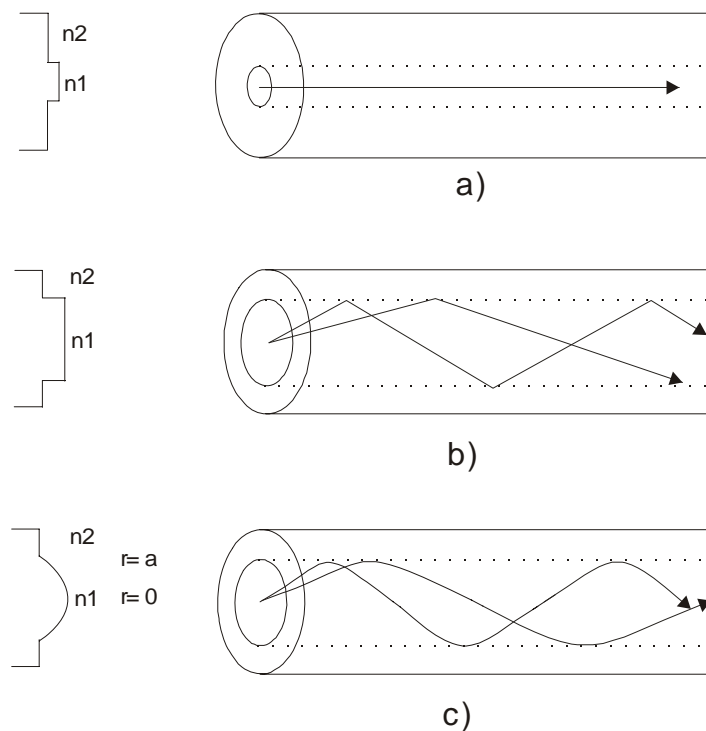


Figura 1.5 Las tres principales configuraciones de fibra óptica y sus perfiles de índice
 a) *Fibra de índice escalonado monomodo*, b) *Fibra de índice escalonado multimodo*, c) *Fibra de índice graduado multimodo.*

Como el nombre lo indica la fibra monomodal mantiene un solo modo de propagación, considerando que la fibra multimodo contiene cientos de modos. En la figura 1.4 se observan algunas ventajas y aplicaciones de diferentes tipos de fibras.

Tabla 1.4 Características y aplicaciones de los tipos de fibras (Ref. 3)

	Fibra Monomodal	Fibra Multimodal de Índice Graduado	Fibra Multimodal de Índice Escalonado
Fuente	Láser	Láser o LED	Láser o LED
Ancho de Banda	Muy Muy Grande > 3 GHz-km	Muy Grande 200 MHz a 3 GHz-km	Grande 200 MHz-km
Empalme	Muy Difícil Debido un Núcleo Pequeño	Difícil pero Posible	Difícil pero Posible
Ejemplo de Aplicación	Sistema de cable en Submarinos	Telefonía Entre Oficinas Centrales	Enlace de Datos
Costo	No tan Costoso	Mas Costoso	Menos Costoso

En las fibra multimodales el radio del núcleo es mas grande, lo que facilita acoplar una mayor potencia óptica hacia al interior de la fibra y facilita la conexión o acoplamiento de fibras similares. Es posible utilizar LED's como fuentes de excitación y, ya que tienen menos potencia óptica de salida que los diodos láser, son más fáciles de fabricación, son más económicos, los circuitos son menos complejos y su tiempo de vida es mayor que la de los diodos láser, lo que los hace mas deseable en muchas aplicaciones. Una desventaja de las fibras multimodo es que sufren de dispersión intermodal, el cual se describe brevemente. Cuando un pulso óptico es lanzado al interior de la fibra la potencia óptica en el pulso es distribuida sobre todos los modos de la fibra, cada uno de los modos se propagan a diferentes velocidades ligeramente, ocasionando que los modos lleguen a diferentes tiempos ligeramente, causando de esta manera que el pulso llegue a extenderse, a este efecto es conocido como dispersión intermodal ². Esto puedo ser reducido utilizando una fibra con núcleo de perfil de índice graduado, el cual permite tener ancho de banda mucho mas grandes que la fibra de índice escalonado. Incluso son posibles ancho banda mas grandes en fibras monomodales donde el efecto de dispersión intermodal no esta presente.

1.6 Propagación de una Señal

Al propagarse una onda debe cumplir con las condiciones de frontera obedeciendo a las ecuaciones de Maxwell. Sin embargo esta señal sufre atenuaciones y distorsión en el interior de la fibra.

1.6.1 Las Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell proveen los conceptos básicos en el desarrollo de ecuaciones para propagación de ondas electromagnéticas en materiales dieléctricos y otros fenómenos ópticos. Las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial son.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (12)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (13)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (14)$$

$$\nabla \cdot D = \rho. \quad (15)$$

En donde existen tres relaciones dadas por $D = \epsilon E$, $B = \mu H$, $J = \sigma E$. Usualmente asumimos que ϵ , μ , y σ no son funciones del tiempo y que el medio es lineal, homogéneo y isotrópico. ϵ , μ , y σ son constantes y uniformes a través del medio, sin embargo existen algunas circunstancias bajo el cual estas asunciones no son validas. En tal caso debemos reexaminar las consecuencias estas asunciones. Uno de estos casos es las fibra de índice graduado en el cual la constante dieléctrica es un función de la distancia radial del eje de la fibra.

Cuando E y H son funciones sinusoidales del tiempo, la dependencia temporal puede ser representada con la exponencial $\exp(j\omega t)$. Por lo que de las ecuaciones 12 y 13 obtendremos la siguiente relación.

$$\nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} = -j\omega\mu H, \quad (16)$$

$$\nabla \times H = (\sigma + j\omega\epsilon)E. \quad (17)$$

Cuando los campos electromagnéticos aparecen en la interfase entre dos materiales diferentes, las ecuaciones de Maxwell requieren que exista una relación entre los campos en ambas lados de la interfase, estas relaciones es llamada condiciones de frontera⁴, las cuales son.

1. la componente tangencial de E debe ser igual en ambos lados de la interfase.
2. La diferencia entre la componente normal de D es igual a la densidad de carga.
3. La diferencia entre la componente tangencial de H es igual a la densidad de corriente.
4. La componente normal de B es continua a través de la interfase.

Las condiciones de frontera en la interfase entre dos materiales dieléctricos, en ausencia de cargas libres y corrientes, son.

1. La componente tangencial de E y H son continuos a través de la interfase
2. La componente normal de D y B son continuos a través de la interfase

Otro parámetro importante es la medición del flujo de potencia temporal en una campo electromagnética, es el vector de Poyting dado de la siguiente forma.

$$S = E \times H \quad (18)$$

Para campos con variación sinusoidal en el tiempo, la densidad de potencia promedio es.

$$S = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ E \times H^* \} \quad (19)$$

1.6.2 La Ecuación de Onda

La solución de la ecuación de onda describe la propagación de la una onda electromagnética a través de un medio uniforme partiendo de la Ec. 16.

$$\nabla \times \nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times H) \quad (20)$$

Utilizando la Ec. 13 en ausencia de cargas libres y corriente y sustituyendo en la Ec. 20

$$\nabla_x \nabla_x E = -\mu_0 \frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = -\mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (21)$$

Ahora considerando la identidad vectorial

$$\nabla_x \nabla_x E = \nabla(\nabla \cdot E) - \nabla^2 E \quad (22)$$

Sustituyendo la Ec. 22 en 21 obtenemos

$$\nabla^2 E - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \nabla(\nabla \cdot E) \quad (23)$$

Expandiendo la Ec. 15 en ausencias de cargas libres y corrientes.

$$\nabla \cdot D = \nabla \cdot (\varepsilon E) = 0 \quad (24)$$

$$\nabla \cdot D = \varepsilon \nabla \cdot E + E \cdot \nabla \varepsilon = 0 \quad (25)$$

$$\nabla \cdot E = -E \cdot \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \quad (26)$$

Regresando a la ecuación 23 y sustituyendo 26, el resultado obtenido es.

$$\nabla^2 E - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\nabla \left(E \cdot \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \right) \quad (27)$$

La permitividad del medio es una función de la posición en el medio, entonces el gradiente de la permitividad no es igual a cero. Sin embargo si el medio es homogéneo la permitividad es igual a cero, por lo que el resultado de la ecuación de onda resulta de la siguiente manera.

$$\nabla^2 E - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (28)$$

Para una guía de onda de índice graduado la ecuación de onda homogénea puede ser resuelta en el núcleo y revestimiento, obteniendo las expresiones para el campo. Sin

embargo para fibras de índice graduado, se debe investigar bajo que condiciones la ecuación de onda homogénea es una buena aproximación a la ecuación.

Para el caso del campo magnético el desarrollo es algo similar, en donde obtenemos.

$$\nabla^2 H - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \quad (29)$$

Las Ec. 28 y 29 están en coordenadas rectangulares y pueden describirse en sus respectivas componentes, sin embargo para generalizar se escribe simbólicamente como.

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{v} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (30)$$

1.6.3 La Ecuación de Onda en Fibras de Índice Escalonado

Para obtener los modos en una fibra de índice escalonado, se debe resolver la ecuación de onda modificada en coordenadas cilíndricas para E_z y H_z . Teniendo las expresiones para E_z y H_z podemos obtener directamente expresiones para las componentes transversales de los campos E_r, E_ϕ, H_r y H_ϕ .

La ecuación de onda para $E_z(r, \theta)$ e coordenadas cilíndricas es⁵.

$$\frac{d^2 E_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE_z}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 E_z}{d\theta^2} + \kappa^2 E_z = 0 \quad (31)$$

$$\frac{d^2 H_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH_z}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 H_z}{d\theta^2} + \kappa^2 H_z = 0 \quad (32)$$

Estas ecuaciones son aplicables tanto para el núcleo como el revestimiento de la fibra. La técnica de separación de variables es aplicada para obtener la solución de la

Ec. 31 y 32. Donde asumiremos que pueden obtenerse soluciones independientes para E_z en ϕ y r , siendo de la siguiente manera.

$$E_z(\phi, r) = A\Phi(\phi)F(r) \quad (33)$$

Siendo que la fibra tiene simetría circular, escogeremos una función con simetría circular como una solución.

$$\Phi(\phi) = e^{jv\phi} \quad (34)$$

$$E_z = AF(r)e^{jv\phi} \quad (35)$$

Tomando las derivadas con respecto a r y ϕ obtenemos.

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = Ae^{jv\phi} \frac{dF(r)}{dr} \quad (36)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} = Ae^{jv\phi} \frac{d^2 F(r)}{dr^2} \quad (37)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} = -Av^2 e^{jv\phi} F(r) \quad (38)$$

Sustituyendo las Ec.36 al 38 y sustituyendo en 31 y multiplicando la ecuación resultante por $1/Ae^{jv\phi}$ obtenemos.

$$\frac{d^2 F(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF(r)}{dr} + \left(\kappa^2 - \frac{v^2}{r^2}\right)F(r) = 0 \quad (39)$$

Esta es la forma de la ecuación diferencial de Bessel y su solución son funciones de Bessel. El cual nos da numerosas funciones cilíndricas, tal y como se muestra en la figura 1.6.

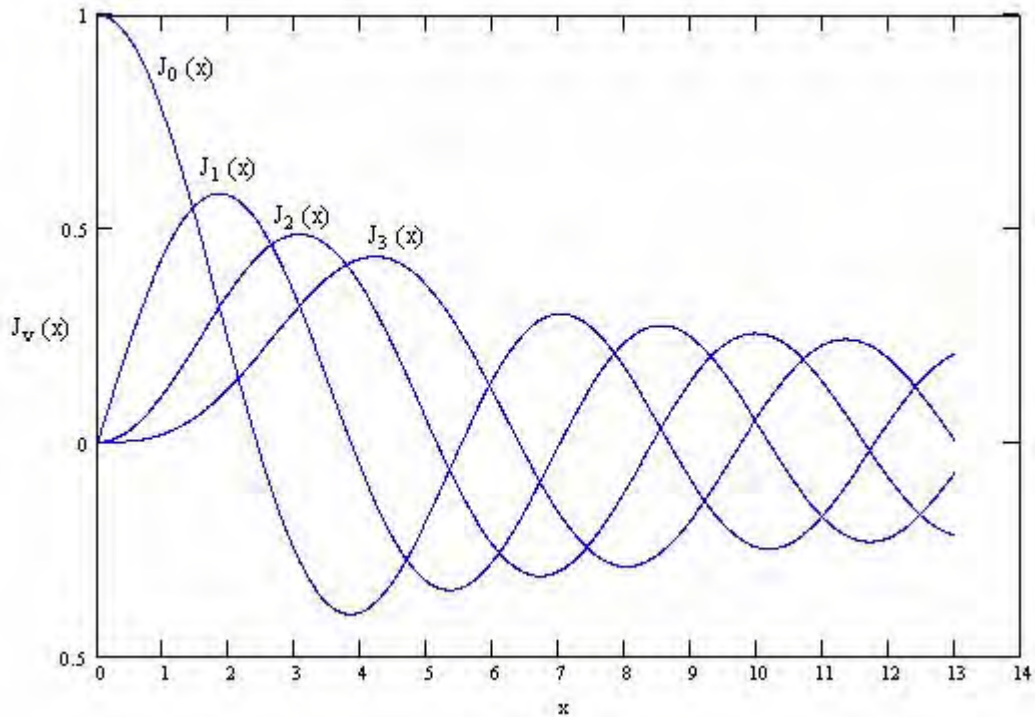


Figura 1.6 Gráficas de la Funciones de Bessel Utilizadas para Calcular la Condición de Cortes de Modos

Siendo que los campos deben ser finitos en el centro del núcleo de la fibra, tenemos que $J_\nu(\kappa r)$ es la solución de primer tipo para $r < a$ y $K_\nu(\gamma r)$ es de segundo tipo para $r > a$. Por consiguiente.

$$E_z = AJ_\nu(\kappa r)e^{j\nu\phi} \quad r < a \quad (40)$$

$$H_z = BJ_\nu(\kappa r)e^{j\nu\phi} \quad r < a \quad (41)$$

y

$$E_z = CK_\nu(\gamma r)e^{j\nu\phi} \quad r > a \quad (42)$$

$$H_z = DK_\nu(\gamma r)e^{j\nu\phi} \quad r > a \quad (43)$$

Las raíces de $J_\nu(x) = 0$ son los ceros de la función de Bessel, estas funciones son útiles para determinar los modos que pueden propagarse en la fibra. La tabla 1.5 muestra algunos ceros de funciones de Bessel de bajo orden.

Tabla 1.5 Ceros de funciones de Bessel (Ref 4)

$J_0(x)$	$J_1(x)$	$J_2(x)$	$J_3(x)$	$J_4(x)$	$J_5(x)$
2.405					
	3.832				
5.520		5.136			
	7.016		6.380		
8.634		8.417		7.588	
	10.173		9.761		8.772
11.792		11.620		11.065	
	13.324		13.015		12.339
14.931		14.796		14.372	
	16.471		16.223		15.700
18.071		17.960		17.616	
	19.616		19.406		18.980
21.212		21.117		20.827	
	22.760		22.583		22.218

Los parámetros κ y γ están dados por

$$\kappa = k_1^2 - \beta^2 \quad (43)$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - k_2^2 \quad (44)$$

Sumando las Ec. 43 y 44 obtenemos

$$\kappa^2 + \gamma^2 = k_1^2 - k_2^2 \quad (45)$$

Si definimos V esto será

$$V = (k_1^2 - k_2^2)^{1/2} a = (k^2 n_1^2 - k^2 n_2^2)^{1/2} = \frac{2\pi}{\lambda} a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (46)$$

Donde V es el parámetro de la frecuencia normalizada.

1.6.4 Atenuación de la señal

La atenuación de la luz al propagarse a lo largo de la fibra es un importante consideración en el diseño de un sistema de comunicaciones. Los mecanismos básicos de atenuación en una fibra son la absorción y el esparcimiento. La absorción es

relacionada al material de la fibra y el esparcimiento esta asociado con el material de la fibra y con las imperfecciones estructurales. La atenuación se expresa en decibeles por kilómetro y se expresa de la siguiente manera.

$$\alpha = 10 \log \frac{P_{\text{entrada}} / P_{\text{sal}}}{L} \quad (31)$$

La absorción es causada por tres diferentes maneras:

1. Absorción por defectos atómico en la composición del vidrio.
2. Absorción extrínseca por átomos impuros en el vidrio.
3. Absorción intrínseca por la elección básica de átomos del material de la fibra.

Los defectos atómicos son imperfecciones de la estructura atómica del material de la fibra tal como moléculas extrañas, alta densidad de grupos de átomos, o defectos de oxígeno en la estructura del vidrio. El factor dominante de absorción en fibras preparadas por el método de fusión directa, es la presencia de impurezas en el material de la fibra. El resultado de la absorción en impurezas que predominan la transición de iones metálicos tales como hierro, cromo, cobalto, y cobre.

Otro mecanismo de atenuación importante es la pérdida por esparcimiento, causado por variación en la densidad del material e inhomogeneidades estructurales o defectos ocurridos durante la manufactura. La variación del índice de refracción causa el esparcimiento Rayleigh² y otros como esparcimiento Raman, Mie, etc. pueden ser relativamente menores. La expresión por pérdidas en el esparcimiento de un vidrio compuesto solamente por un elemento sencillo es dado por.

$$\alpha_s = \frac{8 \pi^3}{3 \lambda^4} (n^8 p^2) (kT) \beta_T \quad (32)$$

Donde k es la constante de Boltzmann, T es la transición vítrea y β_T es la compresibilidad térmica. El coeficiente α_s es proporcional a λ^{-4} . el cual indica que la luz esparcida incrementa cuando decrementa la longitud de onda.

1.6.5 Dispersión intermodal

En el caso de las fibras multimodales, gran números de modos pueden propagarse a través de el, sin embargo la velocidad de grupo de los modos son diferentes. Así que un pulso propagándose a través de una fibra es ensanchada, dando como resultado la distorsión de la señal, tal y como se muestra en la figura 1.7.

Durante el acoplamiento de la señal se excitan un gran número de modos viajando con su propia velocidad de propagación. En la salida el detector responde a la potencia total en algún instante, así que la señal de salida es desplegada fuera de tiempo. Si solamente un modo es excitado, después de recorrer una distancia este puede causar que la energía sea acoplada a otros modos debido a los efectos de conversión de modos (o reconversión) causados por las inhomogeneidades en el núcleo⁵.

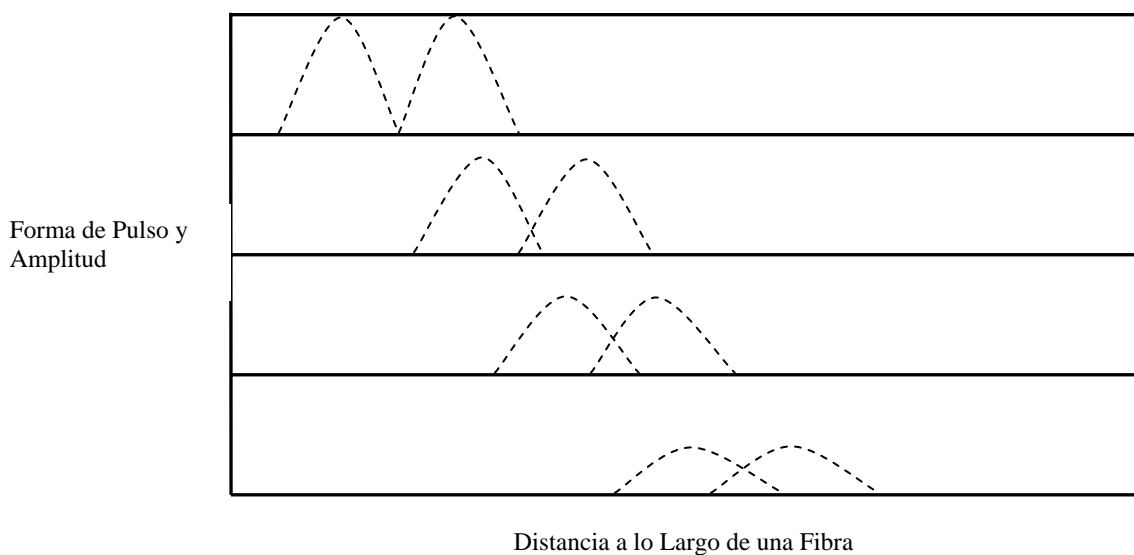


Figura 1.7 Ensanchamiento y Atenuación de dos Pulsos Adyacente viajando a través de una fibra

Si el índice de refracción del grupo de se encuentra dado por

$$n_g = n(\lambda) - \lambda \frac{dn(\lambda)}{d\lambda} \quad (33)$$

Entonces la velocidad de grupo esta dado por.

$$v_g = \frac{c}{n_g} = \frac{1}{n(\lambda) - \lambda \frac{dn(\lambda)}{d\lambda}} \quad (34)$$

La diferencia de tiempo, en el viaje del rayo mayor (modo de orden superior) y el menor (modo fundamental), se encuentra dado por.

$$\tau_{\text{mod}} = \frac{Z}{c} \frac{n_g}{\cos \theta_{\text{mod}}} \quad (35)$$

Donde Z es medio periodo del rayo de incidencia en el interior de la fibra.

Las fibras multimodales de índice escalonado muestran la dispersión intermodal. Sin embargo esto se puede solucionar con una fibra monomodal, en donde la dispersión intermodal es mas pequeña ya que solamente un solo modo puede propagarse.

1.6.6 Dispersión Material o Cromática

La dispersión material o también llamada cromática ocurre debido a la variación del índice de refracción como una función no lineal de la longitud de onda, esto es ejemplificado en la figura 1.8.

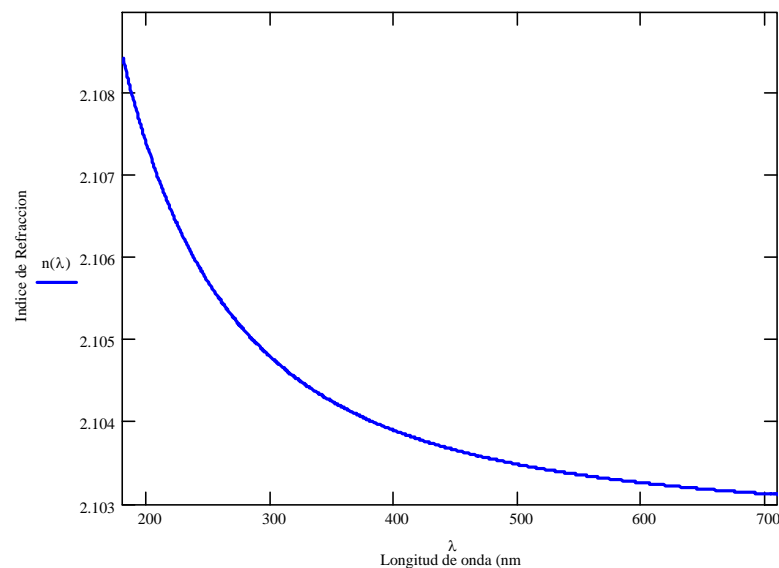


Figura 1.8 Variación de en el índice de refracción como una función de la longitud de onda del Cuarzo.

Como consecuencia, la velocidad de grupo de un modo es función del índice de refracción. Así las componentes espectrales de un modo dado viajarán a diferentes velocidades dependiendo de la longitud de onda.

Para calcular la dispersión inducida, consideremos una onda plana propagándose en un medio dieléctrico infinito que tiene un índice de refracción $n(\lambda)$ igual al núcleo de la fibra. La constante de propagación se encuentra dada por.

$$\beta = \frac{2\pi n(\lambda)}{\lambda} \cos \theta_m \quad (36)$$

Y el retraso de grupo por unidad de longitud en la dirección de propagación, esta dado por.

$$\frac{t_g}{L} = \frac{1}{v_g} = \frac{1}{c} \frac{d\beta}{dk} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\beta}{d\lambda} \quad (37)$$

Sustituyendo la Ec. 36 en 37 y haciendo las operaciones correspondientes el tiempo de retraso grupal viene dado por.

$$t_{mat} = \frac{L}{c} \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (38)$$

Diferenciando la Ec. 38 y multiplicando por una fuente de ancho espectral σ_λ , da como resultado el ensanchamiento de grupo.

$$\tau_{mat} = \frac{dt_{mat}}{d\lambda} \sigma_\lambda = -\frac{L}{c} \lambda \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \sigma_\lambda \quad (39)$$

La dispersión cromática disminuye si el ancho de banda de la fuente láser se reduce con lo que se logra un mayor ancho de banda del sistema.

Referencia Bibliografica

1. M. V. Klein, Optics, Wiley, New Cork, 1986.
2. Gerard Keiser. Optical Fiber Communications. McGraw-Hill. 1983.
3. Allen H. Cherin. An Introduction to Optical Fiber. McGraw-Hill. 1983.
4. William B. Jones, Jr. Introduction to Optical Fiber Communication Systems. Oxford. 1988.
5. Takanori Okoshi. Optical Fibers. Academic Press. 1982
6. T. Katsuyama, H. Matsumura. Infrared Optical Fibers. Adam Hilger.

CAPITULO II

FIBRAS OPTICAS DE SÍLICE

2.1 Introducción

Las fibras ópticas de sílice son las que presentan menor atenuación en 1.55 μm , por lo cual su uso en comunicaciones es muy amplio, por consiguiente son fabricadas en grandes cantidades. En este capítulo se muestran algunas técnicas de fabricación de las fibras sílice, donde la más usual para este tipo es la del proceso MCVD. Sin embargo no solo se limita a utilizarse para comunicación, sino también como fibras amplificadoras dopadas con Er^{3+} , y también para fibras láser dopadas con tierras emitiendo ya sea en el infrarrojo o en el visible.

2.2 FO basadas en SiO_2

Las fibras utilizadas para propósitos de comunicación son hechas de un material que satisfaga las siguientes requerimientos básicos.

1. El material dieléctrico utilizado debe ser transparente en una longitud de onda en particular para que sea guiada eficientemente.
2. Debe ser posible fabricarse largo, delgado, flexible.
3. Físicamente materiales compatibles con diferencias de índice de refracción ligeramente entre el núcleo y el revestimiento¹.

El material más abundante y barato es la sílice SiO_2 . Muchas veces los iones metálicos en forma de óxidos pueden ser incluidos en la estructura de esta. Los óxidos metálicos hacen que los átomos de silicio y oxígeno se enlacen menos fuerte, produciendo un cambio en las propiedades físicas del vidrio. Un ejemplo de ellos, es la variación del índice de refracción y el coeficiente de expansión térmica. Esta es la vía más común para controlar la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y el revestimiento². Para cambiar el índice de refracción de las fibras de sílice puras, estas

son dopadas con dopantes metálicos en forma de óxidos o cloruros. Añadiendo germanio o fósforo resulta un incremento en el índice de refracción, y añadiendo boro lo reduce. La cantidad de dopante añadida hacia el vidrio debe ser considerado cuidadosamente debido a una variedad de cambios pueden ocurrir. La Tabla 2.1 muestra los dopantes mas comúnmente utilizados en la fabricación de fibras ópticas.

Tabla 2.1 Dopantes Utilizados en la Fabricación de Fibras (Ref. 3)

	Núcleo	Revestimiento
Fibra Multimodo	$\text{GeO}_2\text{-B}_2\text{O-SiO}_2$	$\text{B}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$
		$\text{F-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$
	$\text{SeO}_2\text{-SiO}_2$	SiO_2
Fibra Monomodo	$\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$	$\text{F-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$
		SiO_2
		$\text{P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$
		F-SiO_2
	SiO_2	$\text{F-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$
		F-SiO_2

2.3 Métodos de fabricación

Existen dos técnicas básicas para la fabricación de fibras ópticas, los cuales son el proceso de vapores oxidados y el método de fusión directa. Este último sigue los procedimientos de fabricación tradicional, en donde las fibras son hechas directamente del molde. En el caso del proceso de vapores oxidados, los vapores altamente puros de metales haluros reaccionan con el oxígeno para formar un polvo blanco de partículas de SiO_2 . Las partículas son entonces colectadas sobre las superficies de un vidrio voluminoso formando un tubo, a este tubo es llamado preforma.

2.3.1 Deposición Externa de Vapores (OVPO)

En la deposición externa de vapores (OVD, por sus siglas en Inglés), una capa de partículas de SiO_2 llamada hollín es depositada de un quemador sobre un grafito rotatorio. El vidrio es adherido capa por capa hasta formar una preforma de vidrio cilindro. Controlando los constituyentes del vapor de haluro metálico durante el proceso de deposición, la composición vítrea y la dimensión deseada para el núcleo y el revestimiento pueden ser incorporadas en el interior de la preforma⁴. Cuando el proceso de deposición es completado, la barra es removida y el tubo lleno de poros es entonces vitrificado en una atmósfera seca con una temperatura alta para limpiar las preformas, la figura 2.1 muestra el proceso de OVPO.

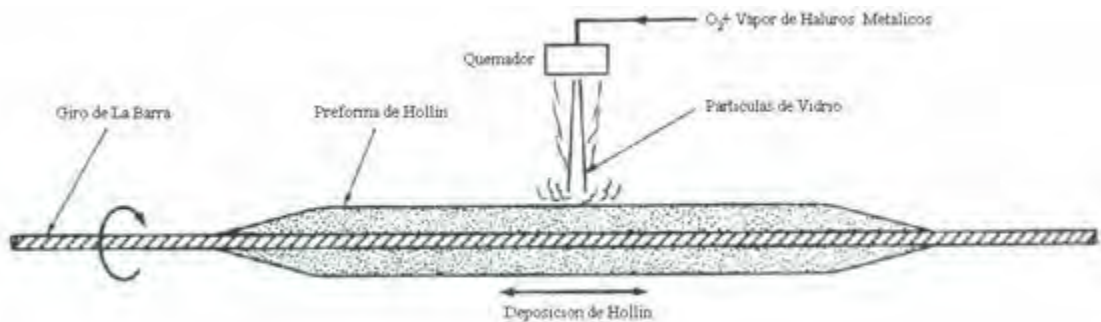


Figura 2.1 Preparación de una Preforma por el Proceso OVPO (Ref. 4)

2.3.2 Deposición Axial de Vapores (VAD)

El proceso de deposición axial de vapores (AVD, por sus siglas en inglés) se realiza en una cámara de reacción. En la cámara se colocan los tubos que alimentan los reactivos en contraposición de la preforma en formación. Los quemadores son tubos coaxiales cilíndricos de sílice donde el material a reaccionar ($\text{SiCl}_4 + \text{O}_2$) penetra por el tubo central y los gases para la combustión ($\text{O}_2 + \text{H}_2$) por el exterior. El perfil del índice de refracción se controla con la temperatura de la cámara, el flujo de material, la velocidad de rotación que mantiene la uniformidad geométrica y la posición relativa de

los quemadores y la preforma. La cámara de calentamiento posterior produce el colapsado de la preforma porosa dando lugar a la preforma transparente, el aparato se muestra en la Fig. 2.2.

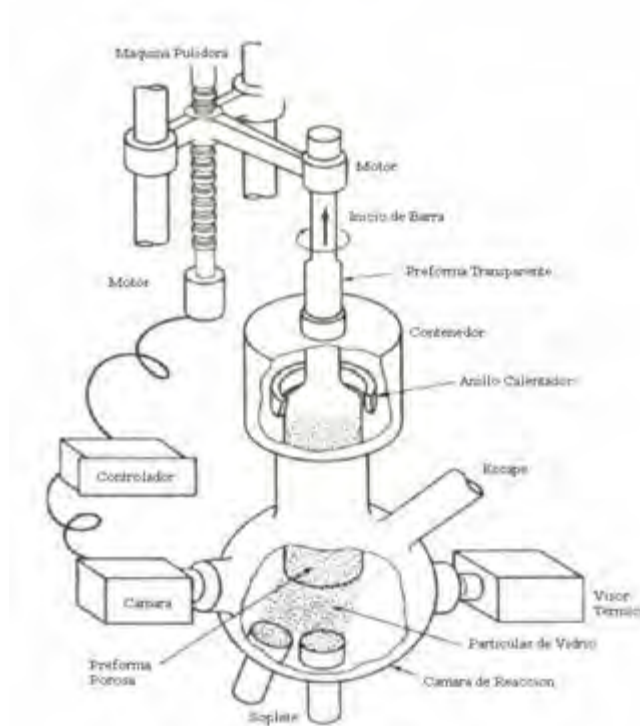


Figura 2.2 Máquina para el proceso de VAD (Ref. 1)

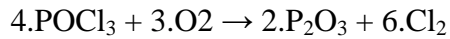
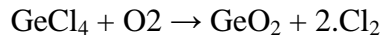
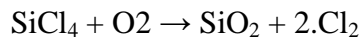
Como el crecimiento y el colapsado se producen en la misma atmósfera, es más eficiente el control de los contaminantes. Por otro lado, la longitud de la preforma puede ser del valor deseado aparentemente sin restricciones de longitud. Las ventajas que el VAD presenta son:

1. La preforma no tiene huecos centrales como ocurre en el proceso de OVPO.
2. El hecho que la cámara de deposición y la zona de fusión encierran el calor, son conectadas herméticamente una a otra permitiendo un entorno limpio.

2.3.3 Deposito modificada de vapores químicos (MCVD)

El método de deposición modificada de vapores químicos (MCVD, por sus siglas en inglés) se realiza sobre un tubo de cuarzo puro que actúa de sustrato. El tubo se coloca en un torno que controla la rotación. La oxidación en el método MCVD se produce

debido a la elevada temperatura interior del tubo lograda mediante la hidrólisis de una llama de H_2+O_2 . La reacción de oxidación es:



Siempre resulta como subproducto de la reacción el Cl_2 que es un gas a temperatura ambiente y se extrae mediante una bomba de vacío, mientras que los óxidos son sólidos y se depositan en la cara interior del tubo formando una fina capa transparente. Para mantener una deposición homogénea se hace girar al tubo en el torno y se mueve la llama que cataliza la reacción en forma longitudinal a una velocidad de algunos mm/seg. La deposición resulta ser capa a capa. El perfil del índice de refracción deseado se logra variando la composición de la reacción para cada capa. En la figura 2.3 se muestra como es la fabricación de la preforma.

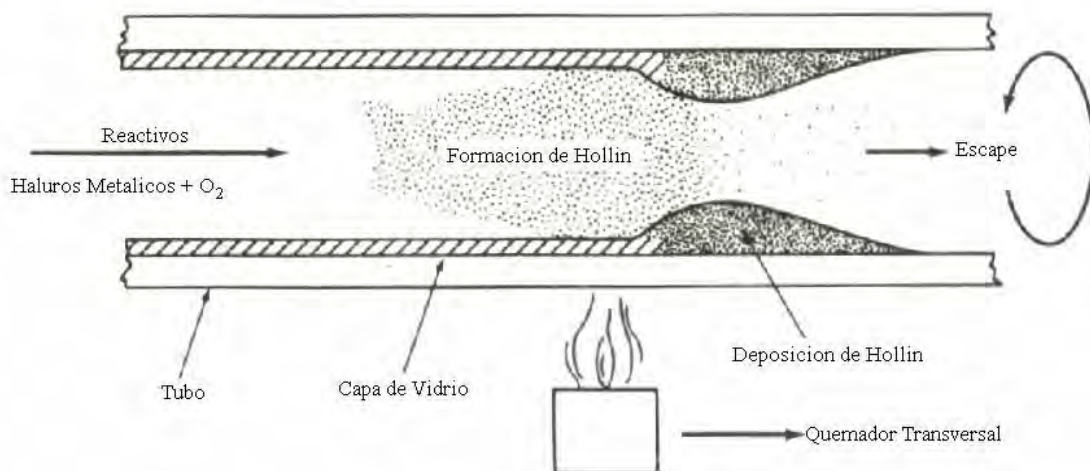


Figura 2.3 Diagrama Esquemático del proceso de MCVD (Ref. 4)

2.3.4 Método doble crisol

El montaje consiste en dos crisoles concéntricos fabricados de platino o sílice, como se muestra en la figura 2.4.

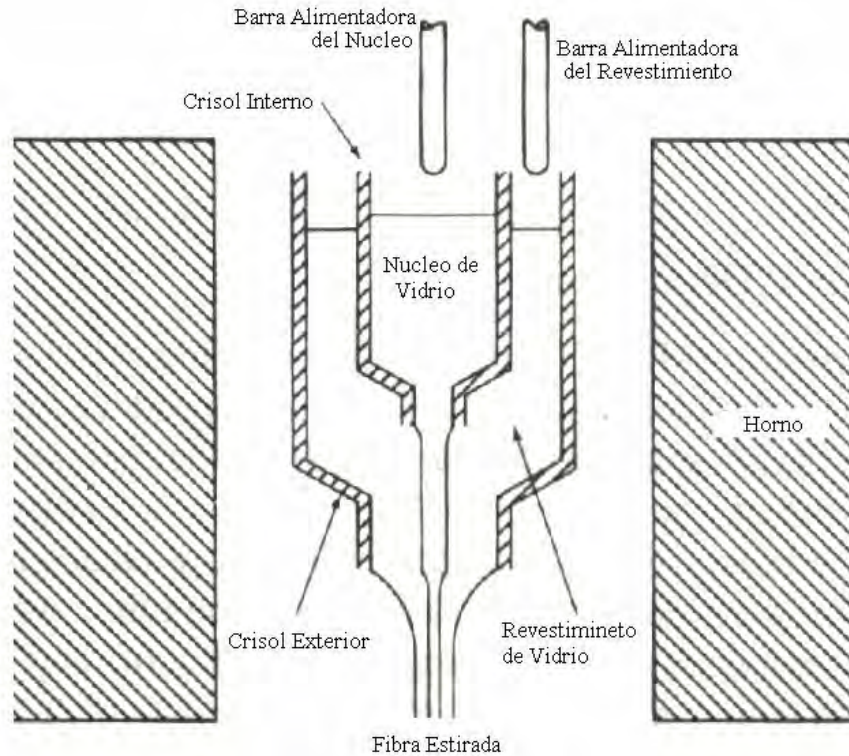


Figura 2.4 Método del Doble Crisol (Ref. 1)

El orificio inferior del crisol interno se diseña en función de la FO deseada. El material se introduce en forma de varilla, de forma que la alimentación del crisol puede ser continua. La viscosidad del material se lleva a un valor adecuado para el estirado mediante un horno de RF. El perfil del índice de refracción se ajusta mediante la posición relativa de los crisoles. Por ejemplo, una separación amplia produce mezcla en los vidrios de ambos crisoles lo cual corresponde a un perfil gradual. Tanto la velocidad de estirado como la temperatura del horno permiten también controlar la mezcla de materiales y por lo tanto el tipo de perfil de índice. El estirado de la FO se efectúa enrollando a la misma en un tambor giratorio colocado debajo del doble crisol. Los mejores valores conseguidos con este método son de 4 dB/km para 0,85 μm y una dispersión modal de 0,6 ns/km.

2.4 Amplificadores a $1.55 \mu\text{m}$ de $\text{SiO}_2:\text{Er}^{3+}$

Los amplificadores de fibras dopadas con tierras raras consisten de tres componentes básicos: una longitud de fibra dopada con tierra rara, una fuente de bombeo láser y una acoplador que combina la potencia y las longitudes de onda de la señal y de bombeo, como se observa en la figura 2.5.

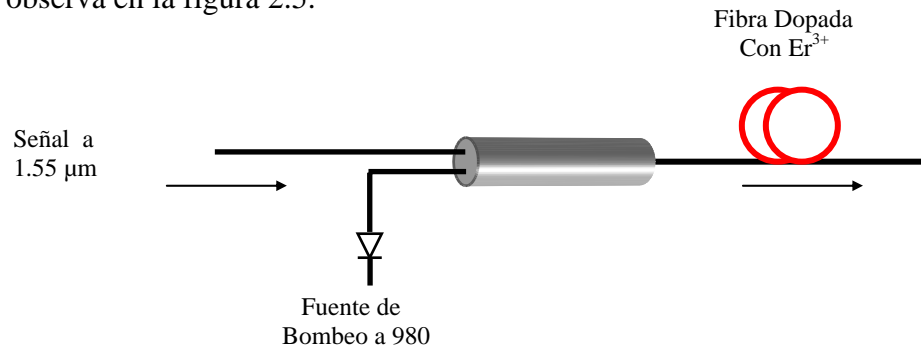


Figura 2.5 Diagrama de un Amplificador Básico

La amplificación óptica ocurre por medio de emisión estimulada el mismo mecanismo utilizado en láseres, en el caso de la fibra dopada con Er^{3+} los iones son bombeados hacia un nivel superior desde una fuente que emite a 980 nm , esta es introducida hacia el acoplador logrando inversión de población en la fibra dopada. A su vez la señal de $1.55 \mu\text{m}$ es introducida al interior del acoplador, activando los iones de Er^{3+} que se encuentran en el nivel superior y lograr que estos decaigan al estado base con la misma sincronía y coherencia de la señal de $1.55 \mu\text{m}$. Dependiendo de los niveles de energía del ion dopante, los esquemas de bombeo pueden ser clasificados en sistemas de 3 y 4 niveles. Para este caso nos limitaremos al de 3 niveles ya que los amplificadores de fibras dopados con Er^{3+} pertenecen a este sistema⁵. La figura 2.6 muestra el sistema de 3 niveles.

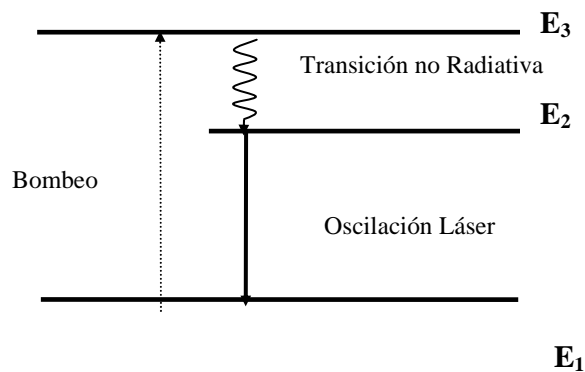


Figura 2.6 Figura de un láser de 3 niveles

La ecuación que describen la población en estado 1 esta dado por.

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_2}{\tau_{21}} + W_s(N_2 - N_1) - W_p(N_1 - N_3) \quad (40)$$

Similarmente para los estados 2 y 3.

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{21}} - W_s(N_2 - N_1), \quad (41)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -\frac{N_3}{\tau_{32}} + W_p(N_1 - N_3). \quad (42)$$

Donde :

N_i	Población Total en los Niveles ($i = 1, 2, 3$)
τ_{ij}	Tiempo de Vida Entre Niveles, Donde i, j Denotan los dos Niveles
$W_s(N_2 - N_1)$	Taza de Emisión Estimulada
$W_p(N_1 - N_3)$	Taza de Bombeo

La transición láser que emite una longitud de onda en 1.55 μm esta dado por los niveles ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ el cual corresponde a la tercera ventana de comunicaciones. Las transiciones ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ y ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ correspondientes a las longitudes de onda de 980 y 1480 nm respectivamente suelen utilizarse para el bombeo en amplificadores de Er^{3+} . Sin embargo a 980 nm es una banda de bombeo práctica porque el coeficiente de ganancia es mas grande que en otras bandas de bombeo ⁶, además es muy accesible ya que se puede encontrar en el mercado con gran facilidad, y ofrece compatibilidad con las fibras ópticas. Sin embargo un problema fuerte que presentan estas fibras es el fenómeno de conversión hacia arriba, donde básicamente los electrones que decaen al nivel ${}^4\text{I}_{13/2}$ son enviados al nivel ${}^4\text{S}_{3/2}$ (figura 2.7). Esto es debido a energía fononica de la sílice que promueve los electrones a un estado superior, que típicamente es alrededor de 950 cm^{-1} , este problema se logra resolver sustituyendo la sílice por otra matriz como el fosfato que tiene un energía fononica mayor.

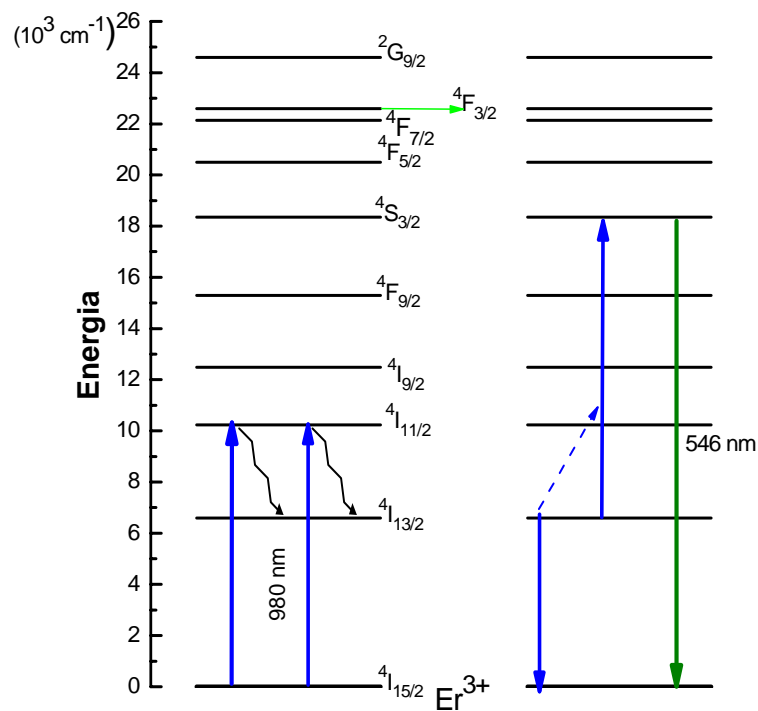


Figura 2.7 Proceso de conversión hacia arriba en un fibra de sílice.

Actualmente los EDFA's se codopa con iterbio y se bombea a una longitud de onda de 980 nm, que provoca la excitación de los iones de Yb^{3+} y esta energía es transferida a los iones del Er^{3+} (figura 2.8).

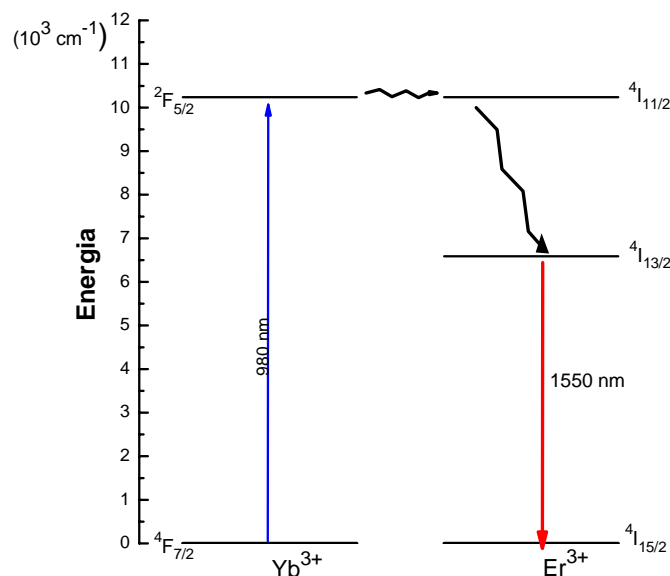


Figura 2.8 Proceso de transferencia de energía del Yb^{3+} - Er^{3+}

2.5 Láseres de fibra dopadas con Nd^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+}

Las fibras láser basadas en iones de tierras raras en una matriz de vidrio han despertado un gran interés en fibras activas y amplificadores, especialmente por la ventana de comunicaciones de 1300 nm correspondiente a la transición ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$. En las fibras de sílice esta transición sufre de absorción de estado excitado (ESA), debido a que en la emisión de 1300 nm existe la transición ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{G}_{7/2}$ para el cual coincide con el pico de la emisión ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ ⁷. Los fibras láser dopadas con neodimio son bombeadas por láseres semiconductores de arseniuro de galio (GaAs). Este bombeo se efectúa en la transición ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{5/2}$, para después presentar un decaimiento no radiativo en nivel meta estable dada por la transición ${}^4\text{F}_{5/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{3/2}$. La emisión láser es producida cuando se tiene una inversión de población en la transición ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ que corresponde a una longitud de onda de 1.06 μm . La población que llega al nivel ${}^4\text{I}_{11/2}$ decae en forma no radiativa al estado base. En la figura 2.9 se presenta los niveles de energía para el neodimio en donde se muestran las respectivas transiciones. A fin de optimizar la eficiencia de bombeo y obtener emisión láser de alta potencia se han desarrollado diversas configuraciones de la fibra. Quizás la más exitosa es la fibra de doble recubrimiento desarrollada en Polaroid Corp.⁸. En la Fig. 2.10 se muestra la emisión láser de una fibra óptica de sílice de doble recubrimiento dopada con neodimio⁹.

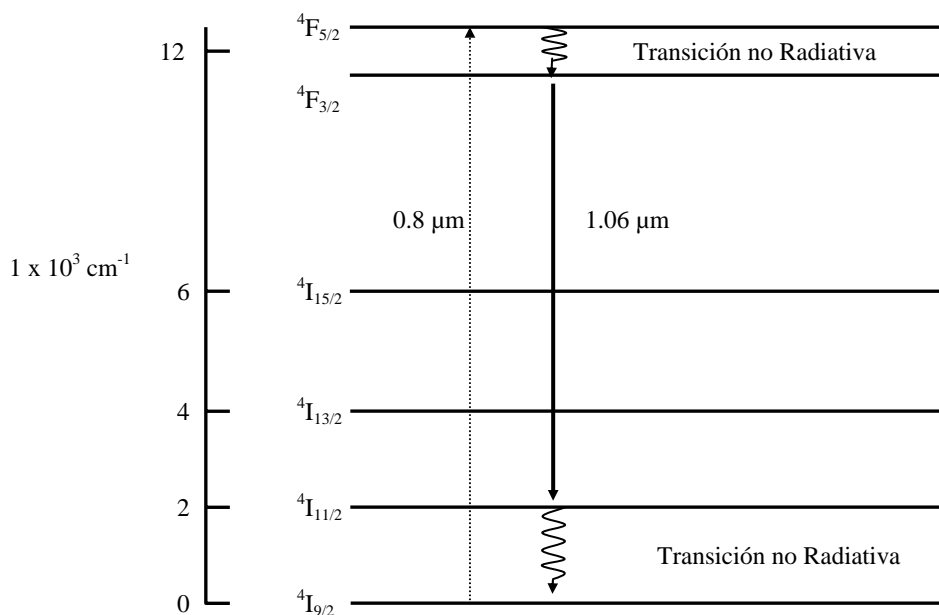


Figura 2.9 Niveles de energía para el Nd^{3+}

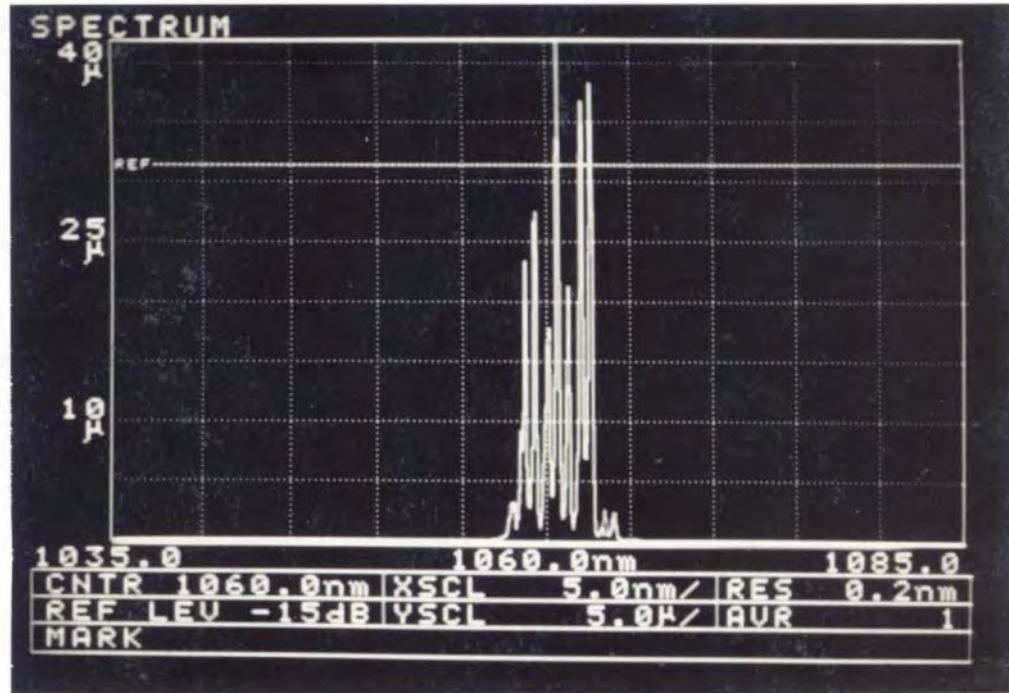


Figura 2.10 Espectro de fluorescencia de una fibra de doble recubrimiento.

Las fibras láser de sílice dopado con erbio con emisión en 1.55 μ m son muy atractivas en diversas aplicaciones debido a que esta emisión no daña al ojo humano. Este láser pertenece a un sistema de tres niveles. Los iones de Er^{3+} en vidrios tienen una banda de absorción alrededor de 808 nm y pueden ser bombeados por un diodo láser de AlGaAs con emisión en 806 nm. Sin embargo, se ha demostrado que la longitud de onda más eficiente a la que debe ser bombeado este sistema es 980 nm ya que la banda de absorción del Er^{3+} a 808 nm sufre de absorción de estados excitados (ESA) que es una desventaja para un sistema láser. La eficiencia del Er^{3+} mejora cuando se codopa con iones de Yb^{3+} . Este ión presenta una mayor absorción del bombeo excitando los niveles $^2F_{7/2} \rightarrow ^2F_{5/2}$. Es un sistema muy simple que se acopla al Er^{3+} transfiriendo a éste su energía y excitando los niveles $^4I_{15/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$. Su mayor sección transversal de absorción y su simplicidad lo hace un ion ampliamente utilizado como sensibilizador para tener una mejor absorción en 980 nm y transferirlo a otro ion¹⁰.

Se ha observado que la fibra láser de Er^{3+} emite en cuatro longitudes de onda discretos: 1.53, 1.56, 1.57 y 1.60 μ m¹¹. Estas longitudes de onda son obtenidas alterando la cavidad acoplada de salida o bien un efecto similar se observa variando la longitud de la fibra. Debido a que el esquema de bombeo es de tres niveles, se requieren mayores potencias de bombeo que las requeridas para el neodimio y obtener inversión

de población. Por otra parte, es posible obtener emisión láser de los iones de Yb^{3+} que también tienen varias aplicaciones¹². La oscilación láser en un vidrio con yterbio fue reportado por Etzel en 1962. Este sistema ofrece algunos aspectos interesantes, ejemplo de ello es la ausencia de absorción de estados excitados (ESA), donde además ofrece la ventaja de bombear con diodos láseres comerciales. Además se han logrado eficiencias cercanas al 40 % comparada con la potencia de bombeo, alcanzando una salida máxima por encima de 10 mW por una potencia de bombeo de 48 mW.

2.6 Emisión visible de Er^{3+} con fibras de sílice

Los iones de Er^{3+} son también muy importantes para obtener láseres con emisión de luz en la región visible del espectro mediante la excitación con luz infrarroja a partir del proceso de conversión hacia arriba. La luminiscencia por este mecanismo es una solución muy prometedora para obtener láseres visibles de alta eficiencia bombeados con diodos láseres comerciales infrarrojos¹³. Estos láseres tienen aplicaciones potenciales en almacenamiento de información, desplegados, diagnóstico médico y sensores^{14,15,16}. La eficiencia del proceso de conversión hacia arriba depende, entre otros, de la matriz que recibe a los iones. Matrices con energía fonónica baja pueden reducir las pérdidas no radiativas debido a la relajación multifonónica. Esto promueve los fenómenos cooperativos obteniéndose un proceso de conversión hacia arriba altamente eficiente. Un ejemplo de esto es la emisión visible en fibras de $\text{SiO}_2:\text{Er}^{3+}$ y $\text{ZBLAN}:\text{Er}^{3+}$, la primera tiene una energía fonónica de alrededor de 950 cm^{-1} y la segunda una energía de alrededor de 500 cm^{-1} ; La emisión visible en esta última es superior a la primera¹⁷.

La conversión hacia arriba no siempre es deseable. En un amplificador a $1.55\text{ }\mu\text{m}$, es deseable que el único canal de des-excitación sea la transición ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ responsable del proceso de amplificación. Sin embargo, los amplificadores de sílice presentan conversión hacia arriba, emisión verde principalmente (${}^2\text{H}_{11/2}, {}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$), convirtiéndose en un elemento de pérdida para el amplificador y reduciendo así su eficiencia^{18,19}. Esta pérdida de eficiencia se compensa con el uso de mayores extensiones de fibra, lo que termina afectando los costos. Otra forma es incrementando la concentración de iones, sin embargo estos iones son pocos solubles en sílice por lo

que se presenta rápidamente aglomeración de iones que produce una reducción de la fluorescencia. De esta manera, existe una gran actividad de investigación alrededor de la ciencia de los materiales a fin de encontrar el material adecuado para obtener amplificadores ópticos de alta eficiencia, capaces de ser convertibles en fibra óptica, donde los iones sean altamente solubles para evitar la aglomeración y con una energía fonónica alta para reducir la conversión hacia arriba. Las nuevas fibras reportadas hasta ahora para los amplificadores de alta eficiencia son las fibras a base fosfato. Se ha reportado una ganancia de 4.1 dB en una fibra de tan solo 1 cm²⁰. Desafortunadamente la aglomeración de los iones se incrementa con la concentración de los iones por lo que es necesario encontrar la concentración adecuada para cada tipo de matriz.

La alta demanda de información en los sistemas de comunicación a introducido un nuevo problema, el ancho de banda. Los amplificadores actuales de sílice y fosfato tienen un ancho de banda de alrededor de 60 nm. Ahora se busca que las nuevas fibras presenten un mayor ancho de banda. Por consiguiente se intenta encontrar una nueva matriz capaz de incrementar el ancho de banda disponible. En este sentido actualmente se investiga sobre la posibilidad de utilizar fibras a base de telurio. Estas presentan un mayor ancho de banda, aproximadamente 90 nm, pero presentan una mayor conversión hacia arriba²¹. Así, la investigación se dirige a evitar los fenómenos cooperativos y mantener el ancho de banda.

Referencia Bibliográfica

1. Gerd Keiser. Optical Fiber Communications,. McGraw Hill, 1993
2. Chai Yeh. Handbook of Fiber Optics Theory and Applications. Academic Press, 1989.
3. Allen H. Cherin. An Introduction to Optical Fibers,. McGraw Hill, 1983.
4. P. C. Schultz. Progress in Optical Waveguide Process and Material. Appl. Opt. 18, 3684-3693. Nov. 1979.
5. Li Qian. Experiment on Erbium-Doped Fiber Amplifiers. 1998.
6. R. I. Laming, M. C. Farries, P.R. Morkel, L. Reekie, D. N. Payne, P. L. Scrivener, F. Fontana, and A. Righeti. Efficient Pump Wavelengths of Erbium-Doped Fiber Optical Fiber Amplifiers. Electron. Lett., vol.25, pp12-14. 1989.
7. P. W. France, Optical Fibre Laser and Amplifiers. Blackie, 1991.
8. L. A. Centeno, High Power Double-Clad Fiber Laser, J. of Lightwave Technol. 11, 1435-1444 (1993).
9. E. de la Rosa Cruz. Interferometro de Fibras Ópticas Birrefringentes y sus Aplicaciones en la Medición de Temperatura, Tesis Doctoral, 1998.
10. S. Jiang, M. Myers, and N. Peyghambarian, J. Non-Cryst. Solids 239, 143 (1998).
11. Digonnet J. F Michael, Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers, SPIE, Vol 2001.
12. F. Gan, Laser Materials, World Scientific, 1995
13. F. Vetrone, J., C Boyer, J. A. Capobianco, A. Speghini, and M. Bettinelli, Appl. Phys. Lett. 80, 1752 (2002).
14. G. Poirier, V. A. Jerez, C. B. de Araújo, Y. Messaddeq, S. J. L. Ribeiro, and M. Poulain, J. Appl. Phys. **93**, 1493 (2003).
15. J. P. Jouart, M. Bouffard, T. Duvaut, and N. M. Khaidukov, Chem. Phys. Lett. **366**, 62 (2002).
16. High-efficiency infrared-to-visible upconversion of Er^{3+} in BaCl_2 , Y. Wang and J. Ohwaki, J. Appl. Phys. 74, 1272 (1993).
17. Conference on Optical Fiber Communication.OFC'92 Tutorial Sessions. 1992
18. Y. Mita, T. Yoshida, T. Yagami, and S. Shionoya, Luminescence and Relaxation Processes in Er^{3+} Doped Glass Fibers. J. Appl. Phys. 71, 938-941 (1992).

19. M. Shimizu, M. Yamada, M. Horiguchi, and E. Sugita, IEEE Phot. Tech. Lett. 2, 43 (1990)
20. Y. C. Yan, A. J. Faber, and H. de Waal, P. G. Kik and A. Polman, Erbium-doped phosphate glass waveguide on silicon with 4.1 dB/cm gain at 1.535 μm . Appl. Phys. Lett. **71** (20), 1997.
21. Fiorenzo Vetrone, Jhon-Christopher Boyer, and Jhon A. Capobianco, 980 nm Excited Upconversion in an Er-Doped ZnO-TeO₂ Glass.

CAPITULO III

FIBRAS OPTICAS ESPECIALES

3.1 Introducción

En el mercado existen diferentes tipos de fibras para cada tipo de aplicación, entre ellos se encuentran fibras ópticas con dispersión corrida, fibras ópticas de doble recubrimiento y con diferentes geometrías, fibras ópticas conservadoras de polarización, entre otras, pero todas a base de sílice. Existen también fibras ópticas de materiales diferentes a la sílice con uno y doble recubrimiento, sin dopar y dopadas con diferentes iones de tierras raras. Estas fibras presentan un rango de transmisión hacia el infrarrojo mucho mayor que el de la sílice y cuando se dopan con iones de tierras raras se puede obtener amplificación imposible de obtener con la sílice. Este tipo de fibras a base de óxidos y no-óxidos pero diferentes a la sílice es a lo que llamamos fibras ópticas especiales. Estas fibras ópticas especiales mayores ventajas en los láseres y amplificadores. Un ejemplo de ellos son las fibras de fosfato y de telurio que dopadas con Er^{3+} presentan una mayor eficiencia y mayor ancho de banda, respectivamente. En este capítulo se mencionan algunos tipos de fibras especiales que pueden ser útiles en fibras láser y amplificadores.

3.2 Fibras ópticas a base de halogenuros activadas con Er, Nd, Tm, Pr.

Las fibras ópticas de halogenuros dopadas con tierras raras son esencialmente vidrios fluorados (no-óxidos). De éstos, el más representativo es el ZBLAN cuya composición típica es $53\text{ZrF}_4-20\text{BaF}_2-4\text{LaF}_3-3\text{AlF}_3-20\text{NaF}_4$. Debido a que la mayor concentración corresponde al zirconio (Zr) se le conoce como fluorozirconado. Aunque existen otras composiciones vítreas basadas en fluoruros y diferentes a la zirconia, el ZBLAN presenta una mayor estabilidad térmica¹. Esta composición vítrea contiene aproximadamente el 4% molar de LaF_3 , el cual puede ser fácilmente sustituido por un dopante de tierra rara sin afectar significativamente las propiedades de los vidrios. Dando como resultado la compatibilidad con el ZBLAN y una alta concentración de

dopantes puede ser tolerado sin modificar el vidrio². Los vidrios fluorados presentan baja energía fonónica lo que promueve los fenómenos cooperativos como la conversión hacia arriba debido a la baja probabilidad de decaimiento no radiativo. La tasa de decaimiento no radiativo esta dado por.

$$W_{nr} = W_o \exp(-\alpha\Delta E) \quad (43)$$

Donde W_o y α son constantes del material y ΔE es la energía del hueco al siguiente nivel inferior. El tiempo de vida esta dado por la siguiente ecuación.

$$\tau = \frac{1}{\sum A_r + W_{nr}} \quad (44)$$

Debido a la baja energía fonónica, se ha demostrado emisión láser en alrededor de 30 longitudes de onda diferentes, desde el UV (381 nm) hasta el IR (3.9 μm) en las fibras ZBLAN; la Tabla 3.1 muestra algunas de las emisiones obtenidas en fibras de ZBLAN utilizando distintos iones. Contrario a las fibras de sílice para las cuales se ha reportado emisión láser en el rango de 0.6 a 2.1 μm .

Tabla 3.1 Características de fibras láser fluoradas de ZBLAN dopadas con tierra rara.

i: incidente, e: emitida y a: potencia de de bombeo por absorción, uc: bombeo por upconversion. (Ref. 3)

λ (μm)	Tierra Rara	Potencia de Salida	Características de Bombeo
0.381	Nd	74 μW	590 nm (uc); 275 mW (i)
0.412	Nd	500 μW	590 nm (uc); 320 mW (i)
0.481	Tm	230 mW	1123 nm (uc); 1.6 W (i)
0.549	Ho	38 mW	643 nm (uc); 280 mW (a)
0.635	Pr	250 mW	476 nm (uc); 800 mW (i)
1.47	Tm	1 W	1064 nm (uc); 3.6 mW (e)
1.88	Tm	115 mW	780 nm ; 320 mW (e)
1.925	Tm	90 mW	790 nm ; 320 mW (e)
2.05	Ho	250 mW	826 nm ; 500 mW (e)
2.35	Tm	40 mW	790 nm ; 300 mW (e)
2.71	Er	158 mW	791 nm ; 800 mW (e)
2.9	Ho	12 mW	640 nm ; 500 mW (a)
3.45	Er	2.5 mW	650 nm ; 300 mW (a)
3.9	Ho	11 mW (77 °K)	885 nm ; 900 mW (e)

Se ha demostrado que para la ZBLAN dopado con Nd^{3+} emite oscilación láser a 381 nm correspondiente a la transición $^4\text{D}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$ y violeta para la transición $^2\text{P}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$ con una longitud de onda de 412 nm en una fibra de 40 cm de longitud⁴. Sander demostró emisión láser en el azul en una fibra de ZBLAN bombeados directamente por dos diodos láser. Obteniendo una salida de 106 mW a 482 nm y 12 % de la eficiencia de conversión del IR a radiación visible⁵. En el caso de las fibras ZBLAN dopadas con Er^{3+} se obtiene emisión verde a 544 nm por medio de upconversion, bombeados directamente por un diodo láser⁶. Otro tipo de emisión infrarroja demostrada, son las fibras fluoradas dopadas con Ho^{3+} emitiendo 2.05 μm son una eficiencia del 60 % y el Tm^{3+} que emite a 2.35 μm ⁷.

Pasando al tema de los amplificadores se ha demostrado una alta ganancia de amplificación óptica en las tres ventanas de comunicaciones con fibras fluoradas dopadas con tierras raras. Estos han sido construidos y comercializados con una tiempo de vida estima de 25 años, en condiciones normales. En la Tabla 3.2 se muestran algunas características de fibras amplificadoras fluoradas.

Tabla 3.2 Características de fibras ópticas amplificadoras de fluoruros y sulfuros.

LD: diodo láser. (Ref. 3)

λ (μm)	Tierra Rara	Ganancia Max.(dB)	Características de Bombeo
1.3	Pr	40.6	1.047 μm 650 mW (Nd:LYF)
1.3	Pr	30.5	1.017 μm 500 mW (MOPA)
1.3	Pr($\text{PbF}_2\text{-InF}_3$)	20	1.015 μm 100 mW (MOPA)
1.34	Pr(vidrio GNS)	32	1.017 μm 90 mW (Ti:safiro)
1.47	Tm	28	1.064 μm 200 mW (Nd:YAG)
1.54	Er	33	1.48 μm 50 mW (LD)
1.658	Tm	35	1.22 μm 140 mW (LD)

Debido a estas características son utilizados en láseres, en el caso de los iones trivalentes del Pr^{3+} son suspendidos en los vidrios fluorados ofreciendo transiciones en las longitudes de onda en el rojo, verde y azul por medio del proceso de conversión hacia arriba⁸. Las fibras láser de conversión hacia arriba es potencialmente una solución compacta para radiación de onda continua en el visible. Solamente dos transiciones a 885 y 910 nm han demostrado oscilación láser en el infrarrojo⁹. El Pr^{3+} también es utilizado como amplificador operando en la segunda ventana de telecomunicaciones a 1.31 μm correspondiente a la transición $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_5$. En la actualidad el desarrollo típico

de los amplificadores excede a 30 dB de ganancia de pequeña señal y los sistemas de demostración indican que los PDFA ofrecen excelentes características operacionales.

3.3 Fibras ópticas a base de calcogenuros activadas con Er^{3+} , Nd^{3+} , Tm^{3+} , Pr^{3+} .

La aplicación principal de las fibras ópticas de calcogenuros es la transmisión de IR y no para doparlos con tierras raras como se ha venido mencionando para otros tipos de fibras en la tabla 3.3 se muestran algunas propiedades de estas fibras.

Tabla 3.3 Composición química y propiedades físicas de algunos vidrios fluoruros, sulfurados y calcogenuros. Los índices de refracción están dados a (a): línea D del sodio, (b): 500 nm, (c): 10 μm (Ref. 3)

Vidrio	Composición	Tg (°C)	Tx (°C)	Tm (°C)	n	α (10^{-7}K^{-1})
ZBLAN	53ZrF ₄ -20BaF ₂ -4LaF ₃ -3AlF ₃ -20NaF	262	352	455	1.498 ^(a)	200
BIG	30BaF ₂ -18InF ₃ -12GaF ₃ -20ZnF ₂ -10YbF ₃ -6ThF ₄ -4ZrF ₄	332	460	576	1.505 ^(a)	171
PZG	35.3PbF ₂ -23.5ZnF ₂ -34.3GaF ₃ -4.9YF ₃ -2AlF ₃	270	325	547	~1.59 ^(a)	170
GLS	70Ga ₂ S ₃ -30La ₂ S ₃	556	681	830	~2.6 ^(b)	90
GNS	66Ga ₂ S ₃ -34Na ₂ S	484	599	720	-	145
2SG	Sb-Se-Ge-Ga	280	-	-	2.63 ^(c)	150
TeXAs	Te ₂ Se ₃ IAS ₄	118	-	-	2.8741 ^(c)	270

El dominio de la transparencia infrarroja de estos vidrios se extiende de 1-2 μm a 14-18 μm dependiendo de la composición vítrea. Las aplicaciones que estos vidrios presentan incluyen imágenes térmicas, sensores de IR, láseres de potencia guiados de CO₂ y fibras ópticas de bajas pérdidas. Estos vidrios son usualmente transparentes en la ventana óptica de 8-12 μm , que es un dominio espectral donde los cuerpos negros emiten mayormente.

A pesar de no tener mucha aplicación con tierras raras, se han efectuado demostraciones con el Pr^{3+} quien ha recibido una mayor atención, emitiendo a una longitud de onda de 1.31 μm correspondiente a la transición $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_5$ el cual es importante para telecomunicaciones. Además obteniendo una ganancia arriba de 30 dB en fibras hechas de sulfuros. Sin embargo esta transición sufre de relajación multifonónica grande que degrada la eficiencia de la fluorescencia a 1.31 μm ¹⁰. Para el

caso del Nd^{3+} inmerso en una matriz de galio-lantano-sulfuro (Ga:La:S) y aluminio-galio-sulfuro (Al:Ga:S) han sido reportados sus espectros de fluorescencia emitiendo a 786, 915, 1080, y 1360 nm, que corresponden a las transiciones $(^4\text{F}_{5/2}, ^2\text{H}_{9/2}) \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$, $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$, $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$ y $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ respectivamente. Estos datos han sido para demostrar oscilación láser en un calcogenuro¹¹. Otras de las tierras raras importantes el Tm^{3+} inmerso en matrices de germanio arsénico sulfuro (Ge:As:S) y germanio galio sulfuro (Ge:Ga:S). Este muestra 4 líneas de emisión en el espectro infrarrojo a 1.21, 1.45, 1.81 y 2.35 μm . La oscilación láser intensa y su reducida extinción multifonónica de estas transiciones son prometedoras para aplicaciones láser¹. Por último se encuentra el Er^{3+} el cual ha sido ampliamente estudiado. Este presenta fluorescencia en las transiciones visible y cercano infrarrojo inmersos en Ga:La:S emitiendo a 660, 822, 860, y 987 nm que corresponden a las transiciones $^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ y $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ respectivamente.

3.4 Fibras ópticas a base de fosfato activadas con tierras raras

Los vidrios de fosfato son materiales que presentan varias ventajas y son escogidos debido a que poseen una región amplia de formación vítrea, además es una matriz para fluorescencia de iones y muestran buenas propiedades químicas y termomecánicas¹². Sin embargo no se limita a eso ya que es un material muy atractivo como medio amplificador ya que a diferencia de los vidrios fluorados o la sílice, combina varias características deseables tales como intercambio de iones, alta ganancia en una longitud pequeña, ancho de ganancia espectral y bajas características de conversión hacia arriba¹³. El desarrollo de nuevos vidrios como el fosfato ha demostrado generación de potencias 20 veces mayores a la sílice. Comparando las fibras láser de sílice normal con las propiedades mencionadas anteriormente se traducen en oportunidades de diseño más pequeñas y generación de altas potencias¹⁴. La tabla 3.4 presenta una comparación del fosfato con otros tipos de vidrio. Los vidrios de fosfato exhiben una alta solubilidad de iones de tierras raras. Esto permite una alta concentración de iones activos en el interior de un volumen pequeño. Por lo que una densidad alta de iones activos en dispositivos ópticos pequeños tales como fibras láser y amplificadores ópticos proporciona una alta ganancia por unidad de longitud¹⁶.

Tabla 3.4 Principales características de las fibras ópticas dopadas con tierra rara (Ref. 15)

Material	Solubilidad de tierra rara	Eficiencia de Conversión Hacia Arriba	Nivel de dopante	Ganancia	Longitud
Sílice	Baja	Alta	<1000ppm	Muy Baja	Larga
Flúorados	Mediana	La + alta	Mediana	Baja	Larga
Fosfato	Muy Alta	La + baja	Muy Alta	Alta	Corta

Una guía de onda experimental manufacturado por Kigre's en un láser de fosfato dopado con Er^{3+} - Yb^{3+} ha demostrado una ganancia de 15.5 dB en trabajos previos¹⁷. el dispositivo es una muestra de 6.5 cm produciendo un coeficiente de ganancia pico de 2.3 dB/cm a 325 mW de potencia de bombeo combinada. Similarmente otros trabajos han presentado un segmento de 5.1 cm de fibra de fosfato obteniendo 15.5 dB y mas actuales 21 dB en una fibra de 7.1 cm de longitud¹⁸. Recientemente se ha demostrado el Er^{3+} en vidrios de fosfato una ganancia de 20 dB/m un nuevo prospecto para una nueva clase de amplificadores ópticos ultracortos¹⁹. En las fibras de fosfato la abertura numérica es mayor que para fibras de sílice, es decir las fibras graduadas de comunicación normal el ángulo de aceptación es de 12° , normal a la superficie y para los vidrios de fosfato la luz puede introducirse a ángulos mayores de 70° tal y como se muestra en la figura 3.1.

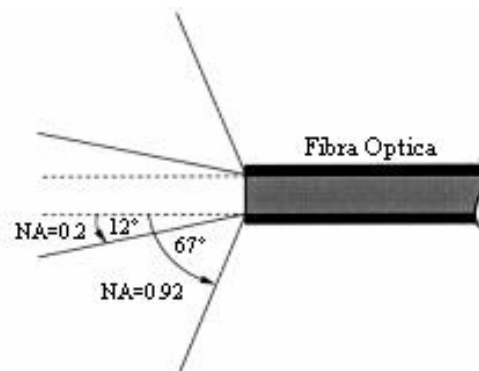


Figura 3.1 Abertura Numérica de una Fibra de Fosfato.

3.5 Fibras ópticas de telurio activadas con tierras raras

Entre todos los óxidos formadores de vidrio el telurio es el principal constituyente que posee propiedades ópticas extremas. También exhiben buena transmisión de luz en la región visible e infrarrojo hasta $7 \mu\text{m}$, por este motivo son importantes para el diseño de instrumento científicos ²⁰. El telurio ofrece varias ventajas sobre los demás vidrios tales como: buena estabilidad vítrea, solubilidad de iones de tierras raras, bajo coeficiente de corrosión, baja energía fonónica alrededor de 650 cm^{-1} ²¹, ancho de la ventana de transmisión (típicamente $0.4\text{-}5.0 \mu\text{m}$), alta linealidad y lo que lo hace mas atractivo es su alto índice de refracción no lineal ²². Debido a estas características el telurio es un buen candidato para la elaboración de fibras láser y amplificadores ópticos. Una aplicación importante ha sido utilizada como material para ensanchar la banda de los amplificadores de fibras dopadas con Er^{3+} operando a $1.56 \mu\text{m}$ ²³. El ancho de banda que presenta el telurio es de aproximadamente 80 nm ²¹ comparado con la sílice y el fosfato que son de aproximadamente 60 nm ²⁴. La figura 3.2 muestra una comparación de emisión estimulada de la sección transversal de diferentes matrices dopados con Er^{3+} .

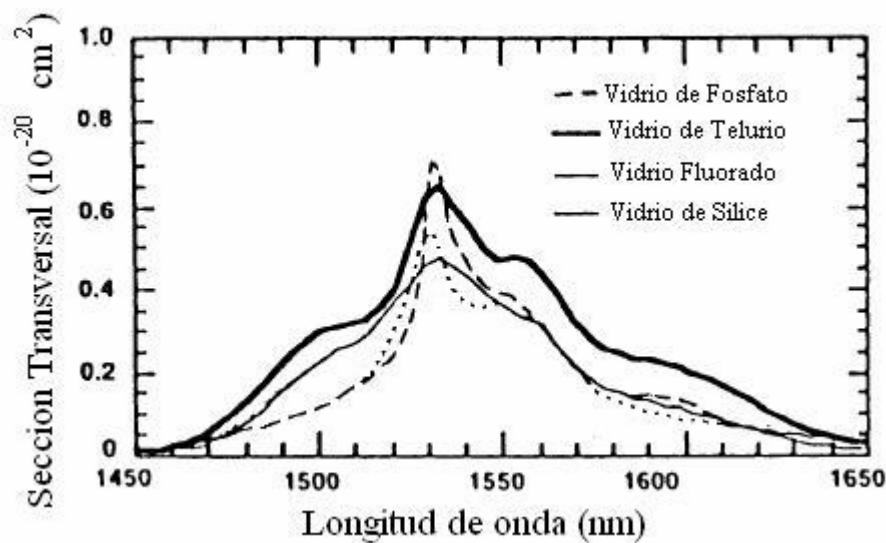


Figura 3.2 Comparación de los espectros de fluorescencia del Er^{3+} en matrices de fosfato, telurio, fluor y sílice (Ref. 23).

Sin embargo cuando es excitado a una longitud de onda de 980 nm que corresponde a la transición ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ algunos electrones decaerán al estado base ${}^4\text{I}_{15/2}$ emitiendo una longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$. Pero otros subirán a un estado superior ${}^4\text{S}_{3/2}$ para

después decaer al estado base y emitir 546 nm. A este proceso es llamado el fenómeno de *conversión hacia arriba* (Upconversion).

Más recientemente se ha comprobado que bombeando a una longitud de onda de 795 nm una matriz de telurio dopados con iones de Tm^{3+} emite un espectro de fluorescencia de 1470 nm con un ensanchamiento FWHM (full width at half maximum) de 105 nm²⁵.

Referencia Bibliográfica

1. Digonnet J. F Michael, Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers, Marcel Dekker Inc., 2001.
2. France P. W., Fibre Lasers and Amplifiers, Blackie, 1991.
3. Jean-Luc Adam and Jacques Lucas, Non-oxide glass Waveguides, SPIE, Vol. 3622, 1999.
4. D.S. Funk, J.W. Carlson, and J.G. Eden, Ultraviolet (381 nm), room temperature laser in neodymium-doped fluorozirconate fibre, Electron. Lett., 30, 22, 1859-1860 (1997).
5. S. Sanders, R.G. Waarts, D.G. Mehuys, and D.F Welch, Laser diode pumped 106 mW blue upconversion fiber laser, Appl. Phys. Lett., 67, 13, 1815-1817 (1995)
6. J.F. Massicott, M.C Brierly, R. Wyatt, S.T. Davey, and D. Szebesta, Low threshold, diode pumped operation of a green, Er^{3+} doped fluoride fibre laser, Electron. Lett., 29, 24, 2119-2120 (1993)
7. R.M Percival, D. Szebesta, and S.T. Davey, Highly efficient and tunable operation of two colour Tm-doped fluoride fibre laser, Electron.Lett., 28, 7, 671-672 (1992).
8. Blue Pr^{3+} Doped ZBLAN Fiber Upconversion Laser. Baney M. Douglas, Rankin Glenn, Chang Kok-Wai, 1997.
9. Tunable CW Lasing Around 610, 635, 695, 715, 885 and 910 in Praseodymium.
10. Heo Jong ,Rare-earth Doped Chalcogenide glasses for Fiber-Optic Amplifiers
11. T. Schweizer, D. W Heak, D. N Payne, T. Jensen, G. Huber. Rare-Earth Doped Chalcogenide Glass Laser. Electronic Letters. 32:666 (1996).
12. Jiang H., Myers J, Rhonehouse D., Myers M, Ballato J. Rare-earth Doped Phosphate Glasses for Neodymium Laser Systems Possessing a Greatly Enhanced Pump Power Conversion. Kigre. 2000.
13. Ed Bryant, Michael R. Lange, Ruikun Wu, Tao-Lue Chen, Michael Myers, John Myers, Chuck Rapp. High Strength, Low Loss, Fusion Spliced Interface Between Fused Silica & Phosphate Glass Fibers. Kigre.
14. John D. Myers, Ruikun Wu, Tao Lue Chen, Michael Myers, Christopher R. Hardy, John K. Driver. Phosphate Glass Fiber Laser Materials and Architectures. Kigre. 2003.
15. Ruikun Wu, John D. Myers, Michael J. Myers. High Power Rare-Earth-Doped Phosphate Glass Fiber and Fiber Laser. Kigre Inc. 2001.

16. Ayman M. Samara, M. Yasin Akhtar Raja, and Sameer K. Arabasi. High-Gain Short-Length Phosphate Glass Erbium-Ytterbium-Doped Fiber Amplifiers.
17. Ruikun Wu, John D. Myers, Michael J. Myers. New Generation High Power Rare-Earth-Doped Phosphate Glass Fiber and Fiber Laser. Kigre. 2001.
18. Michael R. Lange, Eddy Bryant, Michael J. Myers, John D. Myers. High Gain Coefficient Phosphate Glass Fiber Amplifier. 2003
19. Michael R. Lange, Ed Bryant, Michael J. Myers, John D. Myers, Ruikun Wu, Christopher R. Hardy, John K. Driver. High Gain Ultra-Short Length Phosphate Glass Erbium Doped Fiber Amplifier Material. Kigre Inc. 2002.
20. Raouf El-Mallawany. The Optical Properties of Tellurite Glasses. Journal Applied Physics 72(5)1992.
21. A. Mori, Y Ohishi, and S. Sudo. Erbium- Doped Tellurites Glass Fire Laser and Amplifier. Electronic Letter 33:863(1997).
22. R. El-Mallawany, Amitava Patra, Christopher S. Friend, Rakesh Kapoor, Paras N. Prasad. Study of luminescence properties of Er^{3+} -ions in new tellurite glasses. 2004.
23. Frank Ellrich, Remigiuz Zengerle. Broadband Optical Fiber Amplifiers.
24. Naoki Sugimoto, Optical Amplifier Materials, Solid state and Materials Science, 2001.
25. Elizabeth R. Taylor, Li Na Ng, Neil P. Sessions, and Herbert Buerger. Spectroscopy of Tm^{3+} -doped tellurite glasses for 1470 nm fiber amplifier. Journal of Applied Physics Vol 92(1) pp. 112-117. July 1, 2002.

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN ESPECTROSCÓPICA DE VIDRIOS DE FOSFATO Y TELURIO DOPADOS CON Er³⁺

4.1 Introducción

En el mundo actual de amplificadores, el Er³⁺ es la tierra rara más estudiada, debido a que posee una transición que emite una longitud de onda de 1.5 μm, el cual corresponde al mínimo de atenuación en la sílice. Dependiendo de la matriz donde se encuentre el Er³⁺ puede lograrse mayor eficiencia, ejemplo de ello es el vidrio de fosfato y telurio, el primero presenta menor conversión hacia arriba que otros tipos de vidrios y el segundo presente un mayor ancho de banda. Para que esta eficiencia sea óptima es necesario conocer la concentración de iones, debido a que es directamente proporcional a la amplificación, ya que conforme se aumenta la dicha concentración, ocurre el fenómeno de *quenching*, el cual disminuye su amplificación. En este capítulo se presenta el proceso para formar las muestras vítreas. Y así caracterizar las propiedades ópticas y espectroscópicas de los iones de Er³⁺ en ambas matrices.

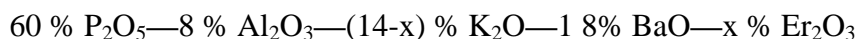
4.2 Preparación de las muestras de fosfato y telurio dopadas con Er³⁺

En esta sección se describe el cálculo de la cantidad de material que lleva cada composición, así como la forma de preparación de los vidrios dopados con Er³⁺. La reacción utilizada se encuentran en forma de óxido, se mezclan, para después ser fundidas e introducirlas en un molde de latón, con orificios en forma de discos previamente calentados. El objetivo de preparar estas muestras en forma de disco, se debe al simple hecho, que las propiedades espectroscópicas que presenta una preforma y una muestra de vidrio son las mismas.

4.2.1 Matriz de fosfato

Recientemente, se ha reportado algunas de las composiciones típicas (comerciales) de los vidrios de fosfato dopados con iones de Nd^{3+} entre las que se pueden mencionar el **LG-750**: (55-60) P_2O_5 - (8-12) Al_2O_3 - (13-17) K_2O - (10-15) BaO - (0-2) Nd_2O_3 , **LHG-8**: (56-60) P_2O_5 - (8-12) Al_2O_3 - (13-17) K_2O - (10-15) BaO - (0-2) Nd_2O_3 y **LG-770**: (55-60) P_2O_5 - (8-12) Al_2O_3 - (13-17) K_2O - (10-15) BaO - (0-2) Nd_2O_3 , estas han sido probadas y demostradas su capacidad para producir emisión láser¹. También se han reportado diferentes composiciones para obtener fibras ópticas amplificadoras de alta ganancia dopadas con Er^{3+} para obtener amplificación en la ventana de comunicación más importante, $1.55 \mu\text{m}^2$. En este tipo de matrices, el compuesto P_2O_5 es el formador de la red vítrea, mientras que el resto de los componentes actúan como modificadores de red para cambiar las propiedades mecánicas y/o ópticas de la muestra obtenida. Un ejemplo de los cambios posibles a obtener es el uso de óxido de aluminio (Al_2O_3) que modifica las propiedades mecánicas reduciendo su fragilidad, lo hace más resistente a la humedad, modifica el índice de refracción y reduce la aglomeración de los iones dopantes. Sin embargo se tiene que tener cuidado ya que un exceso de ciertos componentes puede impedir que una barra o preforma de estos vidrios pueda ser estirada para producir fibras ópticas.

Para la preparación de los vidrios, algunas veces se utilizan distintos compuestos a partir de los cuales se obtienen los componentes deseados que forman finalmente la red vítrea. El resto de los componentes introducidos por los compuestos utilizados se queman o evaporan durante el proceso de fundido³. En algunos casos ciertos elementos de los compuestos utilizados se quedan en la matriz vítrea actuando como modificadores del vidrio, aunque en estos casos el contenido de estos contaminantes es muy bajo. En la Tabla 4.1 se muestran los precursores y compuestos utilizados con sus pesos moleculares correspondientes para formar la composición vítrea de nuestro interés denotada por la siguiente expresión general:



Donde $x = 0.5, 1, 2$ y 3 mol %. Nuestro interés es estudiar el efecto de la concentración de los iones aunque, ciertamente, también se tendrá un cambio en el

contenido de potasio por lo que se tendrá también un cambio en la composición de la red. Sin embargo dado la variación tan pequeña esperamos que los efectos sean despreciables.

Tabla 4.1 a) Compuestos disponibles para la formación de la matriz del fosfato. b) Compuestos principales de la red vítrea del fosfato.

a)

Precursor	Peso molecular [gr/mol]
NaH ₂ PO ₄ H ₂ O	137.999
Al ₂ O ₃	101.96
K ₂ CO ₃	138.21
BaO	153.34
Er ₂ O ₃	382.52

b)

Compuesto Principal	Peso Molecular [gr/mol]
P ₂ O ₅	141.96
Al ₂ O ₃	101.96
K ₂ O	94.19
BaO	153.34
Er ₂ O ₃	382.52

Para la preparación de las muestras de vidrio es necesario conocer la cantidad de gramos de cada uno de los compuestos utilizados para preparar la cantidad de muestra deseada. En nuestro caso se prepararán 5 gr en todas las composiciones. A continuación se describe el procedimiento para calcular el contenido de cada uno de los compuestos necesarios para la preparación de las muestras deseadas; la descripción se hará para la muestra correspondiente a x = 0.5 mol %.

El primer paso es multiplicar el peso molecular (PM) de cada componente de la matriz vítrea por su concentración dada en mol %.

$$\begin{aligned}
 \text{PMC P}_2\text{O}_5 & 141.94 \text{ gr/mol (0.6)} = 85.1730 \text{ gr/mol} \\
 \text{PMC Al}_2\text{O}_3 & 101.96 \text{ gr/mol (0.08)} = 8.1568 \text{ gr/mol} \\
 \text{PMC K}_2\text{O} & 94.19 \text{ gr/mol (0.135)} = 12.7158 \text{ gr/mol} \\
 \text{PMC BaO} & 153.34 \text{ gr/mol (0.18)} = 27.6012 \text{ gr/mol} \\
 \text{PMC Er}_2\text{O}_3 & 382.52 \text{ gr/mol (0.05)} = 1.9126 \text{ gr/mol}
 \end{aligned}$$

Lo que da un peso molecular total (PMT)

$$PMT = 135.5594 \text{ gr/mol.}$$

El siguiente paso es dividir el peso molecular individual de cada concentración (PMC) entre el PMT, dando como resultado el peso molecular relativo (PMR).

$$PMR = \frac{PMC}{PMT} \quad (45)$$

$$PMR(P_2O_5) = \frac{85.1730 \text{ gr/mol}}{135.5594 \text{ gr/mol}} = 0.6203$$

$$PMR(Al_2O_3) = \frac{8.1568 \text{ gr/mol}}{135.5594 \text{ gr/mol}} = 0.0602$$

$$PMR(K_2O) = \frac{12.7158 \text{ gr/mol}}{135.5594 \text{ gr/mol}} = 0.09380$$

$$PMR(BaO) = \frac{27.6012 \text{ gr/mol}}{135.5594 \text{ gr/mol}} = 0.2036$$

$$PMR(Er_2O_3) = \frac{1.9126 \text{ gr/mol}}{135.5594 \text{ gr/mol}} = 0.0141$$

Paso seguido se obtiene el número de moles ($\#M$) de cada componente dado por la ecuación 46 donde involucra la cantidad de gramos ($\#gr$) de muestra a preparar, el peso molecular relativo (PMR) y el peso molecular (PM) de la componente correspondiente.

$$\#M = \frac{(\#gr)(PMR)}{PM} \quad (46)$$

$$\#M(P_2O_5) = \frac{(5gr)(0.6203)}{141.96 \text{ gr/mol}} = 0.0221mol$$

$$\#M(Al_2O_3) = \frac{(5gr)(0.0602)}{101.96 \text{ gr/mol}} = 0.0030mol$$

$$\#M(K_2O) = \frac{(5gr)(0.09380)}{94.19 \text{ gr/mol}} = 0.0050mol$$

$$\#M(BaO) = \frac{(5gr)(0.2036)}{153.34 \text{ gr/mol}} = 0.0066mol$$

$$\#M(Er_2O_3) = \frac{(5gr)(0.0141)}{382.52 \text{ gr/mol}} = 0.00018mol$$

Finalmente se obtiene la cantidad de gramos necesarios para formar el vidrio. Sin embargo como se menciona anteriormente, en ausencia de los elementos P_2O_5 y K_2O necesarios para composición del vidrio, se toman $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$ y K_2CO_3 los cuales contienen estos elementos. Partiendo que 1 mol = 137.99 gr para el $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$ y 1 mol = 138.21 gr para el K_2CO_3 tenemos que:

$$1mol \xleftarrow{\dagger} 137.99 \text{ gr}$$
$$0.0221mol \rightarrow (NaH_2PO_4 \cdot H_2O) = 3.0538 \text{ gr}$$

$$1mol \xleftarrow{\dagger} 138.21 \text{ gr}$$
$$0.0050mol \rightarrow (K_2CO_3) = 0.6882 \text{ gr}$$

Una parte importante es notar que $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$ solo tiene un átomo de P (Fósforo) por lo que es necesario multiplicar por dos y poder obtener P_2O_5 . Los elementos restantes se calculan mediante operación directa teniendo en cuenta que 1 mol = 101.96 gr para el Al_2O_3 , 1 mol = 153.34 gr para el BaO y 1 mol = 382.52 gr para el Er_2O_3 .

$$1mol \xleftarrow{\dagger} 101.96 \text{ gr}$$
$$0.0030mol \rightarrow (Al_2O_3) = 0.3009 \text{ gr}$$

$$1mol \xleftarrow{\dagger} 153.34 \text{ gr}$$
$$0.0066mol \rightarrow (BaO) = 1.0180 \text{ gr}$$

$$1mol \xleftarrow{\dagger} 382.52 \text{ gr}$$
$$0.00018mol \rightarrow (Er_2O_3) = 0.0705 \text{ gr}$$

Finalmente se obtienen la cantidad de gramos necesarios para formar el vidrio como se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Cantidad en gramos de cada compuesto para formar el vidrio de fosfato dopado al 0.5 mol % de Er³⁺.

60% P ₂ O ₅ —8% Al ₂ O ₃ —13.5% K ₂ O—18% BaO—0.5% Er ₂ O ₃		
Precursor	# moles	X[gr]
NaH ₂ PO ₄ H ₂ O	0.0221	6.1076
Al ₂ O ₃	0.0030	0.3009
K ₂ CO ₃	0.0050	0.6882
BaO	0.0066	1.0180
Er ₂ O ₃	0.00011	0.0705

Para facilitar la descripción de las muestras preparadas, se le proporcionara un código a cada composición vítrea como se ilustra en la Tabla 4.3 La misma operación realizada anteriormente para el cálculo de la cantidad de material que forma al vidrio, también es efectuada para las demás concentraciones, estos resultados se muestran en la Tabla 4.4

Tabla 4.3 Código de Composición vítrea

Código	Composición Vítrea
PE05	60% P ₂ O ₅ —8% Al ₂ O ₃ —13.5% K ₂ O—18% BaO—0.5% Er ₂ O ₃
PE1	60% P ₂ O ₅ —8% Al ₂ O ₃ —13% K ₂ O—18% BaO—1% Er ₂ O ₃
PE2	60% P ₂ O ₅ —8% Al ₂ O ₃ —12% K ₂ O—18% BaO—2% Er ₂ O ₃
PE3	60% P ₂ O ₅ —8% Al ₂ O ₃ —11% K ₂ O—18% BaO—3% Er ₂ O ₃

Tabla 4.4 Cantidad de gramos de cada compuesto utilizado para formar el vidrio dopado al 1% Er³⁺, 2% Er³⁺, 3% Er³⁺.

Precursor	PE1		PE2		PE3	
	# moles	X[gr]	# moles	X[gr]	# moles	X[gr]
NaH ₂ PO ₄ H ₂ O	0.0219	6.0434	0.0214	5.9188	0.0210	5.7992
Al ₂ O ₃	0.0029	0.2977	0.0029	0.2916	0.0028	0.2857
K ₂ CO ₃	0.0047	0.6557	0.0043	0.5928	0.0039	0.5324
BaO	0.0066	1.0073	0.0064	0.9866	0.0063	0.9666
Er ₂ O ₃	0.00041	0.1396	0.00071	0.2735	0.0011	0.4019

Después de ser calculado la cantidad de gramos de cada componente correspondiente a la matriz de fosfato, se muelen finamente en un mortero hasta obtener una mezcla homogénea. Después, la mezcla en polvo se deposita en un crisol de platino y se

introduce en un horno con una temperatura de 950 °C durante 3 horas. Después de este proceso se vacía el vidrio fundido en un molde previamente calentado a una temperatura de 200 °C. El precalentado del molde es con la finalidad de evitar choques térmicos. El proceso de enfriamiento es en forma natural, este proceso es muy importante para evitar fracturas, esfuerzos que provoquen variaciones en el índice de refracción y burbujas de aire indeseadas. Finalmente se remueven las muestras y se preparan para ser analizadas las propiedades ópticas y espectroscópicas.

4.2.2 Matriz de telurio

Al igual que el vidrio de fosfato los cálculos para la matriz de telurio siguen el mismo procedimiento y también se les asigna un código (Tabla 4.5) pero con diferentes precursores para formar el vidrio. En la Tabla 4.6 se muestran los elementos disponibles y los que forman este vidrio.

Tabla 4.5 Código de Composición vítrea para el telurio

Código	Composición Vítrea
TE05	75% TeO ₂ —14.5% ZnO—10% Na ₂ O—0.5% Er ₂ O ₃
TE1	75% TeO ₂ —14% ZnO—10% Na ₂ O—1% Er ₂ O ₃
TE2	75% TeO ₂ —13% ZnO—10% Na ₂ O—2% Er ₂ O ₃
TE3	75% TeO ₂ —12% ZnO—10% Na ₂ O—3% Er ₂ O ₃

Tabla 4.6. a) Compuestos disponibles para la formación de la matriz del telurio. b)

Compuestos principales de la red vítrea.

a)

Precursor	Peso Molecular
TeO ₂	159.59
ZnO	81.37
Na ₂ CO ₃	106.0
Er ₂ O ₃	382.852

b)

Compuestos Principales	Peso Molecular
TeO ₂	159.59

ZnO	81.37
Na ₂ O	61.99
Er ₂ O ₃	382.852

Después de realizar los cálculos correspondientes obtenemos la cantidad de moles y gramos para cada concentración como se muestra en la Tabla 4.7.

4.7 Cantidad de gramos de cada compuesto utilizado para formar el vidrio dopado al 0.5% Er³⁺, 1% Er³⁺, 2% Er³⁺, 3% Er³⁺.

Precursor	PE05		PE1		PE2		PE3	
	# moles	X[gr]	# moles	X[gr]	# moles	X[gr]	# moles	X[gr]
TeO ₂	0.0268	4.2884	0.0050	0.4028	0.0045	0.3662	0.0041	0.3311
ZnO	0.0052	0.4217	0.0035	0.3748	0.0035	0.3670	0.0034	0.3595
Na ₂ CO ₃	0.0036	0.3788	0.00035	0.1353	0.00069	0.2649	0.0010	0.3892
Er ₂ O ₃	0.00017	0.0684	0.0265	4.2428	0.0260	4.1543	0.0254	4.0694

Después de ser calculado la cantidad de gramos de cada componente correspondiente a la matriz de telurio, se muelen finamente en un mortero hasta obtener una mezcla homogénea. Esta mezcla es depositada en un crisol de platino y posteriormente se introducen en un horno a una temperatura de 800 °C durante 3 horas. Se vacía el vidrio fundido en un molde hecho en forma de discos previamente calentado a una temperatura de 200 °C, esto con la finalidad de evitar choques térmicos. Finalmente se remueve el disco y se analizan sus propiedades ópticas y espectroscópicas.

4.3 Teoría de Judd-Ofelt

En Agosto de 1962 fueron publicados dos artículos sobre la espectroscopia y la investigación de los lantánidos. “Intensities of Cristal Spectra of Rare-Earth Ions” por George S. Ofelt de la universidad de Johns Hopkins en Baltimore y “Optical Absortion Intensities of Rare-Earth Ion” por Brian R. Judd del laboratorio Lawrence Radation. Ambos trabajaban independientemente, pero en forma simultanea, los apellidos de estos dos autores denotan lo que en la actualidad se conoce como la teoría de Judd-Ofelt. Esta teoría es una de las herramientas mas útiles en estimar la magnitud de la fuerza

eléctrica dipolar en las transiciones de iones de tierras raras. Además determina la intensidad de los parámetros fenomenológicos Ω_2 , Ω_4 y Ω_6 los cuales son utilizados para interpretar varias propiedades ópticas de los iones lantánidos, como las probabilidades de transición radiativa, la razón de ramificación y los tiempos de vida de las transiciones fluorescentes. Mediante los espectros de absorción es posible medir la intensidad de las líneas inducidas por las transiciones dipolares, en forma experimental está determinado por la siguiente expresión:

$$S_{med}(J \rightarrow J') = \frac{3ch(2J+1)}{8\pi^3 \lambda e^2 N_0} \left[\frac{9n}{(n^2+2)^2} \right] \int \alpha(\lambda) d\lambda. \quad (47)$$

Donde J y J' representan los números cuánticos del momento angular total de los estados inicial y final, respectivamente. N_0 es la concentración del ion bajo estudio y λ es la longitud de onda media de la banda de absorción específica que corresponden a la transición $J \rightarrow J'$. $\int \alpha(\lambda) d\lambda$ es la integral del coeficiente de absorción, c es la velocidad de la luz, e es la carga del electrón, h es la constante de Planck y n es el índice de refracción. Este último se mide utilizando el refractómetro de Abbe para las muestras de fosfato y para el telurio se utiliza el método del ángulo de Brewster y se ajusta a cada una de las transiciones mediante la ecuación de dispersión de Sellmeier:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{S\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (48)$$

Donde $S = 1.303$ y $\lambda_0 = 197.18$.

La intensidad medida de las líneas de transición son utilizadas para obtener los parámetros fenomenológicos Ω_2 , Ω_4 y Ω_6 , también conocidos como parámetros de intensidad de Judd-Ofelt, resolviendo un sistema de ecuaciones propuesto por Judd⁴ y Ofelt⁵.

$$Sed_{calc}(J \rightarrow J') = \sum_{t=2,4,6} \Omega_t \left| \langle (S, L)J \| U^{(t)} \| (S', L')J' \rangle \right|^2. \quad (49)$$

Donde Ω_2 , Ω_4 y Ω_6 son la intensidad de los parámetros de Judd-Ofelt. Estos tres parámetros exhiben la influencia de la matriz sobre la probabilidad de decaimiento

raditivo, puesto que contienen implícitamente el efecto de la simetría del campo cristalino. Todas las propiedades analizadas dependen de los Ω_i , pero explícitamente la probabilidad de ramificación depende de Ω_4 y la calidad espectroscópica de Ω_6 . Por otra parte U^2 , U^4 , U^6 son los elementos de matriz reducida entre los estados caracterizados por los números cuánticos (S, L, J) y (S', L', J') . El número de ecuaciones Sed depende el número de bandas de absorción observadas, incrementándose la precisión con el número de bandas. Los valores obtenidos de S_{mes} y S_{calc} se ajustan por mínimos cuadrados para obtener los valores finales de los parámetros Ω_i . Una medición de la precisión del ajuste esta dado por la desviación rms (root mean square)

$$\Delta S_{rms} = \left[\frac{\sum (S_{med} - S_{calc})^2}{(q - p)} \right]^{1/2}. \quad (50)$$

Donde q es el número de bandas analizadas y p es el número de parámetros buscados.

Utilizando ahora los parámetros Ω_i para calcular la S_{calc} correspondiente es posible calcular la probabilidad de decaimiento radiativo entre un estado superior o inicial (J) y uno inferior o final (J') del ion mediante la expresión

$$A[J \rightarrow J'] = \frac{64\pi^4 e^2}{3h(2J+1)\lambda^3} \left[\frac{n(n^2+2)^2}{9} Sed_{calc} + n^3 Smd \right]. \quad (51)$$

Formalmente la probabilidad de decaimiento radiativo esta dado por la Ecu. (51), en el caso de la Smd es muy pequeña por lo que puede despreciarse, sin embargo puede haber casos en no sea despreciable por lo que es bueno tenerlo en cuenta.

La razón de fluorescencia ramificada depende directamente de la probabilidad de decaimiento radiativo entre un estado superior y uno inferior específico e inversamente de la suma total de las probabilidades de decaimiento hacia todos los estados finales posibles. Formalmente se expresa por la ecuación:

$$\beta(J \rightarrow J') = \frac{A[J \rightarrow J']}{\sum A[J \rightarrow J']}. \quad (52)$$

Mientras que el tiempo de vida radiativo para un estado excitado (J) es calculado por el inverso de la suma total de las probabilidades de decaimiento sobre todos los estados finales posibles. Formalmente es expresado por la ecuación

$$\tau_{rad} = \left(\sum A[(J \rightarrow J')] \right)^{-1} \quad (53)$$

es decir, la razón de fluorescencia ramificada para una transición de un estado superior a uno inferior específico depende directamente de esa transición específica y del tiempo de decaimiento radiativo de ese estado superior. El tiempo de vida radiativo representa un promedio efectivo sobre variaciones en el ambiente local del ion bajo estudio. Depende de la matriz en la que se encuentra insertado el ion debido a que la probabilidad de decaimiento radiativo total depende de los parámetros Ω_i . Depende también de la corrección de campo local del ion bajo estudio produciendo una dependencia con el índice de refracción.

4.4 Análisis de Judd-Ofelt

Las muestras de fosfato y telurio descritas en la sección 4.2, son pulidas para obtener caras plano paralela y efectuar mediciones ópticas. El espectro de absorción de cada una de las muestras preparadas son obtenidos con un espectrofotómetro modelo LAMBDA 900 de Perkin-Elmer, mientras que los índices de refracción se miden con un refractómetro de Abbe para el caso de los vidrios de fosfato y par el telurio se miden con el metodo del ángulo de Brewster. Sin embargo a falta precisión en este ultimo metodo se toma un índice de refracción reportados en artículos. Con estos datos y utilizando la teoría de Judo-Ofelt descrita en la sección anterior se calculan los parámetros fenomenológicos Ω_2 , Ω_4 y Ω_6 para cada muestra. A partir de estos valores se caracteriza las propiedades espectroscópicas de los iones de Er³⁺ en ambas matrices, de fosfato y telurio, como función de la concentración de iones.

4.4.1 Espectroscopia del Er^{3+} en matrices de Fosfato

El espectro de absorción se encuentra en el rango de 300 a 1800 nm ejemplo de ello se muestra en la figura 4.1. En este rango de medición se analizan 13 transiciones para los iones de Er^{3+} , como se muestra en la figura 4.2.

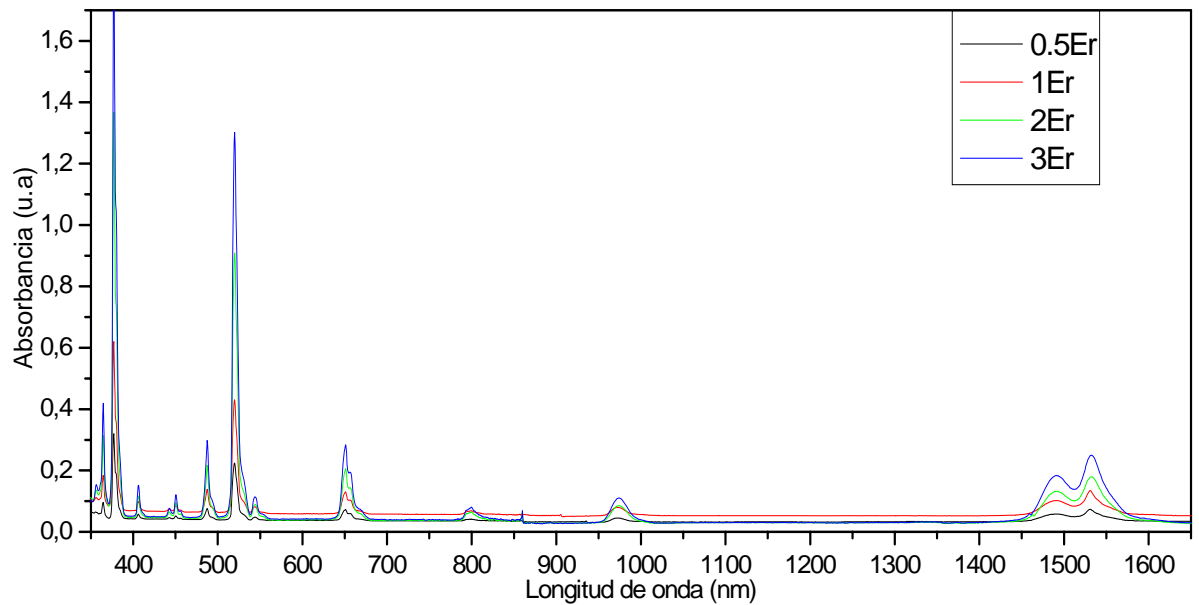


Figura 4.1 Espectro de absorción de las muestras de fosfato dopadas a distintas concentraciones de Er^{3+} .

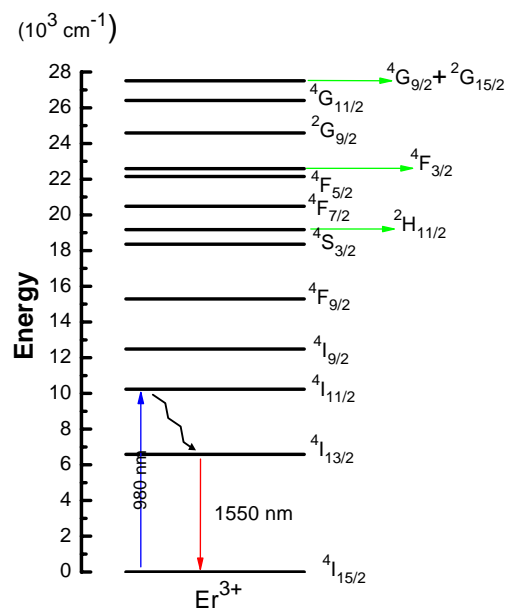


Figura 4.2 Diagrama de energías para los estados de absorción del Er^{3+} en una matriz de fosfato.

En la Tabla 4.8 muestra cada una de las transiciones observadas, así como la longitud de onda media de cada banda, y que serán consideradas para el cálculo. El índice de refracción medido se efectuó en un refractómetro de Abbe y utilizando la ecuación 48, se calcula el índice de refracción por medio de los coeficientes de sellmeier para cada una de las bandas de absorción observadas considerando la longitud de onda media. Los resultados se listan también la Tabla 4.8. Además contiene la integral del coeficiente de absorción de cada una de las bandas observadas. Con estos datos y utilizando la Ecu. 47 se obtiene los valores de la intensidad de las líneas observadas inducidas por transiciones dipolares eléctricas $S_{meas}(J \rightarrow J')$. Con estos datos y utilizando los elementos de la matriz reducida correspondientes a las transiciones observadas listados en la Tabla 4.9, y en conjunto con la ecuación 49 se obtienen los valores de los parámetros fenomenológicos Ω_2 , Ω_4 y Ω_6 . La obtención de estos valores produce un valor de S_{calc} para cada una de las transiciones observadas. Estos valores se describen en la Tabla 4.8 indicándose también el valor *rms* para cada caso, lo que da una idea de la calidad del ajuste.

Tabla 4.8 Parámetros ópticos e intensidad de las líneas observadas inducidas por transiciones dipolares eléctricas, medida experimentalmente y calculadas mediante los parámetros de Judd-Ofelt, para cada una de las muestras de fosfato bajo estudio

a)PE05, b)PE1, c)PE2, d)PE3.

a)

PE05						
Transición de ⁴ I _{15/2}	λ (nm)	Índice de Refracción (n)	Γ (nm cm ⁻¹)	S _{meas} (10 ⁻²⁰ cm ²)	S _{calc} (10 ⁻²⁰ cm ²)	ΔS _{rms} (10 ⁻²⁰ cm ²)
⁴ I _{13/2}	1516,65	1,5249	32,36656478	2,17759758	2,07408421	0,16288
⁴ I _{11/2}	976,2	1,5357	9,102788553	0,94375280	0,65781944	
⁴ I _{9/2}	801,22	1,5450	1,270271069	0,15933293	0,1371059	
⁴ F _{9/2}	654,05	1,5599	6,647848491	1,00992193	0,99521975	
⁴ S _{3/2}	544,88	1,5809	0,944954214	0,16954872	0,29310106	
² H _{11/2}	521,36	1,5876	20,20151044	3,76867201	3,7926493	
⁴ F _{7/2}	488,1436	1,5991	3,280109308	0,64775701	0,93574678	
⁴ F _{5/2}	451,69	1,6155	0,565611006	0,11917654	0,29588492	
⁴ F _{3/2}	442,67	1,6203	0,18945434	0,04057713	0,16862259	
⁴ G _{9/2}	406,72	1,6442	0,870070503	0,19905176	0,31258788	
⁴ G _{11/2}	378,6	1,6697	20,28928516	4,8864807	4,88155394	
⁴ G _{9/2} + ² G _{15/2}	363,33	1,6873	2,653229811	0,65658857	0,54344931	

b)

PE1						
Transición de ⁴ I _{15/2}	λ (nm)	Índice de Refracción (n)	Γ (nm cm ⁻¹)	S _{meas} (10 ⁻²⁰ cm ²)	S _{calc} (10 ⁻²⁰ cm ²)	ΔS _{rms} (10 ⁻²⁰ cm ²)
⁴ I _{13/2}	1517,7	1,5249	58,72785667	1,80038934	1,62930679	0,11797
⁴ I _{11/2}	976,2	1,5357	8,314453563	0,39305738	0,51212055	
⁴ I _{9/2}	802,2	1,5450	2,652591954	0,15153415	0,14429002	
⁴ F _{9/2}	654,53	1,5599	12,56640632	0,86988137	0,88677237	
⁴ S _{3/2}	546,26	1,5809	1,974560345	0,16118143	0,22611582	
² H _{11/2}	521,293	1,5876	37,48687931	3,18912198	3,13308566	
⁴ F _{7/2}	488,322	1,5991	6,044866782	0,54414385	0,75454197	
⁴ F _{5/2}	451,471	1,6155	1,009969425	0,09707145	0,22826346	
⁴ F _{3/2}	442,97	1,6203	0,292909655	0,02858985	0,13008563	
⁴ G _{9/2}	406,821	1,6442	1,559671149	0,16266808	0,24534991	
⁴ G _{11/2}	377,93	1,6697	36,25557391	3,98627379	4,03177181	
⁴ G _{9/2} + ² G _{15/2}	363,2	1,6873	4,989121954	0,5630923	0,47741052	

c)

PE2						
Transición de ⁴ I _{15/2}	λ (nm)	Índice de Refracción (n)	Γ (nm cm ⁻¹)	S _{meas} (10 ⁻²⁰ cm ²)	S _{calc} (10 ⁻²⁰ cm ²)	ΔS _{rms} (10 ⁻²⁰ cm ²)
⁴ I _{13/2}	1519,3437	1,5249	118,4488952	1,39775548	1,23895705	0,12278
⁴ I _{11/2}	976,2174	1,5357	7,657901481	0,13949775	0,38724827	
⁴ I _{9/2}	802,383	1,5450	6,097222963	0,13419	0,1315395	
⁴ F _{9/2}	654,209	1,5599	25,83344556	0,68940122	0,73677	
⁴ S _{3/2}	545,9054	1,5809	3,935692963	0,12386813	0,16940169	
² H _{11/2}	521,497	1,5876	79,43948704	2,60328739	2,49239985	
⁴ F _{7/2}	488,1593	1,5991	13,55614037	0,47035863	0,58515789	
⁴ F _{5/2}	451,497	1,6155	2,015795185	0,07465381	0,17101066	
⁴ F _{3/2}	443,535	1,6203	0,507147407	0,019055	0,09745769	
⁴ G _{9/2}	406,63	1,6442	3,210430741	0,12907079	0,18636787	
⁴ G _{11/2}	378,59	1,6697	73,79616222	3,1228578	3,20686752	
⁴ G _{9/2} + ² G _{15/2}	363,23	1,6873	11,18185704	0,48628333	0,3936463	

d)

PE3						
Transición de ⁴ I _{15/2}	λ (nm)	Índice de Refracción (n)	Γ (nm cm ⁻¹)	S _{meas} (10 ⁻²⁰ cm ²)	S _{calc} (10 ⁻²⁰ cm ²)	ΔS _{rms} (10 ⁻²⁰ cm ²)
⁴ I _{13/2}	1518,49	1,5249	184,3717415	2,14927822	1,87105075	0,50935
⁴ I _{11/2}	976,8159	1,5357	7,781416022	0,13986667	0,54647317	
⁴ I _{9/2}	802,743	1,5450	9,402059409	0,20421214	0,19637956	
⁴ F _{9/2}	654,4381	1,5599	38,94868269	1,02588307	1,11614903	
⁴ S _{3/2}	546,0148	1,5809	5,822380215	0,18089152	0,26121228	
² H _{11/2}	521,36	1,5876	115,0109533	3,72204487	2,5483639	
⁴ F _{7/2}	488,241	1,5991	19,23178344	0,65872996	0,89682803	
⁴ F _{5/2}	453,152	1,6155	3,10285914	0,11311651	0,26369326	
⁴ F _{3/2}	443,48	1,6203	0,755037312	0,02801195	0,15027681	

⁴ G _{9/2}	406,94	1,6442	5,182740538	0,20560474	0,28667015
⁴ G _{11/2}	779,26	1,6697	105,9699448	2,36782856	3,27624952
⁴ G _{9/2} + ² G _{15/2}	363,1659	1,6873	17,25566086	0,74099005	0,55851811

Tabla 4.9. Elementos de la matriz reducida para transiciones posibles y su respectivo índice de refracción ajustado por la ecuación de Sellmeier (Ref. 6).

Transición	Energía (cm ⁻¹)	<i>n</i>	<i>U</i> ²	<i>U</i> ⁴	<i>U</i> ⁶
⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{15/2}	6500	1,524717	0,0195	0,1173	1,4316
⁴ I _{11/2} → ⁴ I _{15/2}	10100	1,535192	0,0282	0,0003	0,3953
⁴ I _{11/2} → ⁴ I _{13/2}	3600	1,519736	0,0331	0,1708	1,0864
⁴ I _{9/2} → ⁴ I _{15/2}	12250	1,543934	0	0,1732	0,0099
⁴ I _{9/2} → ⁴ I ₁₅₃₂	5750	1,523144	0,0004	0,0106	0,7162
⁴ I _{9/2} → ⁴ I _{11/2}	2150	1,518337	0,003	0,0674	0,1271
⁴ F _{9/2} → ⁴ I _{15/2}	15150	1,559061	0	0,5354	0,4619
⁴ F _{9/2} → ⁴ I _{13/2}	8650	1,530373	0,0101	0,1533	0,0714
⁴ F _{9/2} → ⁴ I _{11/2}	5050	1,521857	0,0704	0,0112	1,2839
⁴ F _{9/2} → ⁴ I _{9/2}	2900	1,518972	0,1279	0,0059	0,0281
⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{15/2}	18350	1,580912	0	0	0,2211
⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{13/2}	11850	1,542157	0	0	0,3462
⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{11/2}	8250	1,529189	0	0,0042	0,0739
⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{9/2}	6100	1,523853	0	0,0788	0,2542
⁴ S _{3/2} → ⁴ F _{9/2}	3200	1,519279	0	0,0003	0,0264
² H _{11/2} → ⁴ I _{15/2}	19150	1,587349	0,7125	0,4123	0,0925
² H _{11/2} → ⁴ I _{13/2}	12650	1,545784	0,023	0,0611	0,0529
² H _{11/2} → ⁴ I _{11/2}	9050	1,531619	0,0357	0,1382	0,0371
² H _{11/2} → ⁴ I _{9/2}	6900	1,525639	0,2077	0,0662	0,2858
² H _{11/2} → ⁴ F _{9/2}	4000	1,520249	0,3629	0,0224	0,0022
² H _{11/2} → ⁴ S _{3/2}	800	1,517671	0	0,1988	0,0101
⁴ F _{7/2} → ⁴ I _{15/2}	20300	1,597372	0	0,1468	0,6266
⁴ F _{7/2} → ⁴ I ₁₃₂	13800	1,551513	0	0,3371	0,0001
⁴ F _{7/2} → ² I _{11/2}	10200	1,535555	0,0035	0,2648	0,1515
⁴ F _{7/2} → ⁴ I _{9/2}	8050	1,52862	0,0163	0,0954	0,4277
⁴ F _{7/2} → ⁴ F _{9/2}	5150	1,52203	0,0121	0,0342	0,0151
⁴ F _{7/2} → ⁴ S _{3/2}	1950	1,518199	0,0001	0,0058	0
⁴ F _{7/2} → ² H _{11/2}	1150	1,517785	0,1229	0,0153	0,4017
⁴ F _{5/2} → ⁴ I _{15/2}	21950	1,613489	0	0	0,2233
⁴ F _{5/2} → ⁴ I _{15/2}	15450	1,560865	0	0,1783	0,3429

$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	11850	1,542157	0	0,0979	0,0028
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	9700	1,533779	0,0107	0,0576	0,102
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	6800	1,525403	0,0004	0,2415	0,3575
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	3600	1,519736	0,0082	0,004	0
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	2800	1,518876	0	0,0503	0,1015
$^4F_{5/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	1650	1,518019	0	0,1468	0,6266
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	22300	1,617194	0	0	0,1272
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	15800	1,56303	0	0	0,0345
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	12200	1,543708	0	0,0927	0,4861
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	10050	1,535011	0	0,2299	0,0558
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	7150	1,526245	0	0,004	0,0595
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	3950	1,520182	0,026	0	0
$^4F_{3/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	3150	1,519226	0	0,0005	0,003
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	2000	1,518232	0,0028	0,0584	0
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	350	1,517584	0,0618	0,035	0
$^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	24400	1,641785	0	0,019	0,2255
$^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	17900	1,577473	0,078	0,1194	0,3535
$^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	14300	1,554202	0,0428	0,0824	0,1128
$^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	12150	1,543483	0,0428	0,0062	0,0043
$^2H_{9/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	9250	1,532266	0,0147	0,0062	0,0043
$^2H_{9/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	6050	1,523749	0	0,0019	0,0025
$^2H_{9/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	5250	1,517594	0,0055	0,0314	0,0369
$^2H_{9/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	4100	1,520385	0	0,0019	0,0025
$^2H_{9/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	2450	1,518568	0,0308	0,1828	0,0671
$^2H_{9/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$	2100	1,518301	0,1058	0,0488	0,024
$^2G_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	26400	1,669528	0,9181	0,5261	0,1171
$^2G_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	19900	1,593779	0,1013	0,2651	0,2594
$^2G_{11/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	16300	1,566239	0,0003	0,0496	0,0134
$^2G_{11/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	14150	1,553382	0,0716	0,0131	0,0235
$^2G_{11/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	11250	1,539622	0,4252	0,0368	0,0122
$^2G_{11/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	8050	1,52862	0	0,1302	0,0044
$^2G_{11/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	7250	1,526494	0,0004	0,1539	0,0494
$^2G_{11/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	6100	1,523853	0,0877	0,1287	0,0159
$^2G_{11/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	4450	1,520891	0	0,0378	0,0815
$^2G_{11/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$	4100	1,520385	0	0,0234	0,0923
$^2G_{11/2} \rightarrow ^4G_{9/2}$	2000	1,518232	0,2906	0,117	0,1328
$^4G_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	27350	1,684447	0	0,2415	0,1234
$^4G_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	20850	1,602507	1,0908	0,352	0,016
$^4G_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	17250	1,572727	0,0894	0,1524	0,0144

${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	15100	1,558765	0,0051	0,0042	0,0027
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	12200	1,543708	0,2201	0,3121	0,3765
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	9000	1,53146	0	0,1651	0,01
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	8200	1,529045	0,018	0,3274	0,1495
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	7050	1,526	0,6062	0,0088	0,1243
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$	5400	1,522479	0,163	0,0824	0,0028
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	5050	1,521857	0	0,171	0,1089
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^2G_{9/2}$	2950	1,519021	0,0269	0	0,0452
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$	950	1,517715	0,0005	0,2021	0,1639
${}^2K_{15/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	27700	1,690259	0,0219	0,0041	0,0757
${}^2K_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	21200	1,605895	0,0001	0,0016	0,0261
${}^2K_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	17600	1,57525	0,0468	0,0018	0,2488
${}^2K_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	15450	1,560865	0	0,2221	0,1003
${}^2K_{15/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	12550	1,545314	0	0,0776	0,0125
${}^2K_{15/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	9350	1,532595	0	0	0,0032
${}^2K_{15/2} \rightarrow {}^4H_{11/2}$	8550	1,530071	0,0977	0,0001	1,1458
${}^2K_{15/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	7400	1,526874	0	0,0001	0,0002
${}^2K_{15/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$	5750	1,523144	0	0	0,0461
${}^2K_{15/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	5400	1,522479	0	0	0,0001
${}^2K_{15/2} \rightarrow {}^2G_{9/2}$	3300	1,519388	0	0,7106	0,0758
${}^2K_{15/2} \rightarrow {}^2G_{11/2}$	1300	1,517846	0,0965	0,0595	0,6706
${}^2K_{15/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$	350	1,517584	0	0,0114	0,0598

Los valores de los parámetros fenomenológicos Ω_2 , Ω_4 y Ω_6 así como el factor de calidad espectroscópica de cada una de las muestras bajo estudio se listan en la Tabla 4.10. Estos valores obtenidos de los parámetros de Judd-Ofelt para el Er^{3+} se aproximan a los valores reportados para distintas matrices, como se ilustra en la tabla 4.11.

Tabla 4.10 Cálculo de los parámetros de Judd-Ofelt a diferentes concentraciones de Er^{3+}

	Parámetros de Judd-Ofelt (10^{-20})			Factor de Calidad Espectroscópica
	Ω_2	Ω_4	Ω_6	$\chi = \Omega_4/\Omega_6$
PE05	4,73673	0,71542	1,32565	0,5396738
PE1	3,81633	0,77418	1,02269	0,7570069
PE2	2,98454	0,71526	0,76618	0,9335428
PE3	2,8063	1,06569	1,18142	0,9020377

Tabla 4.11 Parametros de Judd-Ofelt Para Algunas Matrices

Matriz	Parámetros de Judd-Ofelt (10 ⁻²⁰)			Referencia
	Ω_2	Ω_4	Ω_6	
Fosfato	6.28	1.03	1.39	Ref. 7
YAG	0.74	0.33	1.02	Ref. 8
YSGG	0.92	0.48	0.87	Ref. 8
GGG	0.70	0.37	0.86	Ref. 8
Telurio	5.22	1.55	1.13	Ref. 9

El factor de calidad espectroscópica es de gran importancia debido a que es el parámetro en la predicción de transiciones láser en una matriz dada. De acuerdo con la tabla 4.10 se puede observar que este factor aumenta, conforme aumenta la concentración de Er³⁺ (figura 4.3). Sin embargo existe límite de este valor, y después decae, lo cual indica que el fenómeno de *quenching* esta presente en esa muestra.

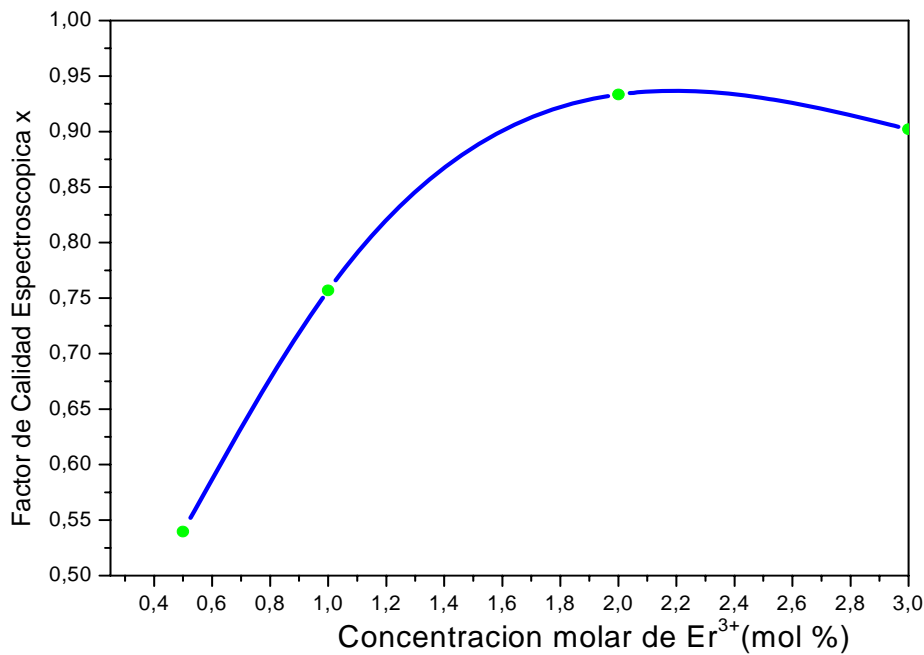


Figura 4.3 Factor de Calidad Espectroscópica como Función de la Concentración de Er³⁺ en vidrios de fosfato.

Los parámetros Ω_2 , Ω_4 y Ω_6 ahora pueden aplicarse a la ecuación (49) para calcular la intensidad de las líneas correspondientes a transiciones entre un estado superior y las posibles transiciones a un nivel inferior. Con estos valores se calculan la probabilidad de decaimiento radiativo para dicha transición por medio de la ecuación (51) y con ellos

se calcula la razón de fluorescencia ramificada utilizando la ecuación (52). Todos estos valores se describen en la Tabla 4.12

Tabla 4.12 Intensidad de las transiciones posibles, probabilidad de decaimiento radiativo y razón de fluorescencia ramificada de líneas un estado superior a uno inferior observadas en las distintas muestras bajo estudio.

a).

PE05			
Transición	$S_{calc} 10^{-20} \text{ cm}^2$	$A_{JJ} (s^{-1})$	B_{JJ}
$^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,07408421	93,28	1,00000
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,65781944	132,31	0,89716
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	1,71916442	15,17	0,10284
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,13703436	60,12	0,58980
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	0,95890814	41,66	0,40870
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	0,23091939	0,15	0,00150
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,99535231	851,59	0,89359
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	0,2521659	37,86	0,03972
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,04347925	59,98	0,06294
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	0,64729887	3,58	0,00375
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,29310106	1164,86	0,68396
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	0,45893978	453,73	0,26641
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	0,10097024	32,80	0,01926
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	0,393355	51,08	0,02999
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	0,03521177	0,65	0,00038
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	3,79250622	5785,68	0,95933
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	0,22278358	89,98	0,01492
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	0,31715348	45,56	0,00755
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	1,41004908	88,67	0,01470
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	1,73789938	21,05	0,00349
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	0,1556142	0,02	0,00000
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,93567523	2602,99	0,85811
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	0,24130004	192,04	0,06331
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2I_{11/2}$	0,40685715	126,53	0,04171
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	0,71243972	107,37	0,03540
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	0,10179898	3,96	0,00131
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	0,0046231	0,01	0,00000

${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	1,12560275	0,48	0,00016
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,29601748	1434,16	0,56712
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,58212421	883,63	0,34942
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,07375126	48,61	0,01922
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,22710728	80,69	0,03191
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{7/2}$	0,64858781	78,03	0,03086
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	0,04170282	0,74	0,00029
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,17053894	1,41	0,00056
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,93567523	1,58	0,00063
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,16862259	1294,64	0,55344
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,0457349	111,87	0,04782
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,71071738	769,21	0,32883
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,23844588	141,70	0,06058
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	0,08173781	17,18	0,00734
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,12315486	4,31	0,00184
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,00433466	0,08	0,00003
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	0,05504325	0,25	0,00011
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$	0,31776926	0,01	0,00000
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,31252686	1321,13	0,42910
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,92350252	1353,20	0,43951
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,41121554	292,93	0,09514
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,21286772	90,98	0,02955
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	0,07976575	14,70	0,00477
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,00467342	0,24	0,00008
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,09743258	3,19	0,00103
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	0,00467342	0,07	0,00002
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$	0,36562065	1,22	0,00040
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	0,56787352	1,19	0,00039
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	4,88040249	23018,7	0,89662
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,01336106	1757,61	0,06846
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,05466946	49,26	0,00192
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,37967426	218,00	0,00849
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	2,05655588	576,89	0,02247
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,09898031	9,94	0,00039
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,17748463	12,97	0,00051
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	0,52856295	22,88	0,00089
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$	0,13508322	2,26	0,00009
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	0,13909821	1,82	0,00007
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$	1,63624251	2,47	0,00010

${}^2K_{15/2}+{}^2G_{9/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$	0,54337777	2313,78	0,17424
${}^2K_{15/2}+{}^2G_{9/2}\rightarrow{}^4I_{13/2}$	5,47607527	8826,98	0,66472
${}^2K_{15/2}+{}^2G_{9/2}\rightarrow{}^4I_{11/2}$	1,10437036	957,035	0,07207
${}^2K_{15/2}+{}^2G_{9/2}\rightarrow{}^4I_{9/2}$	0,32259832	183,632	0,01383
${}^2K_{15/2}+{}^2G_{9/2}\rightarrow{}^4F_{9/3}$	1,83702927	542,865	0,04088
${}^2K_{15/2}+{}^2G_{9/2}\rightarrow{}^4S_{3/2}$	0,13561412	16,1439	0,00122
${}^2K_{15/2}+{}^2G_{9/2}\rightarrow{}^2H_{11/2}$	2,49945209	226,335	0,01704
${}^2K_{15/2}+{}^2G_{9/2}\rightarrow{}^4F_{7/2}$	3,04281339	177,465	0,01336
${}^2K_{15/2}+{}^2G_{9/2}\rightarrow{}^4F_{5/2}$	0,89586092	24,3243	0,00183
${}^2K_{15/2}+{}^2G_{9/2}\rightarrow{}^4F_{3/2}$	0,26683229	5,99266	0,00045
${}^2K_{15/2}+{}^2G_{9/2}\rightarrow{}^4G_{9/2}$	0,79619765	4,05496	0,00031
${}^2K_{15/2}+{}^2G_{9/2}\rightarrow{}^4G_{11/2}$	1,75287008	0,54402	0,00004
${}^2K_{15/2}+{}^2G_{9/2}\rightarrow{}^2G_{9/2}$	0,08742959	0,00052	0,00000

b)

PE1			
Transición	$S_{calc}10^{-20} \text{ cm}^2$	$A_{JJ}(s^{-1})$	B_{JJ}
${}^4I_{13/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$	1,62930679	73,2730	1,00000
${}^4I_{11/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$	0,51212055	103,0081	0,89501
${}^4I_{11/2}\rightarrow{}^4I_{13/2}$	1,36959645	12,0830	0,10499
${}^4I_{9/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$	0,1442126	63,2670	0,66153
${}^4I_{9/2}\rightarrow{}^4I_{1532}$	0,74218039	32,2426	0,33713
${}^4I_{9/2}\rightarrow{}^4I_{11/2}$	0,19361211	0,1280	0,00134
${}^4F_{9/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$	0,88687463	758,7833	0,90019
${}^4F_{9/2}\rightarrow{}^4I_{13/2}$	0,23024656	34,5655	0,04101
${}^4F_{9/2}\rightarrow{}^4I_{11/2}$	1,59036698	46,6803	0,05538
${}^4F_{9/2}\rightarrow{}^4I_{9/2}$	0,52141424	2,8810	0,00342
${}^4S_{3/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$	0,22611582	898,6467	0,68262
${}^4S_{3/2}\rightarrow{}^4I_{13/2}$	0,35405381	350,0330	0,26589
${}^4S_{3/2}\rightarrow{}^4I_{11/2}$	0,07882803	25,6048	0,01945
${}^4S_{3/2}\rightarrow{}^4I_{9/2}$	0,32097212	41,6822	0,03166
${}^4S_{3/2}\rightarrow{}^4F_{9/2}$	0,02723116	0,5057	0,00038
${}^2H_{11/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$	3,13293083	4779,462	0,95882
${}^2H_{11/2}\rightarrow{}^4I_{13/2}$	0,18917817	76,4091	0,01533
${}^2H_{11/2}\rightarrow{}^4I_{11/2}$	0,28117647	40,3888	0,00810
${}^2H_{11/2}\rightarrow{}^4I_{9/2}$	1,13618687	71,4451	0,01433
${}^2H_{11/2}\rightarrow{}^4F_{9/2}$	1,40453912	17,0157	0,00341
${}^2H_{11/2}\rightarrow{}^4S_{3/2}$	0,16423615	0,0158	0,00000

${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,75446455	2098,874	0,83521
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,26107841	207,7846	0,08268
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^2I_{11/2}$	0,37329698	116,0931	0,04620
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,57346574	86,4240	0,03439
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	0,08809716	3,4293	0,00136
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,00487188	0,0102	0,00000
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,89168526	0,3831	0,00015
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,22836573	1106,399	0,54309
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,48871528	741,8443	0,36414
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,07865576	51,8417	0,02545
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,1897415	67,4182	0,03309
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	0,55410121	66,6668	0,03272
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	0,03439066	0,6068	0,00030
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,14274387	1,1829	0,00058
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,75446455	1,2772	0,00063
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,13008563	998,7671	0,53764
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,03528266	86,3020	0,04646
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,56889406	615,7176	0,33144
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,23504989	139,6861	0,07519
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	0,06394652	13,4393	0,00723
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,09922468	3,4722	0,00187
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,00345515	0,0612	0,00003
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	0,05589786	0,2529	0,00014
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$	0,26294574	0,0064	0,00000
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,24532506	1037,048	0,41931
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,75163058	1101,357	0,44531
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,34249049	243,9766	0,09865
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,17253656	73,7462	0,02982
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	0,06529757	12,0342	0,00487
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,00402766	0,2041	0,00008
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,0830362	2,7144	0,00110
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	0,00402766	0,0631	0,00003
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$	0,32768544	1,0908	0,00044
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	0,46609258	0,9766	0,00039
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	4,03082885	19011,67	0,89520
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,85711448	1486,611	0,07000
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,05324823	47,9829	0,00226
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,30742438	176,5174	0,00831
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	1,66367177	466,6843	0,02197

$^4G_{11/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	0,10529808	10,5793	0,00050
$^4G_{11/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	0,17119354	12,5096	0,00059
$^4G_{11/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	0,45059018	19,5049	0,00092
$^2G_{11/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	0,1126129	1,8810	0,00000
$^2G_{11/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$	0,11250971	1,4683	0,00000
$^2G_{11/2} \rightarrow ^4G_{9/2}$	1,33541838	2,0139	0,00000
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,47733311	2032,553	0,18412
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	4,48004383	7221,462	0,65416
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	0,90833416	787,1525	0,07131
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	0,29999692	170,7674	0,01547
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{9/3}$	1,53949788	454,9413	0,04121
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{S_{3/2}}$	0,1413166	16,8228	0,00152
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	2,01977872	182,8995	0,01657
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	2,44767619	142,7558	0,01293
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	0,73586421	19,9802	0,00181
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$	0,24385756	5,4767	0,00050
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} \rightarrow ^4G_{9/2}$	0,77653681	3,9548	0,00036
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} \rightarrow ^4G_{11/2}$	1,4261412	0,4426	0,00004
$^2K_{15/2} + ^2G_{9/2} \rightarrow ^2G_{9/2}$	0,06998226	0,0004	0,00000

c)

PE2			
Transición	$S_{\text{calc}} 10^{-20} \text{ cm}^2$	$A_{JJ'} (s^{-1})$	$B_{JJ'}$
$^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	1,23895705	55,718	1,00000
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,38724827	77,891	0,89341
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	1,05332891	9,293	0,10659
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,13146798	57,676	0,70338
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,55751137	24,220	0,29537
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	0,15454313	0,102	0,00125
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,73684662	630,424	0,90429
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	0,19449804	29,199	0,04188
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	1,20181683	35,276	0,05060
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	0,40747217	2,251	0,00323
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,16940169	673,249	0,68153
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	0,2652504	262,238	0,26546
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	0,05962455	19,367	0,01961
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	0,25112453	32,612	0,03301
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	0,02044164	0,380	0,00038

$^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,4922568	3802,07	0,95855
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	0,15287747	61,747	0,01557
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	0,23382198	33,587	0,00847
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	0,88621226	55,726	0,01405
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	1,10079669	13,336	0,00336
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	0,14993184	0,014	0,00000
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,58508636	1627,67	0,81875
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	0,24119036	191,956	0,09656
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2I_{11/2}$	0,3159222	98,250	0,04942
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	0,44457749	67,000	0,03370
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	0,07214405	2,808	0,00141
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	0,00444696	0,009	0,00000
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	0,68551655	0,295	0,00015
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,17108727	828,894	0,52498
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	0,39025266	592,383	0,37519
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	0,07216913	47,566	0,03013
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	0,15128351	53,753	0,03405
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{7/2}$	0,44783702	53,882	0,03413
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	0,02733426	0,482	0,00031
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	0,11374446	0,943	0,00060
$^4F_{5/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	0,58508636	0,990	0,00063
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,09745769	748,257	0,52543
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	0,0264331	64,656	0,04540
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	0,43874302	474,854	0,33345
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	0,20719067	123,130	0,08646
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	0,04844855	10,182	0,00715
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	0,07759802	2,715	0,00191
$^4F_{3/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	0,00265616	0,047	0,00003
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	0,05012782	0,227	0,00016
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	0,20947859	0,005	0,00000
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	0,18636278	787,801	0,41096
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	0,58903946	863,114	0,45025
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	0,27310035	194,546	0,10149
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	0,13546745	57,902	0,03020
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	0,05160189	9,510	0,00496
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	0,00327443	0,166	0,00009
$^2G_{9/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	0,06714602	2,195	0,00115
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	0,00327443	0,051	0,00003
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	0,27408358	0,912	0,00048

${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	0,36905713	0,773	0,00040
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	3,20612247	15121,8	0,89442
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,6906952	1197,96	0,07086
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,04663897	42,027	0,00249
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,24106806	138,417	0,00819
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	1,30469498	365,986	0,02165
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,09649788	9,695	0,00057
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,14912128	10,897	0,00064
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	0,36598011	15,842	0,00094
${}^2G_{11/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$	0,08948019	1,495	0,00000
${}^2G_{11/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	0,08745517	1,141	0,00000
${}^2G_{11/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$	1,05274067	1,588	0,00000
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,39357477	1675,89	0,19023
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	3,54100546	5707,81	0,64788
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,71844489	622,596	0,07067
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,25600043	145,723	0,01654
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{9/3}$	1,23367622	364,567	0,04138
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{S_{3/2}}$	0,12820276	15,2617	0,00173
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	1,57198724	142,350	0,01616
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	1,91098252	111,454	0,01265
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$	0,58288327	15,8264	0,00180
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	0,20582253	4,62247	0,00052
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$	0,68125441	3,46957	0,00039
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$	1,11598654	0,34636	0,00004
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^2G_{9/2}$	0,05397132	0,00032	0,00000

d)

PE3			
Transición	$S_{\text{calc}} 10^{-20} \text{ cm}^2$	$A_{JJ} (s^{-1})$	B_{JJ}
${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,87105075	84,145	1,00000
${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,54647317	109,918	0,88882
${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,55840394	13,749	0,11118
${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,19627299	86,107	0,69690
${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{1532}$	0,85855282	37,298	0,30187
${}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,23040483	0,152	0,00123
${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,11626717	955,045	0,91012
${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,27606685	41,444	0,03949
${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,72632597	50,671	0,04829

${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,39841089	2,201	0,00210
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,26121228	1038,13	0,68173
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,4090081	404,363	0,26554
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,09178293	29,813	0,01958
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,38429343	49,905	0,03277
${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	0,03150923	0,585	0,00038
${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	2,54815076	3887,34	0,95236
${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,19215548	77,612	0,01901
${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,29129343	41,842	0,01025
${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,9910666	62,320	0,01527
${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	1,04487573	12,658	0,00310
${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,22379086	0,022	0,00001
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,89672146	2494,62	0,82350
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,3593611	286,005	0,09441
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^2I_{11/2}$	0,4710012	146,479	0,04835
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,65270309	98,365	0,03247
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	0,08824214	3,435	0,00113
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,00646161	0,014	0,00000
${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,83577591	0,359	0,00012
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,2638114	1278,12	0,52967
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,59512133	903,363	0,37436
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,1076387	70,944	0,02940
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,21191591	75,297	0,03120
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,680844	81,916	0,03395
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	0,02727438	0,481	0,00020
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,17351831	1,438	0,00060
${}^4F_{5/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,89672146	1,518	0,00063
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,15027681	1153,79	0,52796
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,04075904	99,697	0,04562
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,6730781	728,477	0,33334
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,31092467	184,777	0,08455
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	0,07455732	15,669	0,00717
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,07296372	2,553	0,00117
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,00407711	0,072	0,00003
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	0,07009373	0,317	0,00015
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	0,21072819	0,005	0,00000
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,28665858	1211,77	0,45807
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,76376663	1119,14	0,42305
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,34118643	243,048	0,09188

${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,13179689	56,333	0,02129
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	0,05293994	9,757	0,00369
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,00497836	0,252	0,00010
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,09249164	3,024	0,00114
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	0,00497836	0,078	0,00003
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$	0,36051484	1,200	0,00045
${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	0,37726585	0,790	0,00030
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	3,27546355	15448,9	0,87932
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,87325214	1514,60	0,08621
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,06953099	62,656	0,00357
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,24265477	139,328	0,00793
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$	1,24686814	349,765	0,01991
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$	0,14395065	14,463	0,00082
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	0,22349391	16,331	0,00093
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	0,40205072	17,404	0,00099
${}^2G_{11/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$	0,1365688	2,281	0,00000
${}^2G_{11/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	0,13398226	1,748	0,00000
${}^2G_{11/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$	1,09708804	1,654	0,00000
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,55841155	2377,79	0,24366
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	3,48795414	5622,29	0,57614
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,85749666	743,097	0,07615
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,3771634	214,693	0,02200
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{9/3}$	1,492537	441,064	0,04520
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4I_{S_{3/2}}$	0,19153962	22,802	0,00234
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$	2,20399611	199,581	0,02045
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$	1,85774888	108,349	0,01110
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{5/2}$	0,60301051	16,373	0,00168
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	0,31100735	6,985	0,00072
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$	0,9757183	4,969	0,00051
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$	1,53689062	0,477	0,00005
${}^2K_{15/2} + {}^2G_{9/2} \rightarrow {}^2G_{9/2}$	0,08279783	0,001	0,00000

El tiempo de vida radiativo de un estado excitado es calculado por la ecuación (53) y son descritos en la Tabla 4.13

Tabla 4.13 Tiempos de vida radiativo de los principales estados excitados del Er³⁺ de las muestras bajo estudio.

Estado Excitado	τ_{rad} (ms)			
	PE05	PE1	PE2	PE3
⁴ I _{13/2}	10.7	13.6	17.9	11.9
⁴ I _{11/2}	6.78	8.69	11.5	8.09
⁴ I _{9/2}	9.81	10.5	12.2	8.09
⁴ F _{9/2}	1.05	1.19	1.43	0.95
⁴ S _{3/2}	0.58	0.76	1.01	0.65
² H _{11/2}	0.16	0.20	0.25	0.24
⁴ F _{7/2}	0.33	0.39	0.50	0.33
⁴ F _{5/2}	0.39	0.49	0.63	0.41
⁴ F _{3/2}	0.42	0.53	0.70	0.45
² G _{9/2}	0.32	0.40	0.52	0.37
⁴ G _{11/2}	0.03	0.047	0.059	0.056
⁴ G _{9/2} + ² G _{15/2}	0.07	0.090	0.11	0.10

Se puede observar que con el aumento de la concentración de iones, los tiempos de vida aumentan para todas las transiciones, sin embargo llega a un limite para le cual el tiempo de vida vuelve a disminuir. Al igual que el factor de calidad espectroscópica existe una concentración óptima donde presenta un mayor tiempo de vida radiativo.

4.4.2 Espectroscopia del Er³⁺ en matriz de telurio

Al igual que el vidrio de fosfato el rango de medición efectuado para el telurio es entre 300 y 1800 nm, un ejemplo de este espectro se muestra en la figura 4.4. Las bandas de absorción analizadas para este caso son 9 transiciones (figura 4.5), debido a bandas hipersensibles, que podría alterar los cálculos y obtener error en la información.

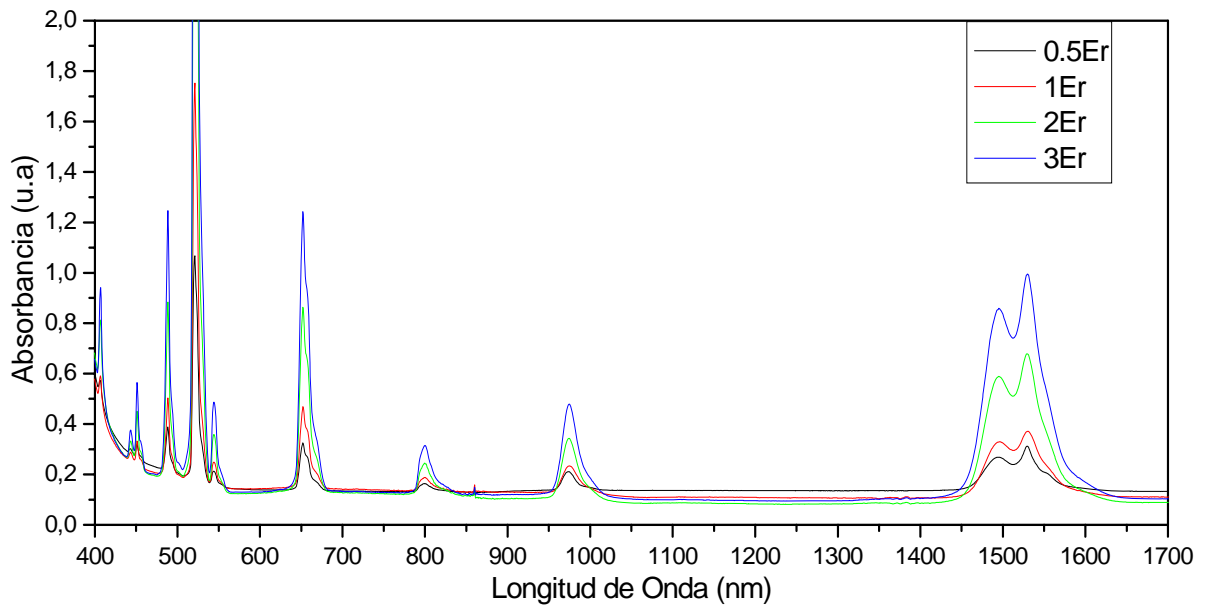


Figura 4.4 Espectro de absorción del telurio a diferentes concentraciones de Er³⁺.

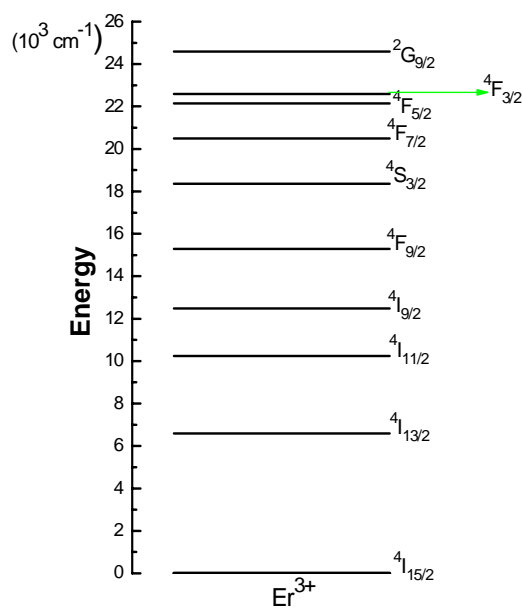


Figura 4.5 Diagrama de energías para los estados de absorción analizadas del Er³⁺ en una matriz de telurio.

Como ya se explico anteriormente, el procedimiento para obtener calculo de los parámetros de Judd-Ofelt, omitiremos el desarrollo para el vidrio de telurio, ya que es el semejante al vidrio del fosfato. En la tabla 4.14 se indican los valores del índice de refracción n , S_{meas} , S_{calc} , Γ , así como la longitud de onda media para cada concentración en el vidrio de telurio. El índice de refracción del telurio es aproximadamente $n \sim 2$, en este caso especifico el índice de refracción es tomado con un valor de $n = 2.08$, debido a que esta matriz es muy semejante a la presentada en esta trabajo¹⁰.

Tabla 4.14 Parámetros ópticos e intensidad de las líneas observadas inducidas por transiciones dipolares eléctricas, medida experimentalmente y calculadas mediante los parámetros de Judd-Ofelt, para cada una de las muestras de telurio a)TE05, b)TE1, c)TE2, d)TE3.

a)

TE05						
Transición de $^4I_{15/2}$	λ (nm)	Índice de Refracción (n)	Γ (nm cm ⁻¹)	S_{meas} (10 ⁻²⁰ cm ²)	S_{calc} (10 ⁻²⁰ cm ²)	ΔS_{rms} (10 ⁻²⁰ cm ²)
$^4I_{13/2}$	1517,36	2,08	112,85696	2,2931791	2,0567536	0,20646
$^4I_{11/2}$	978,806	2,08	17,504694	0,5513865	0,7148722	
$^4I_{9/2}$	805,151	2,08	6,4344424	0,2463947	0,2197520	
$^4F_{9/2}$	655,601	2,08	26,045733	1,2248841	1,2083772	
$^4S_{3/2}$	545,29	2,08	3,4579893	0,1955214	0,2714774	
$^4F_{7/2}$	489,143	2,08	11,053502	0,6967264	0,9453421	
$^4F_{5/2}$	450,143	2,08	1,5152942	0,1037874	0,2740559	
$^4F_{3/2}$	443,023	2,08	0,4326848	0,0301122	0,1561824	
$^2H_{9/2}$	404,52	2,08	0,7262924	0,0553566	0,2996431	

b)

TE1						
Transición de $^4I_{15/2}$	λ (nm)	Índice de Refracción (n)	Γ (nm cm ⁻¹)	S_{meas} (10 ⁻²⁰ cm ²)	S_{calc} (10 ⁻²⁰ cm ²)	ΔS_{rms} (10 ⁻²⁰ cm ²)
$^4I_{13/2}$	1520,18	2,08	224,25433	2,67729391	2,42753292	0,21289
$^4I_{11/2}$	980,492	2,08	36,669777	0,67875719	0,85146425	
$^4I_{9/2}$	804,492	2,08	12,950150	0,29214827	0,26146812	
$^4F_{9/2}$	656,0512	2,08	52,390356	1,44931851	1,43017553	
$^4S_{3/2}$	545,665	2,08	6,8660646	0,2283663	0,31912051	
$^4F_{7/2}$	489,395	2,08	22,461656	0,83297597	1,11391591	
$^4F_{5/2}$	451,23	2,08	3,4365620	0,13822177	0,32215151	
$^4F_{3/2}$	444,974	2,08	0,8377596	0,03416922	0,18359172	
$^2H_{9/2}$	407,005	2,08	3,7050525	0,16521324	0,35257272	

c)

TE2						
Transición de $^4\text{I}_{15/2}$	λ (nm)	Índice de Refracción (n)	Γ (nm cm^{-1})	S_{meas} (10^{-20} cm^2)	S_{calc} (10^{-20} cm^2)	ΔS_{rms} (10^{-20} cm^2)
$^4\text{I}_{13/2}$	1519,9529	2,08	425,72874	2,11122381	1,91260394	0,16745
$^4\text{I}_{11/2}$	979,2238	2,08	63,390075	0,48794485	0,62528838	
$^4\text{I}_{9/2}$	805,414	2,08	25,185224	0,23569918	0,19487169	
$^4\text{F}_{9/2}$	655,744	2,08	97,272962	1,11812215	1,10702404	
$^4\text{S}_{3/2}$	545,7189	2,08	13,361334	0,18454924	0,25892213	
$^4\text{F}_{7/2}$	489,3463	2,08	42,621812	0,65651861	0,88914649	
$^4\text{F}_{5/2}$	451,3477	2,08	6,7031693	0,11194389	0,26138137	
$^4\text{F}_{3/2}$	444,484	2,08	1,8590007	0,03152498	0,14895927	
$^2\text{H}_{9/2}$	407,331	2,08	9,3492204	0,17300528	0,28418013	

d)

TE3						
Transición de $^4\text{I}_{15/2}$	λ (nm)	Índice de Refracción (n)	Γ (nm cm^{-1})	S_{meas} (10^{-20} cm^2)	S_{calc} (10^{-20} cm^2)	ΔS_{rms} (10^{-20} cm^2)
$^4\text{I}_{13/2}$	1519,9963	2,08	664,67039	2,35802770	2,13493743	0,18863
$^4\text{I}_{11/2}$	979,489	2,08	94,1584	0,51837566	0,67264021	
$^4\text{I}_{9/2}$	803,5456	2,08	35,973448	0,24141077	0,20111123	
$^4\text{F}_{9/2}$	656,01491	2,08	147,18649	1,20987178	1,19571593	
$^4\text{S}_{3/2}$	545,766	2,08	21,088914	0,20836887	0,29451393	
$^4\text{F}_{7/2}$	489,3225	2,08	66,3656	0,73136291	0,99395219	
$^4\text{F}_{5/2}$	451,289	2,08	10,04549	0,12003322	0,29731121	
$^4\text{F}_{3/2}$	445,728	2,08	2,969596	0,0359263	0,16943542	
$^2\text{H}_{9/2}$	407,486	2,08	15,817592	0,20932099	0,321003	

Los elementos de matriz son tomados de acuerdo a las transiciones que existan en el vidrio de telurio, en este caso en particular están dados por $^4\text{I}_{13/2}$, $^4\text{I}_{11/2}$, $^4\text{I}_{9/2}$, $^4\text{F}_{9/2}$, $^4\text{S}_{3/2}$, $^4\text{F}_{7/2}$, $^4\text{F}_{5/2}$, $^4\text{F}_{3/2}$ y $^2\text{H}_{9/2}$ como se mostró anteriormente para el fosfato (tabla 4.14). En la Tabla 4.15 se muestran el cálculo de los valores de Ω_2 , Ω_4 y Ω_6 , y la medición de la precisión de ajuste, para diferentes concentraciones en la matriz de telurio.

Tabla 4.15 Cálculo de los parámetros de Judd-Ofelt a diferentes concentraciones de Er^{3+} en matriz de telurio

	Parámetros de Judd-Ofelt (10^{-20})			Factor de Calidad Espectroscópica
	Ω_2	Ω_4	Ω_6	$\chi = \Omega_4/\Omega_6$
TE05	8,12568	1,1979	1,22785	0,9756095
TE1	9,94637	1,42631	1,44333	0,9882055
TE2	5,74644	1,05758	1,17106	0,9030914

TE3	5,16878	1,0843	1,33204	0,8140793
-----	---------	--------	---------	-----------

Al igual que en los vidrios de fosfato, se elabora una grafica del comportamiento de $\chi = \Omega_4/\Omega_6$. Se puede observar que el factor de calidad espectroscópica es mayor en el vidrio de telurio, como se muestra en la figura 4.6

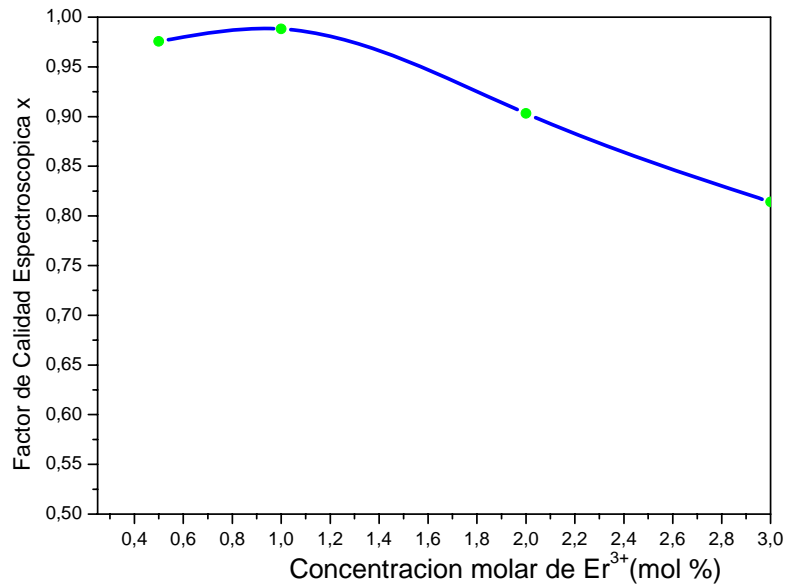


Figura 4.6 Factor de Calidad Espectroscópica como Función de la Concentración de Er³⁺ en vidrios de telurio.

Los parámetros Ω_2 , Ω_4 y Ω_6 ahora pueden aplicarse a la ecuación (49) para calcular la intensidad de las líneas correspondientes a transiciones analizadas. Con estos valores se calculan la probabilidad de decaimiento radiativo para dicha transición por medio de la ecuación (51) y con ellos se calcula la razón de fluorescencia ramificada utilizando la ecuación (52). Todos estos valores se describen en la Tabla 4.16

Tabla 4.16 Líneas de Fuerza y Probabilidades de Decaimiento Radiativo a)TE05, b) TE1, c)TE2, d)TE3

a).

TE05				
Transición	Índice de Refracción (n)	S _{calc} 10 ⁻²⁰ cm ²	A _{JJ'} (s ⁻¹)	B _{JJ'}
⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{15/2}	2,08	2,05675362	270,014	1,00000
⁴ I _{11/2} → ⁴ I _{15/2}	2,08	0,71487226	410,775	0,89727

$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	1,80749694	47,032	0,10273
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,21963224	270,354	0,70262
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{1532}$	2,08	0,89533372	113,915	0,29605
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,26117523	0,511	0,00133
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	1,20850004	2812,39	0,88735
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,35337605	153,066	0,04829
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	2,16189981	186,338	0,05879
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	1,08084407	17,642	0,00557
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,27147749	2806,56	0,66252
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,42508144	1183,47	0,27937
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,09576925	89,975	0,02124
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,40651393	154,382	0,03644
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,03277459	1,797	0,00042
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,94522233	6614,91	0,79393
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,40393536	888,079	0,10659
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,53166334	471,997	0,05665
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,77187947	336,852	0,04043
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,15782943	18,035	0,00216
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	2,08	0,0077604	0,048	0,00001
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	2,08	1,51020048	1,921	0,00023
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,27417876	3234,28	0,48822
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,63461536	2610,58	0,39407
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,12071253	224,052	0,03382
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,28118448	286,251	0,04321
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{7/2}$	2,08	0,7314996	256,556	0,03873
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,07142214	3,717	0,00056
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	2,08	0,18488115	4,527	0,00068
$^4F_{5/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	2,08	0,94522233	4,736	0,00071
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,15618244	2897,87	0,48434
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,0423608	279,555	0,04672
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,70790303	2150,72	0,35946
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,34391153	584,087	0,09762
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,07784864	47,610	0,00796
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	2,08	0,21126756	21,785	0,00364
$^4F_{3/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	2,08	0,0042825	0,224	0,00004
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	2,08	0,09270933	1,241	0,00021
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	2,08	0,54409329	0,039	0,00001
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,29964015	2913,14	0,31551
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	1,21087685	4647,84	0,50338

$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,58498739	1144,84	0,12399
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,36048565	432,722	0,04687
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,13215417	70,000	0,00758
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	2,08	0,00534564	0,792	0,00009
$^2G_{9/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	2,08	0,12761296	12,358	0,00134
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	2,08	0,00534564	0,247	0,00003
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	2,08	0,55163587	5,429	0,00059
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$	2,08	0,94762243	5,873	0,00064

b)

TE1				
Transición	Índice de Refracción (n)	$S_{\text{calc}} 10^{-20} \text{ cm}^2$	$A_{JJ} (s^{-1})$	B_{JJ}
$^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	2,42753292	318,69	1,00000
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,85146425	489,26	0,89778
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	2,14087308	55,707	0,10222
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,26132549	321,67	0,70507
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	1,05281117	133,95	0,29360
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,30941964	0,605	0,00133
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	1,43031986	3328,6	0,88657
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,42216514	182,86	0,04870
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	2,56929176	221,45	0,05898
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	1,32111321	21,564	0,00574
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,31912051	3299,0	0,66244
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,49968124	1391,1	0,27934
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,11265266	105,83	0,02125
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,47928783	182,02	0,03655
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,03853183	2,113	0,00042
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	1,11377328	7794,48	0,79245
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,4809527	1057,40	0,10750
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2I_{11/2}$	2,08	0,63116326	560,331	0,05697
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,91550828	399,533	0,04062
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,19092507	21,817	0,00222
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	2,08	0,00926722	0,057	0,00001
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	2,08	1,82401718	2,321	0,00024
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,32229584	3801,88	0,48673
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,74922893	3082,06	0,39457
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,14367686	266,675	0,03414
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,33580124	341,852	0,04376

$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,86442277	303,175	0,03881
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,08726544	4,541	0,00058
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	2,08	0,21824139	5,344	0,00068
$^4F_{5/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	2,08	1,11377328	5,581	0,00071
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,18359172	3406,43	0,48342
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,04979492	328,616	0,04664
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,833822	2533,29	0,35951
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,40844605	693,690	0,09844
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,09158343	56,010	0,00795
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	2,08	0,25860555	26,666	0,00378
$^4F_{3/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	2,08	0,00504315	0,264	0,00004
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	2,08	0,11114621	1,488	0,00021
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	2,08	0,66460628	0,048	0,00001
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,35257102	3427,74	0,31038
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	1,45633537	5590,01	0,50617
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,70604004	1381,75	0,12512
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,44075396	529,075	0,04791
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,16126103	85,418	0,00773
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	2,08	0,00631831	0,936	0,00008
$^2G_{9/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	2,08	0,15275001	14,793	0,00134
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	2,08	0,00631831	0,291	0,00003
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	2,08	0,66392471	6,534	0,00059
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$	2,08	1,15656944	7,168	0,00065

c)

TE2				
Transición	Índice de Refracción (n)	$S_{calc} 10^{-20} \text{ cm}^2$	$A_{JJ} (s^{-1})$	B_{JJ}
$^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	1,91260394	251,090	1,00000
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,62528838	359,299	0,89366
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	1,64308486	42,754	0,10634
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,19476593	239,745	0,68766
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,85222456	108,430	0,31101
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,23736221	0,464	0,00133
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	1,10714115	2576,51	0,89270
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,30377963	131,583	0,04559
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	1,91992289	165,482	0,05734
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,77411674	12,636	0,00438
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,25892213	2676,76	0,66299

$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,40542217	1128,74	0,27957
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,09098342	85,478	0,02117
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,38102143	144,701	0,03584
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,03123335	1,712	0,00042
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,88904073	6221,74	0,80292
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,35662644	784,067	0,10118
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2I_{11/2}$	2,08	0,47757516	423,979	0,05471
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,69542376	303,487	0,03916
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,12338417	14,099	0,00182
$^4F_{7/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	2,08	0,00670859	0,042	0,00001
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	2,08	1,19283506	1,518	0,00020
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,26149847	3084,70	0,49711
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,59012371	2427,55	0,39121
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,1068158	198,258	0,03195
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,24185188	246,210	0,03968
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,67635871	237,216	0,03823
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	2,08	0,05135115	2,672	0,00043
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	2,08	0,17205908	4,213	0,00068
$^4F_{5/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	2,08	0,88904073	4,455	0,00072
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,14895927	2763,85	0,48973
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,04040169	266,626	0,04724
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,66729138	2027,34	0,35923
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,30848238	523,915	0,09283
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,07390859	45,201	0,00801
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	2,08	0,14940754	15,406	0,00273
$^4F_{3/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	2,08	0,00404198	0,211	0,00004
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	2,08	0,07785256	1,042	0,00018
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	2,08	0,39214543	0,028	0,00000
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	2,08	0,28416878	2762,72	0,35206
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$	2,08	0,98846829	3794,14	0,48349
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2,08	0,46518813	910,393	0,11601
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2,08	0,25754034	309,148	0,03939
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	2,08	0,09606528	50,884	0,00648
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	2,08	0,00493706	0,732	0,00009
$^2G_{9/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	2,08	0,10802561	10,462	0,00133
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	2,08	0,00493706	0,228	0,00003
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	2,08	0,44889397	4,418	0,00056
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$	2,08	0,68768904	4,262	0,00054

d)

TE3				
Transición	Índice de Refracción (n)	S _{calc} 10 ⁻²⁰ cm ²	A _{JJ} (s ⁻¹)	B _{JJ}
⁴ I _{13/2} → ⁴ I _{15/2}	2,08	2,13493743	280,278	1,00000
⁴ I _{11/2} → ⁴ I _{15/2}	2,08	0,67264021	386,508	0,89173
⁴ I _{11/2} → ⁴ I _{13/2}	2,08	1,80342749	46,926	0,10827
⁴ I _{9/2} → ⁴ I _{15/2}	2,08	0,20100279	247,421	0,66685
⁴ I _{9/2} → ⁴ I ₁₅₃₂	2,08	0,96756867	123,106	0,33179
⁴ I _{9/2} → ⁴ I _{11/2}	2,08	0,25789616	0,505	0,00136
⁴ F _{9/2} → ⁴ I _{15/2}	2,08	1,19584914	2782,95	0,89481
⁴ F _{9/2} → ⁴ I _{13/2}	2,08	0,31354866	135,814	0,04367
⁴ F _{9/2} → ⁴ I _{11/2}	2,08	2,08623294	179,816	0,05782
⁴ F _{9/2} → ⁴ I _{9/2}	2,08	0,70491556	11,506	0,00370
⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{15/2}	2,08	0,29451393	3044,71	0,66357
⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{13/2}	2,08	0,46115207	1283,90	0,27982
⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{11/2}	2,08	0,10299214	96,761	0,02109
⁴ S _{3/2} → ⁴ I _{9/2}	2,08	0,42405403	161,043	0,03510
⁴ S _{3/2} → ⁴ F _{9/2}	2,08	0,03549116	1,946	0,00042
⁴ F _{7/2} → ⁴ I _{15/2}	2,08	0,99384376	6955,18	0,81299
⁴ F _{7/2} → ⁴ I ₁₃₂	2,08	0,36567962	803,971	0,09398
⁴ F _{7/2} → ² I _{11/2}	2,08	0,50704006	450,137	0,05262
⁴ F _{7/2} → ⁴ I _{9/2}	2,08	0,75741485	330,540	0,03864
⁴ F _{7/2} → ⁴ F _{9/2}	2,08	0,11974206	13,683	0,00160
⁴ F _{7/2} → ⁴ S _{3/2}	2,08	0,00680632	0,042	0,00000
⁴ F _{7/2} → ² H _{11/2}	2,08	1,18691482	1,510	0,00018
⁴ F _{5/2} → ⁴ I _{15/2}	2,08	0,29744441	3508,73	0,50727
⁴ F _{5/2} → ⁴ I _{15/2}	2,08	0,65010231	2674,28	0,38663
⁴ F _{5/2} → ⁴ I _{13/2}	2,08	0,10989107	203,966	0,02949
⁴ F _{5/2} → ⁴ I _{11/2}	2,08	0,25363462	258,205	0,03733
⁴ F _{5/2} → ⁴ I _{9/2}	2,08	0,74015077	259,590	0,03753
⁴ F _{5/2} → ⁴ F _{9/2}	2,08	0,04672157	2,431	0,00035
⁴ F _{5/2} → ⁴ S _{3/2}	2,08	0,18974661	4,646	0,00067
⁴ F _{5/2} → ² H _{11/2}	2,08	0,99384376	4,980	0,00072
⁴ F _{3/2} → ⁴ I _{15/2}	2,08	0,16943542	3143,77	0,49621
⁴ F _{3/2} → ⁴ I _{13/2}	2,08	0,04595536	303,277	0,04787
⁴ F _{3/2} → ⁴ I _{11/2}	2,08	0,74802694	2272,63	0,35871
⁴ F _{3/2} → ⁴ I _{9/2}	2,08	0,32362808	549,638	0,08675
⁴ F _{3/2} → ⁴ F _{9/2}	2,08	0,08359389	51,124	0,00807

$^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{S}_{3/2}$	2,08	0,13438836	13,858	0,00219
$^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^2\text{H}_{11/2}$	2,08	0,00453831	0,237	0,00004
$^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{F}_{7/2}$	2,08	0,07780072	1,041	0,00016
$^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{F}_{7/2}$	2,08	0,3573843	0,026	0,00000
$^2\text{G}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$	2,08	0,32097823	3120,59	0,37955
$^2\text{G}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$	2,08	1,0035167	3851,90	0,46849
$^2\text{G}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{11/2}$	2,08	0,46083136	901,867	0,10969
$^2\text{G}_{9/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$	2,08	0,23367488	280,500	0,03412
$^2\text{G}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{9/2}$	2,08	0,08843207	46,841	0,00570
$^2\text{G}_{9/2} \rightarrow ^4\text{S}_{3/2}$	2,08	0,00539043	0,799	0,00010
$^2\text{G}_{9/2} \rightarrow ^2\text{H}_{11/2}$	2,08	0,11163028	10,811	0,00131
$^2\text{G}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{7/2}$	2,08	0,00539043	0,249	0,00003
$^2\text{G}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{5/2}$	2,08	0,44680408	4,398	0,00053
$^2\text{G}_{9/2} \rightarrow ^4\text{F}_{3/2}$	2,08	0,63174423	3,916	0,00048

El tiempo de vida radiativo de un estado excitado para la matriz de telurio es calculado por la ecuación (53) y son descritos en la Tabla 4.17. Es importante notar que entre mayor sea la probabilidad de decaimiento radiativo menor será el tiempo de vida.

Tabla 4.17 Tiempos de Vida Radiativo de los Estados Excitados en vidrio de Telurio a diferentes concentraciones Er^{3+} .

Estado Excitado	$T_{rad}(\text{ms})$			
	TE05	TE1	TE2	TE3
$^4\text{I}_{13/2}$	3.7	3.14	3.98	3.57
$^4\text{I}_{11/2}$	2.18	1.83	2.49	2.31
$^4\text{I}_{9/2}$	2.6	2.19	2.87	2.70
$^4\text{F}_{9/2}$	0.31	0.26	0.34	0.32
$^4\text{S}_{3/2}$	0.23	0.201	0.24	0.21
$^4\text{F}_{7/2}$	0.12	0.102	0.129	0.11
$^4\text{F}_{5/2}$	0.151	0.128	0.161	0.14
$^4\text{F}_{3/2}$	0.167	0.142	0.177	0.15
$^2\text{G}_{9/2}$	0.108	0.09	0.127	0.12

Se puede observar que con el aumento de la concentración de iones, los tiempos de vida disminuyen para todas las transiciones, sin embargo llega a un límite para el cual el tiempo de vida vuelve a disminuir. Al igual que el factor de calidad espectroscópica existe una concentración óptima donde presenta un mayor tiempo de vida radiativo.

4.5 Espectros de emisión

Los iones de Er^{3+} puede ser bombeado en sus diferentes niveles de energía y generar conversión hacia arriba o bien conversión hacia abajo. En este caso en particular son bombeados por un diodo láser a una longitud de onda de 980 nm que corresponde al nivel $^4\text{I}_{11/2}$. En este nivel los electrones excitados decaen en forma no radiativa al nivel metaestable $^4\text{I}_{13/2}$ durante un periodo de tiempo y después decaen al estado base en la transición $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ emitiendo un longitud de onda a 1.54 μm .

La gran ventaja que presenta la matriz de fosfato sobre los demás vidrios, incluyendo la del telurio, es la disminución del fenómeno de conversión hacia arriba, que es obtenida al ser bombeado a 980 nm. Típicamente la fluorescencia de conversión hacia arriba se encuentra en el verde (~546 nm) que corresponde a la transición $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, esta es la energía que es desperdiciada en los amplificadores ópticos. En la figura 4.7 se muestran fotografías de la ausencia de conversión hacia arriba en vidrios de fosfato dopados al 0.5 y 3 % de Er^{3+} .

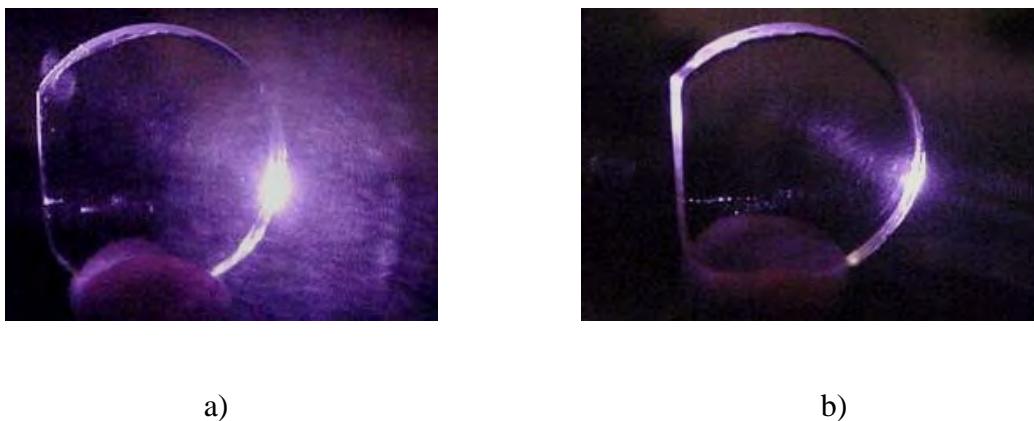


Figura 4.7 Fotografía de la Disminución de Conversión Hacia Arriba en un Vidrio de Fosfato Dopado con Er^{3+} , a) Dopado al 0.5%, b) Dopado al 3%

En la figura 4.8 se muestran los espectros de fluorescencia del fosfato a 1.54 μm con diferentes concentraciones de Er^{3+} , bombeados a la misma potencia.

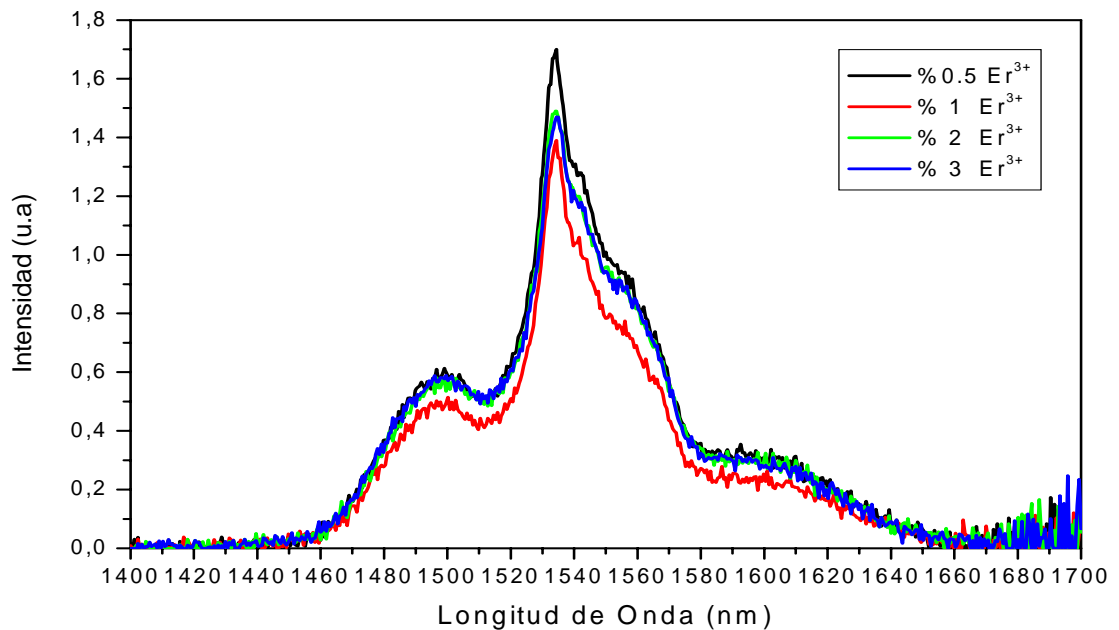


Figura 4.8 Espectro de Fluorescencia a 1.55 μm en Matriz de Fosfato.

Otro fenómeno interesante que ocurre en el vidrio de fosfato es el aumento de ensanchamiento, al aumentar la concentración de iones. Este ensanchamiento ocurre con diferentes potencias de bombeo, por lo que se concluye a mayor concentración de iones presenta un mayor FWHM (figura 4.9).

Por otra parte se encuentran los vidrios de telurio donde los iones de Er^{3+} actúan de forma similar que en la matriz de fosfato fluoresciendo a 1.535 μm . Sin embargo los vidrios de telurio presentan mayor conversión hacia arriba que el fosfato observándose una longitud de onda de 546 nm, esto se puede observar en la figura 4.9. Básicamente este fenómeno ocurre de la siguiente manera. Cuando los electrones son excitados al nivel superior $^4\text{I}_{11/2}$, se relajan al estado metaestable $^4\text{I}_{13/2}$ parte de estos electrones decaen en forma no radiativa al estado base $^4\text{I}_{15/2}$ y le transfieren esta energía a otros electrones, estos por el exceso de energía suben a otro nivel superior $^4\text{S}_{3/2}$ para después decaer al estado base emitiendo en 546 nm. En la figura 4.10 se muestra como ocurre este fenómeno.



Figura 4.9 Fotografía de la Conversión Hacia Arriba en un Vidrio de Telurio Dopado con Er^{3+} a) Dopado al 0.5%, b) Dopado al 3%.

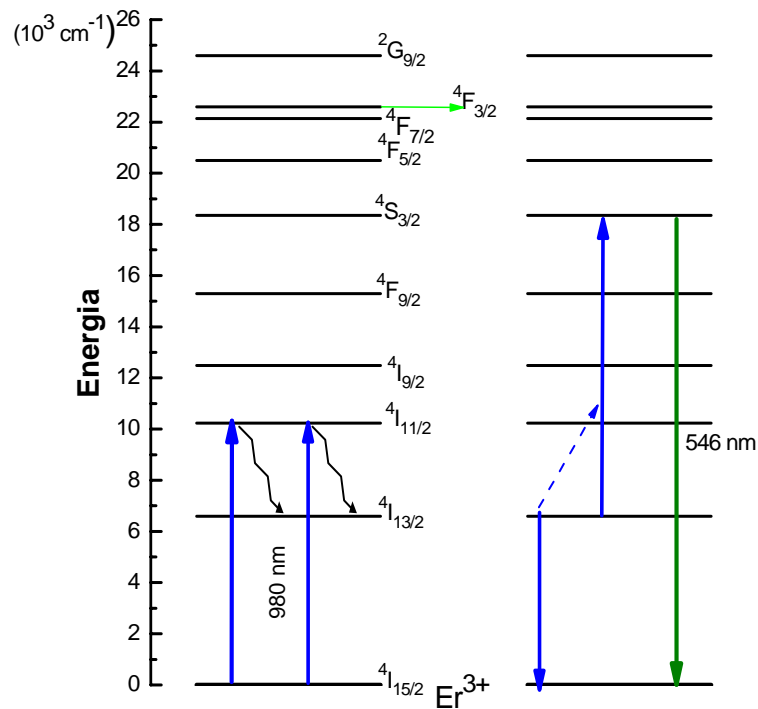


Figura 4.10 Proceso de conversión hacia arriba.

El vidrio de telurio ofrece la gran ventaja del ensanchamiento en su espectro de fluorescencia (figura 4.11) que otros tipos de vidrios no presentan, incluyendo la del fosfato. El ensanchamiento es de especial interés debido al hecho de transmitir mayor información por una fibra óptica. En la figura 4.12 se hace una comparación entre los espectros de emisión del fosfato y el telurio donde se puede observar que el ensanchamiento es mayor para el vidrio de telurio.

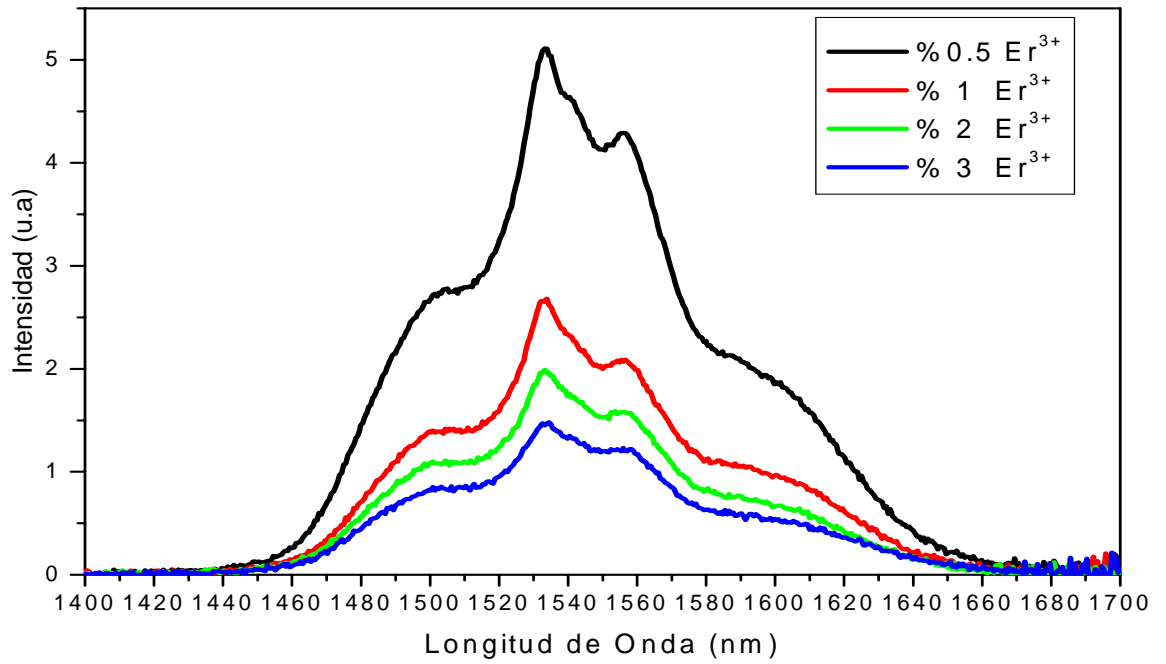


Figura 4.11 Espectro de Fluorescencia a $1.55 \mu\text{m}$ en Matriz de Telurio

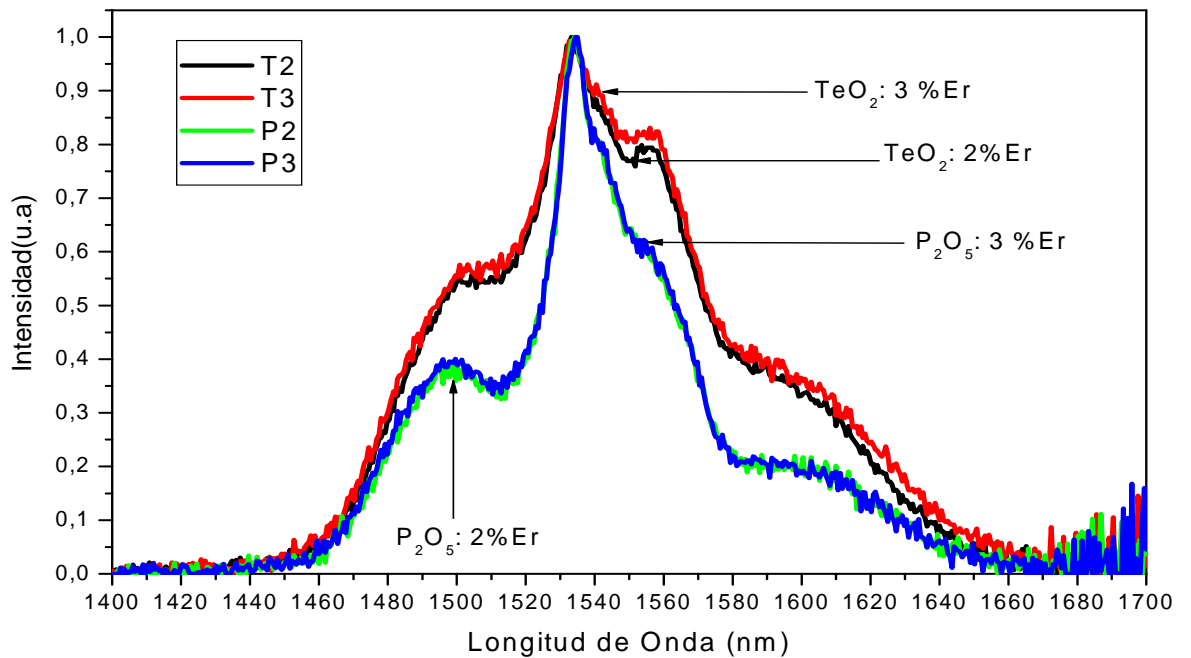


Figura 4.12 Comparación de los Espectros de Emisión normalizados en fosfato y Telurio dopado con Er^{3+} .

Finalmente para hacer un análisis completo de las muestras, se obtiene el valor eficiencia cuántica en la transición $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ para ambas matrices. Para la matriz fosfato se tiene que el tiempo de vida experimental esta dado por 9 ms, para una concentración de Er³⁺ de 1.51 wt % ¹¹, en nuestro caso se tiene una concentración de 1.41 wt % de Er³⁺ una cantidad menor a la reportada, con un tiempo de vida calculado de 10.7 ms. Entonces la eficiencia cuántica esta dada por.

$$Q = \frac{9ms}{10.7ms} \times 100\% = 84\%$$

Para el caso del telurio se encuentra que a una concentración de 1 wt % de Er³⁺ se tiene un tiempo de vida experimental de 2.6 ms¹² y en el caso nuestro se tiene calculado una concentración de 1.37 wt% con un tiempo de vida de 3.14 ms, por la tanto la eficiencia cuántica esta dado por la siguiente expresión.

$$Q = \frac{2.6ms}{3.14} \times 100\% = 82\%$$

Existen otros tiempos de vida reportados, sin embargo es la matriz que mas aproximación presenta a la descrita en esta tesis.

Referencia Bibliográfica

1. J. H. Campbell, T. I Suratwala. Nd-Doped Phosphate Glasses for High-Energy/High-Peak-Power Laser, 2000, Journal of Non-Crystalline Solids, (2000) 318-341.
2. Michael R. Lange, Eddy Bryant, Michael J. Myers, John D. Myers. High Gain Coefficient Phosphate Glass Fiber Amplifier. 2003.
3. Ishward D. Aggarwal, Grant Lu, Fluoride Glass Fiber Optics, Academic Press, 1991.
4. B.R. Judd, Physics Review. 127, 750 (1962)
5. G.S. Ofelt, Journal Chemistry Physics. 37, 511 (1962)
6. Alexander A. Kaminskii, Crystalline Lasers: Physical Processes and Operating Schemes, CRC Press. 1996.
7. Dhiraj K. Sardar, John B. Gruber, Bahram Zandi, J. Andrew Hutchinson, C. Ward Trussell. Judd–Ofelt Analysis of the Er³⁺ (*4f¹¹*) Absorption Intensities in Phosphate Glass: Er³⁺, Yb³⁺ 93, 2041-2046 (2003).
8. Dhiraj K. Sardar, John B. Gruber, Bahram Zandi, J. Andrew Hutchinson, C. Ward Trussell. Judd–Ofelt Analysis of the Er³⁺ (*4f¹¹*) Absorption Intensities in Er³⁺ Doped Garnets 93, 2602-2607 (2003).
9. R. Rolli, M. Montagna. S. Chaussedent, A. Monteil, V.K. Tikhomirov, M. Ferrari. Erbium-doped Tellurite Glasses with High Quantum Efficiency and Broadband Stimulated Emission Cross Section at 1.5 μm. Optical Materials 21, 743–748 (2003).
10. Raffaella Rolli, Karl Gatterer, Mario Wachtler, Marco Bettinelli, Adolfo Speghini, David Ajo. Optical Spectroscopy of Lanthanide Ions in ZnO–TeO₂ glasses. 57, 2009–2017 (2001).
11. Gruber, Bahram Zandi, Dhiraj K. Sardar, John B., J. Andrew Hutchinson, C. Ward Trussell. Modeling the absorption spectra of Er³⁺ and Yb³⁺ in a phosphate glass, 94, 4835-4840, (2003).
12. Hai Lin, Gerald Meredith, Shibin Jiang, Xiang Peng, Tao Luo, and Nasser Peyghambarian, Edwin Yue-Bun Pun. Optical transitions and visible upconversion in Er³⁺ doped niobic tellurite glass, J. Appl. Phys. 93, 186-191 (2003)

CAPITULO V

PREPARACION Y FABRICACION DE PREFORMAS

5.1 Introducción

Obtener una buena caracterización espectroscópica y óptica en pequeñas muestras antes de fabricar una preforma dopada con Er^{3+} es de gran importancia, ya que esto dará como consecuencia el ahorro de materia prima, dinero y tiempo. En esta sección el objetivo principal es obtener una preforma libre de defectos, por lo cual es necesario experimentar con diferentes técnicas. Básicamente se describe las causas del problema, así como las facetas y como evoluciona la preformas.

5.2 Composición y fabricación de la preforma

Como se menciona en la sección 4.2, la composición de la preforma es de gran importancia, ya que al contener material de óxido metálico provoca dureza en la preforma. Lo que significaría dificultad al estirar la preforma o posiblemente no lograr este objetivo. Después de ser calculado cada componente correspondiente a la preforma, se mezclan y se funden en un horno con una temperatura alta durando aproximadamente 3 horas. Esto con la finalidad de desechar las moléculas de OH en la matriz. Después de transcurrir el tiempo necesario, el vidrio fundido es vertido en el interior del cilindro (figura 5.1) inmediatamente después de haberlo sacado del horno de fundido, ya que si transcurre un lapso de tiempo relativamente largo podría solidificarse. Es necesario tener extrema precaución con la temperatura de este proceso, ya que puede provocar quemaduras de hasta de tercer grado en el operador. Es importante mencionar que el molde de latón ha sido previamente calentado para evitar choques térmicos. Este molde es sujetado en el interior de un horno controlado que proporciona la temperatura necesaria tal y como se ilustra en la figura 5.2. El calentamiento del molde tiene una duración de aproximadamente 2 y 2 ½ horas logrando que la temperatura sea estabilizada en el interior del horno.

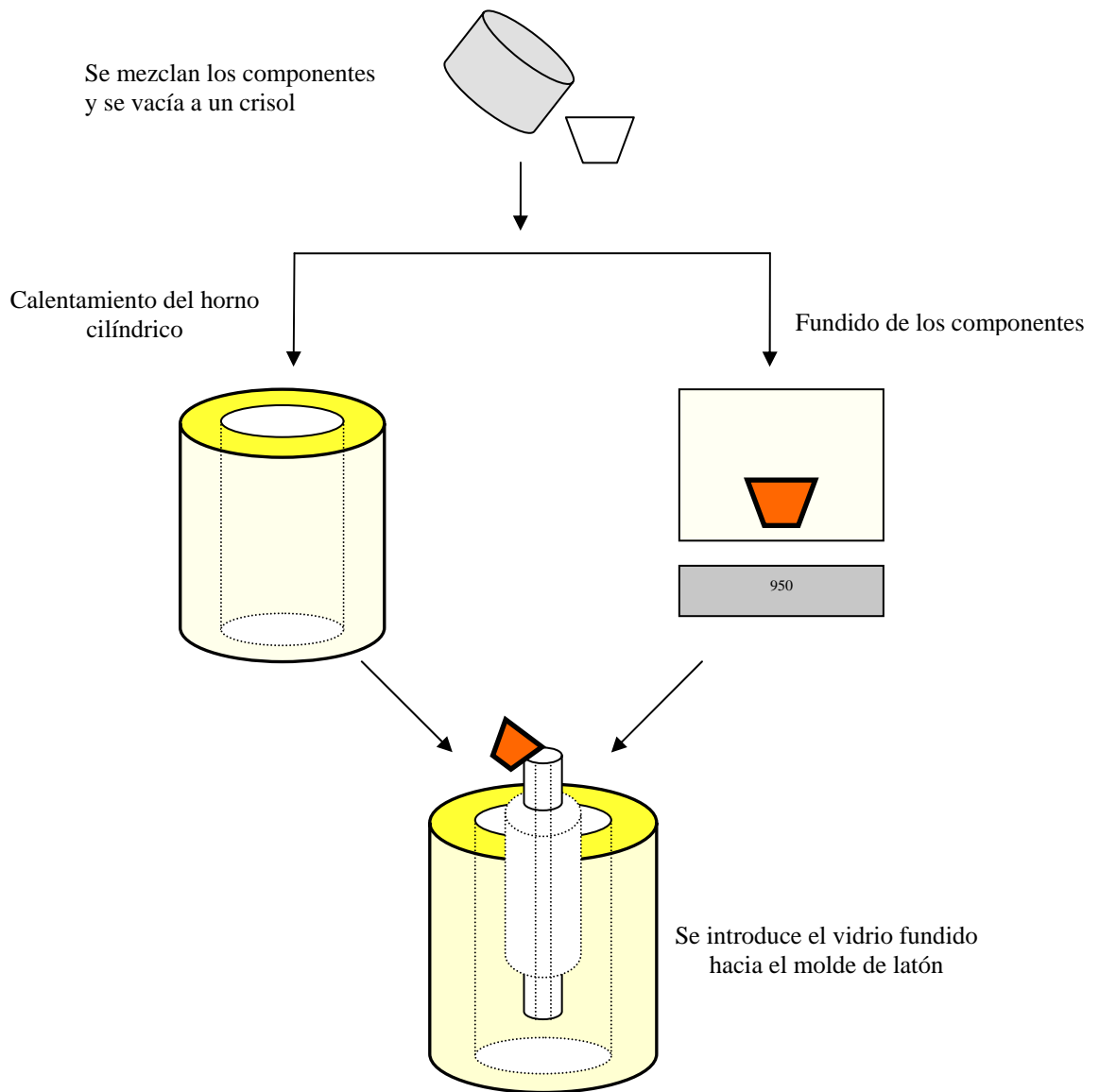


Figura 5.1 proceso de fabricación de la preforma.



Figura 5.2 Fotografía del horno que produce el calentamiento del Molde de latón.

Finalmente, el molde se deja enfriar en forma natural, hasta llegar a la temperatura ambiente. Con este proceso de enfriamiento se espera relajar los esfuerzos y evitar cambios drásticos en el vidrio que provoquen que se fracture con facilidad. Ya que si es retirado antes que la preforma logra enfriarse completamente tiene mayor probabilidad de fracturarse. Finalmente el vidrio es retirada del molde, para después pulir la superficie y las caras de la preforma (figura 5.3).

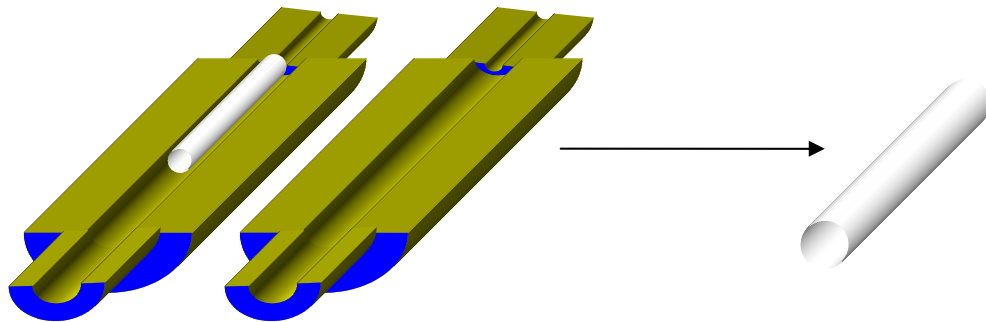


Figura 5.3 Proceso final para el acabado de una preforma

El desarrollo de esta preforma pareciera simple, sin embargo existen ciertos problemas que dificultan su elaboración. En las secciones restantes se menciona algunos problemas que lo causan, así como solución de los mismos y la evolución que presentan, hasta el acabado final.

5.3 Efectos de la Temperatura y Presión Sobre la Preforma

Para obtener una preforma libre de defectos es necesario investigar las causas que lo originan. Uno de los detalles que este presenta es que se queden adherido el vidrio al molde metálico por la temperatura aplicada (550, 500 y 400 °C), de esta forma al retirar la preforma del molde, es fracturada por la presión ejercida sobre ella.

Marcel Poulain investigador y descubridor de las fibras ZBLAN, quien ha trabajado ampliamente con vidrios, ha investigado que es necesario calentar el molde de 50 a 100 °C por debajo de la transición vítrea (T_g). El caso específico del vidrio de fosfato tiene una T_g de 400 °C, logrando que el vidrio se libere del molde sin dificultad en la figura

5.4 se puede observar la diferencia entre una preforma con la temperatura adecuada y otra con la inadecuada.

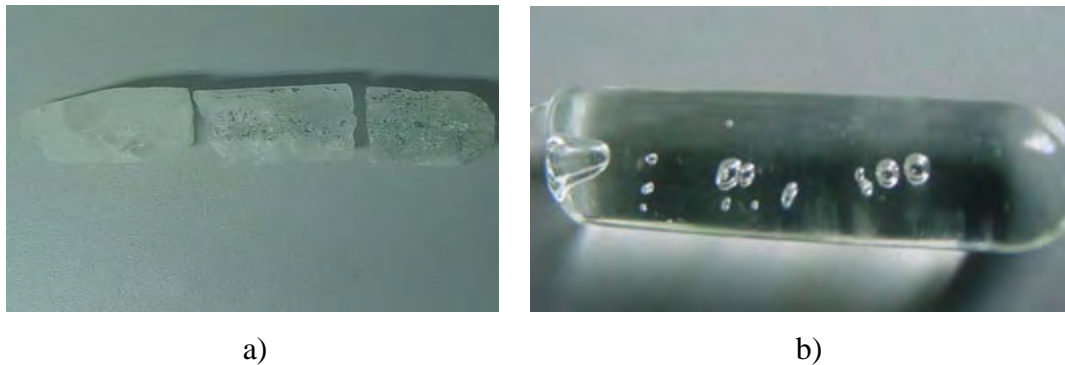


Figura 5.4 Fotografías de preformas a) Aplicación de una temperatura de 410 °C, b) temperatura adecuada de 310 °C a la cual pude liberarse la preforma.

Sin embargo lo anterior es solo la solución de un problema ya que el detalle principal radica en el interior de la preforma, ejemplo de ello, es el ocasionado por la introducción del vidrio al molde cilíndrico. Provocando pequeñas burbujas en la parte central de la preforma (figura 5.5) al caer el vidrio y hacer contacto con el molde.



Figura 5.5 Burbujas en el interior de la preforma

Este problema se logro resolver en forma parcial, manteniendo encendido el horno del cilindro durante un lapso de tiempo después de haber sido introducido el vidrio. Las burbujas se van liberando por medio de un gradiente de temperatura, es decir esta se van desplazando hacia la parte superior de la preforma. Conforme la temperatura sea mayor (350 en adelante), pero conservando el limite del a transición vítrea (400 °C) se facilitara el desplazamiento hacia arriba de las burbujas pero a su vez provocara que

alrededor de la preforma se generen burbujas y se cristalicé teniendo una superficie muy rugosa (figura 5.6).



Figura 5.6 Cristalización y burbujas alrededor de la preforma

La temperatura mas óptima se encuentra entre 300 y 340 °C, en esta rango la preforma libera la mayoría de las burbujas que son generadas en el vaciado, como se ilustra en la figura 5.7.



Figura 5.7 Disminución de burbujas en la preforma de fosfato

Sin embargo el problema no se logra solucionar completamente por lo que es necesario aplicar otro método que logre solucionar este problema. Uno de ellos es aplicar presión sobre la preforma, es decir cuando el vidrio es vertido en el interior del molde cilíndrico es necesario aplicar una presión, logrando que las burbujas que se hayan generado en el transcurso del vaciado, logren desaparecer en la preforma. En la figura 5.8 se pueden observar las preformas libres de burbujas, que han estado bajo el proceso de temperatura y presión.

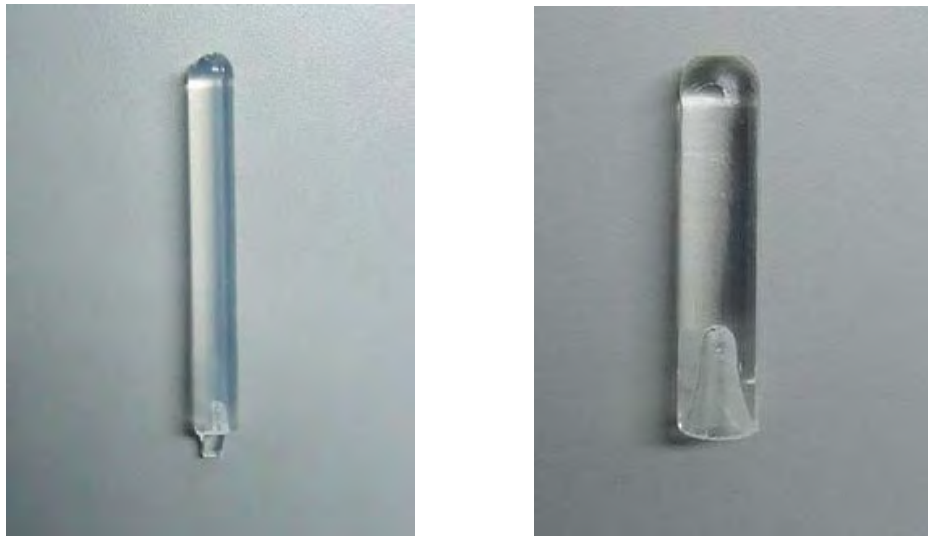


Figura 5.8 Preformas libres de burbujas, aplicando el efecto de temperatura y presión

Hace falta elaborar un estudio mas detallado sobre los efectos que generan las burbujas, debido a la falta de repetibilidad de estas preformas. Es decir existe la probabilidad que estas muestras puedan o no estar libres de burbujas.

Durante el proceso de generar preformas sin burbujas, surgió la idea de poder aplicar una fuerza centrifuga al molde con el vidrio en su interior de tal manera que por la misma presión que es generada hacia las paredes del molde sean liberadas las burbujas. Este proceso es le próximo trabajo a generarse para obtener preformas.

CONCLUSIONES

Las fibras de fosfato son materiales que presentan grandes ventajas sobre los demás fibras, como las fluorados a las de sílice, debido a que se obtiene una alta ganancia por unidad de longitud. Además se tiene una alta solubilidad de iones y presenta bajas características de conversión hacia arriba. Por consiguiente estas fibras son los mejores amplificadores en 1.55 μm . Por otra parte tenemos a las fibras de telurio, aunque presente mas conversión hacia arriba, este vidrio ofrece la ventaja de tener un mayor ancho espectral, que los vidrios existentes en la actualidad. Reduciendo este fenómeno lo haría un excelente amplificador en futuras aplicaciones.

TRABAJO A FUTURO

Al finalizar este trabajo, el siguiente paso por realizar, es añadir iones de Yb^{3+} en vidrios dopados con Er^{3+} , donde se obtuvo una mayor intensidad en la fluorescencia, y que por medio del proceso de transferencia de energía, sea obtenida una mayor eficiencia. Principalmente en la matriz de telurio donde se pretende reducir el fenómeno de conversión hacia arriba.

El siguiente objetivo es la fabricación de preformas libres de burbujas, así como su caracterización óptica y espectroscópica con el sistema $\text{Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$. Sin embargo el objetivo final es obtener la fabricación de fibras ópticas amplificadoras y fibras láser compuestos por $\text{P}_2\text{O}_5\text{:Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$ y $\text{T}_2\text{O}_3\text{:Er}^{3+}\text{-Yb}^{3+}$.