

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS



**FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA CABEZA DE
FIBRA ÓPTICA PARA UN SENSOR DE TEMPERATURA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

FÍSICO

PRESENTA:

PRISCILLA ELIZABETH IGLESIAS VÁZQUEZ

Ensenada, Baja California

Noviembre de 2006.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA CABEZA DE FIBRA
ÓPTICA PARA UN SENSOR DE TEMPERATURA

T E S I S P R O F E S I O N A L

QUE PRESENTA

PRISCILLA ELIZABETH IGLESIAS VÁZQUEZ

APROBADO POR



DR. JUAN CRISÓSTOMO TAPIA MERCADO

Presidente del Jurado



M.C. JESÚS RAMÓN LERMA ARAGÓN

Secretario



DR. LUIS JAVIER VILLEGAS VICENCIO

1er. Vocal

A mis padres Alberto y Amalia,

a mi hermano Beto.

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada agradezco a mi familia todo el apoyo y el amor que me han brindado a lo largo de mi vida, son el pilar que me sostiene. Todo mi amor para ellos.

A mis amigos que han sido muchos y día a día se siguen sumando, pero más que cantidad han sido de calidad. Mencionarlos a todos sería la segunda parte de mi tesis, pero ustedes saben quienes son y no necesitan estar escritos aquí para saber que los quiero y les agradezco su invaluable amistad.

A mis asesores Dr. Jose Luis Lucio M. y Dra. Alejandrina Martínez por su valiosa ayuda para la realización de este proyecto. A mi maestro y asesor Dr. Juan Tapia le agradezco mucho el tiempo dedicado a esta tesis y las contribuciones que hizo a la misma. A los miembros de mi comité M.C. Jesús Lerma y Dr. Javier Villegas por su interés y ayuda para mejorar la parte escrita de este trabajo.

A las instituciones donde realicé esta tesis IFUG y CIO, a todo el personal agradezco su apoyo y hospitalidad. A CONACYT y SNI por el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo.

RESUMEN de la Tesis de Priscilla Elizabeth Iglesias Vázquez presentada como requisito parcial para la obtención de la Licenciatura en Física. Ensenada, Baja California, México. Noviembre de 2006.

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA CABEZA DE FIBRA ÓPTICA
PARA UN SENSOR DE TEMPERATURA

Resumen aprobado por:



Dr. José Luis Lucio Martínez

Director de Tesis

Dra. Alejandrina Martínez Gamez

Directora de tesis

En este trabajo se considera el desarrollo de vidrios de fluorofosfato codopados con Yb^{3+} - Nd^{3+} que puedan servir como cabeza de sensores de temperatura en base a fibras ópticas. Esto implica la fabricación de los vidrios así como su caracterización. Para su caracterización se obtuvo el espectro de absorción del vidrio codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} , y se comparó con el espectro de absorción de un vidrio dopado solo con Nd^{3+} y otro solo con Yb^{3+} . Los resultados muestran que el vidrio codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} presenta una banda de absorción más ancha que los otros dos, ya que presenta la superposición de las transiciones de absorción del ión Yb^{3+} y las de Nd^{3+} . Se obtuvieron los espectros de absorción como función de la temperatura en el intervalo de 33°C a 288°C . Los resultados muestran una variación de los espectros de emisión con la temperatura, esto ocurre como consecuencia del ensanchamiento de los niveles de energía con la temperatura. En cada caso se determinó el ancho de banda de los espectros, a partir de lo cual se pudo calcular la razón de cambio del ancho de banda con la temperatura. La razón de cambio con la temperatura en el intervalo de 33°C - 160°C fue de $0.0447 \pm 0.0147 \text{ nm}^{\circ}\text{C}$, mientras que en el intervalo de 160 - 288°C fue de $0.0903 \pm 0.0179 \text{ nm}^{\circ}\text{C}$, lo que equivale a un incremento del 50% en la razón de cambio para temperaturas mayores de 160°C . Estos resultados indican que el material tiene mayor sensibilidad a la temperatura en el rango de 160°C a 288°C . Finalmente podemos concluir que el vidrio de fluorofosfato codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} es un buen candidato para ser implementado como cabeza de fibra óptica para un sensor de temperatura debido a que presentó suficiente sensibilidad a los cambios de temperatura. La sensibilidad del sensor depende de la sensibilidad del espectrómetro que se utilice.

ÍNDICE

Página de aprobación	I
Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Índice	V
Figuras y Tablas	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	6
2.1. Introducción	6
2.2. Fluorescencia	6
2.3. Iones de tierra rara	7
2.4. Espectroscopía del ión Nd^{3+}	8
2.5. Espectroscopía del ión Yb^{3+}	10
2.6. Transiciones radiativas	11
2.7. Transiciones no radiativas	12
2.7.1. Transferencia de energía entre iones	12
2.7.2. Relajación multifonónica	18

2.8. Anchos de línea y mecanismos de ensanchamiento de la transición	20
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	22
3.1. Introducción	22
3.2. Fabricación de los vidrios activos	22
3.3. Dispositivo experimental para obtener los espectros de absorción	25
3.4. Dispositivo experimental para obtener los espectros de emisión	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	28
4.1. Introducción	28
4.2. Espectros de absorción	29
4.3. Fluorescencia	31
4.4. Razón de decaimiento con la temperatura	36
5. CONCLUSIONES	39
6. BIBLIOGRAFÍA	41

FIGURAS Y TABLAS

Fig. 2.1. Niveles de energía del ión Nd^{3+}	9
Fig. 2.2. Diagrama de niveles de energía del ión Yb^{3+} : SiO_2	11
Fig. 2.3. Mecanismos de transferencia de energía entre iones. Ión donador (1), ión aceptor (2). (a) Transferencia de energía resonante. (b) Transferencia de energía no resonante con la absorción simultánea de un fotón o fonón. (c) Fluorescencia hacia arriba. (d) Apagado de fluorescencia. (e) Luminiscencia cooperativa. (f) Luminiscencia sensibilizada	14
Fig. 2.4. Diagrama de energía de los iones de Nd^{3+} e Yb^{3+}	16
Fig. 3.1. Dispositivo experimental para obtener los espectros de absorción del vidrio de fluorofosfato codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+}	25
Fig. 3.2. Dispositivo experimental para obtener los espectros de emisión de la transición ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ del Yb^{3+}	26
Fig. 4.1. Espectro de absorción del vidrio de fluorofosfato codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+}	29
Fig. 4.2. Espectros de absorción de un (a) vidrio de fluorofosfato dopado con Nd^{3+} y un (b) vidrio de silica dopado con Yb^{3+}	30
Fig. 4.3. Espectro de emisión del diodo láser en 910nm	32
Fig. 4.4. Espectro de emisión del vidrio de fluorofosfato dopado Nd^{3+}	33
Fig. 4.5. Espectros de emisión del vidrio de fluorofosfato codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} dependientes de la temperatura	34
Fig. 4.6. Espectros de emisión normalizados del vidrio de fluorofosfato codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} dependientes de la temperatura	35
Fig. 4.7. Razón de decaimiento del ancho de banda efectivo como función de la temperatura de la muestra codopada con Yb^{3+} - Nd^{3+}	38

Tabla I. Resultados obtenidos del cálculo de $\Delta\lambda_{eff}(T^o)$ dependiente de la temperatura	37
---	----

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de sensores basada en fibras ópticas ha sido un tópico importante en los últimos años. La medición adecuada y fiable de la temperatura es un requerimiento importante en el monitoreo de cambios en procesos químicos, físicos y biológicos. Para muchas aplicaciones científicas y en ambientes industriales, los métodos convencionales de medición de temperatura son inapropiados y las tecnologías de sensor de fibra óptica han sido exitosamente utilizadas. Sin embargo, la aceptación de estos sistemas ha sido lenta, en parte por su alto costo (Konan et al, 1995). Los sensores de fibras ópticas ofrecen el potencial de operar como sensores multiplexados, es decir sensores que pueden tener varias terminales, así como la posibilidad de operar como sensores remotos, siendo de gran utilidad cuando se quiere medir la temperatura en lugares peligrosos o de difícil acceso.

Se han sugerido varios tipos de sensores ópticos de temperatura para aplicaciones industriales, de entre los cuales, se han fabricado transductores usando fósforos (Lin et al, 1996), los cuales son dispositivos capaces de convertir un determinado tipo de energía de entrada en otra diferente de salida, también se han utilizado semiconductores (Kyuma et al, 1982), todos ellos modulan alguna propiedad de luz (amplitud, longitud de onda, etc.) como una función de temperatura. El principio básico de los sensores,

incluyendo los sensores de fibras ópticas, es bien conocido, sin embargo se sigue haciendo investigación en esta área porque se requiere desarrollar sensores con propiedades específicas. Nos interesan sensores baratos, con mayor resolución y más resistentes.

Actualmente los materiales dopados con tierras raras, es decir, materiales a los que se les ha añadido una pequeña concentración de iones de los elementos del grupo de las tierras raras, son de interés práctico para un amplio rango de aplicaciones, tales como sensores de fibra óptica, láseres de estado sólido, amplificadores, etc. En los últimos años se han desarrollado sensores de temperatura a base de fibras ópticas con núcleos dopados con tierras raras. Estos sensores pueden aplicarse en la medición de altas temperaturas, alrededor de 800 °C, a diferencia de sus antecesores basados en fósforos cuya temperatura máxima de operación es de 250°C; además de que presentan sensibilidad y precisión de algunos cuantos grados centígrados (Martínez et al, 1999).

El interés en estos materiales para su uso en sensores de temperatura se debe a que sus propiedades de absorción y emisión dependen de la temperatura. Este comportamiento se debe al ensanchamiento del ancho de línea y al cambio de población de los subniveles de energía. Se ha reportado la medición de la temperatura en vidrios dopados con Nd^{3+} (neodimio) y Eu^3 (europio) usando sus propiedades fluorescentes y de absorción (Adamovsky et al, 1986; Scrivener et al, 1990; Ohishi et al,

1985). De igual forma, se ha llevado a cabo la construcción de una cabeza de sensor de temperatura de fibra óptica basada en el cambio de la fluorescencia con la temperatura de una preforma de fibra óptica activada con iones de tierras raras y excitada con radiación infrarroja (Scrivener, 1990).

En particular, uno de los iones activos más estudiados en el desarrollo de sensores de temperatura a base de fibras ópticas ha sido el neodimio (Nd^{3+}). Se ha demostrado que un incremento en la concentración de estos iones disminuye el tiempo de decaimiento de la fluorescencia. Esto se debe a que decaen no radiativamente. En efecto, al aumentar la concentración de Nd^{3+} surgen mecanismos de relajación alternativos, en particular los iones intercambian entre ellos el total o una fracción de la energía, ocasionando que disminuyan los decaimientos radiativos y con esto el tiempo de decaimiento. A pesar de esto, se ha mostrado que la alta concentración de Nd^{3+} favorece la sensibilidad de los sensores basados en la absorción de la fluorescencia (Martínez et al, 1999).

Otro ión que ha sido reconocido en los últimos años como un interesante dopante para materiales láser ha sido el ión iterbio (Yb^{3+}). La longitud de onda de operación láser de materiales dopados con Yb^{3+} está en la región de 1000 nm, similar a la del ión Nd^{3+} (Honninger et al, 1999), por lo que codoparlos con neodimio tiene como efecto engrandecer la absorción y la eficiencia de bombeo. Además se lleva a cabo un mecanismo de transferencia efectivo del iterbio al neodimio de la energía de excitación.

Este mecanismo de transferencia de energía es fuertemente dependiente de la composición del vidrio y de la concentración Yb^{3+} - Nd^{3+} .

El problema planteado en esta tesis es determinar si los espectros de absorción y emisión de vidrios de fluorofosfato codopados con Yb^{3+} - Nd^{3+} son suficientemente sensibles ante variaciones de temperatura para que estos puedan ser utilizados como cabeza de un sensor de temperatura.

El objetivo es determinar la dependencia con la temperatura de los espectros de emisión y absorción de los vidrios codopados con Yb^{3+} - Nd^{3+} , de tal manera que permita establecer la metodología para la preparación de la preforma óptica que sea óptima en el rango de temperatura de 25°C a 300°C.

La hipótesis en la que se fundamenta esta investigación es que las variaciones de la fluorescencia de las tierras raras serán lo suficientemente grandes para ser usadas como cabeza de un sensor, debido a que los vidrios de fluorofosfato son materiales de alta densidad (3.74 g/cm^3) comparada con la densidad de los vidrios de sílica (2.2 g/cm^3) (Tumminelli et al, 1990), esta propiedad les permite tener una mayor solubilidad a los iones de tierra rara. Al tener una alta concentración de iones el mecanismo de transferencia de energía entre ellos es mayor, por lo que la fluorescencia varía más fuertemente ante cambios de temperatura.

Una vez planteado el tema de investigación de este trabajo, a continuación se presenta la organización de este trabajo por capítulos. En el Capítulo 2 se presentan las propiedades espectroscópicas de los iones Yb^{3+} y Nd^{3+} , se describen las transiciones radiativas y no radiativas que intervienen en los procesos de absorción y emisión de la fluorescencia, así como los mecanismos de ensanchamiento de las transiciones. En el Capítulo 3 se describe el procedimiento que se llevó a cabo para la fabricación del vidrio de fluorofosfato codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} y los dispositivos experimentales utilizados para obtener los espectros de absorción y emisión dependientes de la temperatura. En el Capítulo 4 se muestran los espectros obtenidos de las mediciones y el tratamiento de los resultados de los cuales fue posible obtener la sensibilidad de la muestra a los cambios de temperatura, también se plantean las discusiones de los resultados obtenidos. En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones de este trabajo. Finalmente, en el Capítulo 6 se presenta la literatura citada en este trabajo.

2. ANTECEDENTES

2.1. Introducción

Las interacciones entre la radiación y los electrones que forman los iones de las tierras raras y la interacción con el campo local debido al vidrio, son las responsables de los espectros de energías del ión en el vidrio y, por lo tanto, de la forma que tiene el espectro de absorción y emisión de los iones. Por esta razón es importante conocer las propiedades espectroscópicas de estos iones incorporados en la matriz vítrea, para lograr esto es fundamental conocer los mecanismos que intervienen en los procesos de absorción y emisión de los iones de tierras raras, además de entender los mecanismos que producen el ensanchamiento de las transiciones, ya que en este punto es donde se pueden determinar los efectos que tiene la temperatura en las variaciones de la fluorescencia.

2.2. Fluorescencia

Al someter la muestra a radiación electromagnética, en este caso la emisión de luz del láser, el fenómeno primario consiste en la excitación de los electrones de un estado

inicial que tiene energía E_i a un estado final cuya energía es E_f . El fenómeno secundario es la relajación tanto radiativa como no radiativa del estado excitado. Este fenómeno de relajación recibe el nombre de fluorescencia.

La emisión de radiación resultante del decaimiento tiene una energía proporcional a la frecuencia ν de la radiación electromagnética, la cual está relacionada con las energías de los estados inicial y final por medio de la constante de Planck h :

$$h\nu = E_f - E_i \quad (2.1)$$

La absorción de la radiación ocurrirá sólo si la energía incidente sobre la muestra es igual a la diferencia de energía de los estados final e inicial. La excitación de los electrones generalmente se obtiene a través de la absorción de fotones, los cuales pueden entenderse como cuantos de energía electromagnética.

2.3. Iones de tierra rara

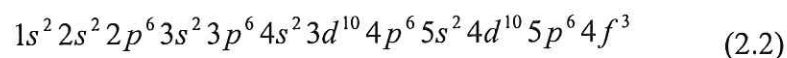
La forma más común de los elementos de tierra rara es la forma iónica, en particular en el estado trivalente. Estos elementos tienen sus orbitales f parcialmente ocupados y están desdoblados por las interacciones espín órbita formando multipletes, los cuales son el grupo de líneas que aparecen en una transición entre dos estados, donde la multiplicidad es $2S+1$, con S como el valor total de espín. El momento angular total J

debido al acoplamiento espín órbita es $J=L+S$, esto conduce al desdoblamiento de los niveles de energía, con L como el momento angular orbital total (Zettili, 2001).

Se utiliza la notación espectroscópica $^{2S+1}L_J$ para acomodar los estados electrónicos, donde L puede tomar los valores $L = 0,1,2,3,\dots$ los cuales son designados por las letras S, P, D, F, G, H, I, ... siguiendo el orden alfabético. Por ejemplo, si consideramos el nivel $^2F_{7/2}$ del Yb^{3+} , se refiere al orbital F, esto es $L = 3$ y el superíndice 2 indica que $S = 1/2$, es decir, un solo estado ocupado con un espín hacia arriba. J puede tomar los valores $J = L+S, L+S-1, \dots, L-S = 7/2, 5/2$. Por lo tanto la notación indica que se trata del primer estado $L+S = 7/2$.

2.4. Espectroscopía del ión Nd^{3+}

El neodimio es un elemento de la serie de los lantánidos, cuyo símbolo es Nd, su peso atómico es 144.24 y su número atómico es 60. La configuración electrónica del ión Nd^{3+} es:



Debido a la configuración electrónica del ión Nd^{3+} , puede considerarse como un sistema de cuatro niveles, los cuales se muestran en la Figura 2.1.

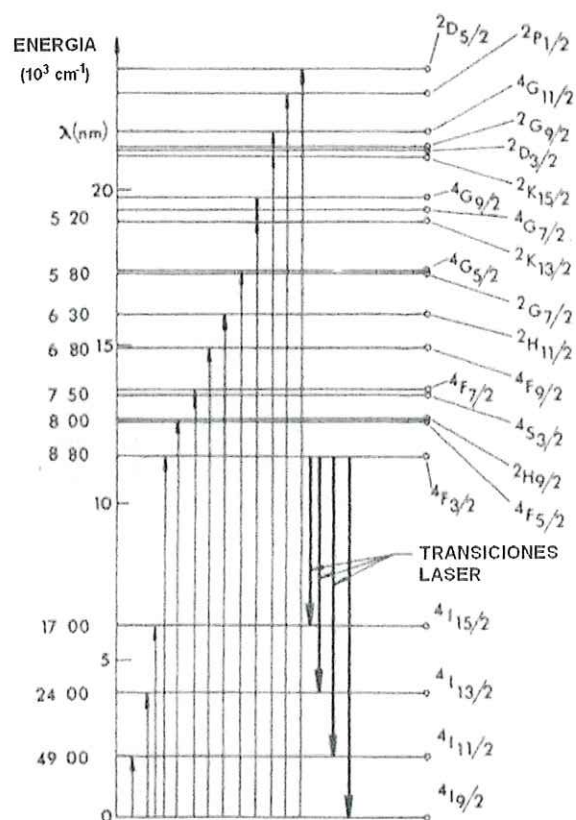


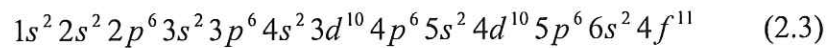
Figura 2.1. Niveles de energía del ión Nd³⁺.

El estado base es ${}^4I_{9/2}$. Las transiciones en el espectro visible de absorción ocurren del estado base a distintos niveles de estados excitados, donde los iones excitados que se encuentran en alguno de estos estados se relajan por transiciones radiativas o no radiativas al mayor nivel láser ${}^4F_{3/2}$ en un tiempo corto, comparado con su tiempo de vida radiativo que usualmente es de entre $300 \mu\text{s}$ y $600 \mu\text{s}$. El nivel ${}^4F_{3/2}$ decae radiativamente a través de cuatro transiciones láser: ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ($1.80 \mu\text{m}$), ${}^4I_{13/2}$ ($1.35 \mu\text{m}$), ${}^4I_{11/2}$ ($1.06 \mu\text{m}$), ${}^4I_{9/2}$ ($0.88 \mu\text{m}$). La transición ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ es una

línea resonante en el sentido que absorbe y emite radiación de la misma longitud de onda (Brown, 1981).

2.5 Espectroscopía del ión Yb^{3+}

El iterbio también pertenece a la serie de los lantánidos. Su símbolo es Yb, su peso atómico es 173.04 y su número atómico es 70. La configuración electrónica del Yb^{3+} es:



Por la configuración electrónica que presenta, el ión Yb^{3+} se puede aproximar a un sistema de dos niveles, el estado base $^2F_{7/2}$ y el estado meta-estable. El Yb^{3+} tiene una banda de absorción muy ancha que abarca de los 800 nm hasta los 1050 nm. Debido a su amplio rango de bombeo, el ión Yb^{3+} ha sido usado como un sensibilizador para otros iones de tierras raras para incrementar su eficiencia de bombeo. En la Figura 2.2 se muestran los principales niveles de energía, así como las transiciones de bombeo y fluorescencia para el $\text{Yb}^{3+}:\text{SiO}_2$ (óxido de silicio) (Cruz, 2004).

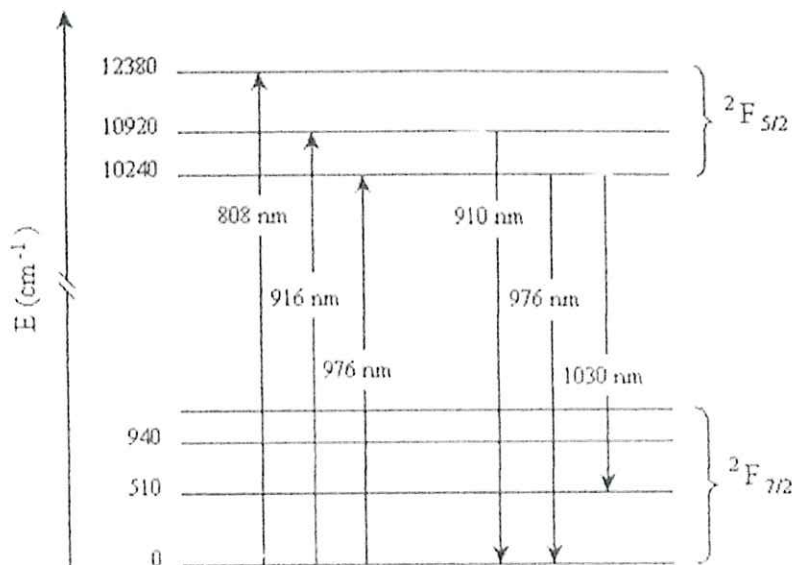


Figura 2.2. Diagrama de niveles de energía del ión Yb^{3+} : SiO_2 .

Un aspecto favorable de los materiales activados con iones de Yb^{3+} es la nula tasa de relajación no-radiativa y el hecho de que no hay mecanismos que compitan con la transición láser, tales como los procesos de absorción del estado excitado y conversión hacia arriba.

2.6. Transiciones radiativas

Cuando los iones de Yb^{3+} y Nd^{3+} excitados son producidos por la absorción de un fotón o por transferencia de energía de otro ión, la relajación al estado base puede tomar lugar a través de tres distintos procesos: radiativo, con la emisión de un fotón, por transferencia de energía a un ión cercano, o no-radiativamente con la emisión simultánea

de muchos fonones, los cuales son cuantos de energía vibracional, análogos a los cuantos de energía electromagnética los fotones (Brown, 1981). En las transiciones radiativas el estado excitado pierde el exceso de energía emitiendo un fotón de energía $h\nu$, decayendo al estado base o a un estado intermedio.

2.7. Transiciones no radiativas

Las principales transiciones no radiativas que intervienen en la desactivación del estado excitado son las transiciones multifonónicas que permiten que la energía de los iones excitados de Yb^{3+} o Nd^{3+} se pierdan en forma de vibraciones de la estructura en la cual se encuentran inmersos, además de que se puede presentar la transferencia de energía entre iones en las cuales los iones excitados de Yb^{3+} o Nd^{3+} se desactivan transfiriendo su energía a otro ión cercano provocando su excitación.

2.7.1. Transferencia de energía entre iones

Cuando la concentración de iones es lo suficientemente baja, son uniformemente distribuidos en la matriz del vidrio y la distancia entre ellos es grande, previniendo cualquier interacción iónica. Sin embargo, a concentraciones bajas, el estado base puede

vaciarse en circunstancias donde el número total de iones disponibles es menor que el número de fotones incidentes.

Si la concentración se incrementa por arriba de un cierto nivel, la distribución llega a ser irregular y la distancia promedio entre iones se reduce, lo cual hace posible diferentes efectos de interacción ión-ión, resultando en un proceso cooperativo de transferencia de energía. Tal interacción puede ocurrir entre todos los iones de la muestra o solamente dentro de una cierta clase. Debido a que la matriz vítrea fabricada en este trabajo es de fluorofosfato, una de sus características principales es que se puede introducir una alta concentración de iones Yb^{3+} - Nd^{3+} en el vidrio, lo cual hace muy probable que se presenten estos procesos de transferencia de energía, de aquí la importancia de entenderlos y saber como se llevan a cabo.

El caso más simple involucra la transferencia de energía de un ión excitado a otro ión cercano, el cual está en el estado base, sin ganancia o pérdida neta de energía. Este proceso es conocido como *transferencia de energía resonante* (Fig. 2.3a). *La transferencia de energía no resonante* (Fig. 2.3b) puede ocurrir cuando la diferencia de energía entre el estado inicial y final no es la misma para las dos transiciones involucradas y la transferencia se produce con la asistencia de un fotón o un fonón.

La transferencia de energía también puede ocurrir entre iones que se encuentran en estados excitados, en este proceso, uno de los iones transfiere su energía a otro ión que

originalmente estaba también en un estado excitado, alcanzando niveles excitados de mayor energía, este ión puede decaer no radiativamente a un nivel inferior y luego relajarse radiativamente al nivel base con la emisión de un fotón. Por lo tanto la emisión de la fluorescencia tendrá una energía mayor que la luz incidente. Este proceso se conoce en inglés como “*up-conversion*” (Fig. 2.3c).

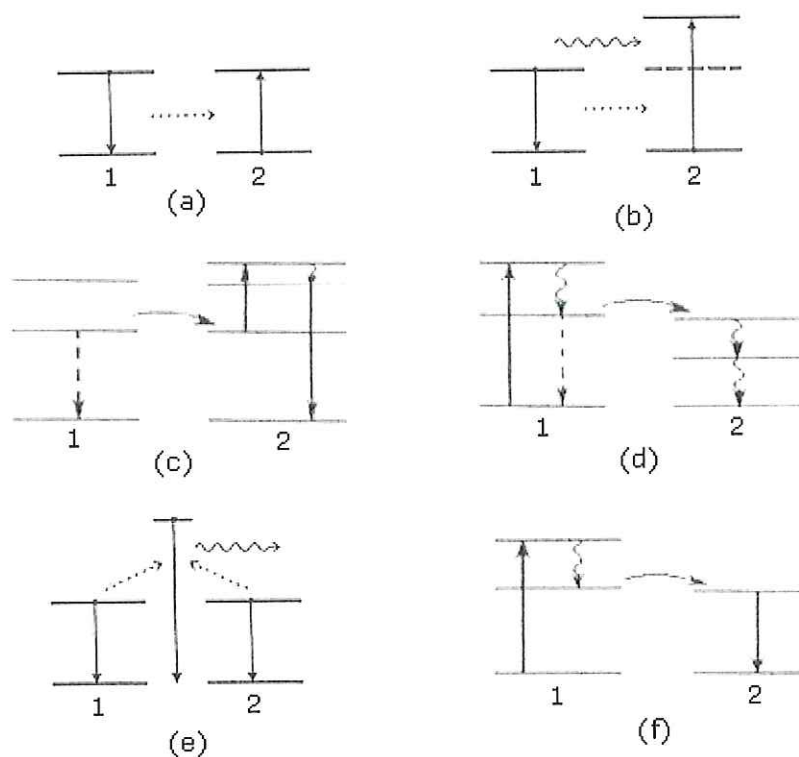


Figura 2.3. Mecanismos de transferencia de energía entre iones. Ión donador (1), ión aceptor (2). (a) Transferencia de energía resonante. (b) Transferencia de energía no resonante con la absorción simultánea de un fotón o fonón. (c) Fluorescencia hacia arriba. (d) Apagado de fluorescencia. (e) Luminiscencia cooperativa. (f) Luminiscencia sensibilizada.

En el proceso de *apagado de fluorescencia* (Fig. 2.3d) la energía es transferida de un ión donador (también llamado sensibilizador) a un ión aceptor (activador), pero éste no emite fluorescencia y se relaja no radiativamente. En este proceso, el ión aceptor actúa como un anulador de energía. Debido a que la fluorescencia del ión donador es parcial o completamente suprimida, el efecto es llamado apagado de fluorescencia.

Además es posible que se de la *luminiscencia cooperativa* (Fig. 2.3e), que es un proceso que involucra dos o más iones cercanos que se comporta como si fuera una sola entidad. El proceso consiste en que los dos iones participen en la emisión (o absorción) de un fotón de manera simultánea. La luminiscencia cooperativa se presenta en el caso donde dos iones en el mismo estado excitado decaen simultáneamente a sus respectivos estados base y se emite un fotón con el doble de la energía de los estados excitados de los iones individuales.

En la *luminiscencia sensibilizada* (Fig. 2.3f) un ión donador transfiere su energía a un ión aceptor, el cual emite fluorescencia. El principio básico de este proceso consiste en que se excita uno de los iones codopantes, para los vidrios fabricados en este trabajo se excitan los iones de Yb^{3+} , utilizando para ello la estimulación con un láser. El ión codopante debe tener una sección transversal de absorción significativamente mayor que cualquiera de las otras transiciones del otro ión, en este caso Nd^{3+} . Para lograr esto es necesario que exista una transferencia de energía eficiente de los iones sensibilizadores de Yb^{3+} (donadores) a la otra especie de iones de Nd^{3+} (aceptores), lo cual se puede

lograr con un alto nivel de concentración de los codopantes. Los iones sensibilizadores son excitados por la fuente de bombeo, esto es, por excitación externa; a diferencia de los iones aceptores que son excitados a través de la transferencia de energía por los iones sensibilizadores.

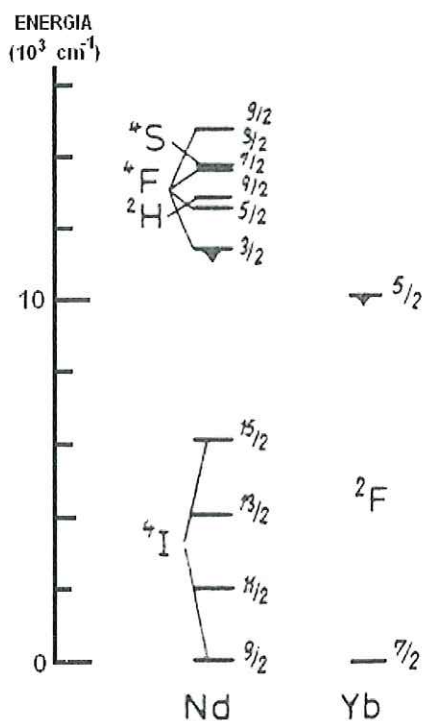


Figura 2.4. Diagrama de energía de los iones de Nd^{3+} y Yb^{3+} .

La transferencia de energía es posible si las energías de transiciones de los iones involucrados son muy parecidas, esto se cumple si se traslapan las bandas espectrales en el espacio de frecuencias de las transiciones donde se presenta la transferencia de energía. Aunque también se produce si el proceso es asistido por un fotón o un fonón. En el caso de los iones de Yb^{3+} - Nd^{3+} no hay un traslape en las bandas espectrales entre ambos, tal como se muestra en la Figura 2.4, pero la energía suministrada por el láser a

través de fotones, permite que los iones de Yb^{3+} - Nd^{3+} adquieran una mayor energía lo cual hace posible que se lleven a cabo los procesos de transferencia de energía entre estos iones.

Para mejorar la eficiencia de la transferencia de energía entre los iones donadores y aceptores se requiere que los iones donadores de Yb^{3+} puedan ser excitados eficientemente, lo cual permite, en ausencia de la transferencia de energía, un incremento de la población de iones en un estado excitado, además de que la población de los niveles excitados de los iones aceptores de Nd^{3+} sea mucho menor, de tal manera que el proceso inverso de transferencia de energía, es decir, de regreso a los iones donadores, este suprimido. Para garantizar esto, es necesario que el tiempo de vida del estado excitado de los iones donadores sea mayor que la del estado excitado de los iones aceptores.

Si los iones aceptores recibieran dos o más paquetes de energía de parte de los iones donadores, esto reduciría aún más el tiempo de vida del estado excitado observado. Una forma de compensar este efecto es incrementar la concentración de los iones donadores (Wiechers, 2004).

2.7.2. Relajación multifonónica

Debido a la alta concentración de iones Yb^{3+} - Nd^{3+} en los vidrios fabricados, otra de las transiciones no radiativas que pueden llevarse a cabo en los procesos de relajación de los estados excitados son las multifonónicas. La relajación multifonónica es asistida por la emisión de uno o varios fonones, donde los niveles excitados se relajan a través de la excitación de las vibraciones de la estructura vítrea. A diferencia de los cristales, estas vibraciones están localizadas espacialmente debido a la estructura aleatoria de los vidrios (Wiechers, 2004).

Como todas las transiciones de estado, las radiativas y las no radiativas ocurren simultáneamente, el tiempo de vida del ión, τ , está dado por:

$$\tau = \frac{1}{W_R + W_{NR}} = \frac{1}{W_R + (W_{MP} + W_{TE})} \quad (2.4)$$

donde W_R es la tasa total de decaimiento radiativo y W_{NR} es la tasa total de decaimiento total no radiativo, la cual puede expresarse, en una primera aproximación, como la suma de dos principales procesos: decaimiento multifonónico W_{MP} y transferencia de energía entre iones W_{TE} (Zenteno, 1993). El tiempo de vida no radiativo depende, además de las características del ión mismo, principalmente de la naturaleza del vidrio huésped y del acoplamiento entre las vibraciones del enrejado del ión. La tasa de decaimiento

multifonónico se incrementa con la temperatura y de acuerdo a la Ecuación (2.4), esto produce un decremento en el tiempo de vida de los niveles electrónicos involucrados. Por lo que cabe señalar que la dependencia con la temperatura se encuentra implícita en las transiciones no radiativas.

Si la tasa de decaimiento no radiativa total es mayor a la tasa de decaimiento radiativa, es decir, $W_{NR} \gg W_R$, no se observará fluorescencia. En el proceso de relajación, la probabilidad de una transición no radiativa disminuye exponencialmente con el número de fonones requeridos para traspasar la energía entre los niveles. Dado que la tasa no radiativa aumenta con la temperatura, ya que la población de fonones se incrementa con la temperatura de acuerdo a la estadística de Bose-Einstein, la tasa de transición no radiativa a temperatura T será dada por:

$$W_{NR}(T) = W_{NR}(0)[1 - \exp(-\hbar\omega / k_B T)]^{-p} \quad (2.5)$$

donde $\hbar = h / 2\pi$, ω es la frecuencia angular, k_B es la constante de Boltzman, $\hbar\omega$ es la energía del fonón, ΔE es la diferencia de energía entre los niveles, $p \equiv \Delta E / \hbar\omega$ es el número de fonones requeridos para traspasar la energía entre los niveles y $W_{NR}(0)$ es la tasa de transición a $T = 0$. La tasa de transición no radiativa en $T = 0$ es también exponencialmente dependiente del número de fonones requeridos para traspasar la energía entre los niveles. Por lo tanto la Ecuación (2.5) puede ser reescrita como:

$$W_{NR}(T, p) = B \exp(-\alpha\Delta E)[1 - \exp(-\hbar\omega / k_B T)]^{-p} \quad (2.6)$$

donde α y B son parámetros empíricos que dependen del material huésped y de la intensidad del acoplamiento electrón-fonón.

En la Ecuación (2.6) se puede ver que la probabilidad de que ocurra una transición fonónica decrece cuando se incrementa la separación entre los niveles de energía ΔE , la razón física es que se requiere un número mayor de fonones para sobrepasar la separación entre los niveles involucrados, el mismo efecto ocurre cuando el material tiene fonones de poca energía. Por otra parte, solamente serán significativas las relajaciones multifonónicas de un estado excitado hasta el nivel inmediato de menor energía, debido a que las transiciones a niveles más alejados serán de orden mayor y por lo tanto menos probables (Cruz, 2004).

2.8. Anchos de línea y mecanismos de ensanchamiento de la transición

El ancho de línea es una función del tiempo de vida de los estados, que a su vez depende de las transiciones no radiativas y, por lo tanto, de la temperatura. El ancho de línea de emisión o absorción implica que cualquier banda de intensidad en el dominio de la longitud de onda (o frecuencia) cubre un intervalo finito, lo cual se ve reflejado en las mediciones experimentales ya que los espectros que se obtienen poseen un ancho de banda bien determinado en un cierto intervalo, esto se debe a que los estados tienen un tiempo de vida finito, de acuerdo al principio de incertidumbre de Heisenberg:

$$\tau\Delta E \geq \hbar \quad (2.7)$$

esta relación ilustra el hecho de que el estado tiene una energía definida exactamente sólo si τ es infinito, pero como este nunca es el caso, todos los niveles de energía tienen un ancho finito (Hollas, 1996).

Si ahora se relacionan las ideas planteadas en las secciones de este capítulo que fueron puramente teóricas, cuya finalidad es que permitan entender los procesos espectroscópicos involucrados en el trabajo experimental desarrollado en este trabajo, se puede llegar a las siguientes conclusiones: En la sección 2.7 se señaló que al aumentar la temperatura, en este caso del vidrio codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} , se produce una disminución en el tiempo de vida de los estados excitados ya que estos no necesariamente decaen directamente al estado base eliminando el exceso de energía emitiendo fotones, si no que pueden decaer a estados intermedios a través de otras transiciones no radiativas, por lo que esta disminución en el tiempo de vida de los estados ocasiona como consecuencia que el ancho de línea de emisión o absorción sea mayor. Es de esperar que los resultados que se obtengan experimentales concuerden con los que se presentan teóricamente.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Introducción

El creciente interés en el desarrollo de sensores de temperatura a base de fibras ópticas activadas ha motivado la investigación sobre las características que deben tener los materiales activos, así como su influencia en el decaimiento de la fluorescencia. La mayoría de los métodos espectroscópicos de caracterización utilizan las intensidades y las formas de las líneas, pero también es posible utilizar su ensanchamiento.

En este capítulo se describe el procedimiento llevado a cabo para la fabricación del vidrio de fluorofosfato codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} y los dispositivos experimentales empleados para la obtención de los espectros de absorción y emisión en el rango de temperaturas de 31°C a 288°C .

3.2. Fabricación de los vidrios activos

Los vidrios son materiales inorgánicos amorfos que han sido formados de materiales enfriados rápidamente de la fase líquida, donde la cristalización ha sido prevenida. En

particular, los vidrios de fosfatos exhiben una alta solubilidad para los iones de tierras raras. Esta propiedad hace posible introducir una alta concentración de iones activos dentro de pequeños volúmenes. El motivo de introducir dos o más tipos de iones de tierra rara simultáneamente dentro de un medio láser es el de aumentar el proceso de transferencia de energía entre los iones, con esto se incrementa la absorción en las regiones espectrales donde los iones individuales no absorben. Las propiedades de los iones dependen fuertemente de las propiedades del vidrio donde se encuentran inmersos.

Para preparar el vidrio de fluorofosfato codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} se utilizaron los siguientes reactivos: $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (fosfato diácido de sodio monohidratado), BaF_2 (fluoruro de bario), Nd_2O_3 (óxido de neodimio) y Yb_2F_3 (trifluoruro de iterbio), todos de una pureza aproximada de 99.99%. Los vidrios de fluorofosfato son materiales de alta densidad por lo que admite grandes concentraciones de tierras raras alrededor de 10^{24} iones/ cm^3 , mientras que los vidrios de silica admiten aproximadamente 10^{19} iones/ cm^3 .

La muestra fue preparada conteniendo la siguiente composición molar:

89 % molar $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

5 % molar BaF_2

4 % molar Yb_2F_3

2 % molar Nd_2O_3

Se utilizó el BaF_2 para la elaboración de las muestras debido a que este compuesto aumenta las propiedades ópticas y espectroscópicas del Nd^{3+} en vidrios de fluorofosfato (Kumar et al, 2003), ya que actúa como un modificador de red para los iones, el cual facilita la incorporación de los iones de tierra rara en el vidrio, debido a que su tamaño (~ 1 angstrom) es mayor que el de los formadores básicos de red.

Los reactivos se mezclaron y fueron molidos en un mortero, para después ser colocados en crisoles de porcelana, los cuales se depositan en un horno eléctrico a $950^\circ C$ durante 4 horas para fundir la mezcla lo más homogénea posible. Al sacarla del horno, la mezcla adquiere una rigidez que permite darle forma, por lo que se deposita en moldes de bronce a $250^\circ C$ y se presiona con una placa del mismo material. Se dejan enfriar las muestras hasta que alcanzan la temperatura ambiente y finalmente se obtienen los vidrios de fluorofosfato.

Además se utilizó un vidrio de fluorofosfato, ya fabricado, dopado sólo con Nd^{3+} para las mediciones de fluorescencia cuya composición molar es la siguiente:

93 % molar $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$

5 % molar BaF_2

2 % molar Nd_2F_3 (fluoruro de neodimio)

3.3. Dispositivo experimental para obtener los espectros de absorción

Para obtener el espectro de absorción del vidrio codopado se utilizó el arreglo experimental que se muestra en la Figura 3.1. Se utilizó una fuente de luz blanca que emite longitudes de onda en el rango de 400 nm a 1800 nm, que incluye el espectro visible el cual abarca de 400 nm a 700 nm. Primero se registra la intensidad de la luz blanca en el espectrómetro, la cual funciona como una señal de referencia. Posteriormente, se hace incidir luz sobre la muestra y se registra la luz que es transmitida a través de ésta. La señal de transmisión obtenida corresponde a la luz blanca de la fuente junto con los picos de absorción de la muestra. Para obtener el espectro de absorción, se resta la señal de referencia a la señal de transmisión. Las mediciones fueron tomadas a temperatura ambiente.

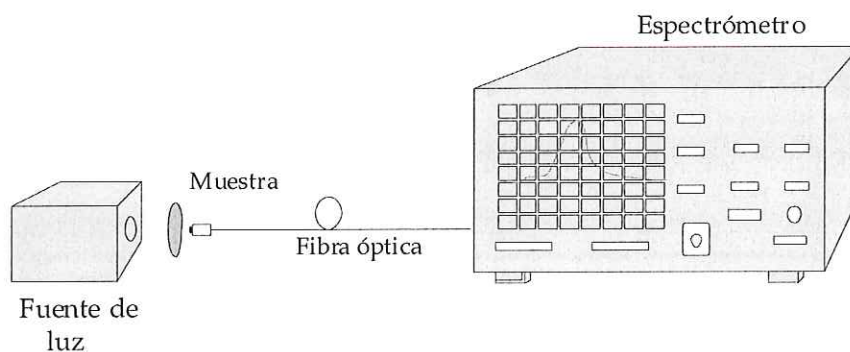


Figura 3.1. Dispositivo experimental para obtener los espectros de absorción del vidrio de fluorofosfato codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} .

3.4. Dispositivo experimental para obtener los espectros de emisión

La obtención de los espectros de emisión a temperatura ambiente y a altas temperaturas se realizó utilizando el arreglo experimental mostrado en la Figura 3.2. La fuente utilizada para excitar los iones activos de la muestra es un diodo láser que emite una señal modulada centrada en 910 nm, con una potencia máxima de salida de 2.5W. Esta longitud de onda corresponde a la transición resonante ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$ requerida para poblar el nivel ${}^2F_{5/2}$, de acuerdo a las propiedades de absorción del Yb^{3+} .

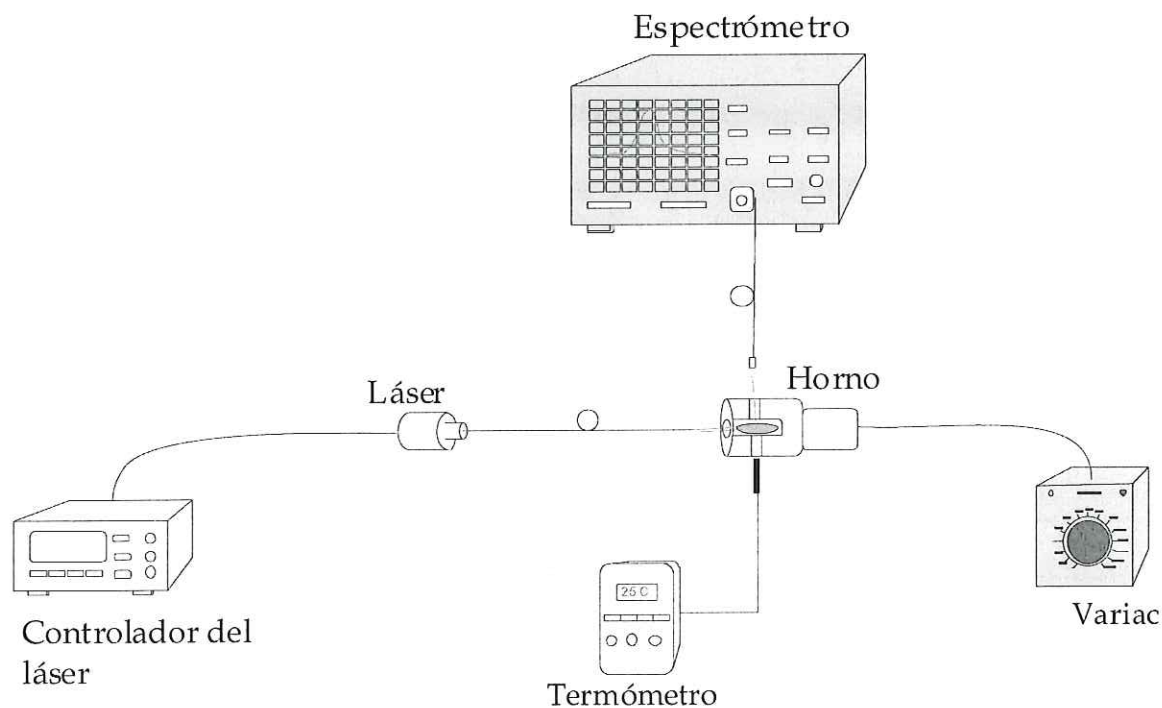


Figura 3.2. Dispositivo experimental para obtener los espectros de emisión de la transición ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ del Yb^{3+} .

La muestra se colocó en un horno, con el cual se pudo variar la temperatura en el intervalo de 31°C a 288°C. El horno cuenta con tres ventanas: una al frente donde se colocó la muestra y se incidió el haz de bombeo, otra en la parte de arriba donde se detectó la salida de la fluorescencia y una más en el costado donde se colocó el termómetro. Para regular la temperatura del horno se colocó un cautín en una cavidad en la parte trasera del horno, el cautín se conectó a un transformador variable para controlar el voltaje, de tal manera que al variar el voltaje suministrado en el cautín también cambiaba la temperatura a la cual se calentaba el horno. La fluorescencia fue registrada por un espectrómetro en la región de 860 nm a 1090 nm. La obtención del espectro de emisión del vidrio de fluorofosfato dopado con Nd^{3+} se realizó a temperatura ambiente a 31°C, en la región de 800 nm a 1600 nm.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Introducción

La medición de temperatura usando las propiedades de la fluorescencia de vidrios activados con neodimio se realiza de dos formas. La primera de ellas tiene en cuenta la variación del espectro de emisión con la temperatura mientras que la segunda está basada en la disminución del tiempo de decaimiento de la fluorescencia. En ambos casos la dependencia ocurre como consecuencia del ensanchamiento de los niveles de energía con la temperatura (Martínez et al, 1999). Uno de los efectos que se espera observar en los vidrios codopados con Yb^{3+} - Nd^{3+} es el ensanchamiento de los espectros de fluorescencia ante cambios de temperatura.

En este capítulo se presentan los espectros de absorción y emisión obtenidos de las mediciones hechas con los dispositivos experimentales, así como la razón de decaimiento de la fluorescencia con la temperatura. La finalidad de este capítulo es reportar la sensibilidad de la muestra ante los cambios de temperatura y de esta manera determinar si es un buen candidato para ser implementado como cabeza de sensor de temperatura.

4.2. Espectros de absorción

Los espectros de absorción nos permiten conocer las longitudes de onda en que las muestras absorben. Con esta información se puede determinar la longitud de onda a la que se debe bombear la muestra para lograr la emisión de la fluorescencia. En la Figura 4.1 se muestra el espectro de absorción del vidrio de fluorofosfato codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} .

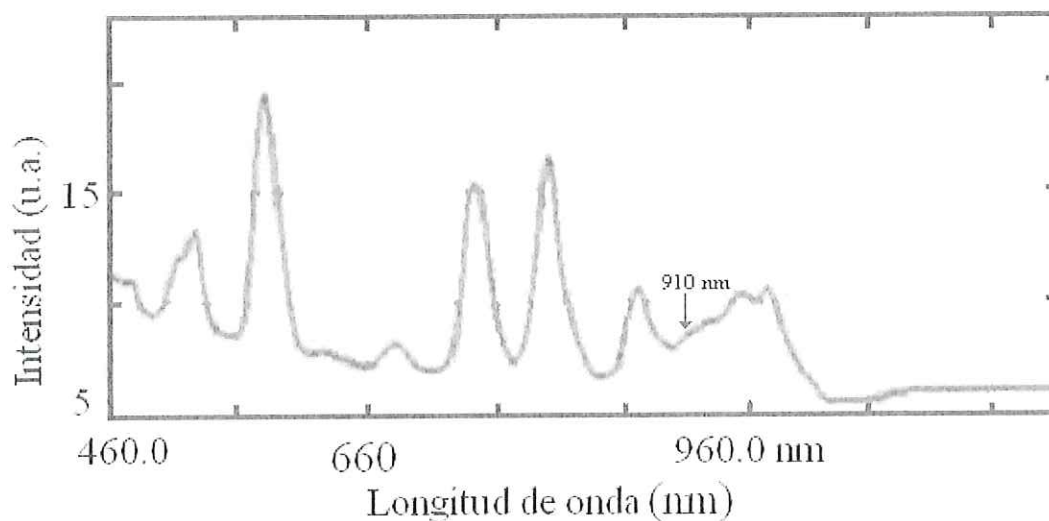


Figura 4.1. Espectro de absorción del vidrio de fluorofosfato codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} .

Para comparación, en la Figura 4.2 se muestran los espectros de absorción de (a) vidrio de fluorofosfato dopado con Nd^{3+} (Villegas, 2006) y (b) vidrio de sílica dopado con Yb^{3+} (Pask, 1995).

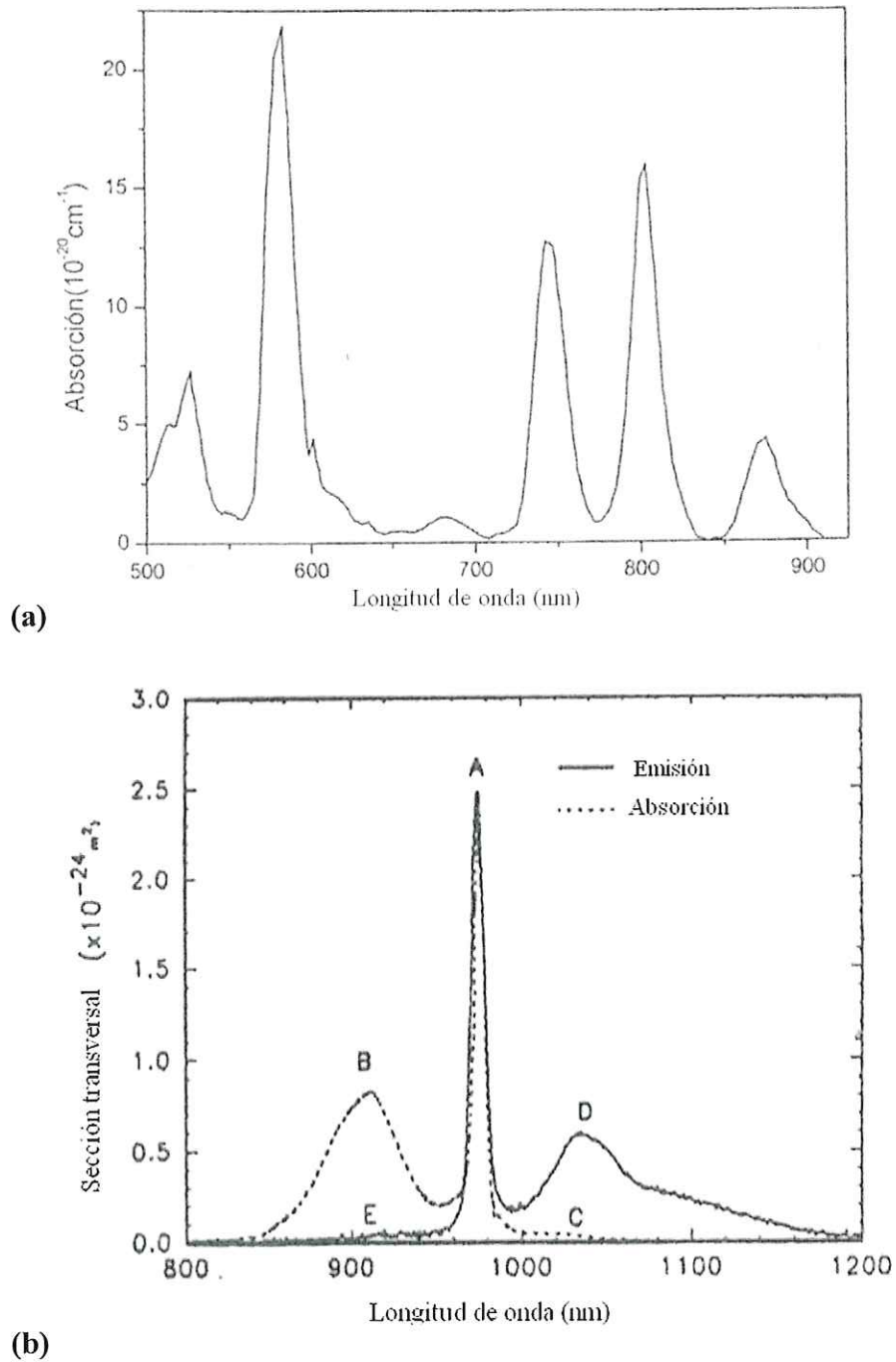


Figura 4.2. Espectros de absorción de (a) vidrio de fluorofosfato dopado con Nd³⁺ (Villegas, 2006) y (b) vidrio de silica dopado con Yb³⁺ (Pask, 1995).

De la Figura 4.1 se puede ver que la banda principal de absorción del vidrio codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} comprende un rango de longitudes de onda entre 450 nm y 1018 nm. El vidrio dopado con Nd^{3+} comprende un rango de longitudes de onda de 500 nm a 900 nm, de la Figura 4.2 (a) se observa que tiene un pico de absorción centrado en 880 nm. Mientras que el vidrio dopado con Yb^{3+} comprende un rango entre 850 nm y 1050 nm. Comparando los espectros de absorción obtenidos del vidrio codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} de los vidrios dopados solamente con Nd^{3+} e Yb^{3+} , se puede observar que el vidrio codopado presenta una banda de absorción más ancha respecto a los otros dos, esto debido a que presenta la superposición de las transiciones de absorción del ión Yb^{3+} y el ión Nd^{3+} que se muestran en la Figura 4.2, resultando así que la absorción de los iones de Yb^{3+} - Nd^{3+} tiene un rango donde se absorbe continuamente entre 860 nm y 1000 nm. Esto representa una ganancia, ya que nos proporciona un rango de longitudes de onda mayor para bombear la muestra que si sólo se dopa con alguno de los dos iones.

4.3. Fluorescencia

En la Figura 4.3 se muestra la señal del diodo láser utilizado en las mediciones. Como se puede observar la señal está centrada en 910 nm, con un ancho de banda que comprende un rango de 902 nm a 919 nm. La intensidad observada del diodo láser presenta muchas fluctuaciones, esto se debe a que no se enfocó el láser cuando se realizó la medición para no dañar el espectrómetro y posiblemente es un láser no estabilizado.

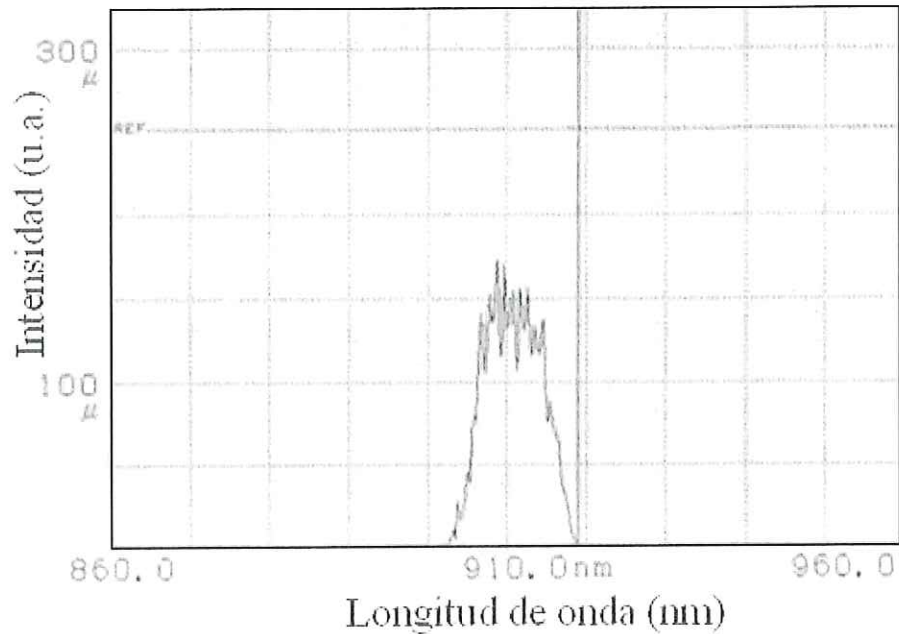


Figura 4.3. Espectro de emisión del diodo láser en 910 nm.

Como se observa en la Figura 4.1, la muestra codopada con $\text{Yb}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$ tiene absorción en 910 nm, por lo que el láser utilizado para bombearla, logra la excitación del estado base de la muestra y de esta manera se puede obtener la emisión de la fluorescencia.

En el estado base, el nivel ${}^2F_{7/2}$ del Yb^{3+} está despoblado, por lo que es necesario excitarlo para obtener la fluorescencia. Al utilizar como fuente de bombeo el diodo láser a 910 nm, se produce la excitación de los iones Yb^{3+} del estado ${}^2F_{7/2}$ al estado ${}^2F_{5/2}$. Una vez que el nivel ${}^2F_{5/2}$ está poblado, se produce el decaimiento espontáneo al nivel ${}^2F_{7/2}$ dando lugar a la fluorescencia como se muestra en la Figura 4.2 (b).

Análogamente se obtuvo una emisión de fluorescencia para el Nd^{3+} en la matriz del vidrio de fluorofosfato a temperatura ambiente a 31°C , la cual se observa en la Figura 4.4.

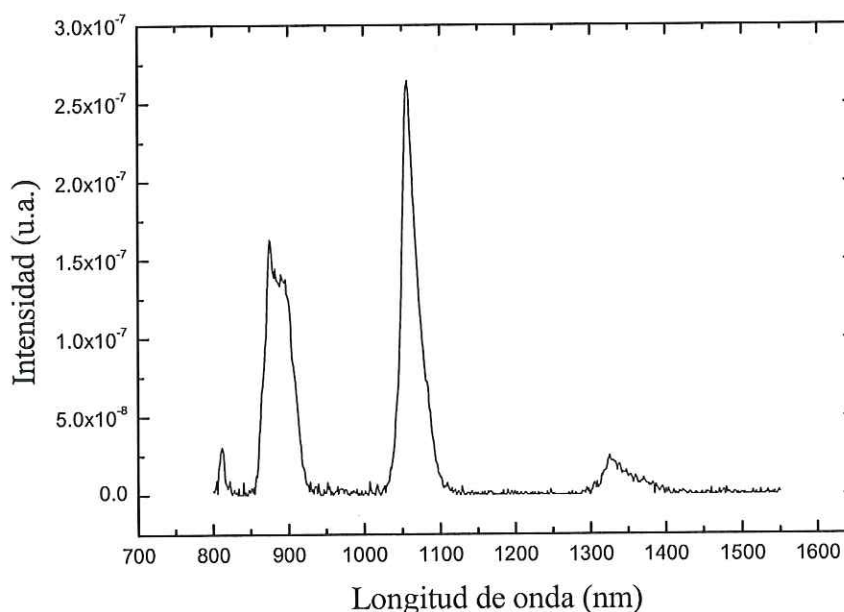


Figura 4.4. Espectro de emisión del vidrio de fluorofosfato dopado con Nd^{3+} .

La emisión de la fluorescencia se obtiene como resultado de la relajación tanto radiativa (fotones) como no radiativa (transferencia de energía entre iones, fonones) del estado excitado. Los iones excitados de Yb^{3+} que decaen por medio de la transferencia de energía entre iones, producen la excitación de los iones de Nd^{3+} del estado base $^4I_{9/2}$ al estado $^4F_{3/2}$. Además, los iones de Nd^{3+} pueden alcanzar niveles de energía superiores debido a la transferencia de energía entre los iones de Yb^{3+} a los de Nd^{3+} (como se mencionó anteriormente) y a través de la absorción de los fotones de bombeo.

En la Figura 4.5 se muestran los espectros de emisión del vidrio codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} como función de la longitud de onda que se obtuvieron utilizando el arreglo experimental de la Figura 3.2. Mientras que en la Figura 4.6 se muestra la normalización de los espectros de emisión, de esta manera es posible visualizar más claramente el ensanchamiento de los espectros ante las variaciones en la temperatura. Se realizaron las mediciones de la fluorescencia dependientes de la temperatura en el rango de 31°C a 288°C .

De las Figuras 4.5 y 4.6 se puede observar que el vidrio codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} presenta una intensa emisión en 975 nm a temperatura ambiente. También se pueden observar el incremento en el ancho de banda de emisión conforme al aumento de la temperatura, mientras que la intensidad de emisión fue disminuyendo de manera notable.

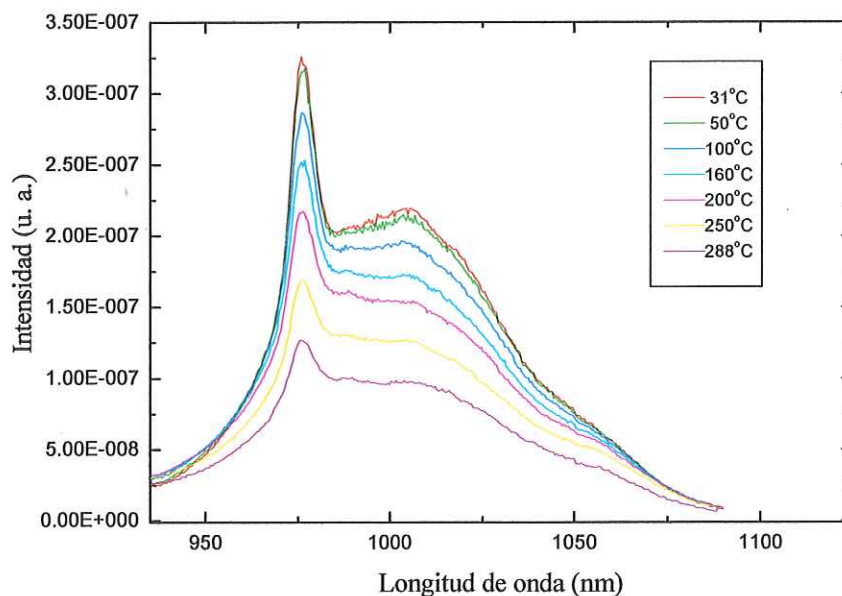


Figura 4.5. Espectros de emisión del vidrio de fluorofosfato codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} dependientes de la temperatura.

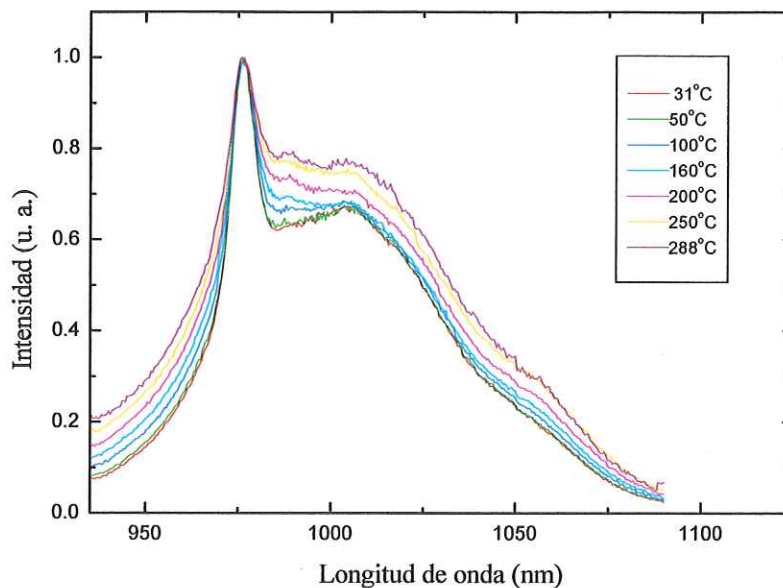


Figura 4.6. Espectros de emisión normalizados del vidrio de fluorofosfato codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} dependientes de la temperatura.

Estos resultados muestran que la combinación de iones de Yb^{3+} y Nd^{3+} es muy eficaz para aumentar la sensibilidad del sensor, por las siguientes razones:

1. En el espectro de emisión a 1060 nm del neodimio se observa un ensanchamiento efectivo de la fluorescencia de 25.7 nm, Figura 4.4.
2. El iterbio emite en el rango de 940 nm a 1100 nm aunque su pico más intenso está en 967 nm. Entre 940 nm y 960 nm es más débil la emisión. Mientras que en el rango de 1000 nm a 1100 nm la emisión es intermedia.

Así la fluorescencia final del vidrio codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} es el resultado de que el Yb^{3+} absorbe el bombeo del láser a 910 nm, parte de esta radiación la transmite al Nd^{3+} y

la otra parte la utiliza para emitir, como se explicó en el punto anterior. Parte de esta emisión a 900 nm es reabsorbida por el sistema $\text{Yb}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$ y la refuerza la señal de emisión a 1060 nm del Nd^{3+} . Teniendo como resultado final una señal homogénea con respecto a la intensidad y con un ensanchamiento de la fluorescencia más grande que la atribuida solo al Nd^{3+} , Figura 4.4. Esto nos permite mejorar la sensibilidad del sensor puesto que aumentó el ensanchamiento efectivo de la fluorescencia de 25.7 nm en el Nd^{3+} solo (Figura 4. 4) a 56.3 nm en el sistema $\text{Yb}^{3+}\text{-Nd}^{3+}$ (Figura 4.5), lo que equivale a un incremento del 54 % en el ancho de banda de la fluorescencia.

4.4. Razón de decaimiento con la temperatura

Debido a que las bandas de emisión obtenidas son asimétricas y varían con la temperatura, se calcula el ancho de banda efectivo, $\Delta\lambda_{eff}$, de cada espectro de emisión utilizando la siguiente ecuación para el caso discreto:

$$\Delta\lambda_{eff} = \frac{\sum I(\lambda)\Delta\lambda}{I_p} \quad (4.1)$$

donde $I(\lambda)$ son todos los valores de la fluorescencia obtenidos del experimento, I_p es el máximo valor de fluorescencia del espectro y λ_p es su correspondiente longitud de onda (De la Rosa-Cruz et al, 2001), $\Delta\lambda$ es el intervalo en la longitud de onda entre cada dato tomado, el cual es determinado por el espectrómetro, en este caso fue de 0.23 nm y

finalmente la sumatoria se realiza sobre todos los datos obtenidos. En la Tabla I se muestran los valores calculados de $\Delta\lambda_{eff}$ con la Ecuación (4.1) para cada espectro de emisión, junto con la temperatura a la cual se obtuvieron los espectros:

T° ($^{\circ}C$)	$\Delta\lambda_{eff}$ (nm)
31	56.3 ± 1.37
50	56.9 ± 1.39
100	59.6 ± 1.47
160	61.9 ± 1.54
200	65.9 ± 1.67
250	70.6 ± 1.68
288	73.2 ± 2.02

Tabla I. Resultados obtenidos del cálculo de $\Delta\lambda_{eff}$ de los espectros de emisión.

Relacionando de manera gráfica los resultados de la Tabla I, obtenemos las dos pendientes que se muestran en la Figura 4.7, las cuales representan la razón de decaimiento del ancho de banda como función de la temperatura. Al aumentar esta razón de decaimiento como función de la temperatura, implica también un incremento en la sensibilidad del sensor, ya que esta relación nos dice que tan sensible a los cambios de temperatura es el vidrio codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} que se pretende utilizar como cabeza de sensor.

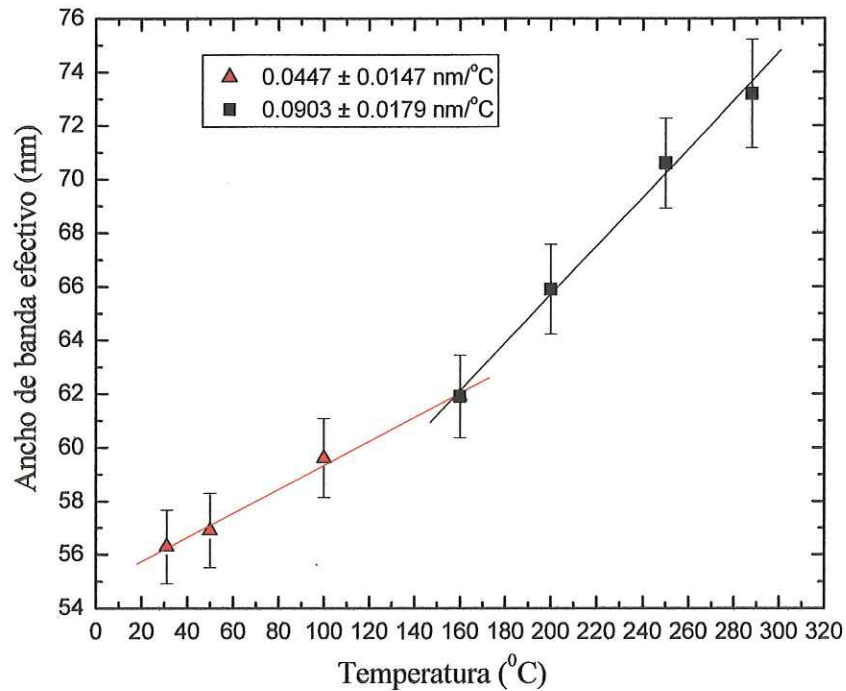


Figura 4.7. Razón de decaimiento del ancho de banda efectivo como función de la temperatura del vidrio codopado con Yb^{3+} - Nd^{3+} .

De la Figura 4.7 podemos notar que en el rango de temperaturas de 28°C a 160°C la razón de cambio con la temperatura es de $0.0447 \pm 0.0147 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, pero conforme la temperatura aumenta por arriba de los 160°C la sensibilidad se incrementa de manera notable ya que se tiene una razón de cambio de $0.0903 \pm 0.0179 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, lo que equivale a un incremento del 50% en la razón de cambio con la temperatura, lo cual a su vez representa un incremento en la sensibilidad del sensor. Estos resultados muestran una mayor eficiencia en la sensibilidad a la temperatura en el rango de 160°C a 288°C .

5. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo la caracterización espectroscópica de vidrios de fluorofosfato codopados con Yb^{3+} - Nd^{3+} , que consistió en la obtención de los espectros de absorción y emisión a diferentes temperaturas en un rango de 33°C a 288°C , de tal manera que se pudo encontrar la dependencia de la disminución de la fluorescencia con la temperatura, la cual se muestra en los siguientes resultados experimentales:

- I. Se obtuvo el espectro de absorción de vidrios de fluorofosfato codopados con Yb^{3+} - Nd^{3+} en el rango de longitudes de onda de 450 nm a 1018 nm, del cual se encontró que el rango espectral de absorción es mayor para vidrios codopados con Yb^{3+} - Nd^{3+} que para vidrios dopados con una sola tierra rara, ya que presentó la superposición de las transiciones de absorción de los dos tipos de iones, esto ofrece como ventaja un incremento de la absorción en las regiones espectrales donde los iones individuales no absorben

- II. Se obtuvieron los espectros de emisión dependientes de la temperatura en el intervalo de 33°C a 288°C de los vidrios de fluorofosfato codopados con Yb^{3+} - Nd^{3+} . A temperatura ambiente se observó una intensa banda de emisión en 975 nm. Con el incremento de la temperatura se observó simultáneamente una disminución en la

intensidad de la fluorescencia y un incremento en el ancho de banda de emisión. A temperatura ambiente se mostró que el ensanchamiento de la fluorescencia en vidrios codopados con Yb^{3+} - Nd^{3+} es mayor que la atribuida solo al Nd^{3+} , lo que permite mejorar la sensibilidad del sensor puesto que se obtuvo un incremento del 54% en el ancho de banda de la fluorescencia de los vidrios codopados con Yb^{3+} - Nd^{3+} sobre el obtenido solo con Nd^{3+} .

- III. Por último se calculó la razón de decaimiento del ancho de banda como función de la temperatura, del cual se obtuvo una razón de cambio de $0.0447 \pm 0.0147 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ en el intervalo de temperatura de 33°C a 160°C y una razón de cambio de $0.0903 \pm 0.0179 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ en el rango de temperatura de 160°C a 288°C , lo que equivale a un incremento del 50% en la razón de cambio en este rango de temperatura. Estos resultados muestran una mayor eficiencia en la sensibilidad a los cambios de temperatura de los vidrios codopados en el rango de 160°C a 288°C .

6. BIBLIOGRAFÍA

Adamovsky, G. y N.D. Piltch. 1986. *Appl. Opt.*, 25:4439.

Brown, D. C. 1981. *High-Peak-Power Nd: Glass Laser Systems*. Springer-Verlang. Alemania.

Cruz Vicente, Saúl. 2004. Caracterización espectroscópica a altas temperaturas de vidrios activados con Erblio-Iterbio y pulsos cortos autogenerados en fibras láser de erbio. *Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias en la especialidad de Óptica*. Centro de Investigaciones en Óptica. León, Guanajuato. México.

De la Rosa-Cruz, E., G. A. Kumar, L. A. Díaz-Torres, A. Martínez y O. Barbosa-García. 2001. *Opt. Materials*, 18:326.

Hollas, J. Michael. 1996. *Modern Spectroscopy*. Wiley.

Honninger, C., R. Paschotta, M. Graf, F. Morier-Genoud, G. Zhang, M. Moser, S. Biswal, J. Nees, A. Braun, G. A. Mourou, J. Johannsen, A. Giesen, W. Seeber y U. Keller. 1999. *Appl. Phys. B*, 69:3.

Konan, D., H. Giovannini, A. Symon, y X. Daxh. 1995. *SPIE*, 2248:331.

Kumar, G. A., E. De la Rosa-Cruz, A. Martínez, N. V. Unnikrishnan y K. Ueda. 2003. *J. of Phys. and Chem. of Solids*, 64:70.

Kyuma, K., S. Tai, T. Sawada y M. Nunoshita. 1982. *IEEE J. Quantum Electron*, QE-18:676.

Lin, Y., L. Xia, D. Jia y X. Zhang. 1996. *SPIE*, 2278:1098.

Martínez, A., E. De la Rosa-Cruz y F. Mendoza-Santoyo. 1999. *Revista Mexicana de Física*, 45(4):360.

Ohishi, Y. y S. Takahashi. 1985. *Appl. Opt.*, 25:720.

Pask, H.M. 1995. *IEEE J. of selected topics in Quantum Electronics*,1:453

Scrivener, P.L., P. D. Maton, A. P. Appleyard y E. J. Tarbox. 1990. *Electron. Lett.*, 26:872.

Scrivener P. L. 1990. *Electron Lett.*, 13:873.

Tuminelli, R., B. McCollum y E. Snitzer. 1990. *IEEE J. of Lighthwave Technology*.8:1681.

Villegas García, Irma L. 2006. Fabricación y caracterización de vidrios de fluorofosfato activados con neodimio para aplicación láser. *Tesis para obtener el grado de Licenciatura en Física*. Instituto de Física de la Universidad de Guanajuato. León, Guanajuato. México.

Wiechers Medina, Carlos H. 2004. Elaboración y caracterización de matrices de vidrio (KBG y fosfatos) codopados con Ho(III)-Yb(III). *Tesis para obtener el grado de Licenciado en Física*. Instituto de Física de la Universidad de Guanajuato. León, Guanajuato. México.

Zenteno, L. 1993. High- power double-clad fiber laser. *J. of Lightwave technology*, 11:1435.

Zettili, N. 2001. *Quantum Mechanics: concepts and applications*. Wiley. Inghaterra.