

**FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE DOS PROTOTIPOS DE
BASTÓN PARA LÁSER DOPADOS CON Er³⁺ Y Nd³⁺**

ELKIN MAURICIO ULLOA REYES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2009**

**FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE DOS PROTOTIPOS DE BASTÓN
PARA LÁSER DOPADOS CON Er³⁺ Y Nd³⁺**

ELKIN MAURICIO ULLOA REYES

Tesis para optar al título de Magíster en Física

Director

Dr. Ancizar Flórez Londoño

Codirector

M. Sc. Rafael Cabanzo

UNIVERSIDAD INSUATRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FÍSICA

BUCARAMANGA

2009

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos al Dr. Ancizar Flórez Londoño quien me enseñó otra forma de ver la ciencia, quien gracias a sus consejos me ha ayudado a madurar como investigador autónomo y a crecer como persona. De igual manera, quiero agradecer al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) dirigido por el Dr. Pedro Prieto, debido al soporte económico que me han brindado durante estos dos años como estudiante becario.

Asimismo, quiero agradecer al profesor Rafael Cabanzo y sus dos estudiantes Julian Valdivieso y Jaime Rodríguez, quienes me colaboraron en la ardua tarea de toma y análisis de los espectros de emisión.

A mis padres, que en los momentos difíciles de mi vida siempre se han encontrado ahí para respaldarme. Así mismo mis tíos Reinaldo Reyes, Noe Reyes y Carlos Eduardo Ulloa, que me han apoyado incondicionalmente durante el curso de mi carrera.

A mis amigos Juan Carlos Piña y Javier del Cristo con los cuales pude compartir durante este corto proceso diferentes vivencias y enseñanzas.

DEDICATORIA

**Este trabajo se lo dedico a mi esposa
y a mi hija por que han sido el
espíritu de mi hogar.**

CONTENIDO

	Pág.
Introducción	1
1 Objetivo de la investigación	3
1.1 Objetivo general	3
1.2 Objetivo específico	3
2 Matrices Cristalinas y vítreas	4
2.1 ¿Porque usar vidrios y no cristales en aplicaciones avanzadas?	4
2.2 Familias de Matrices Vítreas	5
2.2.1 Vidrios óxidos	5
2.2.2 Vidrios no óxidos	6
2.2.3 Vidrios oxi-fluoruros	7
3. Iones Lantánidos	8
3.1 Neodimio	10
3.2 Erblio	11
4 Teoría de Judd y Ofelt (J-O)	13
5 Desarrollo Experimental	17
5.1 Fabricación de los vidrios Oxi-Fluoruros	18
5.2 Medidas de los índices de refracción	19
5.3 Medidas de densidad	19
5.4 Medidas de DSC	20
5.5 Espectros de Absorción	23
5.5.1 Espectros de absorción del Nd^{3+}	24
5.5.2 Espectros de absorción del Er^{3+}	26
5.6 Espectros de Luminiscencia	27
5.6.1 Espectros de Luminiscencia del Er^{3+}	28
6 Cálculos y resultados	33
6.1 Neodimio	33

6.1.1	Fuerzas de oscilador experimentales del ion Nd^{3+}	33
6.1.2	Parámetros de Intensidad Ω_λ del ion Nd^{3+}	34
6.1.3	Fuerzas de oscilador teóricas del ion Nd^{3+}	34
6.1.4	Intensidades de las líneas S_{de} del ion Nd^{3+}	37
6.1.5	Probabilidades de transición $A_{JJ'}$ del ion Nd^{3+}	37
6.1.6	Tiempos de vida $\tau_{JJ'}$ del ion Nd^{3+}	40
6.1.7	Canales de relajación $\beta_{JJ'}$ del ion Nd^{3+}	42
6.2	Erbio	44
6.2.1	Fuerzas de oscilador experimentales del ion Er^{3+}	44
6.2.2	Parámetros de Intensidad Ω_λ del ion Er^{3+}	45
6.2.3	Fuerzas de oscilador teóricas del ion Er^{3+}	45
6.2.4	Intensidades de las líneas S_{ed} del ion Er^{3+}	48
6.2.5	Probabilidades de transición $A_{JJ'}$ del ion Er^{3+}	49
6.2.6	Tiempos de vida $\tau_{JJ'}$ del ion Er^{3+}	52
6.2.7	Canales de relajación $\beta_{JJ'}$ del ion Er^{3+}	54
7	Análisis y discusión de resultados	56
7.1	Vidrios dopados con neodimio	56
7.2	Vidrios dopados con erbio	61
8	Conclusiones	66
9	Referencias	68

LISTA DE FIGURAS

	Pág.	
3.1	Desdoblamiento de los niveles de energía	9
3.2	Niveles de energía del neodimio en el rango entre 0-3000 cm^{-1}	10
3.3	Niveles de energía del erbio en el rango entre 0-30000 cm^{-1}	11
4.1	Extensión de las configuraciones $4f^N$ (blanco) y $5d$ (negro)	14
5.(a)	Medida de DSC del vidrio con 0% molar de P_2O_5	21
5.(b)	Medida de DSC del vidrio con 4% molar de P_2O_5	21
5.(c)	Medida de DSC del vidrio con 8% molar de P_2O_5	21
5.(d)	Medida de DSC del vidrio con 12% molar de P_2O_5	21
5.(e)	Medida de DSC del vidrio con 16% molar de P_2O_5	22
5.6(a)	Medidas de espectros de absorción a temperatura ambiente de las 5 muestras dopadas con 1% molar de Nd^{3+} en el rango espectral entre 300-900 nm	24
5.6(b)	Medidas de espectros de absorción a temperatura ambiente de las 5 muestras dopadas con Nd^{3+} en el rango espectral 1400-2800 nm	24
5.7(a)	Espectro de absorción a temperatura ambiente de las 5 muestras dopadas con 1% molar de Er^{3+} en el rango espectral 300-700 nm	25
5.7(b)	Espectro de absorción a temperatura ambiente de las 5 muestras dopadas con 1 % molar de Er^{3+} en el rango espectral 700-1600 nm	26
5.8	Montaje para tomar espectros de emisión	27

5.9	Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 355$ nm, y registrado en el rango espectral de 350-650 nm para los 5 vidrios	28
5.10	Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 364$ nm, y registrado en el rango espectral de 350-650 nm para los 5 vidrios	29
5.11	Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 379$ nm, y registrado en el rango espectral de 350-650 nm para los 5 vidrios	29
5.12	Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 405$ nm, y registrado en el rango espectral de 350-650 nm para los 5 vidrios	30
5.13	Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 449$ nm, y registrado en el rango espectral de 350-650 nm para los 5 vidrios	30
5.14	Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 486$ nm, y registrado en el rango espectral de 350-650 nm para los 5 vidrios	31
5.15	Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 522$ nm, y registrado en el rango espectral de 350-650 nm para los 5 vidrios.	31
7.1	Procesos de relajación no radiativos presentes en el ion Nd^{3+} cuando los electrones son excitados a niveles electrónicos superiores al nivel $^4\text{F}_{3/2}$	57
7.2	Posibles transiciones láser en el ion Nd^{3+} predichos a través de la teoría de Judd y Ofelt	60
7.3	Procesos de relajación radiativos y no radiativos presentes en el ion Er^{3+} cuando los electrones son excitados al nivel electrónico $^4\text{G}_{9/2}$	62
7.4	Procesos de relajación no radiativos presentes en el ion Er^{3+} cuando los electrones son excitados a niveles electrónicos superiores al nivel $^4\text{S}_{3/2}$ y la transición láser que se origina desde este estado	63
7.5	Posibles transiciones láser en el ion Er^{3+} predichos a través de la teoría de Judd y Ofelt	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1	Composiciones de los 5 vidrios dopados con Nd^{3+} ordenados de acuerdo con el porcentaje molar de P_2O_5 en el material	17
Tabla 5.2	Composiciones de los vidrios dopados con Nd^{3+} ordenados de acuerdo con el porcentaje molar de P_2O_5 en el material	17
Tabla 5.3	Reactivos utilizados para la fabricación de los vidrios	18
Tabla 5.4	Descripción de los valores de densidad (ρ) en g/cm^3 , camino óptico (l) en cm y concentración de los iones neodimio y erbio (C) en mol/litro, ordenados de acuerdo al porcentaje molar de P_2O_5 presente en la composición de los vidrios.	20
Tabla 5.5	Valores de las temperaturas características, T_g (Transición Vítreo), T_x (Cristalización) y ΔT ($T_x - T_g$) en $^\circ\text{C}$	21
Tabla 6.1	Elementos de Matriz U_λ , $\lambda = 2,4,6$ del ion Nd^{3+}	35
Tabla 6.2	Valores de las fuerzas de oscilador experimentales f_{exp} ($\times 10^{-6}$), calculadas f_{cal} ($\times 10^{-6}$), el rms ($\times 10^{-6}$) y Ω_λ ($\times 10^{-20}$) del ion Nd^{3+} descritas para cada vidrio de acuerdo con su porcentaje de P_2O_5	36
Tabla 6.3	Intensidad de las transiciones dipolares eléctricas $S_{\text{ed}} \times 10^{-39}$ del ion Nd^{3+} descritas de acuerdo con el porcentaje molar de P_2O_5 en las muestras	37
Tabla 6.4	Valores de las probabilidades de transición Individuales $A_{JJ'}$ del ion Nd^{3+} descritos de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 en las muestras	39
Tabla 6.5	Valores de las probabilidades de transición $\sum A_{JJ'}$ del ion Nd^{3+} descritos de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 en las muestras	40
Tabla 6.6	Valores de los tiempos de vida de las distintas transiciones $\tau_{JJ'}$ (ms) del ion Nd^{3+} descritos de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 en las muestras	41
Tabla 6.7	Valores de los canales de relajación $\beta_{JJ'}$ del ion Nd^{3+} descritos de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 en las muestras	43
Tabla 6.8	Elementos de Matriz U_λ , $\lambda = 2,4,6$ del ion Er^{3+}	46
Tabla 6.9	Valores de las fuerzas de oscilador experimentales f_{exp} , calculadas f_{cal} , rms ($\times 10^{-6}$) y Ω_λ ($\times 10^{-20}$) del ion Er^{3+} para cada vidrio descritos de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5	47
Tabla 6.10	Intensidad de las transiciones dipolares eléctricas $S_{\text{ed}} \times 10^{-39}$	48

	del ion Er^{3+} descritas de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 en las muestras	
Tabla 6.11	Valores de las probabilidades de transición individuales $A_{JJ'}$ del ion Er^{3+} descritos de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 en las muestras	50
Tabla 6.12	Valores de las probabilidades de transición $\sum A_{JJ'}$ del ion Er^{3+} descritas de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 en las muestras	51
Tabla 6.13	Valores de los tiempos de vida de las distintas transiciones $\tau_{JJ'}$ (ms) del ion Er^{3+} descritos de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 en las muestras	52
Tabla 6.14	Canales de relajación $\beta_{JJ'}$ del ion Er^{3+} descritas de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 en las muestras	54
Tabla 5.1	Composiciones de los 5 vidrios dopados con Nd^{3+} ordenados de acuerdo con el porcentaje molar de P_2O_5 en el material	17
Tabla 5.2	Composiciones de los vidrios dopados con Nd^{3+} ordenados de acuerdo con el porcentaje molar de P_2O_5 en el material	17
Tabla 5.3	Reactivos utilizados para la fabricación de los vidrios	18
Tabla 5.4	Descripción de los valores de densidad (ρ) en g/cm^3 , camino óptico (l) en cm y concentración de los iones neodimio y erbio (C) en mol/litro, ordenados de acuerdo al porcentaje molar de P_2O_5 presente en la composición de los vidrios.	20
Tabla 5.5	Valores de las temperaturas características, T_g (Transición Vítreas), T_x (Cristalización) y ΔT ($T_x - T_g$) en $^\circ\text{C}$	21
Tabla 6.1	Elementos de Matriz U_λ , $\lambda = 2,4,6$ del ion Nd^{3+}	35
Tabla 6.2	Valores de las fuerzas de oscilador experimentales f_{exp} ($\times 10^{-6}$), calculadas f_{cal} ($\times 10^{-6}$), el rms ($\times 10^{-6}$) y Ω_λ ($\times 10^{-20}$) del ion Nd^{3+} descritas para cada vidrio de acuerdo con su porcentaje de P_2O_5	36
Tabla 6.3	Intensidad de las transiciones dipolares eléctricas $S_{\text{ed}} \times 10^{-39}$ del ion Nd^{3+} descritas de acuerdo con el porcentaje molar de P_2O_5 en las muestras	37

RESUMEN

TITULO: fabricación y caracterización de dos prototipos de bastón para láser dopados con Er^{3+} y Nd^{3+}

AUTOR: Elkin Mauricio Ulloa Reyes**

PALABRAS CLAVES: Neodimio, Erblio, Pentóxido de fósforo, vidrio, fluorindato, oxifluorindato

Descripción

Dentro de la familia de vidrios no óxidos, las matrices fluorindatas, han sido de gran interés, debido a su amplia ventana de transmisión, baja frecuencia fonónica, alta durabilidad química y buena calidad óptica. Sin embargo, la gran tendencia a la desvitrificación durante la preparación del material, ha sido la principal desventaja frente otros materiales vítreos, como los fosfatos, los cuales presentan una alta estabilidad térmica y cuyo principal componente es el pentóxido de fósforo (P_2O_5). Aprovechando esta propiedad, fueron fabricados 5 vidrios oxi-fluorindatos dopados con Nd^{3+} y 5 vidrios dopados con Er^{3+} . De esta manera, fueron agregadas pequeñas cantidades de P_2O_5 sistemáticamente a la composición del vidrio fluorindato: $35\text{In F}_3 - 20\text{Zn F}_2 - 16 \text{BaF}_2 - 20\text{SrF}_2 - 6\text{GaF}_3 - 2\text{NaF} - 1\text{TR}$, donde TR corresponde a la tierra rara. Los resultados de la investigación mostraron un incremento en la estabilidad térmica de la matriz fluorindata, de acuerdo con las medidas de DSC (Differential Scanning Calorimetry) realizadas.

De otro lado, los iones lantánidos muestran propiedades ópticas atractivas para ser utilizados como dopantes, debido al especial comportamiento de su estructura electrónica. Es decir, la configuración interna $4f^N$, desde la cual se originan las transiciones electrónicas, se encuentra eficientemente apantallada por las configuraciones externas $5s^2$ y $5p^6$, razón por la cual, las bandas de absorción son poco afectadas por el ambiente químico que rodea al ion tierra rara. Sin embargo entre los diferentes iones lantánidos, para esta investigación, fueron escogidos los iones de Er^{3+} y Nd^{3+} , debido al gran potencial para posibles aplicaciones en dispositivos láser, hacia el cual ha sido direccionada. Los resultados obtenidos a través de la teoría de Judd y Ofelt, muestran que la adición de P_2O_5 tiene un gran efecto sobre sus propiedades ópticas, excepto para pequeñas cantidades de pentóxido de fósforo, tanto para los vidrios dopados con Er^{3+} como para los dopados con Nd^{3+} .

* Proyecto de grado de maestría

** Facultad de Ciencias, Escuela de física Dr. Ancizar Flórez Londoño, M.Sc. Rafael Cabanzo

ABSTRACT

TITLE: fabrication and characterization of two prototype of row laser doped with Er^{3+} and Nd^{3+}

AUTOR: Elkin Mauricio Ulloa Reyes**

KEY WORDS: Neodimium, Erbium, phosphorus pentoxide, glass, fluoroindate, oxi-fluoroindate

Description

Within the non-oxides family glasses, fluoroindate glasses, have been of great interest, due to their large transparency, low phonon frequency, high chemical durability and good optical quality. Nevertheless, the tendency to the desvitrification during the preparation of the material has been the main disadvantage against other vitreous materials, like the phosphates, whose have a high thermal stability. The major component in these glasses is phosphorus pentoxide (P_2O_5). Taking advantage of this property, 5 Nd^{3+} -doped oxi-fluoroindate glasses and 5 Er^{3+} -doped oxi-fluoroindate glasses have been made. In this way, small amounts of P_2O_5 were added to the composition of the fluoroindate glass: 35In F3 - 20Zn F2 - 16 BaF2 - 20SrF2 - 6GaF3 - 2NaF - 1TR, where TR corresponds to the rare Earth. The results of the investigation have shown an increase in thermal stability of the fluoroindate matrix, in agreement with the measures of DSC (Differential Scanning Calorimetry) made.

Of another side, the trivalent lanthanide ions display attractive optical properties to be used like doped elements, due to the special behavior of their electronic structure. Specifically, the internal $4f^N$ shell, from which the electronic transitions are originated, is efficiently shielded by the external $5s^2$ and $5p^6$ shells. So, the absorption bands are little affected by the chemical atmosphere that surrounds to the rare earth ion. Nevertheless, between different lanthanide ions, in this investigation, the ions Er^{3+} and Nd^{3+} were chosen, due to the huge potential for possible applications in lasers, towards the investigation has been pointed. The results obtained through the Judd-Ofelt theory, have shown that the addition of P_2O_5 present a weak influence on optical properties for small amounts of phosphorus pentoxide, on Er^{3+} -doped glasses and Nd^{3+} -doped glasses.

* Maestry Project

** Facultu of Science, Collage of physics, Dr. Ancizar Flórez Londoño, Msc. Rafael Cabanzo

Introducción

La investigación de matrices vítreas transparentes dopadas con iones lantánidos, ha sido desarrollada a fin de ser aprovechadas en las telecomunicaciones, en el rango espectral visible e infrarrojo cercano y medio. Debido a esto, se han requerido de materiales con amplias ventanas de transmisión, bajas frecuencias fonónicas, gran estabilidad térmica y alta durabilidad química. De esta manera, se espera garantizar una disminución en la pérdida de energía mediante procesos multifonónicos, y un aumento en la eficiencia cuántica de las transiciones de los iones tierras raras normalmente usados como dopantes. En el mismo sentido, los materiales con tales características pueden ser menos sensibles a los cambios bruscos de temperatura y humedad.

Dentro del potencial de aplicaciones que pueden tener dichas matrices, éste trabajo ha sido direccionado hacia el posible uso en dispositivos láser. Para el efecto se escogió, una matriz de la familia de los fluorindatos, por su excelente calidad óptica y baja frecuencia fonónica, comparada con matrices de óxido. La matriz elegida tiene inicialmente la composición: $35\text{InF}_3 - 20\text{ZnF}_2 - 16\text{BaF}_2 - 20\text{SrF}_2 - 6\text{GaF}_3 - 2\text{NaF} - 1(\text{TRF}_3)$; donde TR, representa el ion tierra rara usado como dopante. No obstante sus buenas propiedades ópticas que la caracterizan, presenta una alta tendencia hacia la cristalización. En la búsqueda de una disminución de esa característica, se ha recurrido a la gran estabilidad que presentan los vidrios fosfatos. Así, en la matriz elegida, se realizó un proceso sustitucional, que consistió en reemplazar proporcionalmente Fluoruro de bario, BaF_2 , por pentóxido de fósforo, P_2O_5 .

De otra parte, por el auge, cada vez más creciente que en los últimos años ha tenido la fotónica, los iones lantánidos se han convertido en los medios activos más utilizados para este fin. La principal característica de estos elementos, es el pequeño efecto que sobre sus propiedades ópticas tiene el campo cristalino que

representa la matriz en la que ellos son introducidos. Esto es debido, a que la configuración interna $4f^N$, donde se originan sus transiciones electrónicas, se encuentra apantallada por las subcapas externas $5s^2$ y $5p^6$ [1].

Para el estudio cuantitativo de los espectros de absorción de los iones tierras raras, se utilizó como instrumento de cálculo, la teoría de Judd y Ofelt [2,3]. Dado que, hasta el momento, es el único modelo disponible para tal fin. No obstante, el modelo funciona bien para la mayoría de los iones lantánidos, aunque para otros, como el Pr, presenta algunas inconsistencias.

En general, el trabajo se ha desarrollado de acuerdo con el siguiente orden: en el capítulo 2 se han descrito las propiedades físicas más importantes de los vidrios fluoruros, como materiales para aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos. En el capítulo 3 se hace referencia a las propiedades ópticas de los iones lantánidos y en especial, para el neodimio y el erbio, asociada con su estructura electrónica interna. El capítulo 4, se han explicado las suposiciones realizadas por Judd y Ofelt [2,3], para el desarrollo del modelo de intensidades f-f. En el capítulo 5, se ha descrito el proceso experimental de fabricación de las muestras vítreas, así como la realización de diferentes medidas ópticas y térmicas del material, usado como matriz.

Posteriormente, en el capítulos 6 y 7, son presentados los resultados de los cálculos realizados, así como el análisis y discusión de los mismos, en términos de los cambios generados por las distintas concentraciones de P_2O_5 . De esta manera, fueron estudiados: las fuerzas de oscilador, los parámetros de intensidad, la intensidad de línea, las probabilidades de transición, los tiempos de vida, y los canales de relajación en las diversas matrices, tanto para las matrices dopadas con neodimio, como para las dopadas con erbio. Finalmente, en el capítulo 8 son presentadas las conclusiones.

1. Objetivos de la investigación

1.1 Objetivo General

Fabricar y caracterizar ópticamente vidrios para prototipos de bastón para láser, con base en matrices fluoroindatas, usando Nd^{3+} y Er^{3+} como medios activos.

1.2 Objetivos Específicos

1. Fabricar 5 vidrios fluoroindatos dopados con Nd^{3+} , y modificados sistemáticamente con P_2O_5 en cantidades de 4, 8, 12 y 16% molar
2. Fabricar 5 vidrios fluoroindatos dopados con Er^{3+} , y modificados sistemáticamente con P_2O_5 en cantidades de 4, 8, 12 y 16% molar
3. Estudiar la estabilidad térmica del material mediante medidas de DSC (Diferencial Scanning Calorimetry).
4. Obtener los espectros de absorción a temperatura ambiente de todas las muestras fabricadas.
5. Calcular y analizar los parámetros de intensidad, probabilidades de transición radiativa, tiempos de vida radiativa y canales de relajación utilizando la teoría de Judd y Ofelt [2,3].
6. Con base en las predicciones obtenidas a partir de los espectros de absorción, comprobar la teoría de Judd y Ofelt [2,3], a través de espectroscopía de luminiscencia.

2. Matrices Cristalinas y vítreas

Un cristal ideal es un material compuesto de unidades estructurales idénticas que se repiten periódicamente, y son descritas por un conjunto de vectores de translación en las diferentes direcciones en el espacio [4]. Por el contrario, los materiales en los que no existe esa periodicidad de las unidades estructurales, son llamados no cristalinos o amorfos. No obstante, los desordenes estructurales a nivel macroscópico, existen en ellos unidades, en los que a nivel microscópico, se puede definir algún tipo de simetría, como para identificar microcristales [5]. Una clase muy importante de los amorfos lo constituyen los vidrios.

2.1 ¿Porque usar vidrios y no cristales en aplicaciones avanzadas?

En relación con los cristales, una de las grandes ventajas de los materiales vítreos, es la relativa facilidad con la que pueden ser preparados, disponiendo básicamente para ello de métodos, tales como: el fundido y sobreenfriado de los componentes, deposición de vapor químico (CVD) y el sol-gel. De esta manera, se han obtenido grandes piezas de vidrio con buena calidad óptica para usos en láser [6]. Además, cuando el material se encuentra fundido, se vierte en moldes precalentados que le dan formas definidas, como por ejemplo para la obtención de un bastón láser. Contrario a esto, los cristales necesitan técnicas de crecimiento delicadas y de larga duración, con condiciones especiales de presión y temperatura. Esto disminuye la posibilidad del uso en fibras ópticas, debido a la poca versatilidad del material, además, eleva los costos de fabricación y restringe los tamaños y formas de las piezas [7].

De otra parte, los cristales dopados con iones lantánidos, exhiben anchos de banda de algunos pocos nanómetros, debido a que cada ión, ocupa los mismos sitios de simetría en la red. En cambio, los vidrios dopados con tierras raras,

presentan anchos de banda extendidos, en razón a las pequeñas diferencias que entre los sitios de simetría, que los iones ocupan en el ambiente químico donde se encuentran. Esto permite, utilizar fuentes de bombeo con luz no tan monocromática, que puede ser útil en procesos de aplicaciones, como en dispositivos láser en sus diferentes condiciones de operación [7].

Otra característica muy importante de los vidrios, respecto a los cristales, es su isotropía [8]; es decir, los iones dopantes se redistribuyen muy homogéneamente en el material en todas las direcciones, además de tolerar mayores porcentajes de dopante [9]. Adicionalmente, en los materiales vítreos, el índice de refracción puede ser ajustado para usos específicos, como para dispositivos láser.

2.2 Familias de Matrices Vítreas

2.2.1 Vidrios Óxidos

Los vidrios óxidos, basados en óxidos de silicio SiO_2 , fueron los primeros en ser utilizados en aplicaciones tecnológicas avanzadas, como las fibras ópticas. Sus principales características son su transparencia a la luz, que cubre el rango espectral desde el ultravioleta hasta $2 \mu\text{m}$ en el infrarrojo cercano [10]; las pérdidas por dispersión son del orden de 0.1 dB/km , para longitudes de onda entre 2 y $3 \mu\text{m}$; y una frecuencia fonónica del orden de los 1300 cm^{-1} [11,12]. Asimismo, es un material muy resistente a la humedad [11]. A pesar que su estrecha ventana de transmisión efectiva, existen algunos dispositivos láseres comerciales dopados con neodimio, los cuales utilizan la transición de $1.06 \mu\text{m}$ en el límite de su transparencia [13].

Otro grupo importante de vidrios óxidos; son los fosfatos, cuyo principal componente es el fósforo, P. No obstante, su alta higroscopía, comúnmente es usado en la forma, P_2O_5 . Sin embargo, existen otras formas más estables, como la

$\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ y $(\text{NaPO}_3)_n$; las cuales, son frecuentemente utilizadas [14]. Entre sus características más sobresalientes, se encuentran su ventana de transmisión que se extiende, desde 0.2 hasta 3 μm , y su frecuencia fonónica cercana a los 1200 cm^{-1} [14]. Asimismo, presenta una gran estabilidad térmica contra la desvitrificación del orden de 200°C (diferencia entre las temperaturas de cristalización y vitrificación) [15,16], lo cual, las convierte en matrices apropiadas para aplicaciones láser [17].

2.2.2 Vidrios no Óxidos

El grupo de vidrios no óxidos esta compuesta por las familias de los haluros, cloruros, telurios, y fluoruros entre otros. Estos últimos, son los que presentan un mayor potencial para aplicaciones tecnológicas, debido a su gran ventana de transmisión, hasta el infrarrojo; su baja frecuencia fonónica, y las bajas pérdidas por dispersión [9, 18]. Las matrices fluorozirconadas fueron las primeras en ser descubiertas dentro de ésta gran familia [19]. Su frecuencia fonónica es del orden de 580 cm^{-1} [20], el rango de transmisión de 0.2 a 7.5 μm [21], y las pérdidas intrínsecas por dispersión, son menores a 0.01 dB/Km, para longitudes de onda entre 2 y 3 μm [11, 22]. Su estabilidad térmica no es muy alta, del orden de 100°C [23, 24], siendo ésta la característica más negativa para aplicaciones láser. Su rango de transparencia ha permitido su utilización en amplificadores ópticos.

Las matrices con fluoruro de indio, como mayor componente; fueron descubiertas a principios de la década de los 70 [19]. Su estabilidad térmica, es del orden de 110 °C [25] y su frecuencia fonónica de 500 cm^{-1} [20]. Presentan una ventana de transmisión que se extiende desde 0.25 a 10 μm [25], lo cual facilita su uso en aplicaciones hasta en el infrarrojo medio. Sus pérdidas por dispersión son menores de 1 dB/Km en 5.4 μm [26]; siendo además, más resistente a la humedad, en comparación con sus predecesores, los vidrios fluorozirconados [27].

2.2.3 Vidrios Oxi-floruros

Asociados con el proceso de preparación, los principales problemas de los vidrios no-óxidos son su higroscopía y su fuerte tendencia a la cristalización. Por ésta razón, algunos metales y/o no-metales son agregados para tratar de mejorar esta característica. En este sentido, el fósforo ofrece una buena posibilidad. Su influencia como modificador, en pequeñas concentraciones, sobre la red de los fluoruros, aumenta el valor de la estabilidad por encima de 120°C [28]. Sin embargo, la ventana de transmisión se reduce un poco, debido a un pequeño aumento en la frecuencia fonónica del sistema resultante [29]. No obstante, las propiedades ópticas no se modifican sustancialmente, en relación con los fluoruros, para moderadas concentraciones del fósforo [30, 31].

3. Iones Lantánidos

El estudio de los iones lantánidos como medios activos en materiales transparentes, corresponde básicamente a lo que sucede dentro de la configuración $4f^N$. Es decir, a diferencia de los demás elementos de la tabla periódica, en esta capa, se encuentran los electrones de valencia. No obstante, ellos no hacen parte de los enlaces químicos con los cationes que se encuentren a su alrededor para definir los arreglos químicos. Esencialmente, esta responsabilidad corresponde a las dos configuraciones externas $5s^2$ y $5p^6$, que a su vez apantallan a los electrones de la capa $4f^N$ [1, 32, 33]. Este apantallamiento que experimenta dicha configuración, hace que las transiciones electrónicas que se originan en su interior, sean poco sensibles al ambiente químico que rodea al ion, y sus intensidades han sido atribuidas a un mecanismo de dipolo eléctrico. Sin embargo, de acuerdo con la regla de la paridad para este mecanismo, tales transiciones no son permitidas dentro de la misma configuración $4f^N$ [1]. No obstante, por la magnitud de las intensidades observadas, no pueden ser asociadas a transiciones entre las configuraciones $4f^{N-1}5d$, debido a que éstas son comúnmente observadas en la región ultravioleta, mientras que las intra-configuracionales f-f, normalmente son observadas en la región visible e infrarroja cercana del espectro electromagnético [1].

Los niveles energéticos asociados con sus configuraciones electrónicas son determinados a partir del Hamiltoniano atómico multielectrónico [16]:

$$H = H_H + H_{coul} + H_{SO} + H_{CF} \quad (1)$$

Donde H_H , corresponde a la suma de las energías cinética y potencial de los n electrones individuales de carga e y masa m ; H_{coul} , representa la repulsión

colombiana entre electrones; H_{SO} , describe las interacciones spin-orbita; y H_{CF} , describe la perturbación producida por el campo cristalino, generado por los cationes alrededor del ion lantánido, que da origen a los niveles Stark. Estos últimos, son difíciles de ser resueltos debido a que la brecha de energía entre ellos es solo del orden de algunos cientos de cm^{-1} [17]. La figura 3.1 ilustra el esquema correspondiente a los desdoblamientos causados por cada una de las interacciones anteriores.

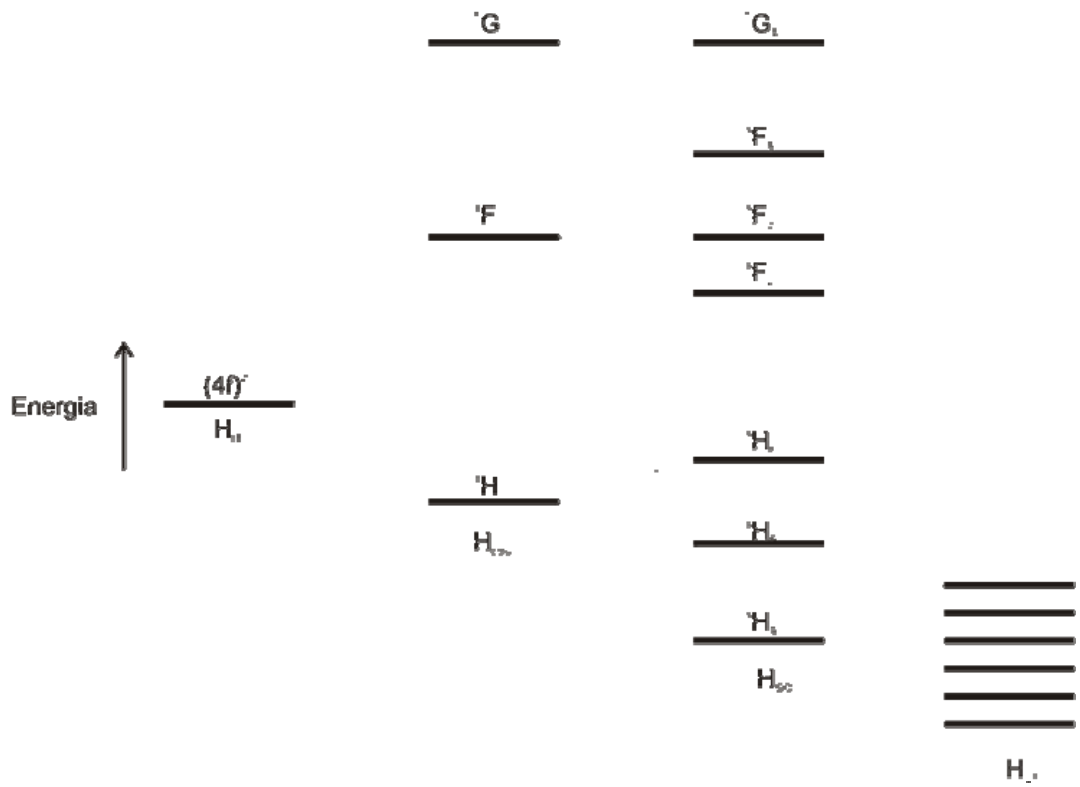


Figura 3.1 Desdoblamiento de los niveles de energía

3.1 Neodimio

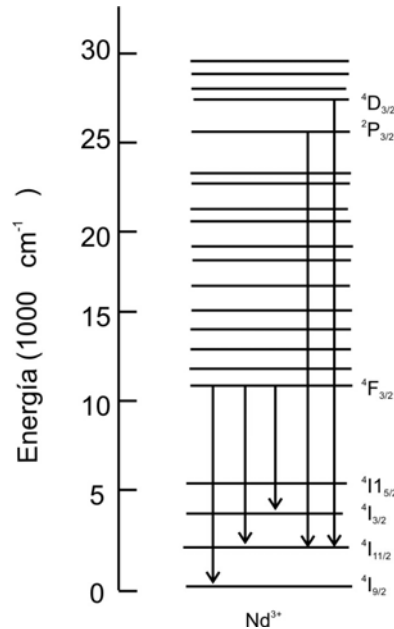


Figura 3.2 Niveles de energía del Neodimio en el rango entre 0-30000 cm⁻¹

El ion de neodimio es una de las tierras raras más reactiva. Posee un brillo metálico-plateado y brillante. Oscurece rápidamente al contacto con el aire formando un óxido. Pertenece a la familia de los elementos de transición interna, y contiene en su forma estable 60 electrones. Su configuración electrónica es de la forma [Xe]4f⁴6s². En el rango entre 0-30000 cm⁻¹ pueden ser identificadas generalmente alrededor de 15 bandas en el espectro de absorción. Por su intensidad característica pueden ser observadas para concentraciones del orden de 1.0 o 2.0 % molar a temperatura ambiente [34]. Para porcentajes mayores, normalmente aparecen efectos de auto extinción en la radiación emitida [35]. A partir del esquema de niveles energéticos, el estado ⁴F_{3/2} tiene características importantes, tales como, un tiempo de vida largo, y la pequeña brecha de energía que media, entre este nivel y los niveles superiores inmediatos. (Ver gráfica 3.2). Así que; la excitación de electrones a estos estados, permite que por medio de relajación no radiactiva, el estado ⁴F_{3/2} pueda adquirir una alta población de

electrones. Este hecho permite, que la relajación desde ese estado a los estados $^4I_{13/2}$, $^4I_{11/2}$ y $^4I_{9/2}$, genere transiciones láser de gran intensidad.

Dentro de estas transiciones, la $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ centrada en $1.06 \mu\text{m}$ ha generado gran interés, debido a su alta intensidad y eficiencia cuántica [38-43]. Su aplicación más común ha sido en dispositivos láser de cuatro niveles, utilizando matrices cristalinas como: YAG y YLF [48]; y vítreas, como en los fosfatos: LHG-5, LHG8 y LG-760, y silicatos: GLS-1, LG-680 y AO-702 [15]. Sin embargo, existen otras transiciones como: $^4D_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ y la $^2P_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$, con potenciales usos en amplificadores de fibra óptica [15].

3.2 Erbio

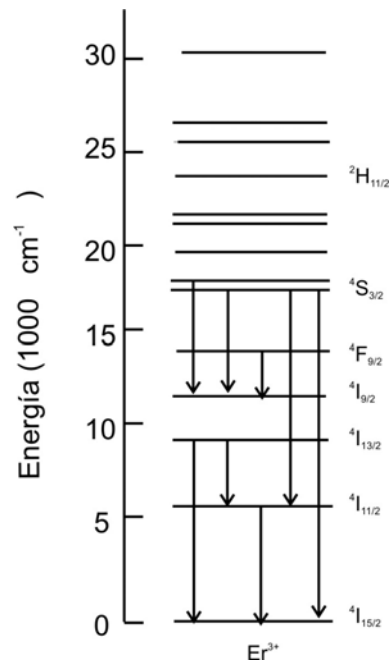


Figura 3.3 Niveles de energía del Erblio en el rango entre 0-30000 cm⁻¹

El erbio es un elemento trivalente, maleable, relativamente estable en el aire y no se oxida tan rápidamente como otros metales de las tierras raras. Sus sales son rosadas y su espectro de absorción característico se encuentra concentrado en la región visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Su configuración electrónica es $[\text{Xe}]6s^24f^{12}$. En el rango entre $0\text{-}30000\text{ cm}^{-1}$, pueden ser identificadas generalmente alrededor de 12 bandas [41]. Al igual que el neodimio, el Er^{3+} exhibe excelentes propiedades ópticas para bajas concentraciones; es decir, de 1.0 o 2.0% molar [41,42]. Sus propiedades luminiscentes, cuando la concentración es del orden del 10%, presenta efectos de auto extinción [43]. En este mismo sentido, en relación con sus propiedades físicas, se puede observar disminución en el rango de estabilidad con el aumento de la concentración [44].

A partir del esquema de los niveles electrónicos, el estado $^4I_{13/2}$, ha sido reportado como un estado metaestable muy importante [41]. La transición $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, ha sido identificada como una transición láser, centrada en alrededor de $1.5\text{ }\mu\text{m}$; con potenciales usos en amplificadores ópticos [45-48]. En la misma dirección, con el fin de mejorar la amplificación, se ha recurrido al codopaje con Yb^{3+} para proyectar un dispositivo láser de tres niveles [49-53].

Además, dentro de las múltiples posibilidades de transiciones para aplicaciones en dispositivos láser, también de tres niveles, surge la transición $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ centrado en alrededor de $0.55\text{ }\mu\text{m}$, correspondiente a una emisión verde. Adicionalmente, algunos estudios han mostrado el potencial uso de este ión, tanto de ésta última transición como la $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ para usos en sensores ópticos de temperatura [54, 55].

4. Teoría de Judd y Ofelt (J-O)

Hacia el año de 1937, con un artículo publicado por Van Vleck [56], se inició la discusión sobre el origen de las intensidades observadas en los espectros de los iones lantánidos. En la época, no era claro, si las transiciones responsables de estas, ocurrían dentro de la configuración $4f^N$, o entre ésta y las configuraciones superiores como la $5d$. Finalmente, después de amplias discusiones, se concluyó que debido a las bajas intensidades y el rango en el cual eran observadas (visible e infrarrojo), su origen debía ser intra-configuracionales $f-f$, mediante mecanismos de dipolo eléctrico [1]. Sin embargo, transiciones dentro de una misma configuración son prohibidas, y no existía en ese momento una teoría que explicara este comportamiento.

La configuración $4f^N$, se extiende desde la región infrarroja, hasta regiones de alta energía, solapándose con la siguiente configuración excitada $5d$ [57], ver figura 4.1. En este sentido, la idea básica de la teoría de Judd e independientemente Ofelt [2,3], fue la de suponer, que el potencial del campo cristalino, considerado como una perturbación de primer orden, permite mezclar las configuraciones de paridad opuesta, en las regiones de más baja energía. De ésta manera, se podrían inducir las transiciones electrónicas, hasta configuraciones de paridad opuesta. Es decir, los iones excitados a niveles superiores dentro de la configuración $4f^N$, son tratados en la teoría, como si alcanzaran la configuración $5d$. Así, las diferencias en energía, entre el estado base y el estado excitado dentro de la configuración $4f^N$, podía ser aproximado a la diferencia entre el estado base de la configuración $4f^N$ y el estado excitado $5d$ [1].

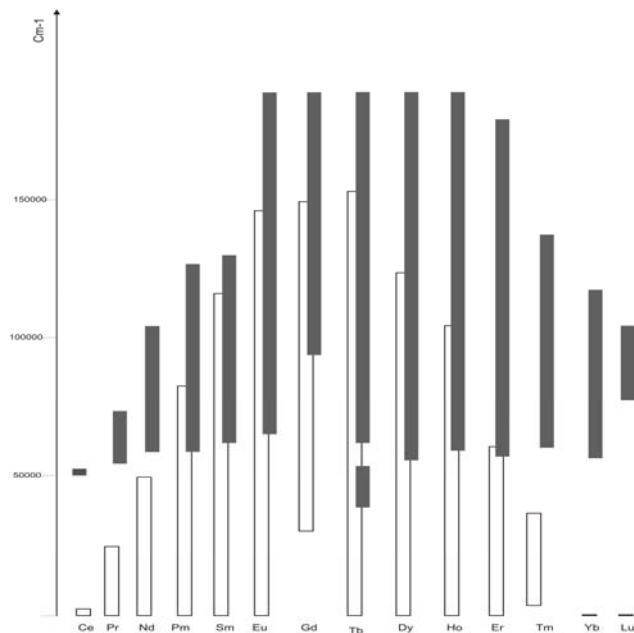


Figura 4.1 Extensión de las configuraciones $4f^N$ (blanco) y $5d$ (negro)

De otro lado, los espectros de absorción, analizados a la luz de ésta teoría, son generalmente obtenidos a temperatura ambiente; por lo que se asume que, todos los niveles del estado base (niveles Stark) están igualmente poblados. Así, la diferencia de energía entre estos niveles, que es sólo del orden de 10^2 cm^{-1} , permitió asumir que los iones excitados desde el estado base, tenían la misma energía.

El modelo contempla la necesidad de calcular una serie de integrales radiales entre configuraciones, las cuales, debido a su complejidad, fueron introducidas dentro de unos parámetros fenomenológicos de intensidad Ω_λ . Estos parámetros están relacionados con la fuerza de oscilador experimental f_{exp} , la cual, es una información, que junto con los elementos de matriz reportados por Carnall [58], sirven de conexión con el modelo teórico, usando el método de mínimos cuadrados. Asimismo, la dependencia de: los parámetros de intensidad, las integrales radiales, la energía de separación entre las configuraciones, y los

términos impares de la expansión del campo cristalino [1], revelan los cambios que el ambiente químico ejerce directamente sobre ellos.

Las fuerzas de oscilador experimental f_{exp} , son determinadas a partir de los espectros de absorción, a través de la relación:

$$f_{exp} = \frac{4.32 \times 10^{-9}}{Cl\lambda^2} \int \varepsilon(\nu) d\nu \quad (2)$$

Donde C es la concentración, λ es la longitud de onda de la transición (baricentro), l es el camino óptico y, $\int \varepsilon(\nu) d\nu$, es el área bajo la curva de cada banda de absorción.

De otro lado, a partir de los parámetros Ω_λ , pueden ser calculadas las fuerzas de oscilador teóricas, f_{cal} , y las intensidades de las bandas de absorción S_{ed} , las cuales explican adecuadamente las transiciones observadas. Sus relaciones matemáticas son expresadas por:

$$f_{cal} = \frac{8\pi^2 m c \nu (n^2 + 2)^2}{27 h n (2J + 1)} \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda \left| \langle (S, L) J \| U^\lambda \| (S', L') J' \rangle \right|^2 \quad (3)$$

$$S_{ed} = e^2 \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda \left| \langle (S, L) J \| U^\lambda \| (S', L') J' \rangle \right|^2 \quad (4)$$

Donde m es la masa del electrón, h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz, $\chi_{ED} = n(n^2 + 2)^2 / 9$ es la corrección de Lorentz al campo local, $2J + 1$ es la degeneración del estado base, S es momento angular total de espín electrónico, L es el momento angular orbital total electrónico, J es el momento angular total

electrónico ($J=S+L$), $\langle\langle U^\lambda \rangle\rangle$ son los correspondientes elementos de matriz doblemente reducida; y e es la carga del electrón.

A partir de los parámetros Ω_λ , obtenidos con el modelo de J-O, se pueden obtener otros parámetros espectroscópicos muy importantes, como las probabilidades de transición espontánea entre multipletes $A_{JJ'}$; tiempos de vida radiativos $\tau_{JJ'}$; y canales de relajación $\beta_{JJ'}$, que permiten evaluar los potenciales usos de los iones tierras raras como medios activos. Las relaciones matemáticas son descritas mediante las siguientes expresiones:

$$A_{JJ'}[(S, L)J(S', L')J'] = \frac{64\pi^2}{3h(2J+1)\lambda^3} \left[\frac{n(n^2+2)^2}{9} S_{ed} \right] \quad (5)$$

$$\tau_{JJ'} = \left(1 / \sum A_{JJ'} \right) \quad (6)$$

$$B_{JJ'} = A_{JJ'} \tau_{JJ'} \quad (7)$$

5. Desarrollo Experimental

Para el presente trabajo fueron fabricados 5 vidrios fluoroindatos dopados con Nd^{3+} , sustituyendo sistemáticamente el fluoruro de bario, BaF_2 , por pentóxido de fósforo, P_2O_5 . Las composiciones se encuentran descritas en las tablas 5.1. Asimismo, fueron fabricados 5 vidrios fluoroindatos dopados con Er^{3+} y modificados de la misma manera que los vidrios dopados con Nd^{3+} . Las composiciones son reportadas en la tabla 5.2. Para la preparación de las muestras fueron usados reactivos de alta pureza, reportados en la tabla 5.3. Por la alta higroscopía de algunos de los reactivos utilizados, la preparación se realizó utilizando cámaras secas; y para evitar la contaminación con micropartículas, se utilizaron crisoles de platino.

Tabla 5.1. Composiciones de los 5 vidrios dopados con Nd^{3+} ordenados de acuerdo con el porcentaje molar de P_2O_5 en el material.

% de Pentóxido de fósforo en el vidrio	Composición
0% P_2O_5	35In F ₃ – 20Zn F ₂ - 16 BaF ₂ - 20SrF ₂ - 6GaF ₃ - 2NaF - 1Nd ₂ O ₃
4% P_2O_5	35In F ₃ - 20Zn F ₂ - 12 BaF ₂ - 4P ₂ O ₅ - 20SrF ₂ - 6GaF ₃ - 2NaF - 1Nd ₂ O ₃
8% P_2O_5	35In F ₃ - 20Zn F ₂ - 8 BaF ₂ - 8P ₂ O ₅ - 20SrF ₂ - 6GaF ₃ - 2NaF - 1Nd ₂ O ₃
12% P_2O_5	35In F ₃ - 20Zn F ₂ - 4 BaF ₂ - 12P ₂ O ₅ - 20SrF ₂ - 6GaF ₃ - 2NaF - 1Nd ₂ O ₃
16% P_2O_5	35In F ₃ - 20Zn F ₂ - 16P ₂ O ₅ - 20SrF ₂ - 6GaF ₃ - 2NaF - 1Nd ₂ O ₃

Tabla 5.2. Composiciones de los vidrios dopados con Er^{3+} ordenados de acuerdo con el porcentaje molar de P_2O_5 en el material.

% de Pentóxido de fósforo en el vidrios	Composición
0% P_2O_5	35In F ₃ - 20Zn F ₂ - 16 BaF ₂ - 20SrF ₂ - 6GaF ₃ - 2NaF - 1ErF ₂
4% P_2O_5	35In F ₃ - 20Zn F ₂ - 12 BaF ₂ - 4P ₂ O ₅ - 20SrF ₂ - 6GaF ₃ - 2NaF - 1ErF ₂
8% P_2O_5	35In F ₃ - 20Zn F ₂ - 8 BaF ₂ - 8P ₂ O ₅ - 20SrF ₂ - 6GaF ₃ - 2NaF - 1ErF ₂
12% P_2O_5	35In F ₃ - 20Zn F ₂ - 4 BaF ₂ - 12P ₂ O ₅ - 20SrF ₂ - 6GaF ₃ - 2NaF - 1ErF ₂
16% P_2O_5	35In F ₃ - 20Zn F ₂ - 16P ₂ O ₅ - 20SrF ₂ - 6GaF ₃ - 2NaF - 1ErF ₂

Tabla 5.3 Reactivos utilizados para la fabricación de los vidrios

Reactivos	Grado de Pureza	Fabricante
In ₂ O ₃	9.999%	Aldrich
Zn F ₂	9.99%	Aldrich
BaF ₂	9.999%	Aldrich
SrF ₂	9.998%	Aldrich
P ₂ O ₅	9.99%	Aldrich
GaF ₃	99.99%	Aldrich
NaF	99.9%	Merck
NdF ₃	99.99%	Aldrich
ErF ₂	9.99%	Aldrich
NH ₄ FHF	97.3%	J. T. Baker

5.1 Fabricación de los vidrios Oxi-Fluoruros

El proceso de fabricación de los vidrios utilizados en este trabajo, fue realizado siguiendo el proceso que se describirá a continuación: primero, fueron pesados los diferentes reactivos utilizando una balanza digital Mettler Toledo AB204. Los compuestos óxidos, excepto el P₂O₅, fueron sometidos al proceso de fluoración, antes de la fusión. Es decir, fueron mezclados con Bifluoruro de amonio (NH₄FHF) en una proporción 1:2, el cual genera una atmósfera enriquecida en flúor. La reacción se llevó a cabo en un horno ubicado en el interior de una cámara extractora C 120 X STANDARD, para evitar el contacto con las emanaciones producto de la reacción a temperaturas entre 250° C y 450° C.

Seguidamente, todos los reactivos fueron mezclados, homogeneizados e introducidos en un crisol de platino totalmente seco y limpio, el cual fue llevado a un horno de fusión ubicado en el interior de una cámara seca en condiciones de vacío, y posteriormente con atmósfera de argón. El crisol permaneció durante 1

hora en cada una de las siguientes temperaturas: 650°C, 750°C y 850°C, para un total de 3 horas en el proceso de fusión de los reactivos. Finalmente, el material fundido fue vertido en un molde precalentado a 290° C, e introducido en una mufla para el proceso de recocido y enfriado lento a una tasa de 5°C/min durante varias horas. Para eliminar las imperfecciones de transparencia de las muestras obtenidas, fueron sometidas a un proceso de pulido utilizando una pulidora Metaserv 2000.

5.2. Medidas de los índices de refracción

Las medidas de los índices de refracción de los diversos vidrios fueron realizadas en un refractómetro Abbe 3L. Los resultados son incluidos en la tabla 5.4. De estos cálculos, se observa un incremento en el índice de refracción n , proporcional al aumento en el porcentaje de P_2O_5 en las muestras dopadas con Neodimio. El mismo comportamiento es observado, en los vidrios dopados con erbio. Así que, para una eventual aplicación tipo láser, las matrices incrementan el índice de refracción con la adición del pentóxido de fósforo, y los vidrios con las concentraciones molares de 4%, 8%, 12% y 16%, que presentan índices de refracción mayor a 1.5, son promisorios para ser utilizados como matrices para medios activos en dispositivos láser.

5.3 Medidas de densidad

Las medidas de densidad de las diferentes muestras fueron realizadas utilizando la balanza digital Mettler Toledo modelo AB204, aplicando el principio de Arquímedes, y utilizando agua destilada como referencia. Los valores se encuentran registrados en la tabla 5.4. Las densidades encontradas disminuyeron a medida que fue aumentado el porcentaje de P_2O_5 en la composición, tanto para los vidrios dopados con 1% molar de Nd^{3+} como para los dopados con 1% molar de Er^{3+} . Este comportamiento es normal, debido a que el peso molecular del

pentóxido de fósforo, de 141.94 gr, es menor que el fluoruro de bario de 175.36 gr., por el cual es reemplazado.

Tabla 5.4 Descripción de los valores de densidad (ρ) en g/cm^3 , camino óptico (l) en cm y concentración de los iones neodimio y erbio (C) en mol/litro, ordenados de acuerdo al porcentaje molar de P_2O_5 presente en la composición de los vidrios.

Dopaje	% P_2O_5	n	ρ	L	C
Neodimio	0% P_2O_5	$1,492 \pm 0.02$	$5,02 \pm 0.03$	$0,16 \pm 0.03$	0,589
	4% P_2O_5	$1,501 \pm 0.03$	$4,89 \pm 0.01$	$0,31 \pm 0.05$	0,585
	8% P_2O_5	$1,521 \pm 0.05$	$4,86 \pm 0.01$	$0,25 \pm 0.03$	0,594
	12% P_2O_5	$1,559 \pm 0.01$	$4,77 \pm 0.01$	$0,24 \pm 0.05$	0,596
	16% P_2O_5	$1,565 \pm 0.03$	$4,76 \pm 0.01$	$0,30 \pm 0.02$	0,607
Erbio	0% P_2O_5	$1,493 \pm 0.02$	$4,98 \pm 0.01$	$0,24 \pm 0.05$	0,649
	4% P_2O_5	$1,504 \pm 0.01$	$4,90 \pm 0.02$	$0,13 \pm 0.01$	0,652
	8% P_2O_5	$1,526 \pm 0.03$	$4,82 \pm 0.02$	$0,14 \pm 0.01$	0,654
	12% P_2O_5	$1,560 \pm 0.04$	$4,79 \pm 0.01$	$0,22 \pm 0.00$	0,664
	16% P_2O_5	$1,570 \pm 0.01$	$4,67 \pm 0.04$	$0,22 \pm 0.03$	0,662

5.4 Medidas de DSC

Las medidas de DSC (Differential Scanning Calorimetry), fueron realizadas en los vidrios dopados con Nd^{3+} , entre 30 y 540 °C, utilizando el calorímetro DSC Q10 V8.1 Build 261, de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander. Los termogramas correspondientes son mostrados en las figuras 5 (a, b, c, d y e). En razón a que las composiciones de las dos series de vidrios, sólo se diferenciaron en el ión lantánido, se utilizó solamente la serie dopada con Nd^{3+} . Los valores de las temperaturas de vitrificación, T_g , y de inicio de la cristalización, T_x , son reportados en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Valores de las temperaturas características, T_g (Transición Vítrea), T_x (Cristalización) y ΔT ($T_x - T_g$) en $^{\circ}\text{C}$

Temperaturas Características			
Muestra	T_g	T_x	ΔT
0% P_2O_5	298.77	408.08	109.31
4% P_2O_5	316.77	467.99	151.22
8% P_2O_5	329.15	502.64	173.49
12% P_2O_5	363.36	471.85	108.49
16% P_2O_5	360.19	524.50	164.31

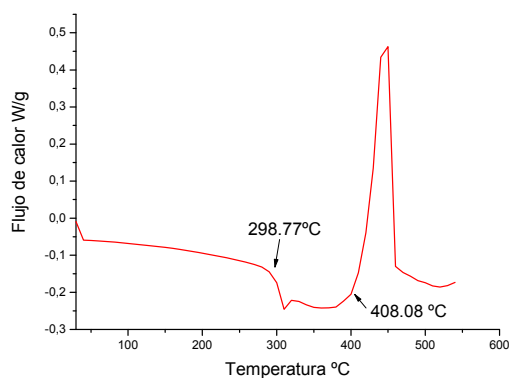


Figura 5 (a) Medida de DSC del vidrio con 0% molar de P_2O_5

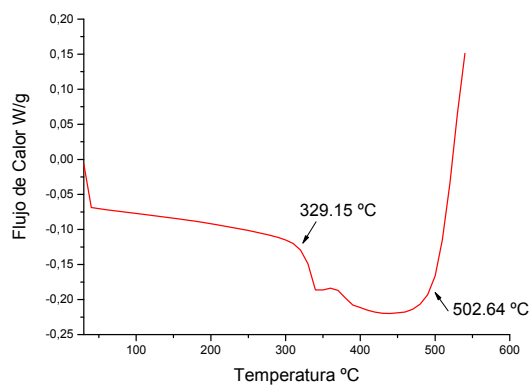


Figura 5 (c) Medida de DSC del vidrio con 8% molar de P_2O_5

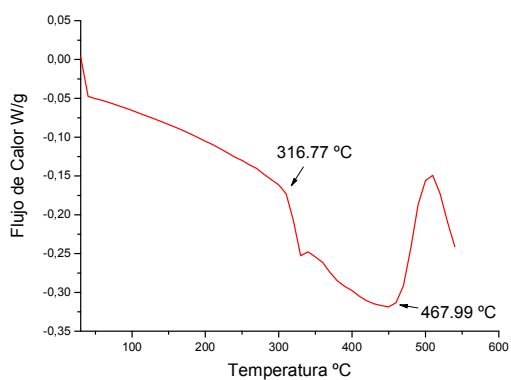


Figura 5 (b) Medida de DSC del vidrio con 4% molar de P_2O_5

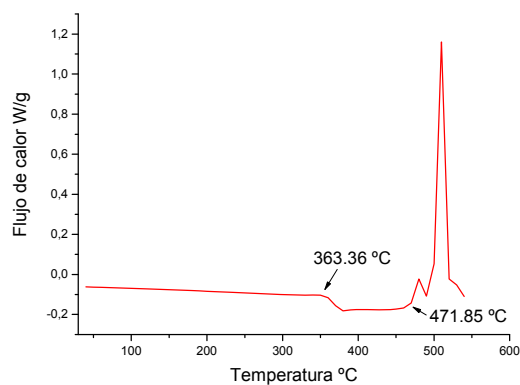


Figura 5 (d) Medida de DSC del vidrio con 12% molar de P_2O_5

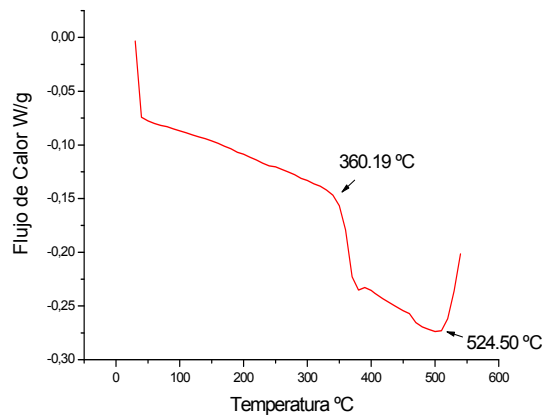


Figura 5 (e) Medida de DSC del Vidrio con 16% molar de P_2O_5

La estabilidad térmica de un vidrio se mide por la diferencia ΔT entre, su temperatura de cristalización T_x y vitrificación T_g , las cuales son medidas a través del método de las tangentes. Al comparar los valores obtenidos en las muestras medidas, el vidrio sin fósforo y la muestra con 12% molar de P_2O_5 , son térmicamente menos estables, respecto de las demás, con ΔT de 109.31°C y 108.49°C respectivamente. Además, la muestra con 12% de P_2O_5 presenta varios picos de cristalización en 468.68°C, 507.79°C y 532.03°C. Contrario a lo anterior, los vidrios con 4%, 8% y 16% molar de P_2O_5 , exhiben una muy alta resistencia contra la cristalización, con valores de ΔT de 151.22°C, 173.49°C y 164.31°C. De otro lado, los valores de las temperaturas de vitrificación aumentan, a medida que aumenta el porcentaje del pentóxido de fósforo en la muestra. Análogamente, las temperaturas de cristalización también crecen. En estos términos, los vidrios con 4%, 8% y 16% de P_2O_5 , son los que presentan las mejores características para ser utilizados como matrices láser.

5.5 Espectros de Absorción

Los espectros de absorción fueron medidas a temperatura ambiente, en un espectrofotómetro V 7200 de Jasco, en el Laboratorio de Materiales Fotónicos de

la universidad Industrial de Santander. Las bandas fueron normalizadas, por el camino óptica de cada muestra.

5.5.1 Espectros de absorción del Nd^{3+}

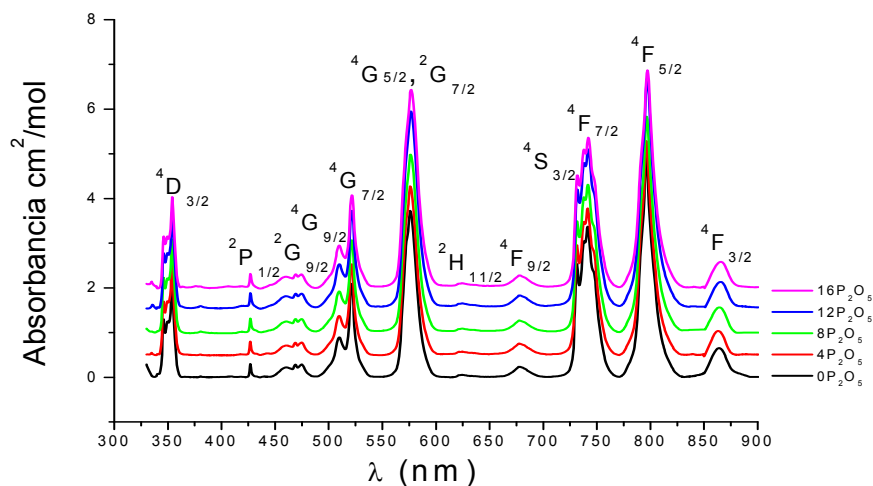


Figura 5.6 (a) Medidas de espectros de absorción a temperatura ambiente de las 5 muestras dopadas con 1% molar de Nd^{3+} en el rango espectral entre 300 y 700 nm

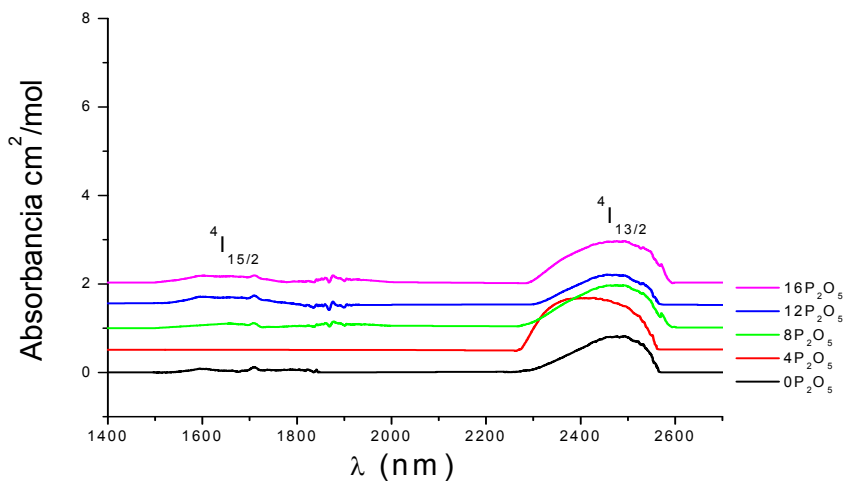


Figura 5.6 (b) Medidas de espectros de absorción a temperatura ambiente de las 5 muestras dopadas con 1% molar de Nd^{3+} en el rango espectral entre 1400 y 2800 nm

Las figuras 5.6 (a) y 5.6 (b) muestran los espectros de absorción del neodimio donde se han identificado de 12 bandas, en el rango espectral desde 300 hasta 2800 nm, que comprende la región visible e infrarroja cercana. Las transiciones ocurren desde el estado base $^4I_{9/2}$. El efecto del campo cristalino sobre los iones de Nd^{3+} , y la variación de sitio entre iones, genera pequeñas inhomogeneidades en la mayoría de las bandas. Sin embargo, la banda correspondiente a la transición $^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ centrada en 2493 nm, presenta un gran ensanchamiento. Las bandas $^4F_{7/2}$ y $^4S_{3/2}$, al encontrarse bastante solapadas, fueron tomadas como una sola, en el análisis cuantitativo. La transición $^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ centrada en 1700 nm, por su baja intensidad, no fue tomada en cuenta, para la realización de los diferentes cálculos.

La banda $^4I_{9/2} \rightarrow ^4G_{5/2}$ centrada en 576 nm, por su gran intensidad, es conocida como hipersensitiva, que se asocia al mecanismo cuadripolar eléctrico, y cumple con sus reglas de selección $|\Delta S|=0$ y $|\Delta L|, |\Delta J| \leq 2$ [1]. De otro lado, el efecto del P_2O_5 sobre las distintas bandas en los diferentes espectros, no es apreciable cualitativamente.

5.5.2 Espectros de absorción del Er³⁺

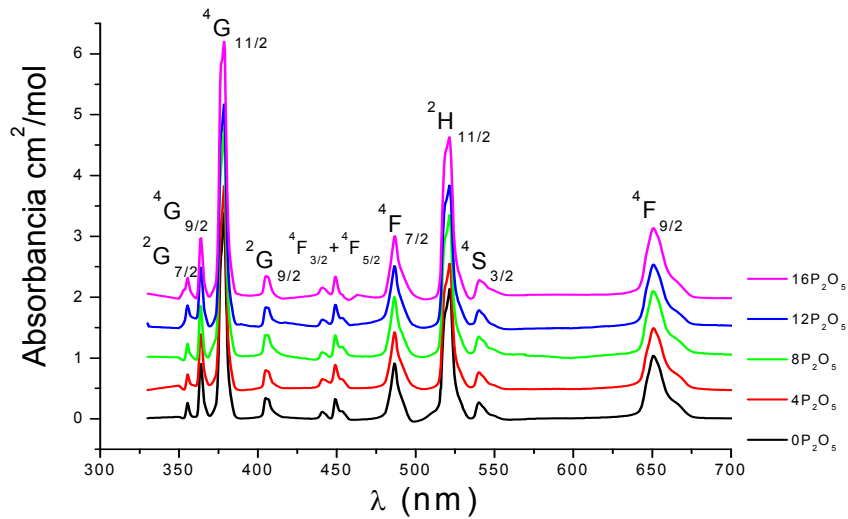


Figura 5.7 (a) Espectro de absorción a temperatura ambiente de las 5 muestras dopadas con 1% molar de Er³⁺ en el rango espectral de 300 a 700 nm

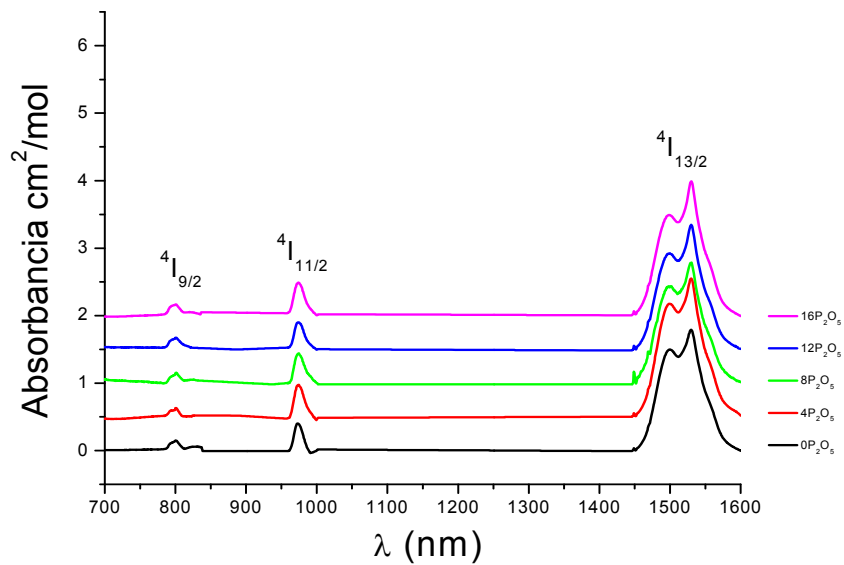


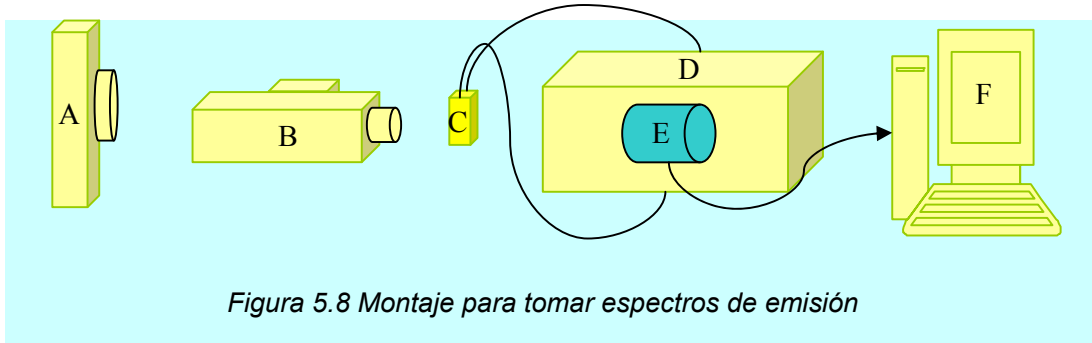
Figura 5.7 (b) Espectro de absorción a temperatura ambiente de las 5 muestras dopadas con 1% molar de Er³⁺ en el rango espectral de 700 a 1600 nm

Las figuras 5.7 (a) y (b), muestran los espectros de absorción a temperatura ambiente del Er³⁺, en ellos pueden ser identificados 12 bandas, en el rango

espectral de 300 a 1600 nm a temperatura ambiente. Las transiciones ocurren desde el estado base $^4I_{15/2}$. La transición más intensa $^4I_{15/2} \rightarrow ^4G_{11/2}$, centrada en 378 nm, debido a su gran intensidad, es conocida como hipersensitiva, por que no cumple las reglas de selección de las transiciones dipolares eléctricas, pero si las cuadrupolares eléctricas. El pequeño efecto del campo cristalino sobre el ion, se ve puede asociar con la homogeneidad en la forma de la mayoría de las bandas independiente del ambiente químico, a pesar que éste, es modificado por el aumento en el porcentaje del P_2O_5 .

5.6 Espectros de Luminiscencia

Los espectros de luminiscencia fueron realizados en el Laboratorio de Espectroscopia Atómica y Molecular de la UIS. El montaje experimental se encuentra esquematizado en la figura 5.8, donde cada parte del montaje se representa por una letra. De esta manera, fue utilizado como fuente de bombeo, una lámpara de Mercurio de 200 W (A); la cual, mediante un monocromador JOBIN YVON d'ISTRUMENTS SA (B), fueron escogidas las longitudes de onda específicas de excitación. En el portamuestra (C) fueron colocados los vidrios uno a uno. La señal emitida fue captada y transportada por dos fibras ópticas hasta un espectrómetro SP ($\frac{1}{2}$ metro de distancia focal y blaze de 600 nm) de SPECTRAL PRODUCTS (D). Finalmente, las emisiones fueron amplificadas por un fotomultiplicador HAMAMATSU H5783 (E) y enviadas a un sistema de adquisición de datos con velocidad de barrido de 100 nm/minuto (F).



5.6.1 Espectros de Luminiscencia del Er^{3+}

Los espectros de luminiscencia del ion erbio en los diferentes vidrios fueron registrados en el rango espectral de 350 a 850 nm. Los espectros correspondientes son mostrados en las figuras 5.9 a 5.15 Los vidrios fueron excitados con las longitudes de onda 355, 364, 379, 405, 449, 486 y 522 nm.

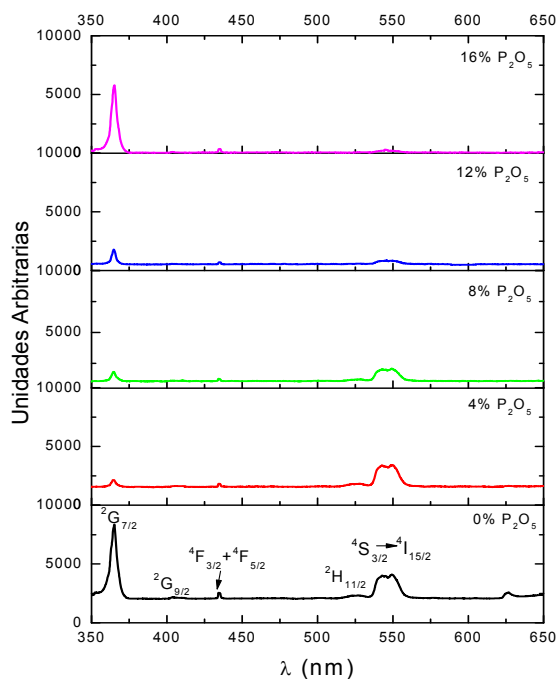


Figura 5.9 Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 355 \text{ nm}$, y registrado en el rango espectral de 350-650 nm para los 5 vidrios.

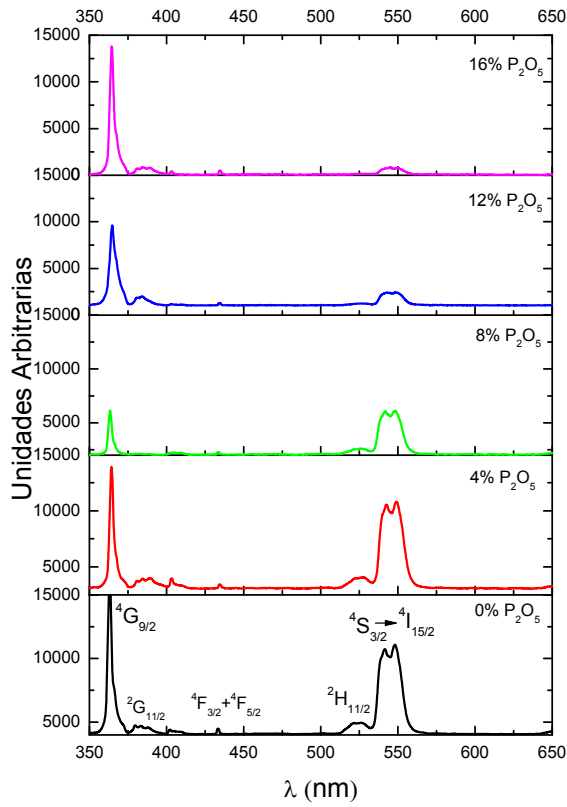
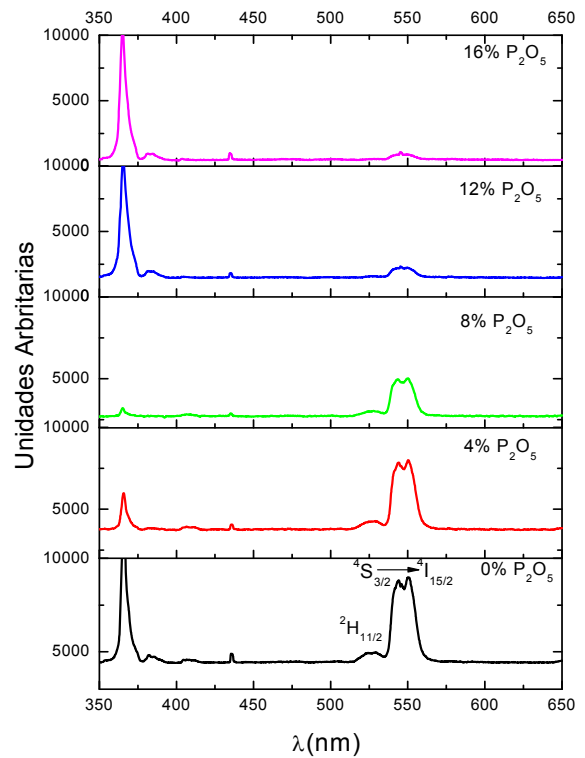


Figura 5.10. Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 364 \text{ nm}$, y registrado en el rango espectral de 350-650 nm para los 5 vidrios.

Figura 5.11. Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 379 \text{ nm}$, y registrados en el rango espectral de 350-650 nm para los 5 vidrios.



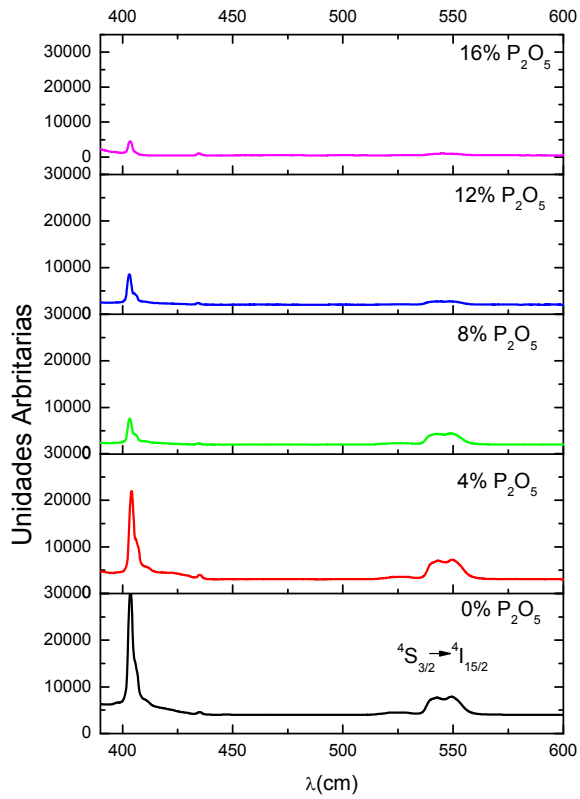
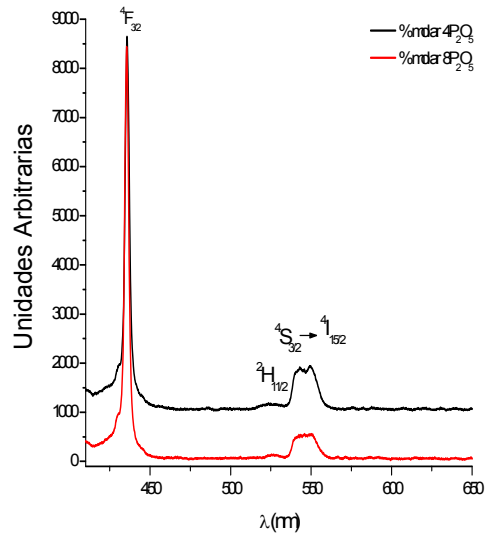
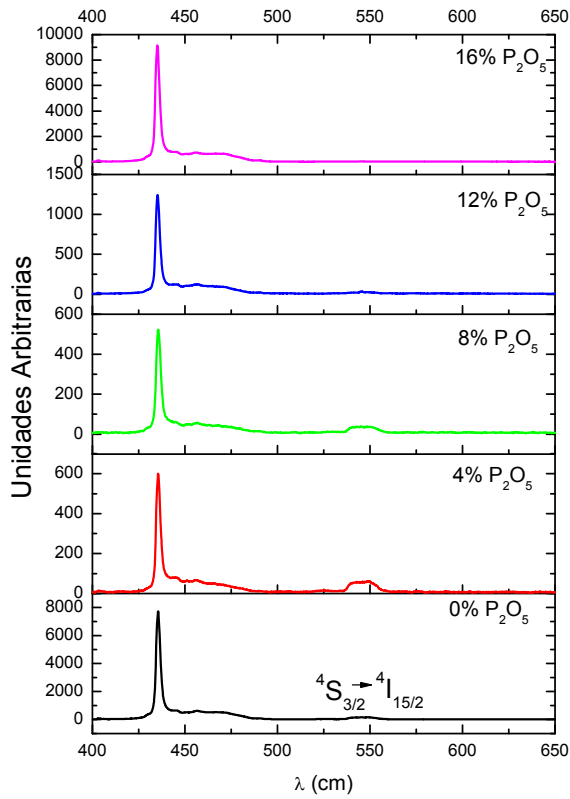


Figura 5.12. Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 405 \text{ nm}$, y registrado en el rango espectral de 350-650 nm para los 5 vidrios.

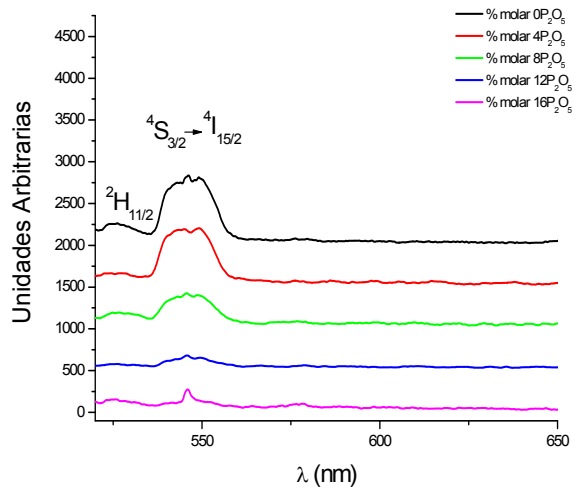
Figura 5.13. Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 449 \text{ nm}$, y registrado en el rango espectral de 350-650 nm para los vidrios con 0 y 4% de P_2O_5 .





5.14. Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 486$ nm, y registrado en el rango espectral de 350-650 nm para los 5 vidrios.

Figura 5.15. Espectro de luminiscencia a temperatura ambiente del Er^{3+} excitado con $\lambda = 522$ nm, y registrado en el rango espectral de 350-650 nm para los 5 vidrios.



La primera banda que se observa en cada figura de izquierda a derecha corresponde a la luz de excitación. Asimismo, puede ser observado que los electrones excitados a frecuencias mayores que el nivel $^4S_{3/2}$, muy posiblemente relajan mediante procesos no radiativos hasta éste, produciéndose la emisión alrededor de 540 nm (color verde). Así, probablemente la cercanía entre niveles energéticos y las vibraciones de la red, generan este comportamiento. Igualmente, el efecto de la adición de pentóxido de fósforo incrementa la intensidad de la emisión en el vidrio con 4% molar P_2O_5 en relación al vidrio sin P_2O_5 , y disminuye los restantes.

6. Cálculos y resultados

6.1 Neodimio

6.1.1 Fuerzas de oscilador experimentales del ion Nd^{3+}

Las fuerzas de oscilador experimentales fueron calculadas a partir de las áreas bajo las bandas de absorción, y el valor del baricentro de cada una de ellas, mediante la ecuación 2 descrita en el capítulo 4:

$$f_{\text{exp}} = \frac{4.32 \times 10^{-9}}{Cl\lambda^2} \int \varepsilon(\nu) d\nu$$

Los valores se encuentran registrados en la tabla 6.2. Esta cantidad puede ser interpretada como una medida de la intensidad de las transiciones electromagnéticas [1]. En este sentido, las bandas ${}^4\text{G}_{5/2}$, ${}^4\text{D}_{3/2}$, ${}^4\text{F}_{7/2}$, ${}^4\text{F}_{5/2}$ que presentan los valores más elevados de fuerza de oscilador, son a su vez las más intensas, como puede ser observado en las figuras 5.6 (a) y (b) Asimismo, entre las diversas bandas registradas, la más intensa es la ${}^4\text{I}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{G}_{5/2} ({}^2\text{G}_{7/2})$, conocida como transición hipersensitiva.

De otro lado, el efecto del P_2O_5 sobre las fuerzas de oscilador en los diferentes vidrios, muestra que, todas las bandas a excepción de la ${}^4\text{I}_{13/2}$ son más intensas en la muestra con 12% molar de P_2O_5 ; mientras que, los vidrios con 4 y 8% molar de P_2O_5 , la intensidad es muy similar a la del vidrio de partida.

6.1.2 Parámetros de Intensidad Ω_λ del ion Nd^{3+}

Los parámetros fenomenológicos de intensidad Ω_λ , ($\lambda = 2,4,6$), correspondiente a cada uno de los vidrios, fueron determinados, relacionando las fuerzas de oscilador experimental, f_{exp} , con la fuerza de oscilador teórica (ecuación 3 de la sección 4), haciendo uso del método de ajuste de mínimos cuadrados. Para este propósito, fueron utilizados los valores de los elementos de matriz reportados por Carnal [58] (Ver tabla 6.1) asociados con cada una de las transiciones. Los resultados se encuentran reportados en la tabla 6.2.

Los valores de los parámetros de intensidad Ω_λ con $\lambda = 2,4$ y 6, y en especial el parámetro Ω_2 , se ha encontrado que es muy sensible al medio [59]. Los valores de $\Omega_2 < 2 \times 10^{-20}$ están asociados con el carácter covalente de los enlaces [59]. El efecto del P_2O_5 , es el aumento del valor del Ω_2 . Esto puede ser interpretado como el aumento en la inhomogeneidad del ambiente químico que rodea al ion lantánido. Probablemente este comportamiento es atribuido a la estructura tetraédrica del pentóxido de fósforo, la cual presenta un alto grado de asimetría en sus cadenas, por efecto de la diferente orientación del doble enlace que intercambia el fósforo con uno de sus cuatro oxígenos [60]. De esta manera, el incremento del P_2O_5 incrementa los desórdenes estructurales, observándose el mayor efecto para la muestra con 16% de fósforo.

6.1.3 Fuerzas de oscilador teóricas del ion Nd^{3+}

Las fuerzas de oscilador teóricas fueron determinadas utilizando la ecuación 3 descrita en el capítulo 4. Los resultados se encuentran registrados en la tabla 6.2, así como los valores del r.m.s., que mide la calidad del ajuste. De esta manera, es posible apreciar que la diferencia entre los valores experimentales y los calculados, son pequeños; aunque en algunas transiciones, como ${}^4F_{3/2}$ y ${}^4F_{5/2}$

presentan algunas discrepancias. El comportamiento de las transiciones electrónicas, respecto del contenido de P₂O₅ en los diferentes vidrios, es similar al descrito para las fuerzas de oscilador experimental.

Tabla 6.1 Elementos de Matriz U_{λ} , $\lambda = 2,4,6$ del ion Nd³⁺ [58]

$S'L'J'$	Energía cm^{-1}	Elementos de Matriz Nd ³⁺		
		U_2^2	U_4^2	U_6^2
⁴ D _{3/2} , ⁴ D _{5/2} , ² L _{11/2} , ⁴ D _{1/2}	28248	0	0.1954	0.0168
² P _{1/2} , ² D _{5/2}	23419	0	0.0381	0
² G _{9/2} , ⁴ G _{11/2} , ² D _{3/2} , ² K _{15/2}	21053	0.001	0.0144	0.0136
⁴ G _{7/2} , ⁴ G _{9/2} , ² K _{13/2}	19175	0.0551	0.1569	0.0547
⁴ G _{5/2} , ² G _{7/2}	17361	0.8968	0.4091	0.0355
² H _{11/2}	16013	0.0001	0.0026	0.0104
⁴ F _{9/2}	14760	0.001	0.0096	0.0381
⁴ F _{7/2} , ⁴ S _{3/2}	13486	0.001	0.042	0.4249
⁴ F _{5/2} , ² H _{9/2}	12563	0.0009	0.2361	0.3973
⁴ F _{3/2}	11574	0	0.2299	0.0547
⁴ I _{13/2}	4010	0.0001	0.0136	0.4557

Tabla 6.2 Valores de las fuerzas de oscilador experimentales f_{exp} ($\times 10^{-6}$), calculadas f_{cal} ($\times 10^{-6}$), el rms ($\times 10^{-6}$) y Ω_{λ} ($\times 10^{-20}$) del ion Nd^{3+} descritas para cada vidrio de acuerdo con su porcentaje de P_2O_5

Vidrios dopados con Neodimio																
$S'LJ'$	Energía cm^{-1}	0% P_2O_5			4% P_2O_5			8% P_2O_5			12% P_2O_5			16% P_2O_5		
		f_{exp}	f_{cal}	Δ	f_{exp}	f_{cal}	Δ	f_{exp}	f_{cal}	Δ	f_{exp}	f_{cal}	Δ	f_{exp}	f_{cal}	Δ
$^4D_{3/2}$	28248	10,50	8,79	-1.7	10,1	8,19	-1.87	10,2	8,55	-1.64	11,4	9,53	-1.60	9,57	8,10	-1.47
$^2P_{1/2}$	23419	0,30	1,33	1.04	0,34	1,23	0.90	0,40	1,29	0.90	0,68	1,43	0.75	0,35	1,22	0.86
$^2G_{9/2}$	21053	2,05	0,78	-1.28	2,01	0,76	-1.25	2,45	0,78	-1.67	3,24	0,89	-2.35	2,38	0,77	-1.61
$^4G_{7/2}$	19175	7,23	5,74	-1.50	7,05	5,54	-1.51	7,54	5,77	-1.76	8,77	6,56	-2.21	7,55	5,73	-1.82
$^4G_{5/2}$	17361	12,16	12,3	0.09	12,6	12,7	0.10	13,6	13,7	0.12	16,0	16,1	0.16	15,33	15,46	0.13
$^2H_{11/2}$	16013	0,16	0,25	0.09	0,26	0,25	-0.01	0,35	0,26	-0.09	0,71	0,30	-0.4	0,41	0,26	-0.15
$^4F_{9/2}$	14760	0,70	0,84	0.14	0,83	0,86	0.04	0,95	0,87	-0.08	1,39	1,02	-0.37	0,95	0,89	-0.06
$^4F_{7/2}$	13486	8,62	7,26	-1.36	8,53	7,55	-0.98	8,70	7,57	-1.12	10,5	8,90	-1.15	8,88	7,84	-1.04
$^4F_{5/2}$	12563	8,56	10,0	1.46	8,43	10,0	1.56	8,73	10,2	1.44	9,97	11,7	1.75	8,87	10,19	1.32
$^4F_{3/2}$	11574	1,28	4,69	3.41	0,79	4,43	3.63	1,00	4,60	3.60	1,34	5,16	3.82	1,00	4,40	3.41
$^4I_{13/2}$	4010	1,63	2,13	0.49	3,20	2,23	-0.96	2,20	2,23	0.04	1,47	2,64	1.17	2,18	2,33	0.15
Error($\times 10^{-08}$)		4.64			8.98			6.19			9.41			2.79		
r.m.s.		1.62			1.79			1.79			2.06			1.71		
Ω_{λ}		Ω_2	Ω_4	Ω_6	Ω_2	Ω_4	Ω_6	Ω_2	Ω_4	Ω_6	Ω_2	Ω_4	Ω_6	Ω_2	Ω_4	Ω_6
		0.42	10.4	7.76	0.94	9.52	8.13	1.17	9.82	7.99	1.62	10.6	9.19	2.12	8.94	8.08
Error ($\times 10^{-22}$)		0.44	4.32	1.94	0.33	2.57	3.09	4.3	2.3	4.3	2.09	0.45	1.69	1.08	1.70	1.43

6.1.4. Intensidades de las líneas S_{de} del ion Nd^{3+}

Tabla 6.3 Intensidad de las transiciones dipolares eléctricas $S_{de} \times 10^{-39}$ del ion Nd^{3+} descritas de acuerdo con el porcentaje molar de P_2O_5 en las muestras

Nivel	Energía cm^{-1}	0% P_2O_5	4% P_2O_5	8% P_2O_5	12% P_2O_5	16% P_2O_5
$^4D_{3/2}, ^4D_{5/2}, ^2L_{11/2}, ^4D_{1/2}$	28248	4,97	4,60	4,73	5,13	4,34
$^2P_{1/2}, ^2D_{5/2}$	23419	0.91	0.84	0.86	0.93	0.79
$^2G_{9/2}, ^4G_{11/2}, ^2D_{3/2}, ^2K_{15/2}$	21053	0.59	0.57	0.58	0.64	0.56
$^4G_{7/2}, ^4G_{9/2}, ^2K_{13/2}$	19175	4,78	4,59	4,71	5,20	4,52
$^4G_{5/2}, ^2G_{7/2}$	17361	11.29	11.58	12.35	14.10	13.47
$^2H_{11/2}$	16013	0.25	0.25	0.25	0.28	0.25
$^4F_{9/2}$	14760	0.91	0.93	0.92	1,05	0.91
$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	13486	8,61	8,89	8,78	10.03	8,79
$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	12563	12.75	12.63	12.67	14.19	12.27
$^4F_{3/2}$	11574	6,47	6,07	6,21	6,77	5,76
$^4I_{13/2}$	4010	8,48	8,84	8,71	9,99	8,77

Las intensidades de las bandas fueron calculadas a través de la ecuación 4 descrita en el capítulo 4. De acuerdo con los resultados reportados en la tabla 6.3, las transiciones $^4I_{13/2} \rightarrow ^4F_{5/2}, ^4G_{5/2}, ^4F_{7/2}, ^4I_{13/2}$ y $^4I_{13/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$ son las más intensas. El resultado esta acorde con las bandas observadas es las figuras 5.6 (a) y (b), las cuales son las de mayor absorbancia. La adición del pentóxido de fósforo en las muestras, genera un leve incremento en la intensidad de las bandas en el vidrio con 12% molar, y una ligera disminución, en los vidrios con 4, 8 y 16% de este compuesto. Asimismo, los valores de las intensidades S_{de} de los vidrios con 4 y 8% molar de P_2O_5 , son muy similares.

6.1.5. Probabilidades de transición $A_{JJ'}$ del ion Nd^{3+}

Las probabilidades de transición $A_{JJ'}$ entre multipletes J y J', fueron calculadas a través de la ecuación 5 descrita en el capítulo 4:

$$A_{JJ'}[(S,L)J(S',L')J'] = \frac{64\pi^2}{3h(2J+1)\lambda^3} \left[\frac{n(n^2+2)^2}{9} S_{ed} \right] \quad (5)$$

Los valores obtenidos son incluidos en la tabla 6.4. Los resultados muestran mayores valores de $A_{JJ'}$ para las posibles transiciones radiativas desde estados excitados particulares, hasta el estado base $^4I_{9/2}$. Contrario a lo anterior, los menores valores, son dados para las transiciones desde un nivel energético específico, hasta el estado inmediatamente inferior a él. Este comportamiento es igual para todos los decaimientos en todas las muestras.

De otro lado, el efecto de la adición de P_2O_5 en la muestra con 4% molar, genera un leve incremento en las probabilidades de transición para la relajación desde los estados $^4I_{13/2}$, $^4F_{7/2}$, $^4F_{9/2}$, $^2H_{11/2}$ y $^2G_{5/2}$, respecto de la muestra sin este compuesto. Asimismo, estos dos vidrios presentan la mayor similitud en todos los valores de $A_{JJ'}$. En la muestra con 8% molar de P_2O_5 , los $A_{JJ'}$ disminuyen para las emisiones radiativas desde los estados $^4F_{3/2}$, $^2P_{1/2}$ y $^4D_{3/2}$. En la muestra con 12% molar de P_2O_5 , todos los valores de $A_{JJ'}$ se incrementaron. Finalmente; la muestra con 16% molar de P_2O_5 , presenta disminución en las probabilidades de relajación desde los niveles $^4F_{3/2}$, $^4G_{7/2}$, $^4G_{9/2}$, $^2P_{1/2}$ y $^4D_{3/2}$.

En la tabla 6.5 son reportados las probabilidades totales de emisión de electrones, $\sum A_{JJ'}$ desde un nivel energético particular hasta los diversos niveles energéticos posibles de menor energía. Sin embargo, solo son descritos los niveles desde los cuales se generan los decaimientos.

Tabla 6.4 Valores de las probabilidades de transición individuales $A_{JJ'}$ del ion de Nd^{3+} descritos de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 presente en las muestras.

Transición		ΔE (cm^{-1})	$A_{JJ'} (S^{-1})$					
			0% P_2O_5	4% P_2O_5	8% P_2O_5	12% P_2O_5	16% P_2O_5	
$^4I_{13/2}$	\rightarrow	$^4I_{9/2}$	4010	22,81	23,95	23,93	28,26	24,94
$^4F_{3/2}$	\rightarrow	$^4I_{13/2}$	7564	116,88	110,33	114,64	128,60	109,83
$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	\rightarrow	$^4I_{9/2}$	11574	418,73	395,28	410,71	460,73	393,46
		$^4F_{3/2}$	989	0,51	0,51	0,52	0,60	0,52
$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	\rightarrow	$^4I_{13/2}$	8553	332,87	331,96	337,95	389,48	338,54
		$^4I_{9/2}$	12563	1054,9	1052,0	1071	1234,3	1072,8
		$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	923	0,28	0,29	0,29	0,35	0,30
$^4F_{9/2}$	\rightarrow	$^4F_{3/2}$	1912	2,51	2,61	2,62	3,08	2,71
		$^4I_{13/2}$	9476	305,53	317,75	318,61	374,57	329,67
		$^4I_{9/2}$	13486	880,71	915,92	918,41	1079,7	950,29
$^2H_{11/2}$	\rightarrow	$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	1274	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08
		$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	2197	0,40	0,41	0,42	0,49	0,43
		$^4F_{3/2}$	3186	1,23	1,26	1,27	1,48	1,30
		$^4I_{13/2}$	10750	47,27	48,38	48,84	56,99	49,99
$^4G_{5/2}, ^2G_{7/2}$	\rightarrow	$^4I_{9/2}$	14760	122,36	125,23	126,41	147,51	129,38
		$^4F_{9/2}$	1253	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
		$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	2527	0,17	0,17	0,17	0,20	0,18
		$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	3450	0,43	0,44	0,44	0,51	0,45
		$^4F_{3/2}$	4439	0,91	0,93	0,94	1,09	0,96
$^4G_{7/2}, ^4G_{9/2}$	\rightarrow	$^4I_{13/2}$	12003	17,91	18,32	18,49	21,57	18,90
		$^4I_{9/2}$	16013	42,54	43,51	43,90	51,21	44,87
		$^2H_{11/2}$	1348	1,15	1,19	1,29	1,52	1,45
		$^4F_{9/2}$	2601	8,29	8,56	9,26	10,88	10,45
		$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	3875	27,41	28,30	30,62	35,99	34,54
		$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	4798	52,03	53,73	58,13	68,32	65,57
$^2G_{9/2}, ^4G_{11/2}$	\rightarrow	$^4F_{3/2}$	5787	91,28	94,27	102,00	119,88	115,05
		$^4I_{13/2}$	13351	1120,9	1157,6	1252,5	1472,0	1412,8
		$^4I_{9/2}$	17361	2464,7	2545,2	2753,9	3236,6	3106,3
		$^4G_{5/2}, ^2G_{7/2}$	1814	1,19	1,15	1,20	1,36	1,19
		$^2H_{11/2}$	3162	6,31	6,09	6,35	7,21	6,30
		$^4F_{9/2}$	4415	17,17	16,58	17,28	19,62	17,15
		$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	5689	36,74	35,48	36,97	41,98	36,70
$^2P_{1/2}, ^2D_{5/2}$	\rightarrow	$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	6612	57,68	55,70	58,04	65,91	57,61
		$^4F_{3/2}$	7601	87,62	84,61	88,18	100,13	87,53
		$^4I_{13/2}$	15165	695,88	671,98	700,28	795,18	695,13
		$^4I_{9/2}$	19175	1406,7	1358,4	1415,6	1607,5	1405,2
		$^4G_{7/2}, ^4G_{9/2}, ^2K_{13/2}$	21053	229,09	224,63	230,48	263,48	228,33
		$^4G_{5/2}, ^2G_{7/2}$	3692	1,24	1,21	1,24	1,42	1,23
		$^2H_{11/2}$	5040	3,14	3,08	3,16	3,61	3,13
		$^4F_{9/2}$	6293	6,12	6,00	6,16	7,04	6,10
$^2G_{9/2}, ^4G_{11/2}, ^2D_{3/2}$	\rightarrow	$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	7567	10,64	10,43	10,70	12,23	10,60
		$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	8490	15,02	14,73	15,12	17,28	14,97
		$^4F_{3/2}$	9479	20,91	20,50	21,04	24,05	20,84
		$^4I_{13/2}$	17043	121,54	119,17	122,27	139,78	121,13
		$^4I_{9/2}$	21053	229,09	224,63	230,48	263,48	228,33
$^2G_{9/2}, ^4G_{11/2}, ^2D_{3/2}$	\rightarrow	$^2G_{9/2}, ^4G_{11/2}, ^2D_{3/2}$	2366	0,50	0,47	0,49	0,54	0,46
		$^4G_{7/2}, ^4G_{9/2}, ^2K_{13/2}$	4244	2,90	2,68	2,81	3,12	2,65
		$^4G_{5/2}, ^2G_{7/2}$	6058	8,45	7,81	8,18	9,08	7,69
		$^2H_{11/2}$	7406	15,43	14,26	14,94	16,58	14,06
		$^4F_{9/2}$	8659	24,67	22,80	23,88	26,50	22,47
		$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	9933	37,23	34,41	36,05	40,00	33,92

Continuación de la tabla 6.4								
${}^4D_{3/2}, {}^4D_{5/2}$	→	${}^4F_{5/2}, {}^2H_{9/2}$	10856	48,61	44,92	47,06	52,22	44,28
		${}^4F_{3/2}$	11845	63,14	58,35	61,12	67,84	57,52
		${}^4I_{13/2}$	19409	277,77	256,72	268,92	298,45	253,05
		${}^4I_{9/2}$	23419	487,96	450,98	472,41	524,29	444,53
		${}^2P_{1/2}, {}^2D_{5/2}$	4829	23,35	21,77	22,73	25,33	21,54
		${}^2G_{9/2}, {}^4G_{11/2}, {}^2D_{3/2}$	7195	77,24	72,00	75,17	83,79	71,25
		${}^4G_{7/2}, {}^4G_{9/2}, {}^2K_{13/2}$	9073	154,89	144,38	150,74	168,02	142,88
		${}^4G_{5/2}, {}^2G_{7/2}$	10887	267,61	249,44	260,44	290,30	246,85
		${}^2H_{11/2}$	12235	379,82	354,04	369,65	412,03	350,37
		${}^4F_{9/2}$	13488	508,88	474,34	495,25	552,03	469,42
		${}^4F_{7/2}, {}^4S_{3/2}$	14762	667,12	621,84	649,25	723,69	615,39
		${}^4F_{5/2}, {}^2H_{9/2}$	15685	800,25	745,93	778,81	868,10	738,19
		${}^4F_{3/2}$	16674	961,37	896,12	935,62	1042,9	886,82
		${}^4I_{13/2}$	24238	2953	2752,6	2873,9	3203,4	2724
		${}^4I_{9/2}$	28248	4674,5	4357,2	4549,2	5070,9	4312,0

Tabla 6.5 Valores de las probabilidades de transición $\sum A_{JJ'}$ del ion Nd^{3+} descritos de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 presente en las muestras.

Nivel energético desde el cual se origina la transición	$\sum A_{JJ'} (s^{-1})$				
	0%	4%	8%	12%	16%
	P_2O_5	P_2O_5	P_2O_5	P_2O_5	P_2O_5
${}^4I_{13/2}$	22,81	23,95	23,93	28,26	24,94
${}^4F_{3/2}$	535,60	505,61	525,36	589,34	503,29
${}^4F_{5/2}, {}^2H_{9/2}$	1388,3	1384,5	1409,4	1624,4	1411,9
${}^4F_{7/2}, {}^4S_{3/2}$	1189,0	1236,6	1239,9	1457,7	1283
${}^4F_{9/2}$	171,34	175,36	177,02	206,56	181,18
${}^2H_{11/2}$	61,97	63,38	63,95	74,60	65,37
${}^4G_{5/2}, {}^2G_{7/2}$	3765,8	3888,9	4207,7	4945,2	4746,2
${}^4G_{7/2}, {}^4G_{9/2}, {}^2K_{13/2}$	2309,3	2230,0	2323,9	2638,9	2306,8
${}^2G_{9/2}, {}^4G_{11/2}, {}^2D_{3/2}$	636,79	624,37	640,66	732,38	634,66
${}^2P_{1/2}, {}^2D_{5/2}$	966,67	893,40	935,84	1038,6	880,62
${}^4D_{3/2}, {}^4D_{5/2}, {}^2L_{11/2}$	11468	10689	11161	12440	10578

6.1.6. Tiempos de vida $\tau_{JJ'}$ del ion Nd^{3+}

Los tiempos de vida $\tau_{JJ'}$ de cada una de las transiciones, fueron calculados, mediante los inversos de las probabilidades de emisión espontánea $(\sum A_{JJ'})^{-1}$. Los resultados están reportados en la tabla 6.6. En general, los valores obtenidos muestran que la adición de pentóxido de fósforo en la muestra disminuye el valor de los tiempos de vida de los diferentes estados energéticos respecto del vidrio sin

P₂O₅. Sin embargo, puede ser observado que el tiempo de vida del estado $^4F_{3/2}$ aumenta en los vidrios con 4, 8 y 16 % molar de P₂O₅. Los tiempos de vida de los vidrios con 8 y 16 % molar de pentóxido de fósforo, muestran valores similares a los valores del vidrio sin este compuesto.

Tabla 6.6 Valores de tiempos de vida de las distintas transiciones $\tau_{JJ'}$ (ms) del ion de Nd³⁺ descritos de acuerdo con el porcentaje de P₂O₅ en los vidrios

Transición		ΔE (cm ⁻¹)	$\tau_{JJ'}$ (ms)					
			0% P ₂ O ₅	4% P ₂ O ₅	8% P ₂ O ₅	12% P ₂ O ₅	16% P ₂ O ₅	
$^4I_{13/2}$	→	$^4I_{9/2}$	4010	43,85	41,75	41,79	35,39	40,10
$^4F_{3/2}$	→	$^4I_{13/2}$	7564	1,87	1,98	1,90	1,70	1,99
		$^4I_{9/2}$	11574					
$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	→	$^4F_{3/2}$	989	0,72	0,72	0,71	0,62	0,71
		$^4I_{13/2}$	8553					
		$^4I_{9/2}$	12563					
$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	→	$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	923	0,84	0,81	0,81	0,69	0,78
		$^4F_{3/2}$	1912					
		$^4I_{13/2}$	9476					
		$^4I_{9/2}$	13486					
$^4F_{9/2}$	→	$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	1274	5,84	5,70	5,65	4,84	5,52
		$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	2197					
		$^4F_{3/2}$	3186					
		$^4I_{13/2}$	10750					
		$^4I_{9/2}$	14760					
$^2H_{11/2}$	→	$^4F_{9/2}$	1253	16,14	15,78	15,64	13,40	15,30
		$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	2527					
		$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	3450					
		$^4F_{3/2}$	4439					
		$^4I_{13/2}$	12003					
		$^4I_{9/2}$	16013					
$^4G_{5/2}, ^2G_{7/2}$	→	$^2H_{11/2}$	1348	0,27	0,26	0,24	0,20	0,21
		$^4F_{9/2}$	2601					
		$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	3875					
		$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	4798					
		$^4F_{3/2}$	5787					
		$^4I_{13/2}$	13351					
		$^4I_{9/2}$	17361					
$^4G_{7/2}, ^4G_{9/2}$	→	$^4G_{5/2}, ^2G_{7/2}$	1814	0,43	0,45	0,43	0,38	0,43
		$^2H_{11/2}$	3162					
		$^4F_{9/2}$	4415					
		$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	5689					
		$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	6612					
$^2G_{9/2}, ^4G_{11/2}$	→	$^4F_{3/2}$	7601					
		$^4I_{13/2}$	15165					
		$^4I_{9/2}$	19175					
		$^4G_{7/2}, ^4G_{9/2}, ^2K_{13/2}$	21053	1,57	1,60	1,56	1,37	1,58
		$^4G_{5/2}, ^2G_{7/2}$	3692					
	$^2H_{11/2}$	5040						
	$^4F_{9/2}$	6293						
	$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	7567						

Continuación de la tabla 6.6						
	$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	8490				
	$^4F_{3/2}$	9479				
	$^4I_{13/2}$	17043				
	$^4I_{9/2}$	21053				
	$^2G_{9/2}, ^4G_{11/2}, ^2D_{3/2}$	2366	1,03	1,12	1,07	0,96
	$^4G_{7/2}, ^4G_{9/2}, ^2K_{13/2}$	4244				1,14
	$^4G_{5/2}, ^2G_{7/2}$	6058				
	$^2H_{11/2}$	7406				
$^2P_{1/2}, ^2D_{5/2}$	\rightarrow $^4F_{9/2}$	8659				
	$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	9933				
	$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	10856				
	$^4F_{3/2}$	11845				
	$^4I_{13/2}$	19409				
	$^4I_{9/2}$	23419				
	$^2P_{1/2}, ^2D_{5/2}$	4829	0,09	0,09	0,09	0,08
	$^2G_{9/2}, ^4G_{11/2}, ^2D_{3/2}$	7195				0,09
	$^4G_{7/2}, ^4G_{9/2}, ^2K_{13/2}$	9073				
	$^4G_{5/2}, ^2G_{7/2}$	10887				
	$^2H_{11/2}$	12235				
$^4D_{3/2}, ^4D_{5/2}$	\rightarrow $^4F_{9/2}$	13488				
	$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	14762				
	$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	15685				
	$^4F_{3/2}$	16674				
	$^4I_{13/2}$	24238				
	$^4I_{9/2}$	28248				

6.1.7. Canales de relajación $\beta_{JJ'}$ del ion Nd^{3+}

Los canales de relajación $\beta_{JJ'}$, representan las intensidades relativas entre los estados J, J' de todas las líneas que se originan desde un estado excitado, y están dados por la ecuación 7 descrita en el capítulo 4; los resultados de los cálculos son incluidos en la tabla 6.7. Los valores muestran que, la transición hasta el estado base, desde cualquier estado excitado particular, presenta la mayor intensidad; y la transición hasta el estado inmediatamente inferior al nivel donde se origina la relajación, es el menor. Así mismo, la transición $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ tiene el mayor valor, con una intensidad relativa de 1.55, seguida de la transición $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ con un valor de 1.41.

De otro lado, el efecto de la adición de fósforo en los vidrios, genera cambios en los valores de los canales de relajación respecto de la matriz sin pentóxido de

fósforo. Así, los vidrios con 4 y 8% molar de P₂O₅, presentan aumentos en las transiciones desde los estados ⁴I_{13/2}, ⁴F_{7/2}, ⁴F_{9/2}, ²H_{11/2} y ⁴G_{5/2}. En la matriz con 12% molar de P₂O₅, todos los valores se incrementan, así como las intensidades relativas desde las transiciones ⁴I_{13/2}, ⁴F_{7/2} y ⁴G_{5/2} para la matriz con 16%.

Tabla 6.7 Valores de los canales de relajación $\beta_{JJ'}$ del ion Nd³⁺ descritos de acuerdo con el porcentaje de P₂O₅ en las muestras

Transición		ΔE (cm ⁻¹)	$\beta_{JJ'}$					
			0% P ₂ O ₅	4% P ₂ O ₅	8% P ₂ O ₅	12% P ₂ O ₅	16% P ₂ O ₅	
⁴ I _{13/2}	→	⁴ I _{9/2}	4010	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
⁴ F _{3/2}	→	⁴ I _{13/2}	7564	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
		⁴ I _{9/2}	11574	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
⁴ F _{5/2} , ² H _{9/2}	→	⁴ F _{3/2}	989	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		⁴ I _{13/2}	8553	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
		⁴ I _{9/2}	12563	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76
⁴ F _{7/2} , ⁴ S _{3/2}	→	⁴ F _{5/2} , ² H _{9/2}	923	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		⁴ F _{3/2}	1912	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		⁴ I _{13/2}	9476	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
		⁴ I _{9/2}	13486	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
⁴ F _{9/2}	→	⁴ F _{7/2} , ⁴ S _{3/2}	1274	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		⁴ F _{5/2} , ² H _{9/2}	2197	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		⁴ F _{3/2}	3186	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		⁴ I _{13/2}	10750	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
		⁴ I _{9/2}	14760	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
² H _{11/2}	→	⁴ F _{9/2}	1253	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		⁴ F _{7/2} , ⁴ S _{3/2}	2527	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		⁴ F _{5/2} , ² H _{9/2}	3450	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		⁴ F _{3/2}	4439	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		⁴ I _{13/2}	12003	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
		⁴ I _{9/2}	16013	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
⁴ G _{5/2} , ² G _{7/2}	→	² H _{11/2}	1348	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		⁴ F _{9/2}	2601	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		⁴ F _{7/2} , ⁴ S _{3/2}	3875	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		⁴ F _{5/2} , ² H _{9/2}	4798	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		⁴ F _{3/2}	5787	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
		⁴ I _{13/2}	13351	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
		⁴ I _{9/2}	17361	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
⁴ G _{7/2} , ⁴ G _{9/2}	→	⁴ G _{5/2} , ² G _{7/2}	1814	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		² H _{11/2}	3162	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		⁴ F _{9/2}	4415	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		⁴ F _{7/2} , ⁴ S _{3/2}	5689	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
		⁴ F _{5/2} , ² H _{9/2}	6612	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
		⁴ F _{3/2}	7601	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
		⁴ I _{13/2}	15165	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
		⁴ I _{9/2}	19175	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61
² G _{9/2} , ⁴ G _{11/2}	→	⁴ G _{7/2} , ⁴ G _{9/2} , ² K _{13/2}	21053	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
		⁴ G _{5/2} , ² G _{7/2}	3692	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		² H _{11/2}	5040	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		⁴ F _{9/2}	6293	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Continuación de la tabla 6.7							
		$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	7567	0,02	0,02	0,02	0,02
		$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	8490	0,02	0,02	0,02	0,02
		$^4F_{3/2}$	9479	0,03	0,03	0,03	0,03
		$^4I_{13/2}$	17043	0,19	0,19	0,19	0,19
		$^4I_{9/2}$	21053	0,36	0,36	0,36	0,36
$^2P_{1/2}, ^2D_{5/2}$	→	$^2G_{9/2}, ^4G_{11/2}, ^2D_{3/2}$	2366	0,00	0,00	0,00	0,00
		$^4G_{7/2}, ^4G_{9/2}, ^2K_{13/2}$	4244	0,00	0,00	0,00	0,00
		$^4G_{5/2}, ^2G_{7/2}$	6058	0,01	0,01	0,01	0,01
		$^2H_{11/2}$	7406	0,02	0,02	0,02	0,02
		$^4F_{9/2}$	8659	0,03	0,03	0,03	0,03
		$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	9933	0,04	0,04	0,04	0,04
		$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	10856	0,05	0,05	0,05	0,05
		$^4F_{3/2}$	11845	0,07	0,07	0,07	0,07
		$^4I_{13/2}$	19409	0,29	0,29	0,29	0,29
		$^4I_{9/2}$	23419	0,50	0,50	0,50	0,50
$^4D_{3/2}, ^4D_{5/2}$	→	$^2P_{1/2}, ^2D_{5/2}$	4829	0,00	0,00	0,00	0,00
		$^2G_{9/2}, ^4G_{11/2}, ^2D_{3/2}$	7195	0,01	0,01	0,01	0,01
		$^4G_{7/2}, ^4G_{9/2}, ^2K_{13/2}$	9073	0,01	0,01	0,01	0,01
		$^4G_{5/2}, ^2G_{7/2}$	10887	0,02	0,02	0,02	0,02
		$^2H_{11/2}$	12235	0,03	0,03	0,03	0,03
		$^4F_{9/2}$	13488	0,04	0,04	0,04	0,04
		$^4F_{7/2}, ^4S_{3/2}$	14762	0,06	0,06	0,06	0,06
		$^4F_{5/2}, ^2H_{9/2}$	15685	0,07	0,07	0,07	0,07
		$^4F_{3/2}$	16674	0,08	0,08	0,08	0,08
		$^4I_{13/2}$	24238	0,26	0,26	0,26	0,26
		$^4I_{9/2}$	28248	0,41	0,41	0,41	0,41

6.2 Erbio

6.2.1 Fuerzas de oscilador experimental del ion Er^{3+}

Las fuerzas de oscilador fueron calculados de manera análoga a lo hecho con el Nd^{3+} . Los resultados se encuentran reportados en la tabla 6.9. Las dos bandas $^4I_{15/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$ y $^4I_{15/2} \rightarrow ^4G_{11/2}$ centradas en 522 y 364 nm respectivamente, son conocidas como hipersensibles [34], debido a sus grandes valores de intensidad y satisfacen las reglas de selección asociadas con el mecanismo cuadrupolar eléctrico. De igual forma, las bandas $^4I_{13/2}$ y $^4F_{9/2}$, centradas en 1447 y 651 nm respectivamente, presentan altos valores de fuerza de oscilador, siendo a su vez estas 4 bandas, las más intensas en los espectros de absorción (Ver figura 5.7 (a) y (b)).

La adición del P_2O_5 en las diferentes muestras, genera incrementos en las fuerzas de oscilador de algunas bandas, y disminuciones en otras, respecto del vidrio sin pentóxido de fósforo. Es así como, en la matriz con 4% molar de P_2O_5 , se presentan ligeros aumentos en las bandas ${}^4F_{3/2}$, ${}^4F_{7/2}$, ${}^4S_{3/2}$, ${}^4I_{11/2}$ y ${}^4I_{13/2}$. En la muestra con 8% molar de P_2O_5 , también aumentan los valores, excepto en las bandas ${}^2G_{7/2}$, ${}^4G_{9/2}$ y ${}^4I_{13/2}$. Asimismo, en el vidrio con 12% molar de P_2O_5 , la única disminución se presenta en la banda ${}^4I_{13/2}$. Finalmente, en la muestra con 16% molar de P_2O_5 continua la tendencia, incrementándose la mayoría de las bandas excepto las ${}^4F_{3/2}$, ${}^2G_{9/2}$ y ${}^2G_{7/2}$.

6.2.2 Parámetros de intensidad Ω_λ del ion Er^{3+}

Los parámetros de intensidad Ω_λ se calcularon de manera análoga a la descrita para los vidrios dopados con Nd^{3+} . Los valores presentan el siguiente orden: $\Omega_2 > \Omega_4 < \Omega_6$. El incremento del parámetro Ω_2 con la adición de pentóxido de fósforo, esta asociado con la posible disminución en el grado de homogeneidad en el ambiente que rodea los iones de Er^{3+} , debido a la estructura tetraédrica y la asimetría en las cadenas estructurales del P_2O_5 [41, 60].

6.2.3. Fuerzas de oscilador teóricas del ion Er^{3+}

Las fuerzas de oscilador teóricas fueron determinadas haciendo uso de la ecuación 3 descrita en el capítulo 4. Los valores están incluidos en la tabla 6.9. Los resultados son similares a los registrados para las fuerzas de oscilador experimental, así como el comportamiento respecto de la introducción de P_2O_5 en la muestra. Por los valores pequeños del r.m.s., la calidad del ajuste en este ión es muy bueno, lo cual indica que el modelo de intensidades de Judd y Ofelt [2,3],

explica muy bien el comportamiento de la intensidad de los espectros de absorción para el Er^{3+} .

Tabla 6.8 Elementos de Matriz U_λ , $\lambda = 2,4,6$ del ion Er^{3+} [58]

$S'LJ'$	Energía cm^{-1}	Elementos de Matriz Er^{3+}		
		U_2^2	U_4^2	U_6^2
$^2G_{7/2}$	28129	0	0,0186	0,1153
$^4G_{9/2}$	27473	0	0,2436	0,119
$^4G_{11/2}$	26420	0,897	0,5123	0,1172
$^2G_{9/2}$	24691	0	0,0157	0,2278
$^4F_{3/2} + ^4F_{5/2}$	22271	0	0	0,2237
$^4F_{7/2}$	20555	0	0,1467	0,628
$^2H_{11/2}$	19157	0,7326	0,4222	0,0927
$^4S_{3/2}$	18519	0	0	0,223
$^4F_{9/2}$	15361	0	0,5275	0,4612
$^4I_{9/2}$	12492	0	0,1856	0,0122
$^4I_{11/2}$	10277	0,0291	0,0004	0,3969
$^4I_{13/2}$	6913	0,0195	0,1173	1,4299

Tabla 6.9 Valores de las fuerzas de oscilador experimentales f_{exp} ($\times 10^{-6}$), calculadas f_{cal} ($\times 10^{-6}$), el rms ($\times 10^{-6}$) y Ω_{λ} ($\times 10^{-20}$) del ion Er^{3+} descritas para cada vidrio de acuerdo con su porcentaje de P_2O_5

Vidrios dopados con Erblio																
$S'LJ'$	Energí a cm^{-1}	0% P_2O_5			4% P_2O_5			8% P_2O_5			12% P_2O_5			16% P_2O_5		
		f_{exp}	f_{cal}	Δ	f_{exp}	f_{cal}	Δ	f_{exp}	f_{cal}	Δ	f_{exp}	f_{cal}	Δ	f_{exp}	f_{cal}	Δ
$^2G_{7/2}$	28129	0,35	0,63	0.28	0,28	0,70	0.42	0,24	0,73	0.49	0,66	0,73	0.06	0,53	0,68	0.15
$^4G_{9/2}$	27473	1,48	1,48	0.00	1,48	1,34	-0.13	1,12	1,49	0.37	1,68	1,61	-0.07	1,4	1,55	0.15
$^4G_{11/2}$	26420	8,15	7,87	-0.27	7,96	7,56	-0.40	9,52	9,07	-0.4	9,05	8,65	-0.40	10,67	10,02	-0.65
$^2G_{9/2}$	24691	0,908	1,03	0.12	0,67	1,16	0.49	1,14	1,2	0.06	0,94	1,18	0.24	0,71	1,10	0.39
$^4F_{3/2}$	22271	0,48	0,86	0.39	0,67	0,99	0.32	0,67	1,02	0.35	0,66	1	0.33	0,33	0,93	0.59
$^4F_{7/2}$	20555	1,80	2,65	0.84	2,09	2,89	0.80	2,27	3,01	0.74	2,59	3,02	0.43	2,08	2,83	0.74
$^2H_{11/2}$	19157	4,19	4,66	0.47	3,8	4,47	0.68	4,61	5,37	0.76	4,47	5,12	0.65	4,81	5,93	1,12
$^4S_{3/2}$	18519	0,45	0,72	0.27	0,46	0,82	0.36	0,89	0,84	-0.1	0,48	0,83	0.35	0,63	0,77	0.14
$^4F_{9/2}$	15361	2,54	2,33	-0.21	2,35	2,25	-0.10	2,97	2,44	-0.5	2,60	2,58	-0.03	2,77	2,46	-0.31
$^4I_{9/2}$	12492	0,26	0,34	0.08	0,19	0,27	0.08	0,23	0,32	0.08	0,32	0,36	0.04	0,3	0,35	0.06
$^4I_{11/2}$	10277	0,40	0,78	0.37	0,54	0,88	0.34	0,52	0,92	0.40	0,47	0,9	0.43	0,60	0,86	0.25
$^4I_{13/2}$	6913	3,43	1,86	-1,57	3,88	2,09	-1,79	3,38	2,16	-1,2	3,31	2,13	-1,17	3,54	2	-1,55
Error		$9,43 \times 10^{-09}$			$9,07 \times 10^{-09}$			$4,22 \times 10^{-09}$			$1,17 \times 10^{-08}$			$2,59 \times 10^{-08}$		
r.m.s.		0.67			0.77			0.64			0.54			0.77		
Ω_{λ}		Ω_2	Ω_4	Ω_6	Ω_2	Ω_4	Ω_6	Ω_2	Ω_4	Ω_6	Ω_2	Ω_4	Ω_6	Ω_2	Ω_4	Ω_6
		2,58	1,50	1,92	2,57	1,14	2,19	3,09	1,33	2,21	2,72	1,50	2,11	3,32	1,47	1,95
Error ($\times 10^{-22}$)		0.23	3.08	0.76	0.27	1.12	2.03	2.8	3.6	2.04	1.13	1.67	2.56	2.39	4.51	3.65

6.2.4 Intensidades de Línea S_{de} para el ion Er^{3+}

Tabla 6.10 Intensidad de las transiciones dipolares eléctricas $S_{de} \times 10^{-39}$ del ion Er^{3+} descritas de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 en las muestras

$S'L'J'$	Energía cm ⁻¹	0% P ₂ O ₅	4% P ₂ O ₅	8% P ₂ O ₅	12% P ₂ O ₅	16% P ₂ O ₅
² G _{7/2}	28129	0,574	0,631	0,645	0,627	0,581
⁴ G _{9/2}	27473	1,371	1,243	1,352	1,425	1,359
⁴ G _{11/2}	26420	7,624	7,259	8,562	7,965	9,137
² G _{9/2}	24691	1,062	1,191	1,209	1,166	1,077
⁴ F _{3/2} , ⁴ F _{5/2}	22271	0,99	1,129	1,140	1,091	1,006
⁴ F _{7/2}	20555	3,287	3,557	3,650	3,572	3,32
² H _{11/2}	19157	6,227	5,923	6,989	6,504	7,462
⁴ S _{3/2}	18519	0,987	1,126	1,137	1,088	1,002
⁴ F _{9/2}	15361	3,869	3,719	3,965	4,078	3,859
⁴ I _{9/2}	12492	0,697	0,551	0,630	0,703	0,683
⁴ I _{11/2}	10277	1,930	2,177	2,232	2,12	2,01
⁴ I _{13/2}	6913	6,849	7,643	7,787	7,503	6,974

Las intensidades de las bandas fueron calculadas mediante la ecuación 4 descrita en el capítulo 4 y los resultados fueron reportados en la tabla 6.10. De ésta manera, puede ser observado que las bandas correspondientes a las transiciones ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$, ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$, ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^2H_{11/2}$ y $I_{15/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$ centradas en 1447, 651, 522 y 379 nm respectivamente, son las más intensas. Este resultado esta en concordancia con los espectros de absorción (Figuras 5.7 (a) y (b)), en los cuales se observan los mayores valores de absorbancia. Asimismo, los cambios generados por la adición de P_2O_5 sobre las bandas, respecto de la matriz sin fósforo, son los siguientes, las bandas: ${}^4G_{9/2}$, ${}^4G_{11/2}$, ${}^4F_{9/2}$, ${}^4I_{9/2}$ y ${}^4I_{13/2}$ del vidrio con 4% molar de P_2O_5 y las bandas: ${}^4G_{9/2}$, ${}^2H_{11/2}$, ${}^4I_{9/2}$ y ${}^4I_{13/2}$, del vidrio con 8% molar de P_2O_5 presentan disminuciones en sus intensidades S_{de} . Adicionalmente, en la muestra con 12 % molar de P_2O_5 , todas los valores sufrieron incrementan, excepto en la banda ${}^4I_{13/2}$. Finalmente en el vidrio con 16% molar de P_2O_5 , presentó disminuciones en las bandas ${}^4G_{9/2}$, ${}^4F_{9/2}$, ${}^4I_{9/2}$ y ${}^4I_{13/2}$.

6.2.5 Probabilidades de transición $A_{JJ'}$ del ion Er^{3+}

Las probabilidades de transición $A_{JJ'}$ entre los multipletes J, J' , fueron calculadas utilizando la ecuación 5 descrita en el capítulo 4, y los resultados están incluidos en la tabla 6.11. Debido a que desde un nivel energético en particular, diferente al estado base, los electrones pueden relajarse a través de cada uno de los niveles energéticos inmediatos inferiores hasta el estado base, la probabilidad que esto ocurra es descrito de la siguiente manera: las mayores probabilidades de transición, $A_{JJ'}$, se presentan para la transición desde el estado excitado, hasta el estado base. Contrario a esto, las menores probabilidades de transición, $A_{JJ'}$, son dadas para las transiciones desde un estado excitado particular hasta el primer estado inmediato inferior a él. Este comportamiento se da para todos los decaimientos en todas las muestras.

De otro lado, el efecto de la adición de P_2O_5 generó cambios en las probabilidades de transición, respecto al vidrio sin este reactivo. En la muestra con 4% molar de pentóxido de fósforo, las probabilidades de transición para relajaciones desde los estados ${}^4G_{9/2}$, ${}^4G_{11/2}$, ${}^2H_{11/2}$ y ${}^4I_{9/2}$ disminuyeron. Sin embargo, en las muestras con 8, 12 y 16% molar de P_2O_5 , todas las probabilidades de transición $A_{JJ'}$ aumentaron. Los vidrios con 0% y 4% molar de P_2O_5 presentan gran similitud en sus valores respecto de las demás muestras.

En la tabla 6.12 son reportados las sumas de las $A_{JJ'}$ para cada una de las transiciones. Sin embargo, solo se especifica el nivel energético desde el cual se origina la transición. El efecto del pentóxido de fósforo en las muestras es análogo al descrito para las probabilidades de transición individuales.

Tabla 6.11 Valores de las probabilidades de transición individuales $A_{JJ'}$ del Er^{3+} descritos de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 en las muestras.

Transición			$A_{JJ'} (S^{-1})$					
			$\Delta E (cm^{-1})$	0% P_2O_5	4% P_2O_5	8% P_2O_5	12% P_2O_5	16% P_2O_5
$^4I_{13/2}$	\rightarrow	$^4I_{15/2}$	6913	59,04	66,42	68,80	68,03	63,72
$^4I_{11/2}$	\rightarrow	$^4I_{15/2}$	10277	54,67	62,16	64,79	63,14	60,30
		$^4I_{13/2}$	3364	1,92	2,18	2,27	2,21	2,11
$^4I_{9/2}$	\rightarrow	$^4I_{15/2}$	12492	35,47	28,26	32,86	37,61	36,82
		$^4I_{13/2}$	5579	3,16	2,52	2,93	3,35	3,28
		$^4I_{11/2}$	2215	0,20	0,16	0,18	0,21	0,21
$^4F_{9/2}$	\rightarrow	$^4I_{15/2}$	15361	365,90	354,61	384,39	405,70	386,80
		$^4I_{13/2}$	8448	60,86	58,99	63,94	67,48	64,34
		$^4I_{11/2}$	5084	13,27	12,86	13,94	14,71	14,02
		$^4I_{9/2}$	2869	2,38	2,31	2,50	2,64	2,52
$^4S_{3/2}$	\rightarrow	$^4I_{15/2}$	18519	163,51	188,08	193,08	189,60	176,08
		$^4I_{13/2}$	11606	40,25	46,30	47,53	46,67	43,34
		$^4I_{11/2}$	8242	14,41	16,58	17,02	16,71	15,52
		$^4I_{9/2}$	6027	5,64	6,48	6,66	6,54	6,07
		$^4F_{9/2}$	3158	0,82	0,93	0,96	0,94	0,87
$^2H_{11/2}$	\rightarrow	$^4I_{15/2}$	19157	1142,20	1095,43	1314,07	1254,91	1450,83
		$^4I_{13/2}$	12244	298,22	286,00	343,09	327,64	378,79
		$^4I_{11/2}$	8880	113,76	109,10	130,88	124,99	144,50
		$^4I_{9/2}$	6665	48,10	46,13	55,34	52,85	61,10
		$^4F_{9/2}$	3796	8,89	8,52	10,22	9,76	11,29
		$^4S_{3/2}$	638	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
$^4F_{7/2}$	\rightarrow	$^4I_{15/2}$	20555	744,85	812,63	847,79	851,32	797,30
		$^4I_{13/2}$	13642	217,75	237,56	247,84	248,87	233,08
		$^4I_{11/2}$	10278	93,12	101,59	105,99	106,43	99,68
		$^4I_{9/2}$	8063	44,96	49,05	51,17	51,38	48,12
		$^4F_{9/2}$	5194	12,02	13,11	13,68	13,74	12,86
		$^4S_{3/2}$	2036	0,72	0,79	0,82	0,83	0,77
		$^2H_{11/2}$	1398	0,23	0,26	0,27	0,27	0,25
$^4F_{3/2}$	\rightarrow	$^4I_{15/2}$	22271	285,27	328,15	336,87	330,80	307,21
		$^4I_{13/2}$	15358	93,55	107,61	110,47	108,48	100,74
		$^4I_{11/2}$	11994	44,56	51,26	52,62	51,67	47,98
		$^4I_{9/2}$	9779	24,15	27,78	28,52	28,00	26,01
		$^4F_{9/2}$	6910	8,52	9,80	10,06	9,88	9,18
		$^4S_{3/2}$	3752	1,36	1,57	1,61	1,58	1,47
		$^2H_{11/2}$	3114	0,78	0,90	0,92	0,90	0,84
		$^4F_{7/2}$	1716	0,13	0,15	0,15	0,15	0,14
$^2G_{9/2}$	\rightarrow	$^4I_{15/2}$	24691	417,23	471,75	486,80	481,51	448,42
		$^4I_{13/2}$	17778	155,74	176,09	181,71	179,74	167,39
		$^4I_{11/2}$	14414	83,00	93,85	96,85	95,80	89,21
		$^4I_{9/2}$	12199	50,32	56,89	58,71	58,07	54,08
		$^4F_{9/2}$	9330	22,51	25,45	26,27	25,98	24,19
		$^4S_{3/2}$	6172	6,52	7,37	7,60	7,52	7,00
		$^2H_{11/2}$	5534	4,70	5,31	5,48	5,42	5,05
		$^4F_{7/2}$	4136	1,96	2,22	2,29	2,26	2,11
		$^4F_{3/2}+^4F_{5/2}$	2420	0,39	0,44	0,46	0,45	0,42
$^4G_{11/2}$	\rightarrow	$^4I_{15/2}$	26420	3668,60	3521,36	4222,76	4031,43	4660,15
		$^4I_{13/2}$	19507	1476,63	1417,37	1699,69	1622,68	1875,74
		$^4I_{11/2}$	16143	836,86	803,28	963,28	919,63	1063,05
		$^4I_{9/2}$	13928	537,49	515,91	618,68	590,65	682,76
		$^4F_{9/2}$	11059	269,06	258,26	309,70	295,67	341,78
		$^4S_{3/2}$	7901	98,12	94,18	112,94	107,82	124,64

Continuación de la tabla 6.11							
	$^2H_{11/2}$	7263	76,22	73,16	87,73	83,75	96,82
	$^4F_{72}$	5865	40,13	38,52	46,20	44,10	50,98
	$^4F_{3/2}+^4F_{5/2}$	4149	14,21	13,64	16,35	15,61	18,05
	$^2G_{9/2}$	1729	1,03	0,99	1,18	1,13	1,31
$^4G_{9/2}$	→	$^4I_{15/2}$	27473	741,69	678,06	749,85	810,93
		$^4I_{13/2}$	20560	310,87	284,20	314,28	339,89
		$^4I_{11/2}$	17196	181,88	166,28	183,88	198,86
		$^4I_{9/2}$	14981	120,26	109,94	121,58	131,49
		$^4F_{9/2}$	12112	63,56	58,10	64,25	69,49
		$^4S_{3/2}$	8954	25,68	23,47	25,96	28,07
		$^2H_{11/2}$	8316	20,57	18,81	20,80	22,49
		$^4F_{72}$	6918	11,84	10,83	11,97	12,95
		$^4F_{3/2}+^4F_{5/2}$	5202	5,04	4,60	5,09	5,51
		$^2G_{9/2}$	2782	0,77	0,70	0,78	0,84
		$^4G_{11/2}$	1053	0,04	0,04	0,04	0,05
$^2G_{7/2}$	→	$^4I_{15/2}$	28129	333,69	369,50	383,72	357,79
		$^4I_{13/2}$	21216	143,18	158,54	164,64	164,30
		$^4I_{11/2}$	17852	85,30	94,45	98,09	97,88
		$^4I_{9/2}$	15637	57,33	63,48	65,92	65,78
		$^4F_{9/2}$	12768	31,21	34,56	35,89	35,81
		$^4S_{3/2}$	9610	13,31	14,73	15,30	15,27
		$^2H_{11/2}$	8972	10,83	12,00	12,45	12,43
		$^4F_{72}$	7574	6,51	7,21	7,49	7,48
		$^4F_{3/2}+^4F_{5/2}$	5858	3,01	3,34	3,47	3,46
		$^2G_{9/2}$	3438	0,61	0,67	0,70	0,70
		$^4G_{11/2}$	1709	0,07	0,08	0,07	0,09
		$^4G_{9/2}$	656	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 6.12 Valores de las probabilidades de transición $\sum A_{JJ'}$ del ion Er^{3+} descritas de acuerdo con el porcentaje de fósforo en las muestras.

Nivel energético desde el cual se origina la transición	$\sum A_{JJ'} (S^{-1})$				
	0% P_2O_5	4% P_2O_5	8% P_2O_5	12% P_2O_5	16% P_2O_5
$^4I_{13/2}$	59,04	66,42	68,80	68,03	63,72
$^4I_{11/2}$	56,59	64,34	67,06	65,35	62,41
$^4I_{9/2}$	38,82	30,93	35,97	41,17	40,31
$^4F_{9/2}$	442,41	428,77	464,77	490,53	467,68
$^4S_{3/2}$	224,61	258,37	265,24	260,45	241,88
$^2H_{11/2}$	1611,21	1545,23	1853,66	1770,20	2046,56
$^4F_{72}$	1113,65	1214,99	1267,56	1272,84	1192,08
$^4F_{3/2}$	458,33	527,21	541,22	531,46	493,57
$^2G_{9/2}$	742,39	839,38	866,17	856,76	797,88
$^4G_{11/2}$	7018,34	6736,66	8078,50	7712,47	8915,27
$^4G_{9/2}$	1482,19	1355,04	1498,49	1620,57	1557,94
$^2G_{7/2}$	685,06	758,55	787,76	786,11	734,52

6.2.6 Tiempos de vida $\tau_{JJ'}$ del ion Er^{3+}

Los tiempos de vida $\tau_{JJ'}$ fueron calculados haciendo uso de la ecuación 6, descrita en el capítulo 4, y los resultados fueron incluidos en la tabla 6.13. De acuerdo con estos valores, el efecto generado por la adición del P_2O_5 en las distintas muestras, es la de disminución del tiempo de vida de los diferentes niveles energéticos, a excepción de los estados $^4I_{9/2}$ y $^4F_{9/2}$ para el vidrio con 4% molar de pentóxido de fósforo y el $^4I_{9/2}$ respecto del vidrio sin este compuesto. Sin embargo, el vidrio con 4% molar de P_2O_5 , es el que presenta los menores cambios respecto de los demás vidrios oxi-fluoruros.

Tabla 6.13 Valores de tiempos de vida de las distintas transiciones $\tau_{JJ'}$ (ms) del ion de Er^{3+} descritos de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 en los vidrios

Transición			$\tau_{JJ'}$ (ms)				
ΔE (cm^{-1})			0%	4%	8%	12%	16%
			P_2O_5	P_2O_5	P_2O_5	P_2O_5	P_2O_5
$^4I_{13/2}$	$^4I_{15/2}$	6913	16,94	15,05	14,53	14,70	15,69
$^4I_{11/2}$	$^4I_{15/2}$	10277	17,67	15,54	14,91	15,30	16,02
	$^4I_{13/2}$	3364					
$^4I_{9/2}$	$^4I_{15/2}$	12492	25,76	32,33	27,80	24,29	24,81
	$^4I_{13/2}$	5579					
	$^4I_{11/2}$	2215					
$^4F_{9/2}$	$^4I_{15/2}$	15361	2,26	2,33	2,15	2,04	2,14
	$^4I_{13/2}$	8448					
	$^4I_{11/2}$	5084					
	$^4I_{9/2}$	2869					
$^4S_{3/2}$	$^4I_{15/2}$	18519	4,45	3,87	3,77	3,84	4,13
	$^4I_{13/2}$	11606					
	$^4I_{11/2}$	8242					
	$^4I_{9/2}$	6027					
	$^4F_{9/2}$	3158					
$^2H_{11/2}$	$^4I_{15/2}$	19157	0,62	0,65	0,54	0,56	0,49
	$^4I_{13/2}$	12244					
	$^4I_{11/2}$	8880					
	$^4I_{9/2}$	6665					
$^4F_{7/2}$	$^4F_{9/2}$	3796					
	$^4S_{3/2}$	638					
	$^4I_{15/2}$	20555	0,90	0,82	0,79	0,79	0,84
	$^4I_{13/2}$	13642					
	$^4I_{11/2}$	10278					
	$^4I_{9/2}$	8063					
Continuación de la tabla 6.13							
	$^4F_{9/2}$	5194					

	$^4S_{3/2}$	2036					
	$^2H_{11/2}$	1398					
	$^4I_{15/2}$	22271	2,18	1,90	1,85	1,88	2,03
	$^4I_{13/2}$	15358					
	$^4I_{11/2}$	11994					
$^4F_{3/2}$	$^4I_{9/2}$	9779					
	$^4F_{9/2}$	6910					
	$^4S_{3/2}$	3752					
	$^2H_{11/2}$	3114					
	$^4F_{72}$	1716					
	$^4I_{15/2}$	24691	1,35	1,19	1,15	1,17	1,25
	$^4I_{13/2}$	17778					
	$^4I_{11/2}$	14414					
$^2G_{9/2}$	$^4I_{9/2}$	12199					
	$^4F_{9/2}$	9330					
	$^4S_{3/2}$	6172					
	$^2H_{11/2}$	19157					
	$^4F_{72}$	4136					
	$^4F_{3/2}+^4F_{5/2}$	2420					
	$^4I_{15/2}$	26420	0,14	0,15	0,12	0,13	0,11
	$^4I_{13/2}$	19507					
	$^4I_{11/2}$	16143					
$^4G_{11/2}$	$^4I_{9/2}$	13928					
	$^4F_{9/2}$	11059					
	$^4S_{3/2}$	7901					
	$^2H_{11/2}$	7263					
	$^4F_{72}$	5865					
	$^4F_{3/2}+^4F_{5/2}$	4149					
	$^2G_{9/2}$	1729					
	$^4I_{15/2}$	27473	0,67	0,74	0,67	0,62	0,64
	$^4I_{13/2}$	20560					
	$^4I_{11/2}$	17196					
$^4G_{9/2}$	$^4I_{9/2}$	14981					
	$^4F_{9/2}$	12112					
	$^4S_{3/2}$	8954					
	$^2H_{11/2}$	8316					
	$^4F_{72}$	6918					
	$^4F_{3/2}+^4F_{5/2}$	5202					
	$^2G_{9/2}$	2782					
	$^4G_{11/2}$	1053					
	$^4I_{15/2}$	28129	1,46	1,32	1,27	1,27	1,36
	$^4I_{13/2}$	21216					
	$^4I_{11/2}$	17852					
$^2G_{7/2}$	$^4I_{9/2}$	15637					
	$^4F_{9/2}$	12768					
	$^4S_{3/2}$	9610					
	$^2H_{11/2}$	8972					
	$^4F_{72}$	7574					
	$^4F_{3/2}+^4F_{5/2}$	5858					
	$^2G_{9/2}$	3438					
	$^4G_{11/2}$	1709					
	$^4G_{9/2}$	656					

6.2.7 Canales de relajación $\beta_{JJ'}$ del ion Er^{3+}

Los canales de relajación $\beta_{JJ'}$ entre los múltiples J, J', fueron calculados a partir de la ecuación 7 descrita en el capítulo 4 y los resultados fueron incluidos en la tabla 6.14. De acuerdo con estos valores, es observado que las intensidades relativas de las transiciones desde los distintos niveles energéticos hasta el estado base son los mayores. Las transiciones ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ y ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ son las más intensas. De igual manera, cuando la transición tiene lugar entre un estado excitado y el estado base, menor es el valor de la intensidad relativa de la línea. Este comportamiento puede ser explicado debido a que los electrones tienen más posibilidades para realizar el proceso de relajación mediante los diferentes niveles energéticos.

La adición sistemática de pentóxido de fósforo incrementa las transiciones ${}^4I_{13/2}$, ${}^4F_{7/2}$, ${}^4F_{9/2}$, ${}^2H_{11/2}$ y ${}^4G_{5/2}$ en el vidrio con 4% molar de P_2O_5 , respecto del vidrio sin este reactivo. Asimismo, en el vidrio con 8% molar de P_2O_5 , las bandas ${}^4I_{13/2}$, ${}^4F_{7/2}$, ${}^4F_{9/2}$, ${}^2H_{11/2}$, ${}^4G_{5/2}$ y ${}^4G_{7/2}$ también se incrementaron. En el vidrio con 12% molar de P_2O_5 , aumentaron todos los valores de los canales de relajación, y en la matriz con 16% molar de P_2O_5 , las bandas: ${}^4I_{13/2}$, ${}^4F_{7/2}$ y ${}^4G_{5/2}$ incrementaron sus valores en sus canales de relajación.

Tabla 6.14 Canales de relajación $\beta_{JJ'}$ para el Er^{3+} descritas de acuerdo con el porcentaje de P_2O_5 en las muestras

Transición			$\beta_{JJ'}$					
			ΔE (cm^{-1})	0 P_2O_5	4 P_2O_5	8 P_2O_5	12 P_2O_5	16 P_2O_5
${}^4I_{13/2} \rightarrow$	${}^4I_{15/2}$	6913	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
${}^4I_{11/2} \rightarrow$	${}^4I_{15/2}$	10277	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	
	${}^4I_{13/2}$	3364	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	
	${}^4I_{15/2}$	12492	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	
${}^4F_{9/2} \rightarrow$	${}^4I_{13/2}$	5579	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	
	${}^4I_{11/2}$	2215	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
${}^4S_{3/2} \rightarrow$	${}^4I_{15/2}$	15361	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	
	${}^4I_{13/2}$	8448	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	

Continuación de la tabla 6.14

	$^4I_{11/2}$	5084	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	$^4I_{9/2}$	2869	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	$^4I_{15/2}$	18519	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
$^2H_{11/2} \rightarrow$	$^4I_{13/2}$	11606	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
	$^4I_{11/2}$	8242	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
	$^4I_{9/2}$	6027	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	$^4F_{9/2}$	3158	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$^4I_{15/2}$	19157	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
	$^4I_{13/2}$	12244	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
$^4F_{7/2} \rightarrow$	$^4I_{11/2}$	8880	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	$^4I_{9/2}$	6665	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	$^4F_{9/2}$	3796	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	$^4S_{3/2}$	638	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$^4I_{15/2}$	20555	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
	$^4I_{13/2}$	13642	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
$^4F_{3/2} \rightarrow$	$^4I_{11/2}$	10278	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
	$^4I_{9/2}$	8063	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	$^4F_{9/2}$	5194	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	$^4S_{3/2}$	2036	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$^2H_{11/2}$	1398	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$^4I_{15/2}$	22271	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
	$^4I_{13/2}$	15358	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
$^2G_{9/2} \rightarrow$	$^4I_{11/2}$	11994	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	$^4I_{9/2}$	9779	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	$^4F_{9/2}$	6910	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	$^4S_{3/2}$	3752	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$^2H_{11/2}$	3114	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$^4F_{7/2}$	1716	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$^4I_{15/2}$	24691	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	$^4I_{13/2}$	17778	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
$^4G_{11/2} \rightarrow$	$^4I_{11/2}$	14414	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
	$^4I_{9/2}$	12199	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	$^4F_{9/2}$	9330	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	$^4S_{3/2}$	6172	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	$^2H_{11/2}$	19157	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
	$^4F_{7/2}$	4136	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$^4F_{3/2} + ^4F_{5/2}$	2420	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$^4I_{15/2}$	26420	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
	$^4I_{13/2}$	19507	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
	$^4I_{11/2}$	16143	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
$^4G_{9/2} \rightarrow$	$^4I_{9/2}$	13928	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
	$^4F_{9/2}$	11059	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	$^4S_{3/2}$	7901	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	$^2H_{11/2}$	7263	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	$^4F_{7/2}$	5865	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	$^4F_{3/2} + ^4F_{5/2}$	4149	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$^2G_{9/2}$	1729	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$^4I_{15/2}$	27473	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	$^4I_{13/2}$	20560	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
	$^4I_{11/2}$	17196	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	$^4I_{9/2}$	14981	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
$^2G_{7/2} \rightarrow$	$^4F_{9/2}$	12112	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	$^4S_{3/2}$	8954	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	$^2H_{11/2}$	8316	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	$^4F_{7/2}$	6918	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	$^4F_{3/2} + ^4F_{5/2}$	5202	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$^2G_{9/2}$	2782	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	$^4G_{11/2}$	1053	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

7. Análisis y discusión de resultados

7.1 Vidrios dopados con neodimio

De acuerdo con las figuras 5 (b), (c) y (d) ilustradas en la sección 5.4, la adición de pequeñas cantidades de pentóxido de fósforo en la composición del vidrio fluoroindato, incrementa la estabilidad térmica del material. Esto puede ser observado, debido a que el vidrio fluoroindato puro, presenta un ΔT del orden de 109°C (figura 5 (a)) y las muestras con 4, 8 y 16% molar de P_2O_5 , correspondientes a las figuras mencionadas, presentan unos ΔT del orden de 151, 173 y 164°C respectivamente. Contrario a lo anterior, el vidrio con 12% molar de P_2O_5 es térmicamente menos estable que el vidrio fluoroindato puro, presentando un ΔT del orden de 108°C , así como varias fases cristalinas, representadas en los dos picos de cristalización presentes en las figuras 5 (c). De esta manera, el vidrio con 12% molar de P_2O_5 , debido a su gran tendencia a la desvitrificación, es descartado como un posible matriz para una aplicación láser. Sin embargo, en razón a que se está estudiando un sistema amorfo, solo en este estudio es difícil establecer por que, el reactivo (P_2O_5) genera éste comportamiento.

Cuando el ión de Nd^{3+} es excitado con una radiación menor a 850 nm y registrada entre 350 y 850 nm, no es detectada ninguna transición radiativa en razón a la cercanía entre los niveles energéticos del ion de neodimio en este rango espectral (figura 7.1). Es decir, las brechas de energía entre niveles energéticos son del orden de los 1000 cm^{-1} a 2500 cm^{-1} , las cuales pueden ser fácilmente llenadas por fonones de la red, que para el vidrio fluoroindato puro son del orden de 500 cm^{-1} y probablemente un poco mayor, para los vidrios con pentóxido de fósforo, debido a la vibración del enlace P-O. En este sentido, es posible que los electrones excitados a niveles energéticos superiores, al nivel energético $^4\text{F}_{3/2}$, relajen mediante procesos no radiativos hasta éste estado de tiempo de vida, del orden de los 1.7 a 1.99 ms para los diferentes vidrios. La brecha energética entre el

estado ${}^4F_{3/2}$ y el primer estado inferior es del orden de los 6000 cm^{-1} . Así, la energía o fotones emitidos por los electrones al relajar hasta estos estados inferiores, difícilmente es absorbida por los fonones de la red.

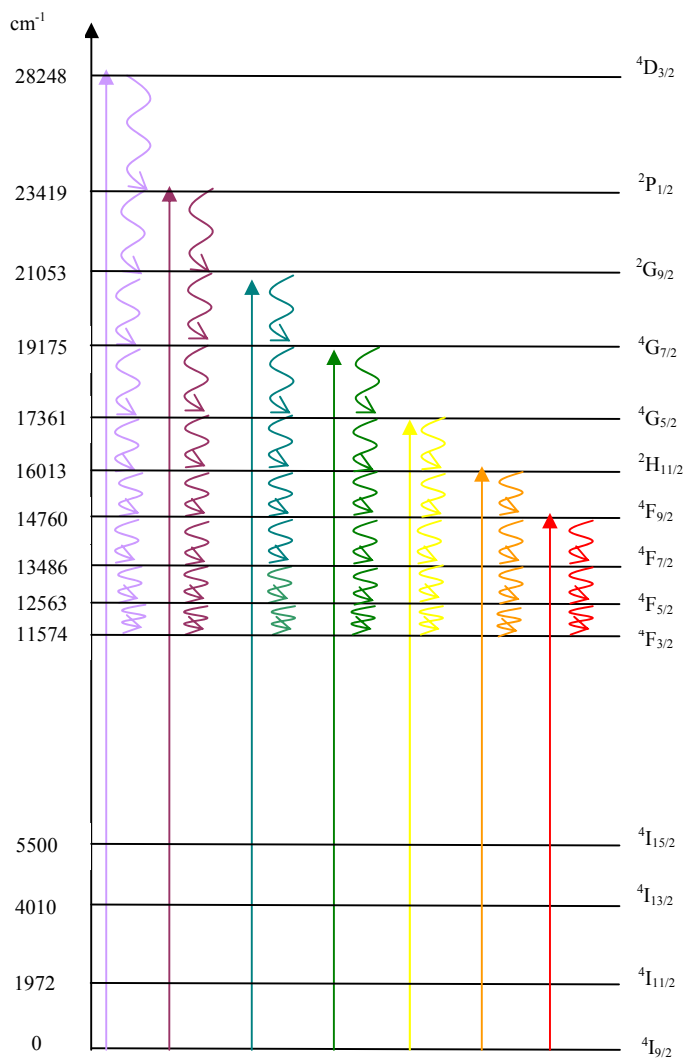


Figura 7.1 Procesos de relajación no radiativos presentes en el ion Nd^{3+} cuando los electrones son excitados a niveles electrónicos superiores al nivel ${}^4F_{3/2}$

A partir de los diferentes parámetros espectroscópicos calculados, y específicamente, del valor de los tiempos de vida de los niveles electrónicos, pueden ser interpretados algunos posibles esquemas láser, esquematizados en la figura 7.2. Para el análisis se tomarán como referencia los valores obtenidos para el vidrio con 8% molar de P_2O_5 . De esta manera, el primer posible esquema láser corresponde a la excitación de los electrones hasta el nivel ${}^4D_{3/2}$, con tiempo de vida de 0.09 ms, seguido de una relajación no radiativa hasta el estado ${}^2P_{1/2}$, con tiempo de vida de 1.07 ms, y posteriormente una transición radiativa hasta el estado base ${}^4I_{9/2}$.

Un segundo esquema láser, puede ser, cuando los electrones son excitados hasta el estado ${}^4G_{7/2}$, con tiempo de vida de 0.43 ms, seguido de una relajación no radiativa hasta el estado ${}^2H_{11/2}$, con tiempo de vida de 15.64 ms desde el cual se debe originar una transición radiativa intensa hasta el estado base. Un tercer esquema láser, podría darse, al excitar los electrones hasta estado ${}^4G_{5/2}$, con tiempo de vida de 0.24 ms, seguido de una relajación no radiativa hasta el estado ${}^2H_{11/2}$ de tiempo de vida de 15.64 ms, desde el cual se podría generar una intensa transición radiativa hasta el estado base. Finalmente, el cuarto esquema láser, corresponde a la excitación de los electrones hasta el estado ${}^4F_{5/2}$ de tiempo de vida 0.71 ms, seguido de una relajación no radiativa hasta el estado ${}^4F_{3/2}$ con tiempo de vida de 1.90 ms, desde el cual se originan varias transiciones radiativas hasta estado base (${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ y ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$).

No obstante, es de aclarar, que para aprovechar los tres primeros esquemas láser, se hace necesario disponer de materiales con menores frecuencias fonónicas que las de los vidrios del presente trabajo, de acuerdo con los resultados obtenidos en los espectros de luminiscencia. De igual manera, la adición de 8% molar de P_2O_5 probablemente aumenta la inhomogeneidad en el ambiente químico, debido a su estructura tetraédrica y sus cadenas estructurales asimétricas, e igualmente puede

ser el responsable del incremento en el índice de refracción de la matriz de 1.492 a 1.52.

En la figura 7.2, se muestran además, las probabilidades de transición $A_{J,J'}$ para los niveles energéticos más representativos o involucrados en los posibles esquemas láser. Como puede ser observado, los niveles a los cuales los electrones son excitados (${}^4D_{3/2}$, ${}^4G_{7/2}$ y ${}^4G_{5/2}$ y ${}^4F_{5/2}$) presentan probabilidades de transición altas, lo que implica, que cuando un electrón llega hasta estos niveles, tiene una alta tendencia a regresar a su estado base (tiempo de vida corto). Contrario a lo anterior, los niveles energéticos inmediatos inferiores; es decir, los ${}^2P_{1/2}$, ${}^2H_{11/2}$ y ${}^4F_{3/2}$, presentan probabilidades de transición menores a los anteriores estados, lo cual implica, que la tendencia a volver al estado de menor energía, no es tan grande (tiempo de vida largo), permitiendo una gran población de electrones.

Finalmente, puede ser observado que los canales de relajación $\beta_{J,J'}$, los cuales pueden ser interpretados como la eficiencia de la transición, incrementa su valor, a medida que la transición se origina desde un nivel energético cercano al estado base ${}^4I_{9/2}$, debido al menor número de niveles energéticos a los cuales pueda relajar el electrón. No obstante, los valores de los canales de relajación para la transición ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ de 0.78 es relativamente alta.

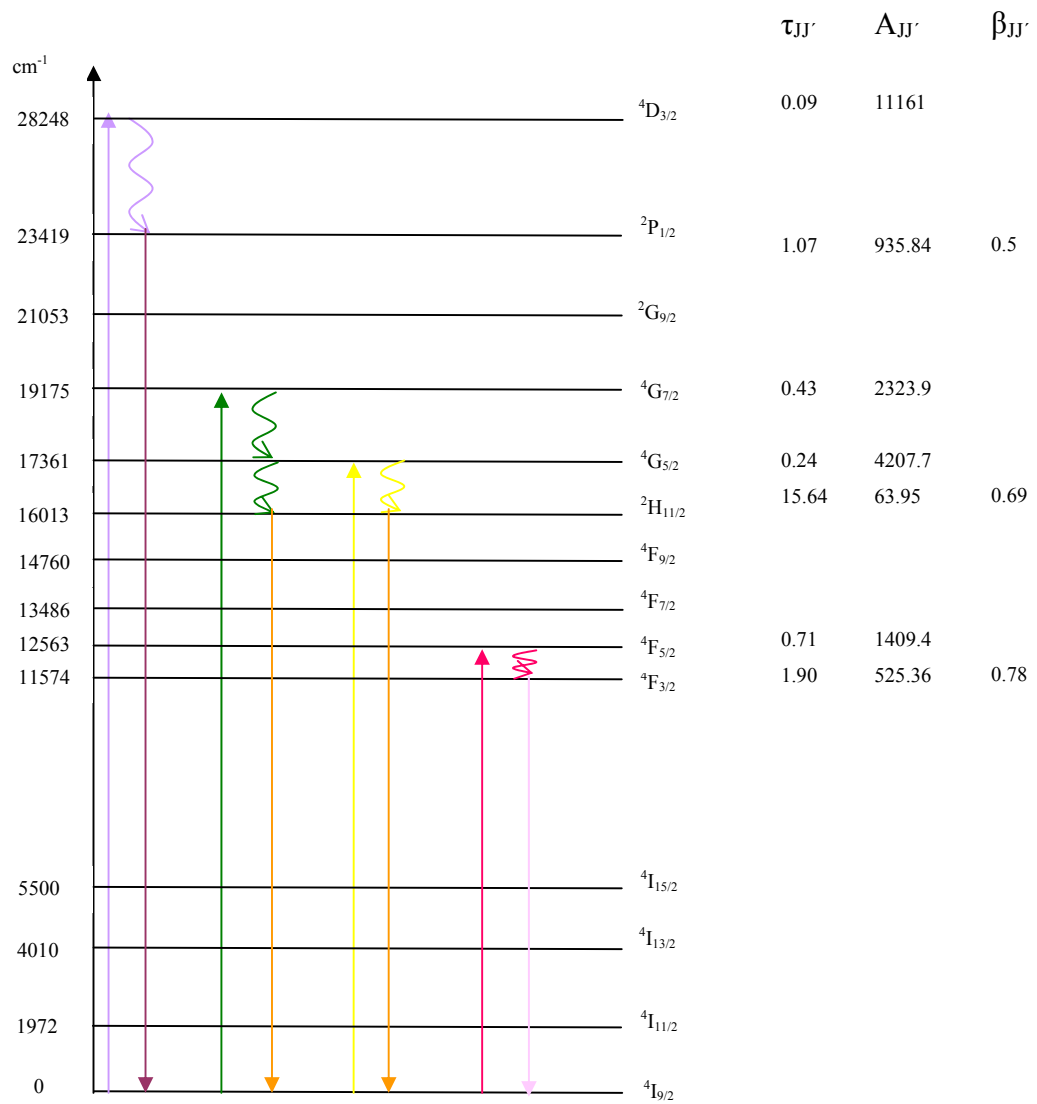


Figura 7.2 Posibles transiciones láser en el ion Nd^{3+} predichos a través de la teoría de Judd y Ofelt

7.2 Vidrios dopados con Erblio

De acuerdo con la similitud en las composiciones, la estabilidad térmica de los vidrios dopados con erbio debe ser muy parecida a la de los vidrios dopados con neodimio, debido a que la única diferencia se encuentra en el dopante, el cual representa solo el 1% molar de la muestra. Así que, no se esperan fuertes cambios en los puntos de vitrificación y cristalización de los vidrios dopados con erbio, en relación a los vidrios dopados con neodimio. En este sentido, la estabilidad térmica de los vidrios con 4, 8 y 12% molar de P_2O_5 son los que presentan mejores características para una aplicación tipo láser, debido al gran valor de ΔT del orden de 151.22, 173.22 y 164.31°C respectivamente.

De otro lado, en los espectros de luminiscencia ilustrados en las figuras 5.9 a 5.15 de la sección 5.6.2, puede ser observado, que los electrones excitados a niveles electrónicos superiores al nivel energético $^4S_{3/2}$, relajan mediante procesos no radiativos hasta éste último estado. Para el efecto de la ilustración, se ha esquematizado uno de los espectros de luminiscencia, junto con los procesos no radiativos y la emisión radiativa centrada en 540 nm (figura 7.3). Los demás procesos son mostrados en la figura 7.4. Este comportamiento, es atribuido al pequeño gap de energía entre los diferentes niveles electrónicos, los cuales son del orden de 1000 a 2000 cm^{-1} . De esta manera, las brechas de energía pueden ser muy fácilmente llenados por fonones de la red. Contrario a lo anterior, el estado $^4S_{3/2}$ y el estado inmediato inferior $^4F_{9/2}$ presentan un gap de energía del orden de 3200 cm^{-1} , siendo menos probable que sea llenado por los fonones de la red, y así, originándose la transición radiativa, centrada en 540 nm, hasta el estado base $^4I_{15/2}$, como se observa en los espectros de luminiscencia.

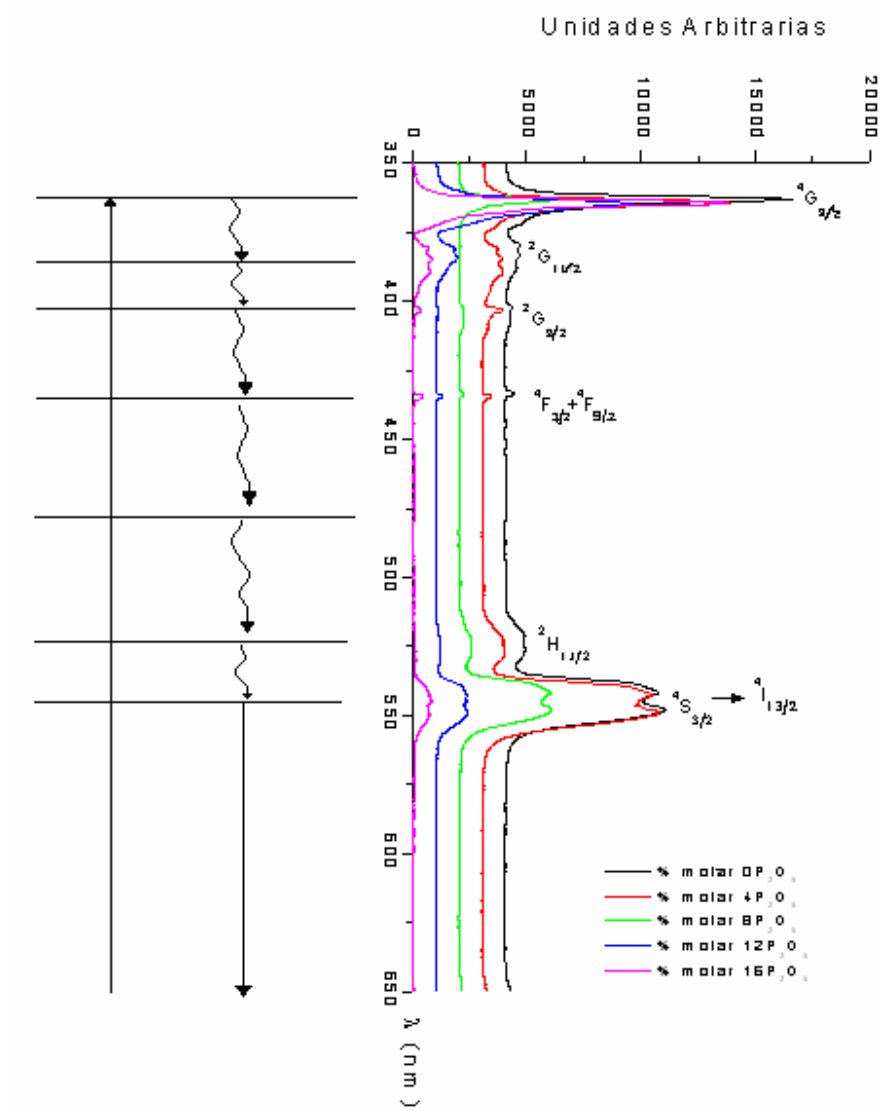


Figura 7.3 Procesos de relajamientos radiativo y no radiativos presentes en el ion Er^{3+} cuando los electrones son excitados al nivel electrónico $4G_{9/2}$

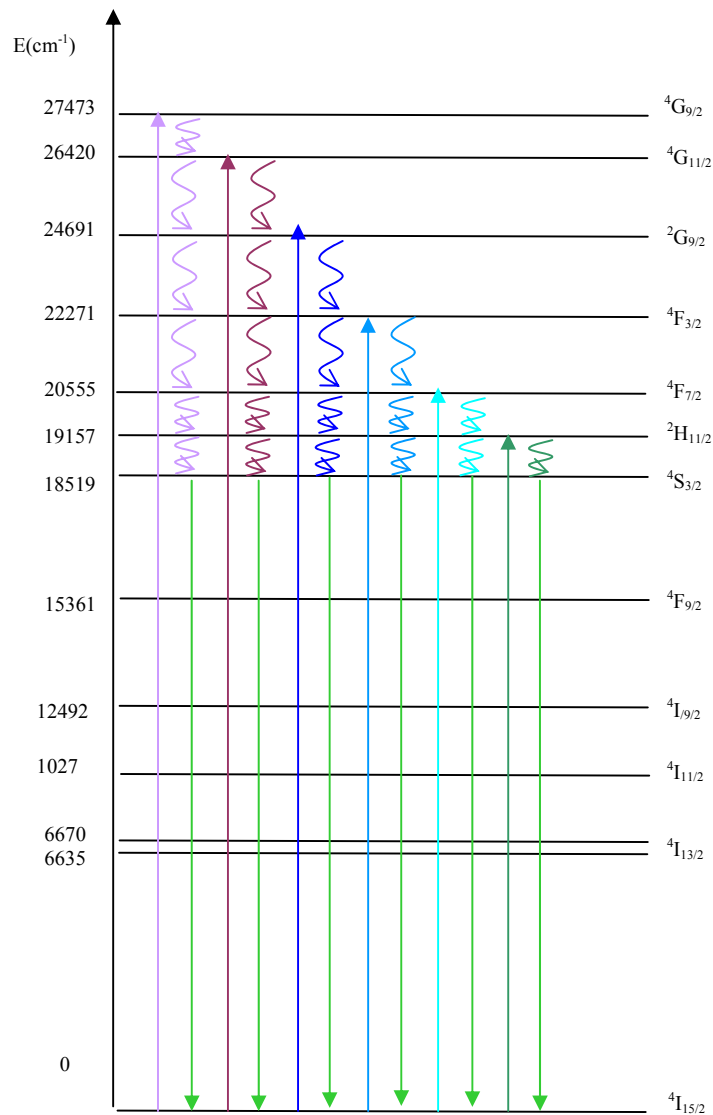


Figura 7.4 Procesos de relajamientos no radiativos presentes en el ion Er^{3+} cuando los electrones son excitados a niveles electrónicos superiores al nivel $^4S_{3/2}$ y la transición láser que se origina desde este estado.

A partir de los diferentes parámetros espectroscópicos calculados, y específicamente, de los tiempos de vida, de los niveles electrónicos, pueden ser interpretadas algunos esquemas láser de tres niveles, esquematizados en las figura 7.5. Para el análisis, se tomará como ejemplo el vidrio con 4% molar de P_2O_5 , debido a que es el que presenta mejor luminiscencia y buena estabilidad

térmica. Un primer esquema láser, puede corresponder a la excitación de los electrones al nivel ${}^4G_{11/2}$, con tiempo de vida de 0.15 ms, seguido de una relajación no radiativa al estado ${}^4G_{9/2}$, con tiempo de vida de 1.19 ms, y posteriormente una transición radiativa hasta el estado base ${}^4I_{15/2}$. Un segundo esquema láser se puede presentar para la excitación de los electrones al estado ${}^4F_{7/2}$, con tiempo de vida de 0.82 ms, seguido de una relajación no radiativa al estado ${}^4S_{3/2}$, con tiempo de vida de 3.87 ms, desde el cual se origina la transición radiativa hasta el estado base.

Un tercer esquema láser se puede obtener con la excitación de los electrones al estado ${}^2H_{11/2}$, con tiempo de vida de 0.65 ms, seguido de una relajación no radiativa al estado ${}^4S_{3/2}$, con tiempo de vida 3.87 ms, desde el cual se origina una transición radiativa hasta el estado base. Finalmente, el cuarto esquema láser corresponde a la excitación de los electrones al estado ${}^4F_{9/2}$, con tiempo de vida de 2.33 ms, seguido de una relajación no radiativo al estado ${}^4I_{9/2}$, con tiempo de vida de 32.33 ms, desde el cual se origina la transición hasta estado base. La transición láser ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ centrada en $1.53\mu\text{m}$, que tiene su origen, cuando los electrones son excitados al estado ${}^4I_{11/2}$, y es una de las transiciones más importantes de este ion.

La no observación en estos materiales de algunos posibles esquemas láser, están asociados a la alta frecuencia fonónica del material, respecto de los gap de energía entre niveles electrónicos sucesivos. De otro lado, las medidas de los espectros de luminiscencia corroboran una vez más, que la teoría de Judd y Ofelt [2,3] funciona muy bien, en la predicción de algunas transiciones láser en éste ión, como la ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ centrada en 540 nm, y observada en todos los espectros de luminiscencia, ilustrados en las figuras 5.9 a 5.15 en la sección 5.6.2. Los valores de las probabilidades de transición $A_{J,J'}$ y canales de relajación $\beta_{J,J'}$, presentan un comportamiento análogo al descrito para el ion de neodimio en la sección 7.1.

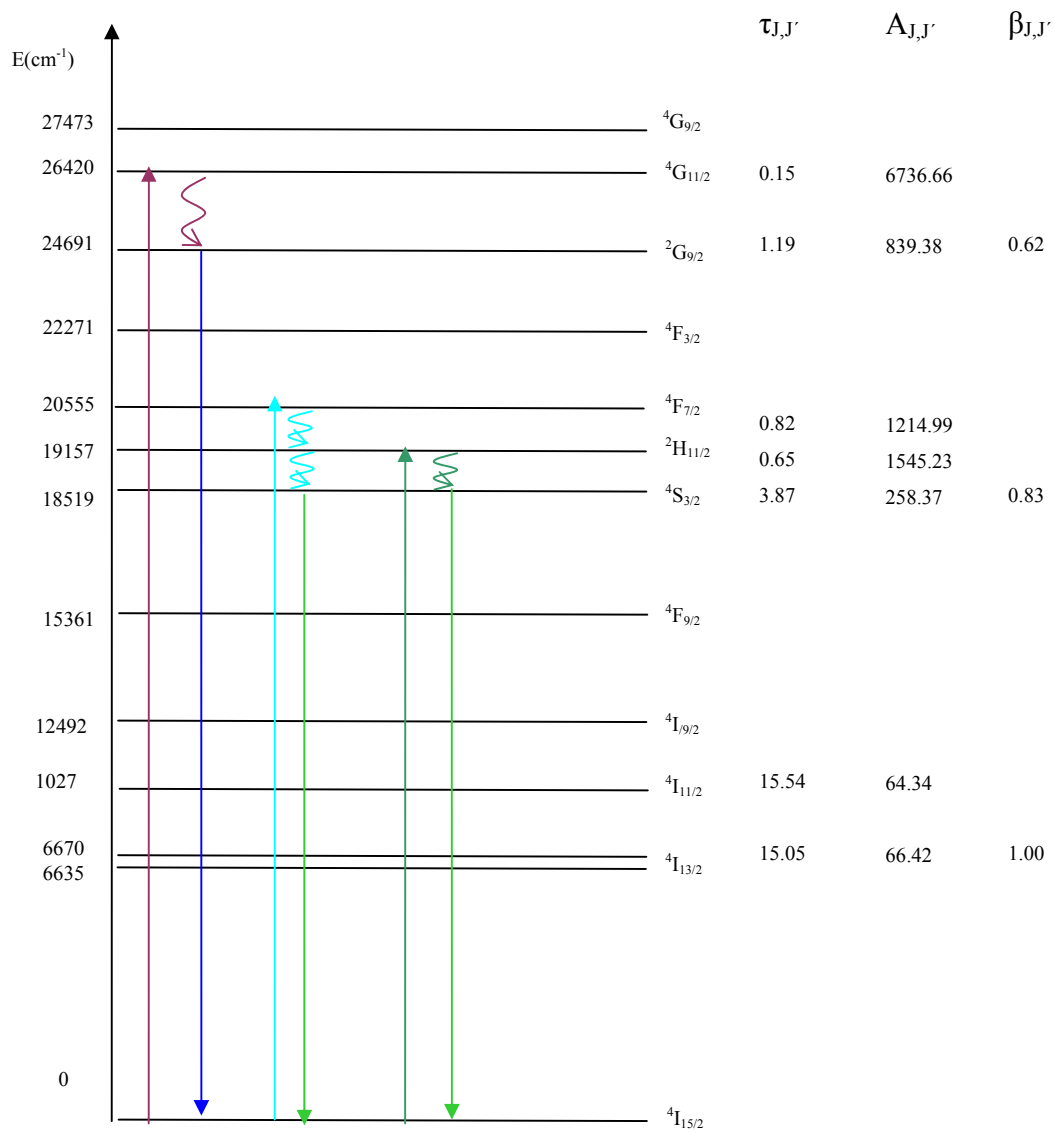


Figura 7.5 Posibles transiciones láser en el ion Er^{3+} predichos a través de la teoría de Judd y Ofelt

8. CONCLUSIONES

1. La adición de P_2O_5 en la composición $35In F_3 - 20Zn F_2 - 16 BaF_2 - 20SrF_2 - 6GaF_3 - 2NaF - 1(Lantánido)$, aumenta el índice de refracción del material, tanto para los vidrios dopados con neodimio como para los vidrios dopados con erbio, lo cual es indispensable para aplicaciones láser.
2. La adición de pentóxido de fósforo en la composición $35In F_3 - 20Zn F_2 - 16 BaF_2 - 20SrF_2 - 6GaF_3 - 2NaF - 1(Lantánido)$, incrementa la resistencia contra la desvitrificación en los vidrios con 4, 8 y 16% molar de P_2O_5
3. Los vidrios con 0, 4, 8 y 12% molar P_2O_5 dopados con Nd^{3+} , tienen tendencia covalente en sus enlaces, debido al pequeño valor del parámetro de intensidad $\Omega_2 < 2 \times 10^{-20}$
4. De acuerdo con lo observado en los espectros de luminiscencia, en los vidrios dopados con neodimio, muy probablemente los electrones experimentaron relajación no radiativa hasta el estado metaestable $^4F_{3/2}$, debido al pequeño gap de energía entre estos niveles, y la alta frecuencia de vibración de la red.
5. La adición de 8% molar de P_2O_5 en la matriz dopada con neodimio, presenta la mayor estabilidad térmica, dentro de la serie de vidrios fabricados. Se incrementó el índice de refracción, y de acuerdo con los cálculos realizados a partir de la teoría de Judd y Ofelt [2, 3], las propiedades espectroscópicas se mantuvieron análogas a la de los vidrios con 0 y 4% molar de P_2O_5 . De suerte que, a partir de estos parámetros, en la serie de vidrios estudiados en este trabajo, el vidrio con 8% molar de P_2O_5 , es el mejor candidato para la fabricación de un prototipo de bastón para láser.

6. Los vidrios dopados con erbio, no presentan una tendencia covalente en sus enlaces.

7. Los electrones excitados hasta los niveles energéticos de menor λ que el estado metaestable $^4S_{3/2}$, experimentan relajaciones no radiativas hasta éste, originándose una emisión láser de 540 nm aproximadamente.

8. El vidrio con 4% molar de P_2O_5 , dopado con erbio, presenta muy buena estabilidad térmica, y un buen índice de refracción mayor a 1.5. De acuerdo con los cálculos realizados con la teoría de Judd y Ofelt [2, 3], sus propiedades espectroscópicas son similares a aquellas que presenta la matriz sin pentóxido de fósforo. En el mismo sentido, para la transición láser desde el nivel energético $^4S_{3/2}$, presenta en esta matriz la mayor intensidad en la luminiscencia. De acuerdo con estos resultados, ésta composición es la mejor, entre las estudiadas, para la fabricación de un prototipo de bastón para láser.

9. Referencias

- [1] Gschneidner Kart A., Eyring LeRoy, handbook on the physics and chemistry of rare earths, Elsevier, volumen 25, (1998) 104-105
- [2] B.R. Judd, Physical. Rev. 127 (1962) 750.
- [3] G.S. Ofelt, J. Chem. Phys. 37 (1962) 511
- [4] Kittel Charles, Introducción a la Física del Estado Sólido, tercera edición, editorial Reverté, 1995
- [5] J. Zarzycki, Glasses and the Vitreous State, Cambridge Solide State Science Series, editorial Cambridge University Press, 1990
- [6] J.H. Campbell, T.I. Suratwala , C.B. Thorsness, J.S. Hayden, A.J. Thorne, J.M. Cimino, A.J. Marker III , K. Takeuchi, M. Smolley, G.F. Ficini-Dorn, Journal of Non-Crystalline Solids 263 & 264 (2000) 342-357
- [7] P. Rüdiger http://www.rp-photonics.com/laser_crystals_versus_glasses.html
- [8] R. Renata, Jorgensen Christian, Lasers and Excited States of Rare Earths, page 107, Springer-Verlag, 1977
- [9] Hans Bach, The Properties of Optical Glass, Springer, 1995, Page 5
- [10] W. A. Gambling, The rise and rise of optical fibers, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron 6 (6), 1084 (2000)
- [11] M. Diagonnet, rare earth doped fiber laser and amplifier, second edition, page 450, editorial CRC Press, 2001

- [12] S. Agathopoulos, D.U. Tulyaganov, J.M.G. Ventura, S. Kannan, A. Saranti, M.A. Karakassides, J.M.F. Ferreira a, *Journal of Non-Crystalline Solids* 352 (2006) 322
- [13] Marvin J. Weber, *Handbook of Lasers*, 2001 CRC Press LLC
- [14] I. Ardelean, Dorina Rusu, C. Andronache, V. Ciobota, *Materials Letters* 61 (2007) 3301–3304
- [15] Hongtao Suna, Liyan Zhanga, Shiqing Xua, Shixun Daia, Junjie Zhanga, Lili Hua, Zhonghong Jiang, *Journal of Alloys and Compounds* 391 (2005) 151–155
- [16] A. S antic, A. Mogus-Milankovic, K. Furic, V. Bermanec, C.W. Kim, D.E. Day, *Journal of Non-Crystalline Solids* 353 (2007) 1070–1077
- [17] J. H. Campbell, T.I Suratwala, *J. of Non-Cristaline Solids* 263-234 (2000) 318
- [18] R. Lebullenger, L.A.O. Nunes, A.C. Hernandez, *Journal of Non-Crystalline Solids* 161 (1993) 277-281
- [19] M. Poulain, M Poulain and J. Lucas, *Mater. Res. Bull.* 10 (1975) 243
- [20] Annapoorna Akella, Elizabeth A. Downing, Lambertus Hesselink *Journal of Non-Crystalline. Solids* 213 & 214 (1997) 1-5
- [21] C. X. Cardoso, Y. Messaddeq, L.A.O. Nunes and M.A. Aegerter, *Journal of Non-Crystalline Solids* 161 (1993) 277-281
- [22] Dennis S. Tucker, Michael R. Lapointe, Zhiyong Jia, *Journal of Materials Research*, Vol 22 No 6, (2007) 1431-1434
- [23] M. Clara Gonfalves and Rui M. Almeida, *Materials Research Bulletin*, Vol. 31, No. 5, pp. 573-580, 1996

- [24] Bruce Phebus, Boris Getman, Shane Kiley, David Rauser 1, Mischa Plesha 2, Roger H. Terrill, *Solid State Ionics* 176 (2005) 2631 – 2638
- [25] A. Boutarfaia, M. A. Poulain, *Solid State ionics* 144 (2001) 117-121
- [26] Nishii et al. *Chem. Abstracts* vol. 104 No. 12 Ab. No. 94043g Aug. 198
- [27] B. J. Costa, A. Soufiane, Y. Messaddeq, *Quimica Nova* 21 (3) 1998
- [28] Joanna Pisarskaa, Bozena Kaczmarczyk, Zbigniew Mazurak, Micha Z elechowera, Tomasz Goryczka, Wojciech A. Pisarski, *Physica B* 388 (2007) 331
- [29] R. Lebullenger, L.A.O. Nunes, A.C. Hernandez, *Journal of Non-Crystalline Solids* 161 (1993) 277-281
- [30] Y. Messaddeq, S. Inoue, C.T.M. Ribeiro, L.A.O. Nunes, *Journal of Non-Crystalline Solids* 213 & 214 (1997) 179-183
- [31] Joanna Pisarskaa, Bozena Kaczmarczyk, Zbigniew Mazurak, Micha Z elechowera, Tomasz Goryczka, Wojciech A. Pisarski, *Physica B* 388 (2007) 331
- [32] Brian G. Wybourne, *Journal of Alloys and Compounds* 380 (2004) 96-100
- [33] Jean-Claude G. Bunzli, Steve Comby, Anne-Sophie Chauvin, Caroline D. B. Vandevyver, *Journal Of Rare Earths* 25 (2007) 257 – 274
- [34] A, Flórez, J. F. Martínez, M. Flórez, P. Porcher, *Journal of Non-Crystalline Solids* 284 (2001) 261-267
- [35] J.H. Choi, Alfred Margaryan, Ashot Margaryan, F.G. Shi, *Journal of Luminescence* 114 (2005) 167–177
- [36] Stuart D. Jackson, Terence A. King, *Optics Communications* 172 (1999) 271

- [37] D. Descamps, C. Gamache, D. Husson, A. Migus, *Optics Communications* 168 (1999)123–130
- [38] Y.C. Ratnakaram *, A. Viswanadha Reddy, *Journal of Non-Crystalline Solids* 277 (2000) 142-154
- [39] S.S.L. Surana *, Y.K. Sharma 1, S.P. Tandon, *Materials Science and Engineering B83* (2001) 204–209
- [40] L.C. Courrol, L.R.P. Kassab, V.D.D. Cacho, S.H. Tatum, N.U. Wetter, *Journal of Luminescence* 102–103 (2003) 101–105
- [41] A. Florez, Y. Messaddeq, O.L. Malta, M.A. Aegerter, *Journal of Alloys and Compounds* 277 (1995) 135–140
- [42] V.K. Bogdanov, W.E.K. Gibbs, D.J. Booth, J.S. Javorniczky, P.J. Newman, D.R. MacFarlane, *Journal of Non-Crystalline Solids* 256&257 (1999) 288-293
- [43] Zhao Suling, Hou Yanbing, Sun Li, Xu Xurong, *Journal of Alloys and Compounds* 311 (2000) 57–59
- [44] Wojciech A. Pisarski, Joanna Pisarska, Witold Ryba-Romanowski, *Chemical Physics Letters* 380 (2003) 604-608
- [45] J.S. Wang, E.M. Vogel, E. Snitzer, *Opt. Mater.* 3 (1994) 187
- [46] S. Tanabe, N. Sugimoto, S. Ito, T. Hanada, *J. Lumin.* 87–89 (2000)670
- [47] X. Feng, S. Tanabe, T. Hanada, *J. Am. Ceram. Soc.* 84 (2001) 165
- [48] S. Brovelli, A. Galli, R. Lorenzi, F. Meinardi, G. Spinolo, S. Tavazzi, V. Sigaev, S. Sukhov, P. Pernice, A. Aronne, E. Fanelli, A. Paleari, *Journal of Non-Crystalline Solids* 353 (2007) 2150–2156

- [49] Taccheo, S., Laporta, P., and Svelto, O., Widely tunable single-frequency erbium-ytterbium phosphate glass laser, *Appl. Phys. Lett.* 68, 2621 (1996).
- [50] Hutchinson, J. A. and Allik, T. H., Diode array-pumped Er,Yb:phosphate glass laser, *Appl. Phys. Lett.* 60, 1424 (1992).
- [51] Laporta, P., Taccheo, S., and Svelto, O., High-power and high-efficiency diode-pumped Er:Yb:glass laser, *Electron. Lett.* 28, 490 (1992).
- [52] I.R. Martin, V.D. Rodriguez *, V. Lavin, U.R. Rodriguez-Mendoza, *Journal of Luminescence* 72-74 (1997) 954-955
- [53] S.W. Harun, H.A. Abdul-Rashid, S.Z. Muhd-Yassin, M.K. Abd-Rahman, K.K. Jayapalan, H. Ahmad, *Optics & Laser Technology* 40 (2008) 88–91
- [54] B. Dong, T. Yang, M.K. Lei, *Sensors and Actuators B* 123 (2007) 667-640
- [55] Garima Tripathi, Vineet Kumar Rai, S.B. Rai, *Optical Materials* 30 (2007) 201
- [56] Van Vleck, *Journal of Chemical Physics* 11, 57 (1937)
- [57] G. H. Dieke, *Spectra and Energy Levels of Rare Earth Ions in Crystals*, page 54 (1968), edit, John Wiley & Sons, INC.
- [58] W.T. Carnall, P.R. Fields, and B.G. Wybourne, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, *Journal of Chemical Physics*, 42 (1965) 11
- [59] R. D. Peacock, *Struct. Bonding (Berling)* 22 (1975) 83
- [59] K. Binnemans, R. Van Deun, C. Görller-Walrand, J.L. Adam, *Journal of Alloys and Compounds* 275 (1998) 455-460

[60] E. Ulloa, análisis de hipersensitividad en Er^{3+} en vidrios no óxidos, tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, 2005