

**CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE VIDRIOS NO ÓXIDOS  
DOPADOS CON Er<sup>3+</sup>**

**ALVARO INSTAN BALLESTEROS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE FÍSICA  
BUCARAMANGA  
2006**

**CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE VIDRIOS NO ÓXIDOS  
DOPADOS CON Er<sup>3+</sup>**

**ALVARO INSTAN BALLESTEROS**

**Tesis para optar al título de**

**FISICO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**ESCUELA DE FÍSICA**

**BUCARAMANGA**

**2006**

***A mi Madre, por su apoyo incondicional y por sus grandes enseñanzas en el transcurso de la vida.***

ALVARO INSTAN BALLESTEROS

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Ancizar Flórez, por sus orientaciones, siempre buscando el perfeccionamiento de nuestras ideas.

A la Universidad Industrial de Santander por sus ayudas a través de muchas etapas de la vida universitaria.

A Elkin Mauricio Ulloa Reyes por su ayuda en la obtención de los espectros de absorción de los vidrios.

A Carlos Eliécer Estupiñán por sus aportes y colaboración cada vez que la requería.

A todos aquellos compañeros y amigos, con los que a lo largo de la carrera compartimos nuestros conocimientos y nuestras vivencias, y que de alguna manera ayudaron a mi formación, tanto profesional como humana.

# CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. EL ESTADO VÍTREO	4
1.1 VIDRIOS DE SÍLICA	5
1.2 VIDRIOS CON BASE EN HALUROS	6
1.2.1 VIDRIOS FLUORUROS	7
1.2.2 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS VIDRIOS FLUORUROS	9
1.2.2.1 ENERGÍA FONÓNICA	10
2. LAS TIERRAS RARAS	12
2.1 CONFIGURACIÓN ELECTRÓNICA DE LAS TIERRAS RARAS	12
2.2 IÓN $\text{Er}^{3+}$	13
2.3 ESPECTROSCOPÍA DE LAS TIERRAS RARAS	14
2.4 APLICACIONES	17
3. TEORÍA DE JUDD-OFELT	20
3.1 HIPÓTESIS DE LA TEORÍA DE JUDD-OFELT	20
3.2 FUERZA DE OSCILADOR TEÓRICA	21
3.3 TRANSICIONES DE DIPOLO MAGNÉTICO	25
3.4 PARÁMETROS ESPECTROSCÓPICOS	26
4. PARTE EXPERIMENTAL	28
4.1 FABRICACIÓN DE LOS VIDRIOS	28

4.2 PARÁMETROS FÍSICOS	31
4.3 PROPIEDADES ÓPTICAS	32
4.3.1 ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN	32
5. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	38
5.1 FUERZA DE OSCILADOR EXPERIMENTAL Y TEÓRICA	38
5.2 PARÁMETROS DE INTENSIDAD $\Omega_{\lambda}$	41
5.3 PROCESOS DE RELAJACIÓN	44
5.4 PARÁMETROS ESPECTROSCÓPICOS	45
6. CONCLUSIONES	49
REFERENCIAS	74

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Formación vítrea y cristalina en función de la temperatura.	5
Figura 2. Transmisión óptica de algunos cristales, vidrios fluoruros y vidrios de sílice.	9
Figura 3. Evolución temporal de la atenuación.	10
Figura 4. Diagrama esquemático del desdoblamiento de los niveles de energía de las tierras raras debido a las diferentes interacciones.	17
Figura 5. Niveles de energía de los iones lantánidos trivalentes.	18
Figura 6. Espectros de absorción de vidrios fluorofosfatos dopados con $\text{Er}^{3+}$ .	33
Figura 7. Espectros de absorción de vidrios fluoroplomados dopados con $\text{Er}^{3+}$ .	34
Figura 8. Niveles de energía para el ión libre $\text{Er}^{3+}$ y embebido en vidrios fluorofosfatos y fluoroplomados.	35
Figura 9. Espectros de absorción de vidrios fluorofosfatos dopados con $\text{Er}^{3+}$ .	36
Figura 10. Espectros de absorción de vidrios fluoroplomados dopados con $\text{Er}^{3+}$ .	37

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Configuración electrónica de átomos e iones trivalentes de las tierras raras.	13
Tabla 2. Reactivos utilizados, grado de pureza, y empresa fabricante.	29
Tabla 3. Temperaturas de fusión y recocido.	30
Tabla 4. Densidad de vidrios fluoroplomados y fluorofosfatos, dopados con diferentes concentraciones de $\text{Er}^{3+}$ .	31
Tabla 5. Índice de refracción y camino óptico de vidrios fluoroplomados y fluorofosfatos dopados con diferentes concentraciones de $\text{Er}^{3+}$ .	32
Tabla 6. Comparación de las fuerzas de oscilador experimental y teórica $f$ , para absorción, desde el estado base $^4\text{I}_{15/2}$ de $\text{Er}^{3+}$ , en vidrios fluorofosfatos dopados con diferentes concentraciones de $\text{Er}^{3+}$ .	39
Tabla 7. Comparación de las fuerzas de oscilador experimental y teórica $f$ , para absorción, desde el estado base $^4\text{I}_{15/2}$ de $\text{Er}^{3+}$ , en vidrios fluoroplomados dopados con diferentes concentraciones de $\text{Er}^{3+}$ .	40
Tabla 8. Valores de los elementos de matriz del operador dipolar eléctrico $[U^{(\lambda)}]^2 = \langle J^N J \  U^\lambda \  J^N J \rangle$ con $\lambda=2, 4, 6$ .	42
Tabla 9. Parámetros fenomenológicos de intensidad $\Omega_\lambda$ ( $*10^{-20} \text{ cm}^2$ ) para vidrios	

para vidrios fluorofosfatos y fluoroplomados dopados con 1% Er<sup>3+</sup>. 43

Tabla 10. Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluorofosfatos, fluoroplomados y fluoroindatos dopados con 1% Er<sup>3+</sup>. 46

## ANEXOS

Anexo 1: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluorofosfatos dopados con 0.5% Er<sup>3+</sup>.

Anexo 2: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluorofosfatos dopados con 1.0% Er<sup>3+</sup>.

Anexo 3: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluorofosfatos dopados con 1.5% Er<sup>3+</sup>.

Anexo 4: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluorofosfatos dopados con 2.0% Er<sup>3+</sup>.

Anexo 5: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluoroplomados dopados con 0.5% Er<sup>3+</sup>.

Anexo 6: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluoroplomados dopados con 1.0% Er<sup>3+</sup>.

Anexo 7: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluoroplomados dopados con 1.5% Er<sup>3+</sup>.

Anexo 8: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluoroplomados dopados con 2.0% Er<sup>3+</sup>.

# RESUMEN

Título: CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE VIDRIOS NO ÓXIDOS DOPADOS CON  $\text{Er}^{3+}$ \*

Autor: ÁLVARO INSTAN BALLESTEROS\*\*

Palabras claves: Erblio, Probabilidad de transición, parámetros espectroscópicos, fuerza de oscilador.

## Descripción

El blindaje producido por las capas  $5s^2$  y  $5p^6$  a la configuración interna  $4f^N$  hace a los iones tierras raras diferentes a los otros elementos de la tabla periódica. Este blindaje hace que las transiciones de dipolo eléctrico no sean afectadas significativamente por el ambiente químico alrededor de los iones tierras raras. La teoría establecida por Judd and Ofelt es una Buena herramienta cuando queremos estudiar este tipo de iones en diferentes vidrios.

En este trabajo presentamos resultados de las propiedades ópticas del ión  $\text{Er}^{3+}$  en vidrios no óxidos. Se prepararon muestras de vidrios fluorofosfatos y fluoroplomados dopados con diferentes concentraciones de  $\text{Er}^{3+}$  (0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 %). Para todas las muestras, se midieron sus parámetros físicos como índice de refracción, densidad, y se pulieron hasta darles calidad óptica, con el mismo camino óptico. Se obtuvieron los espectros de absorción en el rango espectral desde 300 a 1100 nm, a temperatura ambiente; y a partir de estos se calcularon las fuerzas de oscilador experimental. Usando el modelo de intensidades  $4f - 4f$ , se obtuvieron los parámetros  $\Omega_\lambda$  ( $\lambda = 2, 4, 6$ ), a partir de los cuales se calcularon los parámetros espectroscópicos característicos: tiempo de vida radiativa  $\tau_R$ , probabilidad de transición  $A_{JJ'}$ , canales de relajación  $B_{JJ'}$ . En base a estos parámetros es posible identificar transiciones para aplicaciones en láser.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de ciencias. Escuela de Física. Director: Dr. Ancizar Flórez

## ABSTRACT

Title: OPTICAL CHARACTERIZATION OF NO OXIDES GLASSES DOPED WITH  $\text{Er}^{3+}$ .

Author: ÁLVARO INSTAN BALLESTEROS\*\*.

Key words: Erbium, probability of transition, spectroscopic parameters, oscillator strength.

### Description

The screening produced by the  $5s^2$  y  $5p^6$  shells to internal configuration  $4f^N$  to make the rare earth ions different to others elements of periodic table. That screening make that electrical dipole transitions are not affected significantly by the chemical environment around of the rare earth ions. The theory established by Judd and Ofelt is a good help when we want to study this type of ions in different glasses.

In this work we presents the results of the optical properties of  $\text{Er}^{3+}$  -doped no ixide glasses. We prepared samples of fluorophosphates and fluorolead glasses with different concentrations of  $\text{Er}^{3+}$  (0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 %). For all the samples were measured their physical parameters: refractive index and density; and were polished until optical quality with the same optical way. The absorption spectrum were obtained at room temperature in the spectral range from 300 to 1100 nm, and from these were calculated the experiemental oscillator strength. Using the model of intensities  $4f - 4f$ , we obtained the parameters  $\Omega_\lambda$  ( $\lambda = 2, 4, 6$ ), from which were calculated the characteristics spectroscopic parameters: lifetime  $\tau_R$ , transition probability  $A_{JJ'}$ , branching ratio  $B_{JJ'}$  and non radiative relaxation rate  $W_{NR}$ . Based in these paramenteres are possible identified transitions for laser applications.

---

\* degree Project.

\*\* Facultad de ciencias. Escuela de Física. Director: Dr. Ancizar Flórez.

## INTRODUCCIÓN

El gran historial de logros de la ciencia, está sólidamente apoyado en los avances que continuamente está proporcionando la ciencia de los materiales. De hecho, por su importancia en materiales, ya hacen parte de nuestras vidas, como lo hace la energía. Entre los materiales más investigados a nivel general, los sistemas vítreos juegan un papel muy importante, de estos, el más importante ha sido el vidrio de sílica, pues es usado hasta en producción de fibra óptica. La investigación de estos vidrios ha sido lo suficientemente amplia y productiva, hasta tal punto que actualmente está físicamente agotada. Los avances científicos y tecnológicos de los sistemas vítreos, reflejados en aplicaciones tan importantes como el láser, han traído progresos muy importantes a la sociedad, los que se ven reflejados en la industria metalmecánica, opto-electrónica, comunicaciones, medicina, etc; lo cual ha creado un gran impacto en nuestras vidas.

Dentro del acelerado desarrollo y variado uso del láser, haciendo referencia a los materiales que son utilizados como medios activos, se ha llegado a la conclusión que los vidrios, en relación con los cristales, ofrecen mejores ventajas para este tipo de aplicaciones. Estas ventajas son, entre otras, las siguientes: los materiales vítreos pueden ser dopados en altas concentraciones con excelente uniformidad, ofrecen bastante flexibilidad en su tamaño y forma, pueden ser relativamente baratos en grandes volúmenes de producción.

En el desarrollo de nuevas familias vítreas, el sistema a base de fluoruros, tuvo como primer representante al fluoruro de zirconio ( $ZrF_4$ ), el que mezclado con otros fluoruros, mostraba grandes propiedades vitrificantes [1,2]. Los sistemas de esta familia, han mostrado que superan en algunas propiedades a los vidrios de sílica, como por ejemplo, una transmisión hasta 7.000 nm y una frecuencia fonónica de aproximadamente  $500\text{ cm}^{-1}$ .

Producto de la intensa investigación que se adelantó con el descubrimiento del sistema a base de Zr; una nueva familia de vidrios a base de fluoruros surgió. El sistema donde el mayor componente era el Fluoruro de Indio ( $\text{In F}_3$ ), presenta una ventana de transmisión aún mayor (8.000 nm) que los fluorozirconados, una menor frecuencia fonónica ( $400\text{cm}^{-1}$ ), además de una mayor estabilidad frente a la cristalización y mejores propiedades físicas y químicas [3]. En las últimas dos décadas han aparecido nuevas familias de materiales vítreos basados en halogenuros inorgánicos, los cuales son sintéticos, en contraste con los vidrios de óxidos, particularmente de silicio, que existen como minerales naturales y han ocupado desde siempre la posición dominante en la ciencia del vidrio. Entre estas más recientes familias de materiales vítreos podemos mencionar, aquéllas donde el mayor componente del sistema es el Fluoruro de Aluminio, Fluoruro de Fósforo, Fluoruro de Plomo, entre otros, los cuales presentan características muy similares a los sistemas fluoruros mencionados antes.

Entre las principales características de estos nuevos materiales vítreos, que los hacen cada vez más atractivos, está su gran capacidad para albergar iones de tierras raras. Cuando estos materiales son dopados con iones de tierras raras trivalentes, exhiben una serie de propiedades muy interesantes [4]. Por tener la capa 4f blindada por las capas más externas  $5s^25p^6$ , las transiciones dentro de la configuración 4f son prácticamente insensibles a la matriz, y a las pequeñas variaciones de temperatura. Gracias a estas características únicas de estos iones, se han venido haciendo grandes esfuerzos orientados a obtener diferentes dispositivos ópticos utilizando vidrios fluoruros dopados con iones de tierras raras.

El primer capítulo de este trabajo consistirá en una breve descripción de algunas familias vítreas y sus aplicaciones en diferentes dispositivos, resaltando sus propiedades ópticas, ventajas y desventajas.

Las grandes propiedades que poseen los iones de tierras raras estimulan al desarrollo de nuevas tecnologías. Cuando estos iones son introducidos en diferentes matrices, poseen características espectroscópicas muy especiales, por lo que son objeto de investigación en diferentes grupos, especialmente aquellos que están ligados a las comunicaciones. El capítulo dos estará dedicado a las propiedades de estas tierras raras.

La teoría de Judd y Ofelt, publicada independientemente en 1962 [5,6], es el mecanismo que explica convenientemente las intensidades de las líneas espectrales para la mayoría de los iones lantánidos. En el capítulo tres se describirán los detalles de esta teoría, la cual nos permitirá calcular los parámetros de intensidad, con estos parámetros se pueden calcular los parámetros espectroscópicos, probabilidad de transición, canales de relajación, tiempo de vida radiativo, sección transversal de emisión, y probabilidad de decaimiento no radiativo.

En el capítulo cuatro será expuesto el procedimiento experimental. Se describirán las diferentes etapas llevadas a cabo en la elaboración de las muestras, y se comentará a cerca de la infraestructura disponible en el Laboratorio de Materiales Fotónicos de la Universidad Industrial de Santander, para la preparación de las muestras vítreas, y la toma de medidas de índice de refracción, camino óptico y densidad.

En el capítulo cinco se procede a obtener los resultados, se calcularán las fuerzas de oscilador, parámetros de intensidad y parámetros espectroscópicos en cada una de las muestras más relevantes. Con los datos obtenidos, se busca cual de las posibles transiciones puede ser utilizada con fines tecnológicos y se hará un análisis de los resultados.

En el capítulo siete se presentarán las conclusiones del trabajo. El capítulo ocho contiene las tablas adicionales de los datos para las familias estudiadas, y que fueron objeto del estudio para sacar conclusiones de las matrices y concentraciones con mejores características para aplicaciones tecnológicas.

## EL ESTADO VITREO

Desde el punto de vista físico, el vidrio es una sustancia líquida sobrefundida y solidificada, cuyos arreglos atómicos permiten clasificarlos dentro de los amorfos, con una simetría solo de corto alcance. No obstante sus cualidades, ofrece una gama amplia de posibilidades de aplicación, entre las cuales, una de las que más se destaca, es la aplicación en dispositivos ópticos.

También es posible definir un vidrio, como un líquido que ha perdido su habilidad para fluir, y con características estructurales de líquido, en el cual se presentan, una transición vítrea, y una transición hacia su cristalización. La manera más fácil de obtener un vidrio es, enfriándolo desde su estado líquido, lo suficientemente rápido para evitar que ocurra la cristalización.

Para entender el proceso de transformación de líquido a vidrio, se puede monitorear los cambios de entalpía o de volumen en función de la temperatura. La figura 1, muestra cómo, al bajar la temperatura desde su estado líquido, dos cosas pueden ocurrir:

1. Si el líquido cristaliza, se observará una discontinuidad en la curva de volumen versus temperatura a la temperatura  $T_x$  de fusión (línea punteada), que corresponde a una transformación de primer orden.
2. Si la cristalización es “ignorada”, el líquido pasa a un estado metaestable superenfriado (línea gris oscuro) y la curva permanece con la misma pendiente. Al continuar enfriando, llega un momento en que, a la temperatura  $T_g$ , la pendiente de la curva sufre una discontinuidad, a esta temperatura se le conoce como temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), y es aquella a la cual, el arreglo vítreo es alcanzado.

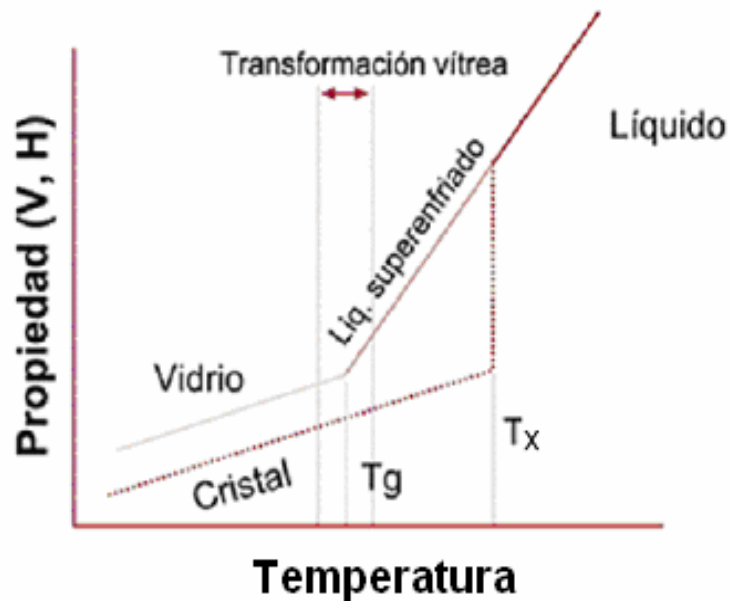


Figura. 1 Formación vítrea y cristalina en función de la temperatura.

En la proximidad de la transición vítrea, el líquido pasa, de ser un líquido extremadamente viscoso, a ser un sólido rígido que retiene las características estructurales de un líquido; es así como la viscosidad se convierte en una propiedad que puede ser usada para definir la transición vítrea de un material.

La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), de un sólido amorfo determina su estabilidad química; además de sus propiedades mecánicas y ópticas, ya que hay que recordar que, el vidrio, al ser un material en un estado metaestable, tenderá a alcanzar un estado de equilibrio.

## 1.1 VIDRIOS DE SÍLICA

Cuando se habla de sistemas vítreos, automáticamente los asociamos con aquellos que tienen como base la sílice ( $SiO_2$ ), debido a su origen natural, y su abundancia en la naturaleza. Estos sistemas son los precursores de los sistemas vítreos más antiguos, y

por tener un enorme potencial de aplicaciones, han logrado ocupar un lugar privilegiado en la industria del vidrio, inclusive en los usos más avanzados, como por ejemplo, el láser y la fibra óptica.

Los vidrios de sílica son ópticamente transparentes, desde el ultravioleta cercano hasta el infrarrojo medio, y permiten alcanzar atenuaciones del orden de 0.2 dB/Km en longitudes de onda de 1550 nm, y 0.35 dB/Km en longitudes de onda de 1300 nm. Otra característica importante de estos vidrios, es su alta frecuencia fonónica, de aproximadamente  $1100 \text{ cm}^{-1}$ .

Las posibilidades de hacer estos vidrios aún más útiles para la tecnología están físicamente agotadas, por lo que surge la necesidad de encontrar nuevas composiciones vítreas que los sustituyan en pro del avance de la ciencia y la industria.

## **1.2 VIDRIOS CON BASE EN HALUROS**

En las últimas décadas han aparecido nuevas familias vítreas, que al contrario de los vidrios a base de óxidos, particularmente de silicio, que existen como minerales naturales, aquellos materiales vítreos basados enteramente en halogenuros inorgánicos [7], son puramente sintéticos.

Recientemente se han alcanzado grandes avances en lo que se refiere a nuevas composiciones vítreas, basadas en aniones del grupo VII de la tabla periódica, F, Cl, Br, I, como formadores de vidrio, así como también en lo que tiene ver con sus propiedades ópticas.

Hay tres factores intrínsecos que limitan el desarrollo científico y tecnológico de estos sistemas vítreos, que los hacen inferiores a los vidrios basados en óxidos, especialmente los silicatos, ellos son:

- La gran mayoría de compuestos basados en haluros, son higroscópicos, lo cual afecta fuertemente, sobretodo sus propiedades ópticas.

- Estos materiales tienen una temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) baja; esto trae como consecuencia, un coeficiente de expansión térmico alto. Además estos sistemas son sensibles a los choques térmicos.
- Por ser materiales formados a partir de los elementos más electronegativos de la tabla periódica, tienen una fuerte tendencia a formar materiales cristalinos iónicos. Esto trae como consecuencia, que en la competición cristal-vidrio, en la línea líquido-sólido, se ve favorecida la formación de microcristales. De este modo, las propiedades ópticas se ven afectadas, especialmente en lo que tiene que ver con las pérdidas por dispersión, por la tendencia a la desvitrificación.

Debido a estos factores, de entre las numerosas composiciones descritas en la literatura, solamente un número limitado de vidrios con base en haluros, pueden ser apropiadas para aplicaciones tecnológicas. El estudio de las propiedades ópticas requiere de muestras de tamaño razonable, buena calidad óptica, y alta resistencia a la humedad atmosférica.

### 1.2.1 VIDRIOS FLUORUROS

Estos vidrios tienen pérdidas por atenuación menores que las predichas para los vidrios de sílice [8], además son matrices que se dejan dopar fácilmente, especialmente por iones de tierras raras, convirtiéndolos en vidrios con gran potencial de aplicaciones.

Las familias más representativas de los vidrios fluoruros son las siguientes:

- **Vidrios Fluoroberilados:** Fueron los primeros vidrios fluoruros en ser descubiertos, en 1926 [9]. Estos vidrios son muy estables y tienen propiedades únicas, incluyendo una buena transparencia en el ultravioleta, bajo índice de refracción y baja dispersión óptica.

Estos vidrios fueron investigados en 1970 como materiales para aplicaciones láser, sin embargo presentan problemas debido a su alta toxicidad, volatilidad e higroscopía, por lo que su estudio fue relegado.

- **Vidrios Fluorozirconados:** Han sido los vidrios más estudiados desde su descubrimiento por M. Poulain en 1974 [10]. Su nombre es debido a que su mayor componente es el Fluoruro de Zirconio ( $ZrF_4$ ). El primer sistema de esta familia en ser sintetizado fue,  $ZrF_4$ - $BaF_2$ - $NaF$  dopado con  $NdF_3$ , estos vidrios no presentan buena estabilidad; desde entonces varios sistemas similares han sido reportados [11]. Intensa fue la búsqueda de familias que presentaran buena estabilidad térmica y excelentes propiedades ópticas. Como producto de esa investigación surgió el sistema ZBLA,  $ZrF_4$ - $BaF_2$ - $LaF_3$ - $AlF_3$ , el cual tenía una buena estabilidad térmica [12,13], y buenas propiedades ópticas; esta composición ya ha sido utilizada para aplicaciones prácticas en dispositivos ópticos.

Sin embargo, Ohsawua y Shibata [14] tomaron este sistema y le agregaron  $NaF$  para fabricar vidrios ZBLAN,  $ZrF_4$ - $BaF_2$ - $LaF_3$ - $NaF$ . Estos vidrios resultaron ser muy estables, con menor tendencia a la cristalización, comparados con los anteriores sistemas, permitiendo así sus posibles aplicaciones en fibra óptica. Además, las fibras fabricadas con estos vidrios presentan una atenuación de 0.013 dB/Km en longitudes de onda del orden de 2500 nm, una frecuencia fonónica del orden de  $580\text{ cm}^{-1}$  y un rango de transparencia que va desde los 300 nm hasta los 8000 nm.

- **Vidrios Fluoroindatos:** En 1980, Poulain y sus colaboradores encontraron que, el  $InF_3$  mezclado con otros fluoruros, generaba una nueva familia, se trataba de los vidrios fluoroindatos [15]. Estos vidrios se han vuelto muy importantes debido a que presentan una ventana de transmisión aún mayor que la de otros sistemas antes mencionados (del orden de 10000 nm), una frecuencia fonónica baja, de aproximadamente  $510\text{ cm}^{-1}$ , una atenuación de 0.001 dB/Km, y mejores propiedades físicas y químicas que los vidrios ZBLAN; por estas características, representan gran potencial de aplicaciones en diferentes dispositivos.

## 1.2.2 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS VIDRIOS FLUORUROS

En la intensa búsqueda de materiales que permitan satisfacer las exigencias tecnológicas, se han descubierto una gran cantidad de sistemas que, sin lugar a dudas, han favorecido de manera significativa la calidad de las telecomunicaciones, y otros campos de la investigación en los materiales.

Los vidrios fluoruros se vienen convirtiendo en grandes atractivos y han estimulado el desarrollo de la investigación en los nuevos materiales; y la razón principal para la investigación de estos vidrios es, su extensa ventana de transparencia, la que permite una transmisión, desde el infrarrojo (10.000 nm) hasta una pequeña región del ultravioleta, con un corte aproximadamente en 250 nm. Ver Fig.2.

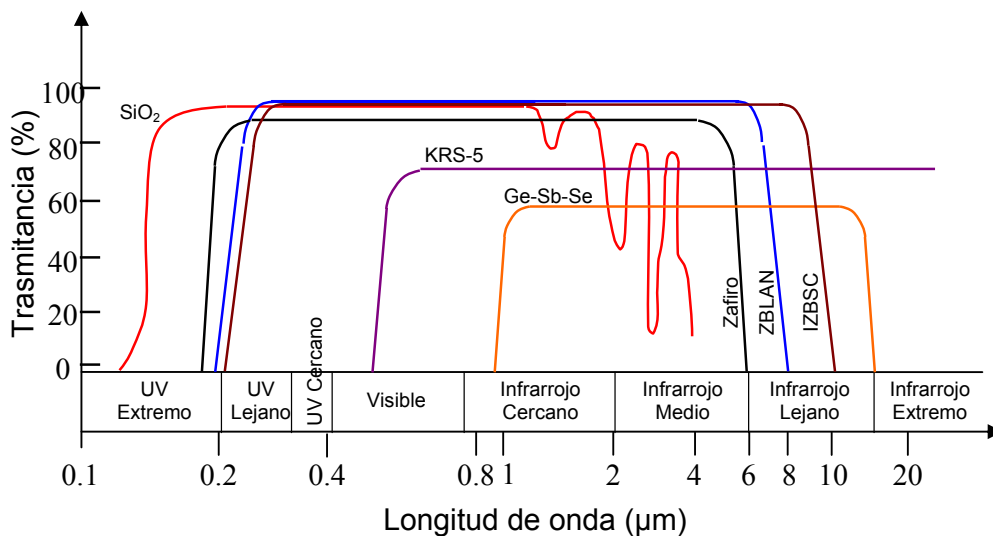


Figura 2. Transmisión óptica de algunos cristales, vidrios fluoruros y vidrios de sílice.

En relación con la atenuación, la cual dice, qué tanta señal se pierde o qué tan eficiente es determinado material, se puede decir que, la transmisión de la radiación a través de un vidrio, no es el 100%. Varios factores deben ser tenidos en cuenta, entre ellos, la

absorción por parte de los elementos que conforman el material. La atenuación es medida al comparar, la potencia de salida con la potencia de entrada y se da en dB/Km.

La figura 3, muestra la evolución que ha tenido la atenuación en diferentes vidrios, en función de las técnicas de preparación a través del tiempo. En ella se observa el gran avance que se logró en la calidad de los vidrios, cuando surgió la nueva técnica de preparación llamada C.V.D (Chemical Vapor Deposition). Este hecho condujo a la obtención de atenuaciones, para los vidrios de sílica, del orden de 0.3 dB/Km en 1550 nm. En los vidrios fluoruros, se han logrado reducir las pérdidas por debajo de 0.001 dB/Km en la región próxima a 2500 nm.

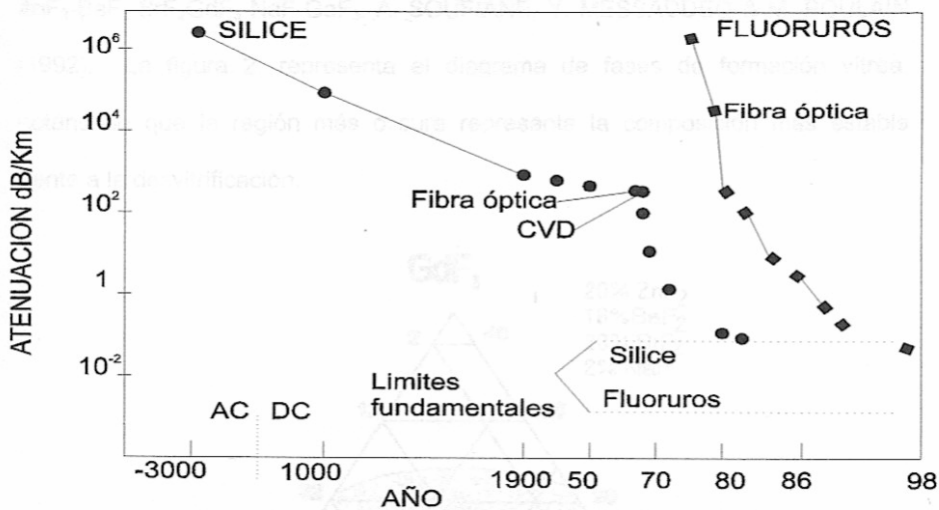


Figura. 3 Evolución temporal de la atenuación

### 1.2.2.1 ENERGIA FONÓNICA

La energía de vibración de red está cuantizada y al cuanto de esta energía se le llama fonón, en analogía con el fotón de la onda electromagnética [16].

En materiales de interés tecnológicos, como los vidrios dopados con tierras raras, la energía fonónica desempeña un papel importante, ya que dependiendo de su valor, las

transiciones involucradas en los iones activadores (tierras raras), pueden ser mejor aprovechadas, especialmente en la región infrarroja.

Teniendo en cuenta que en la mayoría de los vidrios a base de óxidos, la frecuencia fonónica es del orden de  $1100\text{cm}^{-1}$ , esto implicaría que algunas de las brechas entre los niveles de energía de los iones activadores serían llenadas por fonones, en consecuencia, las transiciones involucradas en estos iones no serían aprovechadas radiativamente en su totalidad.

Puesto que los vidrios fluoruros, entre ellos, los fluoroplomados y los fluorofosfatos, tienen una frecuencia fonónica del orden de  $500\text{cm}^{-1}$ , entran a jugar un papel importante cuando son usados como hospederos para iones de tierras raras, ya que buen número de transiciones, que en los vidrios de óxidos serían no radiativas, en estos serían radiativas, y se podrían aprovechar para proyectar el uso de estos iones, por ejemplo, en dispositivos optoelectrónicos y láseres.

En el caso específico del ión Er, se observa que tiene brechas de energía que pueden ser llenadas por fonones, es por esta razón que muchos grupos de investigación, entre ellos el Grupo de Investigación en Materiales Fotónicos de la UIS, están empeñados en conseguir vidrios cuya energía fonónica sea lo más baja posible, y de esta manera poder aprovechar estas transiciones radiativamente.

## 2. LAS TIERRAS RARAS

La historia de la espectroscopía de las tierras raras, comenzó cuando Becquerel, en 1907, observó que las amplias bandas de absorción de sales cristalinas de tierras raras, cuando se sometían a bajas temperaturas, se separaban en múltiples líneas agudas. La base científica para la interpretación de los espectros de las tierras raras, fue posible sólo a partir de los trabajos de Bethe y Kramer en 1930. Estos trabajos iniciales estaban dirigidos a localizar e identificar el gran número de niveles de energía que constituían su complejo espectro. La mayor parte de las primeras aplicaciones de las tierras raras, aprovecharon sus propiedades comunes, utilizándose principalmente en las industrias del vidrio.

Los iones tierras raras se dividen en dos grupos, cada uno de catorce elementos, conocidos como la familia de los lantánidos y la de los actínidos. Se caracterizan por el progresivo llenado de las subcapas 4f o 5f de su configuración electrónica. Los lantánidos, que son los de nuestro interés, incluyen los elementos con números atómicos del 58 al 71 y están asociados con el llenado de las subcapas 4f.

### 2.1 CONFIGURACIÓN ELECTRÓNICA DE LAS TIERRAS RARAS

Los iones tierras raras correspondientes a los iones lantánidos, son caracterizados por la estructura electrónica del Xenón,  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^6$ , con una capa 4f parcialmente llena, es decir:

$\{Xe\}4f^N$  con  $N=1$  para el Cerio, hasta  $N=14$  para el Lutecio

además, con dos o tres electrones más externos ( $6s^2$  ó  $6s^2 5d^1$ ).

La configuración electrónica de átomos e iones trivalentes de las tierras raras se da en la tabla 1:

ELEMENTO	NUMERO ATOMICO	CONFIGURACION ELECTRONICA ÁTOMO NEUTRO	CATIÓN Ln <sup>3+</sup>
Ce	58	4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>1</sup>
Pr	59	4f <sup>2</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>2</sup>
Nd	60	4f <sup>3</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>3</sup>
Pm	61	4f <sup>4</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>4</sup>
Sm	62	4f <sup>6</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>6</sup>
Eu	63	4f <sup>6</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>6</sup>
Gd	64	4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>7</sup>
Tb	65	4f <sup>8</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>8</sup>
Dy	66	4f <sup>9</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>9</sup>
Ho	67	4f <sup>10</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>10</sup>
Er	68	4f <sup>11</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>11</sup>
Tm	69	4f <sup>12</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>12</sup>
Yb	70	4f <sup>13</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>13</sup>
Lu	71	4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	4f <sup>14</sup>

**Tabla 1. Configuración electrónica de átomos e iones trivalentes de las tierras raras.**

## 2.2 Ion Er<sup>3+</sup>

Entre los elementos lantánidos, el erbio es de especial interés, ya que puede jugar un papel importante como ión activo, debido a su diversidad de líneas espectrales, y en particular, a su transición óptica en 1.55  $\mu\text{m}$ . Esta longitud de onda se utiliza extensamente en las comunicaciones, y un gran rango de aplicaciones como la amplificación óptica, para usos en medicina, meteorología [17,18]. Además, la emisión fluorescente por medio de conversión ascendente de energía alrededor de 550 y 660 nm, bajo excitación de 800 o de 980 nm, se puede utilizar para las aplicaciones tales como almacenaje óptico, exhibiciones de color, y dispositivos como sensores de alta densidad [19]. Es un elemento potencial para ser codopado con otros iones tierras raras. En vista

de tan importante transición, S. Tanabe y sus colaboradores han dedicado sus esfuerzos a mejorar la eficiencia cuántica, y las propiedades espectroscópicas con la variación de los componentes químicos en algunas matrices vítreas [20]

El excelente funcionamiento de las fibras ópticas dopadas con  $\text{Er}^{3+}$ , ha revolucionado los usos de estos materiales en telecomunicaciones de alta velocidad, permitiendo el desarrollo de fibras ópticas de gran capacidad sobre una escala global. El ensanchamiento de las transiciones ópticas de  $\text{Er}^{3+}$  en las matrices vítreas, permite transmitir varias longitudes de onda simultáneamente por un mismo canal [21].

Cabe anotar que, el comportamiento electrónico del ión  $\text{Er}^{3+}$  es muy similar al ión  $\text{Nd}^{3+}$ , debido a que se encuentran ubicados simétricamente en la serie de los lantánidos (ver Figura 5). La importancia de esta comparación radica en que el ión  $\text{Nd}^{3+}$  es considerado como el más importante dentro de las series de los lantánidos, debido a gran variedad de estudios sobre sus propiedades espectroscópicas y magnéticas, y consecuentemente el uso actual en la industria. Un ejemplo particular de las aplicaciones de estos dos iones, son las transiciones láser en  ${}^4\text{F}_{3/2}$ - ${}^5\text{I}_{11/2}$  (en  $1.06 \mu\text{m}$ ) para el  $\text{Nd}^{3+}$  y a  ${}^4\text{I}_{13/2}$ - ${}^4\text{I}_{15/2}$  (el  $1.55 \mu\text{m}$ ) para el  $\text{Er}^{3+}$ , usadas en la optoelectrónica infrarroja cercana [22]

Otra ventaja del ion  $\text{Er}^{3+}$ , se debe a que las intensidades de sus espectros se ajustan muy bien a la teoría de Judd y Ofelt, permitiendo el estudio de sus propiedades ópticas.

## 2.3 ESPECTROSCOPIA DE LAS TIERRAS RARAS

Las tierras raras, tanto los actínidos como los lantánidos, tienen en común, tener un espectro más complicado, en comparación con otros elementos de la tabla periódica.

Los electrones externos de los iones tierras raras, como se dijo anteriormente, adoptan la estructura de una capa completa de gas noble (Xenón, con dos electrones 5s y seis electrones 5p). Esta estructura es ópticamente inactiva, el nivel anterior en la estructura del Xenón, es la capa 4f, que se llena sucesivamente al pasar de un elemento al

siguiente, el Cerio trivalente tiene un electrón 4f y el yterbio tiene trece electrones 4f.

En la medida que la capa 4f no esté completamente llena con 14 electrones, quedarán vacíos un cierto número de niveles 4f, y los electrones que ya ocupan parte de esta capa 4f, pueden subir por absorción de luz a los niveles vacíos. A estas transiciones se atribuyen las agudas líneas observadas en los espectros de absorción y emisión de las tierras raras, explicándose dicha agudeza al hecho, de que los electrones realizan estas transiciones en el interior de las capas  $5s^2$  y  $5p^6$ , lo cual hace que estos electrones 4f interaccionen muy débilmente con los iones exteriores ó matriz.

Las transiciones entre sus niveles de energía, producen muchas líneas espectrales y, sin ninguna regularidad aparente, siendo ésta, la causa por la cual fue relegado su estudio por mucho tiempo. Las tierras raras triplemente ionizadas, pueden ser incorporadas en una red cristalina, donde mantienen su carácter atómico.

El espectro de absorción de los iones lantánidos incorporados en diferentes matrices, muestra grupos de muchas líneas finas, presentando una alta similitud con los espectros atómicos correspondientes. En vidrios, las transiciones presentan un ensanchamiento característico, sin embargo, el ancho de línea de cada banda es aún mucho menor que en el espectro de absorción de iones metálicos.

El interés por las intensidades de los espectros de las transiciones f-f de los lantánidos, comenzó con una publicación hecha por VAN VLECK en 1937 [23], cuando aún no se habían establecido definitivamente los niveles de energía involucrados en las transiciones espectrales. No se tenía información sobre las líneas agudas en la región visible e infrarroja en el espectro de los iones trivalentes; sobre todo, sí ellas eran debidas a transiciones dentro de la configuración  $4f^N$ , o a transiciones entre aquella configuración y otra de más alta energía (por ejemplo  $4f^{N-1}5d$ ). En el segundo caso las transiciones podrían ocurrir por el mecanismo de dipolo eléctrico; y en el primer caso, por el mecanismo de dipolo eléctrico forzado (comprometiendo perturbaciones vibrónicas o estáticas), dipolo magnético o cuadrupolo eléctrico.

Van Vleck calculó la intensidad esperada para cada línea, y concluyó que, las intensidades producidas eran muy fuertes como para ser explicadas por mecanismos diferentes al de dipolo eléctrico, sin embargo, las transiciones de dipolo eléctrico están prohibidas entre estados de la misma configuración ( $4f^N$ ) según la regla de Laporte.

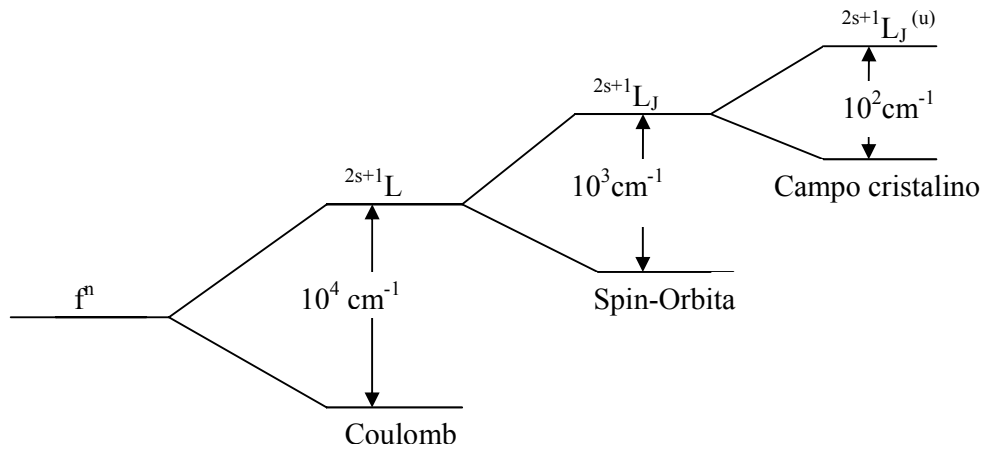
Entre 1942 y 1948, Woudenberg J., Hoogschagen J. y otros [24], en la Universidad de Ámsterdam, publicaron un artículo sobre el origen de las intensidades observadas, y en el cual demostraron que, las intensidades de dipolo magnético o cuadrupolo eléctrico son poco intensas para ser importantes. También que la intensidad de dipolo eléctrico es muy grande para asemejarse a la observada, concluyendo que la intensidad de dipolo eléctrico forzado debida a perturbaciones estáticas podría servir para explicar todas las intensidades.

La dificultad para estimar las intensidades de las transiciones de dipolo eléctrico, restringió los trabajos teóricos sobre las intensidades de las líneas de absorción de los iones lantánidos; pues ellas, surgen de la mezcla de la configuración  $4f^N$  y otra de paridad opuesta. Para calcular tal mezcla, no solamente se deben conocer las energías y las funciones propias de la configuración  $4f^{N-1}5d$ ; sino también la parte del potencial cristalino que es responsable de la mezcla (efecto de perturbaciones).

En 1962, Judd e independientemente Ofelt [6,25], publicaron la única teoría conocida hasta ahora, que explica convenientemente las intensidades de absorción para la mayoría de los iones lantánidos en medios inorgánicos.

Las líneas espectrales de las tierras raras surgen de las transiciones entre los niveles de la configuración  $4f^N$ , y las posiciones de los niveles son determinadas por [26]:

1. La interacción coulombiana entre los electrones.
2. El acoplamiento spin – orbita.
3. El campo eléctrico cristalino local.



**Figura 4. Diagrama esquemático del desdoblamiento de los niveles de energía de las tierras raras debido a las diferentes interacciones.**

## 2.4 APLICACIONES

Las tierras raras tienen una gran variedad de aplicaciones. Entre éstas, la más importante aplicación de las tierras raras trivalentes en cristales, tiene que ver con el desarrollo de la industria del láser, donde el más conocido hasta el momento, es el láser de Neodimio. Otra de las aplicaciones está relacionada con el uso en cristales para probar la simetría cristalina.

Dadas las ventajas que los vidrios tienen sobre los cristales, y con el descubrimiento de las nuevas familias vítreas, los iones tierras raras se han convertido en activadores, con un amplio potencial de aplicaciones que va, desde los láseres, hasta los amplificadores ópticos. Las fibras dopadas con  $\text{Er}^{3+}$ , muestran un claro ejemplo del gran avance que está teniendo la utilización de iones de tierras raras como activadores en vidrios [27].

Observando la figura 5, se puede ver claramente que de ese gran número de transiciones electrónicas de los iones tierras raras, un número muy importante está en las regiones espectrales, visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético; desde luego que



El desarrollo de este trabajo de investigación, gira entorno al estudio del ión  $\text{Er}^{3+}$ , cuando es introducido en vidrios fluoroplomados y fluorofosfatos, analizando su comportamiento óptico, y buscando proyectar su uso para aplicar los resultados a la industria del láser y de las telecomunicaciones.

### **3. TEORÍA DE JUDD-OFELT**

Una fuente importante de información, para ser utilizada en aplicaciones prácticas, es la que representa el estudio de los espectros de absorción de iones tierras raras en vidrios. A través de estos espectros obtenemos información que nos permite identificar importantes niveles de energía electrónicos, asociadas a los estados de cada una de las excitaciones electrónicas. La información obtenida del análisis de los espectros de absorción resulta ser esencial para la caracterización óptica de nuevos materiales de interés tecnológico. Las aplicaciones fundamentales se asocian, entre otras, a la fabricación de láseres, elaboración de fibras ópticas con menores atenuaciones, y amplificadores ópticos.

Las intensidades espectrales de las transiciones electrónicas de los iones lantánidos, han sido abordadas utilizando la teoría de Judd-Ofelt [5,6].

El formalismo de Judd-Ofelt fue diseñado para explicar las intensidades espectrales en diferentes matrices vítreas y cristales dopados con iones lantánidos, incorporando exclusivamente la contribución de las componentes impares del campo cristalino a las fuerzas dipolares eléctricas inducidas de las transiciones electrónicas [28].

#### **3.1 HIPÓTESIS DE LA TEORÍA DE JUDD-OFELT O MODELO DE INTENSIDADES f-f**

Las transiciones electrónicas entre los niveles  $f^N$ , no implican cambio en la paridad, por lo tanto, las transiciones de dipolo eléctrico son prohibidas según la Regla de Laporte. Sin embargo, si a través de los armónicos impares del campo cristalino estático se mezclan estados de paridad opuesta a la configuración  $4f^N$ , tales transiciones se vuelven permitidas. Esto puede ocurrir, si el ión tierra rara, reside en sitios de la red carentes de simetría de inversión.

Esta teoría o modelo, está basada en las siguientes hipótesis [5]:

- Los términos impares del campo cristalino, generan una mezcla entre configuraciones electrónicas de paridades opuestas, que dan lugar al mecanismo de dipolo eléctrico (dipolo eléctrico forzado).
- Diferencias de energía entre dos configuraciones son aproximadamente iguales a la diferencia de energía entre los baricentros de las respectivas configuraciones electrónicas involucradas.
- Todos los niveles del estado base, son asumidos igualmente poblados.

El tratamiento cuantitativo de las intensidades de las bandas de absorción de los lantánidos trivalentes relacionan la fuerza de oscilador determinada experimentalmente,  $f_{\text{exp}}$ , y la del modelo teórico que está basada en los mecanismos a través de los cuales la radiación puede ser absorbida.

La fuerza de oscilador experimental puede ser obtenida a partir de la expresión [29]:

$$f_{\text{exp}} = [4.32 * 10^{-9} / Cl] \int \varepsilon(\sigma) d\sigma \quad (1)$$

Donde  $\varepsilon(\sigma)$  es la densidad óptica, C [mol/l] y  $l$  [cm], son respectivamente la concentración y el camino óptico. La integral es tomada como el área bajo la curva para cada banda de los espectros de absorción.

### 3.2 FUERZA DE OSCILADOR TEÓRICA

La fuerza de oscilador,  $f$ , de una línea espectral correspondiente a una transición de dipolo eléctrico, desde un estado base  $|A\rangle$  hasta un estado excitado  $|B\rangle$ , está dado por la ecuación:

$$f = \left[ \frac{8\pi^2 mc \sigma}{h} \right] \chi \left| \langle A \| D_q^{(1)} \| B \rangle \right|^2 \quad (2)$$

donde  $m$  es la masa del electrón,  $c$  es la velocidad de la luz,  $h$  es la constante de Plank,  $\sigma$  es la energía de transición en  $\text{cm}^{-1}$  (inverso de la longitud de onda),  $\chi$  es la corrección del campo de Lorentz para la refractividad del medio y  $D_q^{(1)}$  el operador del dipolo eléctrico.

Los elementos de matriz del operador de dipolo eléctrico se anulan entre estados de la misma configuración.

En la aproximación de ión libre, los estados de la configuración  $4f^N$  se toman como combinaciones lineales de los estados acoplados de Russell-Saunders  $|f^N \alpha SLJ\rangle$ :

$$|f^N \alpha [SL]J\rangle = \sum_{S,L} A(S,L) |f^N \alpha SLJ\rangle \quad (3)$$

Donde  $\alpha$  representa todos los números cuánticos, diferentes de  $S, L$ , y  $J$ , necesarios para especificar completamente el estado.

La función de onda definida en la ec. (3) será frecuentemente escrita como  $|f^N \psi J\rangle$ .

La matriz del operador del dipolo eléctrico, se anula entre estos estados. Para forzar una transición de dipolo eléctrico, es necesario combinar dentro de la configuración  $4f^N$  otra configuración que tenga paridad opuesta. Tal combinación se puede lograr por los términos de paridad impar de la expansión del campo cristalino.

$$V^{C.F} = \sum_{t,p} A_{t,p} D_p^{(t)}, \text{ con } t \text{ impar.}$$

donde  $A_{t,p}$  son los coeficientes del campo cristalino, y  $D_p^{(t)}$  es un tensor de rango  $t$  con componentes  $p$ . Considerando el campo cristalino como una perturbación de primer orden, y además, el encargado de combinar la configuración  $4f^N$  con un estado configuracional de paridad opuesta y de mayor energía  $|nl\alpha''[S''L'']J''\rangle$ , el cual será escrito  $|\psi''\rangle$ , podemos escribir  $|A\rangle$  y  $|B\rangle$  de la siguiente forma:

$$|A\rangle = |f^N \psi JM\rangle + \sum_k \frac{\langle \psi'' | f^N \psi JM | V^{C.F} | \psi'' \rangle}{E(4f^N J) - E(\psi'')}$$

$$|B\rangle = |f^N \psi' J' M'\rangle + \sum_k \frac{\langle \psi'' | \langle f^N \psi' J' M' | V^{C.F} | \psi'' \rangle}{E(4f^N J') - E(\psi'')}$$

donde  $k$  representa todos los números cuánticos de la configuración excitada.  $E(4f^N J)$ ,  $E(4f^N J')$  y  $E(\psi'')$  son las energías de los niveles  $4f^N J$ ,  $4f^N J'$  y  $\psi''$  respectivamente.

Por lo tanto, la fuerza del oscilador,  $f$ , de una línea espectral de una transición desde el estado  $|A\rangle$  hasta  $|B\rangle$  es de la siguiente forma:

$$f = \left[ \frac{8\pi^2 mc \sigma}{h} \right] \chi \left| \sum_{k,t,p} A_{k,t,p} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\langle f^N \psi J M | D_q^{(1)} | \psi'' \rangle \langle \psi'' | D_p^{(t)} | f^N \psi' J' M' \rangle}{E(4f^N J') - E(\psi'')} \\ + \frac{\langle f^N \psi J M | D_q^{(1)} | \psi'' \rangle \langle \psi'' | D_p^{(t)} | f^N \psi' J' M' \rangle}{E(4f^N J) - E(\psi'')} \end{array} \right\} \right|^2 \quad (4)$$

De acuerdo con la teoría de Judd-Ofelt, la ec. (4) puede ser escrita en la forma:

$$f = \frac{8\pi^2 mc \sigma}{3h(2J+1)} \chi \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_\lambda \langle f^N \psi J \| U^{(\lambda)} \| f^N \psi' J' \rangle^2 \quad (5)$$

donde  $U^{(\lambda)}$  es un operador unitario de rango  $\lambda$ ;  $\Omega_\lambda$  son los llamados parámetros de intensidad, que pueden ser evaluados de los datos experimentales, e involucran las partes radiales de las funciones de onda  $4f^N$ ,  $4f^{N-1}(nl)$  y la interacción entre el ion central y sus más próximos vecinos, y representan el cuadrado del desplazamiento de carga debido a la transición de dipolo eléctrico inducido [30].

Estos parámetros de intensidad pueden ser calculados por medio de las fuerzas de oscilador experimental utilizando el método de ajuste de mínimos cuadrados. El error de la desviación *r.m.s.* (*root mean square*) es una medida de la exactitud del ajuste y se puede calcular como sigue:

$$r.m.s = \left[ \frac{\text{suma de los cuadrados de las desviaciones}}{\text{número de bandas} - \text{números de parámetros}} \right]^{1/2} \quad (6)$$

Para la fuerza de oscilador ( $f$ ) al  $r.m.s$  definido por:

$$r.m.s = \left[ \frac{\sum (f_{\text{exp}}^i - f_{\text{cal}}^i)^2}{N - 3} \right]^{1/2} \quad (7)$$

donde  $f_{\text{exp}}$  es la fuerza del oscilador experimental,  $f_{\text{cal}}$  es la fuerza del oscilador teórica y  $N$  es el número de transiciones o bandas usadas en el ajuste, el número de parámetros es tres ( $\Omega_2, \Omega_4, \Omega_6$ ).

La ventaja de los parámetros  $\Omega_\lambda$  es que es solo necesario un conjunto de estos parámetros para describir tanto los procesos de absorción como los de emisión, ya que la expresión para  $\chi$  es diferente tanto para el espectro de absorción como para el de emisión.

Los factores de corrección para un espectro de absorción, tanto de dipolo eléctrico (DE) como de dipolo magnético (DM), son:

$$\chi_{DE} = \frac{(n^2 + 2)^2}{9n}, \quad \chi_{DM} = n \quad (\text{Absorción})$$

donde  $n$  es el índice de refracción del medio. Los factores de corrección para el espectro de emisión son diferentes:

$$\chi_{DE} = \frac{n(n^2 + 2)^2}{9}, \quad \chi_{DM} = n^3 \quad (\text{Emisión}).$$

La intensidad de línea (line strength) de la transición de dipolo eléctrico forzado entre dos multipletes  $J$  y  $J'$ , Hufner [31], está dado por:

$$S_{JJ'}^{de} = e^2 \sum_{\lambda=2,4,6} \Omega_{\lambda} \left\langle f^N \psi_J \parallel U^{(\lambda)} \parallel f^N \psi_{J'} \right\rangle^2 \quad (8)$$

donde  $e$  es la carga del electrón.

De la teoría de Judo-Ofelt se derivan las siguientes reglas de selección para las transiciones de dipolo eléctrico inducido:

$$\Delta L = \pm 1, \Delta S = 0, |\Delta L| \leq 6, |\Delta J| \leq 6, |\Delta J| = 2, 4, 6 \text{ Si } J \text{ o } J' = 0.$$

### 3.3 TRANSICIONES DE DIPOLO MAGNETICO

Las transiciones de dipolo magnético dentro de una configuración  $4f^N$  son permitidas.

La fuerza de oscilador para una transición de dipolo magnético,  $f_{dm}$ , calculada a partir de las funciones  $|4f^N \alpha[S,L]JM\rangle$ , es dada por:

$$f_{dm} = \frac{2\pi\sigma n}{3hmc(2J+1)} \left\langle 4f^N \alpha[S,L]J \parallel \hat{L} + 2\hat{S} \parallel 4f^N \alpha'[S',L']J' \right\rangle^2 \quad (9)$$

cuya intensidad de línea está dada por:

$$S_{JJ'}^{dm} = \frac{e^2}{4m^2c^2} \left\langle 4f^N \alpha[S,L]J \parallel \hat{L} + 2\hat{S} \parallel 4f^N \alpha'[S',L']J' \right\rangle^2 \quad (10)$$

Las reglas de selección  $\Delta J = 0 \pm 1$ , se pueden distinguir tres casos para los elementos de matriz de dipolo magnético:

1)  $J = J'$

$$\left\langle 4f^N \alpha[S,L]J \parallel \hat{L} + 2\hat{S} \parallel 4f^N \alpha'[S',L']J' \right\rangle = g\hbar [J(J+1)(2J+1)]^{\frac{1}{2}}$$

donde:

$$g = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)}$$

$$2) J' = J - 1$$

$$\langle 4f^N \alpha | SLJ | \hat{L} + 2\hat{S} | 4f^N \alpha' [S'L'] J' \rangle =$$

$$\hbar \left[ \frac{(S+L+J+1)(S+L+1-J)(J+S-L)(J+L-S)}{4J} \right]^{1/2}$$

$$3) J' = J + 1$$

$$\langle 4f^N \alpha | SLJ | \hat{L} + 2\hat{S} | 4f^N \alpha' [S'L'] J' \rangle =$$

$$\hbar \left[ \frac{(S+L+J+2)(S+J+1-L)(L+J+1-S)(S+L-J)}{4(J+1)} \right]^{1/2}$$

### 3.4 PARAMETROS ESPECTROSCÓPICOS

El coeficiente de emisión espontánea (también llamado probabilidad de emisión espontánea o el coeficiente de Einstein para emisión espontánea) entre los multipletes  $J$  y  $J'$ ,  $A_{JJ'}$ , tiene la siguiente forma [33]:

$$A_{JJ'}^{DE} = \frac{64\pi^4 \sigma^3}{3h(2J+1)} \chi S_{DE} \quad (11)$$

Donde  $S_{DE}$  está definido por la ecuación (8) respectivamente.

Ya que los procesos de relajación de los estados excitados generalmente involucran transiciones para varios estados finales inferiores, se define una probabilidad de relajación radiativa total,  $A_{JJ'}^T$ , dada por:

$$A_{JJ'}^T = \sum_{J'} A_{JJ'} \quad (12)$$

Los canales de relajación de los diferentes niveles, desde un multiplete  $J$  a un estado final  $J'$ , está dada por:

$$\beta_{JJ'} = \frac{A_{JJ'}}{\sum_{J'} A_{JJ'}} \quad (13)$$

Los canales de relajación pueden ser usados para predecir las intensidades relativas de todas las líneas de emisión que se originan desde un estado excitado.

El tiempo de vida radiativo de un estado está dado por:

$$\tau_R = \frac{1}{\sum_{J'} A_{JJ'}} \quad (14)$$

La sección transversal de emisión estimulada,  $\rho_p$ , para un ancho de línea dado, está relacionado con la probabilidad de transición radiativa por:

$$\rho_p = \frac{\lambda^4}{8\pi c n^2 \Delta\lambda} A_{JJ'} \quad (15)$$

donde  $\Delta\lambda$  es el ancho medio de la banda.

Los electrones de la capa  $4f^N$ , al cambiar de estado en las transiciones, no solo absorben y emiten fotones; estos también pueden realizar transiciones no radiativas llamadas transiciones multifonón, estas transiciones son debidas a la interacción de los electrones  $4f^N$  y los modos de vibración de la red. Para brechas de energía pequeñas, es decir, del orden de  $K_B T$ , la transición ocurre muy rápido tanto en la absorción, como en la emisión, provocando el proceso de termalización de los niveles electrónicos involucrados. La brecha de energía entre dos estados es muy pequeña en un proceso no radiativo, esto conduce a un calentamiento del material y este medio es quien absorbe la energía y no el ión. De esta manera se puede explicar una parte de las pérdidas ópticas en el material.

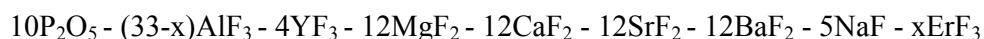
$$W_{NR} = B e^{\alpha \Delta E} (n(w, T) + 1) \quad (16)$$

La relajación no radiativa se puede calcular por medio de la anterior expresión [33].

## 4. PARTE EXPERIMENTAL

### 4.1 FABRICACIÓN DE LOS VIDRIOS

Se fabricaron cuatro matrices vítreas de la familia de los fluoroplomados, y cuatro de la familia de los fluorofosfatos con diferentes concentraciones del ión  $\text{Er}^{3+}$  como se indica a continuación:



con  $x = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$  mol %

Fueron preparadas las muestras antes mencionadas con un peso de 5 gramos cada una, y utilizando el método de fusión. Debido a la alta higroscopía que presentan los componentes fluoruros utilizados en la fabricación de las muestras, fue necesaria la utilización de las cámaras secas con una atmósfera inerte de Argón (Ar), para evitar la contaminación de las muestras y el contacto con la humedad atmosférica.

El proceso de fabricación de las muestras consta de las siguientes etapas:

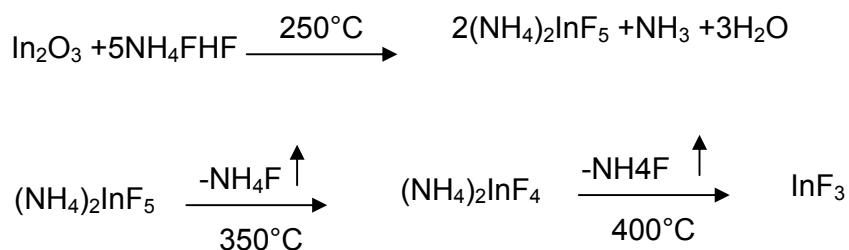
- **Pesaje de reactivos:** el proceso de pesaje, según la composición establecida para cada muestra, se llevó a cabo utilizando una balanza analítica Mettler Toledo AB204.

En la tabla 2 se relacionan los reactivos químicos, junto con el grado de pureza y los proveedores que se escogieron para la fabricación de los vidrios de este trabajo:

Reactivo	Grado de pureza	Fabricante
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.999%	Aldrich Chem. Co
ZnF <sub>2</sub>	99.99%	Aldrich Chem. Co
PbF <sub>2</sub>	99.997%	Alfa Aesar
CdF <sub>2</sub>	99.99%	Alfa Aesar
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.99%	Aldrich Chem. Co
NaF	99.98%	Aldrich Chem. Co
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.998%	Aldrich Chem. Co
ErF <sub>3</sub>	99.99%	Aldrich Chem. Co
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	99.98%	Alfa Aesar
AlF <sub>3</sub>	99.99%	Alfa Aesar
YF <sub>3</sub>	99.99%	Alfa Aesar
MgF <sub>2</sub>	99.99%	Alfa Aesar
CaO	99.998%	Alfa Aesar
SrF <sub>2</sub>	99.998%	Aldrich Chem. Co
BaO	97.00%	Aldrich Chem. Co

**Tabla 2. Reactivos utilizados, grado de pureza y empresa fabricante.**

- **Fluoración:** debido a que algunos de los reactivos que se utilizan para la fabricación de los vidrios no son fluoruros, sino óxidos, es necesario llevar a cabo un proceso en el cual se convierten estos óxidos en fluoruros. En este proceso, los fluoruros se deben sintetizar por el método convencional, utilizando un exceso de bifluoruro de amonio NH<sub>4</sub>FHF. La reacción química correspondiente, si tomamos como ejemplo el In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, es de la siguiente manera:



La liberación continua de  $\text{NH}_4\text{F}$  nos garantiza una atmósfera rica en flúor, la cual asegura una alta tasa de conversión. Esto da como resultado, un producto policristalino, libre de los principales óxidos contaminantes, obteniéndose así, un producto de alta pureza. De esta misma forma se transforman los demás óxidos a fluoruros.

- **Fusión:** es un proceso que se realizó en una cámara con atmósfera controlada, con lo que se puede evitar contaminantes y se garantiza baja humedad. La temperatura de fusión ( $T_f$ ) para cada tipo de matriz es diferente, y se puede observar en la tabla 3.
- **Vertido:** después que se obtiene el material (vidrio) fundido, éste es vertido en un molde precalentado a una temperatura ligeramente inferior a la temperatura de transición vítrea, para prevenir de esta manera, tanto los choques térmicos como la cristalización, la cual se manifiesta experimentalmente con la adhesión del material al molde. Debido a que se tienen dos tipos de matrices, la temperatura a la cual debe estar precalentado el molde ( $T_r$ ) varía para cada una de ellas y se presenta en la tabla 3.

<b>Matriz</b>	<b>Acrónimo</b>	<b><math>T_f</math> (°C)</b>	<b><math>T_r</math> (°C)</b>
Fluorofosfata	PAIYMgCaSrBaNa	970	310
Fluoroplomada	InZnPbCdGaNaGd	800	241

**Tabla 3. Temperaturas de fusión y recocido.**

- **Recocido:** después que se ha vertido el fundido en el molde, éste es llevado a una mufla, la cual está a la temperatura de recocido  $T_r$ . Una vez introducido el molde con el vertido dentro de la mufla, ésta es llevada hasta la temperatura ambiente a una rata de 2 °C/min. Este proceso se realiza para aliviar las tensiones propias del material, debidas al cambio abrupto de temperatura que sufre la matriz.

- **Pulido:** Finalmente, las muestras son pulidas hasta alcanzar una calidad óptica, dándoles la forma de paralelepípedo, esto se logra con el uso de la pulidora Metaserv 2000.

## 4.2 PARÁMETROS FÍSICOS

- **Densidad ( $\rho$ ):** La densidad de un cuerpo homogéneo es considerada como la cantidad de masa contenida en determinado volumen. En los vidrios fluoroplomados, ya que sus componentes tienen pesos atómicos muy elevados, la densidad que se presenta es alta en comparación con la densidad que presentan los vidrios fluorofosfatos. Los valores de densidad para los diferentes vidrios, se presentan en la tabla 4.

Las medidas de densidad fueron tomadas utilizando una balanza electrónica Metler Toledo, modelo AB204, con un aditamento ME-33360 para medidas de densidad en sólidos y utilizando el principio de Arquímedes, usando agua destilada como referencia.

<b>Matriz</b>	<b>% Er</b>	<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Concentración de Er (mol/litro)</b>
Fluoroplomado	0.5	6.10	0.19
Fluoroplomado	1.0	6.09	0.39
Fluoroplomado	1.5	6.11	0.58
Fluoroplomado	2.0	6.12	0.78
Fluorofosfato	0.5	3.64	0.23
Fluorofosfato	1.0	3.70	0.56
Fluorofosfato	1.5	3.70	0.69
Fluorofosfato	2.0	3.82	0.77

**Tabla 4: Densidad de vidrios fluoroplomados y fluorofosfatos dopados con diferentes concentraciones de Er<sup>3+</sup>.**

- **Índice de refracción (n):** una onda electromagnética al propagarse en algún medio, es perturbada por el campo eléctrico del medio, esto causa variaciones en su velocidad e intensidad. El índice de refracción ( $n$ ) mide la relación entre, la velocidad de la radiación en el vacío ( $c$ ) y la velocidad de la radiación en el medio ( $c_m$ ), esto es:  $n=c/c_m$ .

El índice de refracción fue medido utilizando un refractómetro Abbe 3L y el camino óptico fue tomado con un calibrador digital Mitutuyo. Estos resultados son presentados en la tabla 5.

<b>Matriz</b>	<b>% Er</b>	<b>Índice de refracción</b>	<b>Camino óptico (cm)</b>
Fluoroplomado	0.5	1.65	0.22
Fluoroplomado	1.0	1.65	0.22
Fluoroplomado	1.5	1.65	0.22
Fluoroplomado	2.0	1.65	0.25
Fluorofosfato	0.5	1.42	0.22
Fluorofosfato	1.0	1.44	0.21
Fluorofosfato	1.5	1.43	0.23
Fluorofosfato	2.0	1.44	0.18

**Tabla 5: Índice de refracción y camino óptico de vidrios fluoroplomados y fluorofosfatos dopados con diferentes concentraciones de Er<sup>3+</sup>.**

## 4.3 PROPIEDADES ÓPTICAS

### 4.3.1 ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN

Cuando la luz atraviesa dos medios ópticamente diferentes, hay tres fenómenos simultáneos involucrados, transmisión, reflexión y absorción, estos están relacionados a través de la expresión:

$$I_0 = I_T + I_R + I_A$$

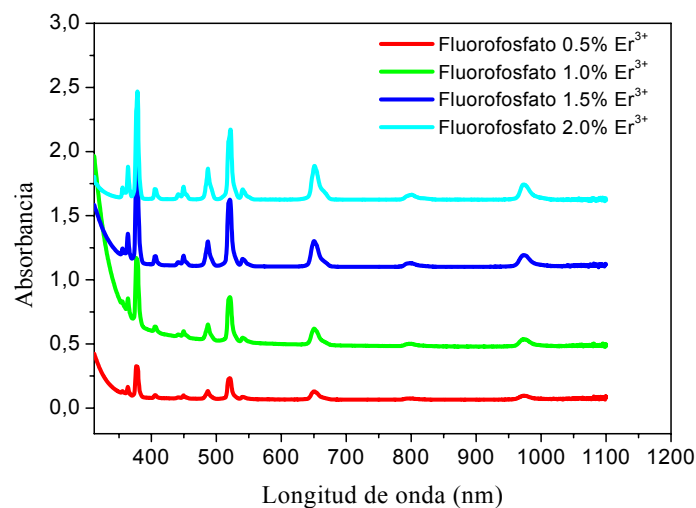
Si dividimos por  $I_0$  obtenemos:

$$1 = T + R + A$$

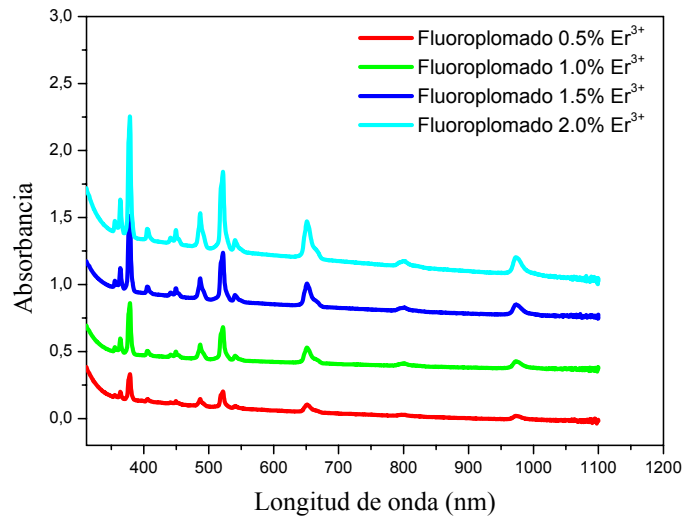
donde T es igual a  $I_T/I_0$ , R es igual a  $I_R/I_0$ , A es igual a  $I_A/I_0$ , y son la transmitancia, reflectancia y absorbancia respectivamente.

Un espectro de absorción es la representación gráfica del grado en el que un determinado elemento capta las diferentes longitudes de onda de la radiación luminosa incidente, y nos permite identificar transiciones electrónicas. A partir de los espectros de absorción, se pueden obtener las energías e intensidades de líneas espectrales relativas de los niveles electrónicos.

Los espectros de absorción para este trabajo de grado fueron obtenidos en la Universidad de Antioquia, utilizando un espectrofotómetro Cary 50 BIO, con una resolución de 0.4 nm, en el rango de 300-1200 nm. que comprende la región del visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Las mediciones se iniciaron con el ajuste de una línea base (absorbancia nula), obteniéndose un espectro de absorción al aire, a temperatura ambiente y sin matriz vítrea. Posteriormente se introduce cada vidrio dentro del espectrofotómetro y con ayuda de un software apropiado, se obtienen las diferentes bandas de absorción para cada muestra dopada con  $Er^{3+}$  las cuales se presentan a continuación en las figuras 6 y 7:



**Figura 6:** Espectros de absorción de vidrios fluorofosfatos dopados con  $Er^{3+}$



**Figura 7: Espectros de absorción de vidrios fluoroplomados dopados con Er<sup>3+</sup>**

La longitud de onda de las bandas de absorción del Er<sup>3+</sup> en las dos matrices coinciden, y solo leves cambios en la intensidad, asociados con las concentraciones, pueden ser observados. En cada espectro de absorción sobresalen dos bandas centradas alrededor de 380 nm y 525 nm, que corresponden a las bandas hipersensitivas de este ión,

Con los espectros obtenidos, se procedió de una manera sistemática a calcular los diferentes parámetros que nos permiten decidir, cuál de los vidrios estudiados nos ofrece las mejores propiedades para una aplicación láser.

En la figura 8 se pueden ver los niveles de energía del ión libre Er<sup>3+</sup>, y del ión Er<sup>3+</sup> cuando está embebido en vidrios fluorofosfatos y fluoroplomados. Se puede observar que los niveles de energía no varían de una manera significativa, lo cual nos asegura que los cálculos que se van a obtener son de muy buena calidad. Este hecho, da clara muestra que, estos vidrios fluoruros son buenos materiales para albergar iones de tierras raras, y debido a esta propiedad, están siendo ampliamente investigados en la actualidad.

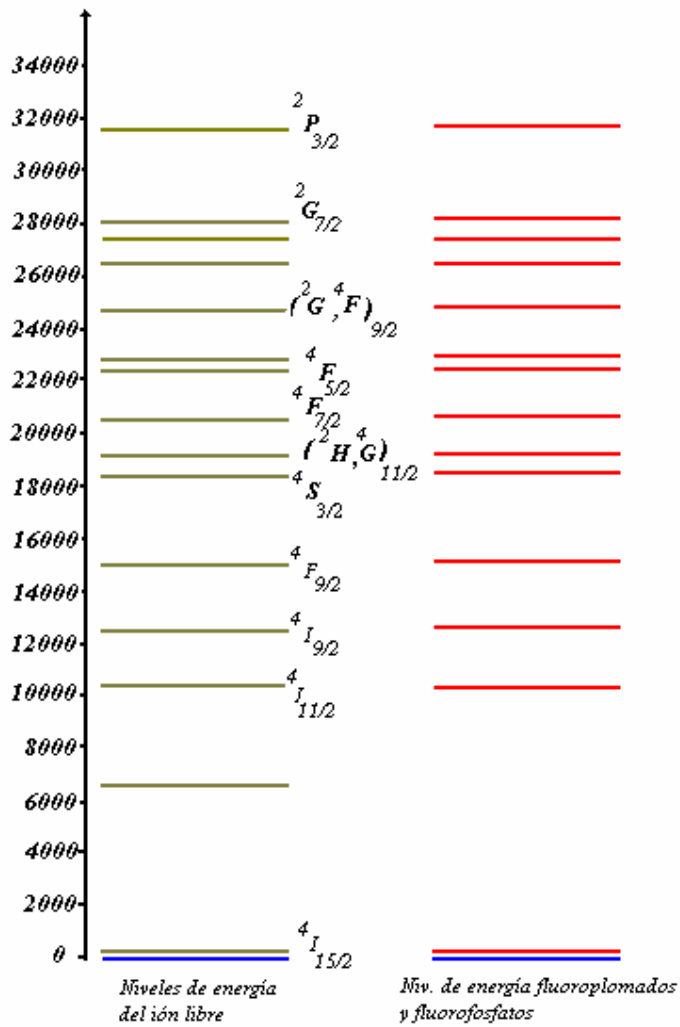


Fig.8 : Niveles de energía para el ión libre  $\text{Er}^{3+}$ , y embebido en vidrios fluorofosfatos y fluoroplomados.

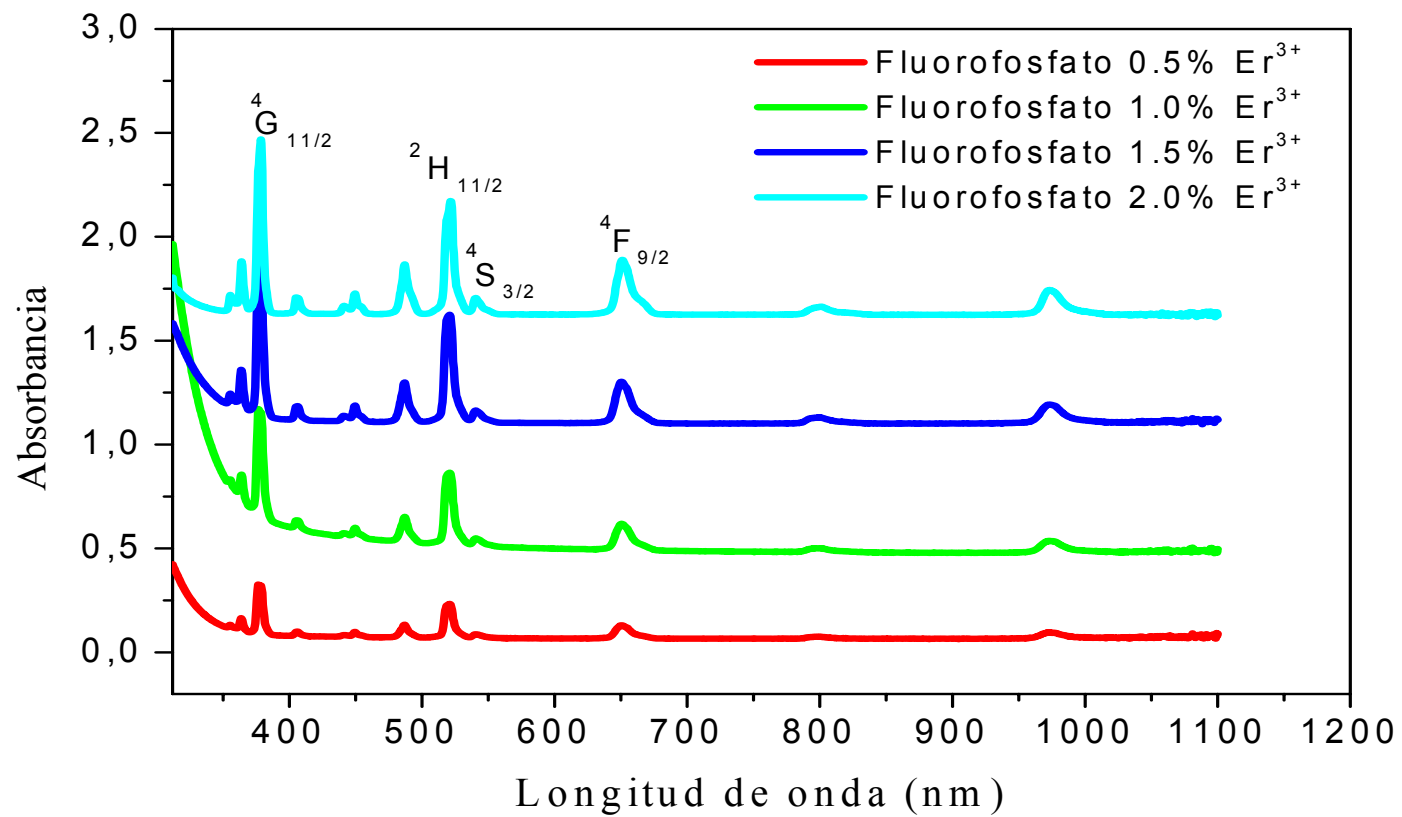


Figura 6: Espectros de absorción de vidrios fluorofosfatos dopados con  $\text{Er}^{3+}$

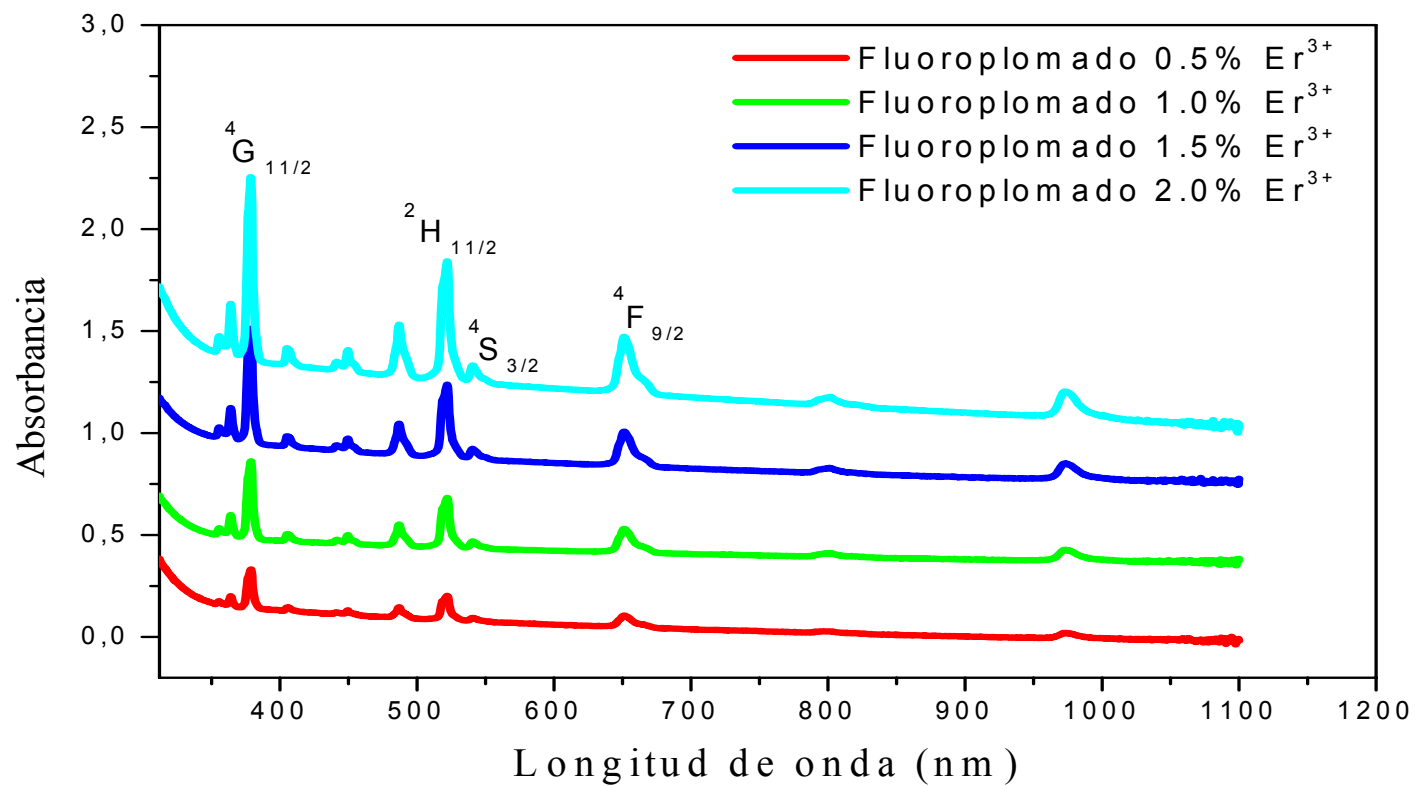


Figura 7: Espectros de absorción de vidrios fluoroplomados dopados con  $\text{Er}^{3+}$

## 5. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### 5.1 FUERZA DE OSCILADOR EXPERIMENTAL

La fuerza de oscilador experimental está dada por la siguiente relación [29]:

$$f = 4.32 * 10^{-9} \int \varepsilon(\nu) d\nu$$

donde  $\varepsilon(\nu)$  es la absorbitividad molar. Esta relación es válida solamente si se cumple la ley de Lambert-Beer, la cual establece que:

$$A = \varepsilon * C * l$$

donde A es la absorbancia, C es la concentración, y  $l$  es el camino óptico.

La integral de  $\varepsilon(\nu)$  se calculó con la ayuda de un software apropiado. El rango usado es el mismo para cada banda en los diferentes espectros de absorción analizados.

Los resultados para la fuerza de oscilador experimental  $f_{exp}$ , y fuerza de oscilador teórica  $f_{teor.}$  (obtenida por medio de la ecuación 5) de los vidrios fluorofosfato y fluoroplomado dopados con las diferentes concentraciones (0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0 %) de  $Er^{3+}$  se pueden observar en las tablas 6 y 7.

Transición desde $^4I_{15/2}$	Baricentro (cm-1)	Fluorofosfato 0.5% Er			Fluorofosfato 1.0% Er			Fluorofosfato 1.5% Er			Fluorofosfato 2.0% Er		
		$f_{ex.} (*10^{-6})$	$f_{teo.} (*10^{-6})$	$\Delta$	$f_{ex.} (*10^{-6})$	$f_{teo.} (*10^{-6})$	$\Delta$	$f_{ex.} (*10^{-6})$	$f_{teo.} (*10^{-6})$	$\Delta$	$f_{ex.} (*10^{-6})$	$f_{teo.} (*10^{-6})$	$\Delta$
$^2P_{3/2}$	31595	0,02	0,05	0.03	0.09	0.04	0.05	0,06	0,05	0.01	0,05	0,07	0.02
$^2G_{7/2}$	28104	0,26	0,36	0.10	0.20	0.30	0.10	0,22	0,36	0.14	0,43	0,52	0.09
$^4G_{9/2}$	27451	0,93	1,17	0.24	0.81	0.99	0.18	0,89	1,14	0.25	1,38	1,65	0.27
$^4G_{11/2}$	26438	7,95	7,77	0.18	7.03	6.93	0.10	7,85	7,75	0.10	8,94	8,83	0.11
$(^2G, ^4F)_{9/2}$	24600	0,55	0,56	0.01	0.43	0.46	0.03	0,54	0,56	0.02	0,73	0,81	0.08
$^4F_{3/2}$	22634	0,1	0,26	0.16	0.09	0.21	0.12	0,13	0,26	0.13	0,2	0,38	0.18
$^4F_{5/2}$	22197	0,39	0,45	0.06	0.30	0.37	0.07	0,37	0,45	0.08	0,55	0,65	0.10
$^4F_{7/2}$	20512	1,58	1,56	0.02	1.32	1.29	0.03	1,58	1,54	0.04	2,28	2,24	0.04
$(^2H, ^4G)_{11/2}$	19186	4,07	4,39	0.32	3.74	3.92	0.18	4,21	4,38	0.17	4,8	4,99	0.19
$^4S_{3/2}$	18439	0,34	0,37	0.03	0.29	0.30	0.01	0,34	0,37	0.03	0,52	0,54	0.02
$^4F_{9/2}$	15304	1,91	1,7	0.21	1.60	1.44	0.16	1,87	1,67	0.20	2,65	2,42	0.23
$^4I_{9/2}$	12449	0,25	0,29	0.04	0.18	0.25	0.07	0,23	0,28	0.05	0,35	0,41	0.06
$^4I_{11/2}$	10238	0,54	0,44	0.10	0.44	0.36	0.08	0,52	0,44	0.08	0,75	0,6	0.15
RMS *10-7		0.17			1.06			0.14			0.16		

Tabla 6: Comparación de las fuerzas de oscilador experimental y teórica  $f$ , para absorción, desde el estado base,  $^4I_{15/2}$  de  $Er^{3+}$ , en vidrios fluorofosfatos dopados con diferentes concentraciones de  $Er^{3+}$ .

Transición desde $^4I_{15/2}$	Baricentro ( $\text{cm}^{-1}$ )	Fluoroplomado 0.5% Er			Fluoroplomado 1.0% Er			Fluoroplomado 1.5% Er			Fluoroplomado 2.0% Er		
		$f_{ex.} (*10^{-6})$	$f_{teo.} (*10^{-6})$	$\Delta$	$f_{ex.} (*10^{-6})$	$f_{teo.} (*10^{-6})$	$\Delta$	$f_{ex.} (*10^{-6})$	$f_{teo.} (*10^{-6})$	$\Delta$	$f_{ex.} (*10^{-6})$	$f_{teo.} (*10^{-6})$	$\Delta$
$^2P_{3/2}$	31595	0,03	0,05	0.02	0,06	0,05	0.01	0,03	0,05	0.02	0,03	0,05	0.02
$^2G_{7/2}$	28104	0,35	0,35	0.00	0,3	0,35	0.05	0,28	0,34	0.06	0,3	0,36	0.06
$^4G_{9/2}$	27451	0,98	1,14	0.16	0,96	1,13	0.17	0,95	1,13	0.18	1	1,16	0.16
$^4G_{11/2}$	26438	6,63	6,44	0.19	6,49	6,35	0.14	6,32	6,17	0.15	6,48	6,35	0.13
$(^2G, ^4F)_{9/2}$	24600	0,54	0,54	0.00	0,52	0,54	0.02	0,5	0,54	0.04	0,52	0,57	0.05
$^4F_{3/2}$	22634	0,11	0,25	0.14	0,14	0,25	0.11	0,11	0,25	0.14	0,12	0,26	0.14
$^4F_{5/2}$	22197	0,33	0,43	0.10	0,39	0,43	0.04	0,39	0,43	0.04	0,39	0,45	0.06
$^4F_{7/2}$	20512	1,45	1,5	0.05	1,51	1,5	0.01	1,5	1,49	0.01	1,57	1,56	0.01
$(^2H, ^4G)_{11/2}$	19186	3,31	3,64	0.33	3,35	3,59	0.24	3,22	3,49	0.27	3,35	3,59	0.24
$^4S_{3/2}$	18439	0,39	0,35	0.04	0,35	0,36	0.01	0,36	0,35	0.01	0,37	0,37	0.00
$^4F_{9/2}$	15304	1,83	1,66	0.17	1,79	1,65	0.14	1,82	1,65	0.17	1,86	1,7	0.16
$^4I_{9/2}$	12449	0,24	0,29	0.05	0,28	0,28	0.00	0,23	0,28	0.05	0,25	0,29	0.04
$^4I_{11/2}$	10238	0,57	0,4	0.17	0,5	0,41	0.09	0,51	0,4	0.11	0,55	0,42	0.13
RMS *10-7		0.16			0.83			0.14			0.13		

Tabla 7: Comparación de las fuerzas de oscilador experimental y teórica  $f$ , para absorción, desde el estado base,  $^4I_{15/2}$  de  $\text{Er}^{3+}$ , en vidrios fluoroplomados dopados con diferentes concentraciones de  $\text{Er}^{3+}$ .

Las fuerzas de oscilador experimental y teórica para los vidrios fluorofosfatos y fluoroplomados con sus diferentes concentraciones son presentadas en la Tabla 6 y 7. Los niveles  $J'$  excitados son dados en la columna 1, y en las otras columnas son incluidos los valores de la fuerza de oscilador experimental,  $f_{exp}$ , la fuerza de oscilador teórica,  $f_{teor}$ , y la desviación  $\Delta$ ; así como también la calidad del ajuste (r.m.s) para todas las muestras estudiadas. Estos valores fueron calculados a partir de las ecuaciones (1) y (5). Las longitudes de onda utilizadas fueron las correspondientes a los baricentros de las bandas de absorción. A partir de estos resultados se puede ver claramente que, la calidad del ajuste entre la fuerza de oscilador teórica y la fuerza de oscilador experimental, medida por la desviación  $\Delta$ , es muy buena. Estos resultados permiten apreciar el éxito del modelo de intensidades f-f, aplicado al ión  $Er^{3+}$  en estas familias de vidrios. Además, los valores del ajuste son un poco menores que los valores obtenidos para el mismo ión en los vidrios fluoroindatos.

## 5.2 PARÁMETROS DE INTENSIDAD $\Omega_\lambda$

Haciendo uso de la ecuación (5), y la fuerza de oscilador experimental, ecuación (1), se plantea un sistema de trece ecuaciones con tres incógnitas, que corresponden a los parámetros  $\tau_\lambda$ . Para la solución de este sistema, se utiliza el método de mínimos cuadrados, haciendo uso de los elementos de matriz  $(U^\lambda)^2$  para el operador de dipolo eléctrico (Tabla 8) reportados por Carnall [32] para el ión  $Er^{3+}$ , se calcularon los parámetros  $\tau_\lambda$ . La relación existente entre estos parámetros y los parámetros fenomenológicos de intensidad  $\Omega_\lambda$  se da mediante la siguiente ecuación:

$$\Omega_\lambda = \frac{3h}{8\pi^2 m_e c \chi} \tau_\lambda \quad (17)$$

donde  $h$  es la constante de Planck,  $m_e$  es la masa del electrón,  $c$  es la velocidad de la luz,  $\chi = \frac{(n^2 + 2)^2}{9n}$  es la corrección del campo de Lorentz al índice de refracción. Los parámetros de intensidad se encuentran en la Tabla 9.

Estado	Baricentro (cm <sup>-1</sup> )	(U <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	(U <sup>4</sup> ) <sup>2</sup>	(U <sup>6</sup> ) <sup>2</sup>
<sup>2</sup> P <sub>3/2</sub>	31595	0,0000	0,0000	0,0172
<sup>2</sup> G <sub>7/2</sub>	28104	0,0000	0,0174	0,1163
<sup>4</sup> G <sub>9/2</sub>	27451	0,0000	0,2416	0,1235
<sup>4</sup> G <sub>11/2</sub>	26438	0,9183	0,5262	0,1172
( <sup>2</sup> G, <sup>4</sup> F) <sub>9/2</sub>	24600	0,0000	0,0189	0,2256
<sup>4</sup> F <sub>3/2</sub>	22634	0,0000	0,0000	0,1272
<sup>4</sup> F <sub>5/2</sub>	22197	0,0000	0,0000	0,2232
<sup>4</sup> F <sub>7/2</sub>	20512	0,0000	0,1469	0,6266
( <sup>2</sup> H, <sup>4</sup> G) <sub>11/2</sub>	19186	0,7125	0,4125	0,0925
<sup>4</sup> S <sub>3/2</sub>	18439	0,0000	0,0000	0,2211
<sup>4</sup> F <sub>9/2</sub>	15304	0,0000	0,5354	0,4618
<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	12449	0,0000	0,1733	0,0099
<sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	10238	0,0282	0,0003	0,3953

**Tabla 8:** Valores de los elementos de matriz del operador dipolar eléctrico  $[U^{(\lambda)}]^2 = \langle f^N J \| U^\lambda \| f^N J \rangle$  con  $\lambda=2, 4, 6$ .

Matriz	$\Omega_2 (*10^{-20} \text{ cm}^2)$	$\Omega_4 (*10^{-20} \text{ cm}^2)$	$\Omega_6 (*10^{-20} \text{ cm}^2)$
Fluorofosfato 0.5% Er	2.73	1.51	1.06
Fluorofosfato 1.0% Er	2.44	1.28	0.85
Fluorofosfato 1.5% Er	2.72	1.44	1.04
Fluorofosfato 2.0% Er	2.79	2.08	1.51
Fluoroplomado 0.5% Er	1.77	1.25	0.85
Fluoroplomado 1.0% Er	1.75	1.23	0.86
Fluoroplomado 1.5% Er	1.67	1.24	0.85
Fluoroplomado 2.0% Er	1.72	1.26	0.89

**Tabla 9: Parámetros fenomenológicos de intensidad  $\Omega_\lambda$  ( $*10^{-20} \text{ cm}^2$ ) para vidrios fluorofosfatos y fluoroplomados dopados con 1%  $\text{Er}^{3+}$ .**

En la Tabla 9 se muestran los parámetros fenomenológicos de intensidad  $\Omega_\lambda$  para los vidrios fluorofosfatos y fluoroplomados dopados con las diferentes concentraciones de  $\text{Er}^{3+}$ .

Como se mencionó antes, los materiales vítreos, macroscópicamente hablando, no exhiben ningún tipo de ordenamiento, sin embargo, sí podemos referirnos a una simetría local o de corto alcance para estos materiales. El parámetro fenomenológico  $\Omega_2$  se relaciona con la sensibilidad de los iones lantánidos, a las perturbaciones que genera el potencial del ambiente químico que los rodea [29]. Los valores de  $\Omega_2$  ( $< 3.0*10^{-20} \text{ cm}^2$ ) obtenidos para los vidrios estudiados, nos da indicios de una simetría local alta alrededor del ión  $\text{Er}^{3+}$ , y también están asociados con un alto grado de homogeneidad del vidrio. Estos valores son muy similares a los obtenidos para  $\text{Er}^{3+}$  en vidrios fluorindatos, los cuales son los mejores hospederos para este tipo de iones [33].

Hay una leve diferencia, entre los parámetros fenomenológicos  $\Omega_2$  para los vidrios fluorofosfatos y fluoroplomados, esto es debido a los compuestos con que se fabrica cada vidrio. En los vidrios fluorofosfatos, hay una concentración significativa de fósforo (P), el cual tiene un radio iónico 0.17 Å, y participa con valencia, +5. Teniendo

en cuenta que el promedio de los radios iónicos de los demás componentes del vidrio es del orden de 1 Å, esto significa que el fósforo introduce un pequeño desorden en el material, y la consecuente variación en el parámetro  $\Omega_2$ . De esto se deduce, el cuidado que se debe tener en la fabricación de estos materiales, ya que una diferencia significativa entre los radios de los compuestos formadores del vidrio, puede traer como consecuencia un desorden que afecta la calidad del vidrio y sus propiedades.

Al hacer una comparación entre los valores de éste parámetro ( $\Omega_2$ ) en estos vidrios, con los correspondientes al parámetro  $\Omega_2$  para iones de  $\text{Er}^{3+}$  dentro de los vidrios fluorindatos (en el cual el parámetro oscila entre  $1.4 \cdot 10^{-20}$  y  $1.6 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2$ ), se aprecia que estos vidrios tienen una homogeneidad muy similar con aquellos.

Con base en el valor obtenido (1.51) para el factor de calidad espectroscópico, dado por  $\Omega_4/\Omega_6$  [33], se puede inferir que el vidrio con mejores condiciones para hospedar al ión  $\text{Er}^{3+}$  es el fluorofostato.

### 5.3 PROCESOS DE RELAJACIÓN

Los procesos de relajación o decaimiento no radiativo, son dominados principalmente por transferencia de energía, y procesos multifonónicos, los cuales varían con la temperatura y el gap de energía entre los cuales ocurre la transición. Estos mecanismos afectan los tiempos de vida de los estados metaestables impidiendo con ello un aumento de la población para la acción láser.

Los procesos de relajación entre dos estados excitados, generalmente son una combinación de las probabilidades de transición radiativa y no radiativa. Si  $W_{JJ'}$  denota la probabilidad de decaimiento no radiativo, entonces tenemos que:

$$\frac{1}{\tau} = \sum_J A_{JJ'} + \sum_J W_{JJ'} \quad (18)$$

$W_{JJ'}$  es la suma de las ratas de relajación no radiativa o rata de relajación multifonónica.

Sin embargo, una expresión para la rata de emisión multifonónica fue desarrollada por Moos y Riseberg [34]:

$$W_{MF} = \beta e^{-\alpha \Delta E} (n(\omega, T) + 1)^p \quad (19)$$

donde  $\beta$  y  $\alpha$  son característicos del vidrio,  $\Delta E$  es la diferencia de energía entre niveles, y  $\hbar\omega$  es la energía de los fonones,  $p = \frac{\Delta E}{\hbar\omega}$  es el número de fonones que son emitidos durante la transición, y  $n = \frac{1}{[\exp(\hbar\omega/kT) - 1]}$ .

Para nuestros vidrios fluoruros,  $\beta = 1.59 \cdot 10^{10} \text{ seg}^{-1}$ ,  $\alpha = 5.19 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$ . y  $\hbar\omega \cong 500 \text{ cm}^{-1}$  [35].

## 5.4 PARÁMETROS ESPECTROSCÓPICOS

La caracterización óptica, en lo que tiene que ver con la información obtenida de los espectros de absorción, incluye otros parámetros que se obtienen de la información anterior. Tales parámetros son: probabilidad de transición radiativa  $A_{JJ'}$  ec. (11), canales de relajación  $\beta_{JJ'}$  ec. (12), tiempo de vida radiativo  $\tau_R$  ec. (13), sección transversal de emisión estimulada  $\rho_p$  ec. (14), y sus valores son incluidos en la tabla 10. Los correspondientes a las otras concentraciones estudiadas, hacen parte de los anexos. Además, en dicha tabla se han tenido en cuenta solamente las transiciones que presentan valores mayores que  $100 \text{ s}^{-1}$  en la probabilidad de transición radiativa.

Vidrios		Fluorofosfatos			Fluoroplomados			Fluoroindatos		
Transición	$\Delta E$ (cm <sup>-1</sup> )	$A_{JJ'}^{de}$ (s <sup>-1</sup> )	$\beta_{JJ'}$	$\tau_R$ (ms)	$A_{JJ'}^{de}$ (s <sup>-1</sup> )	$\beta_{JJ'}$	$\tau_R$ (ms)	$A_{JJ'}^{de}$ (s <sup>-1</sup> )	$\beta_{JJ'}$	$\tau_R$ (ms)
<sup>4</sup> I <sub>11/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	10130	136.86	1.000	7.3069	200.71	1.000	4.9823	79.37	0.859	10.8300
<sup>4</sup> I <sub>9/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	12341	168.77	0.994	5.8903	247.92	0.994	4.0105	159.57	0.891	5.5800
<sup>4</sup> F <sub>9/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	15196	1472.07	0.958	0.0007	2203.69	0.958	0.0004	1307.20	0.814	0.0623
<sup>4</sup> S <sub>3/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	18331	562.76	0.886	1.5750	870.39	0.885	1.0172	674.06	0.718	1.0600
( <sup>2</sup> H, <sup>4</sup> G) <sub>11/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	6737	459.52	0.038	0.0821	556.37	0.038	0.0685	135.81	0.029	0.2110
→ <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	8948	1088.52	0.089		1303.74	0.089		334.56	0.071	
→ <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	19078	10541.76	0.866		12635.56	0.865		3295.50	0.697	
<sup>4</sup> F <sub>7/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	10274	253.57	0.106	0.4172	386.65	0.101	0.2735	262.31	0.083	0.3160
→ <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	20404	1986.63	0.829		3028.65	0.828		2088.10	0.661	
<sup>4</sup> F <sub>5/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	11959	126.19	0.124	0.9797	195.20	0.124	0.6337	194.12	0.097	0.5000
→ <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	22089	796.47	0.780		1229.94	0.780		1230.50	0.614	
<sup>4</sup> F <sub>3/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	22526	603.30	0.767	1.2712	929.20	0.767	0.8250	1230.50	0.614	0.5000
( <sup>2</sup> G, <sup>4</sup> F) <sub>9/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	14362	248.95	0.143	0.5740	382.66	0.143	0.3734	158.03	0.111	0.7000
→ <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	24492	1235.68	0.709		1897.73	0.709		794.63	0.557	
<sup>4</sup> G <sub>11/2</sub> → <sup>4</sup> S <sub>3/2</sub>	7999	334.64	0.019	0.0553	398.65	0.018	0.0461	290.39	0.014	0.0480
→ ( <sup>2</sup> G, <sup>4</sup> F) <sub>9/2</sub>	11134	893.57	0.049		1075.08	0.050		799.22	0.038	
→ <sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	13989	1767.50	0.098		2132.46	0.098		1560.10	0.074	
→ <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	16200	2760.57	0.153		3311.98	0.153		2489.10	0.119	
→ <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	26330	11856.45	0.656		14219.44	0.655		10886.00	0.518	
<sup>4</sup> G <sub>9/2</sub> → <sup>4</sup> F <sub>9/2</sub>	12147	238.91	0.055	0.2293	358.34	0.055	0.1533	248.28	0.042	0.1700
→ <sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	15002	449.04	0.103		675.11	0.104		461.13	0.079	
→ <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	17213	681.98	0.156		1019.81	0.156		714.61	0.122	
→ <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	27343	2735.70	0.627		4087.80	0.627		2919.30	0.498	
<sup>2</sup> G <sub>7/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>9/2</sub>	15655	225.57	0.106	0.4699	346.19	0.106	0.3074			
→ <sup>4</sup> I <sub>11/2</sub>	17866	336.88	0.158		514.60	0.158				
→ <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	27996	1295.73	0.609		1980.04	0.609				
<sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> → <sup>4</sup> I <sub>15/2</sub>	31487	221.79	0.522	2.3513	343.13	0.520	1.5165			

Tabla 10: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluorofosfatos, fluoroplomados y fluoroindatos dopados con 1% Er<sup>3+</sup>.

Teniendo en cuenta que, este trabajo es realizado con el objetivo de conseguir la aplicación de los resultados, a una posterior aplicación, como por ejemplo, la fabricación de un láser, debemos tener muy en cuenta los resultados que nos arroja la tabla 10. En esta tabla, se encuentran los parámetros espectroscópicos en vidrios fluorofosfatos, fluoroplomados y fluoroindatos dopados con 1.0 %  $\text{Er}^{3+}$ , y en vista del gran número de transiciones, se hizo un análisis para ver cuál es la más importante para una eventual transición láser. Como se dijo anteriormente, éste es el vidrio con su concentración adecuada que mejores resultados muestra, además, el factor de calidad espectroscópico  $\Omega_4/\Omega_6 = 1.51$ , es el mejor entre los vidrios fabricados.

La comparación de los vidrios estudiados se hizo con los vidrios fluoroindatos dopados con 1 %  $\text{Er}^{3+}$ , ya que es el hospedero que mejores propiedades muestra cuando alberga a este ión, presentando un alto grado de homogeneidad que es superior a otros vidrios [33].

Los parámetros de las transiciones escogidas, son similares entre los vidrios fluoroplomados y fluorofosfatos, y entre estos y los vidrios fluoroindatos, sin embargo nos ocuparemos de una transición muy importante en el ión  $\text{Er}^{3+}$ , y que corresponde a la transición  $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ .

Haciendo el análisis de esta transición en los dos sistemas vítreos estudiados y comparándola con la transición del mismo ión ( $\text{Er}^{3+}$ ) en vidrios fluoroindatos, se puede llegar a diferentes conclusiones. Los tiempos de vida calculados del estado excitado  $^2\text{H}_{11/2}$  para los vidrios fluorofosfatos y fluoroplomados son similares ( $\sim 0.07$  ms), y apropiados para lograr una inversión de población de electrones a el estado metaestable  $^4\text{S}_{3/2}$ . Sin embargo, el estado  $^4\text{S}_{3/2}$  (estado metaestable), en los vidrios fluoroplomados, tiene un tiempo de vida bajo, el cual dificulta de alguna manera el proceso de inversión de población.

Describiremos el proceso que se lleva a cabo para la acción láser del ión  $\text{Er}^{3+}$  para vidrios fluorofosfatos. Cuando la excitación de los electrones ocurre desde el estado base hacia el nivel  $^2\text{H}_{11/2}$ , y dada la proximidad que existe entre éste y el estado  $^4\text{S}_{3/2}$  ( $747 \text{ cm}^{-1}$ ), tiene lugar una relajación no radiativa  $W_{NR}$ , esto se debe esencialmente a que dicha brecha de energía puede ser llenada con máximo dos fonones, puesto que en estos vidrios la frecuencia fonónica es del orden de  $500 \text{ cm}^{-1}$ . Luego de que los

electrones hayan relajado al estado  $^4S_{3/2}$ , y debido a que este estado tiene un tiempo de vida relativamente grande (1.58 ms), se da la inversión de población, que es fundamental para la transición láser que ocurre desde este estado hacia el estado  $^4I_{15/2}$ .

De otra parte, si tenemos en cuenta el tiempo de vida radiativo de otros estados, como por ejemplo el  $^4F_{3/2}$ , podemos decir que, aunque el ión  $Er^{3+}$  no tenga un estado inmediato (por encima) con un tiempo de vida lo suficientemente pequeño para que los electrones relajen, y sirva de este estado metaestable; se podría hacer un codopaje con el ión Dy o Sm, ya que estos iones presentan estados muy próximos al del ión Er, y habría que hacer un análisis en sus tiempos de vida para hacer una posible aplicación.

Al comparar los resultados de los tiempos de vida radiativos  $\tau_R$  del ión  $Er^{3+}$  en vidrios fluorofosfatos con los reportados por la literatura del mismo ión en vidrios fluoroindatos, los cuales dan las mejores condiciones, nos damos cuenta que son muy similares, de esta manera, se ve la gran importancia que podrían tener estos vidrios en la fabricación de dispositivos como amplificadores y láseres.

## CONCLUSIONES

- Los diferentes ambientes que rodean al ión tierra rara  $\text{Er}^{3+}$  no afectan de una manera significativa las transiciones electrónicas.
- De acuerdo a los resultados obtenidos para la fuerza de oscilador experimental y la desviación  $\Delta$  observada con respecto a la fuerza de oscilador teórica, se comprobó la fiabilidad de las predicciones de la Teoría de Judd-Ofelt del ión  $\text{Er}^{3+}$  dopando vidrios fluorofosfatos y fluoroplomados con diferentes concentraciones.
- De acuerdo a los valores de la desviación r.m.s se comprobó que los vidrios fluorofosfatos, en comparación con los vidrios fluoroplomados, son mejores hospederos para el ión  $\text{Er}^{3+}$  y son muy similares a los reportados por la literatura en otros ambientes.
- El parámetro  $\Omega_2$  pequeño para los vidrios fluoroplomados, indicó que, la inclusión de un elemento con un radio iónico diferente al promedio de los demás componentes, involucra una inhomogeneidad en el material.
- El vidrio fluorofosfato dopado con 1.0  $\text{Er}^{3+}$  fue el vidrio que presentó las mejores características espectroscópicas y por lo tanto es el mejor hospedero para el ión  $\text{Er}^{3+}$ , y con buenas posibilidades para aplicaciones en un futuro.
- El tiempo de vida del estado  $^4\text{S}_{3/2}$  (1.58 ms) lo hace un estado ideal para crear inversión de población, y así obtener una emisión láser con buena eficiencia cuántica.

## ANEXOS

Transición	$\Delta E$ (cm <sup>-1</sup> )	$A_{JJ}^{de}$ (s <sup>-1</sup> )	$\beta_{JJ}$	$\tau_R$ (ms)	$\rho_p(10^{-22}\text{cm}^2)$	$W_{NR}(s^{-1})$
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	10130	174,27	1,000	5,7383	54,263	$2,02 \cdot 10^{-12}$
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2211	1,27	0,006	4.6739	19,170	$2,22 \cdot 10^{+05}$
$^4I_{15/2}$	12341	212,68	0,994		32,061	$2,82 \cdot 10^{-17}$
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2855	12,05	0,006	0.0005	1,057	$1,25 \cdot 10^{+04}$
$^4I_{11/2}$	5066	69,77	0,036		6,118	$1,75 \cdot 10^{-01}$
$^4I_{15/2}$	15196	1879,68	0,958		164,830	$2,22 \cdot 10^{-23}$
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	3135	8,65	0,004	0.4986	0,643	$3,15 \cdot 10^{+03}$
$^4I_{9/2}$	5990	60,34	0,030		4,485	$2,48 \cdot 10^{-03}$
$^4I_{11/2}$	8201	158,29	0,079		11,764	$3,46 \cdot 10^{-08}$
$^4I_{15/2}$	18331	1778,31	0,887		132,170	$4,41 \cdot 10^{-30}$
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	747	0,42	0,000	0.1384	0,028	$3,35 \cdot 10^{+08}$
$^4F_{9/2}$	3882	52,49	0,007		3,513	$6,64 \cdot 10^{+01}$
$^4I_{9/2}$	6737	271,08	0,038		18,139	$5,22 \cdot 10^{-05}$
$^4I_{11/2}$	8948	645,31	0,089		43,180	$7,29 \cdot 10^{-10}$
$^4I_{15/2}$	19078	6255,31	0,866		418,560	$9,27 \cdot 10^{-32}$
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	1326	1,08	0,000	0.2079	0,065	$2,24 \cdot 10^{+07}$
$^4S_{3/2}$	2073	4,32	0,001		0,261	$4,71 \cdot 10^{+05}$
$^4F_{9/2}$	5208	65,93	0,014		3,975	$9,33 \cdot 10^{-02}$
$^4I_{9/2}$	8063	242,43	0,050		14,616	$7,35 \cdot 10^{-08}$
$^4I_{11/2}$	10274	508,51	0,106		30,659	$1,02 \cdot 10^{-12}$
$^4I_{15/2}$	20404	3987,37	0,829		240,400	$1,30 \cdot 10^{-34}$
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	1685	0,83	0,000	0.4131	0,055	$3,82 \cdot 10^{+06}$
$^2H_{11/2}$	3011	4,72	0,002		0,314	$5,37 \cdot 10^{+03}$
$^4S_{3/2}$	3758	9,41	0,004		0,626	$1,13 \cdot 10^{+02}$
$^4F_{9/2}$	6893	56,99	0,024		3,791	$2,24 \cdot 10^{-05}$
$^4I_{9/2}$	9748	160,11	0,066		10,649	$1,76 \cdot 10^{-11}$
$^4I_{11/2}$	11959	299,19	0,124		19,900	$2,46 \cdot 10^{-16}$
$^4I_{15/2}$	22089	1889,24	0,781		125,660	$3,13 \cdot 10^{-38}$
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	437	0,01	0,000	0.4037	0,001	$1,86 \cdot 10^{+09}$
$^4F_{7/2}$	2122	1,56	0,001		0,085	$4,46 \cdot 10^{+05}$
$^2H_{11/2}$	3448	6,71	0,003		0,367	$6,27 \cdot 10^{+02}$
$^4S_{3/2}$	4195	12,3765	0,005		0,677	$1,32 \cdot 10^{+01}$

$^4F_{9/2}$	7330	64,99	0,026		3,553	$2,62*10^{-06}$
$^4I_{9/2}$	10185	173,31	0,070		9,474	$2,06*10^{-12}$
$^4I_{11/2}$	12396	316,12	0,128		17,280	$2,87*10^{-17}$
$^4I_{15/2}$	22526	1901,76	0,768		103,960	$3,66*10^{-39}$
$^2G_{9/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$	1966	0,85	0,000	0.4383	0,036	$8,73*10^{+05}$
$^4F_{5/2}$	2403	1,53	0,001		0,064	$1,02*10^{+05}$
$^4F_{7/2}$	4088	7,48	0,003		0,314	$2,45*10^{+01}$
$^2H_{11/2}$	5414	17,36	0,008		0,729	$3,44*10^{-02}$
$^4S_{3/2}$	6161	25,97	0,011		1,090	$7,25*10^{-04}$
$^4F_{9/2}$	9296	88,06	0,039		3,697	$1,44*10^{-10}$
$^4I_{9/2}$	12151	195,51	0,086		8,208	$1,13*10^{-16}$
$^4I_{11/2}$	14362	325,90	0,143		13,681	$1,58*10^{-21}$
$^4I_{15/2}$	24492	1618,82	0,710		67,958	$2,01*10^{-43}$
$^4G_{11/2} \rightarrow ^2G_{9/2}$	1838	7,31	0,000	0.0311	0,183	$1,61*10^{+06}$
$^4F_{3/2}$	3804	64,50	0,002		1,613	$8,83*10^{+01}$
$^4F_{5/2}$	4241	88,93	0,003		2,223	$1,03*10^{+01}$
$^4F_{7/2}$	5926	240,85	0,008		6,021	$2,48*10^{-03}$
$^2H_{11/2}$	7252	440,23	0,014		11,006	$3,48*10^{-06}$
$^4S_{3/2}$	7999	597,33	0,019		14,933	$7,33*10^{-08}$
$^4F_{9/2}$	11134	1592,56	0,050		39,814	$1,45*10^{-14}$
$^4I_{9/2}$	13989	3139,89	0,098		78,497	$1,14*10^{-20}$
$^4I_{11/2}$	16200	4914,72	0,153		122,870	$1,60*10^{-25}$
$^4I_{15/2}$	26330	21113,10	0,656		527,830	$2,03*10^{-47}$
$^4G_{9/2} \rightarrow ^4G_{11/2}$	1013	0,21	0,000	0.1504	0,009	$1,07*10^{+08}$
$^2G_{9/2}$	2851	4,75	0,001		0,199	$1,08*10^{+04}$
$^4F_{3/2}$	4817	22,96	0,004		0,960	$5,93*10^{-01}$
$^4F_{5/2}$	5254	29,68	0,005		1,241	$6,92*10^{-02}$
$^4F_{7/2}$	6939	68,05	0,010		2,846	$1,66*10^{-05}$
$^2H_{11/2}$	8265	114,78	0,017		4,800	$2,34*10^{-08}$
$^4S_{3/2}$	9012	150,30	0,023		6,286	$4,92*10^{-10}$
$^4F_{9/2}$	12147	364,53	0,055		15,245	$9,76*10^{-17}$
$^4I_{9/2}$	15002	683,10	0,103		28,567	$7,68*10^{-23}$
$^4I_{11/2}$	17213	1039,58	0,156		43,475	$1,07*10^{-27}$
$^4I_{15/2}$	27343	4171,16	0,627		174,440	$1,36*10^{-49}$
$^2G_{7/2} \rightarrow ^4G_{9/2}$	653	0,02	0,000	0.3509	0,001	$6,27*10^{+08}$
$^4G_{11/2}$	1666	0,36	0,000		0,017	$4,20*10^{+06}$
$^2G_{9/2}$	3504	3,41	0,001		0,156	$4,25*10^{+02}$
$^4F_{3/2}$	5470	13,02	0,005		0,595	$2,34*10^{-02}$
$^4F_{5/2}$	5907	16,34	0,006		0,747	$2,73*10^{-03}$

$^4F_{7/2}$	7592	34,56	0,012		1,580	$6,55*10^{-07}$
$^2H_{11/2}$	8918	55,92	0,020		2,558	$9,21*10^{-10}$
$^4S_{3/2}$	9665	71,86	0,025		3,286	$1,94*10^{-11}$
$^4F_{9/2}$	12800	165,45	0,058		7,567	$3,85*10^{-18}$
$^4I_{9/2}$	15655	301,20	0,106		13,774	$3,03*10^{-24}$
$^4I_{11/2}$	17866	450,94	0,158		20,622	$4,22*10^{-29}$
$^4I_{15/2}$	27996	1737,08	0,610		79,440	$5,37*10^{-51}$
$^2P_{3/2} \rightarrow ^2G_{7/2}$	3491	1,00	0,001	0.7358	0,104	$3,59*10^{+02}$
$^4G_{9/2}$	4144	1,66	0,001		0,172	$1,42*10^{+01}$
$^4G_{11/2}$	5157	3,16	0,002		0,328	$9,50*10^{-02}$
$^2G_{9/2}$	6995	7,88	0,006		0,818	$9,61*10^{-06}$
$^4F_{3/2}$	8961	16,52	0,012		1,714	$5,28*10^{-10}$
$^4F_{5/2}$	9398	19,01	0,014		1,973	$6,16*10^{-11}$
$^4F_{7/2}$	11083	31,02	0,023		3,219	$1,48*10^{-14}$
$^2H_{11/2}$	12409	43,42	0,032		4,506	$2,08*10^{-17}$
$^4S_{3/2}$	13156	52,06	0,038		5,403	$4,38*10^{-19}$
$^4F_{9/2}$	16291	97,99	0,072		10,170	$8,69*10^{-26}$
$^4I_{9/2}$	19146	158,20	0,116		16,419	$6,84*10^{-32}$
$^4I_{11/2}$	21357	220,70	0,162		22,905	$9,54*10^{-37}$
$^4I_{15/2}$	31487	706,37	0,520		73,310	$1,21*10^{-58}$

**Anexo 1: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluorofosfatos dopados con 0.5% Er<sup>3+</sup>**

Transición	$\Delta E$ (cm <sup>-1</sup> )	$A_{JJ}^{de}$ (s <sup>-1</sup> )	$\beta_{JJ}$	$\tau_R$ (ms)	$\rho_p$ (10 <sup>-22</sup> cm <sup>2</sup> )	$W_{NR}$ (s <sup>-1</sup> )
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	10130	136,858	1,000	7,3069	42,938	$2,08 \cdot 10^{-12}$
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2211	0,999	0,006	5,8903	0,145	$2,34 \cdot 10^5$
$^4I_{15/2}$	12341	168,771	0,994		24,416	$3,07 \cdot 10^{-17}$
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2855	9,579	0,006	0,0007	0,818	$1,17 \cdot 10^4$
$^4I_{11/2}$	5066	54,746	0,036		4,673	$17,29 \cdot 10^{-2}$
$^4I_{15/2}$	15196	1472,068	0,958		125,660	$2,27 \cdot 10^{-23}$
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	3135	2,743	0,004	1,5750	0,206	$3,13 \cdot 10^3$
$^4I_{9/2}$	5990	19,247	0,030		1,444	$2,31 \cdot 10^{-3}$
$^4I_{11/2}$	8201	50,179	0,079		3,764	$3,40 \cdot 10^{-8}$
$^4I_{15/2}$	18331	562,760	0,886		42,209	$4,45 \cdot 10^{-30}$
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	747	0,699	0,000	0,0821	0,045	$3,41 \cdot 10^8$
$^4F_{9/2}$	3882	88,411	0,007		5,635	$0,67 \cdot 10^2$
$^4I_{9/2}$	6737	459,518	0,038		29,289	$4,95 \cdot 10^{-5}$
$^4I_{11/2}$	8948	1088,520	0,089		69,381	$7,29 \cdot 10^{-10}$
$^4I_{15/2}$	19078	10541,755	0,866		671,920	$9,56 \cdot 10^{-32}$
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	1326	0,538	0,000	0,4172	0,030	$2,24 \cdot 10^7$
$^4S_{3/2}$	2073	2,143	0,001		0,120	$4,80 \cdot 10^5$
$^4F_{9/2}$	5208	32,834	0,014		1,838	$9,44 \cdot 10^{-2}$
$^4I_{9/2}$	8063	121,382	0,051		6,795	$6,96 \cdot 10^{-8}$
$^4I_{11/2}$	10274	253,566	0,106		14,195	$1,03 \cdot 10^{-12}$
$^4I_{15/2}$	20404	1986,628	0,829		111,210	$1,35 \cdot 10^{-34}$
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	1685	0,347	0,000	0,9797	0,022	$3,87 \cdot 10^6$
$^2H_{11/2}$	3011	1,985	0,002		0,126	$5,45 \cdot 10^3$
$^4S_{3/2}$	3758	3,952	0,004		0,251	$1,17 \cdot 10^2$
$^4F_{9/2}$	6893	24,004	0,024		1,521	$2,30 \cdot 10^{-5}$
$^4I_{9/2}$	9748	67,752	0,066		4,294	$1,70 \cdot 10^{-11}$
$^4I_{11/2}$	11959	126,193	0,124		7,997	$2,50 \cdot 10^{-16}$
$^4I_{15/2}$	22089	796,464	0,780		50,475	$3,28 \cdot 10^{-38}$
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	437	0,005	0,000	1,2712	0,000	$1,64 \cdot 10^9$
$^4F_{7/2}$	2122	0,509	0,001		0,025	$4,00 \cdot 10^5$
$^2H_{11/2}$	3448	2,164	0,003		0,108	$5,63 \cdot 10^2$
$^4S_{3/2}$	4195	3,968	0,005		0,198	$0,12 \cdot 10^2$
$^4F_{9/2}$	7330	20,740	0,026		1,033	$2,37 \cdot 10^{-6}$
$^4I_{9/2}$	10185	55,397	0,070		2,758	$1,75 \cdot 10^{-12}$
$^4I_{11/2}$	12396	100,600	0,128		5,009	$2,58 \cdot 10^{-17}$
$^4I_{15/2}$	22526	603,302	0,767		30,039	$3,38 \cdot 10^{-39}$

${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	1966	0,625	0,000	0,5740	0,019	$9,72*10^5$
${}^4F_{5/2}$	2403	1,174	0,001		0,036	$1,00*10^5$
${}^4F_{7/2}$	4088	5,719	0,003		0,175	$0,24*10^2$
${}^2H_{11/2}$	5414	13,259	0,008		0,407	$3,44*10^{-2}$
${}^4S_{3/2}$	6161	19,801	0,011		0,607	$7,38*10^{-4}$
${}^4F_{9/2}$	9296	67,229	0,039		2,061	$1,45*10^{-10}$
${}^4I_{9/2}$	12151	149,758	0,086		4,592	$1,07*10^{-16}$
${}^4I_{11/2}$	14362	248,952	0,143		7,633	$1,58*10^{-21}$
${}^4I_{15/2}$	24492	1235,682	0,709		37,888	$2,07*10^{-43}$
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^2G_{9/2}$	1838	4,068	0,000	0,0553	0,099	$1,66*10^6$
${}^4F_{3/2}$	3804	35,478	0,002		0,863	$1,02*10^2$
${}^4F_{5/2}$	4241	49,887	0,003		1,214	$0,10*10^2$
${}^4F_{7/2}$	5926	135,025	0,008		3,286	$2,55*10^{-3}$
${}^2H_{11/2}$	7252	246,917	0,014		6,009	$3,60*10^{-6}$
${}^4S_{3/2}$	7999	334,636	0,019		8,144	$7,72*10^{-8}$
${}^4F_{9/2}$	11134	893,567	0,049		21,746	$1,52*10^{-14}$
${}^4I_{9/2}$	13989	1767,502	0,098		43,014	$1,12*10^{-20}$
${}^4I_{11/2}$	16200	2760,570	0,153		67,182	$1,65*10^{-25}$
${}^4I_{15/2}$	26330	11856,447	0,656		288,540	$2,16*10^{-47}$
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$	1013	0,137	0,000	0,2293	0,006	$1,07*10^8$
${}^2G_{9/2}$	2851	3,099	0,001		0,127	$1,11*10^4$
${}^4F_{3/2}$	4817	14,815	0,003		0,608	$68,16*10^{-2}$
${}^4F_{5/2}$	5254	19,457	0,005		0,798	$7,04*10^{-2}$
${}^4F_{7/2}$	6939	44,574	0,010		1,828	$1,71*10^{-5}$
${}^2H_{11/2}$	8265	75,209	0,017		3,085	$2,41*10^{-8}$
${}^4S_{3/2}$	9012	98,376	0,023		4,035	$5,18*10^{-10}$
${}^4F_{9/2}$	12147	238,906	0,055		9,799	$1,02*10^{-16}$
${}^4I_{9/2}$	15002	449,043	0,103		18,419	$7,51*10^{-23}$
${}^4I_{11/2}$	17213	681,981	0,156		27,973	$1,11*10^{-27}$
${}^4I_{15/2}$	27343	2735,702	0,627		112,210	$1,45*10^{-49}$
${}^2G_{7/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$	653	0,018	0,000	0,4699	0,001	$5,64*10^8$
${}^4G_{11/2}$	1666	0,279	0,000		0,013	$3,79*10^6$
${}^2G_{9/2}$	3504	2,574	0,001		0,121	$3,96*10^2$
${}^4F_{3/2}$	5470	9,662	0,005		0,455	$2,42*10^{-2}$
${}^4F_{5/2}$	5907	12,288	0,006		0,578	$2,50*10^{-3}$
${}^4F_{7/2}$	7592	25,9048	0,012		1,219	$6,08*10^{-7}$
${}^2H_{11/2}$	8918	41,882	0,020		1,970	$8,56*10^{-10}$
${}^4S_{3/2}$	9665	53,731	0,025		2,527	$1,84*10^{-11}$
${}^4F_{9/2}$	12800	123,668	0,058		5,817	$3,61*10^{-18}$

$^4I_{9/2}$	15655	225,573	0,106		10,610	$2,66*10^{-24}$
$^4I_{11/2}$	17866	336,884	0,158		15,846	$3,93*10^{-29}$
$^4I_{15/2}$	27996	1295,726	0,609		60,946	$5,15*10^{-51}$
$^2P_{3/2} \rightarrow ^2G_{7/2}$	3491	0,291	0,001	2,3513	0,009	$5,76*10^2$
$^4G_{9/2}$	4144	0,497	0,001		0,015	$0,20*10^2$
$^4G_{11/2}$	5157	0,958	0,002		0,030	$13,72*10^{-2}$
$^2G_{9/2}$	6995	2,409	0,006		0,075	$1,43*10^{-5}$
$^4F_{3/2}$	8961	5,054	0,012		0,157	$8,77*10^{-10}$
$^4F_{5/2}$	9398	5,870	0,014		0,182	$9,06*10^{-11}$
$^4F_{7/2}$	11083	9,608	0,023		0,298	$2,20*10^{-14}$
$^2H_{11/2}$	12409	13,481	0,032		0,419	$3,10*10^{-17}$
$^4S_{3/2}$	13156	16,169	0,038		0,502	$6,66*10^{-19}$
$^4F_{9/2}$	16291	30,555	0,072		0,949	$1,31*10^{-25}$
$^4I_{9/2}$	19146	49,540	0,117		1,539	$9,66*10^{-32}$
$^4I_{11/2}$	21357	69,083	0,162		2,146	$1,42*10^{-36}$
$^4I_{15/2}$	31487	221,785	0,522		6,888	$1,87*10^{-58}$

**Anexo 2: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluorofosfatos dopados con 1% Er<sup>3+</sup>**

Transición	$\Delta E$ (cm <sup>-1</sup> )	$A_{JJ'}^{de}$ (s <sup>-1</sup> )	$\beta_{JJ'}$	$\tau_R$ (ms)	$\rho_p(10^{-22}\text{cm}^2)$	$W_{NR}(s^{-1})$
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	10130	162,614	1,000	6.1500	51,612	2,09E-12
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2211	1,125	0,006	5.2650	0,157	2,27E+05
$^4I_{15/2}$	12341	188,825	0,994		26,394	2,98E-17
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2855	10,948	0,006	0.0006	0,929	1,20E+04
$^4I_{11/2}$	5066	62,921	0,036		5,340	1,71E-01
$^4I_{15/2}$	15196	1690,089	0,958		143,440	2,24E-23
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	3135	3,312	0,004	1.3050	0,234	3,11E+03
$^4I_{9/2}$	5990	23,180	0,030		1,636	2,34E-03
$^4I_{11/2}$	8201	60,603	0,079		4,277	3,34E-08
$^4I_{15/2}$	18331	679,170	0,886		47,927	4,38E-30
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	747	0,780	0,000	0.5511	0,051	3,38E+08
$^4F_{9/2}$	3882	98,091	0,054		6,384	6,61E+01
$^4I_{9/2}$	6737	508,490	0,280		33,094	4,97E-05
$^4I_{11/2}$	8948	1207,267	0,665		78,572	7,09E-10
$^4I_{15/2}$	19078	11680,081	6,437		760,170	9,31E-32
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	1326	0,637	0,000	0.3526	0,038	2,23E+07
$^4S_{3/2}$	2073	2,543	0,001		0,150	4,74E+05
$^4F_{9/2}$	5208	38,892	0,014		2,296	9,29E-02
$^4I_{9/2}$	8063	143,473	0,051		8,468	6,98E-08
$^4I_{11/2}$	10274	300,291	0,106		17,723	9,96E-13
$^4I_{15/2}$	20404	2350,607	0,829		138,740	1,31E-34
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	1685	0,421	0,000	0.8111	0,029	3,81E+06
$^2H_{11/2}$	3011	2,403	0,002		0,168	5,35E+03
$^4S_{3/2}$	3758	4,790	0,004		0,334	1,14E+02
$^4F_{9/2}$	6893	29,040	0,024		2,027	2,22E-05
$^4I_{9/2}$	9748	81,797	0,066		5,709	1,67E-11
$^4I_{11/2}$	11959	152,575	0,124		10,649	2,38E-16
$^4I_{15/2}$	22089	961,909	0,780		67,134	3,13E-38
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	437	0,006	0,000	1.0539	0,000	1,71E+09
$^4F_{7/2}$	2122	0,610	0,001		0,031	4,10E+05
$^2H_{11/2}$	3448	2,601	0,003		0,130	5,76E+02
$^4S_{3/2}$	4195	4,778	0,005		0,239	1,22E+01
$^4F_{9/2}$	7330	24,999	0,026		1,248	2,39E-06
$^4I_{9/2}$	10185	66,712	0,070		3,331	1,80E-12
$^4I_{11/2}$	12396	121,374	0,128		6,061	2,57E-17
$^4I_{15/2}$	22526	727,790	0,767		36,342	3,37E-39

${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	1966	0,7456	0,000	0.4801	0,029	9,80E+05
${}^4F_{5/2}$	2403	1,387	0,001		0,054	1,06E+05
${}^4F_{7/2}$	4088	6,806	0,003		0,266	2,53E+01
${}^2H_{11/2}$	5414	15,803	0,008		0,617	3,55E-02
${}^4S_{3/2}$	6161	23,634	0,011		0,923	7,53E-04
${}^4F_{9/2}$	9296	80,316	0,039		3,135	1,48E-10
${}^4I_{9/2}$	12151	178,785	0,086		6,979	1,11E-16
${}^4I_{11/2}$	14362	297,688	0,143		11,620	1,58E-21
${}^4I_{15/2}$	24492	1477,630	0,709		57,676	2,08E-43
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^2G_{9/2}$	1838	4,595	0,000	0.0499	0,114	1,56E+06
${}^4F_{3/2}$	3804	39,613	0,001		0,986	9,62E+01
${}^4F_{5/2}$	4241	55,322	0,001		1,377	1,04E+01
${}^4F_{7/2}$	5926	149,919	0,002		3,733	2,48E-03
${}^2H_{11/2}$	7252	274,062	0,004		6,823	3,48E-06
${}^4S_{3/2}$	7999	371,613	0,005		9,252	7,40E-08
${}^4F_{9/2}$	11134	991,643	0,014		24,689	1,45E-14
${}^4I_{9/2}$	13989	1958,892	0,027		48,770	1,09E-20
${}^4I_{11/2}$	16200	3062,655	0,043		76,250	1,55E-25
${}^4I_{15/2}$	26330	13142,485	0,184		327,200	2,04E-47
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$	1013	0,153	0,000	0.2014	0,006	1,09E+08
${}^2G_{9/2}$	2851	3,555	0,001		0,146	1,07E+04
${}^4F_{3/2}$	4817	16,919	0,003		0,696	6,59E-01
${}^4F_{5/2}$	5254	22,105	0,005		0,909	7,10E-02
${}^4F_{7/2}$	6939	50,728	0,010		2,086	1,70E-05
${}^2H_{11/2}$	8265	85,601	0,017		3,520	2,39E-08
${}^4S_{3/2}$	9012	112,037	0,023		4,607	5,07E-10
${}^4F_{9/2}$	12147	272,039	0,055		11,186	9,93E-17
${}^4I_{9/2}$	15002	510,806	0,103		21,005	7,46E-23
${}^4I_{11/2}$	17213	776,633	0,156		31,936	1,06E-27
${}^4I_{15/2}$	27343	3113,796	0,627		128,040	1,40E-49
${}^2G_{7/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$	653	0,021	0,000	0.3952	0,001	5,84E+08
${}^4G_{11/2}$	1666	0,325	0,000		0,015	4,00E+06
${}^2G_{9/2}$	3504	3,065	0,001		0,140	3,93E+02
${}^4F_{3/2}$	5470	11,489	0,005		0,524	2,42E-02
${}^4F_{5/2}$	5907	14,550	0,006		0,663	2,61E-03
${}^4F_{7/2}$	7592	30,744	0,012		1,402	6,24E-07
${}^2H_{11/2}$	8918	49,730	0,020		2,267	8,77E-10
${}^4S_{3/2}$	9665	63,848	0,025		2,911	1,86E-11
${}^4F_{9/2}$	12800	147,011	0,058		6,702	3,65E-18

$^4I_{9/2}$	15655	267,977	0,106		12,217	2,74E-24
$^4I_{11/2}$	17866	400,701	0,158		18,267	3,91E-29
$^4I_{15/2}$	27996	1541,092	0,609		70,255	5,13E-51
$^2P_{3/2} \rightarrow ^2G_{7/2}$	3491	0,357	0,001	1.9448	0,007	5,26E+02
$^4G_{9/2}$	4144	0,605	0,001		0,011	1,93E+01
$^4G_{11/2}$	5157	1,161	0,002		0,022	1,32E-01
$^2G_{9/2}$	6995	2,931	0,006		0,055	1,30E-05
$^4F_{3/2}$	8961	6,133	0,012		0,114	8,02E-10
$^4F_{5/2}$	9398	7,103	0,014		0,132	8,63E-11
$^4F_{7/2}$	11083	11,630	0,023		0,217	2,07E-14
$^2H_{11/2}$	12409	16,315	0,032		0,304	2,90E-17
$^4S_{3/2}$	13156	19,572	0,038		0,365	6,16E-19
$^4F_{9/2}$	16291	36,967	0,072		0,689	1,21E-25
$^4I_{9/2}$	19146	59,873	0,116		1,117	9,07E-32
$^4I_{11/2}$	21357	83,552	0,163		1,558	1,29E-36
$^4I_{15/2}$	31487	267,999	0,521		4,998	1,70E-58

**Anexo 3: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluorofosfatos dopados con 1.5% Er<sup>3+</sup>**

Transición	$\Delta E$ (cm <sup>-1</sup> )	$A_{JJ}^{de}$ (s <sup>-1</sup> )	$\beta_{JJ}$	$\tau_R$ (ms)	$\rho_p(10^{-22}\text{cm}^2)$	$W_{NR}(s^{-1})$
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	10130	227,243	1,000	4.4010	75,632	2,16E-12
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2211	1,622	0,004	3.6080	0,240	2,42E+05
$^4I_{15/2}$	12341	275,577	0,994		40,732	3,29E-17
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2855	16,141	0,006	0.0004	1,494	1,17E+04
$^4I_{11/2}$	5066	91,859	0,036		8,500	1,77E-01
$^4I_{15/2}$	15196	2471,633	0,958		228,700	2,41E-23
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	3135	4,943	0,004	0.8885	0,379	2,85E+03
$^4I_{9/2}$	5990	34,403	0,031		2,636	2,09E-03
$^4I_{11/2}$	8201	89,242	0,079		6,838	3,18E-08
$^4I_{15/2}$	18331	996,967	0,886		76,389	4,32E-30
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	747	0,844	0,000	0.0644	0,057	3,66E+08
$^4F_{9/2}$	3882	113,177	0,007		7,574	6,56E+01
$^4I_{9/2}$	6737	587,651	0,038		39,329	4,81E-05
$^4I_{11/2}$	8948	1388,224	0,089		92,907	7,32E-10
$^4I_{15/2}$	19078	13430,802	0,865		898,860	9,95E-32
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	1326	0,930	0,000	0.2408	0,051	2,26E+07
$^4S_{3/2}$	2073	3,634	0,001		0,197	5,19E+05
$^4F_{9/2}$	5208	57,043	0,014		3,096	9,31E-02
$^4I_{9/2}$	8063	210,833	0,051		11,442	6,83E-08
$^4I_{11/2}$	10274	439,469	0,106		23,851	1,04E-12
$^4I_{15/2}$	20404	3440,651	0,829		186,730	1,41E-34
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	1685	0,630	0,000	0.5527	0,039	3,59E+06
$^2H_{11/2}$	3011	3,561	0,002		0,223	5,09E+03
$^4S_{3/2}$	3758	6,992	0,004		0,437	1,17E+02
$^4F_{9/2}$	6893	42,822	0,024		2,675	2,10E-05
$^4I_{9/2}$	9748	120,622	0,067		7,535	1,54E-11
$^4I_{11/2}$	11959	224,063	0,124		13,997	2,34E-16
$^4I_{15/2}$	22089	1410,675	0,780		88,123	3,19E-38
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	437	0,008	0,000	0.7189	0,000	1,77E+09
$^4F_{7/2}$	2122	0,902	0,001		0,048	3,98E+05
$^2H_{11/2}$	3448	3,828	0,003		0,206	5,65E+02
$^4S_{3/2}$	4195	6,949	0,005		0,373	1,30E+01
$^4F_{9/2}$	7330	36,760	0,026		1,975	2,33E-06
$^4I_{9/2}$	10185	98,177	0,071		5,273	1,71E-12
$^4I_{11/2}$	12396	177,971	0,128		9,559	2,60E-17
$^4I_{15/2}$	22526	1066,461	0,767		57,283	3,54E-39

${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	1966	1,100	0,000	0.3273	0,042	9,62E+05
${}^4F_{5/2}$	2403	2,029	0,001		0,077	1,07E+05
${}^4F_{7/2}$	4088	10,056	0,003		0,380	2,41E+01
${}^2H_{11/2}$	5414	23,281	0,008		0,880	3,42E-02
${}^4S_{3/2}$	6161	34,527	0,011		1,305	7,87E-04
${}^4F_{9/2}$	9296	118,183	0,039		4,468	1,41E-10
${}^4I_{9/2}$	12151	263,215	0,086		9,950	1,03E-16
${}^4I_{11/2}$	14362	436,861	0,143		16,515	1,57E-21
${}^4I_{15/2}$	24492	2166,348	0,709		81,895	2,14E-43
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^2G_{9/2}$	1838	5,162	0,000	0.0434	0,143	1,68E+06
${}^4F_{3/2}$	3804	45,201	0,002		1,252	1,02E+02
${}^4F_{5/2}$	4241	62,910	0,003		1,742	1,13E+01
${}^4F_{7/2}$	5926	172,115	0,008		4,766	2,55E-03
${}^2H_{11/2}$	7252	314,531	0,014		8,710	3,62E-06
${}^4S_{3/2}$	7999	424,047	0,018		11,742	8,34E-08
${}^4F_{9/2}$	11134	1139,868	0,050		31,564	1,49E-14
${}^4I_{9/2}$	13989	2254,815	0,098		62,438	1,10E-20
${}^4I_{11/2}$	16200	3517,099	0,153		97,392	1,67E-25
${}^4I_{15/2}$	26330	15095,543	0,655		418,010	2,27E-47
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$	1013	0,229	0,000	0.1375	0,010	1,06E+08
${}^2G_{9/2}$	2851	5,161	0,001		0,220	1,12E+04
${}^4F_{3/2}$	4817	24,724	0,003		1,056	6,79E-01
${}^4F_{5/2}$	5254	32,199	0,004		1,375	7,54E-02
${}^4F_{7/2}$	6939	74,397	0,010		3,177	1,70E-05
${}^2H_{11/2}$	8265	125,445	0,017		5,357	2,41E-08
${}^4S_{3/2}$	9012	163,318	0,023		6,974	5,56E-10
${}^4F_{9/2}$	12147	398,933	0,055		17,035	9,96E-17
${}^4I_{9/2}$	15002	749,829	0,103		32,019	7,31E-23
${}^4I_{11/2}$	17213	1137,376	0,156		48,568	1,11E-27
${}^4I_{15/2}$	27343	4559,113	0,627		194,680	1,51E-49
${}^2G_{7/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$	653	0,029	0,000	0.2701	0,001	6,08E+08
${}^4G_{11/2}$	1666	0,474	0,000		0,021	4,05E+06
${}^2G_{9/2}$	3504	4,429	0,001		0,195	4,29E+02
${}^4F_{3/2}$	5470	16,728	0,005		0,737	2,60E-02
${}^4F_{5/2}$	5907	21,130	0,006		0,931	2,88E-03
${}^4F_{7/2}$	7592	44,958	0,012		1,981	6,51E-07
${}^2H_{11/2}$	8918	72,706	0,020		3,204	9,23E-10
${}^4S_{3/2}$	9665	92,906	0,025		4,094	2,13E-11
${}^4F_{9/2}$	12800	215,244	0,058		9,484	3,81E-18

$^4I_{9/2}$	15655	392,867	0,106		17,310	2,79E-24
$^4I_{11/2}$	17866	586,238	0,158		25,830	4,25E-29
$^4I_{15/2}$	27996	2255,226	0,609		99,368	5,78E-51
$^2P_{3/2} \rightarrow ^2G_{7/2}$	3491	0,544	0,001	1.3200	0,013	4,22E+02
$^4G_{9/2}$	4144	0,911	0,001		0,022	1,61E+01
$^4G_{11/2}$	5157	1,745	0,002		0,042	1,08E-01
$^2G_{9/2}$	6995	4,349	0,006		0,105	1,14E-05
$^4F_{3/2}$	8961	9,090	0,012		0,219	6,90E-10
$^4F_{5/2}$	9398	10,502	0,014		0,253	7,66E-11
$^4F_{7/2}$	11083	17,232	0,023		0,415	1,73E-14
$^2H_{11/2}$	12409	24,135	0,032		0,482	2,45E-17
$^4S_{3/2}$	13156	28,834	0,038		0,695	5,64E-19
$^4F_{9/2}$	16291	54,597	0,072		1,316	1,01E-25
$^4I_{9/2}$	19146	88,409	0,117		2,131	7,42E-32
$^4I_{11/2}$	21357	123,069	0,163		2,967	1,13E-36
$^4I_{15/2}$	31487	393,995	0,520		9,499	1,53E-58

**Anexo 4: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluorofosfatos dopados con 2.0% Er<sup>3+</sup>**

Transición	$\Delta E$ (cm <sup>-1</sup> )	$A_{JJ'}^{de}$ (s <sup>-1</sup> )	$\beta_{JJ'}$	$\tau_R$ (ms)	$\rho_p(10^{-22}\text{cm}^2)$	$W_{NR}(s^{-1})$
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	10130	199,031	1,000	5.0240	50,481	2,20E-12
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2211	1,504	0,006	3.9290	0,212	2,32E+05
$^4I_{15/2}$	12341	252,997	0,994		35,667	3,21E-17
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2855	14,473	0,006	0.0000	1,089	1,17E+04
$^4I_{11/2}$	5066	82,825	0,036		6,235	1,71E-01
$^4I_{15/2}$	15196	2220,488	0,958		167,150	2,37E-23
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	3135	4,239	0,004	1.0300	0,230	2,95E+03
$^4I_{9/2}$	5990	29,582	0,031		1,606	2,18E-03
$^4I_{11/2}$	8201	77,063	0,079		4,183	3,18E-08
$^4I_{15/2}$	18331	860,320	0,886		46,696	4,40E-30
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	747	0,785	0,000	0.0675	0,040	3,78E+08
$^4F_{9/2}$	3882	107,036	0,007		5,391	7,02E+01
$^4I_{9/2}$	6737	557,974	0,038		28,101	5,18E-05
$^4I_{11/2}$	8948	1324,093	0,089		66,684	7,56E-10
$^4I_{15/2}$	19078	12817,387	0,866		645,510	1,05E-31
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	1326	0,826	0,000	0.2748	0,035	2,20E+07
$^4S_{3/2}$	2073	3,181	0,001		0,135	5,23E+05
$^4F_{9/2}$	5208	49,793	0,014		2,119	9,70E-02
$^4I_{9/2}$	8063	184,263	0,051		7,843	7,16E-08
$^4I_{11/2}$	10274	385,338	0,106		16,401	1,04E-12
$^4I_{15/2}$	20404	3015,584	0,829		128,350	1,45E-34
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	1685	0,557	0,000	0.6392	0,031	3,37E+06
$^2H_{11/2}$	3011	3,131	0,002		0,175	4,65E+03
$^4S_{3/2}$	3758	6,092	0,004		0,340	1,11E+02
$^4F_{9/2}$	6893	37,044	0,024		2,070	2,05E-05
$^4I_{9/2}$	9748	104,251	0,067		5,824	1,52E-11
$^4I_{11/2}$	11959	194,031	0,124		10,840	2,21E-16
$^4I_{15/2}$	22089	1219,328	0,779		68,120	3,06E-38
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	437	0,007	0,000	0.8312	0,000	1,75E+09
$^4F_{7/2}$	2122	0,795	0,001		0,037	3,71E+05
$^2H_{11/2}$	3448	3,363	0,003		0,157	5,12E+02
$^4S_{3/2}$	4195	6,057	0,005		0,282	1,22E+01
$^4F_{9/2}$	7330	31,821	0,026		1,482	2,26E-06
$^4I_{9/2}$	10185	84,895	0,071		3,953	1,67E-12
$^4I_{11/2}$	12396	154,170	0,128		7,178	2,43E-17
$^4I_{15/2}$	22526	922,014	0,766		42,927	3,37E-39

${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	1966	0,932	0,000	0.3770	0,027	1,05E+06
${}^4F_{5/2}$	2403	1,730	0,001		0,050	1,15E+05
${}^4F_{7/2}$	4088	8,724	0,003		0,253	2,44E+01
${}^2H_{11/2}$	5414	20,269	0,008		0,588	3,37E-02
${}^4S_{3/2}$	6161	29,956	0,011		0,869	8,02E-04
${}^4F_{9/2}$	9296	102,367	0,039		2,970	1,49E-10
${}^4I_{9/2}$	12151	228,109	0,086		6,618	1,10E-16
${}^4I_{11/2}$	14362	379,445	0,143		11,009	1,60E-21
${}^4I_{15/2}$	24492	1881,328	0,709		54,582	2,22E-43
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^2G_{9/2}$	1838	4,967	0,000	0.0454	0,106	1,65E+06
${}^4F_{3/2}$	3804	42,767	0,002		0,913	1,09E+02
${}^4F_{5/2}$	4241	59,667	0,003		1,274	1,20E+01
${}^4F_{7/2}$	5926	164,666	0,008		3,515	2,53E-03
${}^2H_{11/2}$	7252	301,564	0,014		6,437	3,50E-06
${}^4S_{3/2}$	7999	405,431	0,018		8,655	8,33E-08
${}^4F_{9/2}$	11134	1087,749	0,049		23,220	1,55E-14
${}^4I_{9/2}$	13989	2151,971	0,098		45,938	1,14E-20
${}^4I_{11/2}$	16200	3362,785	0,153		71,784	1,66E-25
${}^4I_{15/2}$	26330	14426,534	0,656		307,960	2,30E-47
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$	1013	0,209	0,000	0.1521	0,007	1,04E+08
${}^2G_{9/2}$	2851	4,705	0,001		0,154	1,08E+04
${}^4F_{3/2}$	4817	22,225	0,003		0,728	7,11E-01
${}^4F_{5/2}$	5254	28,990	0,004		0,950	7,82E-02
${}^4F_{7/2}$	6939	67,419	0,010		2,208	1,66E-05
${}^2H_{11/2}$	8265	113,865	0,017		3,729	2,29E-08
${}^4S_{3/2}$	9012	147,861	0,023		4,843	5,45E-10
${}^4F_{9/2}$	12147	360,428	0,055		11,805	1,01E-16
${}^4I_{9/2}$	15002	677,386	0,103		22,186	7,46E-23
${}^4I_{11/2}$	17213	1029,130	0,157		33,707	1,09E-27
${}^4I_{15/2}$	27343	4122,343	0,627		135,020	1,51E-49
${}^2G_{7/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$	653	0,025	0,000	0.3094	0,001	6,10E+08
${}^4G_{11/2}$	1666	0,416	0,000		0,012	3,99E+06
${}^2G_{9/2}$	3504	3,890	0,001		0,111	4,14E+02
${}^4F_{3/2}$	5470	14,523	0,005		0,414	2,73E-02
${}^4F_{5/2}$	5907	18,369	0,006		0,524	3,00E-03
${}^4F_{7/2}$	7592	39,318	0,012		1,121	6,36E-07
${}^2H_{11/2}$	8918	63,685	0,020		1,815	8,79E-10
${}^4S_{3/2}$	9665	81,187	0,025		2,314	2,09E-11
${}^4F_{9/2}$	12800	187,737	0,058		5,351	3,88E-18

$^4I_{9/2}$	15655	342,638	0,106		9,767	2,86E-24
$^4I_{11/2}$	17866	512,079	0,158		14,596	4,18E-29
$^4I_{15/2}$	27996	1968,713	0,609		56,117	5,79E-51
$^2P_{3/2} \rightarrow ^2G_{7/2}$	3491	0,482	0,001	1.5230	0,044	3,67E+02
$^4G_{9/2}$	4144	0,802	0,001		0,074	1,41E+01
$^4G_{11/2}$	5157	1,534	0,002		0,141	9,22E-02
$^2G_{9/2}$	6995	3,812	0,006		0,352	9,57E-06
$^4F_{3/2}$	8961	7,896	0,012		0,728	6,30E-10
$^4F_{5/2}$	9398	9,126	0,014		0,841	6,93E-11
$^4F_{7/2}$	11083	15,010	0,023		1,384	1,47E-14
$^2H_{11/2}$	12409	21,031	0,032		1,939	2,03E-17
$^4S_{3/2}$	13156	25,075	0,038		2,312	4,83E-19
$^4F_{9/2}$	16291	47,352	0,072		4,366	8,96E-26
$^4I_{9/2}$	19146	76,612	0,117		7,063	6,61E-32
$^4I_{11/2}$	21357	106,734	0,163		9,840	9,65E-37
$^4I_{15/2}$	31487	341,090	0,520		31,447	1,34E-58

**Anexo 5: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluoroplomados dopados con 0.5%  $Er^{3+}$**

Transición	$\Delta E$ (cm <sup>-1</sup> )	$A_{JJ}^{de}$ (s <sup>-1</sup> )	$\beta_{JJ}$	$\tau_R$ (ms)	$\rho_p(10^{-22}\text{cm}^2)$	$W_{NR}(s^{-1})$
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	10130	200,710	1,000	4.9820	52,947	2,15E-12
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2211	1,426	0,006	4.0110	0,158	2,68E+05
$^4I_{15/2}$	12341	247,918	0,994		27,429	3,63E-17
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2855	14,618	0,006	0.0004	1,030	1,09E+04
$^4I_{11/2}$	5066	81,670	0,036		5,753	1,84E-01
$^4I_{15/2}$	15196	2203,689	0,958		155,220	2,49E-23
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	3135	4,353	0,004	1.0170	0,283	2,71E+03
$^4I_{9/2}$	5990	30,371	0,031		1,974	1,86E-03
$^4I_{11/2}$	8201	77,949	0,079		5,065	3,13E-08
$^4I_{15/2}$	18331	870,389	0,885		56,562	4,24E-30
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	747	0,757	0,000	0.0685	0,039	3,89E+08
$^4F_{9/2}$	3882	106,418	0,007		5,459	6,64E+01
$^4I_{9/2}$	6737	556,372	0,038		28,542	4,55E-05
$^4I_{11/2}$	8948	1303,737	0,089		66,882	7,66E-10
$^4I_{15/2}$	19078	12635,55 6	0,865		648,200	1,04E-31
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	1326	0,831	0,000	0.2735	0,035	2,19E+07
$^4S_{3/2}$	2073	3,173	0,001		0,133	5,34E+05
$^4F_{9/2}$	5208	50,345	0,014		2,102	9,12E-02
$^4I_{9/2}$	8063	186,870	0,051		7,803	6,25E-08
$^4I_{11/2}$	10274	386,650	0,106		16,146	1,05E-12
$^4I_{15/2}$	20404	3028,648	0,828		126,470	1,43E-34
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	1685	0,547	0,000	0.6337	0,023	3,65E+06
$^2H_{11/2}$	3011	3,117	0,002		0,132	5,01E+03
$^4S_{3/2}$	3758	6,057	0,004		0,257	1,23E+02
$^4F_{9/2}$	6893	37,375	0,024		1,583	2,09E-05
$^4I_{9/2}$	9748	105,713	0,067		4,478	1,43E-11
$^4I_{11/2}$	11959	195,202	0,124		8,269	2,41E-16
$^4I_{15/2}$	22089	1229,944	0,780		52,104	3,27E-38
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	437	0,007	0,000	0.8250	0,000	1,81E+09
$^4F_{7/2}$	2122	0,778	0,001		0,036	4,16E+05
$^2H_{11/2}$	3448	3,334	0,003		0,155	5,71E+02
$^4S_{3/2}$	4195	6,002	0,005		0,279	1,40E+01
$^4F_{9/2}$	7330	32,016	0,026		1,489	2,38E-06
$^4I_{9/2}$	10185	85,894	0,071		3,995	1,63E-12
$^4I_{11/2}$	12396	154,861	0,128		7,203	2,75E-17
$^4I_{15/2}$	22526	929,202	0,767		43,220	3,71E-39

${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	1966	0,981	0,000	0.3734	0,029	9,09E+05
${}^4F_{5/2}$	2403	1,791	0,001		0,054	1,04E+05
${}^4F_{7/2}$	4088	8,827	0,003		0,265	2,37E+01
${}^2H_{11/2}$	5414	20,499	0,008		0,615	3,26E-02
${}^4S_{3/2}$	6161	30,202	0,011		0,906	7,98E-04
${}^4F_{9/2}$	9296	103,750	0,039		3,111	1,36E-10
${}^4I_{9/2}$	12151	231,730	0,087		6,949	9,34E-17
${}^4I_{11/2}$	14362	382,663	0,143		11,474	1,57E-21
${}^4I_{15/2}$	24492	1897,726	0,709		56,904	2,13E-43
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^2G_{9/2}$	1838	4,838	0,000	0.0461	0,102	1,71E+06
${}^4F_{3/2}$	3804	42,864	0,002		0,903	9,78E+01
${}^4F_{5/2}$	4241	59,400	0,003		1,251	1,11E+01
${}^4F_{7/2}$	5926	162,144	0,008		3,414	2,56E-03
${}^2H_{11/2}$	7252	297,113	0,014		6,256	3,51E-06
${}^4S_{3/2}$	7999	398,646	0,018		8,393	8,59E-08
${}^4F_{9/2}$	11134	1075,082	0,050		22,636	1,47E-14
${}^4I_{9/2}$	13989	2132,464	0,098		44,898	1,00E-20
${}^4I_{11/2}$	16200	3311,985	0,153		69,733	1,69E-25
${}^4I_{15/2}$	26330	14219,44	0,655		299,390	2,29E-47
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$	1013	0,208	0,000	0.1533	0,007	1,04E+08
${}^2G_{9/2}$	2851	4,632	0,001		0,154	1,12E+04
${}^4F_{3/2}$	4817	22,339	0,003		0,741	6,37E-01
${}^4F_{5/2}$	5254	28,988	0,004		0,962	7,26E-02
${}^4F_{7/2}$	6939	66,812	0,010		2,217	1,67E-05
${}^2H_{11/2}$	8265	112,888	0,017		3,746	2,29E-08
${}^4S_{3/2}$	9012	146,328	0,022		4,855	5,60E-10
${}^4F_{9/2}$	12147	358,338	0,055		11,889	9,55E-17
${}^4I_{9/2}$	15002	675,108	0,104		22,400	6,55E-23
${}^4I_{11/2}$	17213	1019,814	0,156		33,837	1,10E-27
${}^4I_{15/2}$	27343	4087,802	0,627		135,630	1,49E-49
${}^2G_{7/2} \rightarrow {}^2G_{9/2}$	653	0,025	0,000	0.3074	0,001	6,19E+08
${}^4G_{11/2}$	1666	0,417	0,000		0,015	4,04E+06
${}^2G_{9/2}$	3504	3,881	0,001		0,140	4,34E+02
${}^4F_{3/2}$	5470	14,762	0,005		0,531	2,48E-02
${}^4F_{5/2}$	5907	18,591	0,006		0,669	2,83E-03
${}^4F_{7/2}$	7592	39,487	0,012		1,420	6,49E-07
${}^2H_{11/2}$	8918	63,996	0,020		2,301	8,91E-10
${}^4S_{3/2}$	9665	81,452	0,025		2,929	2,18E-11
${}^4F_{9/2}$	12800	189,213	0,058		6,804	3,72E-18

$^4I_{9/2}$	15655	346,193	0,106		12,448	2,55E-24
$^4I_{11/2}$	17866	514,595	0,158		18,503	4,30E-29
$^4I_{15/2}$	27996	1980,037	0,609		71,197	5,82E-51
$^2P_{3/2} \rightarrow ^2G_{7/2}$	3491	0,468	0,001	1.5170	0,008	4,62E+02
$^4G_{9/2}$	4144	0,782	0,001		0,014	1,80E+01
$^4G_{11/2}$	5157	1,507	0,002		0,026	1,17E-01
$^2G_{9/2}$	6995	3,762	0,006		0,065	1,26E-05
$^4F_{3/2}$	8961	7,908	0,012		0,136	7,21E-10
$^4F_{5/2}$	9398	9,122	0,014		0,157	8,21E-11
$^4F_{7/2}$	11083	14,965	0,023		0,258	1,88E-14
$^2H_{11/2}$	12409	21,003	0,032		0,362	2,59E-17
$^4S_{3/2}$	13156	25,027	0,038		0,432	6,33E-19
$^4F_{9/2}$	16291	47,520	0,072		0,820	1,08E-25
$^4I_{9/2}$	19146	77,142	0,117		1,331	7,40E-32
$^4I_{11/2}$	21357	107,077	0,162		1,847	1,25E-36
$^4I_{15/2}$	31487	343,132	0,520		5,920	1,69E-58

**Anexo 6: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluoroplomados dopados con 1.0%  $Er^{3+}$**

Transición	$\Delta E$ (cm <sup>-1</sup> )	$A_{JJ}^{de}$ (s <sup>-1</sup> )	$\beta_{JJ}$	$\tau_R$ (ms)	$\rho_p(10^{-22}\text{cm}^2)$	$W_{NR}(s^{-1})$
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	10130	197,545	1,000	5.0620	53,085	2,17E-12
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2211	1,468	0,006	3.9710	0,190	2,46E+05
$^4I_{15/2}$	12341	250,372	0,994		32,472	3,36E-17
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2855	14,404	0,006	0.0004	1,048	1,17E+04
$^4I_{11/2}$	5066	81,802	0,036		5,953	1,81E-01
$^4I_{15/2}$	15196	2204,341	0,958		160,430	2,47E-23
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	3135	4,288	0,004	1.0300	0,256	2,77E+03
$^4I_{9/2}$	5990	29,760	0,031		1,773	2,03E-03
$^4I_{11/2}$	8201	77,035	0,079		4,589	3,15E-08
$^4I_{15/2}$	18331	860,214	0,886		51,245	4,30E-30
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	747	0,742	0,000	0.0705	0,003	3,85E+08
$^4F_{9/2}$	3882	103,253	0,007		5,308	6,69E+01
$^4I_{9/2}$	6737	536,781	0,038		27,593	4,92E-05
$^4I_{11/2}$	8948	1267,084	0,089		65,135	7,63E-10
$^4I_{15/2}$	19078	12275,72	0,866		631,040	1,04E-31
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	1326	0,825	0,000	0.2754	0,034	2,19E+07
$^4S_{3/2}$	2073	3,161	0,001		0,130	5,29E+05
$^4F_{9/2}$	5208	49,953	0,014		2,056	9,20E-02
$^4I_{9/2}$	8063	184,523	0,051		7,594	6,76E-08
$^4I_{11/2}$	10274	384,146	0,106		15,809	1,05E-12
$^4I_{15/2}$	20404	3008,079	0,829		123,800	1,43E-34
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	1685	0,539	0,000	0.6414	0,021	3,68E+06
$^2H_{11/2}$	3011	3,076	0,002		0,122	5,06E+03
$^4S_{3/2}$	3758	5,991	0,004		0,238	1,22E+02
$^4F_{9/2}$	6893	36,896	0,024		1,469	2,13E-05
$^4I_{9/2}$	9748	103,958	0,067		4,138	1,56E-11
$^4I_{11/2}$	11959	192,959	0,124		7,680	2,43E-16
$^4I_{15/2}$	22089	1215,718	0,780		48,387	3,31E-38
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	437	0,007	0,000	0.8342	0,000	1,77E+09
$^4F_{7/2}$	2122	0,773	0,001		0,036	4,08E+05
$^2H_{11/2}$	3448	3,306	0,003		0,153	5,61E+02
$^4S_{3/2}$	4195	5,958	0,005		0,276	1,36E+01
$^4F_{9/2}$	7330	31,676	0,026		1,467	2,36E-06
$^4I_{9/2}$	10185	84,618	0,071		3,919	1,74E-12
$^4I_{11/2}$	12396	153,277	0,128		7,099	2,69E-17
$^4I_{15/2}$	22526	919,100	0,767		42,568	3,67E-39

${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	1966	0,967	0,000	0.3735	0,029	9,24E+05
${}^4F_{5/2}$	2403	1,779	0,001		0,053	1,03E+05
${}^4F_{7/2}$	4088	8,746	0,003		0,261	2,37E+01
${}^2H_{11/2}$	5414	20,309	0,008		0,607	3,26E-02
${}^4S_{3/2}$	6161	29,954	0,011		0,895	7,89E-04
${}^4F_{9/2}$	9296	102,729	0,038		3,070	1,37E-10
${}^4I_{9/2}$	12151	228,685	0,085		6,834	1,01E-16
${}^4I_{11/2}$	14362	379,178	0,142		11,332	1,56E-21
${}^4I_{15/2}$	24492	1904,944	0,712		56,929	1,25E-43
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^2G_{9/2}$	1838	4,696	0,000	0.0474	0,103	1,72E+06
${}^4F_{3/2}$	3804	41,518	0,002		0,908	9,96E+01
${}^4F_{5/2}$	4241	57,765	0,003		1,263	1,11E+01
${}^4F_{7/2}$	5926	157,497	0,008		3,445	2,56E-03
${}^2H_{11/2}$	7252	288,594	0,014		6,312	3,52E-06
${}^4S_{3/2}$	7999	387,540	0,018		8,476	8,51E-08
${}^4F_{9/2}$	11134	1043,815	0,050		22,829	1,48E-14
${}^4I_{9/2}$	13989	2064,481	0,098		45,152	1,09E-20
${}^4I_{11/2}$	16200	3217,835	0,153		70,376	1,69E-25
${}^4I_{15/2}$	26330	13812,57	0,655		302,090	2,30E-47
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$	1013	0,211	0,000	0.1529	0,007	1,01E+08
${}^2G_{9/2}$	2851	4,664	0,001		0,156	1,09E+04
${}^4F_{3/2}$	4817	22,401	0,003		0,749	6,34E-01
${}^4F_{5/2}$	5254	29,154	0,005		0,975	7,04E-02
${}^4F_{7/2}$	6939	67,085	0,010		2,243	1,63E-05
${}^2H_{11/2}$	8265	113,310	0,017		3,789	2,24E-08
${}^4S_{3/2}$	9012	146,962	0,023		4,914	5,41E-10
${}^4F_{9/2}$	12147	359,331	0,055		12,015	9,42E-17
${}^4I_{9/2}$	15002	674,999	0,103		22,570	6,92E-23
${}^4I_{11/2}$	17213	1022,909	0,156		34,203	1,07E-27
${}^4I_{15/2}$	27343	4098,151	0,627		137,030	1,46E-49
${}^2G_{7/2} \rightarrow {}^2G_{9/2}$	653	0,024	0,000	0.3102	0,001	6,44E+08
${}^4G_{11/2}$	1666	0,411	0,000		0,015	4,09E+06
${}^2G_{9/2}$	3504	3,839	0,001		0,137	4,42E+02
${}^4F_{3/2}$	5470	14,589	0,005		0,520	2,57E-02
${}^4F_{5/2}$	5907	18,427	0,006		0,657	2,85E-03
${}^4F_{7/2}$	7592	39,120	0,012		1,395	6,59E-07
${}^2H_{11/2}$	8918	63,410	0,020		2,262	9,06E-10
${}^4S_{3/2}$	9665	80,769	0,025		2,881	2,19E-11
${}^4F_{9/2}$	12800	187,466	0,058		6,686	3,81E-18

$^4I_{9/2}$	15655	342,151	0,106		12,203	2,80E-24
$^4I_{11/2}$	17866	510,243	0,158		18,197	4,35E-29
$^4I_{15/2}$	27996	1963,284	0,609		70,019	5,92E-51
$^2P_{3/2} \rightarrow ^2G_{7/2}$	3491	0,476	0,001	1.5280	0,013	3,92E+02
$^4G_{9/2}$	4144	0,788	0,001		0,021	1,59E+01
$^4G_{11/2}$	5157	1,517	0,002		0,040	1,01E-01
$^2G_{9/2}$	6995	3,767	0,006		0,100	1,09E-05
$^4F_{3/2}$	8961	7,888	0,012		0,208	6,33E-10
$^4F_{5/2}$	9398	9,110	0,014		0,241	7,02E-11
$^4F_{7/2}$	11083	14,916	0,023		0,394	1,62E-14
$^2H_{11/2}$	12409	20,915	0,032		0,553	2,23E-17
$^4S_{3/2}$	13156	24,924	0,038		0,659	5,40E-19
$^4F_{9/2}$	16291	47,226	0,072		1,248	9,40E-26
$^4I_{9/2}$	19146	76,439	0,117		2,020	6,91E-32
$^4I_{11/2}$	21357	106,325	0,163		2,810	1,07E-36
$^4I_{15/2}$	31487	340,210	0,520		8,990	1,46E-58

**Anexo 7: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluoroplomados dopados con 1.5%  $Er^{3+}$**

Transición	$\Delta E$ (cm <sup>-1</sup> )	$A_{JJ}^{de}$ (s <sup>-1</sup> )	$\beta_{JJ}$	$\tau_R$ (ms)	$\rho_p(10^{-22}\text{cm}^2)$	$W_{NR}(s^{-1})$
$^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$	10130	207,375	1,000	4.8220	53,432	2,20E-12
$^4I_{9/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$	2211	1,493	0,006	3.8890	0,174	2,51E+05
$^4I_{15/2}$	12341	255,626	0,994		29,700	3,48E-17
$^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$	2855	15,025	0,006	0.0004	1,073	1,12E+04
$^4I_{11/2}$	5066	84,783	0,036		6,052	1,77E-01
$^4I_{15/2}$	15196	2278,961	0,958		162,690	2,45E-23
$^4S_{3/2} \rightarrow ^4F_{9/2}$	3135	4,509	0,004	0.9769	0,273	2,80E+03
$^4I_{9/2}$	5990	31,464	0,031		1,908	1,97E-03
$^4I_{11/2}$	8201	81,255	0,079		4,927	3,11E-08
$^4I_{15/2}$	18331	906,390	0,886		54,957	4,30E-30
$^2H_{11/2} \rightarrow ^4S_{3/2}$	747	0,758	0,000	0.0686	0,039	3,88E+08
$^4F_{9/2}$	3882	105,856	0,007		5,470	6,82E+01
$^4I_{9/2}$	6737	553,159	0,038		28,586	4,80E-05
$^4I_{11/2}$	8948	1303,284	0,089		67,351	7,59E-10
$^4I_{15/2}$	19078	12618,07	0,865		652,080	1,05E-31
$^4F_{7/2} \rightarrow ^2H_{11/2}$	1326	0,867	0,000	0.2634	0,036	2,16E+07
$^4S_{3/2}$	2073	3,308	0,001		0,137	5,27E+05
$^4F_{9/2}$	5208	52,180	0,014		2,162	9,28E-02
$^4I_{9/2}$	8063	193,444	0,051		8,015	6,52E-08
$^4I_{11/2}$	10274	402,017	0,106		16,657	1,03E-12
$^4I_{15/2}$	20404	3145,127	0,828		130,320	1,43E-34
$^4F_{5/2} \rightarrow ^4F_{7/2}$	1685	0,575	0,000	0.6078	0,028	3,56E+06
$^2H_{11/2}$	3011	3,271	0,002		0,161	4,83E+03
$^4S_{3/2}$	3758	6,350	0,004		0,313	1,18E+02
$^4F_{9/2}$	6893	38,968	0,024		1,919	2,07E-05
$^4I_{9/2}$	9748	110,020	0,067		5,417	1,46E-11
$^4I_{11/2}$	11959	203,843	0,124		10,037	2,31E-16
$^4I_{15/2}$	22089	1282,272	0,779		63,140	3,19E-38
$^4F_{3/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$	437	0,007	0,000	0.7914	0,000	1,82E+09
$^4F_{7/2}$	2122	0,815	0,001		0,038	4,07E+05
$^2H_{11/2}$	3448	3,492	0,003		0,161	5,53E+02
$^4S_{3/2}$	4195	6,283	0,005		0,289	1,35E+01
$^4F_{9/2}$	7330	33,366	0,026		1,536	2,37E-06
$^4I_{9/2}$	10185	89,372	0,071		4,114	1,67E-12
$^4I_{11/2}$	12396	161,665	0,128		7,442	2,64E-17
$^4I_{15/2}$	22526	968,598	0,767		44,586	3,65E-39

${}^2G_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$	1966	1,012	0,000	0.3590	0,030	9,33E+05
${}^4F_{5/2}$	2403	1,8489	0,001		0,055	1,07E+05
${}^4F_{7/2}$	4088	9,176	0,003		0,272	2,39E+01
${}^2H_{11/2}$	5414	21,339	0,008		0,632	3,25E-02
${}^4S_{3/2}$	6161	31,446	0,011		0,931	7,92E-04
${}^4F_{9/2}$	9296	107,786	0,039		3,191	1,39E-10
${}^4I_{9/2}$	12151	240,518	0,086		7,120	9,80E-17
${}^4I_{11/2}$	14362	398,379	0,143		11,793	1,55E-21
${}^4I_{15/2}$	24492	1974,103	0,709		58,438	2,14E-43
${}^4G_{11/2} \rightarrow {}^2G_{9/2}$	1838	4,830	0,000	0.0461	0,108	1,71E+06
${}^4F_{3/2}$	3804	42,627	0,002		0,950	1,01E+02
${}^4F_{5/2}$	4241	59,057	0,003		1,316	1,15E+01
${}^4F_{7/2}$	5926	161,841	0,008		3,606	2,57E-03
${}^2H_{11/2}$	7252	296,860	0,014		6,614	3,50E-06
${}^4S_{3/2}$	7999	398,374	0,018		8,875	8,54E-08
${}^4F_{9/2}$	11134	1072,459	0,050		23,892	1,50E-14
${}^4I_{9/2}$	13989	2125,466	0,098		47,352	1,06E-20
${}^4I_{11/2}$	16200	3309,872	0,153		73,738	1,67E-25
${}^4I_{15/2}$	26330	14200,64	0,655		316,360	2,31E-47
${}^4G_{9/2} \rightarrow {}^4G_{11/2}$	1013	0,210	0,000	0.1488	0,007	1,07E+08
${}^2G_{9/2}$	2851	4,744	0,001		0,155	1,16E+04
${}^4F_{3/2}$	4817	22,873	0,003		0,748	6,79E-01
${}^4F_{5/2}$	5254	29,684	0,004		0,971	7,77E-02
${}^4F_{7/2}$	6939	68,698	0,010		2,247	1,74E-05
${}^2H_{11/2}$	8265	116,233	0,017		3,802	2,36E-08
${}^4S_{3/2}$	9012	150,719	0,022		4,930	5,76E-10
${}^4F_{9/2}$	12147	368,723	0,055		12,060	1,01E-16
${}^4I_{9/2}$	15002	694,339	0,103		22,710	7,13E-23
${}^4I_{11/2}$	17213	1051,653	0,156		34,397	1,13E-27
${}^4I_{15/2}$	27343	4214,594	0,627		137,850	1,56E-49
${}^2G_{7/2} \rightarrow {}^4G_{9/2}$	653	0,027	0,000	0.2958	0,001	5,92E+08
${}^4G_{11/2}$	1666	0,435	0,000		0,015	4,00E+06
${}^2G_{9/2}$	3504	4,040	0,001		0,140	4,31E+02
${}^4F_{3/2}$	5470	15,314	0,005		0,532	2,53E-02
${}^4F_{5/2}$	5907	19,280	0,006		0,670	2,89E-03
${}^4F_{7/2}$	7592	41,055	0,012		1,426	6,47E-07
${}^2H_{11/2}$	8918	66,582	0,020		2,313	8,80E-10
${}^4S_{3/2}$	9665	84,753	0,025		2,944	2,15E-11
${}^4F_{9/2}$	12800	196,552	0,058		6,827	3,77E-18

$^4I_{9/2}$	15655	359,309	0,106		12,480	2,66E-24
$^4I_{11/2}$	17866	535,335	0,158		18,593	4,20E-29
$^4I_{15/2}$	27996	2058,300	0,609		71,489	5,81E-51
$^2P_{3/2} \rightarrow ^2G_{7/2}$	3491	0,496	0,001	1.4520	0,010	4,20E+02
$^4G_{9/2}$	4144	0,832	0,001		0,017	1,56E+01
$^4G_{11/2}$	5157	1,590	0,002		0,032	1,05E-01
$^2G_{9/2}$	6995	3,955	0,006		0,079	1,14E-05
$^4F_{3/2}$	8961	8,282	0,012		0,166	6,67E-10
$^4F_{5/2}$	9398	9,548	0,014		0,191	7,64E-11
$^4F_{7/2}$	11083	15,675	0,023		0,314	1,71E-14
$^2H_{11/2}$	12409	21,998	0,032		0,440	2,32E-17
$^4S_{3/2}$	13156	26,207	0,038		0,525	5,66E-19
$^4F_{9/2}$	16291	49,658	0,072		0,994	9,96E-26
$^4I_{9/2}$	19146	80,511	0,117		1,612	7,01E-32
$^4I_{11/2}$	21357	111,932	0,163		2,241	1,11E-36
$^4I_{15/2}$	31487	358,157	0,520		7,170	1,53E-58

**Anexo 8: Valores de los parámetros espectroscópicos en vidrios fluoroplomados dopados con 2.0%  $Er^{3+}$**

## REFERENCIAS

- [1] N. Poulain, M.Poulain and J. Lucas, mater. Res. Bull., 10 (1975) 243.
- [2] N. Poulain, M.Poulain and G. Maze, Fluoride Glasses. Fr. Pat. 618, 2478.
- [3] A.S.T.A Delben, Preparación y Caracterización de Vidrios Fluorozirconados. Tesis de Doctorado. Inst. de Física de San Carlos. Univ. de San Pablo (1992).
- [4] B. G. Wybourne, Spectroscopy Properties of Rare Earths. John Wiley (1965).
- [5] B. R. Judd, Optical Absorption Intensities of Rare Earths Ions. Chem. Phys. 37, 750-761 (1962).
- [6] G. S. Ofelt, Intensities of Crystal Spectra of Rare Earths Ions. Chem. Phys. 37, 511-520 (1962).
- [7] M. Yamane, Y. Asahara, Glasses for Photonics. University Press. Cambridge (2000)
- [8] M. D. Shinn, et al, Optical Transitions of  $\text{Er}^{3+}$  Ions in Fluorozirconate Galss. Phys. Rev B, 27, 11, 6635-6648 (1983).
- [9] H. Rawson, Inorganic Glass-Forming Systems. Academic Press. New York, 236 (1967).
- [10] M. Poulain, N. Poulain and J. Lucas, Mater. Res. Bull, 10, 243 (1975).
- [11] M. Poulain, Fluoride Glass Composition and Processing, in Fluoride Glass Fiber Optics. Academic Press, New York, (1991).
- [12] A. Lecoq, M. Poulain, Journal Non-Cryst. Solids, 41, 209 (1980).

- [13] D. C. Tran, R. J. Ginther, G. H. Sigel, *Journal Mater, Res. Bull*, 7, 1177 (1982).
- [14] K. Ohsawa, T. Shibata, *J. Lighwave Technol. Lt2*. 602 (1984).
- [15] M. Poulain, N. Poulain and G. Maze, *Fluoride Glasses, Fr. Pat*, 2478, 618 (1980).
- [16] D. L. Goldstein, *States of Matter*, Prentice-Hall, Inc. N. J. (1975).
- [17] S. Jiang, et al, *Opt. Eng.* 37, 3282 (1998).
- [18] S. Taccheo, et al, *Appl. Phys. Lett.* 68, 2621 (1996).
- [19] Long Zhang, He Fang Hu, *The Fluorescence Properties of Highly-Doped Erbium Fluoroaluminate Glass Pumped at 800 and 980 nm*, *J. of Non-Cryst. Sol.* 326, 353-358 (2003).
- [20] S. Tanabe, *Journal of Non-Crytalline Solids*, 259 (1999).
- [21] S.A. López-Rivera, J. Martina, A. Flórez, V. Balassone, *Journal of Luminiscence*, 106, 291-299 (2004).
- [22] W.A. Pisarski, T. Goryczka, B. Wodecka, *Materials Science and Engineering*, B122, 94-99 (2005).
- [23] J. H. Van Vleck, *Chem. Phys.*, 67, 41 (1937).
- [24] J. Hoogschagen, C. J. Gortier, *Phisical*, 14, 197 (1948).
- [25] B. R. Judd, *Phys. Rev.*, 127, 750 (1962).
- [26] B.G Wybourne, *Spectroscopy Properties of Rare Earths*, Springer Verlag, (1977).
- [27] J. Pisarska, *IR Transmisión and Emission Spectra or Erbium Ions in Fluoroindate Glasses*, *Journal Non-Crystalline Solids*, 345, 382-385 (2004).
- [28] B. R. Judd, *Optical Absorption Intensities of Rare Earths Ions*, *Phys. Rev*, 127, 750-761 (1962)

- [29] K. A. Gschneidner, L. Eyring, Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, 25, 167, 102-263 (1998).
- [30] R. Peacock, The Intensities of Lanthanide f-f Transitions, London WC2R 2LS, England.
- [31] S. Hufner, Optical Spectra of Transparent Rare Earths Compounds, Academic Press Inc., (1978).
- [32] W. T. Carnall, P. R. Fields, and K. Rajnak, Electronic Energy Levels in the Trivalent Lanthanide Aquo Ions.  $\text{Pr}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Pm}^{3+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Dy}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ , and  $\text{Tm}^{3+}$ , Journal Chem. Phys. 49, 4424-4442 (1987).
- [33] A. Flórez, Y. Messaddeq, O. Malta, M. Aegerter., Optical Transitions Probabilities and Compositional Dependence of Judd-Ofelt Parameters of  $\text{Er}^{3+}$  Ions in Fluorindate Glass., Journal of Alloys and Comp. 227, 135-140 (1995).
- [34] L. Riseberg. And H. W. Moos., Multiphonon Orbit-Lattice Relaxation of Excited States of Rare Earths Ions in Crystall. Phys. Rev. 174, 429 (1968).
- [35] A. Herrera, Fabricación y Caracterización Óptica de Vidrios Fluoroindatos Dopados con  $\text{Sm}^{3+}$ .