

APLICACIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS DOPADAS CON ER³⁺ PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Contenido

Lista de figuras

Resumen

Introducción

Objetivos

Metodología

Referencias

1. Propiedades ópticas de las fibras de vidrio dopadas con iones de tierras raras

1.1	Resumen	19
1.2	Introducción	19
1.3	Iones de tierras raras en fibras de vidrio	20
1.4	Comparación de vidrios a base de silicatos y fluorozirconatos dopados con tierras raras	21
1.5	Niveles de energía de las fibras de vidrio dopadas con erbio	22

1.6	Absorción del estado excitado (ESA)	24
1.7	Conversión hacia arriba (up-conversion)	26
	1.7.1 Efectos de multi-iones en vidrios dopados con iones de tierras raras	29
	1.7.2 Efectos de iones del mismo tipo	31
1.8	Conclusiones	33
1.9	Referencias del capítulo 1	34

2. Sensores de temperatura de fibra óptica

2.1	Resumen	36
2.2	Introducción	36
2.3	Sensores de temperatura de fibra óptica	37
2.4	Sensores de temperatura de fibra óptica dopada con tierras raras	39
	2.4.1 Técnica de la razón de intensidad de fluorescencia FIR	40
	2.4.2 Técnica de la medición del tiempo de vida de la fluorescencia FT	49
2.5	Conclusiones	54
2.6	Referencias del capítulo 2	55

3. Modelo radiométrico para evaluar el desempeño de sensores de fibra para medición de temperatura

3.1	Resumen	58
3.2	Introducción	59
3.3	Bandas espectrales de fluorescencia sensibles a la temperatura	60
3.4	Arreglo experimental para evaluar el desempeño del sensor de temperatura	66
3.5	Sistema de detección propuesto para el sensor de temperatura	69
3.6	Fuentes de ruido	71
3.7	Figuras de mérito radiométricas del sensor de temperatura de fibra dopada con erbio	73
3.8	Sensibilidad del sensor de temperatura basado en la razón	82
3.9	Conclusiones	84
3.10	Referencias del capítulo 3	86

4. Resultados experimentales de un sensor de temperatura de fibra óptica de silica dopado con erbio

4.1	Resumen	89
-----	---------	----

4.2	Introducción	89
4.3	Principio de operación del sensor: Experimento y Resultados	90
4.4	Evaluación del desempeño del sensor: Análisis radiométrico	97
4.5	Espectro de fluorescencia de fibras de silicio con diferente concentración de erbio: Experimento y Resultados	104
4.6	Conclusiones	106
4.7	Referencias del capítulo 4	107
5.	Conclusiones generales	109

Lista de figuras

Capítulo 1

- Figura 1.1** Diagrama de niveles de energía para el Er^{3+} :vidrio que muestra las transiciones radiativas y de absorción. Las longitudes de onda de las transiciones (en nanómetros) han sido observadas experimentales en fibras de silicatos y fluorozirconatos.¹
- Figura 1.2** Diagrama parcial de los niveles de energía de los iones de erbio en fibras de silicio ilustrando la absorción de estado excitado (ESA) en un sistema láser de 3 niveles.
- Figura 1.3** Diferentes esquemas de excitación para láseres de conversión hacia arriba.
- Figura 1.4** Diagrama esquemático de niveles de energía mostrando como la transferencia de energía entre iones donantes y aceptantes (representado por líneas punteadas) puede conducir a una inversión de población en el subsistema aceptor.
- Figura 1.5** Esquemático diagrama mostrando procesos de transferencia de energía: conversión hacia arriba **a**) y apagado (quenching) **b**) en medios altamente dopados.

Capítulo 2

- Figura 2.1** Espectro de emisión de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con erbio como una función de longitud de onda para diferentes valores de temperatura.
- Figura 2.2** Razón de intensidades de dos transiciones como una función de temperatura.
- Figura 2.3** Espectro de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con neodimio a diferentes temperaturas.
- Figura 2.4** Razón de intensidad de fluorescencia como una función de temperatura para el sensor incorporando una fibra de silicio dopada con neodimio.
- Figura 2.5** Espectro de emisión de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con yterbio a varias temperaturas.

- Figura 2.6** Razón de intensidad de una fibra dopada con yterbio como una función de temperatura.
- Figura 2.7** Espectro de fluorescencia del praseodimio inmerso en vidrio de ZBLAN a diferentes temperaturas.
- Figura 2.8** Variación de la razón de intensidad como función de la temperatura.
- Figura 2.9** Esquema óptico para medir el tiempo del decaimiento del tiempo de vida de la fluorescencia en fibras dopadas con tierras raras sometidas a cambios de temperatura.
- Figura 2.10** Medición del tiempo de decaimiento de la fluorescencia
- Figura 2.11** Gráfica temporal del decaimiento de la fluorescencia en una fibra dopada con erbio como función de la temperatura.¹⁴

Capítulo 3

- Figura 3.1** Espectro de emisión de la fluorescencia de una fibra de silicio dopada con erbio como una función de longitud de onda para diferentes temperaturas.¹¹ Las bandas angostas de los filtros se usan para incrementar los picos ($^2H_{11/2}$ y $^4S_{3/2}$) detectados dependiente de la temperatura.
- Figura 3.2** Predicción teórica de la razón de intensidades de dos transiciones como una función de la temperatura, considerando solo picos de intensidad.
- Figura 3.3** Predicción teórica de la razón de intensidades integradas sobre bandas espectrales como una función de la temperatura.
- Figura 3.4** Principio de operación del sensor de fibra óptica dopada con erbio para mediciones remotas de temperatura, empleando la razón de emisión de fluorescencia en el intervalo de longitud de onda [515 nm - 570 nm].
- Figura 3.5** Sistema de detección para evaluar las figuras de mérito radiométricas del sensor de fibra óptica de silicio dopado con erbio.
- Figura 3.6** Razón señal a ruido en el detector del sensor de temperatura de fibra dopado con erbio como una función de longitud de onda para diferentes líneas espectrales de fluorescencia, con la temperatura como parámetro e incluyendo pérdidas de transmisión.

- Figura 3.7** Razón señal a ruido en el detector del sensor de temperatura de fibra dopada con erbio como una función de la longitud de onda, con temperatura como un parámetro e incluyendo pérdidas de transmisión, y tomando bandas espectrales de emisión.
- Figura 3.8** Responsividad del sensor evaluada como la razón de cambio en la señal de salida $P_{out}(\lambda, T)$ a un cambio en su entrada ΔT_{fibra} para cada banda espectral del sensor de temperatura.
- Figura 3.9** Resolución evaluada como el mínimo cambio detectado por cada banda espectral del sensor de temperatura.
- Figura 3.10** Sensibilidad del sensor, evaluada como la razón del incremento en la razón de intensidad $\Delta R(I_1/I_2)$ a un incremento en el incremento de temperatura ΔT_{fibra} como una función de temperatura.

Capítulo 4

- Figura 4.1** Principio de operación del sensor de fibra óptica dopada con erbio para mediciones remotas de temperatura, empleando la razón de emisión de fluorescencia en el intervalo de longitud de onda [515 nm - 570 nm].
- Figura 4.2** Foto del arreglo experimental para estudiar el comportamiento del sensor de temperatura de fibra óptica dopada con erbio.
- Figura 4.3** El espectro de emisión de fluorescencia normalizado medido de la fibra óptica de silicio dopada con erbio como una función de longitud de onda es mostrada para un intervalo de valores de temperatura [26 C – 60].
- Figura 4.4** La dependencia de temperatura de las transiciones ${}^2H_{11/2}$ y ${}^4S_{3/2}$ definida como la razón de la señal espectral $P_{out}(\lambda, T + \Delta T)$ sobre la señal espectral en la temperatura de referencia de 26 C, $P_{out}(\lambda, T)$, como una función de la longitud de onda.
- Figura 4.5** La razón de intensidades integradas sobre bandas espectrales como una función de la temperatura.
- Figura 4.6** Razón señal a ruido sobre bandas espectrales de emisión del sensor de temperatura de fibra óptica dopada con erbio, para diferentes bandas de longitud de onda.
- Figura 4.7** La responsividad $\mathfrak{R}(\lambda)$ del sensor para las bandas espectrales más sensibles a la temperatura

- Figura 4.8** Potencia de salida de la fluorescencia P_{out} a un incremento en su temperatura de entrada ΔT_{fibra} para cada banda espectral del sensor de temperatura.
- Figura 4.9** Foto del arreglo experimental para medir la emisión de fluorescencia en la longitud de onda del verde para la fibra de silicio dopada con erbio.
- Figura 4.10** Sensibilidad del sensor, evaluada como la razón del incremento en la razón de intensidad $\Delta R(I_1/I_2)$ al incremento en un incremento de temperatura ΔT_{fibra} como una función de la temperatura.
- Figura 4.11** Resolución de temperatura ΔT_{min} como una función de temperatura para varias bandas espectrales.
- Figura 4.12** Espectro de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con 960 ppm de erbio, sometida a 3 diferentes temperaturas.
- Figura 4.13** Espectro de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con 460 ppm de erbio, sometida a 3 diferentes temperaturas.

Aplicación de Fibras Ópticas Dopadas con Er³⁺ para Medición de Temperatura

Resumen

El presente trabajo se compone de 4 capítulos de los cuales el primero describe las propiedades ópticas de los iones de tierras raras cuando están inmersos en fibras ópticas de vidrio. Así mismo, se describen los diversos procesos que ocurren para la generación de fluorescencia en fibras láser. El segundo capítulo presenta una revisión de los sensores de temperatura de fibra óptica dopados con tierras raras reportados en la literatura.

Principalmente, describimos y comparamos 2 técnicas de intensidad de fluorescencia en fibras ópticas activadas con diferentes iones de tierras raras para medición de temperatura.

El capítulo 3 reporta el desarrollo de un modelo radiométrico para evaluar el desempeño y predecir los límites de detección de sensores de temperatura de fibra de silica dopada con tierras raras a partir de conocer solo su espectro de fluorescencia. Este novedoso modelo radiométrico se aplica un espectro de fluorescencia previamente publicado de una fibra dopada con erbio sometida a diferentes temperaturas. Para este análisis, evaluamos las figuras de mérito radiométricas en el sistema de detección que proponemos. El sistema de detección interpreta la señal óptica que lleva la información de temperatura de una fibra dopada con erbio. Adicionalmente, se determinaron las mejores bandas espectrales de fluorescencia para ser empleadas en la razón de intensidades de fluorescencia del sensor.

Finalmente, el capítulo 4 reporta resultados experimentales obtenidos de una fibra de silica dopada con erbio empleado como sensor óptico de temperatura. El espectro de fluorescencia se obtuvo al excitar la fibra en los 800 nm de longitud de onda, con

relativamente poca potencia de entrada. La fibra dopada es sometida a cambios de temperatura en un intervalo de [26 C a 60 C]. El espectro de fluorescencia en la longitud de onda del verde [515 nm – 570 nm] presentó cambios de intensidad en dos diferentes transiciones debido a las diferentes temperaturas aplicadas en la fibra dopada. Además, evaluamos su desempeño del sensor empleando el sistema de detección y aplicando el modelo radiométrico propuesto y descrito en el capítulo 3.

Finalmente, presentamos resultados experimentales, de la comparación de los espectros de fluorescencia de fibras de silica dopadas con diferente concentración de iones de erbio, sometidas a diferentes temperaturas.

Introducción

Frecuentemente, la temperatura es medida en el interior de espacios físicos pequeños, remotos e inaccesibles para mantener control sobre diversos procesos. Más frecuentemente, los métodos radiativos de mediciones de temperatura son considerados altamente ventajosos porque ellos no requieren contacto físico o equilibrio de temperatura entre diferentes objetos con distinta masa térmica.¹⁻⁵ En otras circunstancias, línea directa del campo de interés entre los objetos cuya temperatura será determinada y el sensor no es accesible o libre o es obstruido. Frecuentemente, la temperatura puede ser medida solo indirectamente, sin contacto y a una distancia. En estas circunstancias, el enlace de fibra óptica ha probado ser muy eficiente, debido a su pequeña masa térmica, flexibilidad mecánica necesaria para acceso a volúmenes pequeños, remotos y la habilidad para transmitir la luz con adecuada eficiencia. Los dispositivos sensores de fibra óptica son

particularmente apropiados para la operación en termalmente, químicamente y electromagnéticamente aplicaciones peligrosas.

Anteriormente, la investigación de medición con fibra óptica, en particular, en la medición de temperatura ha motivado a desarrollar una gran variedad de configuraciones y técnicas para diferentes aplicaciones. Sin embargo, su desarrollo comercial ha sido impedido como consecuencia del costo y la confiabilidad.⁶⁻⁷ Entre las técnicas mas sobresalientes, los sensores de temperatura basados en modulación de intensidad han sido investigados y una gran variedad de configuraciones han sido propuestas.⁸ También, los sensores de temperatura basados bajo técnicas interferométricas han sido investigados.⁹ Así mismo, la dependencia en temperatura del tiempo de decaimiento de la fluorescencia.¹⁰⁻¹³ Sin embargo, tales esquemas, en general requieren fuentes láser, sistemas para modulación de la señal, laboriosos y costosos sistemas de medición para resolver tiempo y son sensibles a variaciones de potencia.

Actualmente, la investigación es enfocada en desarrollar confiables, con un costo efectivo sensores de temperatura de fibra optica.¹⁴ La investigación fibras láser y el desarrollo de amplificadores ópticos condujo a extender la distancia de transmisión en los sistemas de comunicación óptica. La investigación de iones de tierras raras tales como el erbio activado en fibras de vidrio ha sido ampliamente estudiado para tales desarrollos. En años recientes, la investigación de iones de tierras raras inmersos en fibras de vidrio han sido explorados como el elemento transductor para la medición de temperatura. Esto es debido a que sus propiedades de emisión y de absorción son dependientes de la temperatura.

Fibras de vidrio dopadas con tierras raras han sido previamente investigadas para la posibilidad de desarrollar nuevos sensores de temperatura, utilizando la técnica de la razón de intensidad de fluorescencia.¹⁵⁻²² Esta técnica toma ventaja de la dependencia de temperatura del espectro de fluorescencia de fibras dopadas con tierras raras. La aplicación de esta técnica en este tipo de fibras muestra significativas ventajas tanto para sensores tradicionales de medición de temperatura como en sensores de fibra óptica.

La investigación de las fibras ópticas dopadas con iones de tierras raras para la medición de temperatura forma parte de la motivación que condujo a la realización de esta tesis doctoral. De acuerdo a lo anterior, esta tesis esta soportada bajo los siguientes objetivos.

Objetivos:

- 1) Estudiar el comportamiento de fibras ópticas dopadas con tierras raras como elemento sensor de temperatura mostrando sus ventajas sobre sistemas tradicionales y sensores de fibra en la medición de temperatura.
- 2) Desarrollar un modelo radiométrico para evaluar el desempeño y conocer los límites de detección de sensores de fibra óptica dopados con tierras raras para medición remota de temperatura, a partir de conocer sólo su espectro de fluorescencia.
- 3) Presentar resultados experimentales del comportamiento de una fibra de silica dopada con erbio como sensor remoto de temperatura. Además, evaluar su desempeño en función del modelo radiométrico propuesto.

Metodología

Para lograr el primer objetivo, se detectaron los problemas existentes en la medición de temperatura con técnicas tradicionales. Así mismo, se investigo el potencial que tienen las fibras ópticas dopadas con tierras raras para resolver tales problemas. Detectamos la problemática actual de estos sensores para la medición remota de temperatura y su desarrollo en aplicaciones reales.

El segundo objetivo se cumplió procediendo de la siguiente manera: i) Se partió de conocer un espectro de fluorescencia de una fibra óptica dopada con erbio sometida a 3 diferentes temperaturas, ii) Después, determinamos las mejores bandas de fluorescencia en función de su sensibilidad a cambios de temperatura y su razón señal a ruido. La razón de intensidad de estas bandas tiene una dependencia directa con la temperatura en la fibra dopada, iii) Se analizó radiométricamente el espectro de fluorescencia a 3 diferentes temperaturas con la ayuda de un sistema de detección que proponemos para interpretar la señal óptica al extremo de salida de la fibra dopada, iv) Desarrollamos importantes figuras de mérito radiométricas como la razón señal a ruido SNR, responsividad \mathfrak{R} , potencia equivalente de ruido NEP, detectividad estrella D^* , sensibilidad S , y resolución ΔT_{\min} del sensor.

El tercer objetivo se cumplió implementando en el laboratorio un sensor de temperatura de fibra óptica de silica dopado con erbio para medición remota de temperatura. Así mismo,

se determinaron las mejores bandas con mayor sensibilidad y mayor señal a ruido basándose en el sistema de detección propuesto. Evaluamos su desempeño aplicando el modelo radiométrico propuesto.

Referencias

1. M. S. Scholl, "Temperature Calibration of an Infrared Radiation Source," *Appl. Opt.*, **19** (21), 3622-3625 (1980).
2. M. S. Scholl, "Thermal Considerations in the Design of a Dynamic IR source," *Appl. Opt.*, **21** (4), 660-667 (1982).
3. M. S. Scholl, "Spatial and Temporal Effects due to Target Irradiation: A Study," *Appl. Opt.*, **21** (9), 1615-1620 (1982).
4. M. S. Scholl, "Errors in Radiance Simulation and Scene Discrimination," *Appl. Opt.*, **21** (10), 1839-1843 (1982).
5. M. S. Scholl, "Target Temperature Distribution Generated and Maintained by a Scanning Laser Beam," *Appl. Opt.*, **21** (12), 2146-2152 (1982).

6. K. A. Wickersheim, W. D. Hyatt, "Commercial applications of fiber optic temperature measurements," in *Fiber Optic Sensors IV*, R. T. Kersten, ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **1267**, 84-96 (1990).
7. F. C. Allard, *Fibers Optic Handbook For Engineers and Scientists*, Mc Graw Hill (New York), 1990.
8. R. Hypszer, "Fiber optic temperature sensors," SPIE Vol. 2634, pp. 34-46, 1995.
9. H. S. Choi, H. F. Taylor, C. E. Lee, "High-Performance Fiber Optic Temperature Sensor Using Low-Coherence Interferometry," *Opt. Lett.*, **22**, NO. 23, pp. 1814-1816 (1997).
10. M. S. Scholl, J. Robert Trimmier, "Luminescence of YAG:TM:Tb," *J. Electrochem. Soc.*, **133** (3), 643-648, (1986).
11. Zhi-Yi Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, B. T. Meggitt, "Thulium-doped intrinsic fiber optic sensor for high temperature measurements (>1100 °C)," *Rev. Sci. Instrum.*, **69**, 3210-3214 (1998).
12. T. Sun, Z. Y. Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, "Ytterbium-based fluorescence decay time fiber optic temperature sensor systems," *Rev. Sci. Instrum.*, **69**, 4179-4185 (1998).

13. T. Sun, Z. Y. Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, S. F. Collins, "Temperature dependence of the fluorescence lifetime in Pr^{3+} : ZBLAN glass for fiber optic thermometry," *Rev. Sci. Instrum.*, **68**, 3447-3451 (1997).
14. J. Castellon, G. Paez, "Radiometric figures of merit of a fiber optic temperature sensor," Proc. SPIE vol. 3759, p. 410-421, Infrared Spaceborne Remote Sensing VII, Marija Strojnik, Bjorn F. Andresen, Eds. (1999).
15. Snitzer E., W. W. Morey, W. H. Glenn, "Fiber Optic Rare Earth Temperature Sensors," Proc. 1st Int. Conf. Optic. Fib Sensors, London, pp. 79-82 (1983).
16. H. Berthou, C. K. Jorgensen, "Optical-fiber temperature sensor based on upconversion-excited state fluorescence," *Opt. Lett.*, **15**, 1100-1102 (1990).
17. M. C. Farries, M.E. Fernmann, R.I. Laming, S.B. Poole, D. N. Payne, A. P. Leach, "Distributed temperature sensor using Nd^{3+} -doped optical fibre," *Elec. Lett.*, **22**, 418-419 (1986).
18. P. V. Dos Santos, M. T. Araujo, A. S. Gouveia-Neto, J. A. Madeiros Neto, A. S. B. Sombra, "Optical temperature sensing using upconversion fluorescence emission in Er^{3+} / Yb^{3+} -codoped chalcogenide glass," *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 578-580 (1998).

19. E. Maurice, S. A. Wade, S. F. Collins, G. Monnom, G. W. Baxter, "Self-referenced point temperature sensor based on a fluorescence intensity ratio in Yb^{3+} -doped silica fiber," *Appl. Opt.*, **36**, No. 31, pp. 8264-8269 (1997).
20. E. Maurice, G. Monnom, D. B. Ostrowsky, G. W. Baxter, "1.2- μm transitions in erbium-doped fibers: the possibility of quasi-distributed temperature sensors," *Appl. Opt.*, **34**, No. 21, pp. 4196-4199 (1995).
21. E. Maurice, G. Monnom, B. Dussardier, A. Saissy, D. B. Ostrowsky, G. W. Baxter, "Erbium doped silica fibers for intrinsic fiber optic temperature sensors," *Appl. Opt.*, **34**, 8019-8025 (1995).
22. E. Maurice, G. Monnom, D. B. Ostrowsky, G. W. Baxter, "High dynamic interval temperature point sensor using green fluorescence intensity ratio in erbium-doped silica fiber," *Journal Light. Tech.*, **13**, No. 7, pp. 1349-1353 (1995).

CAPITULO 1

Propiedades ópticas de las fibras de vidrio dopadas con iones de tierras raras

1.1 Resumen

En el presente capítulo se describen las propiedades ópticas de las fibras de vidrio activadas con iones de tierras raras. También, discutimos la dinámica de población en vidrios dopados con estos iones. Además, presentamos los niveles de energía de estos iones y en particular las transiciones radiativas entre estos niveles. Finalmente, describimos los procesos de excitación en fibras ópticas activadas con tierras raras que conllevan a la generación de fluorescencia en estas fibras láser.

1.2 Introducción

Las tierras raras tienen importantes características que las distinguen de otros iones ópticamente activos. Las tierras raras emiten y absorben sobre intervalos angostos de longitudes de onda, las longitudes de onda de las transiciones de absorción y emisión son relativamente insensibles al material anfitrión. Las intensidades de estas transiciones son débiles y los tiempos de vida de los estados metaestables son largos.

Todas estas propiedades resultan de la naturaleza de los estados involucrados en estos procesos y conducen a un excelente desempeño de iones de tierras raras en muchas

aplicaciones ópticas. Dispositivos que proveen ganancia, tales como los láseres y amplificadores, deben tener bajas pérdidas de esparcimiento, y uno es restringido a usar anfitriones ya sea de cristales simple o de vidrio. Mientras en muchas aplicaciones materiales cristalinos son preferidos por razones que incluyen picos de secciones transversales más altos o mejor conductividad térmica, la versatilidad de los vidrios y los más anchos espectros de emisión y absorción que ellos proveen, guían al uso de vidrios dopados con tierras raras en muchas aplicaciones láser.

1.3 Iones de tierras raras en fibras de vidrio

El ensanchamiento de las bandas de absorción y fluorescencia de los iones de tierras raras en vidrios es necesariamente más complicado que en cristales, ya que los vidrios tienen por definición una estructura aleatoria. Cada ion de tierra rara en material amorfo está sujeto a un campo eléctrico diferente y por lo tanto presenta una configuración diferente de sub-niveles denominados Stark. De esta forma, cada ion tiene asociado con él un espectro de emisión y absorción así como razones de decaimiento propios. Por lo tanto, las características espectrales de una muestra pueden ahora ser consideradas como el promedio de todos los espectros individuales de los iones. El hecho de que los diferentes iones dentro de la muestra no cristalina están sujetos a diferente medio ambiente, sugiere que las transiciones radiativas serán predominantemente inhomogeneamente ensanchadas. Por lo tanto, los espectros de emisión y absorción de tierras raras son más anchos en vidrios que en cristales.

1.4 Comparación de vidrios a base de silicatos y fluorozirconatos dopados con tierras raras

Aunque se dispone de muchos otros vidrios láser, la mayor parte del trabajo reportado hasta la fecha sobre materiales para fibras láser involucra vidrios a base de silicatos y fluorozirconatos, desarrolladas durante las últimas 2 décadas, para comunicación óptica. Estos son ahora utilizados como materiales anfitriones para los iones de tierras raras. Debido a esta tendencia, de trabajar con solo estos dos materiales anfitriones, se harán algunas comparaciones entre ellos, desde el punto de vista de la dinámica de población de los iones de tierras raras.

Son notables las diferencias existentes entre estos dos tipos de vidrios debido a sus grandes diferencias en la razón de emisión fotonica. Los modos vibracionales fundamentales de los fluorozirconatos caen en el infrarrojo, en la región mayor a $3 \mu\text{m}$, mientras que los de los silicatos aparecen desde $2 \mu\text{m}$. De esto surgen dos propiedades importantes. Primero, los fluorozirconatos son transparentes en la región del infrarrojo medio ($1-5 \mu\text{m}$) mientras que los silicatos comienzan a ser absorbentes para longitudes de onda mayores a $2 \mu\text{m}$.

Segundo, la probabilidad de decaimiento no-radiativo para un ion en cualquier nivel excitado LSJ es mucho más alta en los silicatos que en fluorozirconatos. Esto implica que los tiempos de vida de los estados excitados sean menores en los silicatos. Solamente cuando la banda prohibida de energía ΔE al siguiente nivel más bajo es mayor a 4600 cm^{-1} un nivel en un silicato fluoresce en forma significativa mientras que en fluorozirconato este

valor es de 3100 cm^{-1} . Este hecho limita en gran medida el número de posibles transiciones láser en silicatos dopados con iones de tierras raras.

En gran medida la dinámica de población de los iones de tierras raras en silicatos es determinada por transiciones no radiativas en cascada nivel por nivel. Existen muy pocos decaimientos radiativos y como consecuencia existe una alta eficiencia de alimentación ($\approx 100 \%$) de población del nivel superior de bombeo hacia el nivel láser superior.

La situación en un vidrio a base de fluorozirconato es radicalmente diferente ya que en éste las probabilidades de decaimiento no-radiativo son mucho menores. La dinámica de población es ahora más fuertemente determinada por las razones de transición radiativas. Tomando el ejemplo anterior, todos los niveles del erbio incluyendo al $^4S_{3/2}$ fluorescen hasta cierto grado en este material. No obstante, para asegurar un bombeo eficiente del nivel láser superior es necesario escoger cuidadosamente la transición de bombeo. Esto con el fin de bombear directamente hacia el nivel láser superior o al menos, hacia un nivel que transfiera en forma no-radiativa y eficientemente hacia dicho nivel.

1.5 Niveles de energía de las fibras de vidrio dopadas con erbio

Presentamos la estructura de los niveles de energía del erbio en vidrio así como las transiciones de absorción y emisión en este ion. Primeramente, para entender la nomenclatura de los iones de tierras raras, se describe la notación referida para los distintos niveles energéticos del erbio. Los posibles estados de un átomo multielectron son referidos

por el símbolo $^{2S+1}L_J$, donde $L=0, 1, 2, 3, 4, \dots$ que corresponden a las letras S, P, D, F, G... respectivamente. Donde $2S+1$ es el momento orbital y S es el spin total. Donde J es el momento angular total ($J=L+S$). Así pues, la notación para el estado base $^4I_{15/2}$ del erbio, corresponde al termino ($J=15/2, L=6, S=3/2$), lo cual tienen una multiplicidad $2J+1=8$ y una multiplicidad de spin $2S+1=4$.

La Figura 1.1 muestra un diagrama de los niveles de energía para el Er^{3+} :vidrio.¹ La figura también muestra las transiciones de bombeo en el visible y cercano infrarrojo (bandas de bombeo), así como las transiciones radiativas observadas en fibras de vidrio de silicato y de fluorozirconato. La emisión láser a $1.55 \mu\text{m}$ (en la transición $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$) para una fibra de $\text{Er}^{3+}:\text{SiO}_2$ es de especial importancia en telecomunicaciones, ya que a esta longitud de onda se toma ventaja de las pequeñas pérdidas que presentan las fibras de silicio en esta región.²

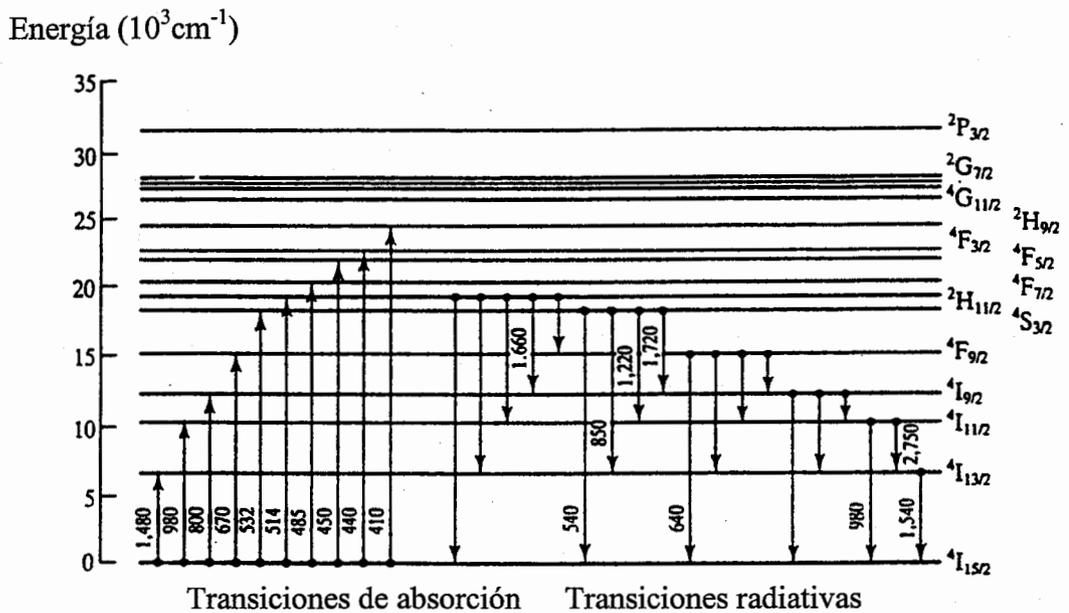


Figura 1.1 Diagrama de niveles de energía para el Er^{3+} :vidrio que muestra las transiciones radiativas y de absorción. Las longitudes de onda de las transiciones (en nanómetros) han sido observadas experimentales en fibras de silicatos y fluorozirconatos.¹

1.6 Absorción del estado excitado (ESA)

Una de las condiciones básicas para desarrollar amplificadores de fibra para comunicación óptica, fue la capacidad de emplear láseres de semiconductor como fuente de bombeo. Al inicio de 1990 la fuente de bombeo de semiconductor más disponible comercialmente fue el diodo láser de AlGaAs en la banda de los 800 nm. Las propiedades a esta banda de bombeo fueron estudiadas intensivamente. Esta investigación, condujo directamente al principal problema de bombear en los 800 nm, la existencia de la absorción del estado excitado (ESA) en esta banda de bombeo.

La absorción del estado excitado o ESA es definida como un proceso de absorción el cual no es originado en el estado base del ion láser. Este proceso usualmente es originado a un nivel mas arriba del nivel láser superior del ion de interés.

Los procesos de absorción de fotones de bombeo limitan el desempeño de amplificación en fibras ópticas de silicio dopadas con erbio bombeadas en la banda de los 800 nm.³⁻⁶

Para describir el fenómeno de absorción del estado excitado (ESA) la Figura 1.2 muestra un simplificado diagrama de niveles de energía del erbio.⁷ En el cual, la absorción de un fotón en la banda de absorción del estado base (GSA) en los 800 nm, excita un ion de erbio al estado $^4I_{9/2}$. Para silicio, rápidas relajaciones a través de emisiones multifonon poblan el estado del nivel $^4I_{13/2}$ (el nivel láser superior). Un ion en este estado metaestable puede entonces ser promovido para el nivel $^2H_{11/2}$ a través de la absorción de un segundo fotón (ESA) en los 800 nm. Esta nueva reabsorción limita el desempeño de la emisión láser para comunicación óptica en la ventana de los 1550 nm.

Los iones excitados tienen un espectro ESA diferente al de su espectro de GSA debido a la nueva energía de hueco entre el estado base y los estados situados mas arriba. Este problema es importante ya que la ESA en ciertas bandas de longitud de onda puede ser así de fuerte que llegue a dominar a la GSA.

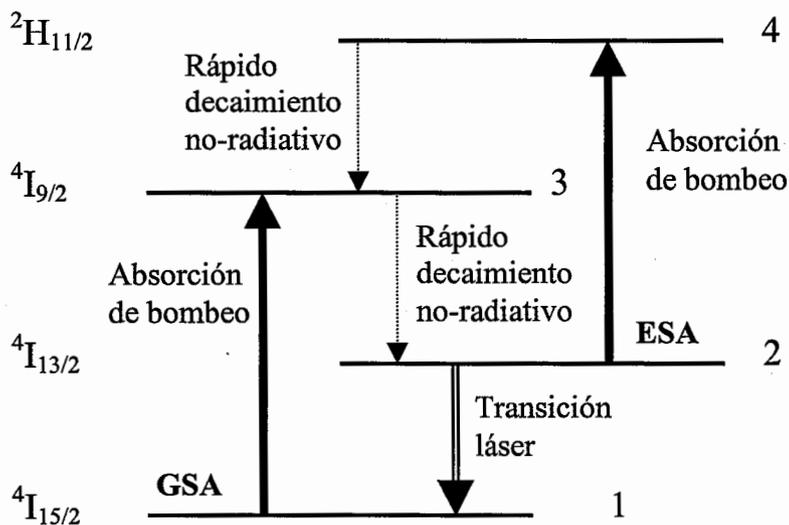


Figura 1.2 Diagrama parcial de los niveles de energía de los iones de erbio en fibras de silicio ilustrando la absorción de estado excitado (ESA) en un sistema láser de 3 niveles.

1.7 Conversión hacia arriba (up-conversion)

Los láseres de conversión hacia arriba representan en general, un tipo de láseres ópticamente bombeados que oscilan a frecuencias mayores que aquellas de bombeo. Utilizando procesos de absorción de estado excitado, estos láseres pueden convertir radiación de bombeo en el infrarrojo generada por diodos láser, por ejemplo, a luz láser en el visible. Por esta razón el bombeo vía conversión hacia arriba representa una alternativa al uso de procesos ópticos no-lineales. Entre estos el doblamiento en frecuencia de radiación láser infrarroja a radiación de longitud de onda mas corta y coherente. La operación de varios láseres de conversión hacia arriba usando cristales y vidrios dopados con iones de tierras raras ha sido demostrada en años recientes.⁸⁻¹¹

En un láser convencional bombeado ópticamente, la energía de un fotón de bombeo es mayor que aquella de los fotones del láser. Además, la absorción de un fotón de bombeo por un ion activo es suficiente para que este último sea excitado al nivel láser superior. Por otro lado, para un láser de conversión hacia arriba, se requiere de más de un fotón para proveer de energía suficiente al ion láser que se necesita excitar. Esta excitación paso por paso se lleva a cabo haciendo uso de un nivel de energía intermedio de larga vida posesionado entre el nivel base y el nivel superior de emisión láser. Esta se da en pasos con el estado intermedio actuando como un acumulador de la energía de bombeo. En materiales láser apropiados, estos niveles intermedios metaestables pueden almacenar tanta población como, o más que el estado base.

Como se muestra esquemáticamente en la Figura 1.3.a, una absorción secuencial de dos fotones puede conducir a una excitación de conversión hacia arriba con un primer fotón poblando un estado intermedio. Luego, un segundo fotón el cual en el caso más general es de energía diferente, bombea al nivel láser superior vía absorción de estado excitado (ESA).¹² Como una alternativa, el proceso de transferencia de energía entre iones excitados puede resultar en conversión hacia arriba eficiente cuando un número de iones suficientemente grande ha sido excitado a un estado intermedio como se muestra en la Figura 1.3.b. Aquí, dos iones físicamente muy cercanos son acoplados por un proceso no-radiativo en el cual un ion regresa al estado base mientras que el otro es promovido al nivel superior. Un tercer tipo eficiente de excitación vía conversión hacia arriba se basa en el proceso llamado absorción de avalancha (o avalancha fotónica), el cual involucra absorción de estado excitado de la luz del bombeo así como también relajación cruzada interiónica, Figura 1.3.c. En este tipo de conversión hacia arriba, la excitación inicial se lleva a cabo

debido a que el medio activo presenta una absorción pequeña (no resonante) a la longitud de onda del bombeo. Los iones excitados por esta absorción decaen no-radiativamente hasta un nivel metaestable donde presentan una absorción de estado excitado a la longitud de onda de bombeo y son llevados al nivel superior de emisión láser. De este nivel, dos cosas ocurren: 1) algunos iones decaen no-radiativamente a un nivel metaestable inferior, transfiriendo su energía por relajación cruzada a otros que se encuentran en el estado base. Estos últimos, son llevados a un estado energético igual a los iones que los excitaron y todos estos presentan absorción de estado excitado, lo cual los puede llevar al nivel superior de emisión láser; 2) otros iones decaen radiativamente hacia el estado de emisión láser inferior; es decir, son los que generan la emisión láser.

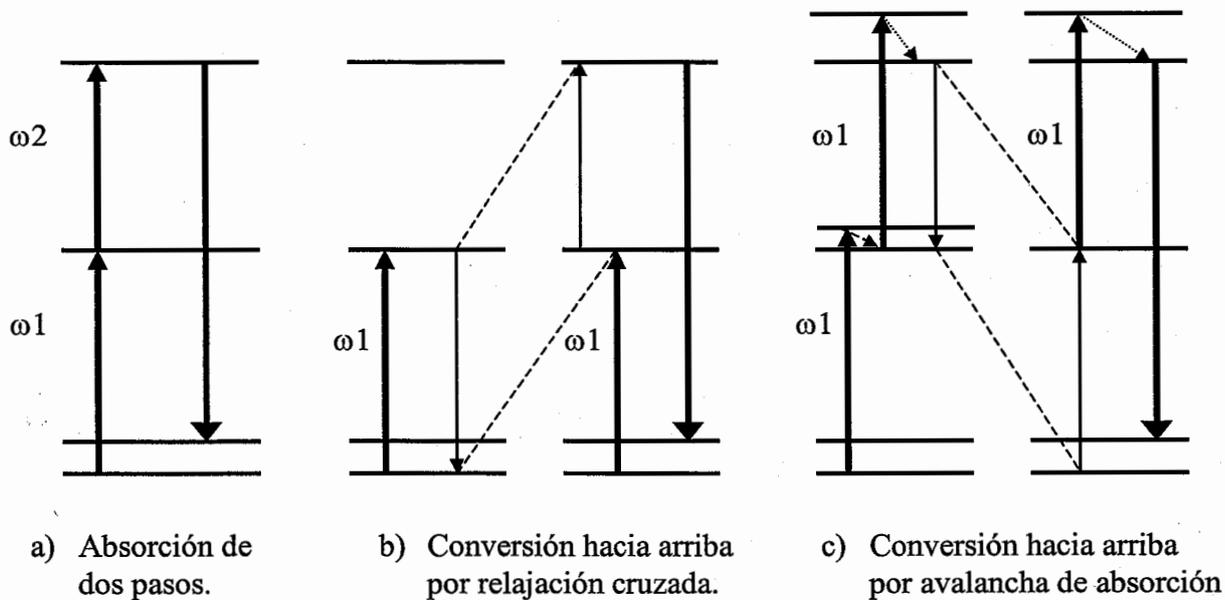


Figura 1.3 Diferentes esquemas de excitación para láseres de conversión hacia arriba.

1.7.1 Efectos de multi-iones en vidrios dopados con iones de tierras raras

A medida que la densidad de dopaje de iones de tierras raras es incrementada, ésta llega a un punto en donde el promedio de la separación de los iones es suficientemente pequeño.

Entonces, la migración espacial de excitación de un ion de tierra rara a un ion vecino llega a ser posible. Tal transferencia de excitación puede ser usada para incrementar el bombeo de una transición láser y así incrementar la eficiencia de laseo.

Sin embargo, también hay situaciones donde la presencia de fenómenos multi-iones puede dañar el desempeño láser. Estos efectos multi-ion pueden ser divididos dentro de dos categorías dependiendo si la migración de energía toma lugar entre iones similares o iones distintos.

El uso de co-dopaje es mostrado esquemáticamente en la Figura 1.4.¹³ La transición láser de interés toma lugar entre dos niveles con los llamados iones aceptores. Los otros iones de tierras raras presentes, conocidos como los iones donantes están ahí para absorber la radiación de bombeo. Después de la absorción de los fotones de bombeo, un ion donador se relaja desde el nivel bombeado hacia un nivel metaestable. Si la fluorescencia desde ese metaestable nivel se superpone con el espectro de absorción del ion aceptor y si la densidad de los iones aceptores es suficientemente alta, entonces hay una probabilidad de que un par donador-aceptor sufrirá una transición radiationless (menor radiación) saliendo el ion donante hacia atrás en el estado base y bombeando el ion aceptor para un nivel excitado.

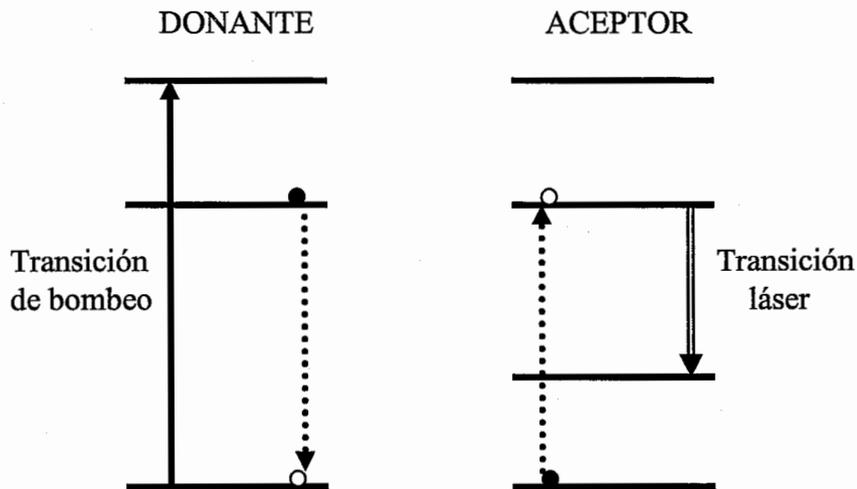


Figura 1.4 Diagrama esquemático de niveles de energía mostrando como la transferencia de energía entre iones donantes y aceptantes (representado por líneas punteadas) puede conducir a una inversión de población en el subsistema aceptor.

La idea de introducir los iones donantes dentro del medio de ganancia de un láser bombeado por lamparas flash, es incrementar la absorción del medio activo en estas regiones espectrales no absorbidas por los iones aceptores. Absorbiendo una más grande proporción de la emisión espectral ancha de la lampara flash, la pendiente de eficiencia del láser deberá ser incrementada, asumiendo que el donador-aceptor transferido es razonablemente eficiente. La razón para codopar en el caso de láseres de fibra de vidrio es un poco diferente. La fuente de bombeo para una fibra láser es invariablemente un láser y un láser emite solo sobre un muy limitado rango espectral. Una obvia situación donde codopar una fibra láser puede ser considerada meritoria es cuando el ion de láser no absorbe a una conveniente longitud de onda de bombeo. Bombear una fibra láser, por ejemplo, con un barato diodo láser de alta potencia de tiene practicas ventajas. Aun no

todos los iones de tierras raras tienen bandas de absorción coincidentes con las longitudes de onda de emisión de GaAlAs.

Otra razón para codopar es cuando, aunque el ion aceptor absorbe a la longitud de onda de bombeo, hay problemas de absorción de estado excitado de bombeo en el ion aceptor las cuales necesitan ser evitadas. Utilizando un esquema de bombeo codopado y cuidadosamente adaptando la concentración de los iones donantes y aceptantes, esto deberá ser posible para asegurar que la mayoría de la absorción de fotones de bombeo ocurran en el subsistema del donador y no desde un estado excitado de los iones aceptores. Tal esquema fue considerado para producir eficiente acción láser a $1.55 \mu\text{m}$ con un diodo de GaAlAs bombeando una fibra de silicio codopada con $\text{Yb}^{3+}\text{-Er}^{3+}$.¹⁴

Similarmente, los esquemas de bombeo codopados también pueden mejorar el desempeño láser en el caso de una muy débil absorción de bombeo. Aquí, los coeficientes de absorción de bombeo son comparables a las pérdidas de fondo de las fibras.

1.7.2 Efectos de iones del mismo tipo

En un medio dopado con un solo tipo de ion, interacciones ion-ion pueden también afectar la dinámica de población si la densidad de iones de tierras raras es suficientemente alto. Existen dos casos para considerar aquí. En ambos ejemplo esquemáticos dados aquí, cualquiera de los dos, antes o después de la transferencia no radiativa, ambos iones están en el mismo nivel de energía. Sin embargo no necesariamente las dos transiciones

compartirán un común nivel. La Figura 1.5.a muestra dos iones vecinos ambos inicialmente existentes en el mismo nivel $|b\rangle$. Los niveles de energía de este particular ion son tales que $E_{ba} \approx E_{db}$. Entonces, existe la posibilidad de una transición de menor energía, según el cual uno de los iones es excitado a un más alto estado $|d\rangle$, mientras que el otro ion regresa al estado base $|a\rangle$. Tal situación ocurre para el nivel $^4I_{13/2}$ del erbio del nivel superior de 1.5 μm láser transición. Conversión hacia arriba cooperativa puede, sin embargo ser puesta para un buen uso si la diferencia de energía entre estados $|d\rangle$ y $|a\rangle$ es más grande que la energía del fotón de bombeo, como ahora existe la posibilidad de un láser de conversión hacia arriba, por ejemplo uno en el que lasie a una más corta longitud de onda que la longitud de onda de bombeo.

La Figura 1.5.b muestra los procesos que son justamente al revés de los mostrados en la Figura 1.5.a. (La diferencia entre el caso a) y el caso b) es realmente solo una clasificación). Aquí dos iones vecinos, uno en el estado base y el otro en el estado excitado sufrirán una transición de menor energía, ambos terminando en el mismo estado $|j\rangle$. Esto es esencialmente un proceso de apagado (quenching) en el que éste básicamente involucra la desexcitación de un nivel LSJ situado más arriba. Nuevamente este proceso puede o no puede ser benéfico para la acción láser dependiendo de las circunstancias.

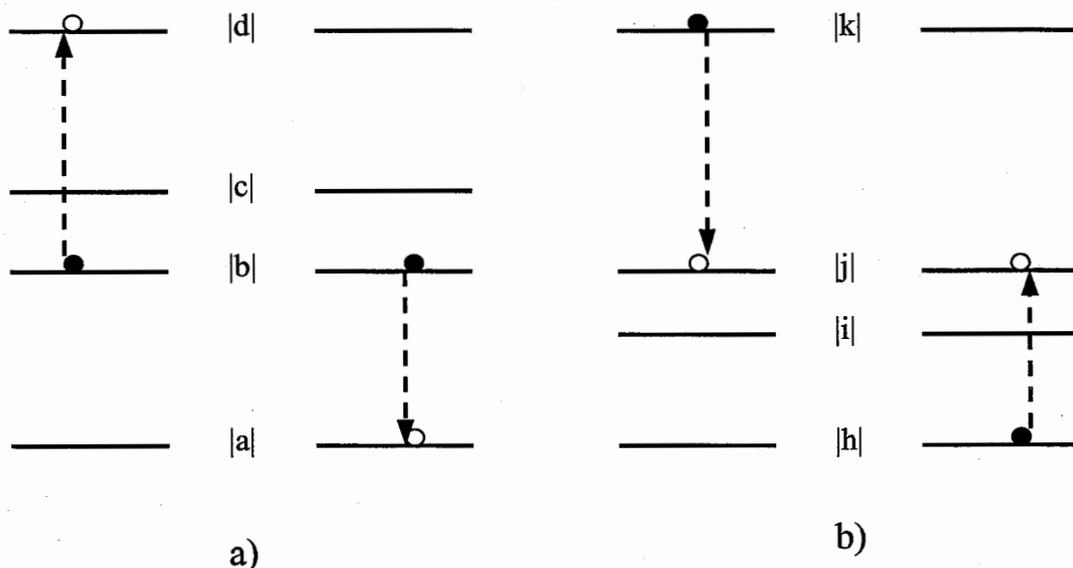


Figura 1.5 Esquemático diagrama mostrando procesos de transferencia de energía: conversión hacia arriba **a)** y apagado (quenching) **b)** en medios altamente dopados.

1.8 Conclusiones

En el capítulo 1 se mostraron las diferentes bandas de absorción y de emisión de los iones de erbio inmersos en fibras de vidrio dopadas con erbio. Además, se describieron los mecanismos de emisión láser y fluorescencia tales como absorción del estado excitado (ESA), conversión hacia arriba (up-conversion) y transferencia de energía en fibras de vidrio dopadas con tierras raras. Los diferentes procesos de bombeo así como las diferentes bandas de absorción y emisión de los iones del erbio servirán, como base para entender el principio de operación en sensores de temperatura de fibra dopada con tierras raras.

1.9 Referencias del capítulo 1

1. E. Desurvire, *Erbium Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, New York (1994), First Edition.
2. G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, Second Edition, McGraw-Hill, Inc. (1991).
3. Nakazawa, M, Y, Kimura, K. Suzuki, "High Gain Erbium Fibre Amplifier Pumped by 800 nm Band," *Elect. Lett.*, Vol. 26, No. 8, 1990, pp. 548-550.
4. Suzuki, K, Y, Kimura, Nakazawa, "High Gain Er^{3+} -Doped Fibre Amplifier Pumped By 820 nm GaAlAs Láser Diodes," *Elect. Lett.*, Vol. 26, No. 13, 1990, pp. 948-949.
5. Laming, R, I, S, B, Poole, E, J, Tarbox, "Pump Excited-State Absorption in Erbium-Doped Fibers," *Opt. Lett.*, Vol. 13, No. 12, 1988, pp1084-1086.
6. Atkins, C. G. J. R. Armigate, R. Wyatt, B. J. Ainslie, S. P. Craig-Ryan, "Pump Excited State Absorption in Er^{3+} Doped Optical Fibers," *Opt. Com.*, Vol. 73, 1989, pp. 217-222.
7. Anders Bjarklev, *Optical Fiber amplifiers: Design and System Applications*, Boston London (1993).
8. T. J. Whitley, C. A. Millar, R. Wyatt, M. C. Brierley, D. Szebesta, "Upconversion pumped green lasing in erbium doped fluorozirconate fibre," *Elec. Lett.*, Vol. 27, pp. 1785-1786, 1991.
9. L. F. Johnson, H. J. Guggenheim, "Infrared-pumped visible laser," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 19, pp. 44-47, 1971.
10. A. J. Silversmith et al., "Green infrared-pumped erbium upconversion laser," *Apply. Phys. Lett.*, Vol. 51, pp. 1977-1979, 1987.

11. R. A. McFarlane, "High Power visible upconversion laser," *Opt., Lett.*, Vol. 16, pp. 1397-1399, 1991.
12. W. Lenth, R. M. Macfarlane, "Upconversion Lasers," *Optics&Photonics News*, 1992.
13. P. W. France, *Optical Fibre Lasers and Amplifiers*, 1991.
14. W. L. Barnes, S. B. Poole, J. E. Townsend, L. Reekie, D. J. Taylor, D. N. Payne, "Er³⁺-Yb³⁺ and Er³⁺ doped fiber laser", *J. Ligth, Technol.*, 7 (1989) 1461.

CAPITULO 2

Sensores de temperatura de fibra óptica

2.1 Resumen

En el presente capítulo se presenta una revisión de sensores de fibra óptica dopados con tierras raras para medición de temperatura. También, se presentan las características espectrales de los iones de tierras raras inmersos en fibras de vidrio para su uso como sensor remoto de temperatura. Además, describimos y comparamos tanto la técnica de la razón de intensidades de fluorescencia FIR y la técnica de medición del decaimiento del tiempo de vida de la fluorescencia FT. Finalmente, se discuten las ventajas y desventajas de estas 2 técnicas al ser empleadas en fibras dopadas con tierras raras como sensores de temperatura.

2.2 Introducción

Los sensores de fibra óptica representan una base tecnológica que puede ser aplicada a una multitud de aplicaciones de sensado. La ventaja de emplear fibra óptica como sensor para la medición de temperatura, radica fundamentalmente en su inmunidad a la interferencia electromagnética debido a que son dispositivos dieléctricos.¹ También, los sensores de fibra pueden operar en ambientes hostiles de trabajo, así como realizar la medición sin

contacto sobre el objeto a ser medido. Además, su pequeño tamaño y peso le permiten acceso dentro de áreas normalmente inaccesibles así como realizar la medición remota. Finalmente, los sensores de fibra pueden ser interfaceados con los sistemas de comunicación óptica para transportar la información desde puntos distantes.

Se han investigado diferentes técnicas y configuraciones de sensores de fibra óptica particularmente para medir temperatura.² Actualmente, la investigación es enfocada en desarrollar sensores de temperatura de fibra óptica confiables y con un costo efectivo. Actualmente, las fibras ópticas dopadas con tierras raras muestran gran potencial en la medición de temperatura debido a que sus propiedades tanto de emisión como de absorción son dependientes de la temperatura.

A continuación haremos una breve mención de algunas técnicas para medir temperatura siguiendo con la clasificación funcional de los sensores en fibras ópticas más utilizada para distinguir entre varios tipos de sensores de temperatura. Enfatizamos en dos técnicas principalmente: razón de intensidad de fluorescencia y medición del decaimiento del tiempo de vida de la fluorescencia. Así mismo, comparamos su desempeño en función de sus características de trabajo.

2.3 Sensores de temperatura de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica para medición de temperatura son básicamente divididos en tres grupos: sensores interferométricos o de modulación de fase, sensores modulación de amplitud y sensores de modulación de espectro.³ Para un sensor de temperatura

interferométrico, el cambio de fase es función de la temperatura. Este tipo de sensores generalmente utiliza fuentes láser de luz coherente y dos fibras monomodales. La luz se divide e inyecta en cada fibra. Si el medio ambiente perturba una de las fibras, ocurre un cambio de fase con respecto a la fibra no perturbada, el cual puede detectarse con mucha precisión.

En los sensores interferométricos se utiliza la técnica de modulación de fase, ya que son sensibles tanto a cambios de longitud como a cambios en el índice de refracción. Si los parámetros en la fibra sensora cambian con relación a los de la fibra de referencia, entonces ocurrirá un cambio de fase relativo.

Por otra parte los sensores de modulación de amplitud son más fáciles de construir, usan fibras multimodales y fuentes no coherentes pueden ser usadas. Ellos son menos costosos pero tienen menor sensibilidad que los interferométricos. Los sensores de luz que utilizan esta técnica son los que detectan variaciones en las características de tal modulación debido al medio perturbador. Tales características son típicamente la amplitud de modulación o la duración temporal en el caso de luz pulsada.

Los sensores de modulación espectral son los que detectan cambios de longitud de onda máxima en un espectro inicialmente conocido o también puede detectar cambios en el espectro mismo, es decir, su forma, ancho de banda o amplitud. Dependiendo del tipo de sensor existen diferentes configuraciones pero en ambas la sensibilidad es más alta que en sensores convencionales.

Con el advenimiento de las fibras láser en las comunicaciones tanto como amplificadores ópticos y como láseres, se ha investigado las características de estas fibras para medición de temperatura. El potencial de estas fibras como elemento sensor de temperatura ha motivado a diversas investigaciones realizadas hasta la fecha. A continuación daremos una

revisión de estas fibras activadas con diferentes iones de tierras raras para medición de temperatura.

2.4 Sensores de temperatura de fibra óptica dopados con tierras raras

Un gran número de propuestas de métodos ópticos para medición de temperatura han sido hechas y los métodos pueden ser divididos principalmente en dos categorías. En el primer tipo la fibra por sí misma actúa como el elemento sensor y en el segundo caso la fibra actúa meramente como una guía de onda de luz para y desde el elemento transductor.

El uso de materiales luminiscentes como el medio transductor ha sido explorado en un número de sensores de temperatura reportados en la literatura. Actualmente la investigación se ha enfocado a la incorporación de diferentes iones de tierras raras en diferentes matrices en fibras ópticas para medición de temperatura. Iones tales como erbio, neodimio, yterbio, praseodimio en matrices de vidrio tanto de silicatos como de ZBLAN entre otros se han investigado. La investigación abarca la dependencia con temperatura de sus diferentes líneas tanto de absorción como de emisión.

En años recientes 2 técnicas basadas en este comportamiento han surgido como una fuerte alternativa para solucionar problemas de medición de temperatura en donde técnicas convencionales no son confiables. La técnica de la razón de intensidades de 2 transiciones de fluorescencia FIR y la técnica de la medición del tiempo de vida de la fluorescencia

FT.⁴⁻⁵

2.4.1. Técnica de la razón de intensidad de fluorescencia (FIR)

La razón de intensidad de fluorescencia (FIR) es una técnica recientemente propuesta e investigada para medición de temperatura. Esta técnica se basa en el termal acoplamiento de dos niveles de energía espacialmente muy cercanos de los iones de tierra raras (unos pocos cientos de cm^{-1}). Sensores ópticos basados en este efecto emplean una fuente óptica para excitar a los iones de tierras raras a uno de los deseados niveles de energía. La relajación de estos iones excitados a un nivel de menor energía es observada en forma de fluorescencia. La relativa población de los dos niveles termalmente acoplados es descrita por la distribución de Boltzmann.

Aunque los iones de tierras raras nunca están en equilibrio termodinámico debido a la metastabilidad de su algunos niveles, se ha demostrado que la población de los dos niveles responsables de la emisión en la longitud de onda del verde (550 nm) en fibras dopadas con erbio están en quasi-termal equilibrio. Este efecto ha sido observado por primera vez en fibras de ZBLAN⁵ y puede ser atribuido al relativo largo tiempo de vida de estos niveles (400 μs) en este huésped. En silicatos a pesar de los dos ordenes de magnitud mas bajo de tiempo de vida⁶ un rápido termal acoplamiento entre los dos niveles ha sido propuesto⁶ y confirmado experimentalmente.⁷ Estos niveles pueden ser considerados para estar en quasi-termal equilibrio debido a su pequeña energía de hueco entre ellos alrededor de 800 cm^{-1} , comparados con la más grande energía de hueco entre ellos y el más cercano más bajo nivel de alrededor de 3000 cm^{-1} . En este caso el tiempo de vida de estos niveles es suficiente (1 μs) para permitir población del nivel superior para un mas bajo por transiciones fononicas inducidas.

El emplear esta técnica en fibras ópticas dopadas con tierras raras como sensor óptico de temperatura implica tener varias ventajas sobre de otras técnicas de medición de temperatura. La razón de la población de estos dos niveles y consecuentemente la razón de su intensidad de fluorescencia es independiente de fluctuaciones de bombeo de la fuente de excitación y de pérdidas de transmisión de la fibra causadas por microdoblamiento y por lo tanto depende solamente de la temperatura. De igual manera en su capacidad de medición remota y sin contacto con el objeto a ser medido. Esta técnica por lo tanto provee una auto-referenciada medición de temperatura que es importante para la precisión y confiabilidad del sensor. Investigaciones recientes sobre fibras ópticas dopadas con diferentes iones de tierras raras empleando la técnica de la razón de intensidad de fluorescencia han sido reportadas como posibles elementos sensores de temperatura, debido a la dependencia tanto de su espectro de absorción como de emisión con la temperatura.

La investigación realizada por ⁸ reporta una fibra óptica de silicio (SiO_2 88%, GeO_2 10%, P_2O_5 2%) con un diámetro de 9.2 μm dopada con 200 ppm de erbio que es excitada con un láser de titanio zafiro sintonizado desde 750-1000 nm y centrado en los 800 nm. La longitud de la fibra dopada fue de 30 cm de larga con una potencia acoplada en el núcleo de 250 mW. La potencia de salida de fluorescencia de la fibra fue detectada por un analizador espectral fue de 2.5 nW a temperatura ambiente. La intensidad de fluorescencia medida en el analizador de espectros ópticos fue a 2 longitudes de onda: 530 nm correspondiente a la transición de la máxima intensidad $^2\text{H}_{11/2}$ a $^4\text{I}_{15/2}$ y 555 nm correspondiente a la transición $^4\text{S}_{3/2}$ a $^4\text{I}_{15/2}$. El desempeño reportado para este sensor fue una sensibilidad de $0.013/^\circ\text{C}$, en un intervalo de temperatura de un cuarto a 700°C [300 K a 833 K]. Sin embargo la alta

potencia de bombeo necesaria para excitar los iones de erbio así como la pobre fluorescencia no hacen factible a este sensor para un buen desempeño de medición.

Una fibra reportada por ⁹ con las mismas características excepto con un mayor dopaje de 2000 ppm y una potencia de salida de fluorescencia medida en la contrapropagativa dirección en un analizador espectral de 500 pW a 1nW. La razón de intensidad de fluorescencia medida en el analizador de espectros ópticos fue a 2 longitudes de onda: 1.13 μm y 1.24 μm correspondientes a las transiciones $^2\text{H}_{11/2}$ a $^4\text{I}_{11/2}$ y $^4\text{S}_{3/2}$ a $^4\text{I}_{11/2}$.

La Figura 2.1 muestra el espectro de fluorescencia de la fibra dopada con erbio como función de temperatura. Así mismo la Figura 2.2 muestra la razón de intensidad como función de temperatura para esta fibra. El desempeño reportado para este sensor tiene una sensibilidad de 0.008/ $^{\circ}\text{C}$, en un intervalo de temperatura desde un cuarto a 600 $^{\circ}\text{C}$. Sin embargo los mismos problemas mencionados anteriormente aunado a la más pobre fluorescencia limitan la factibilidad de desempeño de esta fibra como sensor óptico.

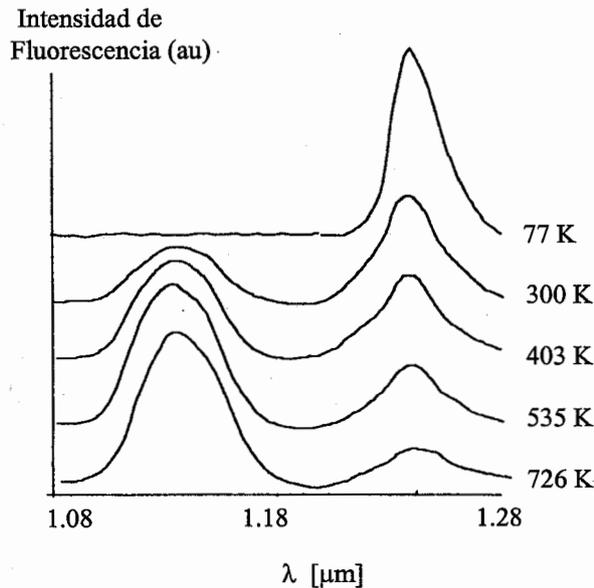


Figura 2.1 Espectro de emisión de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con erbio como una función de longitud de onda para diferentes valores de temperatura.

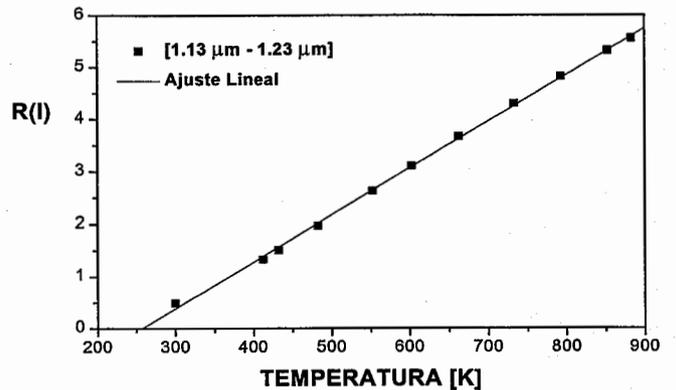


Figura 2.2 Razón de intensidades de dos transiciones como una función de temperatura.

Fibras ópticas de silica dopadas con iones de neodimio también han sido estudiadas para aplicaciones de medición de temperatura.¹⁰ La investigación reporta una fibra óptica de silicio dopada con 500 ppm de iones de neodimio. La fibra óptica en el núcleo fue excitada por un diodo láser con emisión a 802 nm con una potencia de entrada de 550 μ W. La longitud de la fibra dopada es de 250 mm con 5 μ m de diámetro del núcleo. El espectro de fluorescencia contrapropagándose fue grabado en un analizador de espectro óptico a temperatura de $[-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+500\text{ }^{\circ}\text{C}]$ y se muestra en la Figura 2.3. El cambio en la razón de intensidad de fluorescencia con temperatura fue calculado usando los rangos de longitud de onda de 820-840 nm para el nivel superior de intensidad y 895-915 nm para el nivel de intensidad más bajo y se muestra en la Figura 2.4. El desempeño reportado por este sensor es de una sensibilidad de 1.68 $\% / ^{\circ}\text{C}$ a 20 $^{\circ}\text{C}$ y una precisión de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ sobre un intervalo de temperatura de $[-50\text{ }^{\circ}\text{C} - 500\text{ }^{\circ}\text{C}]$.

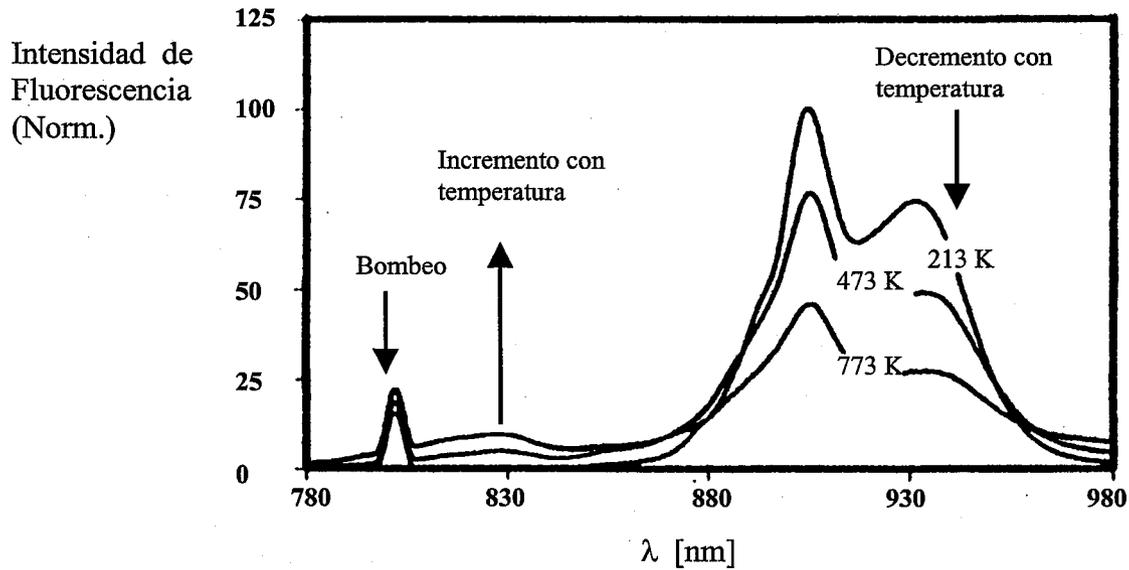


Figura 2.3 Espectro de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con neodimio a diferentes temperaturas.

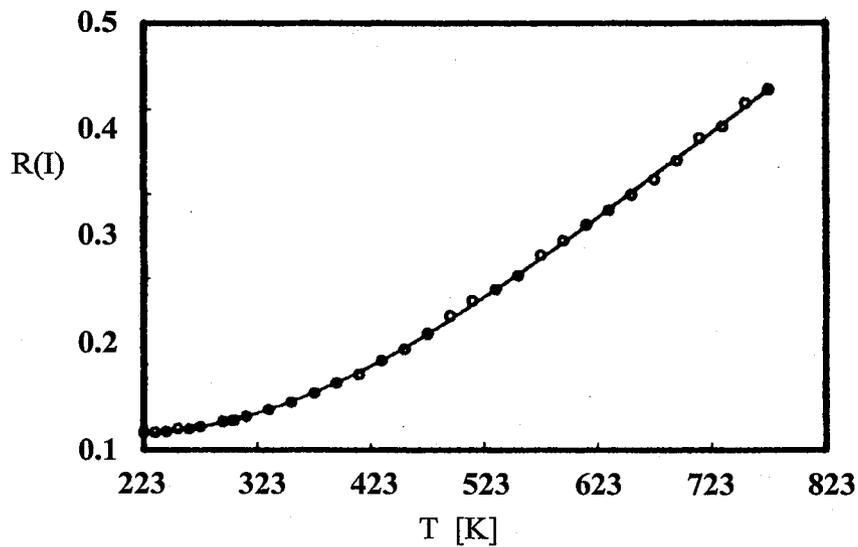


Figura 2.4 Razón de intensidad de fluorescencia como una función de temperatura para el sensor incorporando una fibra de silicio dopada con neodimio.

Fibras ópticas de silicio dopadas con iones de Yterbio han sido estudiadas para aplicaciones de medición de temperatura.¹¹ La investigación reporta una fibra óptica de silicio (comercialmente no disponible) fabricada en los laboratorios de física de la universidad de Nice, la fibra tiene un dopaje de 2000 ppm de iones de yterbio en su núcleo de 40 μm de diámetro. Este ion tiene una amplia banda de absorción en el infrarrojo resultado de la transición en ${}^2F_{7/2}$ a ${}^2F_{5/2}$. La desexcitación de los estados excitados del nivel metaestable ${}^2F_{5/2}$ es predominantemente radiativo ya que las transiciones no-radiativas debido a acoplamiento de fonones o transferencia de energía con otros niveles de energía son impedidas. La simple estructura de niveles de energía del yterbio evita problemas similares a decaimientos multifonon, absorción de estado excitado y concentración quenching. El contrapropagativo espectro de fluorescencia a varias temperaturas entre 20 y 600 $^{\circ}\text{C}$ fue grabado por un analizador de espectros ópticos y es observada en al Figura 2.5. La intensidad de fluorescencia integrada sobre el espectro de emisión fue típicamente 50 nW a 20 $^{\circ}\text{C}$.

La razón R de intensidad de fluorescencia se toma de los sub-niveles termalmente acoplados ${}^2F_{5/2}^a$ y ${}^2F_{5/2}^b$ y es observada en al Figura 2.6. La diferencia de energía entre estos 2 niveles deducida del espectro de absorción es de 680 cm^{-1} , dando una sensibilidad de 1.1 %/C a 20 $^{\circ}\text{C}$ y una precisión de 1 $^{\circ}\text{C}$. Los iones de yterbio en el núcleo de la fibra fueron excitados por un diodo láser de AlGaAs con emisión a 810 nm de longitud de onda. Una potencia de 30 mW fue acoplada dentro de uno de los puertos de entrada acoplada a la fibra. La longitud de la fibra dopada es de 14 cm de longitud.

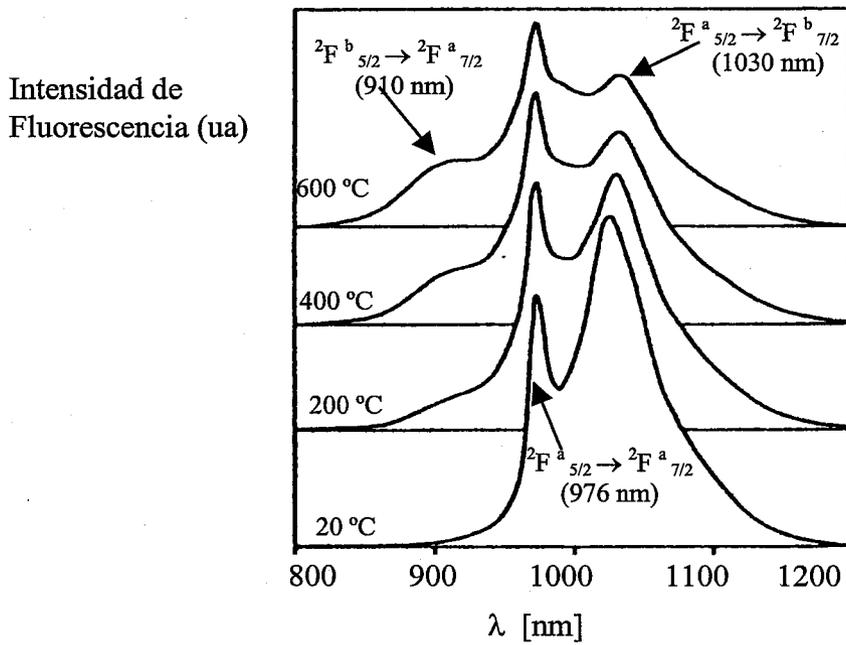


Figura 2.5 Espectro de emisión de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con yterbio a varias temperaturas.

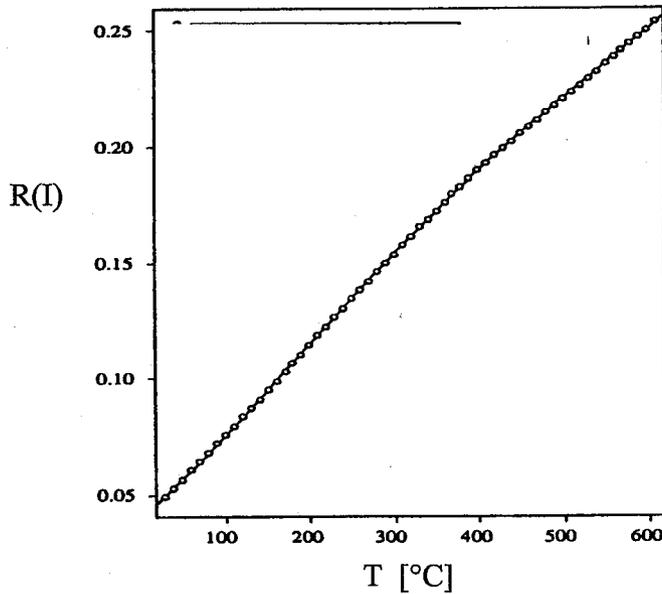


Figura 2.6 Razón de intensidad de una fibra dopada con yterbio como una función de temperatura.

Materiales ópticos dopadas con iones de praseodimio en ZBLAN bulto también han sido estudiados como posibles sensores de temperatura.¹² El efecto de termalización entre los niveles 3P_0 y el ($^3P_1 + ^1I_6$) de los iones de praseodimio dopados dentro de ZBLAN es observado a varias temperaturas entre $[-60\text{ }^\circ\text{C}$ y $220\text{ }^\circ\text{C}]$. Un prototipo del sensor de temperatura, bombeado por un LED azul es investigado para el desempeño del sensor realizando una precisión de alrededor de $1\text{ }^\circ\text{C}$ a través de $300\text{ }^\circ\text{C}$ de un rango de temperatura de $[-45\text{ }^\circ\text{C} - 255\text{ }^\circ\text{C}]$.

La Figura 2.7 muestra la evolución del espectro de fluorescencia como función de la temperatura desde $[-60\text{ }^\circ\text{C}$ a $220\text{ }^\circ\text{C}]$. Preliminares datos fueron grabados usando un láser de iones de argón a 476 nm . El haz de bombeo fue lanzado dentro de una fibra de $600\text{ }\mu\text{m}$ de diámetro en el núcleo y en el otro extremo fue fijado para una muestra de bulto dopado con 1% de $\text{Pr}^{3+}:\text{ZBLAN}$. Las longitudes de onda de emisión de estos niveles aparecen en un pico a 877 nm y 906 nm respectivamente, lo cual implica una energía de hueco de 365 cm^{-1} . La Figura 2.8 muestra la razón de intensidad como función de temperatura. La sensibilidad reportada para este sensor es de $0.58\%/^\circ\text{C}$ a $20\text{ }^\circ\text{C}$. El LED azul tubo una potencia óptica de 2 mW y 60 nm . La potencia típica lanzada fue de $100\text{ }\mu\text{W}$. El LED fue modulado a 270 Hz , y las señales desde los detectores fueron monitoreados por 2 lock-in amplificador, usando una constante de tiempo de 3 segundos.

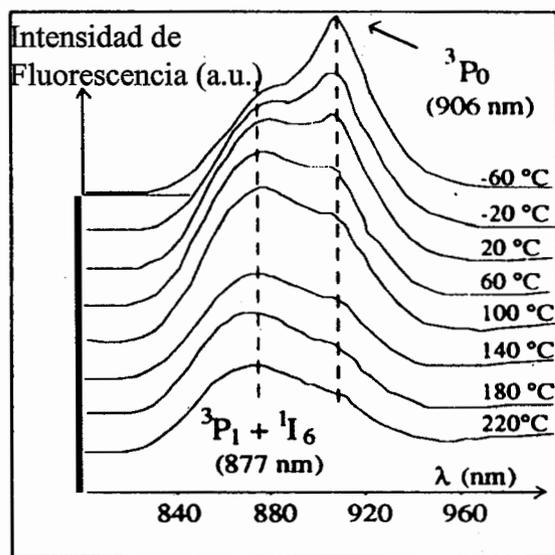


Figura 2.7 Espectro de fluorescencia del praseodimio inmerso en vidrio de ZBALN a diferentes temperaturas.

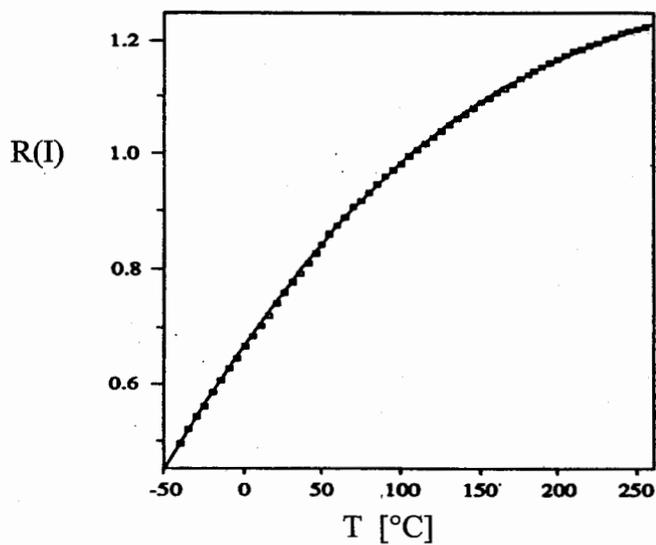


Figura 2.8 Variación de la razón de intensidad como función de la temperatura.

2.4.1. Técnica de la medición de tiempo de decaimiento de la fluorescencia (FL)

En la segunda técnica, estos sensores emplean la medición del decaimiento del tiempo de vida de la fluorescencia de la transición de un nivel superior de energía.⁴ En esta técnica un láser modulado es empleado para enviar un pulso de energía a través de la fibra y con ello excitar los iones de tierras raras dentro del material provocando a la salida de la fibra la fluorescencia en la cual se medirá el tiempo de vida del pulso como una función de temperatura. La Figura 2.9 muestra el esquema óptico para medir el tiempo de decaimiento de la fluorescencia en fibras dopadas con tierras raras.¹³ La principal ventaja de esta técnica es que elimina la necesidad de hacer mediciones precisas de la intensidad de luz de entrada para propósitos de referencia.

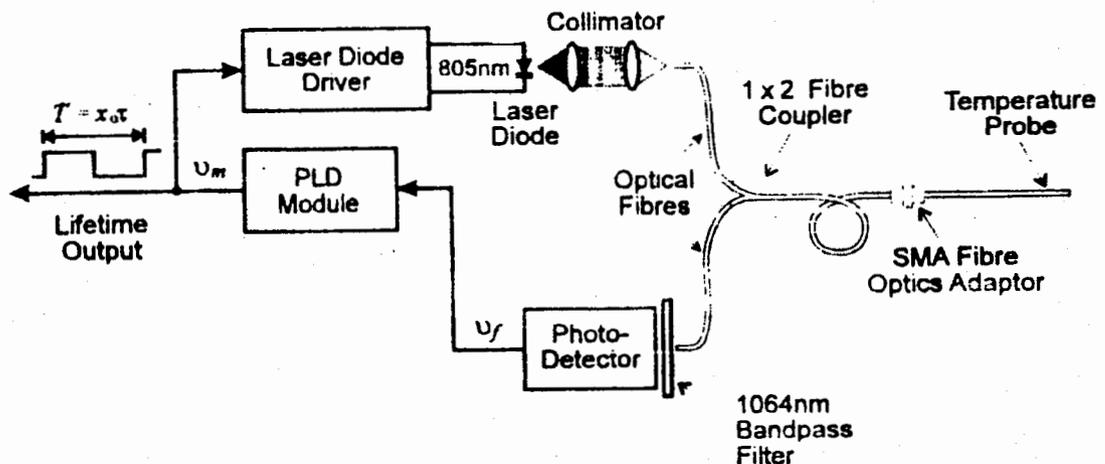


Figura 2.9 Esquema óptico para medir el tiempo del decaimiento del tiempo de vida de la fluorescencia en fibras dopadas con tierras raras sometidas a cambios de temperatura.

Cuando un medio fluorescente es excitado por un pulso de radiación el cual es corto (en comparación al decaimiento de la fluorescencia), la intensidad de la fluorescencia emitida a una particular longitud de onda es vista para disminuir en tiempo como se observa en al Figura 2.10.

La intensidad I , a un tiempo t después de la terminación del pulso de excitación es dada por

$$I(t) = I_0 e^{-k t} \quad (2.1)$$

Donde I_0 es la intensidad inicial (a $t=0$) y k es la constante de decaimiento, características del medio, el recíproco del tiempo de vida de la fluorescencia τ . La intensidad de fluorescencia es vista para disminuir desde cualquier nivel I_a a un nivel I_e (donde por conveniencia $I_a=2I_e$) entonces τ es dado por

$$\tau = \frac{(t_e - t_a)}{\ln 2} \quad (2.2)$$

Donde t_a y t_e son los tiempos relativos correspondientes para I_a y I_e respectivamente. Por lo tanto en la configuración experimental el tiempo de decaimiento fluorescente puede ser demostrado midiendo el intervalo de tiempo transcurrido entre una arbitraria intensidad de fluorescencia I_a y por conveniencia matemática, $I_a/2$.

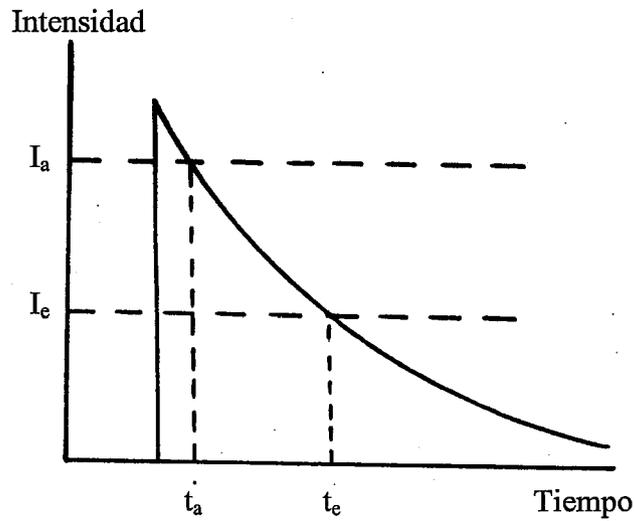


Figura 2.10 Medición del tiempo de decaimiento de la fluorescencia.

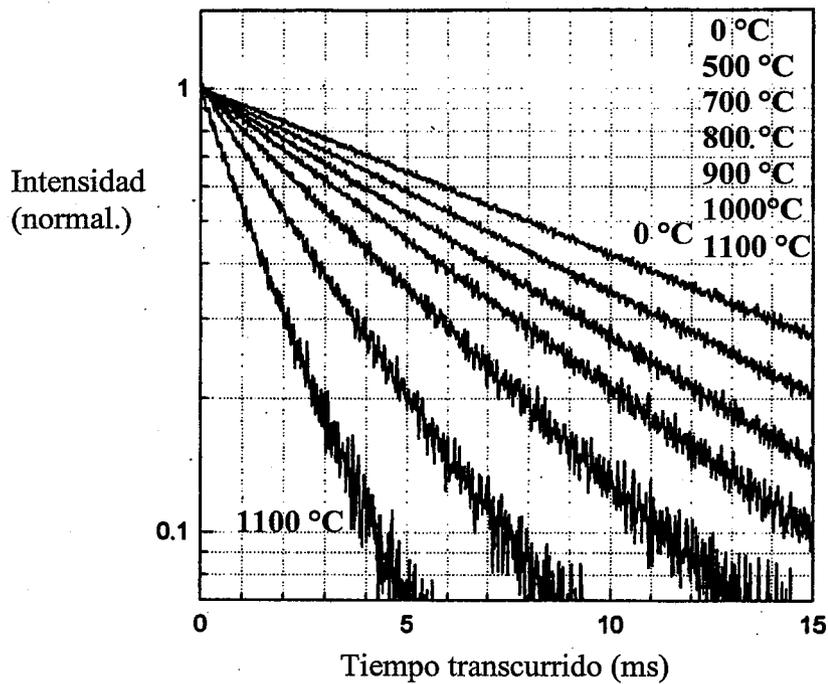


Figura 2.11 Gráfica temporal del decaimiento de la fluorescencia en una fibra dopada con erbio como función de la temperatura.¹⁴

La Figura 2.11 muestra el tiempo de decaimiento de la fluorescencia como función de la temperatura en un intervalo de $[0^{\circ}\text{C} - 1100^{\circ}\text{C}]$ para una fibra de silicio dopada con erbio.¹⁴

Sin embargo la principal desventaja de esta técnica para sensores radica en el uso de fuentes láser pulsadas y sistemas para modular la señal además del complicado sistema de detección para interpretar la señal óptica.

Investigaciones recientes sobre fibras ópticas dopadas con diferentes iones de tierras raras empleando esta técnica han sido reportadas como posibles elementos sensores de temperatura, debido a la dependencia del tiempo de vida del decaimiento de la fluorescencia el cual es dependiente de la temperatura.

La investigación realizada por ¹⁵ reporta el tiempo de vida de la fluorescencia en la región de $\sim 1.5 \mu\text{m}$ de longitud de onda en fibras dopadas con diferentes concentraciones de erbio a temperaturas arriba de aproximadamente 950°C . El desempeño de la fibra sensora tubo una incertidumbre de medición es de $\sim 10 \mu\text{s}$ correspondiendo a 4°C sobre la región de temperatura de 0°C a 400°C y menor a mayores temperaturas. La sensibilidad de temperatura se incrementa significativamente a temperaturas arriba de aproximadamente 500°C , desde $[\sim 2.5 \mu\text{s/K}$ a $\sim 12 \mu\text{s/K}]$ en una región de temperatura desde $[0^{\circ}\text{C}$ a $400^{\circ}\text{C}]$ y desde $[700^{\circ}\text{C}$ a $900^{\circ}\text{C}]$ respectivamente.

Una investigación realizada por ¹⁶ reporta las características de una fibra de aluminio-silicato dopada con neodimio (fibra no comercialmente disponible) usando la técnica de la medición del tiempo de vida de la fluorescencia a una temperatura máxima de operación de 750 °C. El intervalo de operación de la fibra fue desde [-196 °C a 750 °C] de temperatura. La apertura numérica de la fibra fue de 0.28 con diámetros de 100/140 μm (núcleo/recubrimiento). La longitud de la sonda de prueba fue de ~5 mm. La desviación de la medición del tiempo de vida es de ±3°C de cambio en error de temperatura en el termómetro de referencia y en el horno de temperatura. La calibración del tiempo de vida de la fibra dopada fue realizada desde [-190 °C a 750 °C].

Una investigación realizada por ¹⁷ reporta una fibra óptica de silicio dopada con tulio y un cristal de Ytrium Aluminio Garnet (YAG) dopado con tulio para aplicaciones de medición de temperatura mayores a 1300 °C. La fibra usada fue de silicio dopada con tulio con apertura numérica de 0.2 y una concentración de tulio de ~280 ppm. El diámetro de la fibra fue de 15 μm/125 μm (núcleo/recubrimiento).

Una investigación realizada por ¹⁸ muestra la posibilidad de desarrollar sensores de temperatura usando un material de vidrio de ZBLAN dopado con iones de praseodimio acoplado a una fibra óptica a diferentes concentraciones. El sensor basado en el tiempo de decaimiento de la fluorescencia trabaja sobre una importante región desde un cuarto de temperatura hasta aproximadamente 500 K. Mas arriba de esta temperatura la matriz de ZBLAN es sujeto a craking y este es el uso para él limite del material para termometría

óptica. La calibración es realizada vía un modelo de 3 niveles. El sensor tiene una típica resolución de aproximadamente $\pm 2K$ sobre el rango de temperatura considerado.

Una investigación realizada por ¹⁹ reporta una fibra óptica de silica dopada con yterbio para medir temperatura. En este artículo el yterbio fue dopada dentro de vidrio de germanosilica y hecho en fibra.

Investigaciones realizadas por ²⁰ reportan el uso de un sistema basado en fibra dopada con tulio (comercialmente disponible) para medición de temperatura arriba de 1250 °C.

La fibra de Tulio usada en este trabajo fue basada en silica, de apertura numérica 0.2, con una concentración de Tm^{3+} de ~280 ppm. El diámetro del núcleo/recubrimiento fue de ~15 μm /125 μm .

2.5 Conclusiones

En el capítulo anterior se describieron las características de las fibras ópticas como sensores de temperatura. Así mismo se presentó el potencial de las fibras ópticas dopadas con iones de tierras raras como sensores de temperatura. Presentamos una revisión de las diferentes técnicas y esquemas propuestas hasta la fecha de los sensores de tierras raras, Enfatizamos principalmente en dos técnicas para medición de temperatura.

Sin embargo la mayor parte de los reportes sobre esta clase de sensores no realiza una evaluación que permita conocer las características de desempeño.

2.6 Referencias del capítulo 2

1. E. Udd, "Fiber optic sensors," *Optical reviews SPIE*, Vol. CR44, Pag. 31 (1992).
2. R. Hyspzer, "Fiber optic temperature sensor," *SPIE*, Vol. 2634 pp. 34-46 1995.
3. D.A. Krohn, "Fiber optic sensors, Fundamentals and applications", Editorial ISA, 1988, E. U., Cap. 7.
4. K.T.V. Grattan, A.W. Palmer, "A fiber optic temperature sensor using fluorescent decay," *SPIE Vol. 492* 1984.
5. H. Berthou and C. K. Jorgensen, "Optical-fiber temperature sensor based on upconversion-excited state fluorescence," *Opt. Lett.*, **15**, 1100-1102 (1990).
6. P. A. Krug, M. G. Sceats, G. R. Atkins, S. C. Guy, S. B. Poole, "Intermediate excited-state absorption in erbium-doped fiber strongly pumped at 980 nm," *Opt. Lett.*, **16**, pp 1976-1978 (1991).
7. E. Maurice, G. Monnom, A. Saissy, D. B. Ostrowsky, G. W. Baxter, "Thermalization effects between upper levels of green fluorescence in Er-doped silica fibers," *Opt. Lett.*, **19**, pp. 990-992 (1994).
8. E. Maurice, G. Monnom, D. B. Ostrowsky, G. W. Baxter, "High dynamic range temperature point sensor using green fluorescence intensity ratio in erbium-doped silica fiber," *Journal. Light. Tech.*, **13**, No. 7, pp. 1349-1353 (1995).
9. E. Maurice, G. Monnom, D. B. Ostrowsky, G. W. Baxter, "1.2 μm transitions in erbium-doped fibers: the possibility of quasi-distributed temperature sensors," *Appl. Opt.*, **34**, No. 21, pp. 4196-4199 (1995).

10. S. A. Wade, J. C. Muscat, S. F. Collins, G. W. Baxter, "Nd³⁺-doped optical fiber temperature sensor using the fluorescence intensity ratio technique," *Rev. Scit. Instru.* Vol. 70, pp. 4131-4438. 1999.
11. E. Maurice, S. A. Wade, S. F. Collins, G. Monnom, G. W. Baxter, "Self-referenced point temperature sensor based on a fluorescence intensity ratio in Yb³⁺-doped silica fiber," *Appl. Opt.*, **36**, No. 31, pp. 8264-8269 (1997).
12. E. Maurice, G. Monnom, S. A. Wade, B. P. Petreski, S. F. Collins, "Blue light-emitting-diode-pumped point temperature sensor based on a fluorescence intensity ratio in Pr³⁺:ZBLAN glass," *Opt. Rev.* **4**, pp. 89-91 (1997).
13. Z. Y. Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, B. T. Meggitt, "Potential for temperature sensor applications of highly neodymium-doped crystals and fiber at up to approximately 1000 C," *Rev. Scie. Inst.*, Vol. 68, No. 7, pp. 2759-2763, 1997.
14. Z. Y. Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, B. T. Meggitt, T. Sun, "Characterization of erbium-doped intrinsic optical fiber sensor probes at high temperatures," *Rev. Scint, Inst.*, Vol. 69, No. 8, pp. 2823-3082, 1998.
15. Z. Y. Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, B. T. Meggitt, T. Sun, "Fluorescence decay-time characteristics of erbium-doped optical fiber at elevated temperatures," *Rev. Sc. Inst.* pp. 2764-2766, Vol. 68. No. 7, 1997.
16. Z. Y. Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, B. T. Meggitt, "Spectral characteristics and effects of heat treatment on intrinsic Nd-doped fiber thermometer probes," *Rev. Sct. Intt.* Vol 69, No. 1, pp. 139-145, 1998.
17. Z. Y. Zhang, K. T. V. Grattan, B. T. Meggitt, "Thulium-doped fiber optic decay-time temperature sensors: "Characterization of high temperature performance," *Rev. Sct. Intrum.* Vol. 71, No. 4, pp. 1614-1620, 2000

18. T. Sun, Z. Y. Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, S. F. Collins, "Temperature dependence of the fluorescence lifetime in Pr³⁺:ZBLAN glass for fiber optic thermometry," *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 68, No. 9, pp. 3447-3451, 1997.
19. T. Sun, Z. Y. Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, "Ytterbium-based fluorescence decay time fiber optic temperature sensor systems," *Rev. Sci. Instr.* Vol. 69, No. 12, pp. 4179-4185, 1998.
20. Zhi-Yi Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, B. T. Meggitt, "Thulium-doped intrinsic fiber optic sensor for high temperature measurements (> 1100 °C)," *Rev. Sci. Instr.* Vol. 69, No. 9, pp. 3210-3214, 1998.

CAPITULO 3

Modelo radiométrico para evaluar el desempeño de sensores de fibra para medición de temperatura

3.1 Resumen

Proponemos analizar un sensor de temperatura de fibra óptica en términos de las estándar figuras de mérito radiométricas para evaluar su habilidad para detectar radiación termalmente generada.¹ Desarrollamos un modelo radiométrico incluyendo la razón de señal a ruido SNR, la potencia equivalente de ruido NEP, responsividad \mathfrak{R} , detectividad estrella D^* , sensibilidad S y resolución ΔT_{\min} , para predecir el desempeño y conocer los límites de detección de sensores de temperatura de fibra óptica a partir de conocer solamente su espectro de fluorescencia. Aplicamos este novedoso análisis radiométrico al espectro de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con erbio sometida a diferentes temperaturas. Así mismo, identificamos de esta manera las mejores bandas para usar en la medición remota de temperatura y las comparamos con las consideradas en el pasado. Encontramos una mejorada razón señal a ruido para este sensor de aproximadamente 58.8 dB para la banda espectral a [520 nm – 530 nm] y 54.9 dB para la banda espectral [540 nm – 550 nm].

3.2 Introducción

Las características espectroscópicas de los iones de tierras raras incorporados en fibras de vidrio han sido ampliamente utilizadas para desarrollar láseres y amplificadores ópticos principalmente para comunicaciones. Sin embargo, otras aplicaciones de estos materiales han sido estudiadas, por ejemplo, muchas de las propiedades de absorción y fluorescencia de materiales dopados con tierras raras son termalmente dependientes. Por lo tanto, estas propiedades pueden ser explotadas para medición de temperatura.

Actualmente, diferentes iones de tierras raras incorporados en diferentes huéspedes de vidrio en forma de fibra como en material bulto, han sido investigadas para emplearse como sensor óptico de temperatura.²⁻¹¹ Diferentes esquemas y técnicas basadas en las propiedades térmicas de los espectros de absorción y emisión de los materiales dopados con tierras raras han sido investigados. Recientemente, la técnica de la razón de intensidad de fluorescencia descrita en el capítulo 2 ha mostrado importantes características en aplicaciones de medición de temperatura. Empleando esta técnica en fibras de vidrio empleando diferentes iones de tierras raras han sido reportados en la literatura.

Proponemos analizar un sensor de temperatura de fibra óptica que emplea la técnica de la razón de intensidad, en términos de las figuras de mérito radiométricas. Esto incluye la razón señal a ruido (SNR), la potencia equivalente de ruido (NEP), sensibilidad (S) y la resolución de temperatura (ΔT_{\min}), para predecir, desde su espectro de fluorescencia, el desempeño de un sensor de fibra óptica, empleando la técnica de la razón de intensidad. Aplicamos este análisis radiométrico a la fibra de silicio dopada con erbio para identificar las bandas espectrales para el óptimo desempeño del sensor de temperatura, incorporando

la técnica de la razón de intensidad. Este manuscrito es enfocado para presentar un nuevo método de analizar este tipo de sensores para predecir su esperado desempeño, usando el espectro de fluorescencia medido.¹¹⁻¹²

3.3 Bandas espectrales de fluorescencia sensibles a la temperatura

Fibras de silicio de baja pérdida dopadas con erbio son de interés para aplicaciones de medición de temperatura donde su absorción y emisión son dependientes de la temperatura. Este comportamiento es debido al homogéneo ensanchamiento del ancho de línea y a la cambiante población de los niveles de energía con la temperatura.

Cuando una fibra dopada con erbio es bombeada con fotones de 2.484×10^{-19} J de energía que corresponde a la longitud de onda de 800 nm, el nivel del erbio $^4I_{9/2}$ es excitado y el nivel metaestable $^4I_{13/2}$ es cuasi-instantenamente poblado debido a las transiciones no radiativas. En este nivel otros fotones de bombeo son absorbidos resultando en la excitación de los niveles $^2H_{11/2}$ y el $^4S_{3/2}$ responsables de la emisión de radiación de alrededor de 520 nm (verde). Estos niveles son considerados para estar en cuasi termal equilibrio, a causa de la pequeña energía de hueco entre ellos (alrededor de 1.59×10^{-20} J). Esta energía es pequeña en comparación con la larga energía de hueco entre ellos y el próximo más bajo nivel (alrededor 5.9636×10^{-20} J).

La Figura 3.1 muestra el espectro de emisión de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con erbio como función de la temperatura.¹¹ Cambiamos la abscisa en la gráfica para mostrar la potencia en [nW], en vez de intensidad, como se acostumbra la terminología para

este campo. En análisis radiométrico tradicional, la señal óptica es expresada como potencia, en las mismas unidades. Adherimos a la terminología establecida para la razón de intensidad, en vez de la razón de potencia, como los dos son relacionados a través de factores comunes, los cuales se cancelan en la técnica de la razón. Para ser precisos, la razón es finalmente obtenida de la corriente de salida del detector en dos canales.

La Figura 3.1 también muestra las curvas de transmisión teórica de los filtros que proponemos para incrementar la cantidad de energía encerrada en las bandas correspondientes a las transiciones (${}^2H_{11/2}$ y ${}^4S_{3/2}$) de fluorescencia del erbio. La dependencia de temperatura del espectro de fluorescencia en la longitud de onda del verde es claramente vista. Al calentar la fibra, el pico de transición de menor energía ${}^2H_{11/2}$ se incrementa mientras que el otro pico decrece. Esto es debido a la termalización entre estos dos niveles, lo cual ha sido explicado teóricamente¹³ y observado experimentalmente.¹⁴

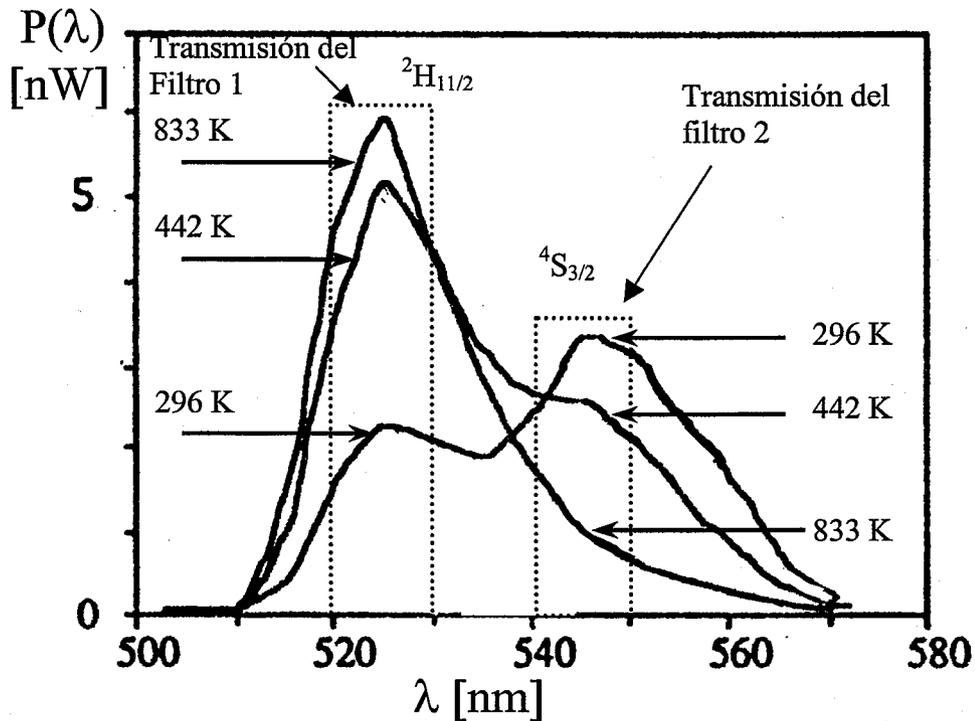


Figura 3.1 Espectro de emisión de la fluorescencia de una fibra de silicio dopada con erbio como una función de longitud de onda para diferentes temperaturas.¹¹ Las bandas angostas de los filtros se usan para incrementar los picos (${}^2H_{11/2}$ y ${}^4S_{3/2}$) detectados dependiente de la temperatura.

La razón $[R(I_1/I_2)]$ de las intensidades (I_1 e I_2) radiando desde dos niveles respectivos, ha sido mostrada para ser proporcional a su razón de frecuencia ν , a su razón de sección transversal de emisión σ_e y a su distribución de población con la temperatura.

$$R = \frac{I({}^2H_{11/2})}{I({}^4S_{3/2})} = \frac{\nu({}^2H_{11/2})}{\nu({}^4S_{3/2})} \frac{\sigma_e({}^2H_{11/2})}{\sigma_e({}^4S_{3/2})} \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (3.1)$$

En esta expresión, ΔE es la diferencia de energía entre los dos niveles (alrededor de 1.59×10^{-20} J), k_B es la constante de Boltzman ($k_B = 1.38054 \times 10^{-23}$ J/K) y T es la temperatura absoluta en kelvins. La razón del producto de secciones transversales de emisión y frecuencia tiene un valor aproximadamente de 40 el cual ha sido reportado por¹¹. De esta manera, proponemos diferentes líneas espectrales de emisión para observar su comportamiento como función de la temperatura. De acuerdo a la Ecuación 3.1, calculamos la razón de intensidades para estos diferentes picos espectrales de fluorescencia como función de la temperatura. La Figura 3.2 muestra la predecida razón de intensidades de estas transiciones contra la temperatura, considerando solo picos de intensidades. La razón de intensidades a [520 nm / 560 nm], [530 nm / 555 nm] y [525 nm / 545 nm] muestran una mayor pendiente con una razón máxima de aproximadamente 12 a 833 K de temperatura.

Sin embargo, ahora tomamos bandas de fluorescencia y determinamos las más sensibles para las temperaturas mostradas en el espectro de fluorescencia de la Figura 3.1. La Figura 3.3 muestra la predecida razón de intensidades de las intensidades integradas sobre bandas espectrales como una función de la temperatura. La razón de intensidades para las bandas [515 nm – 525 nm / 555 nm – 565 nm], [525 nm – 535 nm / 550 nm – 560 nm] y [520 nm – 530 nm / 540 nm – 550 nm] muestran una mayor pendiente con una razón máxima de aproximadamente 15 a 833 K de temperatura.

La comparación entre las dos figuras muestra un incremento en la razón de intensidades $R(I_1/I_2)$. Este incremento es debido a la más alta cantidad de energía contenida usando bandas espectrales.

Esta razón es más grande que la mostrada en la Figura 3.2, porque esta ha sido calculada asumiendo intervalos de 10-nm de ancho espectral, óptimamente centrados en los picos verde (520 nm) y amarillo (550 nm) respectivamente. *Óptimamente* en este caso significa que el intervalo no está centrado en la longitud de onda, donde el pico es en realidad observado (especialmente porque este cambia con la temperatura), pero en vez de esto, este es centrado de tal forma que la máxima señal es obtenida. Los resultados con desempeño mejor que los de la Figura 3.2 son desplegados en la Figura 3.3. Ellos confirman la importancia de integrar sobre las bandas integrales que llevan la información para incrementar la señal útil.

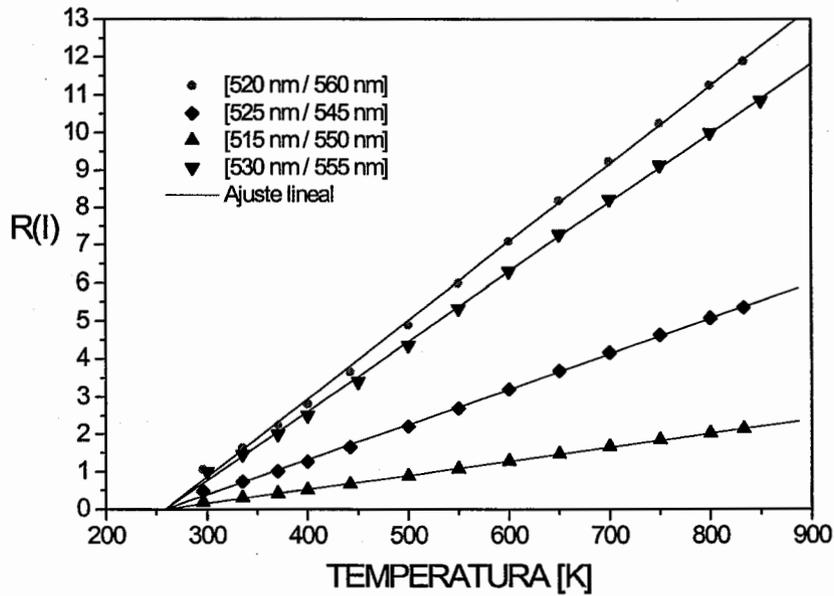


Figura 3.2 Predicción teórica de la razón de intensidades de dos transiciones como una función de la temperatura, considerando solo picos de intensidad.

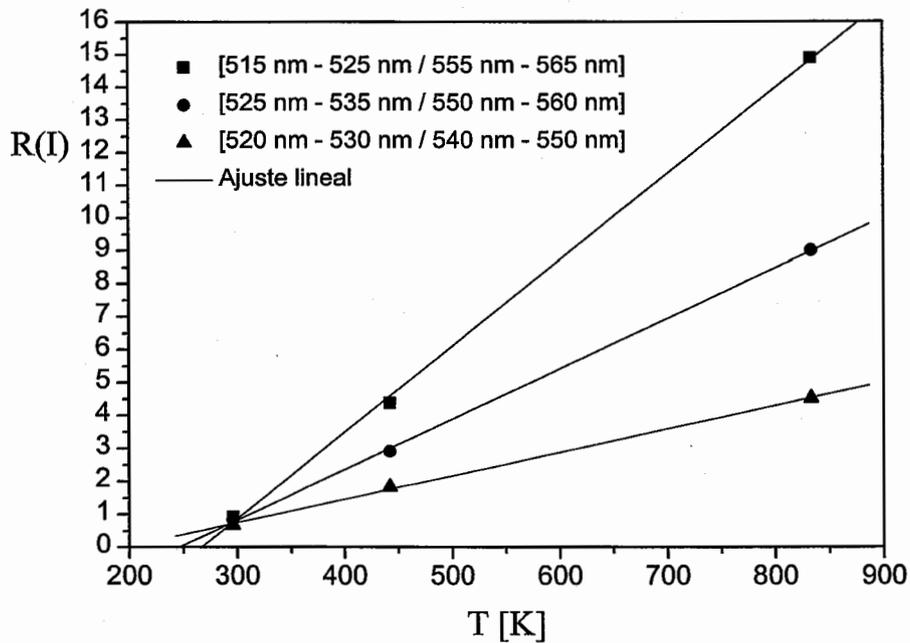


Figura 3.3 Predicción teórica de la razón de intensidades integradas sobre bandas espectrales como una función de la temperatura.

3.4 Arreglo experimental para evaluar el desempeño del sensor de temperatura

La emisión de radiación del silicio dopado con erbio, bombeado con 800 nm de longitud de onda, ha sido ampliamente demostrado con amplificadores ópticos de fibra.^{15, 16} El nivel $^4I_{9/2}$ del ion de erbio es excitado y cuasi-instantáneamente el nivel metastable $^4I_{13/2}$ es poblado via transiciones no-radiativas. Este metaestable nivel absorbe los fotones de bombeo y excita los niveles superiores, $^2H_{11/2}$ y el $^4S_{3/2}$, responsables de la fluorescencia del verde.

La Figura 3.4 muestra el arreglo experimental para estudiar el comportamiento del espectro de fluorescencia mostrado en la Figura 3.1 y evaluar las figuras de mérito radiométricas del sensor. El haz láser de cercano infrarrojo a 800 nm pasa a través de un espejo dicróico transmitiendo la radiación de cercano infrarrojo y reflejando la radiación en el intervalo visible verde y amarillo. Una larga separación espectral entre el bombeo y la longitud de onda de fluorescencia simplifican los requerimientos en el divisor de haz.. Una fibra estándar de comunicaciones (monomodal a 1.55 μm) colecta 250 mW de potencia incidente es acoplada al elemento sensible de temperatura. La fibra dopada con erbio se encuentra dentro de un horno cuya temperatura T es monitoreada con un termopar. La longitud máxima sugerida para la fibra transparente es de unos pocos cientos de metros para conservar la señal de fluorescencia de baja potencia generada en la fibra, $P_f(\lambda, T)$. Esta longitud se considera suficiente para transportar la radiación desde las condiciones potencialmente inhóspitas a el medioambiente conductivo para la detección de la señal, para posteriormente procesarla y monitorearla.

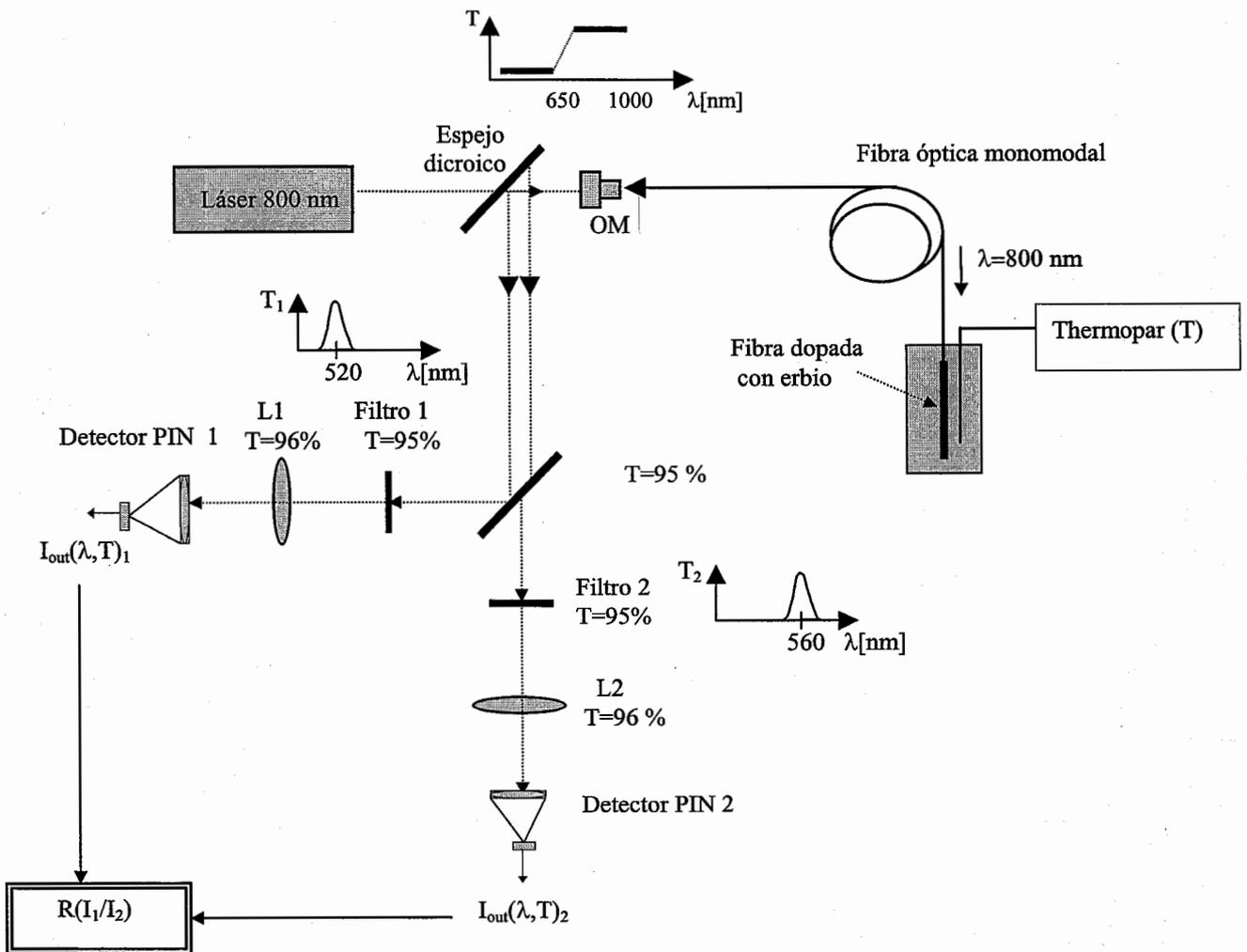


Figura 3.4 Principio de operación del sensor de fibra óptica dopada con erbio para mediciones remotas de temperatura, empleando la razón de emisión de fluorescencia en el intervalo de longitud de onda [515 nm - 570 nm].

El corazón del sensor es de 30 cm de largo de fibra dopada con erbio (200 ppm) con un núcleo de silicio (88% SiO₂, 10% GeO₂, 2% P₂O₅) de 9.2 μm de diámetro. La potencia radiativa de la fluorescencia $P_f(\lambda, T)$ generada y propagándose en la dirección opuesta de la radiación de bombeo es estimada para ser de 15 nW a 42 nW para un intervalo de 296 K a

833 K de temperatura. Esta potencia de fluorescencia es debida a los filtros de interferencia que proponemos con 10 nm de transmisión de ancho de banda centrado en el pico de transición. Por el contrario cuando empleamos picos espectrales la cantidad de potencia radiativa a 525 nm decrece a 2.5 nW y 5.8 nW para 296 K y 833 K de la temperatura respectivamente.¹¹ Sin embargo para el mismo incremento de temperatura, la potencia del pico espectral decrece desde 3.4 nW a 1.1 nW a 545 nm.

La fluorescencia del verde después de la reflexión en el espejo dicróico puede ser medida con el analizador de espectros ópticos. Las características espectrales del espejo dicróico son seleccionadas de tal forma que la radiación láser bombeada es transmitida, y la radiación de fluorescencia verde es reflejada desde este. La misma fibra es empleada para llevar la potencia de bombeo a la fibra dopada con erbio y regresar la señal de fluorescencia.

Otro espejo dicróico (WDM) es usado para separar la señal radiométrica debido a las transiciones $^2H_{11/2}$ y $^4S_{3/2}$ en el espectro de emisión del silicio dopado con erbio.

En diferencia l tradicional arreglo empleado en la evaluación del desempeño del sensor, incorporamos un filtro de transmisión con 10-nm de ancho espectral en cada canal espectral, centrado aproximadamente en el pico de transición. Con esta señal incrementada, la potencia de fluorescencia es incrementada por aproximadamente un factor de 5 sobre el mismo intervalo de temperatura. La potencia de fluorescencia integrada sobre los 10-nm de banda espectral [520 nm – 530 nm] se incrementa desde 21.5 nW a 52.1 nW para el cambio de temperatura de 296 K a 833 K. Del mismo modo, la potencia de fluorescencia en los 10-nm de banda espectral [540 nm – 550 nm] es similarmente realizada.

Finalmente, el haz en cada brazo es enfocado en un PIN detector. Ahora que hemos descrito la optimización de la señal espectral, consideraremos las pérdidas de transmisión óptica triadas por la incorporación de diversos componentes ópticos. Estos decrecerán la potencia incidente en el detector en cada canal espectral. Los factores de transmisión en el divisor de haz, WDM filtros y lentes del fotodetector τ_1 , τ_2 , y τ_3 respectivamente decrecen la señal de fluorescencia en cada canal $P_0(\lambda, T)$.

$$P_0(\lambda, T) = \tau_1 \tau_2 \tau_3 P_f(\lambda, T) \quad [W] \quad (3.2)$$

Las señales en cada canal son divididas formando la razón de intensidad. Después, discutimos el sistema de detección en más detalle, considerando su bajo nivel de luz y las implicaciones de dividir las dos señales.

3.5 Sistema de detección propuesto para el sensor temperatura

Un transductor es colocado a la salida del extremo del sensor óptico para interpretar la información de temperatura encerrada en la señal óptica. La Figura 3.5 muestra el sistema de detección para evaluar las radiométricas figuras de mérito en el detector del sensor de temperatura de fibra óptica dopada con erbio. Su principal requerimiento es alta sensibilidad en el intervalo espectral [510 nm – 570 nm], baja corriente oscura y compatibilidad con las dimensiones de la fibra óptica. Un fotodetector de silicio PIN cumple estos objetivos.^{17, 18}

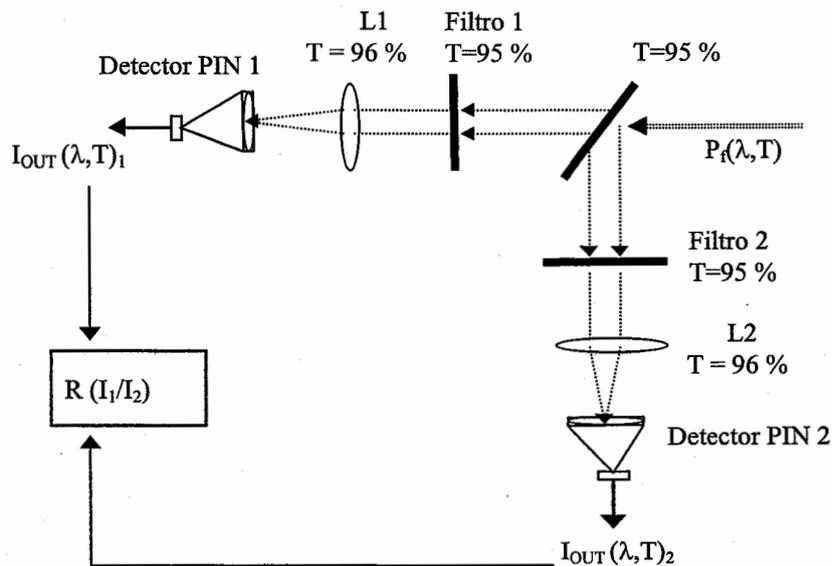


Figura 3.5 Sistema de detección para evaluar las figuras de mérito radiométricas del sensor de fibra óptica de silicio dopado con erbio.

Esta es una aplicación de baja frecuencia y bajo nivel de luz. Por lo tanto, el detector es usado en un modo fotovoltaico de operación, sin suministro de voltaje. La no-linearidad con un fotodiodo planar difuso de silicio es menor que $\pm 1\%$ sobre 6 décadas. Para evaluar los parámetros representativos de desempeño, seleccionamos valores específicos de componentes comercialmente disponibles: el fotodiodo tiene una resistencia en serie pequeña despreciable $R_s \ll 1 \text{ k}\Omega$, una capacitancia total $C_d = 10^{-10} \text{ F}$, y una corriente oscura de $I_d = 10^{-12} \text{ A}$ (sin suministro de voltaje), el amplificador tiene una resistencia de entrada $R_a = 1 \text{ M}\Omega$, y una resistencia de retroalimentación $R_F = 10 \text{ k}\Omega$. La resistencia, R_s es apreciablemente más pequeña que la resistencia de carga R_F . Para propósitos prácticos,

esta puede ser por lo tanto despreciable en el siguiente análisis. La corriente de ruido del amplificador I_a es 10^{-13} A/ $\sqrt{\text{Hz}}$. La fotocorriente $I_p(\lambda, T)$ resultado de la absorción de la radiación de fluorescencia en el fotodetector es dada por¹⁸

$$I_p(\lambda, T) = \frac{q \lambda P_0(\lambda, T) \eta(\lambda)}{h c} \quad [A] \quad (3.3)$$

$P_0(\lambda, T)$ es la potencia espectral incidente dependiente de temperatura en el fotodetector, [W]; q es la carga del electrón, 1.6×10^{-19} C; $h\nu (= h c / \lambda)$ es la energía del fotón, [J]; λ es la longitud de onda de emisión para cada transición, [nm]; y finalmente $\eta(\lambda)$ es la eficiencia cuántica del fotodiodo, aproximadamente igual a 0.9. De esta manera, observamos que la generada fotocorriente integrada sobre longitudes de onda y depende de la temperatura a través de la potencia radiativa.

3.6 Fuentes de ruido

El ruido es el principal factor degradante de la razón señal a ruido para ser minimizado cuidadosamente en mediciones de bajo nivel de luz. En suma la corriente oscura, reducida a cero voltaje los ruidos considerados para la evaluación de las figuras de mérito radiométricas del sensor son el ruido térmico, el ruido de disparo y el ruido del amplificador.¹⁷ La corriente de ruido térmico en el fotodetector depende de la temperatura del detector y es dada por

$$I_J = \sqrt{\frac{4kT_d \Delta f}{R_F}} \quad [A] \quad (3.4)$$

Aquí I_J es la corriente de ruido térmico en [A], k es la constante de Boltzmann, T_d es la temperatura de operación del detector (300 K); Δf es el ancho de banda electrónico (≈ 20 Hz); y R_F es la resistencia de retroalimentación. La corriente de ruido de disparo está dada por

$$I_{sn} = \sqrt{2qI_p(\lambda, T) I_d(T) \Delta f} \quad [A] \quad (3.5)$$

La generada fotocorriente $I_p(\lambda, T)$ está dada por la ecuación (3.3), $I_d(T)$, en [A], es la fotocorriente oscura del fotodetector. La corriente de ruido total del detector I_T en [A], es obtenida sumando los ruidos

$$I_T = \sqrt{(I_J)^2 + (I_{sn})^2} \quad [A] \quad (3.6)$$

Ahora hemos identificado y evaluado los parámetros importantes del sistema que nos permite determinar las figuras de mérito radiométricas del sensor de temperatura dopado con erbio incorporando la razón de intensidad sobre las bandas espectrales.

3.7 Figuras de mérito radiométricas del sensor de temperatura de fibra dopada con erbio

El análisis radiométrico es uno de los más importantes aspectos a ser considerado para el diseño de sensores de fibra óptica cuando son utilizados en aplicaciones reales. La evaluación de las figuras de mérito radiométricas conduce a la optimización de desempeño del sensor de temperatura.¹⁸ La relación señal a ruido (SNR) es representada separadamente para cada canal, a fin de evaluar su diseño. Esto es particularmente relevante en el caso del método de la razón de intensidad, debido a que un pequeño error en el denominador (un canal) afecta significativamente el resultado. Algún ruido en el detector es eliminado en el proceso de división (lo cual hace a esta técnica sumamente atractiva), sin embargo, el desempeño del detector es altamente dependiente de la longitud de onda. Este análisis involucra al detector usado para la detección de la señal al extremo del sensor.^{19,20} Estas figuras de mérito son relevantes ya que nos permiten deducir los límites de detección del sensor. Desarrollamos la SNR como una función de la longitud de onda separadamente para los canales determinados por la longitud de onda del divisor de haz. La relación señal a ruido $SNR(\lambda, T)$ dada en dB puede ser expresada por la siguiente expresión

$$SNR(\lambda, T) = \frac{I_p(\lambda, T)}{\sqrt{I_T^2 + I_a^2}} \quad [dB] \quad (3.7)$$

Donde $I_p(\lambda, T)$ es la fotocorriente a la salida del fotodetector como función de la longitud de onda de emisión y temperatura en la fibra dopada. El ruido total en el detector I_T es

dado en la ecuación 3.6. La corriente de ruido del amplificador la ha sido dada anteriormente para el detector específico.

La Figura 3.6 muestra la razón señal a ruido en el detector del sensor de temperatura de fibra dopado con erbio como una función de longitud de onda para diferentes picos espectrales de fluorescencia, con la temperatura como parámetro e incluyendo pérdidas de transmisión.

Así mismo, calculamos la razón señal a ruido tomando bandas espectrales de emisión de fluorescencia para comparar su desempeño contra las líneas espectrales propuestas.

La Figura 3.7 muestra la razón de señal a ruido tomando bandas espectrales de emisión e incluyendo las pérdidas de transmisión del sensor de temperatura de fibra dopada con erbio como una función de la longitud de onda, con temperatura como un parámetro.

A 833 K observamos una muy buena razón señal a ruido para este sensor de casi 60 dB para la banda espectral de [520 nm a 530 nm] (transición ${}^2H_{11/2}$) y casi 55 dB para la banda espectral de [540 nm a 550 nm] (transición ${}^4S_{3/2}$). Estos valores pueden ser comparados con los más bajos valores de 41 dB a 525 nm y 27 dB a 545 nm a la misma temperatura, usando líneas espectrales que previamente reportamos.¹²

Esto significa, que la potencia radiativa de la fluorescencia generada, propagándose en dirección opuesta, es estimada para incrementarse desde 21.5 nW a 52.1 nW para 296 K y 833 K de temperatura respectivamente, en la banda espectral [520 nm - 530 nm]. También, en la banda espectral de [540 nm – 550 nm] la potencia de fluorescencia se incrementa

desde 31.9 nW y 11.5 nW para 296 K respectivamente a [540 nm - 550 nm]. El incremento en la razón señal a ruido es debido a la incorporación de los filtros de interferencia con 10 nm de ancho de banda para cada banda espectral. Cuando analizamos líneas espectrales la razón señal a ruido es decrecida debido a una pobre potencia radiativa. Para observar esto, podemos comparar la potencia radiativa desde 2.3 nW a 5.9 nW para 296 K y 833 K de temperatura respectivamente a 525 nm y desde 3.4 nW a 1.1 nW para 296 K y 833 K]de temperatura respectivamente a 545 nm.

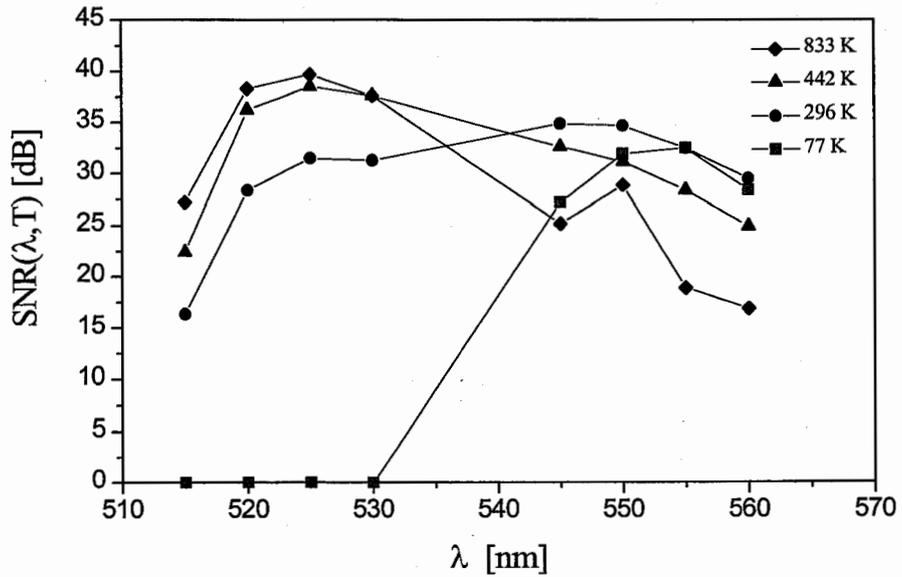


Figura 3.6 Razón señal a ruido en el detector del sensor de temperatura de fibra dopado con erbio como una función de longitud de onda para diferentes líneas espectrales de fluorescencia, con la temperatura como parámetro e incluyendo pérdidas de transmisión.

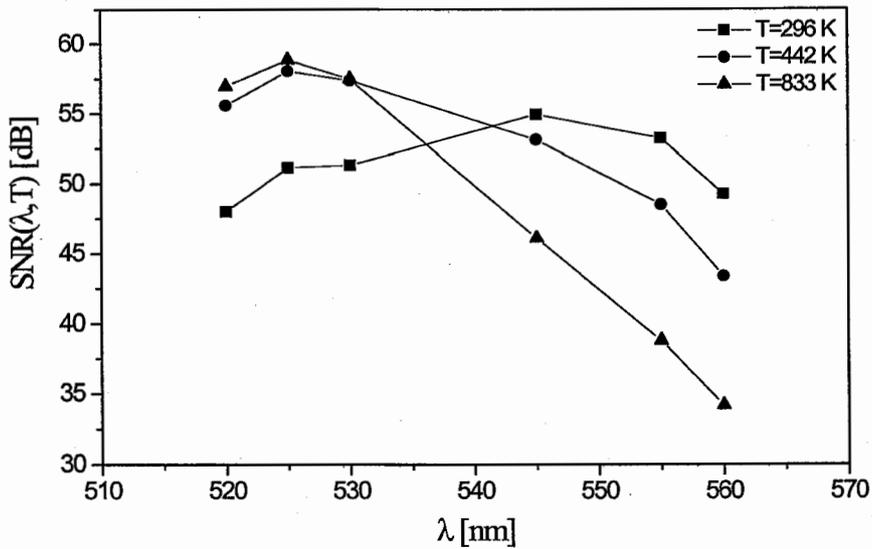


Figura 3.7 Razón señal a ruido en el detector del sensor de temperatura de fibra dopada con erbio como una función de la longitud de onda, con temperatura como un parámetro e incluyendo pérdidas de transmisión, y tomando bandas espectrales de emisión.

Así mismo, calculamos la responsividad espectral del fotodiodo a fin de evaluar su desempeño espectral.

$$\mathfrak{R}(T_d, \lambda) = \frac{I_p(\lambda, T_d)}{P_0(\lambda, T_d)} \quad [A/W] \quad (3.8)$$

La responsividad es definida como la fotocorriente de la señal de salida del detector sobre la potencia óptica incidente bajo el detector como una función de la longitud de onda. Así pues, la responsividad cambiará con la longitud de onda.

La potencia equivalente de ruido NEP es la potencia radiante incidente que produce un voltaje de salida igual al de ruido. Podemos interpretar a la NEP como una indicación de la mínima señal detectable. La NEP como una función de la longitud de onda y temperatura esta dada por

$$NEP(T_d, \lambda) = \frac{I_T}{\mathfrak{R}(T_d, \lambda)} \quad [W] \quad (3.9)$$

Aquí I_T es la corriente de ruido total, [A]; y $\mathfrak{R}(T_d, \lambda)$ es la responsividad espectral, [A/W].

La $\mathfrak{R}(T_d, \lambda)$ depende de varias características del detector, incluyendo la temperatura T_d , su área A_d , y el ancho de banda Δf . Por lo tanto, la NEP también depende de estas características. Muchas fuentes de ruido generan ruido blanco, para lo cual el cuadrado del voltaje de ruido es proporcional al ancho de banda eléctrico Δf . En suma, para un largo

numero de sensores, el cuadrado del voltaje de ruido es proporcional al área del detector A_d . Así pues, la corriente de ruido es proporcional a la raíz cuadrada del producto del producto del ancho de banda y área. Por lo tanto, podemos definir la normalizada NEP* como sigue:

$$NEP^*(T_d, \lambda) = \frac{NEP(T_d, \lambda)}{\sqrt{A_d \Delta f}} \quad [W/cm \text{ Hz}^{1/2}] \quad (3.10)$$

Así pues, la NEP* es independiente del tamaño del detector y del ancho de banda eléctrico. Sin embargo, una larga NEP* refiere aun pobre desempeño del detector. Por esta razón, el recíproco de la NEP* es comúnmente usada ya que esta incorpora una directa relación con el desempeño superior del detector. Esta cantidad es llamada la especifica detectividad estrella y es dada por

$$D^*(T_d, \lambda) = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{NEP(T_d, \lambda)} \quad [cm \text{ Hz}^{1/2} / W] \quad (3.11)$$

Aquí A_d es el área del detector alrededor de 0.3 cm^2 , y Δf es el ancho de banda.

La responsividad para este detector es de aproximadamente 0.4 A/W . Para este sensor la NEP* es de $\sim 10^{-10} [W/cm \text{ Hz}^{1/2}]$ y la detectividad estrella es de $\sim 7 \times 10^9 [cm \text{ Hz}^{1/2} / W]$.

La responsividad espectral de la fibra dopada es considerado para evaluar el optimo intervalo espectral de trabajo del sensor. La responsividad espectral del sensor $\mathfrak{R}(\lambda)$ describe la razón del cambio en la potencia de salida de la fibra dopada ΔP_{out} a un cambio en su temperatura ΔT_{fibra} . Evaluamos la responsividad espectral del sensor para cada canal espectral de trabajo. Esta figura de mérito es dada por

$$\mathfrak{R}(\lambda) = \frac{P_{\text{out}}(\lambda, T_{\text{fibra}})}{T_{\text{fibra}}} \quad [\text{W/K}] \quad (3.12)$$

Aquí, $P_{\text{out}}(\lambda, T_{\text{fibra}})$ es la potencia de fluorescencia a la salida de la fibra dopada. T_{fibra} es la temperatura de la fibra dopada. La Figura 3.8 muestra la responsividad espectral $\mathfrak{R}(\lambda)$ correspondientes a las transiciones dependientes de temperatura, ${}^2\text{H}_{11/2}$ y ${}^4\text{S}_{3/2}$. La responsividad espectral es calculada del espectro de emisión de fluorescencia de la Figura 3.1 del sensor de temperatura de fibra dopada con erbio para cada canal de trabajo como una función de la temperatura. Para cada una de las dos transiciones, evaluamos la responsividad espectral para tres intervalos de longitud de onda con 10-nm de ancho, ligeramente desplazados espectralmente una con respecto a la otra. La responsividad espectral para la banda espectral [520 nm - 530 nm] correspondiente a la transición ${}^2\text{H}_{11/2}$ es de alrededor de 0.18 W nm/K. La responsividad espectral para la banda espectral [540 nm - 550 nm] correspondiente a la transición ${}^4\text{S}_{3/2}$ es alrededor de 0.04 W nm/K. Para estas bandas espectrales la más alta razón señal a ruido es pronosticada. Este sensor muestra más alta responsividad para la transición ${}^2\text{H}_{11/2}$ que para la transición ${}^4\text{S}_{3/2}$. Sin embargo, la responsividad para ${}^4\text{S}_{3/2}$ exhibe una más constante respuesta que la transición ${}^2\text{H}_{11/2}$.

Otra figura de mérito del sensor es la resolución espectral por banda espectral en cada transición. La resolución es el más pequeño cambio de temperatura detectado por cada banda espectral en cada transición espectral del sensor. La resolución es definida como el inverso de la responsividad multiplicada por la potencia equivalente de ruido, NEP (10^{-11} W) y es dada por

$$\Delta T_{\min}(\lambda) = \frac{T_{\text{fibra}} \cdot \text{NEP}(\lambda, T)}{P_{\text{out}}(\lambda, T_{\text{fibra}})} \quad [\text{K}] \quad (3.13)$$

La Figura 3.9 muestra la resolución de temperatura obtenida para este sensor calculada del espectro de emisión de la Figura 3.1 para cada banda espectral en cada transición. La resolución de temperatura para este sensor es más pequeña (mejor) que 1 K para las diferentes bandas espectral en las dos transiciones.

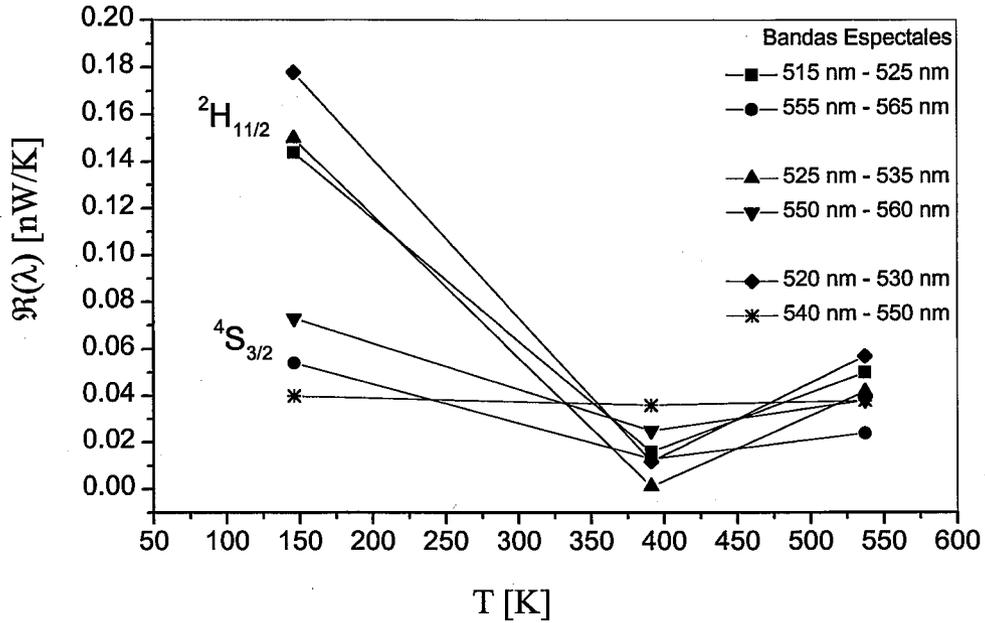


Figura 3.8 Responsividad espectral del sensor evaluada como la razón de cambio en la señal de salida $P_{out}(\lambda, T)$ a un cambio en su entrada T_{fibra} para cada banda espectral del sensor de temperatura.

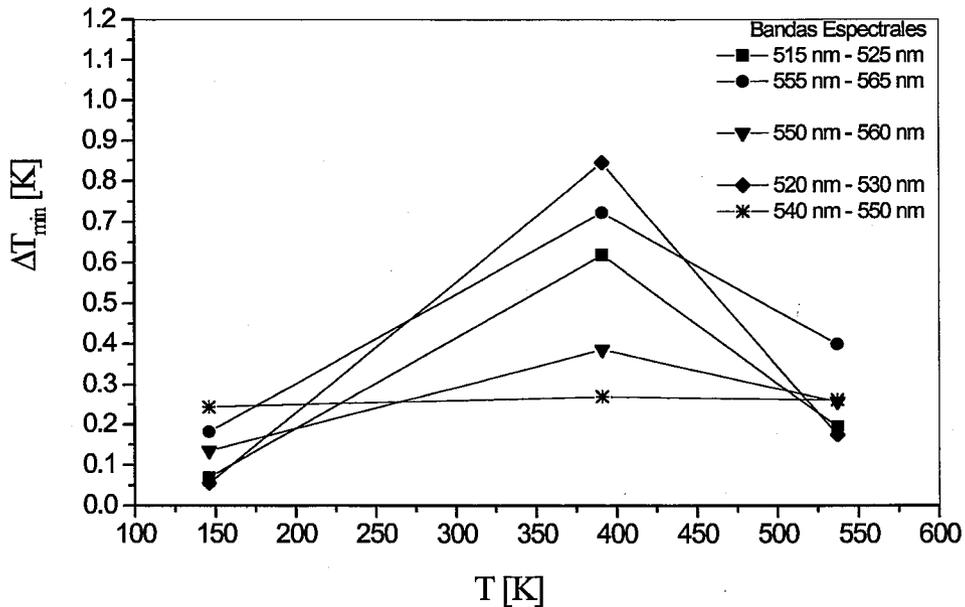


Figura 3.9 Resolución evaluada como el mínimo cambio detectado por cada banda espectral del sensor de temperatura.

3.8 Sensibilidad del sensor de temperatura, basadas en la razón

La sensibilidad del sensor de fibra dopada con erbio puede ser definida de una manera análoga al de los detectores estándar, por ejemplo, como la salida (fotocorriente en el caso del detector empleado aquí) dividido por la potencia radiativa incidente. En el caso de un sensor, incorporando la razón de intensidad (potencia), la salida es la razón de intensidad (potencia) detectada o la razón de la fotocorriente surgida debido a la potencia en cada respectivo canal espectral. La entrada en este caso es la temperatura T en [K].

$$S(\Delta\lambda, T) = \frac{I_{p1}(\Delta\lambda_1, T)}{I_{p2}(\Delta\lambda_2, T) (T - T_{ref})} \quad [K^{-1}] \quad (3.14)$$

Aquí los subíndices 1 y 2 se refieren a los respectivos canales espectrales. Substituyendo la Ecuación 3.3 en Ecuación 3.14 con las respectivas cantidades espectrales tenemos la siguiente expresión

$$S(\Delta\lambda, T) = \frac{\Delta\lambda_1 P_1(\Delta\lambda_1, T) \eta(\lambda_1)}{\Delta\lambda_2 P_2(\Delta\lambda_2, T) \eta(\lambda_2) \Delta T} \quad [K^{-1}] \quad (3.15)$$

Podemos cancelar el intervalo espectral en el numerador y denominador porque tienen el mismo ancho espectral. Además, en esta primera aproximación podemos igualar las eficiencias. Entonces la Ecuación 3.15 se simplifica a la razón de potencia sobre el cambio de temperatura.

$$S(\Delta\lambda, T) = \frac{P_1(\Delta\lambda_1, T)}{P_2(\Delta\lambda_2, T) \Delta T} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (3.16)$$

La Figura 3.10 muestra la sensibilidad espectral del sensor calculada del espectro de fluorescencia de la Figura 3.1 para 3 diferentes temperaturas en la fibra dopada. La sensibilidad del sensor para las bandas espectrales [515 nm – 525 nm] y [555 nm – 565 nm] es de aproximadamente $0.025/\text{K}^{-1}$. Esta sensibilidad decrece a 0.015 K^{-1} y 0.0075 K^{-1} para las otras dos bandas bajo consideración. La sensibilidad de este sensor es independiente de la temperatura para cada una de los tres pares de intervalos de longitud de onda, considerados para el diseño del sensor.

La resolución de temperatura del sensor $\Delta T_{\min}(S)$ es definida como el más pequeño cambio en temperatura detectado por el sensor bajo un cambio en la razón de intensidad (potencia) $\Delta R(I_1/I_2)$ a un cambio de temperatura en la fibra.

Donde esta cantidad es el inverso de la sensibilidad espectral y también es independiente de temperatura. Su valor numérico actual depende del más pequeño cambio en la razón de intensidad, $\Delta R(I_1/I_2)$, que actualmente puede ser medido en un arreglo experimental.

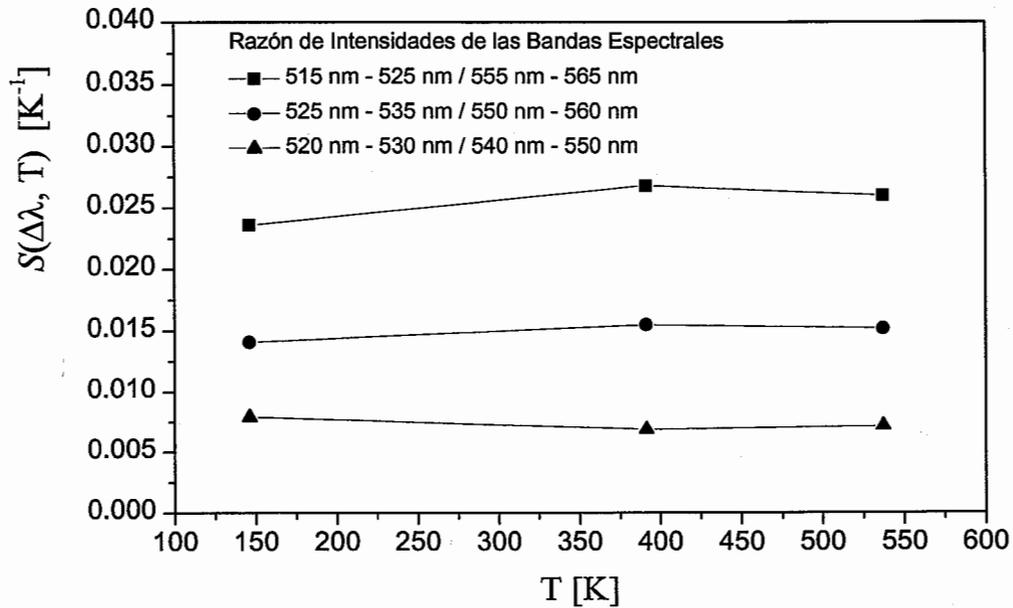


Figura 3.10 Sensibilidad del sensor, evaluada como la razón del incremento en la razón de intensidad $\Delta R(I_1/I_2)$ a un incremento en el incremento de temperatura ΔT_{fibra} como una función de temperatura.

3.9 Conclusiones de capítulo 3

Presentamos un nuevo método completo de analizar y predecir el desempeño de sensores, basado solo en su espectro de fluorescencia medido. Aplicamos este análisis radiométrico para el espectro de fluorescencia de la fibra de silicio dopada con erbio identificando, de esta forma, las mejores bandas para usar para las mediciones de temperatura remotas, que aquellas consideradas en el pasado. Analizamos el desempeño de la fibra de silicio dopada con erbio usando la razón de intensidad de fluorescencia, como un sensor de temperatura en el intervalo desde un cuarto de temperatura hasta alrededor de 833 K.

Conociendo el espectro de fluorescencia medido, aplicamos al sistema las figuras de mérito tales como razón señal a ruido SNR y la responsividad espectral, ambas cantidades adicionalmente dependientes de temperatura, para determinar las mejores bandas de transmisión para emplear en cada canal espectral usado en la técnica de la razón.

Empleando las consideraciones de transferencia de potencia radiométrica para integrar la potencia de la señal sobre 10-nm de intervalo de longitud de onda, obtenemos aproximadamente por un factor de más alta razón señal a ruido. Este proceso adicionalmente evita buscar los picos de emisión cuya posición espectral varía con la temperatura. Para este específico sensor analizado, identificamos los intervalos espectrales más sensibles a cambio de temperatura.

Debido a suma alta razón señal a ruido de casi 60 dB y 55 dB respectivamente las bandas a [520 nm – 530 nm] y [540 nm – 550 nm] exhiben un mejor desempeño que otras líneas espectrales analizadas aquí.

Desarrollamos las expresiones para la sensibilidad y resolución del sensor de temperatura empleando la técnica de la razón de intensidad. Encontramos que la sensibilidad de este sensor es mejor que la de tradicionales sensores de fibra óptica. La sensibilidad del sensor con bandas espectrales [515 nm - 525 nm] y [555 nm –565 nm] es aproximadamente 0.025 K^{-1} , constante sobre el intervalo de temperatura considerado en este estudio. La resolución de temperatura ΔT_{min} es estimada para ser más pequeño (mejor) que 0.1 K, dependiendo de la precisión instrumental de lectura de la razón de (potencia) intensidad.

3.10 Referencias del capítulo 3

1. M. Strojnik, G. Páez, "Radiometry," in *Handbook of Optical Engineering*, D. Malacara, B. Thompson, Eds. Pp649-699, Marcel Dekker , New, York (2001).
2. Snitzer E., W. W. Morey, W. H. Glenn, "Fiber Optic Rare Earth Temperature Sensors," Proc. 1st Int. Conf. Optc. Fiber Sensors, London, pp. 79-82 (1983).
3. H. Berthou, C. K. Jorgensen, "Optical-fiber temperature sensor based on upconversion-excited state fluorescence," *Opt. Lett.*, **15**, 1100-1102 (1990).
4. M. C. Farries, M. E. Fernmann, R.I. Laming, S. B. Poole, D. N. Payne, A. P. Leach, "Distributed temperature sensor using Nd³⁺-doped optical fibre," *Elec. Lett.*, **22**, 418-419 (1986).
5. P. V. dos Santos, M. T. Araujo, and A. S. Gouveia-Neto, J. A. Madeiros Neto, A. S. B. Sombra, "Optical temperature sensing using upconversion fluorescence emission in Er³⁺ / Yb³⁺-codoped chalcogenide glass," *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 578-580 (1998).
6. Zhi-Yi Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, B. T. Meggitt, "Thulium-doped intrinsic fiber optic sensor for high temperature measurements (>1100 °C)," *Rev. Sci. Instrum.*, **69**, 3210-3214 (1998).

7. T. Sun, Z. Y. Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, S. F. Collins, "Temperature dependence of the fluorescence lifetime in Pr^{3+} : ZBLAN glass for fiber optic thermometry," *Rev. Sci. Instrum.*, **68**, 3447-3451 (1997).
8. E. Maurice, S. A. Wade, S. F. Collins, G. Monnom, G. W. Baxter, "Self-referenced point temperature sensor based on a fluorescence intensity ratio in Yb^{3+} -doped silica fiber," *Appl. Opt.*, **36**, No. 31, pp. 8264-8269 (1997).
9. E. Maurice, G. Monnom, D. B. Ostrowsky, G. W. Baxter, "1.2 μm transitions in erbium-doped fibers: the possibility of quasi-distributed temperature sensors," *Appl. Opt.*, **34**, No. 21, pp. 4196-4199 (1995).
10. E. Maurice, G. Monnom, B. Dussardier, A. Saissy, D. B. Ostrowsky, G. W. Baxter, "Erbium-doped silica fibers for intrinsic fiber-optic temperature sensors," *Appl. Opt.*, **34**, 8019-8025 (1995).
11. E. Maurice, G. Monnom, D. B. Ostrowsky, and G. W. Baxter, "High dynamic range temperature point sensor using green fluorescence intensity ratio in erbium-doped silica fiber," *Journal. Light. Tech.*, **13**, No. 7, pp. 1349-1353 (1995).
12. J. Castellon and G. Paez, "Radiometric figures of merit of a fiber optic temperature sensor," Proc. SPIE vol. 3759, p. 410-421, Infrared Spaceborne Remote Sensing VII, Marija Strojnik, Bjorn F. Andresen, Eds. (1999).

13. P. A. Krug, M. G. Sceats, G. R. Atkins, S. C. Guy, S. B. Poole, "Intermediate excited-state absorption in erbium-doped fiber strongly pumped at 980 nm," *Opt. Lett.*, **16**, pp. 1976-1978 (1991).
14. E. Maurice, G. Monnom, B. Dussardier, A. Saissy, D. B. Ostrowsky, G. W. Baxter, "Thermalization effects between upper levels of green fluorescence in Er-doped silica fibers," *Opt. Lett.*, **19**, pp. 990-992 (1994).
15. C. G. Atkins, J. R. Armitage, R. Wyatt, B. J. Ainslie, S. P. Craig-Ryan, "Pump excited state absorption in Er³⁺ doped optical fibres," *Opt. Comm.*, **73**, pp. 217-222 (1989).
16. R. A. Betts, F. F. Kuhl, T. M. Kwok, G. F. Zheng, "Optical amplifiers based on phosphorus co-doped rare-earth-doped optical fibres," *Int. J. Optoelectron.*, **6**, pp. 47-64 (1991).
17. E. L. Dereniak, D. G. Crowe, *Optical Radiation Detectors*, John Wiley & Sons (1984).
18. G. Keiser, *Optical Fiber Communications*, Second Edition, McGraw-Hill, Inc. (1991).
19. G. Paez, M. S. Scholl, "Thermal contrast detected with a thermal detector." *Infr. Phys. & Tech.*, **40** (2), 109-118 (1999).
20. G. Paez, M. S. Scholl, "Thermal contrast detected with a quantum detector." *Infr. Phys. & Tech.*, **40** (4), 261-266 (1999).

CAPITULO 4

Resultados experimentales de un sensor de temperatura de fibra óptica de silica dopado con erbio

4.1 Resumen

Presentamos resultados experimentales demostrando el desempeño de una fibra óptica de silicio dopada con erbio como un sensor de temperatura remoto en el intervalo de [26 C – 60 C] de temperatura. El sensor usa la técnica de la razón de intensidad de fluorescencia con niveles de energía $^2H_{11/2}$ y $^4S_{3/2}$. El desarrollo y construcción del sensor son descritos, el cual requiere un sistema de detección relativamente simple y análisis de datos. Con los datos de fluorescencia medidos y una fibra de enlace, encontramos un mejoramiento en la razón señal a ruido para el sensor de aproximadamente 60 dB. Su responsividad medida es de 0.3 nW/C, su resolución de temperatura medido es mejor que 0.06 C, y la sensibilidad medida es 0.06/C. Finalmente, presentamos resultados experimentales de la comparación del espectro de fluorescencia de dos fibras de silica dopadas con diferente concentración de iones de erbio, sometidas a diferentes temperaturas.

4.2 Introducción

Presentamos resultados experimentales del estudio de factibilidad para emplear la técnica de la razón de intensidad de fluorescencia para medir temperatura. Empleamos el modelo

radiométrico descrito en el Capítulo 3 para evaluar su desempeño y conocer su límites de detección. El sensor de fibra óptica muestra alta sensibilidad para medir cambios de temperatura en el intervalo de [26 C – 60 C]. El sensor requiere solo modestos niveles de potencia para excitar la emisión de fluorescencia en la fibra, ofrecida por un láser disponible comercialmente de semiconductor. El sistema de detección es confiable, sensible y económico, permitiendo la fácil interpretación de la señal al extremo de la fibra.

Evaluamos el desempeño de este sensor para diferentes bandas espectrales de fluorescencia en el intervalo espectral [515 nm – 570 nm] como una función de la temperatura. En el sistema de detección incorporamos un par de fotodetectores de silicio, cada uno con su propio filtro de interferencia sintonizado con una angosta banda de transmisión de 10 nm. Los datos medidos demuestran un mejor desempeño en comparación con aquellos reportados previamente.

4.3 Principio de operación del sensor: Experimento y Resultados

Fibras de silicio de baja pérdida dopadas con tierras raras muestran potenciales características para aplicaciones de medición de temperatura. Esto debido a que su espectro de fluorescencia es dependiente de la temperatura.¹⁻¹² Este comportamiento ocurre debido a la dependencia de temperatura de los homogéneos ensanchamientos del ancho de línea de emisión y a la cambiante población de los niveles de energía. Cuando una fibra dopada con erbio es bombeada con fotones de 2.484×10^{-19} J de energía correspondiente a la longitud de onda de 800 nm, el nivel del erbio $^4I_{9/2}$ es excitado y el nivel metaestable $^4I_{13/2}$ es cuasi-

instantáneamente poblado debido a las transiciones no radiativas. El nivel $^4I_{13/2}$ absorbe fotones de bombeo resultando en la excitación de los niveles $^2H_{11/2}$ y $^4S_{3/2}$, responsables de la emisión en alrededor de 520 nm. Estos niveles se consideran estar en cuasi termal equilibrio debido a la pequeña energía de hueco entre ellos (alrededor de 1.59×10^{-20} J) en comparación con la larga diferencia de energía entre ellos y el próximo nivel más bajo (alrededor 5.9636×10^{-20} J). La fluorescencia de fibras dopadas con tierras raras, bombeando a 800 nm de longitud de onda, así como los procesos de absorción de estado excitado y conversión hacia arriba han sido previamente explicada en el Capítulo 1.

La Figura 4.1 muestra el arreglo experimental para estudiar el comportamiento del espectro de fluorescencia del sensor de fibra óptica dopada con erbio para mediciones de remotas de temperatura. El espectro de fluorescencia es usado para evaluar las figuras de mérito radiométricas del sensor y conocer su desempeño. El haz láser radiando a 785 nm (láser semiconductor disponible comercialmente) incide a través de un espejo dicróico, el cual transmite la radiación de bombeo y refleja la emisión de fluorescencia de la fibra dopada. El haz de bombeo se acopla a una fibra estándar de comunicaciones (monomodal a 1.55 μm) conectada al elemento sensible de fibra. La fibra dopada con erbio se coloca dentro de un termocalentador cuya temperatura, T, es monitoreada con un termopar tipo-k. El cual, está conectado a un multímetro de alta resolución con un adaptador de temperatura modelo TP-30B. La fibra de comunicaciones tiene una longitud máxima recomendada de unos pocos cientos de metros para transportar la señal de fluorescencia de baja potencia, $P_f(\lambda, T)$. Esta longitud se considera suficiente para transportar la radiación desde el medioambiente en condiciones ambientales potencialmente inhóspitas, al centro de

monitoreo para la detección y procesamiento de la señal de fluorescencia que lleva la información de temperatura.

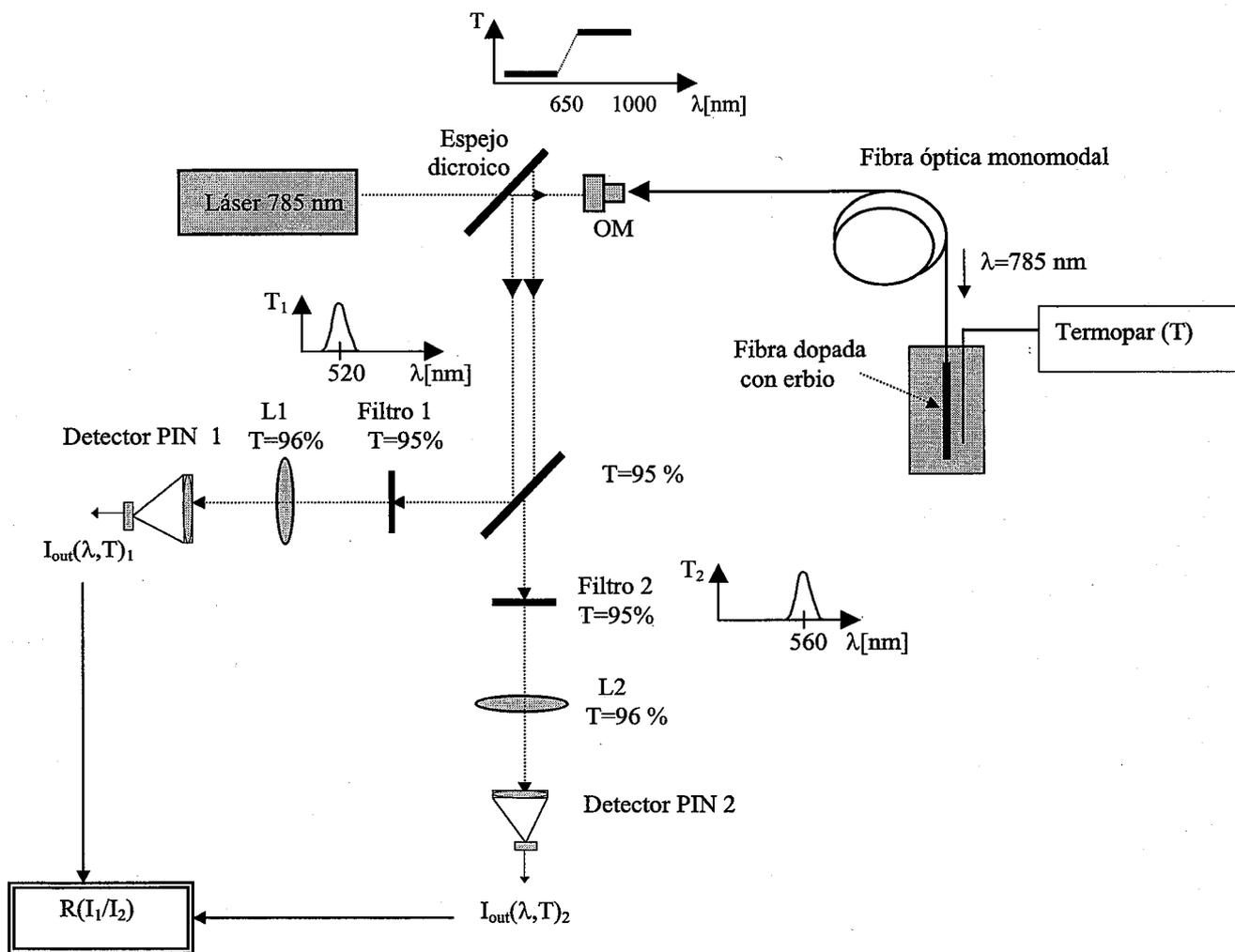


Figura 4.1 Principio de operación del sensor de fibra óptica dopada con erbio para mediciones remotas de temperatura, empleando la razón de emisión de fluorescencia en el intervalo de longitud de onda [515 nm - 570 nm].

El corazón del sensor tiene una longitud de 20 cm, con una concentración nominal de iones de erbio de 960 ppm (núcleo: silicio/germanio, recubrimiento: silicio). La fibra comercialmente disponible tiene un diámetro núcleo/recubrimiento de 3.2 μm /125 μm , con una apertura numérica de 0.22. La potencia radiativa de la fluorescencia es medida en nuestro laboratorio para ser mayor a 10 nW a 60 C con 60-mW de potencia de bombeo. Usamos filtro de interferencia con 10 nm de ancho espectral de transmisión centrado en el pico de transición. La energía contenida en las bandas espectrales conduce a una mayor razón señal a ruido debida a los filtros de ancho espectral angosto. El espectro de fluorescencia en la longitud de onda del verde es medido con un espectrometro (Ocean Optics con 1 nm de resolución) después de sustraer el ruido de fondo.

La figura 4.2 muestra una foto del arreglo experimental que se utilizó para evaluar el funcionamiento sensor de temperatura de fibra óptica dopada con erbio en el laboratorio de Ingeniería Optica del CIO.

La Figura 4.3 muestra el espectro de emisión de fluorescencia normalizado medido de la fibra de silicio dopada con erbio como una función de la longitud de onda [515 nm – 570 nm] para diferentes temperaturas. La dependencia de temperatura del nivel de emisión $^2\text{H}_{11/2}$ es claramente observado para incrementarse casi linealmente con la temperatura en el intervalo [26 C – 60 C]. El nivel $^4\text{S}_{3/2}$ es prácticamente independiente de temperatura en el mismo rango de temperatura.



Figura 4.2 Foto del arreglo experimental para estudiar el comportamiento del sensor de temperatura de fibra óptica dopada con erbio.

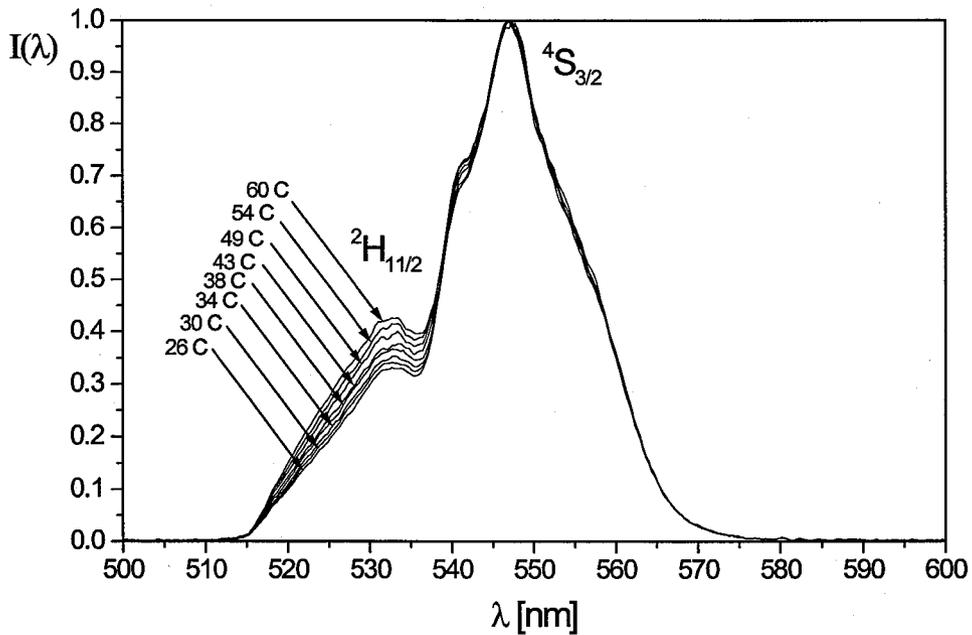


Figura 4.3 El espectro de emisión de fluorescencia normalizado medido de la fibra de silica dopada con erbio como una función de longitud de onda es mostrada para un intervalo de valores de temperatura [26 C – 60].

La Figura 4.4 muestra el espectro de fluorescencia normalizado al pico máximo de emisión como una función de longitud de onda para las transiciones, ${}^2H_{11/2}$ y ${}^4S_{3/2}$. Además, muestra las zonas espectrales con mayor sensibilidad a la temperatura. Posteriormente, analizaremos radiométricamente su desempeño para determinar las bandas espectrales más sensibles para emplearse en el sensor de temperatura. El espectro es desplegado como la razón de la potencia espectral de fluorescencia con un incremento de temperatura, $P_{out}(\lambda, T + \Delta T)$, a la potencia espectral de fluorescencia en la temperatura de referencia de 26 C, $P_{out}(\lambda, T)$. Las bandas espectrales con mayor sensibilidad a cambios de temperatura son [515 nm – 525 nm], [520 nm – 530 nm], y [525 nm – 535 nm], correspondiendo a la transición del erbio ${}^2H_{11/2}$. La razón del espectro de fluorescencia ilustra que la transición ${}^2H_{11/2}$ es mucho más sensible a la temperatura que la transición ${}^4S_{3/2}$. Adicionalmente, su dependencia es observada para ser casi lineal.

Por lo tanto, de la Ecuación 3.3, calculamos la razón de las intensidades medidas $R(I_1/I_2)$, de las transiciones ${}^2H_{11/2}$ y ${}^4S_{3/2}$ para las diferentes bandas espectrales de fluorescencia.

La Figura 4.5 muestra la razón de las intensidades integradas sobre bandas espectrales como una función de la temperatura. La razón varía casi linealmente con la temperatura en el intervalo [26 C – 60 C], con pendientes ligeramente diferentes y con incremento casi linealmente en la intersección-y. Cuando usamos filtros para aislar las bandas espectrales, obtenemos un incremento en la intensidad de la señal de salida. Además, la razón señal a ruido del sensor es incrementada. La razón para las bandas espectrales [525 nm – 535 nm] & [555 nm – 565 nm] muestra una alta razón de intensidad y ligeramente una mejor pendiente que otras. Del mismo modo, la razón de bandas espectrales [520 nm – 530 nm] & [555 nm – 565 nm] muestra alto desempeño.

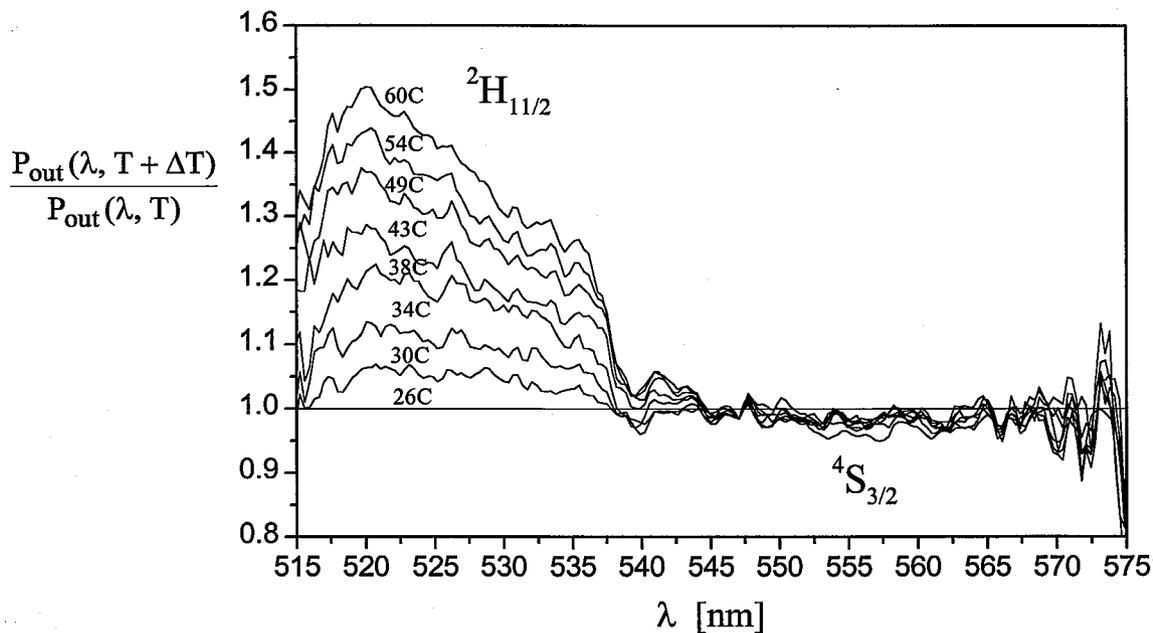


Figura 4.4 La dependencia de temperatura de las transiciones ${}^2H_{11/2}$ y ${}^4S_{3/2}$, definida como la razón de la señal espectral $P_{out}(\lambda, T + \Delta T)$ sobre la señal espectral en la temperatura de referencia, 26 C, $P_{out}(\lambda, T)$, como una función de la longitud de onda.

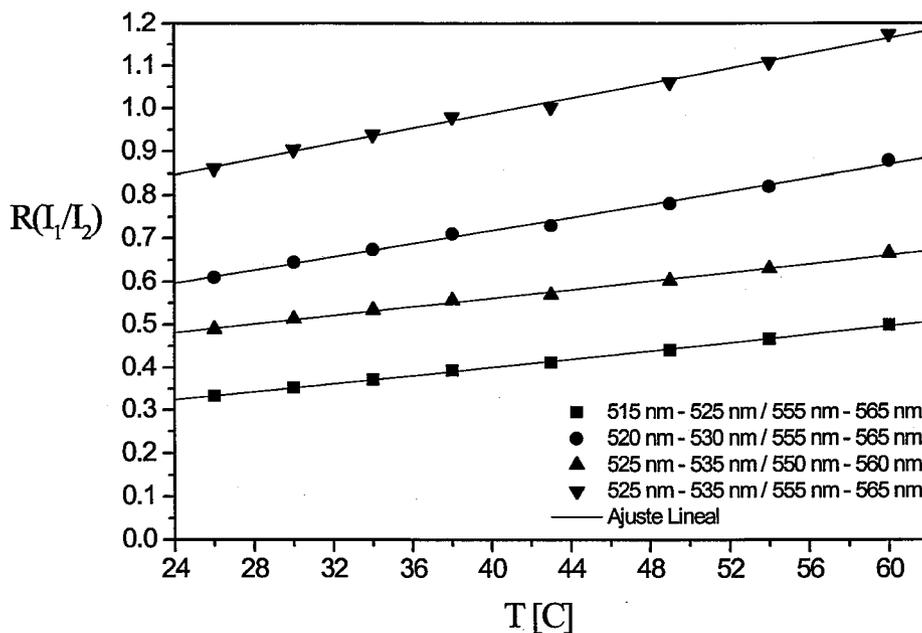


Figura 4.5 La razón de las intensidades integradas sobre bandas espectrales como una función de la temperatura.

4.4 Evaluación del desempeño del sensor: Análisis radiométrico

Para analizar radiométricamente los resultados experimentales obtenidos de este sensor, consideramos el sistema de detección propuesto y descrito en el Capítulo 3. También, aplicamos el modelo radiométrico descrito en el Capítulo 3 para evaluar el desempeño de este sensor y deducir sus límites de detección.

Por lo tanto, evaluamos las figuras de mérito radiométricas como la razón señal a ruido SNR, sensibilidad $S(R)$, responsividad espectral $R(\lambda)$ y resolución ΔT_{\min} .

La Figura 4.6 muestra la razón de señal a ruido tomando bandas espectrales de emisión e incluyendo las pérdidas de transmisión del sensor de temperatura de fibra dopada con erbio como una función de la longitud de onda, con temperatura como un parámetro. La gráfica muestra que la razón señal a ruido es casi constante sobre el intervalo [26 C – 60 C] de temperatura. También, la razón señal a ruido más alta para este sensor es mayor que 60 dB para la banda espectral [550 nm - 560 nm]. El segundo mejor valor de alrededor de 56 dB es obtenido para las bandas espectrales de [525 nm - 535 nm], y [555 nm - 565 nm].

Como explicamos en el Capítulo 3, cuando consideramos la radiación de fluorescencia integrada en las bandas espectrales en vez de un pico angosto, la razón señal a ruido es incrementada. Para este sensor la potencia de fluorescencia medida es de 10 nW en el pico máximo de transición y se incrementa a 90 nW cuando la señal es integrada sobre la banda.

Calculamos otras figuras de mérito como la potencia equivalente de ruido estrella, NEP^* y la detectividad estrella D^* para el detector del sensor de temperatura de fibra dopada con erbio como un a función de longitud de onda [515 nm – 570 nm], usando el espectro de fluorescencia medido. Para este sensor, la NEP^* es aproximadamente 1.5×10^{-10} W/cm $Hz^{1/2}$. También, la detectividad estrella D^* para este sensor es de 7×10^9 cm $Hz^{1/2}$ /W.

Una figura de mérito importante es la responsividad espectral $\mathfrak{R}(\lambda)$ del sensor. La responsividad espectral se define como la razón de cambio en la potencia espectral de salida de la fibra dopada $P_{out}(\lambda, T_{fibra})$ a un cambio en su temperatura T_{fibra} . Evaluamos la responsividad espectral del sensor para cada canal espectral de trabajo de la Ec. 3.12 dada en el Capítulo 3.

La Figura 4.7 muestra la responsividad espectral $\mathfrak{R}(\lambda)$ del espectro de fluorescencia medido, mostrado en la Figura 4.2, para las bandas espectrales correspondiente a la transición ${}^2H_{11/2}$ como una función de temperatura. La responsividad para las bandas espectrales de [520 nm - 530 nm] y [525 nm – 535 nm] que corresponden a la transición ${}^2H_{11/2}$ es aproximadamente de 0.3 nW/C. Del mismo modo, la razón señal a ruido es también la mas alta para estas bandas espectrales. Este sensor adicionalmente muestra más alta responsividad para la transición del nivel ${}^2H_{11/2}$ que para el nivel de transición ${}^4S_{3/2}$.

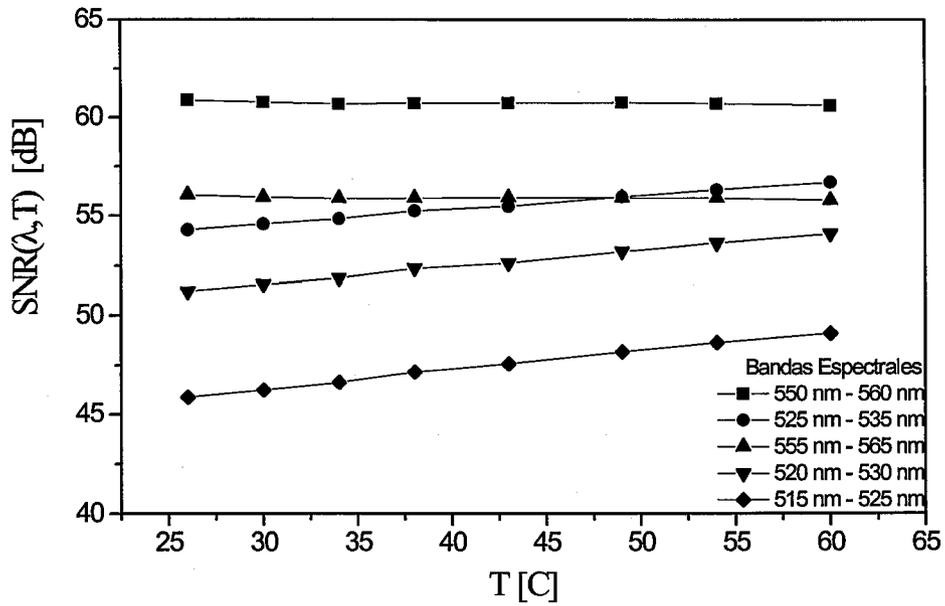


Figura 4.6 Razón señal a ruido sobre bandas espectrales de emisión del sensor de temperatura de fibra óptica dopada con erbio, para diferentes bandas de longitud de onda.

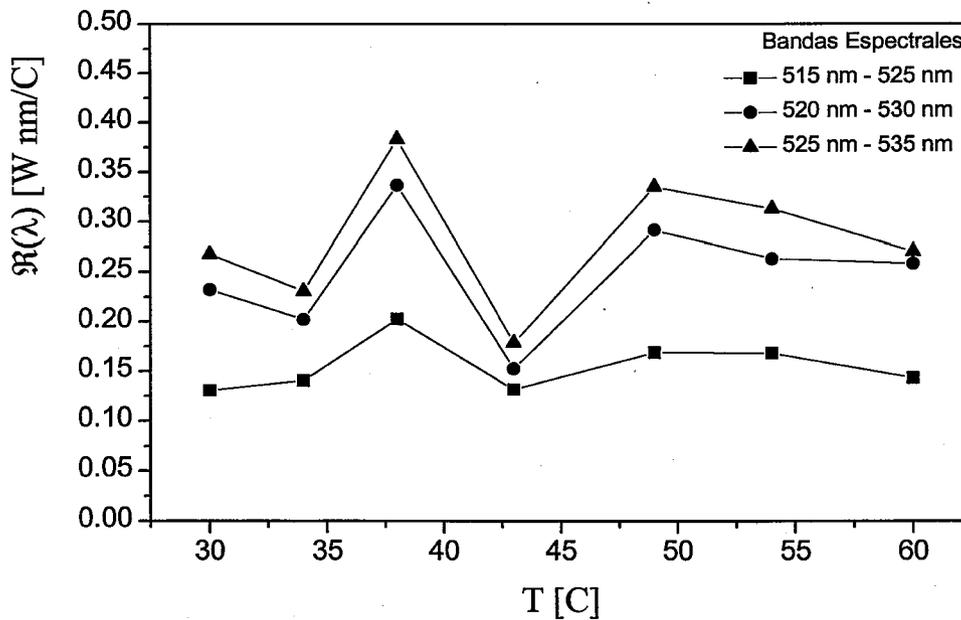


Figura 4.7 La responsividad espectral $\mathcal{R}(\lambda)$ del sensor para las bandas espectrales más sensibles a la temperatura.

La Figura 4.8 muestra la potencia de fluorescencia, P_{out} , de las bandas espectrales más sensibles a la temperatura. La potencia de fluorescencia se incrementa de 11.8 nW a 40.1 nW para las bandas espectrales [515 nm – 525 nm], [520 nm – 530 nm], y [525 nm – 535 nm] en un intervalo de [26 C a 60 C] de temperatura. El incremento de potencia es 28.3 nW sobre un rango dinámico de 34 C de temperatura.

La Figura 4.9 muestra una foto del arreglo experimental utilizado para medir la potencia de fluorescencia en intervalo espectral [515 nm – 570 nm] para la fibra de silicio dopada con erbio.

Como lo explicamos en el Capítulo 3, la sensibilidad del sensor de fibra dopada con erbio puede ser definida de una manera análoga al de los detectores estándar, por ejemplo, como la salida (fotocorriente en el caso del detector empleado aquí) dividido por la potencia radiativa incidente. En el caso de un sensor, incorporando la razón de intensidad (potencia), la salida es la razón de intensidad (potencia) detectada o la razón de la fotocorriente surgida debido a la potencia en cada respectivo canal espectral. La entrada en este caso es la temperatura T en [K].

La Figura 4.10 muestra la sensibilidad del sensor, calculada del espectro de fluorescencia de la Figura 4.3 para el intervalo de [26 C – 60 C] de temperatura. La sensibilidad del sensor para la razón de bandas espectrales espectral [520 nm – 530 nm] & [555 nm – 565 nm], y [525 nm – 535 nm] & [555 nm – 565 nm] es de aproximadamente 0.06/C. La sensibilidad decrece a 0.03/C para la razón de bandas espectrales [515 nm – 525 nm] & [555 nm – 565 nm], y [525 nm – 535 nm] & [550 nm – 560 nm]. También, la Figura 4.10

muestra que la sensibilidad del sensor es incrementada casi linealmente a un incremento de temperatura.

Otra figura de mérito del sensor es la resolución de las bandas espectrales más sensibles a la temperatura. La resolución es el más pequeño cambio de temperatura detectado por las bandas espectrales. La resolución es definida como el inverso de la responsividad espectral del sensor multiplicada por la potencia equivalente de ruido, NEP (1×10^{-11} W) y esta dada por la Ec. 3.13 del Capítulo 3.

La Figura 4.11 muestra la resolución de temperatura obtenida para este sensor calculada del espectro de fluorescencia de la figura 4.3 para las bandas espectrales más sensibles a cambios de temperatura. La resolución de temperatura es más pequeña (mejor) que 0.06 C para las bandas espectrales [520 nm – 530 nm], y [525 nm – 535 nm] más sensibles a cambios de temperatura.

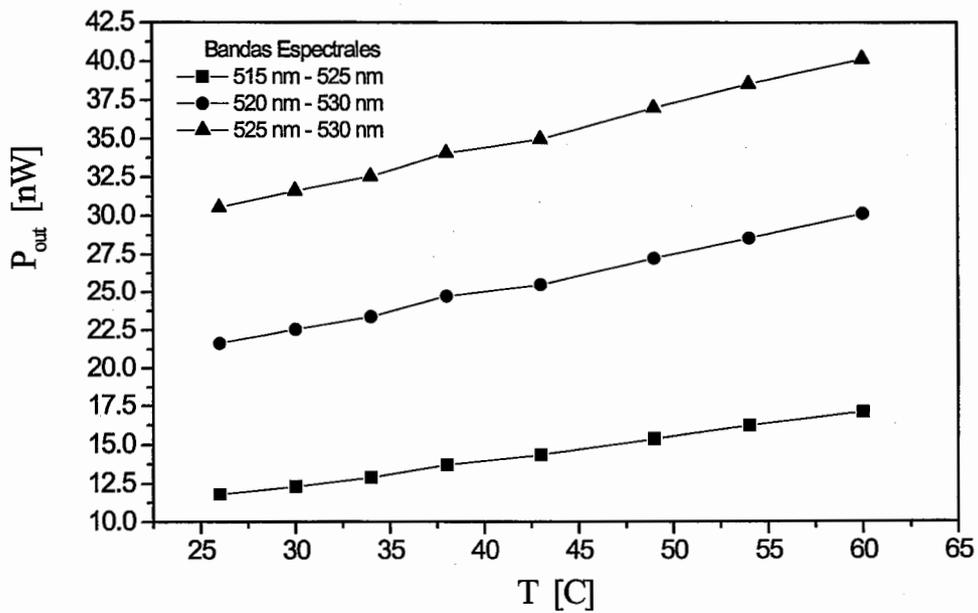


Figura 4.8 Potencia de salida de la fluorescencia P_{out} a un incremento en su temperatura de entrada ΔT_{fibra} para cada banda espectral del sensor de temperatura.

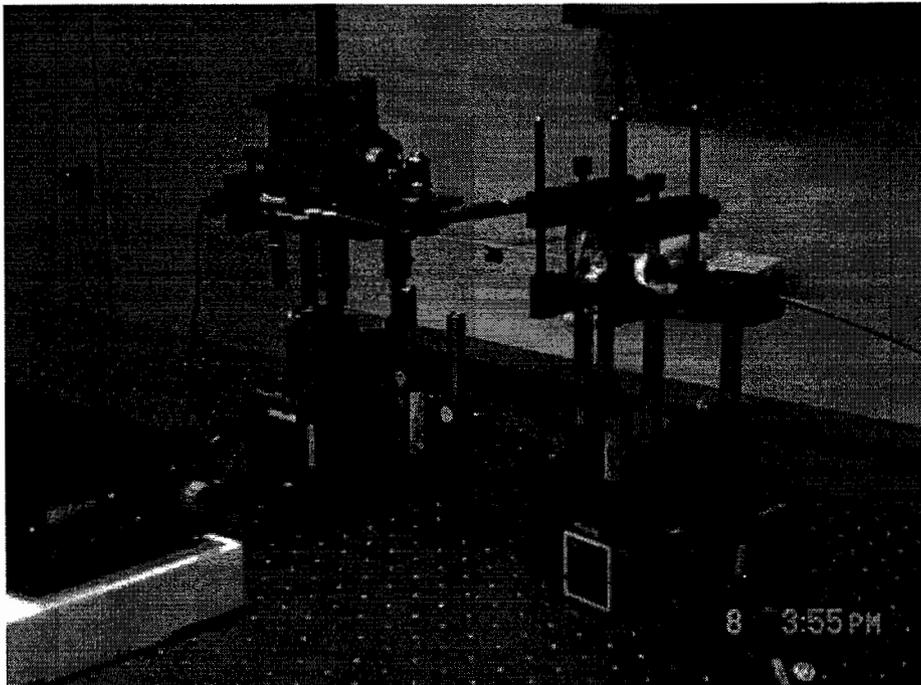


Figura 4.9 Foto del arreglo experimental para medir la emisión de fluorescencia en el intervalo espectral [515 nm – 570 nm] para la fibra de silicio dopada con erbio.

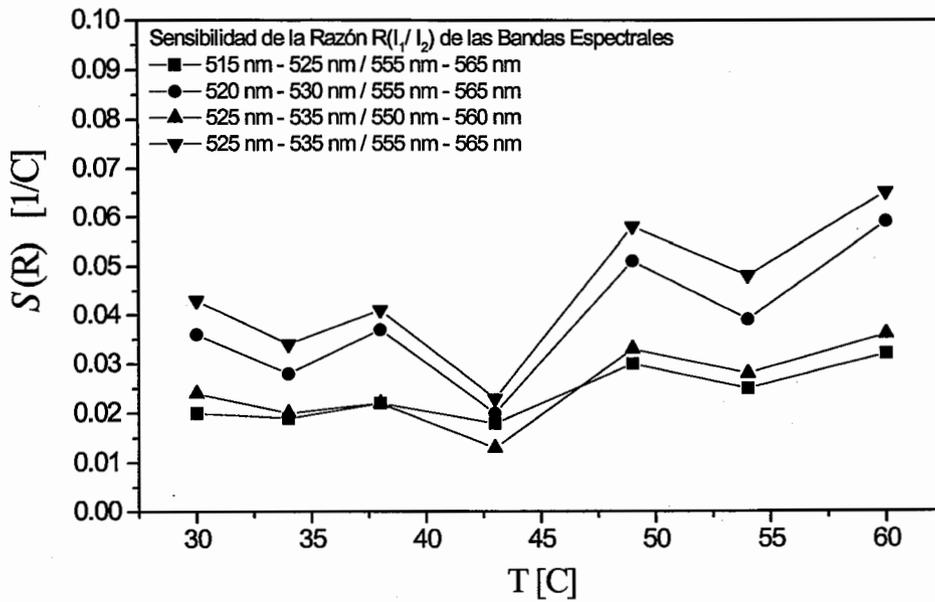


Figura 4.10 Sensibilidad del sensor, evaluada como la razón del incremento en la razón de intensidad $\Delta R(I_1/I_2)$ al incremento en un incremento de temperatura ΔT_{fibra} como una función de la temperatura.

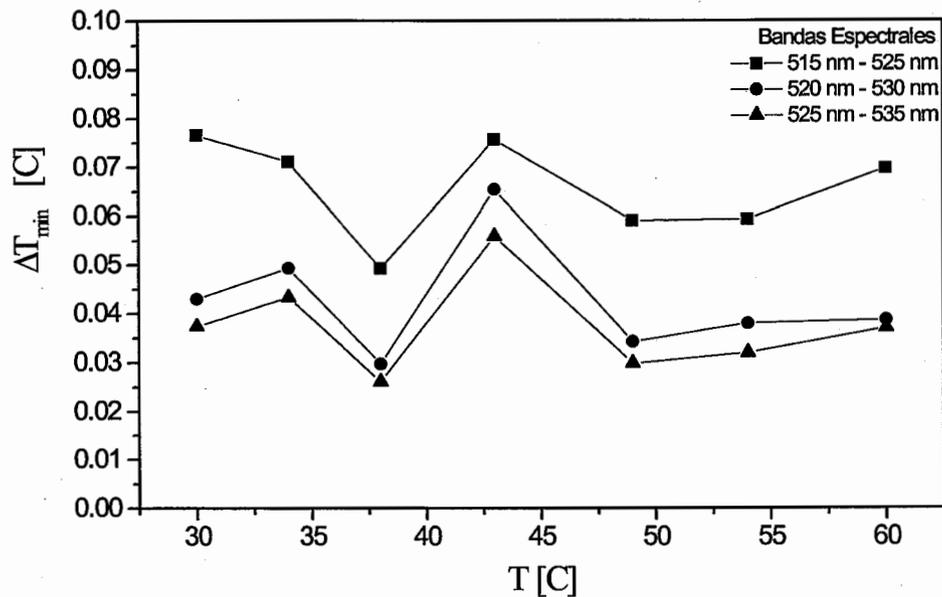


Figura 4.11 Resolución de temperatura ΔT_{min} como una función de temperatura para varias bandas espectrales.

4.5 Espectro de fluorescencia de fibras de silicio con diferente concentración de erbio: Experimento y Resultados

Finalmente, comparamos los espectros de fluorescencia de dos fibras dopadas con diferente concentración de iones de erbio. La Figura 4.12 muestra el espectro de fluorescencia de una fibra de silicio con 20 cm de longitud, dopada con 960 ppm de iones de erbio a 64 C, 92 C y 133 C de temperatura. El espectro muestra un mayor incremento en la transición $^2S_{3/2}$ a temperaturas mayores a 60 C de temperatura.

La figura 4.13 muestra el espectro de fluorescencia de una fibra de silicio con 20 cm de longitud, dopada con 460 ppm de iones de erbio a 60 C, 88 C y 133 C de temperatura. También, el espectro de fluorescencia muestra un cambio en la transición $^2S_{3/2}$ a temperaturas mayores a 60 C. Sin embargo, la intensidad de fluorescencia medida de esta fibra es menor que la fibra dopada con 960 ppm de erbio. Por lo tanto, esto disminuye la razón señal a ruido en el detector y afecta el desempeño del sensor de fibra de silicio dopado con erbio.

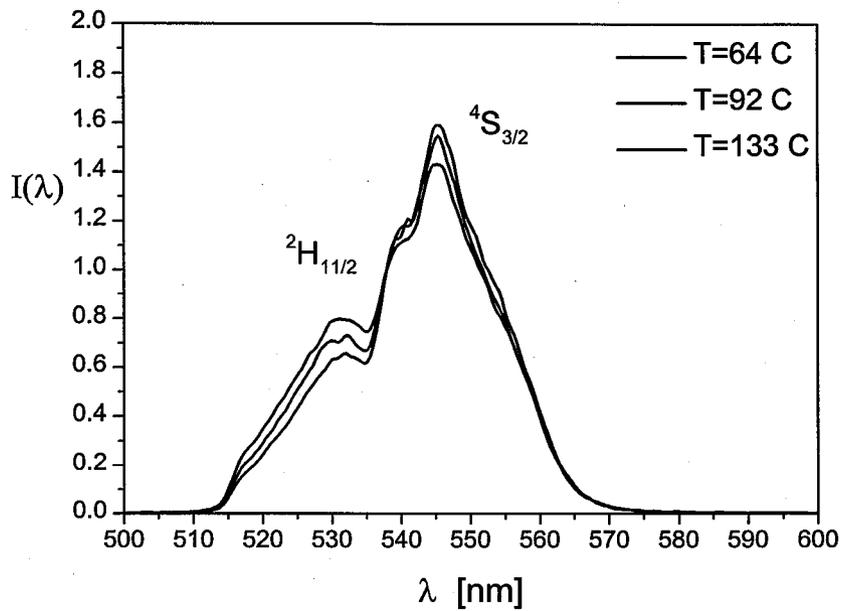


Figura 4.12 Espectro de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con 960 ppm de erbio, sometida a 3 diferentes temperaturas.

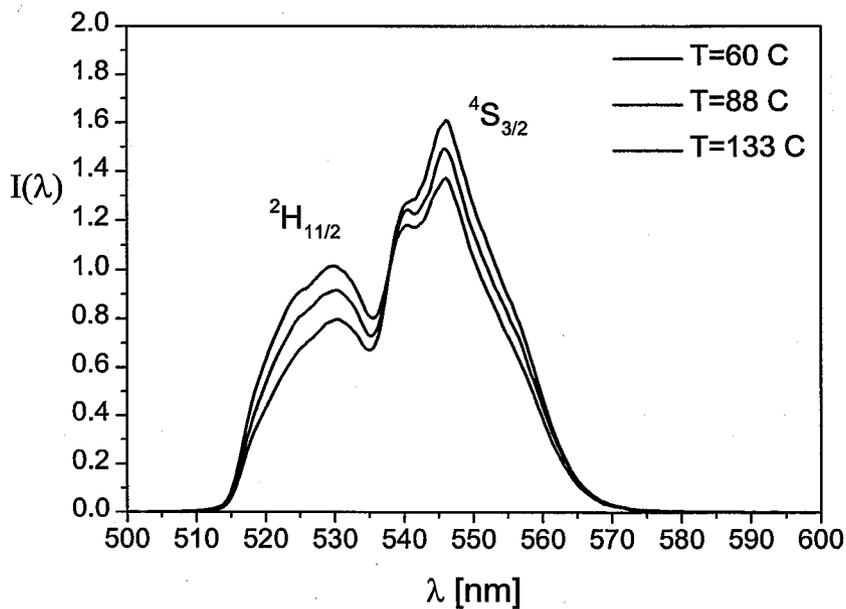


Figura 4.13 Espectro de fluorescencia de una fibra de silicio dopada con 460 ppm de erbio, sometida a 3 diferentes temperaturas.

4.6 Conclusiones

Presentamos resultados experimentales demostrando el desempeño de la fibra óptica de silicio dopada con erbio como un sensor de temperatura remoto usando la técnica de razón de intensidad de fluorescencia. Evaluamos su desempeño con las figuras de mérito radiométricas tales como la razón señal a ruido SNR, sensibilidad S, responsividad R, resolución ΔT_{\min} , y potencia equivalente de ruido NEP. Este nuevo modelo radiométrico es una poderosa herramienta para evaluar el desempeño de cualquier sensor de temperatura de fibra óptica desde su espectro de fluorescencia medido. Las bandas espectrales [520 nm – 530 nm], y [525 nm – 535 nm] correspondiendo a la transición del erbio ${}^2H_{11/2}$ son altamente sensibles a cambios de temperatura en el intervalo [26 C – 60 C]. La responsividad es de 0.3 nW/C y su resolución de temperatura es mejor que 0.06 C. La sensibilidad del sensor es aproximadamente 0.06/C. Esta sensibilidad medida es la mas alta reportada para sensores que usan la técnica de la razón de intensidad de fluorescencia. Finalmente, comparamos los espectros de fluorescencia medidos de dos fibras con diferentes concentraciones de erbio, sometidas desde 60 C a 133 C de temperatura. La baja concentración de iones de erbio en la fibra disminuye la relación señal a ruido del detector y afecta el desempeño del sensor de temperatura.

4.7 Referencias del capítulo 4

1. Zhi-Yi Zhang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, and B. T. Meggitt, "Thulium-doped intrinsic fiber optic sensor for high temperature measurements (>1100 °C)," *Rev. Sci. Instrum.*, **69**, 3210-3214 (1998).
2. T. Sun, Z. Y. Zhang, K. T. V. Grattan, and A. W. Palmer, "Ytterbium-based fluorescence decay time fiber optic temperature sensor systems," *Rev. Sci. Instrum.*, **69**, 4179-4185 (1998).
3. T. Sun, Z. Y. Zhang, K. T. V. Grattan, and A. W. Palmer, S. F. Collins, "Temperature dependence of the fluorescence lifetime in Pr^{3+} : ZBLAN glass for fiber optic thermometry," *Rev. Sci. Instrum.*, **68**, 3447-3451 (1997).
4. J. Castellon and G. Paez, "Radiometric figures of merit of a fiber optic temperature sensor," Proc. SPIE vol. 3759, p. 410-421, Infrared Spaceborne Remote Sensing VII, Marija Strojnik, Bjorn F. Andresen, Eds. (1999).
5. Snitzer E., W. W. Morey, W. H. Glenn, "Fiber Optic Rare Earth Temperature Sensors," Proc. 1st Int. Conf. Optc. Fib Sensors, London, pp. 79-82 (1983).
6. H. Berthou and C. K. Jorgensen, "Optical-fiber temperature sensor based on upconversion-excited state fluorescence," *Opt. Lett.*, **15**, 1100-1102 (1990).
7. M. C. Farries, M.E. Fernmann, R.I. Laming, S.B. Poole, D. N. Payne, and A. P. Leach, "Distributed temperature sensor using Nd^{3+} -doped optical fibre," *Elec. Lett.*, **22**, 418-419 (1986).
8. P. V. Dos Santos, M. T. Araujo, A. S. Gouveia-Neto, J. A. Madeiros Neto, A. S. B. Sombra, "Optical temperature sensing using upconversion fluorescence emission in $\text{Er}^{3+} / \text{Yb}^{3+}$ -codoped chalcogenide glass," *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 578-580 (1998).

9. E. Maurice, S. A. Wade, S. F. Collins, G. Monnom, and G. W. Baxter, "Self-referenced point temperature sensor based on a fluorescence intensity ratio in Yb^{3+} -doped silica fiber," *Appl. Opt.*, **36**, No. 31, pp. 8264-8269 (1997).
10. E. Maurice, G. Monnom, D. B. Ostrowsky, and G. W. Baxter, "1.2- μm transitions in erbium-doped fibers: the possibility of quasi-distributed temperature sensors," *Appl. Opt.*, **34**, No. 21, pp. 4196-4199 (1995).
11. E. Maurice, G. Monnom, B. Dussardier, A. Saissy, D. B. Ostrowsky, and G. W. Baxter, "Erbium doped silica fibers for intrinsic fiber optic temperature sensors," *Appl. Opt.*, **34**, 8019-8025 (1995).
12. E. Maurice, G. Monnom, D. B. Ostrowsky, and G. W. Baxter, "High dynamic interval temperature point sensor using green fluorescence intensity ratio in erbium-doped silica fiber," *Journal Light. Tech.*, **13**, No. 7, pp. 1349-1353 (1995).

5 Conclusiones generales

Estudiamos el comportamiento de fibras ópticas dopadas con tierras raras como elemento sensor de temperatura mostrando sus ventajas sobre sistemas de fibras óptica y tradicionales de medición de temperatura. Identificamos la problemática existente en este tipo sensores para evaluar y comparar su desempeño.

Presentamos un nuevo método completo de analizar y predecir el desempeño de sensores, basado solo en su espectro de fluorescencia medido. Aplicamos este análisis radiométrico para el espectro de fluorescencia de la fibra de silicio dopada con erbio identificando, de esta forma, las mejores bandas para usar para las mediciones de temperatura remotas, que aquellas consideradas en el pasado.

Presentamos resultados experimentales demostrando el desempeño de una fibra óptica de silicio dopada con erbio como un sensor de temperatura remoto en el intervalo de temperatura [26 C – 60 C]. Aplicamos el novedoso método radiométrico que proponemos para evaluar el desempeño de sensores de fibra óptica dopados con tierras raras a este sensor. El sensor usa la técnica de la razón de intensidad de fluorescencia con niveles de energía $^2H_{11/2}$ y $^4S_{3/2}$. El desarrollo y construcción del sensor fueron descritos, el cual requiere un sistema de detección relativamente simple y análisis de datos. Con los datos de fluorescencia medidos y una fibra de enlace, encontramos un mejoramiento en la razón señal a ruido para el sensor de aproximadamente 60dB. Su responsividad medida es de 0.3

nW/C, su resolución de temperatura medido es mejor que 0.06 C, y la sensibilidad es de 0.06/C.

Finalmente, investigamos el desempeño del espectro de fluorescencia de fibras de silicio dopadas con diferente concentración de iones de erbio, sometidas a cambios de temperatura. Una mayor concentración de iones de erbio en fibras de silicio genera una mayor fluorescencia. Para aplicaciones de medición de temperatura, empleando fibras de silicio, la razón señal a ruido en el detector será mayor, por lo tanto, un eficiente desempeño se alcanzará.