

Efecto del aluminio-neodimio en la sensibilidad de los sensores de temperatura a base de fibras ópticas de Al-Nd:SiO₂

A. Martínez, E. De la Rosa-Cruz y F. Mendoza-Santoyo
Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
Apartado postal 1-948, 37150 León, Gto., Mexico
e-mail: amartine@andromeda.cio.mx

Recibido el 9 de julio de 1998; aceptado el 3 de febrero de 1999

Se reportan resultados experimentales de los cambios del tiempo de decaimiento de la fluorescencia en función de la temperatura, para muestras con distintas concentraciones de neodimio (Nd³⁺) y de aluminio (Al). Se demuestra experimentalmente que la mayor sensibilidad a los cambios de temperatura se obtiene maximizando la concentración de Nd y minimizando la concentración de Al.

Keywords: Fibras ópticas; sensores de fibra óptica; fibras activas

Experimental results on the variation of fluorescence decay time when the temperature change for different Nd and Al concentration are reported. It is experimentally shown that increasing the Nd and reducing the Al concentration increases the sensitivity at the temperature change.

Descriptores: Optical fibers; optical fiber sensors; active fibers

PACS: 42.50; 42.80

1. Introducción

En los últimos años se han desarrollado sensores de temperatura a base de fibras ópticas con núcleos dopados con tierras raras [1, 2]. Estos sensores pueden ser aplicados en la medición de altas temperaturas, (alrededor de 800°C), a diferencia de sus antecesores basados en fósforos cuya temperatura máxima de aplicación es 250°C; presentan además una gran sensibilidad y precisión de algunos cuantos grados centígrados. La precisión no es un problema, ya que existe una gran cantidad de aplicaciones para las cuales dichos dispositivos son aceptables si se considera el costo-beneficio del sistema completo. La medición de temperatura usando las propiedades de la fluorescencia de vidrios activados con neodimio se realiza de dos formas. La primera de ellas tiene en cuenta la variación del espectro de absorción con la temperatura, mientras que la segunda está basada en la disminución del tiempo de decaimiento de la fluorescencia τ . En ambos casos la dependencia ocurre como consecuencia del ensanchamiento de los niveles de energía con la temperatura [3-5].

El creciente interés en el desarrollo de sensores de temperatura a base de fibras ópticas activas ha motivado la investigación sobre las características que deben tener los materiales activos, así como su influencia en el decaimiento de la fluorescencia. En particular, uno de los iones activos más estudiados ha sido el neodimio (Nd³⁺). Se ha demostrado que un incremento en la concentración de estos iones disminuye el tiempo de decaimiento de la fluorescencia [6]. Esto se debe a que decaen no radiativamente. En efecto, al aumentar la concentración de Nd surgen mecanismos de relajación al-

ternativos, en particular los iones intercambian entre ellos el total o una fracción de la energía, ocasionando que disminuya la fluorescencia y con esto el tiempo de decaimiento. Es una práctica común introducir aluminio (Al) en los silicatos para favorecer la solubilidad del Nd, evitando así que los iones se aglomeren e intercambien energía entre ellos [7]. Así, altas concentraciones de neodimio requieren de altas concentraciones de aluminio. La alta concentración de neodimio favorece la sensibilidad de los sensores basados en la absorción de la fluorescencia [3]; sin embargo, el tiempo de decaimiento disminuye además de que se reduce la exponencialidad del decaimiento de la fluorescencia.

Hasta donde sabemos no existen reportes en la literatura sobre el efecto que la combinación neodimio-aluminio tiene en la sensibilidad de los sensores de temperatura a base de fibras activas. En este trabajo se presentan resultados experimentales que permiten obtener conclusiones sobre el efecto de dicha combinación en la sensibilidad del sensor, en un intervalo de trabajo de entre 15°C y 500°C. El trabajo está organizado de la siguiente manera: En la Sec. 2 se describe el arreglo experimental. En la Sec. 3 se reportan y discuten los resultados experimentales obtenidos para preformas de silicio activadas con 0.19, 0.61 y 0.92 wt.% de neodimio y codopadas con 8 wt.% de aluminio. Se comparan los resultados obtenidos para una preforma activada con 0.52 wt.% de Nd y 8 wt.% de Al con una activada con 0.5 wt.% de Nd y 3.8 wt.% de Al. A fin de contar con una referencia se reporta también la dependencia del tiempo de decaimiento con la temperatura de una muestra de vidrio suave (ZBLAN) de 9 wt.% de neodimio y cero aluminio. En la Sec. 4 se presentan las conclusiones.

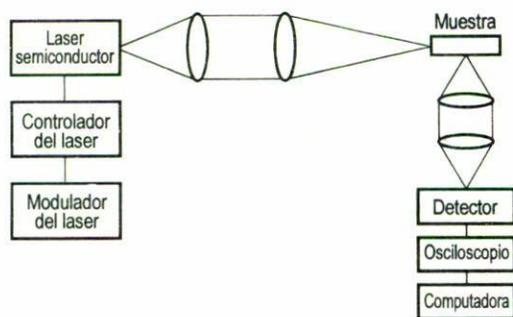


FIGURA 1. Arreglo experimental para la detección y medición del tiempo de decaimiento de la fluorescencia.

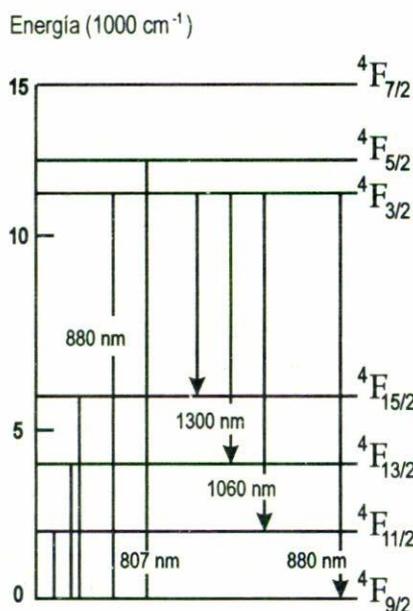


FIGURA 2. Distribución de los niveles de energía del Nd³⁺.

2. Experimento

La Fig. 1 muestra el arreglo experimental utilizado para la medición del tiempo de decaimiento de la fluorescencia. La fuente utilizada para excitar los iones activos de la preforma es un láser semiconductor que emite una señal modulada centrada en 807 nm. Esta longitud de onda corresponde a la transición $^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$ requerida para poblar el nivel $^4F_{3/2}$, de acuerdo a las propiedades de absorción del Nd³⁺ (ver Fig. 2). Desde el punto de vista experimental, esta longitud de onda se obtiene variando la temperatura en el controlador del láser una vez que se ha fijado la corriente. Por otro lado, la modulación de la señal es requerida para que el sistema esté un tiempo suficientemente largo sin iluminar, de tal forma que permita detectar el decaimiento de la intensidad de la luz. Si el tiempo de vida medio a medir es τ , se requiere modular a frecuencias menores que $\nu = 1/\tau$. Sabemos que el fenómeno

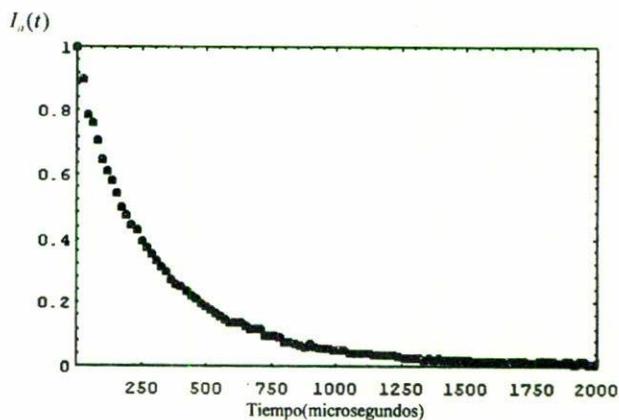


FIGURA 3. Gráfica de la variación de la intensidad normalizada de la fluorescencia en función del tiempo para la preforma de 0.61 wt.% Nd y 8 wt.% Al, a una temperatura de 25°C.

que aquí se discute tiene una duración de entre 100 y 800 μs , por lo que la frecuencia de 400 Hz (1/2500 μs) asegura la medición del tiempo de decaimiento.

Para la escala de tiempos que queremos medir, se implementó la modulación de la corriente que alimenta al láser, introduciendo para ello un pulso de frecuencia de 400 Hz al controlador de corriente. Esto se logró mediante un generador de funciones con un pulso de 110 mV y corriente promedio de 58 mA, con un tiempo de subida y caída de 100 nseg. De esta forma, el láser genera un pulso de frecuencia de 400 Hz con tiempo de subida y caída de 3 μs y una potencia de 70 mW.

La señal de bombeo es acoplada a una preforma de Al-Nd:SiO₂, con una longitud de 40 mm y un espesor de 10 mm. La preforma es colocada en un horno regulado que permitió variar su temperatura entre 15°C y 500°C con una precisión de $\pm 5^\circ C$. Una vez que el nivel $^4F_{3/2}$ está poblado, se produce el decaimiento espontáneo dando lugar a la radiación electromagnética que es posible detectar. La fluorescencia es colectada en dirección perpendicular al eje de incidencia de la luz de bombeo, como se muestra en Fig. 1; esto permite detectar la fluorescencia sin incluir la radiación del láser de bombeo sin la utilización de un filtro para bloquearlo. Cuando se utiliza un filtro, también se atenúa la señal correspondiente a la transición ($^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$). Sin embargo, comparando los resultados experimentales reportados en este trabajo con los reportados en [6], se observa que la atenuación de la señal correspondiente a la transición mencionada no afecta la determinación del tiempo de decaimiento de la fluorescencia.

La señal fluorescente es recibida por un detector marca New Focus modelo 811 que presenta un ancho de banda de 1000 nm centrada en 1060 nm y una sensibilidad de 75 μW con una rapidez de detección de 12 ns; el detector está conectado a un osciloscopio computarizado que muestra el decaimiento de la fluorescencia, como se observa en la Fig. 3 y a partir del cual se determina el tiempo de decaimiento.

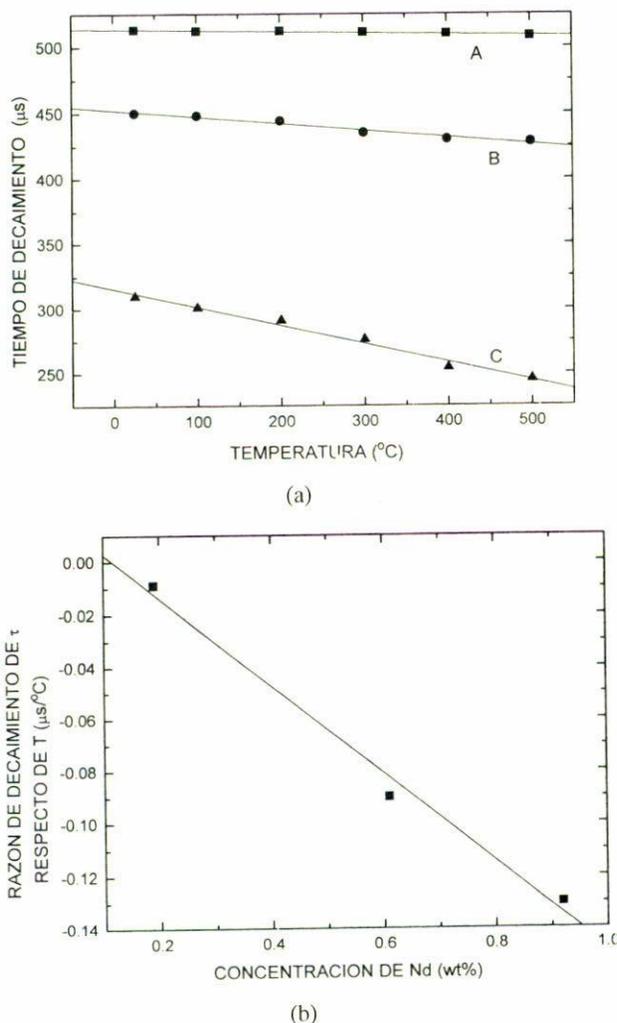


FIGURA 4. a) Tiempo de decaimiento de la fluorescencia en función de la temperatura para 8 wt.% de Al y las siguientes concentraciones de Nd: 0.19 wt.% (curva A), 0.61 wt.% (curva B) y 0.92 wt.% (curva C); las sensibilidades obtenidas son: $-0.009 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$, $-0.09 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$ y $-0.13 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$ respectivamente. b) Comportamiento de la razón de cambio del tiempo de decaimiento de la fluorescencia como función de la concentración de Nd.

3. Resultados experimentales

Como se mencionó anteriormente, un incremento en la concentración de Nd aumenta la razón de cambio del tiempo de decaimiento de la fluorescencia con la temperatura, aumentando así la sensibilidad del sensor. La Fig. 4a muestra los resultados experimentales para tres muestras con 0.19 wt.% (curva A), 0.61 wt.% (curva B) y 0.92 wt.% (curva C) de Nd, y 8 wt.% de Al en todos los casos. Ajustando los datos experimentales por mínimos cuadrados se observa que la sensibilidad a la temperatura aumenta muy suavemente como función de la concentración de los iones activos. La sensibilidad obtenida en cada uno de los casos es: $-0.009 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$, $-0.09 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$ y $-0.13 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$ respectivamente. La Fig. 4b

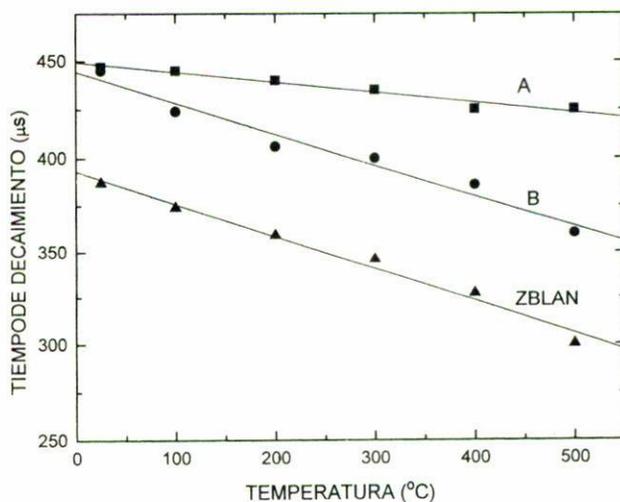


FIGURA 5. Tiempo de decaimiento de la fluorescencia en función de la temperatura para dos muestras con 0.50 wt.% de Nd y las siguientes concentraciones de Al: 8 wt.% (curva A) y 3.8 wt.% (curva B); las sensibilidades obtenidas son $-0.08 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$ y $-0.16 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$ respectivamente. Se muestra además el comportamiento para una muestra de ZBLAN con 9 wt.% de Nd y 0 wt.% de Al; en este caso la sensibilidad es $-0.18 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$.

muestra el gráfico de los coeficientes anteriores como función de la concentración de Nd. Ajustando por mínimos cuadrados a una línea recta, se obtiene una pendiente de $(-0.16 \pm 0.01) (\mu\text{s}/^{\circ}\text{C}/\text{wt.}\%)$; este coeficiente corresponde a la razón de cambio de la sensibilidad del sensor como función de la concentración de Nd, lo que muestra la gran influencia de dicha concentración. Sin embargo, es importante hacer notar que la exponencialidad del decaimiento de la fluorescencia se reduce para concentraciones mayores a 0.61 wt.% de Nd; este hecho dificulta la medición del tiempo de decaimiento de la fluorescencia. Estos resultados muestran la posibilidad de aumentar la sensibilidad del dispositivo vía incrementos en la concentración de Nd.

En la Fig. 5 se muestran los resultados experimentales del tiempo de decaimiento de la fluorescencia como función de la temperatura, para dos muestras con la misma concentración de Nd (0.5 wt.%) y dos concentraciones de Al, 8 wt.% (curva A) y 3.8 wt.% (curva B). En este caso se obtiene una razón de cambio con la temperatura de $-0.08 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$ y $-0.16 \mu\text{s}/^{\circ}\text{C}$ respectivamente, lo que equivale a un incremento del 50% en la sensibilidad del sensor, con $\sim 50\%$ de reducción en la concentración de Al. Estos resultados muestran que la razón de cambio de la sensibilidad del sensor, como función de la concentración de Al, es $\sim 0.02 (\mu\text{s}/^{\circ}\text{C}/\text{wt.}\%)$. Este valor muestra claramente la poca influencia del Al en los cambios del tiempo de decaimiento de la fluorescencia como función de la temperatura. Sin embargo, es claro de la Fig. 5 que la reducción de la concentración de Al aumenta la razón de cambio del tiempo de decaimiento con la temperatura. En la Fig. 5 también se muestra el comportamiento del tiempo de decaimiento de la fluorescencia para una muestra de fosfato (ZBLAN) con 9 wt.% de neodimio y 0 wt.% de Al. En este

TABLA I. Resultados obtenidos del coeficiente de disminución del tiempo de decaimiento con la temperatura en función de la concentración de Nd-Al.

MUESTRA	Nd (wt.%)	Al (wt.%)	$(d\tau/dT)$ ($\mu\text{s}/^\circ\text{C}$)
Al-Nd:SiO ₂	0.19	8	-0.009
Al-Nd:SiO ₂	0.52	8	-0.08
Al-Nd:SiO ₂	0.61	8	-0.09
Al-Nd:SiO ₂	0.92	8	-0.13
Al-Nd:SiO ₂	0.50	3.80	-0.16
ZBLAN	9	0	-0.18

caso el coeficiente de disminución del tiempo de decaimiento con la temperatura es $-0.18 \mu\text{s}/^\circ\text{C}$; comparando este resultado con el de la curva C de la Fig. 4a, se observa una mayor eficiencia en la sensibilidad a la temperatura para preformas a base de SiO₂. A manera de resumen, en la Tabla I se pre-

sentan la sensibilidad a los cambios de temperatura de cada una de las muestras utilizadas en el experimento.

4. Conclusiones

Los resultados experimentales discutidos sugieren que la sensibilidad a los cambios de temperatura del tiempo de decaimiento de la fluorescencia, se incrementa para concentraciones mayores de Nd combinada con una baja concentración de Al. La máxima concentración de Nd debe ser tal que no destruya la exponencialidad del decaimiento de la fluorescencia; mientras que la mínima concentración de aluminio debe ser tal que resuelva el problema de aglomeración de los iones de neodimio. De los resultados experimentales es posible inferir que las preformas a base de SiO₂ son más eficientes en la medición de cambios de temperaturas; con éstas se requieren menos cantidades de iones activos que los vidrios ZBLAN, para obtener sensibilidades similares.

1. V. Fericola y L. Crovini, *SPIE* **2070** (1993) 472.
2. M.C. Farries, *SPIE* **798** (1987) 46.
3. P.L. Scrivener, P.D. Maton, A.P. Appleyard, and E.J. Tarbox, *Electron Lett.* **13** (1990) 873.
4. K.T.V. Grattan and A.W. Palmer, *A. W. Sci. Instrum.* **56** (1985) 1784.
5. L.A. Zenteno, *J. Lighthwave Technol.* **11** (1993) 1435.
6. A. Martínez, L.A. Zenteno, and J.C.K. Kuo, *Appl. Phys.* **B 67** (1998) 17.
7. K. Arai, H. Namikawa, K. Kumata, and T. Honda, *J. Appl. Phys.* **59** (1986) 3430.