

CAPÍTULO 3. FUENTES DE RADIACIÓN EN FIBRA ÓPTICA DOPADA CON TIERRAS RARAS

Las tierras raras también conocidas como Lantánidos son elementos del grupo IIIB, la característica principal de estos elementos es que ocupan el nivel subatómico 4f, estos iones están muy protegidos de la influencia de fuerzas externas en las capas $5s^2$ y $5p^6$, por lo que prácticamente el ion permanece invariable en todos sus compuestos.

Una de las características principales de algunas tierras raras es la fluorescencia o luminiscencia cuando son usados como activadores de redes cristalinas de los óxidos lantánidos, silicatos u óxidos de los metales de transición, por esta razón son usadas en fibras de sílice.

Existen varias aplicaciones para las fibras ópticas dopadas con tierras raras, como el uso del Erblio como amplificador, conocido más comúnmente como EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), láseres de barrido de longitud de onda, láseres de fibra de resonancia y fuentes superluminiscentes en fibra.

La inversión de población puede ser producida en un material dado, tomando en cuenta los niveles energéticos atómicos, desde un equilibrio térmico, el nivel 1 es más poblado que el nivel 2, esto quiere decir que la absorción será predominante sobre la emisión. Introduciendo una onda podríamos producir transiciones de $1 \rightarrow 2$ y $2 \rightarrow 1$ y podríamos esperar una inversión de población. Haciendo esto podríamos ver que este sistema de 2 niveles no funciona, para solucionar esto se trabaja en niveles más altos de energía, en tres y cuatro niveles [9].

3.1 Sistemas de cuatro niveles

En un sistema de cuatro niveles, los átomos son levantados desde el nivel base (siendo este el nivel 0) hasta el nivel 3. Si el átomo cae rápidamente al nivel 2, la inversión de población será obtenida entre los niveles 2 y 1, una vez iniciada la oscilación en el laser de cuatro niveles los átomos serán transferidos al nivel uno por emisión estimulada. Para generar una

onda continua la operación de un láser de cuatro niveles necesariamente tiene que tener una transición muy rápida del nivel 1 al 0, aún más rápida a la transición de 3 a 2 como se observa en la figura 15.

El funcionamiento de un láser de cuatro niveles se ha modelado y descrito por las siguientes ecuaciones, en donde se nombra N_g a la población del sistema base o 0, N_1 , N_2 y N_3 a población de los siguientes niveles.

Para conocer la cantidad total de población de átomos activos o moléculas “ N_t ” se hace la siguiente operación:

$$N_g + N_2 = N_t \quad (28)$$

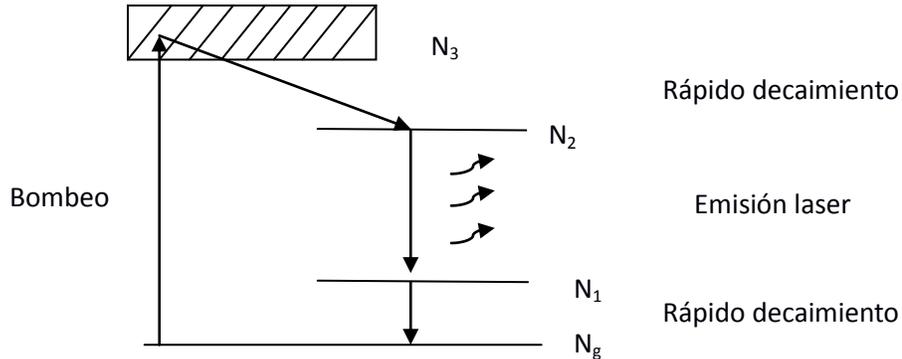


Figura 15. Esquema de un sistema láser de 4º nivel.

Para calcular la velocidad con la cual el segundo nivel se comienza a poblar después del bombeo y del rápido decaimiento del tercer al segundo nivel se usa la siguiente expresión:

$$\dot{N}_2 = W_p N_g - BqN_2 - \left(N_2 / \tau \right) \quad (29)$$

En esta ecuación W_p es un coeficiente conocido como “velocidad de bombeo”, el término $W_p N_g$ representa las cuentas del bombeo, BqN_2 representa las cuentas de la emisión estimulada, en donde el coeficiente B se refiere a la velocidad de transición estimulada por fotón y por modo, q corresponde al número total de fotones en la cavidad. τ Representa el tiempo de vida del laser en el nivel superior.

Esta ecuación puede ser simplificada expresando la en términos de inversión de población “ N ” en donde se puede obtener de la siguiente forma:

$$N = N_2 - N_1 \quad (30)$$

Y podemos aproximar $N \approx N_2$, de esta forma podemos reducir la ecuación (28) y (29) de la siguiente forma:

$$\dot{N} = W_p(N_t - N) - BqN - (N/\tau) \quad (31)$$

La última ecuación se refiere a los fotones emitidos y se expresa de la siguiente forma:

$$\dot{q} = V_a BqN_2 - (q/\tau_c) \quad (32)$$

Esta ecuación también puede ser simplificada de la siguiente forma

$$\dot{q} = [V_a B N - (1/\tau_c)]q \quad (33)$$

En donde el término $V_a BqN_2$ representa la velocidad de crecimiento de la población de fotones debido a la emisión estimulada. V_a Es el volumen de modo el cual se puede calcular de la siguiente forma:

$$V_a = A_e l \quad (34)$$

En donde A_e es el área efectiva de la sección transversal del medio laser y l es la longitud del material activo y depende si la oscilación del laser es en uno o en varios modos.

Finalmente el término q/τ_c representa las cuentas de la disipación de los fotones debido a las pérdidas de la cavidad, en donde τ_c es el tiempo de vida del fotón [8].

3.1.1 Funcionamiento del laser de onda continua de cuatro niveles

Existe una condición necesaria para una oscilación de onda continua en un laser de cuatro niveles. El estado estable de la población del nivel 1 debe cumplir la siguiente ecuación de balance entre poblaciones entrando y saliendo del mismo nivel: $N_1/\tau_1 = N_2/\tau_{21}$, en donde τ_{21} es el tiempo de vida de la transición de 2->1. Para conseguir la oscilación láser requerimos que $N_2 > N_1$, lo cual implica que $\tau_1 < \tau_{21}$.

Si estas condiciones no son satisfechas, entonces la acción laser solo es posible basada en impulsos con un pulso de bombeo que es más pequeño comparado con el tiempo de vida del nivel superior.

Si W_p es constante u suficientemente fuerte y satisface $\tau_1 < \tau_{21}$, entonces la oscilación en estado estable entonces podrá ser alcanzable. En una emisión espontanea es necesario que las condiciones $\dot{q} > 0$ y $V_a B N > 1/\tau_c$ sean satisfechas. La acción láser, por tanto, se produce cuando la inversión de población N alcanza un valor N_c crítico el cual puede calcularse como:

$$N_c = \frac{1}{V_a B \tau_c} \quad (35)$$

La velocidad crítica de bombeo W_p es obtenida haciendo $\dot{N} = 0, N = N_c$ y $q = 0$ en la ecuación (31). La velocidad crítica de bombeo corresponde a la situación donde la velocidad total de las transiciones de bombeo, $W_{cp} (N_t - N_c)$ es igual a la velocidad de transición espontanea del nivel 2:

$$W_{cp} = N_c / (N_t - N_c) \tau \quad (36)$$

Si $W_p > W_{cp}$, el número de fotones q emitirá una emisión espontanea, y, si W_p es independiente del tiempo, alcanzara un valor q_0 constante. Este valor corresponde a el valor en estado estable de N_0 donde la inversión es obtenida de $\dot{N}_0 = \dot{q} = 0$. Esto nos da:

$$N_0 = 1 / V_a B \tau_c = N_c \quad (37)$$

$$q_0 = V_a \tau_c [W_p (N_t - N_0) - (N_0 / \tau)] \quad (38)$$

Estas ecuaciones describen el comportamiento de un laser de onda continua de cuarto nivel. Aunque cabe aclarar que existen casos donde $N_0 \neq N_c$ [9].

El ejemplo más común de estos láseres en fibra óptica dopada con tierras raras es el láser de fibra óptica dopada con Neodimio con la cual se implementan láseres con una emisión pico que puede variar de 905 nm a los 1363 nm de longitud de onda, dependiendo de la longitud de onda de la fuente laser de bombeo, la concentración de iones de Neodimio en la fibra óptica y su longitud [9].

3.2 Sistemas de tres niveles

En un láser de tres niveles los átomos son elevados desde el nivel base 1 al nivel 3, después de ser elevados al nivel 3 rápidamente caen al nivel 2, entonces es cuando la inversión de población es obtenida entre los niveles 2 y 1 (ver la figura 16).

Refiriéndonos al esquema de la figura 16, se asume un bombeo desde la banda base, y si la transición de 3->2 es lo suficientemente rápida, podemos decir que $N_3 \approx 0$. Así que las ecuaciones de velocidad son:

$$N_1 + N_2 = N_t \quad (39)$$

Donde N_1 es la población del nivel más bajo en un láser de tres niveles, N_2 es la población del segundo nivel, y N_t es la población total.

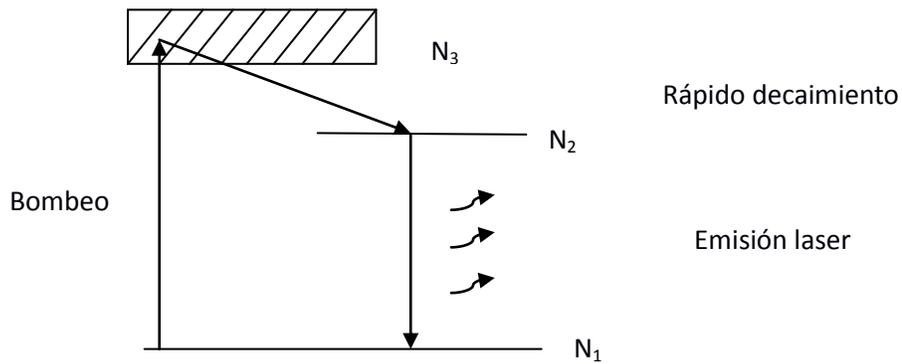


Figura 16. Esquema de un sistema laser de 3^{er} nivel

Para calcular la velocidad con la cual la población se mueve en el nivel 2 se usa la siguiente expresión:

$$\dot{N}_2 = W_p N_1 - Bq(N_2 - N_1) - (N_2/\tau) \quad (40)$$

Y por último la ecuación que describe el comportamiento de los fotones emitidos:

$$\dot{q} = V_a Bq(N_2 - N_1) - q/\tau_c \quad (41)$$

Estas tres ecuaciones pueden ser reducidas de la misma forma que para un láser de cuatro niveles por medio de N la cual representa la inversión de población y las ecuaciones simplificadas quedan de la siguiente forma:

$$\dot{N} = W_p(N_t - N) - 2BqN - (N_t + N)/\tau \quad (42)$$

$$\dot{q} = [V_a BN - (1/\tau_c)]q \quad (43)$$

Un hecho muy notable es que la ecuación de velocidad del fotón para un láser de tres y cuatro niveles es la misma pero la ecuación de inversión de población es algo diferente, en particular la emisión estimulada para un sistema de tres niveles está dada por $2BqN$ la cual tiene un factor de 2, esta diferencia surge del hecho de que la emisión de un fotón en un sistema implica un cambio de 2, uno que tiene un decremento de N_2 y otro que incrementa de N_1 , mientras que en un sistema de cuatro niveles solo existe un decremento de N_1 y un rápido decaimiento de $1 \rightarrow 0$ [8].

3.2.1 Funcionamiento de onda continua del láser de tres niveles

El cálculo del funcionamiento del láser de tres niveles es similar al caso del láser de cuatro niveles. El umbral de inversión de población se obtiene de hacer $\dot{q} = 0$ en la ecuación (43)

$$N_c = \frac{1}{BV_a\tau_c} \quad (44)$$

La cual cómo podemos notar es la misma que para un laser de 4° nivel. La velocidad de bombeo crítico es obtenida de la ecuación (40) haciendo $\dot{N} = 0, q = 0, y N = N_c$ así tenemos que:

$$W_{cp} = (N_t + N_c)/(N_t - N_c)\tau \quad (45)$$

En la práctica podemos ver que para ambos tipos de láser (de 3° y 4° nivel) N_c es mucho menor a N_t . Así podemos reducir la ecuación (45) y tenemos que:

$$W_{cp} \approx 1/\tau \quad (46)$$

Si comparamos las ecuaciones de la velocidad de bombeo critico de ambos sistemas láser podemos ver que el bombeo láser del sistema de cuatro niveles es más pequeño por un factor de (N_c/N_t) que el láser de tres niveles. Esto es la base del desempeño superior del láser de cuatro niveles.

Justo como en el laser de cuatro niveles la inversión de onda continua N_0 y el número de fotones q_0 de onda continua, se obtiene el umbral haciendo $\dot{N} = \dot{q} = 0$, entonces obtenemos:

$$N_c = N_0 \quad (47)$$

$$q_0 = \frac{V_a(N_t + N_0)\tau_c}{2\tau} \left(\frac{W_p}{W_{cp}} - 1 \right) \quad (48)$$

Estas ecuaciones son las que describen el comportamiento niveles en onda continua de un laser de tres niveles [8].

El láser en fibra óptica dopada con tierras raras más común en tres niveles es el láser en fibra dopada con Erblio, el cual tiene una emisión pico que varía su emisión pico desde 1550 nm hasta 1620 nm de longitud de onda, dependiendo de la emisión pico de la fuente de excitación usada, la concentración de iones en la fibra y la longitud de esta [9].

3.3 Fuente superluminiscente en fibra óptica dopada con tierras raras basada en sistemas de tres niveles.

Para el estudio de una fuente superluminiscente vamos a considerar la figura 17 en donde se realiza un bombeo láser unidireccional a una fibra dopada por ejemplo con Erblio, y con un bombeo a partir de $z=0$ y propagándose en una dirección $+z$. El bombeo induce a lo largo de la fibra una ganancia por unidad de longitud (también conocido como factor de ganancia) que depende de z . Los fotones generados por emisión espontanea en la fibra son amplificados en dirección delantera ($+z$) y trasera ($-z$), lo que da a lugar a dos ondas de emisión de amplificación espontanea, una en cada dirección. Estas ondas agotan la población del estado excitado de los iones de tierras raras los cuales, a su vez, afectan al mismo tiempo la absorción del bombeo y el factor de ganancia [9].

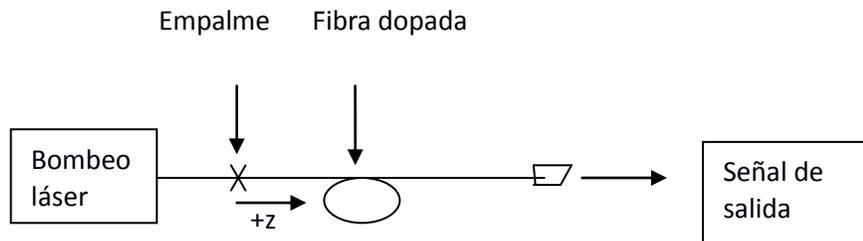


Figura 17. Esquema de una fuente superluminiscente

Una representación de las ecuaciones de razón para una fuente superluminiscente basada en tres niveles que describen la evolución de la potencia de la señal de amplificación y la potencia de la señal bombeada a través de la fibra activada son las ecuaciones [17].

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z)P_z(z), \quad (49)$$

$$\frac{dP_s^\pm(z, \lambda_i)}{dz} = \pm G_e(z, \lambda_i)[P_s^\pm(z, \lambda_i) + P_0] - G_a(z, \lambda_i)P_s^\pm(z, \lambda_i), \quad (50)$$

Las fuente superluminiscentes son usadas principalmente para mejorar la sensibilidad de sensores como el giroscopio basado en efecto Sagnac, debido a la disminución de la componente de la señal de ruido, debido a que poseen un mayor ancho espectral que las fuentes tradicionales de bombeo basadas en semiconductores (diodos láser), además de que poseen una mayor estabilidad térmica en el dispositivo completo que las fuentes superluminiscentes semiconductoras.

Como se sabe el Erblio es un ion el cual pertenece a un elemento con energía de tres niveles para láseres, el cual tiene una emisión pico a 1550 nm de longitud de onda cuando es bombeado por una fuente láser a 980 nm de longitud de onda, esto se menciona debido a que la utilización de láseres y dispositivos que trabajan alrededor de la longitud de onda conocida como la tercera ventana de las telecomunicaciones (1550 nm), la cual es una longitud de onda en la cual existen bajas pérdidas, además tiene como ventaja que a medida que la longitud de onda aumenta la vida útil de estos dispositivos también lo hace.

Las fuentes superluminiscentes en fibra óptica usan una fibra óptica monomodal activada con iones de tierras raras, este tipo de fuentes coinciden casi al cien por ciento con la fibra óptica monomodal usada en el embobinado sensible de un giroscopio [17].

Conclusiones al capítulo 3

Los elementos conocidos como tierras raras, forman parte del grupo IIIB de la tabla periódica, estos elementos son usados para dopar fibras ópticas de vidrio, debido a que presentan fluorescencia o luminiscencia cuando están en redes cristalinas de sílice y otros compuestos.

Para producir una emisión láser es necesario obtener una inversión de población en los niveles de energía del material, debido a que este fenómeno no es posible realizarlo con materiales con dos niveles de energía se trabaja en niveles superiores (tres y cuatro niveles). A pesar de que el funcionamiento en onda continua de un láser de cuatro niveles posee una eficiencia mayor a un láser de tres niveles, es importante trabajar el sistema de tres niveles de fibras dopadas con Erblio ya que su emisión a 1550 nm coincide con la región de la tercera ventana en telecomunicaciones, que es una región de bajas pérdidas de transmisión; otra ventaja de trabajar en esta longitud de onda es la mayor vida útil comparando con dispositivos que trabajan a longitud de onda menores.

Las fuentes superluminiscentes en fibra óptica dopada con tierras raras, son dispositivos que tienen una excelente estabilidad térmica y un amplio ancho espectral, estas cualidades en aplicaciones como en giroscopios en fibra óptica basados en efecto Sagnac, dotan al dispositivo de una mejor relación señal a ruido, además de que se acoplan casi al 100% con fibra óptica monomodal usada en los embobinados sensibles para la fabricación de giroscopios.