

CAPÍTULO 4. RESULTADOS TEÓRICOS Y PRÁCTICOS

4.1 Resultados teóricos

Usando las ecuaciones de razón de una fuente superluminiscente en fibra óptica dopada en tierras raras, las cuales describen el comportamiento de la potencia de la señal de amplificación y la potencia de la señal bombeada a través de la fibra dopada [17]:

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

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

En donde:

z -> Es la coordenada longitudinal

$P_p(z)$ -> Es la potencia de bombeo de la fibra óptica dopada

$\gamma_p(z)$ -> Es el coeficiente de absorción del bombeo dependiente del cambio de la coordenada z .

$P_s^\pm(z, \lambda_i)$ -> Es la densidad espectral de la potencia de la señal dependiente de la longitud de onda (λ) y de la fibra óptica (z); en donde P_s^+ corresponde a la dirección coincidente de la señal de radiación con la señal de bombeo; P_s^- Corresponde a la dirección cuando la señal de radiación es contraria a la señal de bombeo.

$G_e(z, \lambda_i)$ -> es el coeficiente de amplificación en potencia para la radiación espontánea.

$G_a(z, \lambda_i)$ -> es el coeficiente de absorción en potencia para la radiación espontánea.

P_0 -> es el equivalente del espectro de la densidad de potencia de entrada de la radiación espontánea amplificada.

λ_i -> es la densidad espectral de la potencia de la señal dependiente de la longitud de onda λ .

La ecuación (49) nos indica la evolución de la potencia de bombeo de la fibra dopada, esta ecuación es muy importante ya que $P_p(z)$ es un valor que no podemos medir con nuestra implementación solo es posible calcularlo, esta ecuación fue resuelta para las condiciones de frontera $P_p(z=0)=P_{IN}$, y además suponiendo por simplicidad γ_p como constante en donde P_{IN} es la potencia de entrada, donde la solución es:

$$P_p(z) = P_{IN} e^{-z\gamma_p} \quad (51)$$

Como podemos observar la solución de esta ecuación para estas condiciones particulares en la frontera es una exponencial decreciente lo cual indica, en términos de la longitud, que entre mayor sea el largo de la fibra dopada, la potencia de bombeo de la fibra dopada decrecerá de forma exponencial.

La ecuación (49) puede ser descrita de la siguiente forma [16]:

Cuando $P_p(z) < P_p^{th}$,

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z)P_p(z),$$

en donde γ_p es constante si $P_p(z) > P_p^{th}$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -N_T \pi a^2 \left(\frac{h\nu_p}{\tau} \right) \quad (52)$$

En donde P_p^{th} es la potencia de umbral. Dependiendo de los parámetros de la fibra óptica dopada, se describe de la siguiente forma:

$$P_p^{th} = \pi a^2 \left(\frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau} \right) \quad (53)$$

Donde σ_p es la sección transversal de transición de la absorción del bombeo la cual se supone como: $2.58 \times 10^{-25} \text{m}^2$, a es el radio del núcleo de la fibra óptica: $2 \times 10^{-6} \text{m}$, ν_p es la frecuencia de bombeo: $3.071 \times 10^{14} \text{Hz}$, h es la constante de Planck, τ es el tiempo de vida del nivel de trabajo superior para la radiación espontánea: $10 \times 10^{-3} \text{s}$ y N_T es la concentración de iones de Erbium: $1.9 \times 10^{25} \text{iones/m}^3$.

Entonces la solución de la ecuación diferencial (52) con la condición $P_p(z) > P_p^{th}$, debido a que hay una parte de saturación en la ecuación (49) se describe como:

$$P_p(z) = P_{in} - \left(N_T \pi a^2 \left(\frac{h\nu_p}{\tau} \right) \right) z \quad (54)$$

Al igual que la ecuación (51) podemos observar que a medida que z aumenta, $P_p(z)$ decrece linealmente, con la limitación física de que no podemos tener un $P_p(z)$ menor a 0, por lo que con esta ecuación dichos valores no son válidos, la ecuación (54) será la expresión utilizada en simulaciones debido a que nos ofrece simplicidad en los cálculos.

En la ecuación (52) podemos ver que tiene dos soluciones, una de ellas indica la señal de la amplificación de la emisión espontánea en la misma dirección de nuestra fuente de bombeo, la cual se escribe como [20]:

$$P_s^+(z, \lambda_i) = \frac{G_e(z, \lambda_i)}{G_b(z, \lambda_i)} P_0 e^{z G_b(z, \lambda_i)} - \frac{G_e(z, \lambda_i)}{G_b(z, \lambda_i)} P_0, \quad (55)$$

En dicha solución podemos observar que la potencia de salida cuando es coincidente con la dirección de la fuente de bombeo, tendrá un valor mínimo cuando la coordenada longitudinal a través del eje de la fibra dopada sea $z=0$ y se incrementará a medida que la longitud de la fibra aumente.

La segunda solución representa la potencia de salida cuando su dirección es contraria a la dirección de la fuente de bombeo [20]:

$$P_s^-(z, \lambda_i) = \frac{G_e(z, \lambda_i)}{G_b(z, \lambda_i)} P_0 e^{(L-z) G_b(z, \lambda_i)} - \frac{G_e(z, \lambda_i)}{G_b(z, \lambda_i)} P_0, \quad (56)$$

Ahora podemos observar que la potencia de salida de la señal será mínima, cuando la coordenada longitudinal sea $z=L$, donde L es la longitud de la fibra óptica dopada y será máxima su potencia cuando $z=0$.

Los factores $G_e(z, \lambda_i)$ y $G_a(z, \lambda_i)$ pueden definirse de la siguiente forma:

$$G_e = N_T \sigma_e(\lambda_i) (1 - \eta) \left[\frac{\frac{P_p(z)}{P_p^{th}}}{\frac{P_p(z)}{P_p^{th}} + 1} \right] \quad (57)$$

$$G_a = N_T \sigma_a (\lambda_i) (1 - \eta) \left[\frac{1}{\frac{P_p(z)}{P_p^{th}} + 1} \right] \quad (58)$$

En donde los valores de los siguientes coeficientes fueron supuestos, σ_e es la sección transversal de transición de emisión con un valor de $8.129 \times 10^{-25} \text{m}^2$, σ_a la sección transversal de transición de absorción con un valor de $2.105 \times 10^{-25} \text{m}^2$, η es el factor de encubrimiento con un valor de 0.685 y $G_b(z, \lambda_i) = G_e(z, \lambda_i) - G_a(z, \lambda_i)$.

En la figura 18, se muestran los resultados de la simulación de la ecuación 54, que es el comportamiento de $Pp(z)$ el cual es un valor que no podemos medir con nuestra implementación, solo es posible calcularlo, como se puede observar se ha simulado para z desde 0 a 5 metros, para diferentes valores del bombeo inicial P_{in} , lo cual como se menciona en el análisis de la solución tiene un comportamiento decreciente lineal.

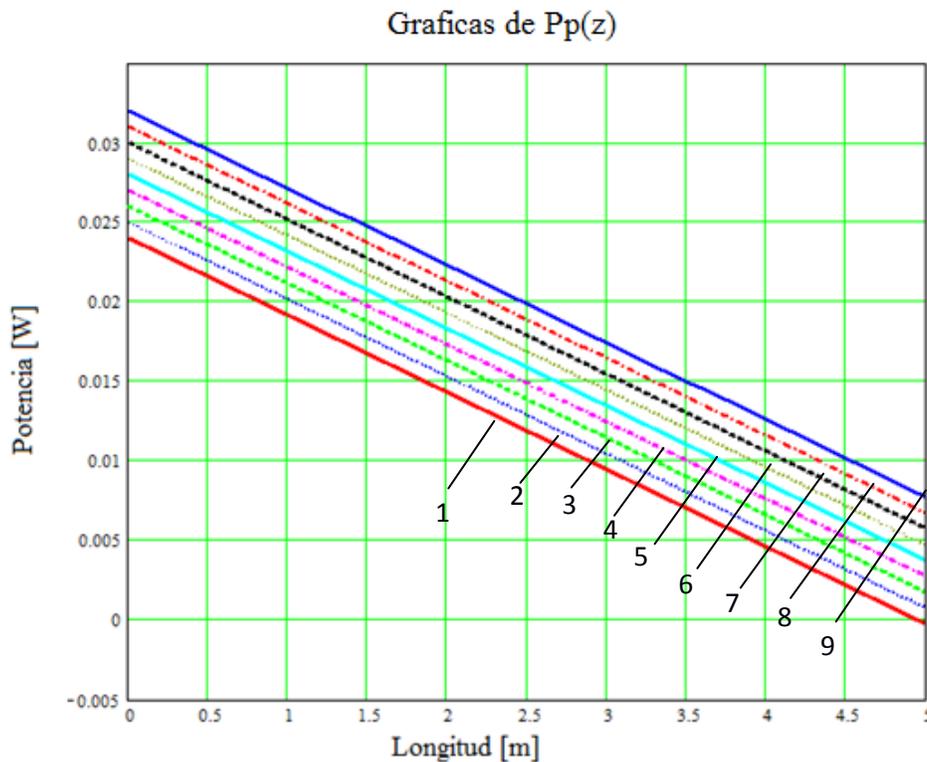


Figura 18. Simulación de la señal de bombeo $Pp(z)$, con z desde 0 hasta 5 metros.

En la tabla 3 que se muestra a continuación se indica la potencia de entrada con la cual fue excitada la fibra óptica dopada con Erblio para cada gráfica.

Numero indicado	P_{in} (mW)	Numero indicado	P_{in} (mW)
1	24	6	29
2	25	7	30
3	26	8	31
4	27	9	32
5	28		

Tabla 3

La siguiente simulación (ver figura 19) nos muestra el comportamiento de la potencia de la emisión espontánea a diferentes longitudes de la fibra óptica.

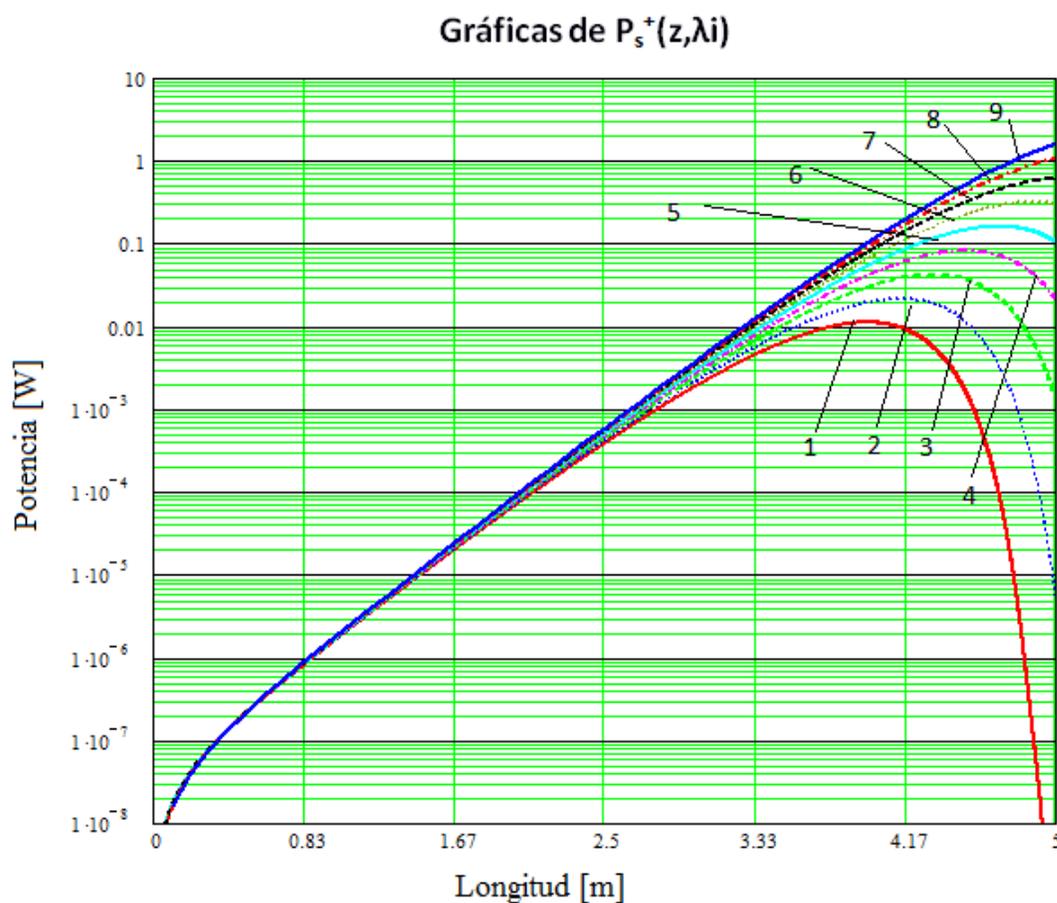


Figura 19. Simulación de $P_s^+(z, \lambda_i)$ en función de la longitud.

En la tabla 3 encontramos para cada gráfica a que potencia de entrada P_{in} corresponde. En las gráficas de la figura 19, se observa los resultados de la potencia de la señal de salida coincidente con la dirección de la señal de bombeo, esta se denota como $P_s^+(z, \lambda_i)$, la cual aumenta a medida que la longitud de la fibra dopada aumenta, también podemos observar que hace una curva en la cual la potencia de salida empieza a decrecer, esto quiere decir que para cada potencia de bombeo existe una longitud en la cual la emisión será máxima y la absorción mínima, después de este punto la emisión comenzara a decrecer y la absorción aumentara con la longitud de la fibra, es de esperarse este resultado aunque al ver las ecuaciones no es un resultado a la vista como sabemos tanto $Ga(z, \lambda_i)$ como $Ge(z, \lambda_i)$ están en función de $Pp(z)$, si observamos la imagen en donde se simula $Pp(z)$, vemos que a medida que la longitud aumenta la potencia de bombeo decrece, es por esta razón el coeficiente $Ga(z, \lambda_i)$ para ciertos valores es mayor que $Ge(z, \lambda_i)$.

Continuando con nuestro análisis se muestra la simulación obtenida para el sentido, en que la señal obtenida va en dirección de contrapropagación a la de bombeo, se denomina como $P_s^-(z, \lambda_i)$, estos resultados son obtenidos de forma similar que cuando la señal coincide con la dirección de bombeo, así como para los valores desde $z=0$ hasta $z=5$.

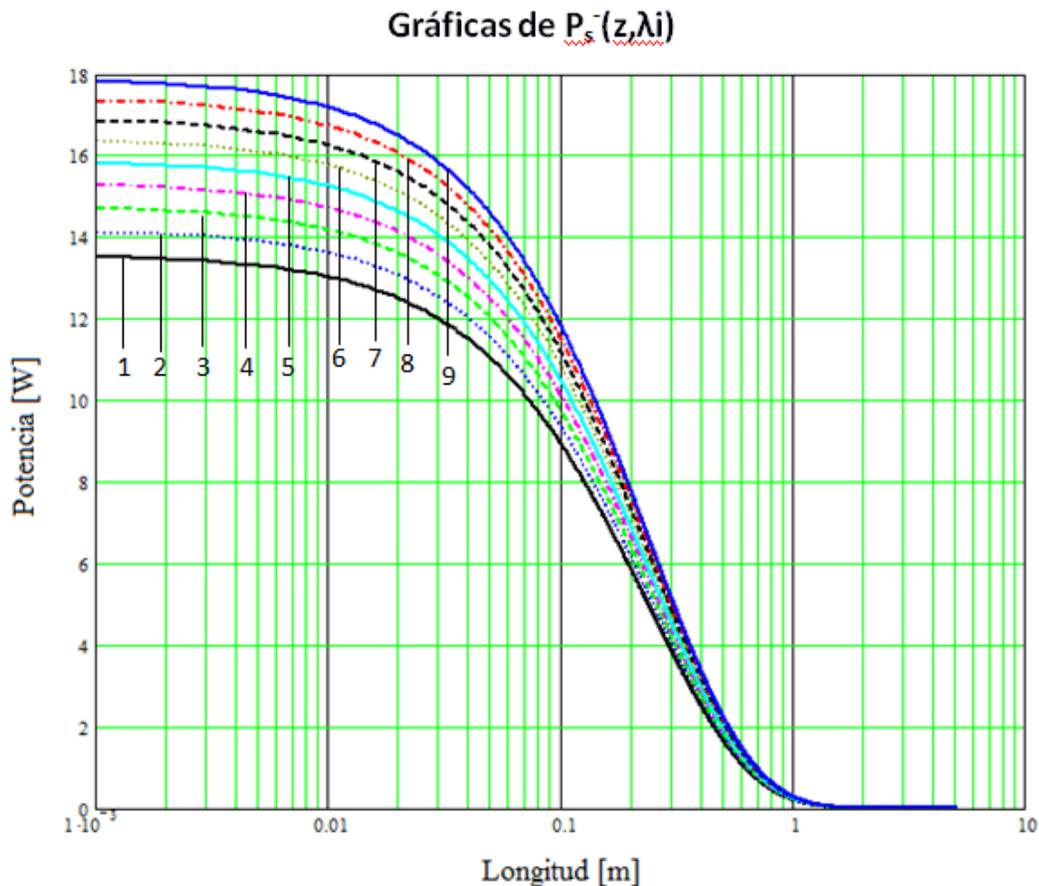


Figura 20. Simulación de $P_s^-(z, \lambda_i)$ en función de la longitud.

En la tabla 3 se puede ver a que para cada grafica a que potencia P_{in} corresponde. En esta gráfico de la figura 20 se observa lo que se predice en el análisis de la ecuación que rige el comportamiento de la señal en sentido contrario a la potencia de bombeo $P_s^-(z, \lambda_i)$, aquí podemos ver que la potencia de salida decrece con la longitud de la fibra, a diferencia de $P_s^+(z, \lambda_i)$ aquí siempre vemos el decremento de la potencia por el factor $(L-z)$ en la exponencial, L es un valor fijo $L=5$ y conforme aumenta z el valor de esta operación tiende a cero.

4.2 Implementación de la fuente superluminiscente en fibra óptica dopada en tierras raras

Se usó un diodo laser con fibra óptica como fuente de bombeo a 980 nm, un multiplexor por división de longitud de onda (Wavelength Divisor Multiplexor, WDM, por sus siglas en inglés), y 5 metros de fibra óptica dopada en Erblio, los empalmes realizados fueron empalmes por fusión y la medición de la potencia fue realizada por un multímetro óptico de la marca ILX lighthwave con una cabeza de medición de InGaAs.

Existen diferentes configuraciones para implementar una fuente superluminiscente en fibra óptica dopada en tierras raras, en este trabajo utilizamos configuración mostrada en la figura 21, la cual es usada en giroscopios:

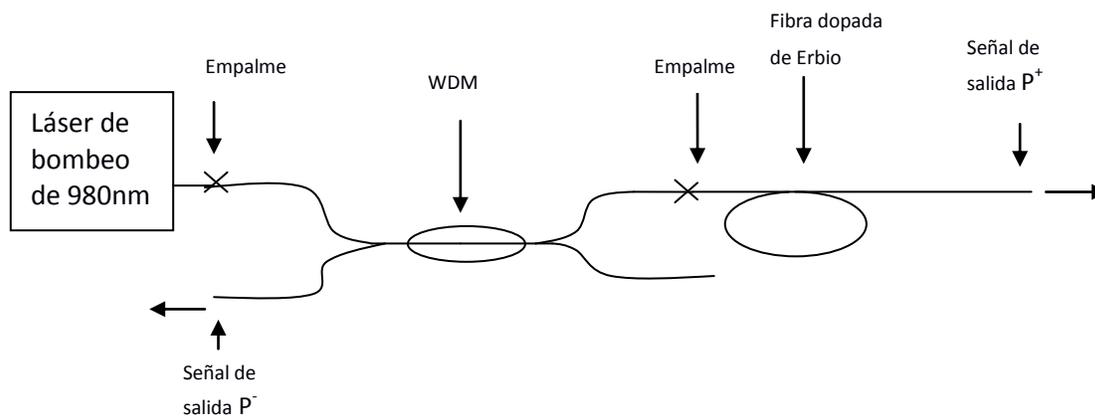


Figura 21. Esquema de fuente superluminiscente

4.2.1 Características técnicas del equipo

Laser

El láser usado es de la marca JDSU en configuración de mariposa de 14 pines, este diodo láser está equipado con un termistor para sensar la temperatura, un enfriador termoeléctrico.

Las características proporcionadas por el proveedor son las siguientes:

Modelo 29-7702-360-FL

Voltaje del Control de temperatura a 950mA----- 2.37V a 75°C
Corriente del Controlador de temperatura de 950mA a 1.85A a 75°C
Temperatura de operación del diodo Láser----- 25°C
Resistencia del termistor a 25°C----- 9.96HOhms
Corriente de umbral Ith(mA)----- 19
Corriente de operación Iop(mA)----- 565.9 a 325mW de salida
Corriente máxima Imax(mA)----- 630.2
Longitud de onda Pico----- 976.2nm

Multiplexor por división de longitud de onda

Estas son las características proporcionadas por el proveedor Opto-Link Corporation LTD

Modelo OLWDM-F-22-985-25-NC

Longitudes de onda de operación----- 980nm y 1550nm
Configuración----- 2X2
Longitud de la fibra----- 1m
Dimensiones del empaque----- Φ 3.0mm x 40mm
Temperatura de operación----- -40 a 85°C

Longitud de onda (nm)	980	1550
Aislamiento (dB)	24.0	34.3
Pérdidas por inserción (dB)	0.12	0.05
PDL(dB)	0.01	0.01
Directividad (dB)	>60	>60

Tabla 4. Características del WDM

Fibra óptica dopada con Erblio

La fibra óptica es de la marca Liekki la cual proporciona los siguientes datos [21]:

Modelo: Er30-4/125

Especificaciones ópticas

Diámetro del campo modal a 1550nm	6.5±0.5µm
Absorción pico del núcleo a 1530nm	30±3dB/m
Apertura numérica del núcleo	0.2
Longitud de onda de corte	800-980nm

Tabla 5. Especificaciones ópticas de la fibra dopada

Especificaciones geométricas y mecánicas

Error de concentricidad del núcleo	< 0.7 µm
Diámetro del revestimiento	125 ± 2 µm
Geometría del revestimiento	Circular

Tabla 6 Especificaciones ópticas de la fibra dopada

Concentración de Erblio en la fibra.....1.9x10²⁵ [iones/m³]

4.3 Desarrollo y resultados experimentales

En el inicio de nuestro trabajo experimental fue necesario caracterizar nuestro diodo laser con nuestro equipo de medición, para corroborar que el funcionamiento de nuestro laser sea el adecuado, esto lo hacemos con la curva característica que provee el fabricante de cada laser (ver figura 22).

La medición fue realizada controlando la corriente suministrada al diodo láser comenzando desde 0 mA e incrementando en 10 mA cada medición, midiendo a la salida su potencia óptica con el multímetro óptico y una cabeza de medición mencionada al inicio, de estas mediciones la curva característica obtenida fue la mostrada en la figura 23.

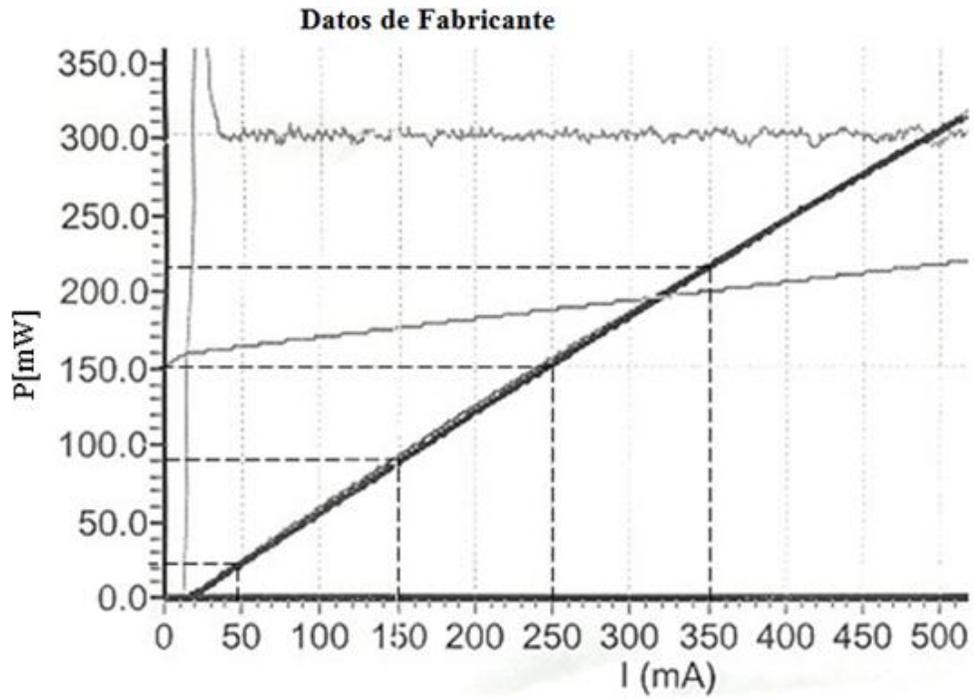


Figura 22. Curva característica del diodo láser proporcionada por el fabricante

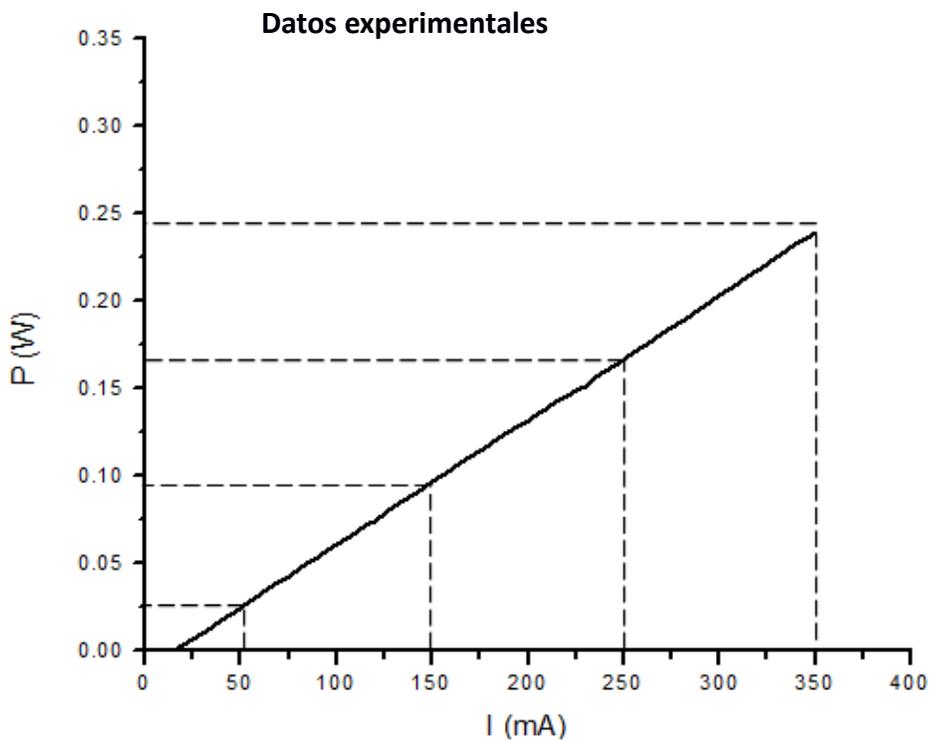


Figura 23. Curva característica del diodo láser obtenida experimentalmente.

Podemos ver que el comportamiento experimental del láser es similar el medido en el laboratorio con pequeñas diferencias a partir de los 250 mA, pero podemos decir que tenemos un detector confiable, además nuestras mediciones para la fuente superluminiscente serán máximo apenas unos pocos mW.

El siguiente paso antes de armar la fuente superluminiscente, es necesario caracterizar la fuente laser a la salida del multiplexor por división de longitud de onda, la potencia de esta señal de salida es con la cual se bombea la fibra dopada en Erblio.

La curva obtenida de la caracterización a la salida del multiplexor por división de longitud se muestra a continuación en la figura 24:

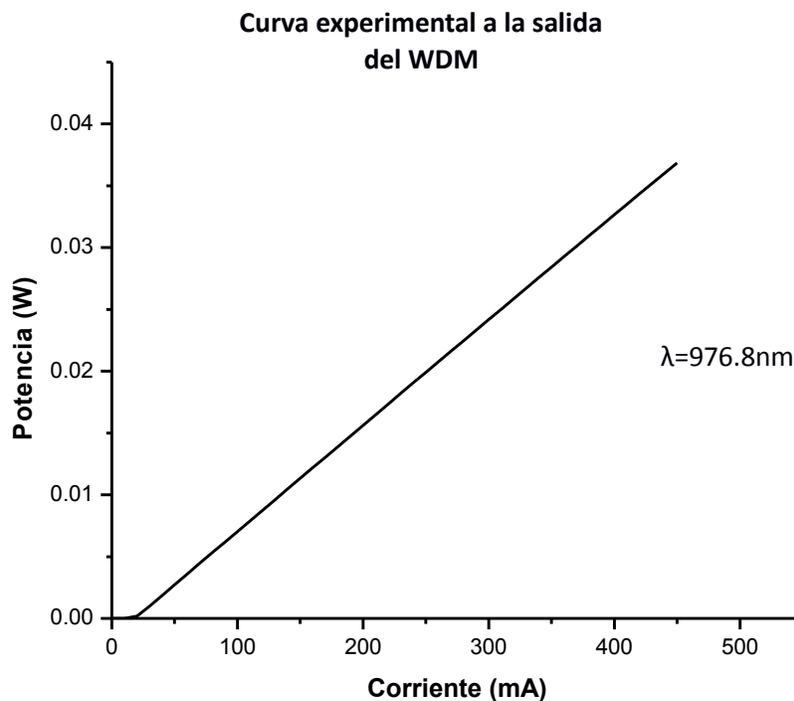


Figura 24. Curva obtenida experimentalmente a una longitud de onda pico de 976.8 nm en donde el medidor de potencia obtuvo la mayor potencia de salida de la fuente de bombeo.

Esta potencia de salida obtenida es la que más adelante conoceremos como P_{in} , la cual es la fuente de excitación de nuestra fibra activa.

Una vez conocida la respuesta de la fuente de bombeo se implemento nuestra fuente superluminiscente en fibra óptica dopada en Erblio, para caracterizar la fuente superluminiscente fue necesario realizar la medición en dos puntos, el primero de ellos es al final de la fibra dopada en Erblio la cual nombramos P^+ (ver figura 25) y la otra es la salida es la de retorno del WDM a la cual llamamos P^- (ver figura 26).

La curva obtenida para P^+ se muestra a continuación en la figura 25:

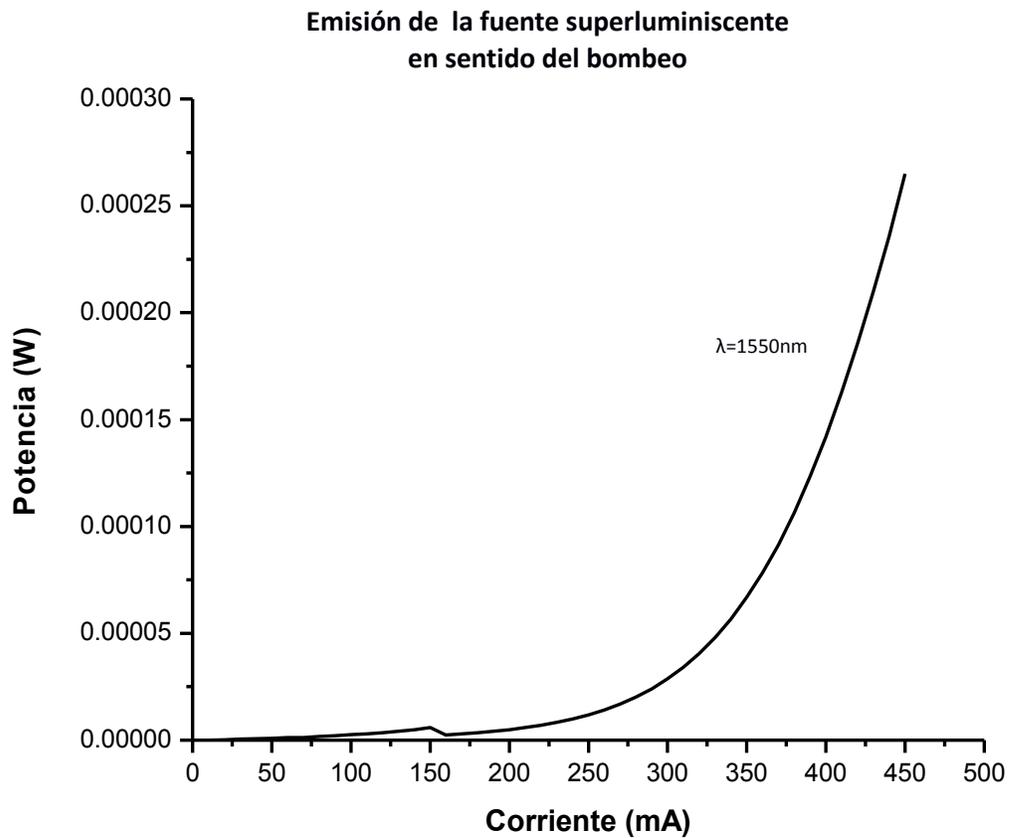


Figura 25. Curva característica de P^+ con una longitud pico a $\lambda=1550\text{nm}$

A continuación en la figura 26 se muestra la curva obtenida para la potencia de salida P :

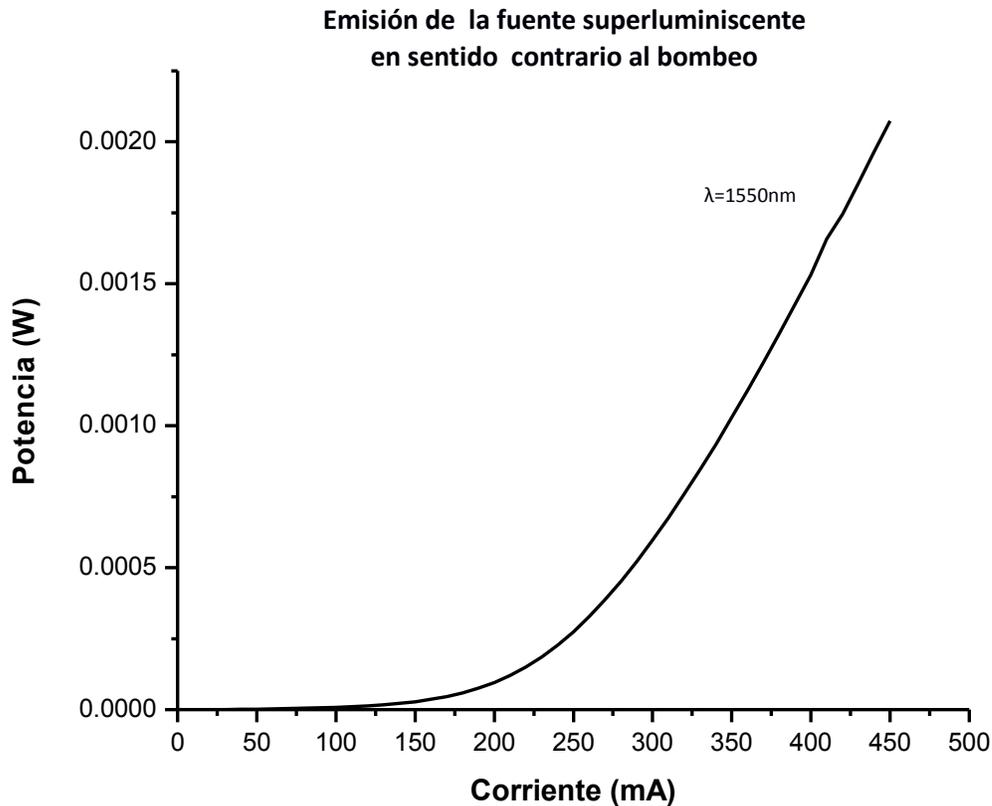


Figura 26. Curva característica de P con una longitud pico a $\lambda=1550\text{nm}$

Estas curvas son el resultado de la excitación de los iones de Erblio en la fibra dopada, los cuales producen una emisión espontánea, estas dos curvas fueron fijadas a 1550 nm, aunque cabe aclarar que el pico de nuestra fuente superluminiscente no es fijo conforme la potencia de bombeo se varia, la decisión de fijarla en 1550 nm es que este valor fue el más repetido dentro de nuestras mediciones.

Para asegurarnos de la longitud de onda fijada en el detector, usamos un Analizador de Espectros Óptico y realizamos una medida de la longitud de onda pico la cual se muestra en la figura 27.

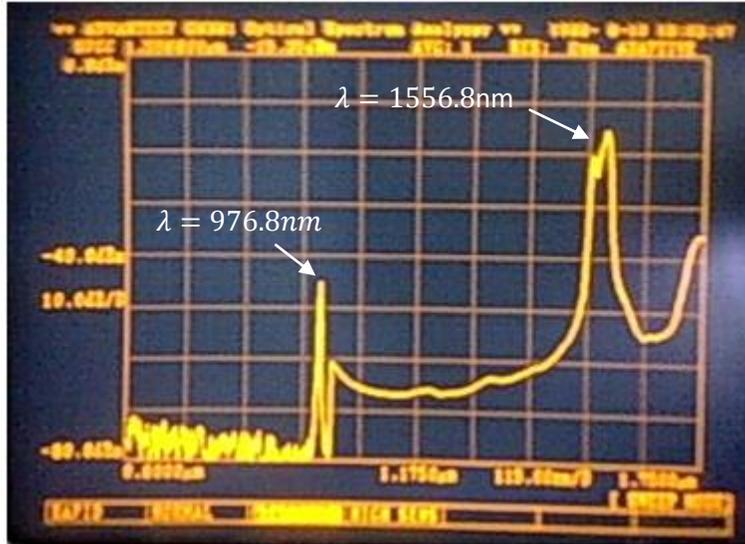


Figura 27 Espectro óptico a la salida de la fibra óptica dopada.

En la figura 27, vemos dos emisiones, la emisión a 976.8 nm corresponde a la fuente de bombeo, la cual es un diodo láser, la emisión con mayor magnitud que tiene una longitud de onda pico de 1556.8 nm, ésta señal es la emisión de amplificación espontánea producida por nuestra fuente superluminiscente.

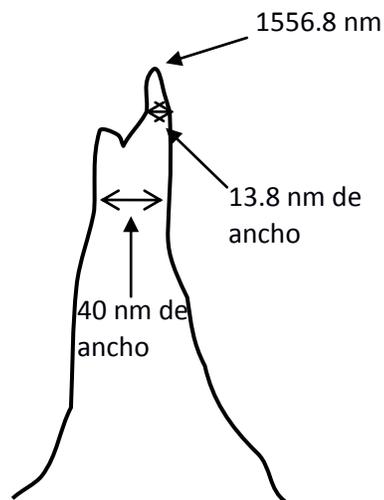


Figura 28. Esquema del espectro de la fuente superluminiscente

De la figura 28, podemos ver tenemos una pequeña fluctuación láser, la cual no afecta el funcionamiento de nuestra fuente superluminiscente, es claro que nuestra fuente de luz es simplemente una amplificación por emisión estimulada, ya que tiene un amplio ancho espectral característico de las fuentes superluminiscentes, la fluctuación láser puede deberse a que el WDM, este actuando como un resonador óptico en esa longitud de onda.

Conclusiones al capítulo 4

Los cálculos realizados para predecir la potencia de la fuente superluminiscente, simulan la potencia a diferentes longitudes de fibra óptica dopada y para diferentes potencias de entrada P_{in} , con estos cálculos además de esperar un valor de la potencia, podríamos predecir la longitud óptima para cada potencia de entrada.

Si observamos las figuras 19 y 20, las cuales corresponden a las potencias de salida de la fuente superluminiscente en sentido del bombeo y en sentido contrario respectivamente, se aprecia que la potencia $P_s^-(z, \lambda_i)$ es mayor a la potencia $P_s^+(z, \lambda_i)$, esto sucede porque, parte de la potencia que se dirige a la salida $P_s^+(z, \lambda_i)$ es reflejada y excita los iones activos de la fibra que producen una amplificación de emisión espontánea en sentido contrario a la fuente de bombeo.

Antes de implementar la fuente superluminiscente, fue necesario aprender a realizar empalmes de fusión, para asegurar un mejor desempeño del dispositivo. Después de realizar el empalme entre el diodo láser y el WDM, se verificó la potencia a su salida, donde las mediciones mostraron pérdidas más grandes de las esperadas, aunque la potencia obtenida era suficiente para excitar la fibra dopada con Erblio, así que no fue necesario realizar nuevamente el empalme. Una vez caracterizada la fuente de excitación la cual llamamos P_{in} , realizamos el empalme del WDM con la fibra óptica dopada con Erblio, la primera prueba para asegurarnos de que el empalme era funcionaba, fue bombear la fibra dopada ya que si ésta presenta una fluorescencia de color verde a lo largo de toda la fibra, esto significa que existe el fenómeno de emisión espontánea, lo cual así sucedió.

Ya implementada la fuente superluminiscente, se realizaron las mediciones de las potencias $P_s^+(z, \lambda_i)$ y $P_s^-(z, \lambda_i)$, una vez obtenidas las curvas, pude observar que la potencia de regreso $P_s^-(z, \lambda_i)$ es mayor en un orden de magnitud que $P_s^+(z, \lambda_i)$, que también se observa en la parte teórica, por otro lado las magnitudes calculadas en la parte teórica y las obtenidas experimentalmente son diferentes, esto se adjudica principalmente a pérdidas por empalme, las cuales resultaron ser grandes a la salida del WDM y seguramente son similares en el empalme entre el WDM y la fibra dopada con Erblio; otra razón posiblemente importante es que se hicieron suposiciones en varios datos de la fibra dopada con Erblio, aunque al intentar obtener estos valores no se obtuvo una magnitud similar a la experimental, pero, suponiendo una pérdida similar a la del láser a la salida del WDM que es una pérdida de 20 dB en el empalme entre el WDM y la fibra dopada, esto sugiere que la concentración de iones de Erblio en la fibra dopada es menor a la proporcionada por el fabricante y es alrededor de $N_T = 1.25 \times 10^{25}$ [iones/m³].

En el esquema de la figura 28, tenemos el espectro de la fuente superluminiscente, que tiene una pequeña fluctuación láser en el pico, probablemente debido a que los cortes realizados en el WDM estén funcionando como espejos y esto provoca una resonancia a esta longitud de onda, que no afecta el funcionamiento de la fuente superluminiscente ya que es claro que es una fuente de amplio ancho de banda.