



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Láser de fibra óptica WDM empleando un  
interferómetro Mach-Zehnder y un amplificador  
óptico de semiconductor

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero en Telecomunicaciones**

**P R E S E N T A**

David López Mata

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México

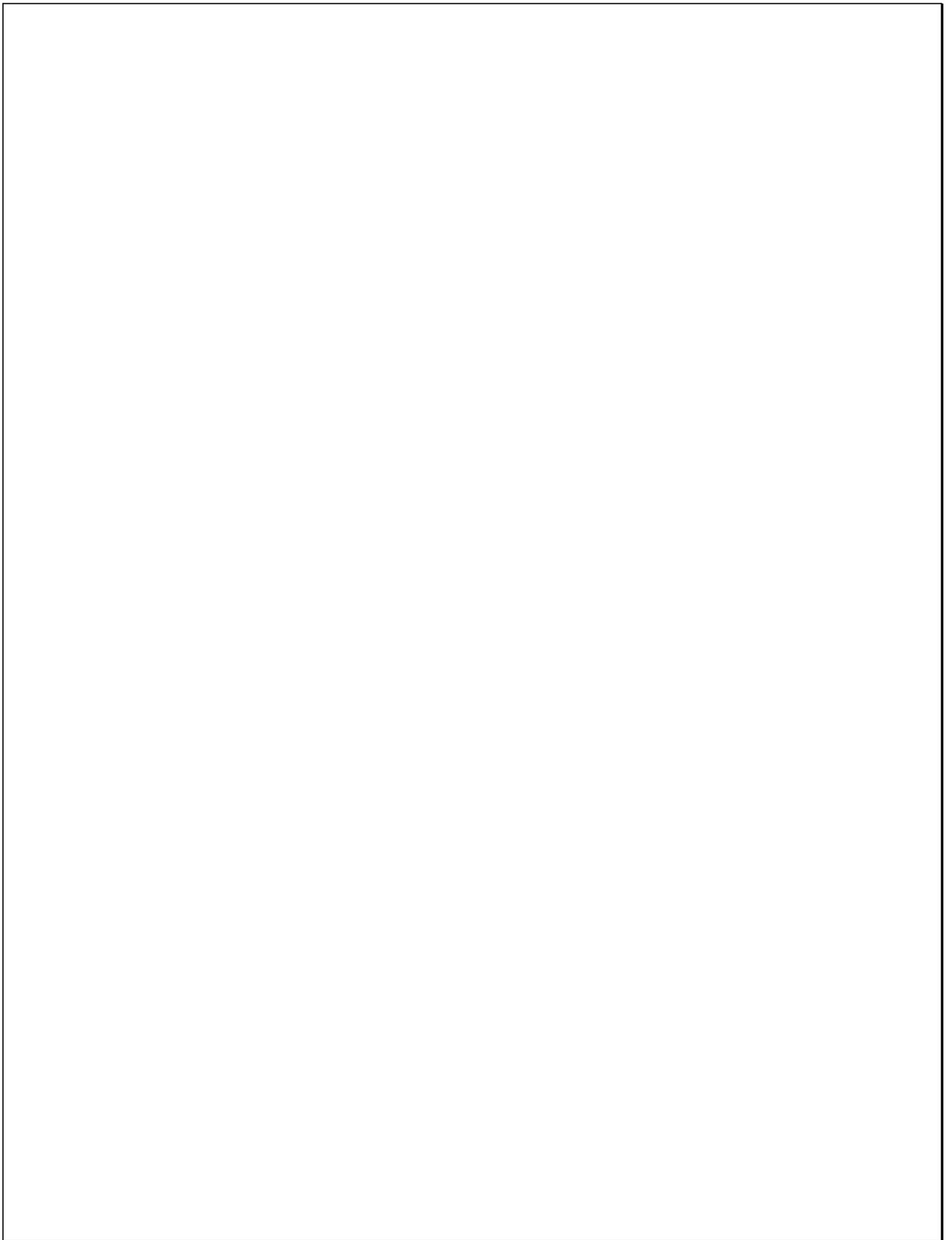


**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## **Dedicatoria**

A María Cristina Patricia López Mata<sup>†</sup>, quien toda su vida me enseñó que por medio del esfuerzo y trabajo constante es como se logran las cosas, que el estudio de una carrera ingenieril no es cosa sencilla pero tampoco imposible, quien siempre me guio por el buen camino y me ayudó en todo momento.

*“Esfuézate y sé valiente...”*

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi Dios y Señor, Jesucristo quien me dio, fe, esperanza y sabiduría para poder concluir con una etapa más en mi vida al terminar este presente trabajo escrito.

Doy gracias a la UNAM que me permitió estudiar en las aulas de la Facultad de Ingeniería.

Agradezco a mi asesor, el Dr. Daniel Ceballos quien me tuvo paciencia y me dirigió correctamente para lograr terminar este trabajo.

A la Dra. Carmen que me aconsejó y motivo para no renunciar al trabajo escrito.

A mis sinodales que dedicaron parte de su tiempo en la revisión y corrección del presente trabajo.

A mis familiares que siempre me apoyaron y estuvieron conmigo en los momentos más difíciles de mi carrera, brindándome su total apoyo y comprensión, gracias.

A mis amigos que me motivaron a seguir adelante.

## Prólogo

El presente trabajo de tesis fue realizado en el laboratorio de Telecomunicaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM en donde se propuso el diseño e implementación de un láser con emisiones multi-longitud de onda para ser empleados en sistemas WDM (Por sus siglas en inglés: Wavelength Division Multiplexing). Para ello se emplearon diversos dispositivos ópticos fundamentales para la obtención de múltiples emisiones láser a diferentes longitudes de onda.

Este trabajo propone el diseño de una fuente láser capaz de generar diferentes longitudes de onda en forma simultánea empleando un interferómetro Mach-Zehnder y un amplificador óptico de semiconductor incorporados dentro de la cavidad resonante de un láser de fibra óptica. Esta emisión láser multi-longitud de onda puede ser empleada como canales WDM y transmitir datos en cada uno de ellos a través de una misma fibra óptica en lugar de utilizar varios láseres separados tal como se realiza en la actualidad reduciendo los costos de implementación.

**Hipótesis:** Actualmente han empezado a surgir propuestas de esquemas láser para obtener emisiones multi-longitud de onda, siendo las más usadas los láseres de fibra óptica dopados con Erblio lo cual nos permitirá el desarrollo de nuevas fuentes multi-longitud de onda que se puedan emplear en los sistemas de comunicaciones ópticos de alta capacidad que operan dentro de las bandas C y L. Con base a lo anterior se plantea acoplar un interferómetro de tipo Mach-Zehnder y un amplificador óptico de semiconductor dentro de la cavidad resonante de un láser de fibra óptica dopada con Erblio para modificar su funcionamiento original y permitir la generación de múltiples longitudes de onda simultáneas.

**Objetivo:** Estudiar teórica y experimentalmente un láser de fibra óptica dopada con Erblio capaz de emitir al menos 3 longitudes de onda simultáneas y estables, que se encuentren dentro de las bandas de transmisión C y L designadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones para los sistemas de comunicaciones ópticos.

El presente documento está estructurado en 5 capítulos. En el primero se describe brevemente las características y funcionamiento de un láser. También se describen los procesos cuánticos que permiten la emisión láser tales como la absorción, emisión espontánea y emisión

estimulada. También se describe el principio de interferencia y como operan distintos tipos de interferómetros que se pueden emplear para modificar la emisión de un láser. En particular, se describe el interferómetro Mach-Zehnder (MZI, por sus siglas en inglés Mach-Zehnder Interferometer) en fibra óptica el cual será usado en la presente investigación. Posteriormente, en este mismo capítulo, se describe el funcionamiento de un amplificador óptico de semiconductor (SOA, por sus siglas en inglés Semiconductor Optical Amplifier), el cual se empleó en el presente trabajo.

En el segundo capítulo se describe el diseño propuesto de un láser de fibra óptica dopada con Erblio en cavidad de anillo para su implementación. También se describe como se introducen en el diseño un interferómetro Mach-Zehnder y un Amplificador Óptico de Semiconductor dentro de la cavidad de anillo con el propósito de obtener la emisión simultánea de múltiples longitudes de onda láser.

En el tercer capítulo se presentan los resultados de la implementación del láser de fibra óptica dopada con Erblio dividido en tres etapas clave:

1. La primera etapa que consiste en el análisis de un láser de fibra óptica con una cavidad en configuración de anillo para obtener una sola longitud de onda.
2. La segunda etapa que consiste en incorporar un MZI dentro de la cavidad láser y analizar cómo se modifica la emisión del láser para obtener múltiples longitudes de onda.
3. La tercera etapa que consiste en incorporar el MZI y el SOA dentro de la cavidad láser para analizar cómo se modifica la emisión del láser para obtener múltiples longitudes de onda con una mejor ecualización y que las emisiones sean estables.

Estas etapas de estudio muestran cómo se va modificando el diseño de un láser de fibra óptica para obtener desde una simple longitud de onda hasta la obtención de múltiples longitudes de onda dentro de la cavidad resonante.

Finalmente, en el cuarto capítulo se muestra el análisis de los resultados obtenidos, y en el quinto capítulo se mencionan las conclusiones a las que se llegó con la presente tesis, así como el trabajo a futuro que se podría desarrollar.

## Índice

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Prólogo .....	iii
Capítulo 1: Antecedentes.....	1
1.1 Láseres .....	1
1.2 Fibras ópticas .....	7
1.3 Fibra óptica dopadas con Erbio .....	7
1.4 Láseres de fibra óptica dopadas con Erbio .....	11
1.5 Interferómetro .....	14
1.6 Teoría de interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica .....	18
1.6.1 Aplicación del interferómetro Mach-Zehnder en láseres de fibra óptica.....	21
1.6.2 Sintonización de MZI.....	23
1.7 Teoría del Amplificador óptico de semiconductor .....	25
Capítulo 2: Diseño propuesto .....	30
Capítulo 3: Resultados experimentales .....	33
3.1 Etapa 1: Láser de fibra óptica dopada con Erbio en configuración de anillo .....	33
3.2 Etapa 2: Implementación del láser de fibra óptica con un MZI acoplado .....	34
3.3 Etapa 3: Implementación del láser de fibra óptica con un MZI y SOA acoplado .....	38
Capítulo 4: Análisis de resultados y conclusiones .....	46
Capítulo 5: Conclusiones y trabajo a futuro .....	48
5.1 Trabajo a futuro .....	48
Referencias .....	49
Anexo 1: Especificaciones del controlador de corriente y temperatura para diodos láser ...	51
Anexo 2: Especificaciones del diodo láser 980 nm 700mW .....	54
Anexo 3: Especificaciones la fibra dopada con Erbio (2m) ER80 4/125, 1530-1610 nm ...	59
Anexo 4: Especificaciones del acoplador WDM 980nm/1550nm .....	60
Anexo 5: Especificaciones del Acoplador 90/10.....	62
Anexo 6: Especificaciones del acoplador 50/50.....	63
Anexo 7: Especificaciones del amplificador óptico de semiconductor .....	64
Anexo 8: Especificaciones del aislador 1530-1570.....	69

## Capítulo 1: Antecedentes

### 1.1 Láseres

La palabra láser es un acrónimo de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation que en español quiere decir amplificación de luz radiación de emisión estimulada.

La emisión láser es una radiación de luz que, a diferencia de otras fuentes lumínicas (focos, LEDS, luz solar) el láser emite en una sola longitud de onda, por eso se dice que la emisión láser es monocromática, esta longitud de onda viaja únicamente en una sola dirección, además de que dicha radiación es coherente, es decir, su fase es conocida en cualquier punto y momento.

La conformación de cualquier tipo de láser es la siguiente, una cavidad resonante, un medio de ganancia el cual emite fotones al absorber energía y una fuente de bombeo el cual puede ser lumínico, eléctrico o químico tal como se puede observar en la Fig. 1.1.

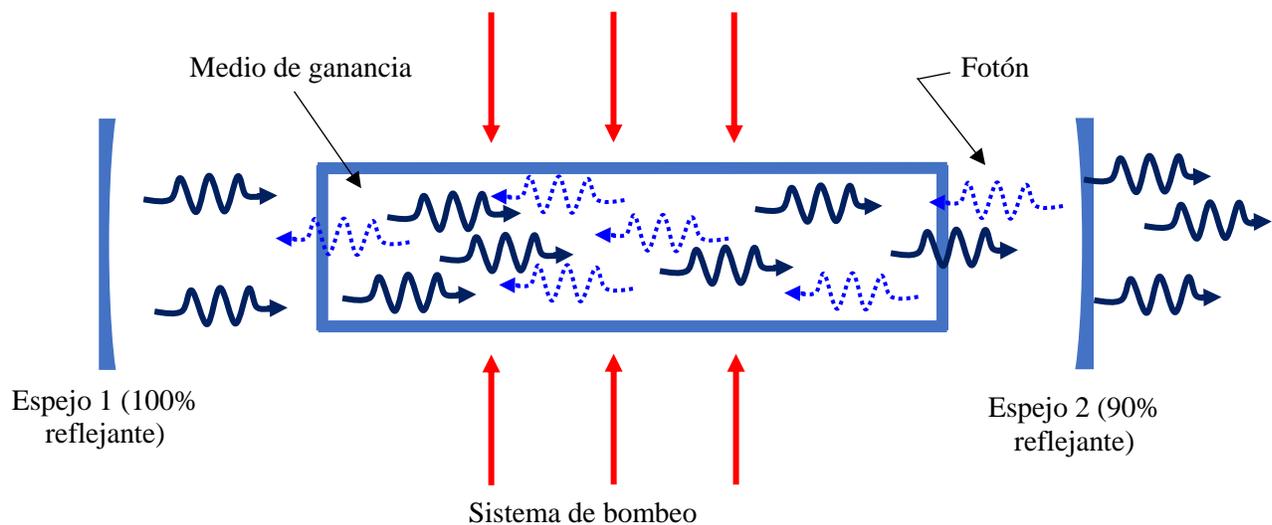


Figura 1. 1 Esquema de configuración básica de un sistema láser donde la cavidad resonante es formada por los espejos 1 y 2.

La cavidad resonante de un láser es un espacio que confina el medio activo de un láser, generalmente este medio activo está delimitado por dos espejos de alta reflectividad. La

cavidad resonante hará que los fotones emitidos en forma desordenada por el medio activo (también llamado medio de ganancia) se agrupen y alineen entre sí.

El medio de ganancia de un láser es donde se lleva a cabo la emisión de fotones, este medio puede ser sólido, líquido, gas o incluso plasma. Dependiendo del estado en el que se encuentre dicho medio activo se puede determinar las diferentes propiedades que puede llegar a tener la emisión láser, así como su aplicación.

La fuente de bombeo puede ser eléctrica, química, o lumínica, y es suministrada al medio de ganancia, lo cual permite excitar el medio activo produciendo fotones a través de emisión espontánea y emisión estimulada.

De acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica los átomos y moléculas tienen diferentes niveles de energía. Al inicio los átomos del medio de ganancia tienen todos sus electrones en el estado base, luego son excitados por el bombeo y ocupan niveles superiores de energía. Cuando estos vuelven a decaer a su estado base liberan energía en forma de fotones emitidos. A lo anterior se le conoce como interacción fotón-materia.

Cabe destacar que dentro de la interacción fotón-materia existe lo que se conoce como absorción, emisión espontánea y emisión estimulada.

Como se mencionó anteriormente, los materiales tienen distintos niveles energéticos en los cuales un electrón puede estar subiendo o bajando entre dichos niveles provocando diferencias energéticas entre cada cambio de nivel. Para poder explicar de una manera sencilla algunos de los procesos que se llevan a cabo en la interacción de un electrón y los niveles energéticos de algún material cualesquiera se asumirá que dicho material únicamente cuenta con dos niveles energéticos.

Comencemos con la absorción, que es el caso en donde un fotón se encuentra en su estado base, en este punto el fotón permanece en el estado base del material hasta que un estímulo externo se presente, el cual puede ser una onda electromagnética con una cierta frecuencia  $\nu$  la cual incide en el material y existe la probabilidad que este material absorba un fotón provocando que un electrón el cual se encuentra en un nivel base  $E_1$  se desplace a un nivel superior  $E_2$  como se puede apreciar en la Fig. 1.2.

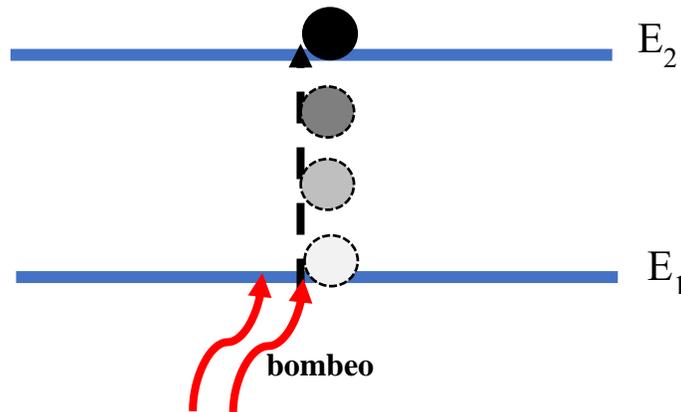


Figura 1. 2 Esquema del proceso de absorción.

Para poder describir la emisión espontanea debemos suponer que un electrón se encuentra en un nivel energético  $E_2$  y con el paso del tiempo este decae espontáneamente a un estado  $E_1$ . La cantidad de energía correspondiente a la diferencia que existe entre el estado  $E_2$  y el estado  $E_1$  se libera ya sea de forma no radiactiva (vibraciones atómicas o moleculares) o de forma radiactiva (emitiendo un fotón) como lo podemos ver en la Fig. 1.3. Lo anterior se le conoce como emisión espontánea. La energía correspondiente a dicho fotón emitido se puede saber gracias a la relación de Plank-Einstein

$$E = h\nu \text{ [J]} \quad (1.1)$$

Donde  $E$  es la energía total que existe entre los dos niveles de energía,  $h$  es la constante de Plank equivalente a  $6,62607015 \times 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}$  y  $\nu \left[ \frac{1}{s} \right]$  es la frecuencia de la onda que se libera.

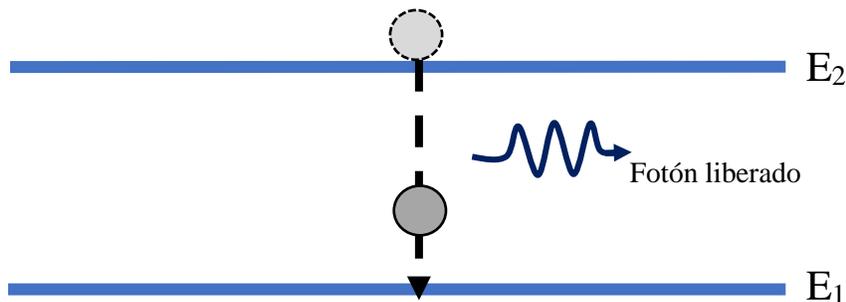


Figura 1. 3 Esquema del proceso de emisión espontanea.

Como sabemos, dentro del medio activo del láser existen átomos o partículas que están en estado base o de reposo y cuando se suministra el bombeo, este proporciona energía a los electrones del estado base excitándolos e incrementando su nivel energético los cuales

permanecerán en ese estado por un tiempo hasta que espontáneamente decaigan. Cuando decaen al estado energético más bajo se libera energía en forma de un fotón como se observa en la Fig. 1.4. Este primer fotón estimulará el decaimiento de los demás electrones excitados a su estado base, emitiendo por consecuencia más fotones con la misma longitud de onda y fase del fotón incidente. Repitiendo el proceso anterior en múltiples ocasiones se logra una cascada de fotones emitidos dentro del medio activo provocando una emisión estimulada que a la larga se convertirá en la luz láser.

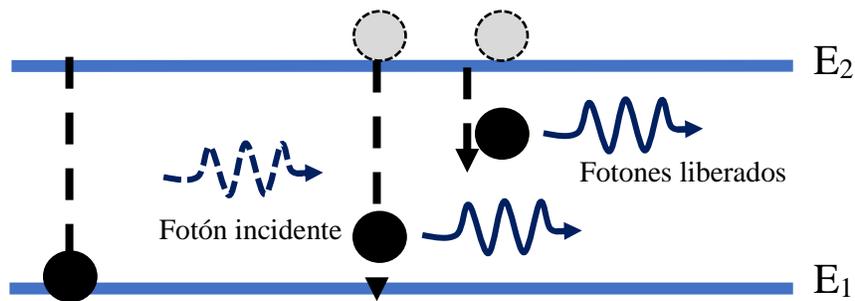


Figura 1. 4 Esquema del proceso de emisión espontánea.

Ahora que sabemos que existen estos tres diferentes procesos, podemos describir el funcionamiento de láser de la siguiente manera. Al inicio el bombeo excitará los electrones del medio activo para que luego se emitan en forma espontánea fotones a una cierta longitud de onda. Estos fotones serán emitidos en forma desordenada. Posteriormente, la cavidad resonante hará que estos fotones reboten y vuelvan a pasar por el medio activo para generar emisión estimulada y también servirá para que se agrupen en forma ordenada y unidireccional. Luego, una de las paredes de la cavidad al ser parcialmente reflectiva, permitirá la salida de la emisión láser dentro de la cavidad.

Como se mencionó anteriormente debido al tipo de medio de ganancia es el uso y propiedades que va a tener un láser, algunas de estas podemos verlas en la Tabla 1 [1].

Tabla 1 Características generales de los principales láseres existentes [1].

Láser	Medio activo	Rango de frecuencia de emisión	Régimen de emisión	Potencia de pico máxima (aproximada)	Aplicaciones
Helio-Neon	Gas	Rojo	Continuo	10 mW	- Meteorología - Lectores de códigos de barras
Ion de Ar	Gas	Verde-Azul	Continuo	10 W	- Bombeo - Espectáculos
CO2	Gas	Infrarrojo	Continuo o Pulsado	1 KW	- Corte - Soldadura - Cirugía
Excímero	Gas	Ultravioleta	Pulsado	1 MW	- Microprocesador - Cirugía
Químicos	Gas	Infrarrojo	Continuo	1 W	- Escudos antimisiles
Colorante	Líquido Sólido	IR-Visible-UV	Continuo o Pulsado	1 KW	- Espectroscopia
Rubí	Sólido	Rojo	Pulsado	1 KW	- Investigación - Bombeo
Neodimio: YAG	Sólido	Infrarrojo	Continuo o Pulsado	1 GW	- Procesado de materiales - Cirugía
Titanio: Zafiro	Sólido	Infrarrojo	Continuo o Pulsado	1 PW	- Investigación - Pulsos ultracortos - Comunicaciones
Semiconductor	Sólido	Infrarrojo – visible	Continuo	1 mW – 1 KW	- CD, DVD - Apuntadores - Bombeo
Fibra	Sólido	Infrarrojo – visible	Continuo o Pulsado	1 W – 1KW	- Procesado de materiales - Comunicaciones - Espectroscopia

Los láseres tienen diversas aplicaciones en la vida cotidiana pero ahora los que van a ser de interés para este tema serán aquellos que se usan en los sistemas de comunicaciones ópticas.

Los láseres son ampliamente usados en sistemas de comunicaciones basados en fibras ópticas, en donde se emplean longitudes de onda de emisión láser de 810 nm, 1310 nm y 1550 nm respectivamente. En particular, para comunicaciones ópticas se pueden utilizar láseres de fibra óptica dopados con Erbio, o láseres de semiconductor. Los láseres de semiconductor en comunicaciones ópticas se dividen a su vez en diodos láser FP (Fabry Perot) y diodos láser DFB (Distributed Feedback).

Una de las principales características que posee un diodo láser FP es que este puede emitir un rango de longitudes de onda con un ancho espectral amplio de alrededor de 5 nm, mientras que un DFB tiene un ancho espectral estrecho de alrededor de 0.05 nm (lo cual es altamente requerido en comunicaciones ópticas de alta velocidad) haciendo que estos últimos tengan un mayor costo. Como ejemplo, en la Fig. 1.5 se muestra un diodo láser FP y un diodo láser DFB encontrados comercialmente en el mercado para el área de telecomunicaciones ópticas.



**1310nm or 1550nm FP Laser - Coaxial Pigtail**

Model	LDM-a-F			
Price:	US\$89.99			
Parameter	Min.	Typ.	Max.	Note
Center Wavelength, $\lambda_c$ (nm)	1520	1550	1580	
Threshold Current, $I_{th}$ (mA)		10	20	CW, 25°C
Spectral Width, $\Delta\lambda$ (nm)		1	2	CW, $I_{op}=20mA$
Output Power, P (mW)		0.8	2.5	CW, $I_{th}+20mA$
Operating Voltage, $V_{op}$ (V)		1.1	1.5	CW, $I_{th}+20mA$
Rise/Fall Time, $T_r/T_f$ (ns)		0.3	0.7	CW, $I_{th}+20mA$
Monitor Current, $I_m$ (mA)	0.1	0.4		CW, $I_{th}+20mA$
Optical Isolation, Iso (optional) (dB)	30			25°C



**1310nm or 1550nm DFB Laser - Coaxial Pigtail**

Model	LDM-a-DC					
Price:	US\$104.00 US\$139.00					
Optical Characteristics						
Optical Output Power	$P_o$	mW	-	2.0	-	CW, $I_{op}=35mA$
			5.0	-	5.6	
Slope Efficiency	SE	W/A	0.08	0.1	-	-
Central Wavelength	$\lambda_c$	nm	1290	1310	1330	CW
			1530	1550	1570	
Spectral Width	$\Delta\lambda$	nm	-	0.1	1	CW, -20dB
Side Mode Suppression Ratio	SMSR	dB	30	40	-	
Rise/Fall Time	$T_r/T_f$	ns	0.3	-	0.7	
Monitor PD Capacitance	C	pF	-	-	10	$V_{oc}=5V, f=1MHZ$
Optical Isolation	Iso	dB	30	-	-	

Figura 1. 5 Comparativa de precio entre diodo láser FP y DFB [2].

En los láseres semiconductores como los mostrados en la figura anterior, el bombeo se suministra por medio de corriente eléctrica. El diodo está conformado por dos materiales semiconductores que forman una unión tipo PIN, el cual posee portadores positivos y negativos en los extremos de la unión. Lo anterior conforma el medio activo de estos tipos de láseres. El bombeo facilitará que los portadores negativos y positivos que se encuentran en el medio activo se acerquen entre sí para recombinarse. Durante la recombinación, los portadores negativos que se encuentran en niveles superiores de energía decaen hasta el nivel más bajo de energía (nivel base) donde se encuentran los portadores positivos y por consecuencia pierden energía. Dicha energía es liberada por el medio activo en forma de fotones. Por otro lado, la cavidad resonante en estos láseres semiconductores se forma haciendo que las paredes de los extremos del diodo sean reflejantes, haciendo que los fotones

generados reboten y atraviesen constantemente el medio activo para generar una emisión estimulada. La principal diferencia entre un diodo láser FP y un diodo láser DFB es la forma en cómo se diseña la cavidad resonante [3].

En el presente trabajo se analizará específicamente la emisión de un láser de fibra óptica para Telecomunicaciones. Para comprender el mecanismo de operación de estos láseres de fibra óptica se explicará a continuación algunos conceptos de fibra óptica requeridos para entender el funcionamiento de estos tipos de láseres.

## 1.2 Fibras ópticas

La fibra óptica es una guía de onda compuesta por un núcleo (core) de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), este puede ser en su forma pura o con algunos dopantes como puede ser el dióxido de Germanio ( $\text{GeO}_2$ ), este núcleo tiene un diámetro que puede ir desde los  $8\mu\text{m}$  hasta los  $50\mu\text{m}$ . El núcleo está recubierto por otra capa llamada revestimiento (cladding) que incluyendo el núcleo tiene un diámetro de  $125\mu\text{m}$ , conformando así la fibra óptica como se muestra en la Fig. 1.6. Es importante mencionar que el núcleo tiene un índice de refracción un tanto mayor que el del revestimiento.

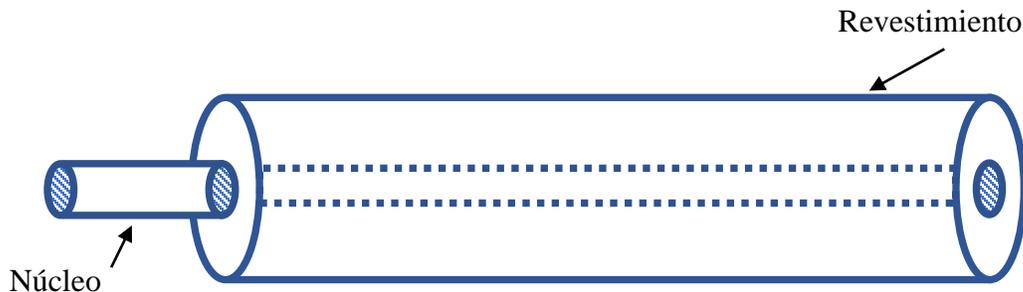


Figura 1. 6 Esquema básico de una fibra óptica.

## 1.3 Fibra óptica dopadas con Erbio

Las fibras ópticas pueden ser fabricadas con algunos dopantes para usos particulares, entre los dopantes más utilizados para la elaboración de estas fibras especiales podemos encontrar el Neodimio ( $\text{Nd}^{3+}$ ), Erbio ( $\text{Er}^{3+}$ ), Iterbio ( $\text{Yb}^{3+}$ ), Tulio ( $\text{Tm}^{3+}$ ), Holmio ( $\text{Ho}^{3+}$ ), Samario ( $\text{Sm}^{3+}$ ) y Praseodimio ( $\text{Nd}^{3+}$ ) [4], es muy importante destacar que únicamente el núcleo de las fibras es el que se dopa con alguna de estas tierras raras y no el revestimiento. Por otro lado, los iones de estas tierras raras que se encuentran en el núcleo de las fibras tienen la

propiedad de absorber luz a cierta longitud de onda. En el caso del Erblio, los electrones de los iones de esta tierra rara pueden absorber varios rangos de longitudes de onda, específicamente la longitud de onda de 980 nm, y con ello alcanzar un estado excitado, para luego decaer a un estado base y emitir una fluorescencia en un rango de longitudes de onda que va desde los 1500 nm a los 1600 nm, que justamente corresponde a la tercera ventana de transmisión de comunicaciones ópticas. Es por esto que las fibras dopadas con Erblio son las más utilizadas dentro de las telecomunicaciones. En la Fig. 1.7 se muestra el diagrama de niveles de energía de los átomos ionizados (iones) del Erblio y cómo es que estos iones emiten una fluorescencia alrededor de 1550 nm cuando decaen a niveles bajos de energía [4].

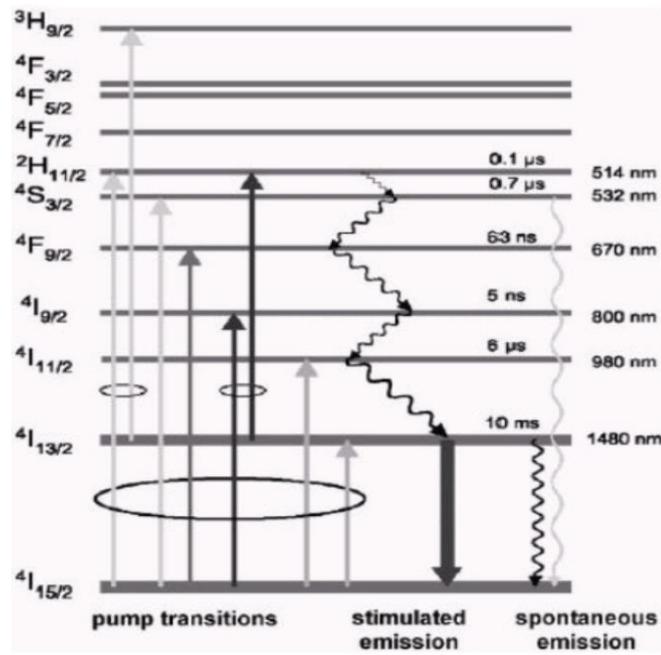


Figura 1.7 Diagrama de bandas de energía del Erblio [5].

Teóricamente, del proceso de emisión de una fibra dopada con Erblio podemos considerar dos niveles energéticos de algún material, la diferencia de densidad entre la población entre estos dos niveles está definida como:

$$N = N_2 - N_1 \tag{1.1}$$

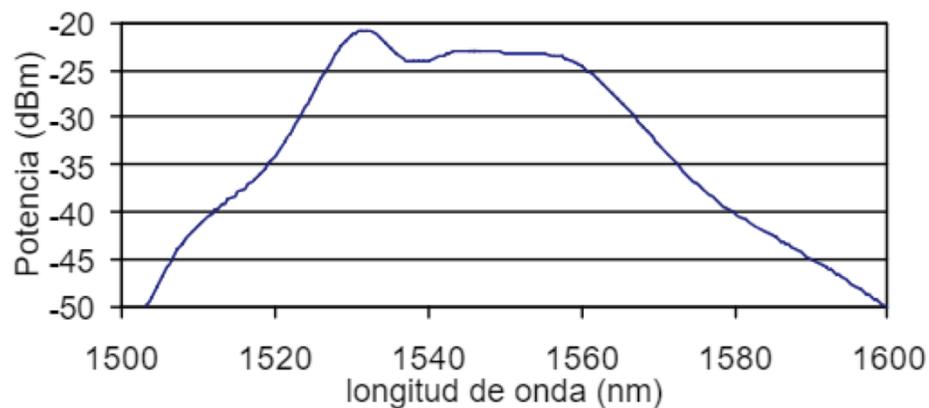
Donde se sabe que  $N_1$  es la población del estado base o primer nivel,  $N_2$  es la población del nivel energético superior o segundo nivel y  $N$  es la población total. Por tanto, si  $N > 0$  existe

una inversión de población y estamos hablando de un material activo, y esto significa que el material puede funcionar como amplificador.

Si  $N < 0$  el material no alcanza una inversión de población y no se podrá emitir fluorescencia.

Para el caso de fibras ópticas dopadas con Erblio, para obtener una emisión de fluorescencia alrededor de 1550 nm, se requiere aplicar un bombeo a la fibra con luz de longitud de onda de 980 nm. Los iones de Erblio absorberán dicha luz y los electrones de los iones del Erblio que estaban en su estado base se excitarán y empezarán a poblar el estado excitado de mayor energía, tal como se describe en la Fig. 1.7. Una vez que haya más electrones en el estado de mayor energía que en el estado base, se obtiene lo que se conoce como inversión de población. Alcanzado este estatus, los iones de Erblio comenzarán a decaer al estado base emitiendo fotones espontáneamente. También se requiere que la potencia de bombeo no sea muy baja, pues es necesario una potencia de bombeo umbral para obtener la inversión de población y hacer que la fibra dopada empiece a emitir fluorescencia alrededor de 1550 nm.

En la Fig. 1.8 se muestra una imagen típica de la fluorescencia de una fibra dopada con iones de Erblio.



*Figura 1. 8 Fluorescencia del Erblio [5].*

Además de introducir una fuente de bombeo a la fibra dopada con Erblio, se le introduce una señal de 1550 nm, cuyos fotones de 1550 nm estimularán el decaimiento de los electrones que están en un nivel de energía mayor hacia el estado base produciendo una emisión estimulada también a 1550 nm, y generando en consecuencia una amplificación de la señal

de 1550 nm a la salida de la fibra. Este principio es usado para desarrollar amplificadores de fibra óptica dopados con Erblio.

En el caso de láseres de fibra óptica dopada con Erblio, la fibra óptica dopada sería el medio activo y la luz de 980 nm sería el bombeo, y solo faltaría agregarle una cavidad resonante al sistema, lo cual se puede realizar tal como se describirá en la siguiente sección.

También es necesario mencionar que cuando se trabaja con fibra dopada con Erblio para implementar algún sistema láser en fibra es muy importante el considerar la longitud de la fibra dopada, ya que dicha longitud afecta directamente el umbral y la eficiencia de operación del láser [4]. En particular, si se aumenta la longitud de la fibra dopada, los fotones de 1550 nm emitidos por los iones de Erblio pueden volver a ser absorbidos por los mismos iones. Por otro lado, si la fibra dopada es muy corta, posiblemente no se tengan los suficientes electrones excitados en niveles superiores para generar una inversión de población y lograr emisiones en cascada a 1550 nm [6].

Las fibras dopadas con tierras raras como el caso del Erblio también se pueden utilizar para la fabricación de lo que se conocen como fuentes superluminiscentes en fibra o SFS por sus siglas en inglés (Superluminescent Fiber Source) las cuales son muy similares en construcción a los láseres de fibra óptica, pero con la diferencia que no cuentan con la cavidad resonante lo cual hace que estas fuentes tengan anchos espectrales muy amplios al igual que altas potencias. La misma fluorescencia de la fibra óptica dopada con Erblio mostrada en la Fig. 1.8, funciona por sí misma como una fuente superluminiscente.

Cuando se considera un láser de fibra dopado con Erblio, en realidad se tiene tres niveles, en donde los iones de Erblio pasan de un estado inicial  $N_1$  a un estado de mayor energía  $N_3$  donde no duran mucho tiempo, es decir, los iones decaen con gran rapidez a un nivel  $N_2$  y permanecen ahí un largo tiempo (los iones duran 8 microsegundos en el nivel 3 y 10 milisegundos en el nivel 2 para el caso de iones de Erblio), y es en ese momento cuando ocurre el fenómeno de inversión de población ya que los electrones se concentran mayormente en el nivel 2 y su población crece en dicho nivel con respecto al nivel del estado base tal como se ilustra en la Fig. 1.9.

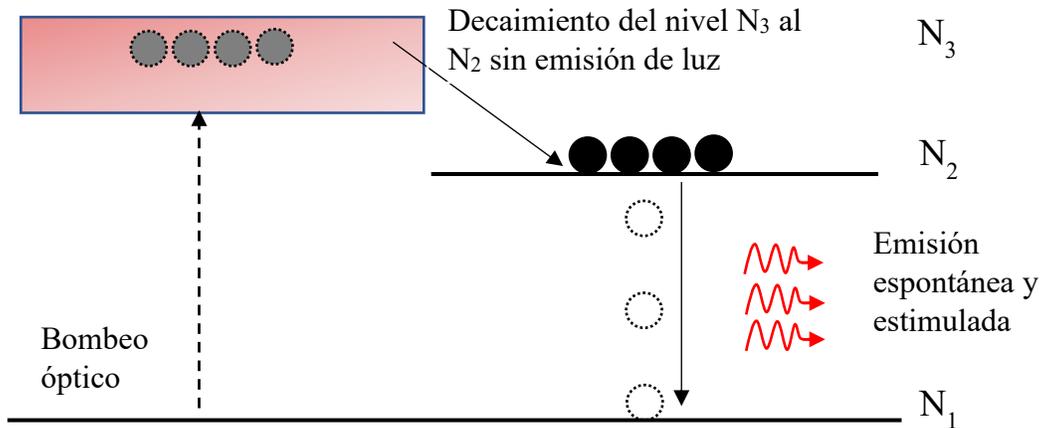


Figura 1. 9 Esquema láser de tres niveles.

### 1.4 Láseres de fibra óptica dopadas con Erblio

Para generar una emisión láser es muy importante el uso de una cavidad resonante o como también se le conoce, resonador óptico, el cual es un dispositivo el cual permite que un haz de luz circule a través de una ruta cerrada delimitada por dos espejos donde uno de ellos es parcialmente reflejante el cual se coloca a la salida de la cavidad resonante permitiendo que salga la energía óptica que se está amplificando continuamente entre dicha cavidad como podemos apreciar en la Fig. 1.10.

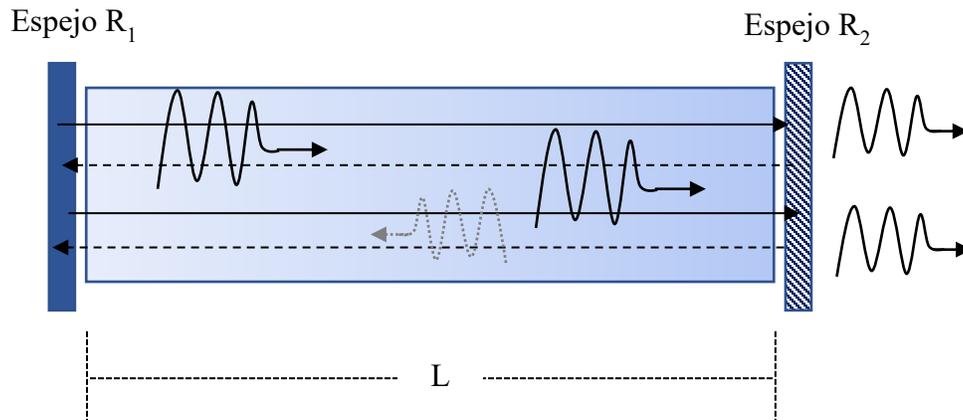


Figura 1. 7 Esquema de una cavidad resonante con un espejo totalmente reflejante R1 y otro espejo parcialmente reflejante en la salida denominado como R2.

Los resonadores ópticos se pueden realizar por medio de componentes ópticos de bloque como pueden ser espejos, ya sean curvos o lisos, y también se puede realizar un resonador a

través de una guía de onda, siendo este tipo de resonadores los más empleados en los láseres de fibra óptica. Existen diferentes implementaciones de los resonadores en fibra óptica como es la configuración lineal y la configuración de anillo. Para poder implementar un resonador en configuración lineal es necesario que la luz se encuentre rebotando entre dos espejos altamente reflejantes.

De los resonadores en configuración lineal más utilizado es el Fabry-Perot. Por su fácil configuración ya que se emplean espejos miniaturas en los extremos de la fibra dopada, los cuales previamente fueron pulidos o cortados perpendicularmente al eje de la fibra [6, 7].

Por otro lado, los espejos también pueden estar conformados por rejillas de Bragg, los cuales son elementos ópticos que permiten la reflexión de una sola longitud de onda [7]. La rejilla es seleccionada para reflejar la emisión láser a una longitud de onda deseada.

En la Fig. 1.11 podemos ver algunos ejemplos de configuraciones simples de resonadores lineales en fibras ópticas dopadas con tierras raras.

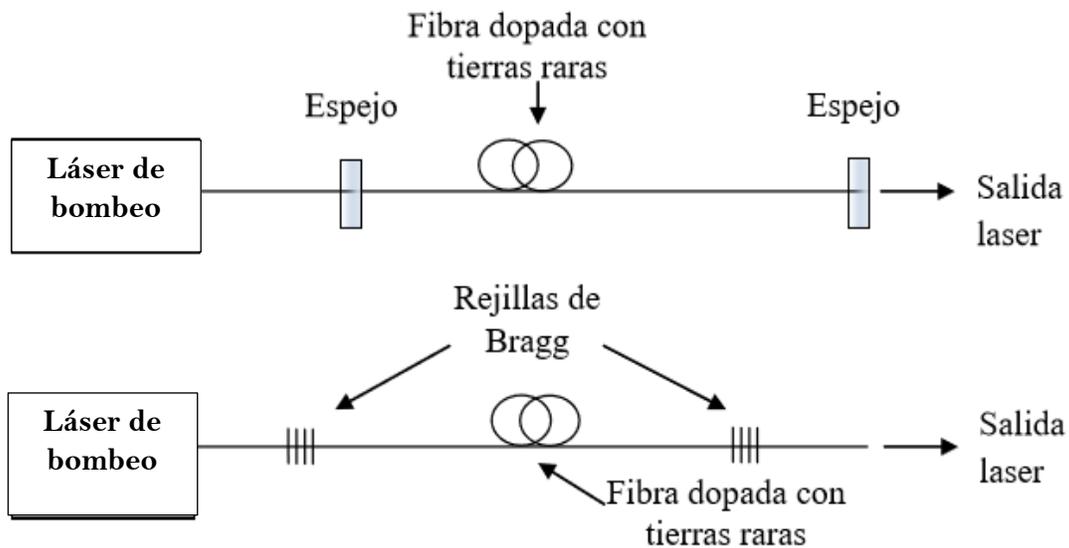


Figura 1. 11 Esquemas de resonadores lineales [4].

En este tipo de configuraciones, la fibra dopada con tierra rara es el medio de ganancia, el bombeo entra por un espejo y llega a la fibra dopada, posteriormente dicha fibra absorberá el bombeo y emitirá una fluorescencia. La fluorescencia saldrá por la fibra dopada en dos

direcciones, una de ellas rebotará en el espejo de entrada y regresará nuevamente pasando varias veces por el medio de ganancia y generando la emisión láser.

En la construcción de láseres de fibra óptica, el tipo de resonador que se utiliza comúnmente es el de anillo, es debido a su fácil implementación y que puede ser construido completamente en fibra. Para su implementación es necesario formar un lazo cerrado entre la fibra dopada y un acoplador, este se puede sustituir por un multiplexor por longitud de onda WDM por sus siglas en inglés (Wavelength Division Multiplexer) tal como se aprecia en la Fig. 1.12

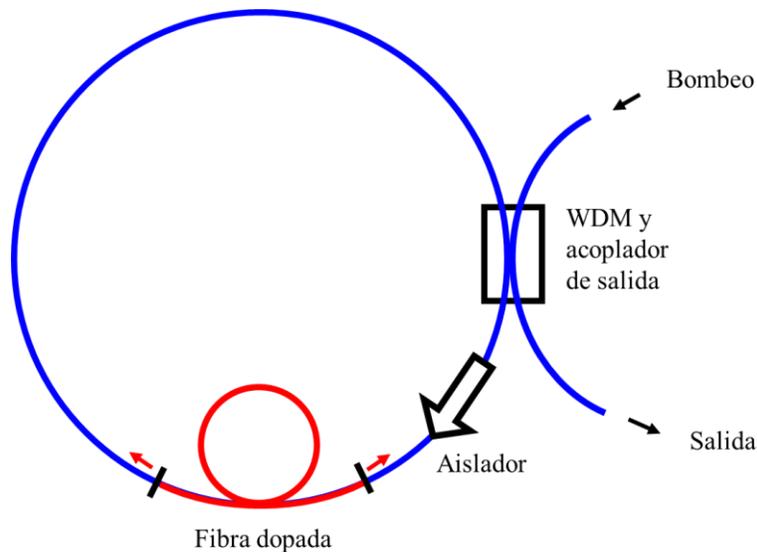


Figura 1. 8 Esquema de resonador en configuración de anillos.

El bombeo entra a la cavidad láser por el acoplador y este al llegar a la fibra dopada con Erblio es absorbido. Esta absorción emite fluorescencia alrededor de 1550 nm la cual circula en dos direcciones como lo indican las flechas rojas, el aislador permite que únicamente circulen en una sola dirección los fotones emitidos y estos a su vez pasen varias veces por el medio de ganancia permitiendo que se lleve a cabo la emisión láser.

Entre algunas de las diferencias más importantes que tienen los resonadores ópticos en configuración lineal y los de configuración de anillo se encuentran que en los resonadores lineales la luz puede circular en dos diferentes direcciones mientras que en un resonador en anillo únicamente la luz viaja en una sola dirección debido al aislador que posee.

Las fibras ópticas dopadas con tierras raras tienen un rol importante en el desarrollo de los láseres hoy en día y existen también dispositivos basados en fibra dopada que son compatibles con la infraestructura de fibra óptica que se encuentra alrededor del mundo.

### 1.5 Interferómetro

La interferencia óptica es un efecto físico que ocurre cuando dos o más haces de luz se encuentran en superposición produciendo un patrón de franjas intensas y oscuras. Para ello, es necesario o indispensable que se cumplan tres condiciones para que la interferencia pueda ocurrir.

- 1) Requiere que exista un traslape en el espacio y tiempo de los dos campos luminosos.
- 2) Que ambos haces de luz sean coherentes. La coherencia se refiere a que se puede conocer la fase del campo eléctrico en diferentes momentos o en diferentes posiciones del frente de onda de la luz.
- 3) El estado de polarización de dichas ondas traslapadas no debe ser ortogonales entre sí.

El fenómeno de interferencia se puede observar de una manera práctica con el experimento de Thomas Young (1773 – 1829) el cual consistió en hacer incidir 2 haces de luz en una misma zona de una pantalla, generando con ello un patrón de franjas lumínicas denominado patrón de interferencia tal como se observa en la Fig.1.13.



*Figura 1.13 Patrón de interferencia observado sobre una pantalla debió a la superposición de dos ondas, visto desde un cierto ángulo.*

Los dos haces que se emplearon en dicho experimento fueron producidos por una misma fuente, cuya luz incidía sobre una placa oscura con dos ranuras, las cuales dividían la fuente de luz original en dos fuentes de luz coherentes los cuales continuaban propagándose en el aire hasta superponerse sobre una pantalla colocada posterior a la placa.

La interferencia observada en la Fig. 1.13 se describe con la siguiente fórmula [8]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1.2)$$

Donde  $I_1$  e  $I_2$  es la intensidad de luz de las dos ondas por separado, y  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  son las fases de las dos ondas que se superponen entre sí. Cuando la diferencia de fase  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  de las dos ondas que se superponen es múltiplo par de  $2\pi$  existe interferencia constructiva (Franjas Brillantes), mientras que si dicha diferencia de fase es múltiplo impar de  $\pi$ , se tiene interferencia destructiva que se traduce en una disminución de la intensidad de la luz (Franjas Oscuras). En ambos casos la energía se conserva ya que los máximos y mínimos de la intensidad óptica al ser sumados es igual a la intensidad del haz original con que fueron producidos los dos haces que se superponen.

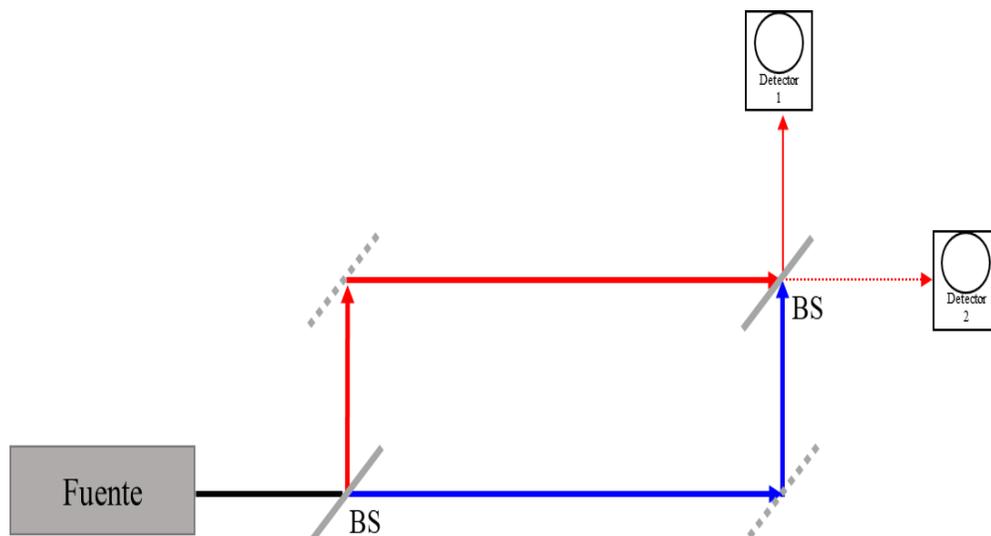
Los dispositivos que ocupan el principio de interferencia óptica para su funcionamiento se les conoce comúnmente como interferómetros. Un interferómetro es un dispositivo óptico que tradicionalmente inicia con un haz de entrada el cual se separa en dos empleando un espejo parcialmente transmisor. Estos haces pueden viajar diferentes trayectorias con diferente longitud y luego se vuelven a recombinar empleando otro espejo parcialmente transmisor o un divisor de haz.

Los interferómetros tienen múltiples usos hoy en día, se usan para medir desde distancias con una precisión sumamente exacta, del orden de la longitud de onda de la luz utilizada. También se pueden utilizar para medir desde cambios muy leves en las superficies ópticas y evaluar si una superficie es perfectamente plana, así como también se pueden medir rotaciones, y también permite modular la potencia o fase de una emisión láser para un sistema de comunicaciones ópticas, etc.[9].

Entre los interferómetros más utilizados están el interferómetro Mach-Zehnder (MZI). Este fue desarrollado por Ludwig Mach y Ludwig Zehnder 1891-1892 [10], el cual funciona mediante dos divisores de haz (BS, Beam Splitters). El primero separa un haz incidente en

dos haces que recorrerán caminos con diferente trayectoria y longitud, para posteriormente ser recombinados empleando un segundo divisor de haz. La superposición de los dos haces es monitoreada con dos fotodetectores, tal como se muestra en la Fig. 1.14. La trayectoria que siguen los haces divididos puede ser casi idéntica entre sí o pueden diferir por una pequeña diferencia. Esta diferencia de trayecto produce un desfase entre las dos ondas generando un máximo o un mínimo de potencia detectada en ambos fotodetectores. La potencia óptica en la salida de cada uno de los brazos se distribuye de acuerdo a la fórmula de interferencia dada en la ecuación (1.2) [10]. Entonces, la distribución de potencias ópticas en las dos salidas del interferómetro dependerá en la diferencia que existe entre la distancia de los brazos ópticos del interferómetro así mismo como de la longitud de onda de la luz empleada.

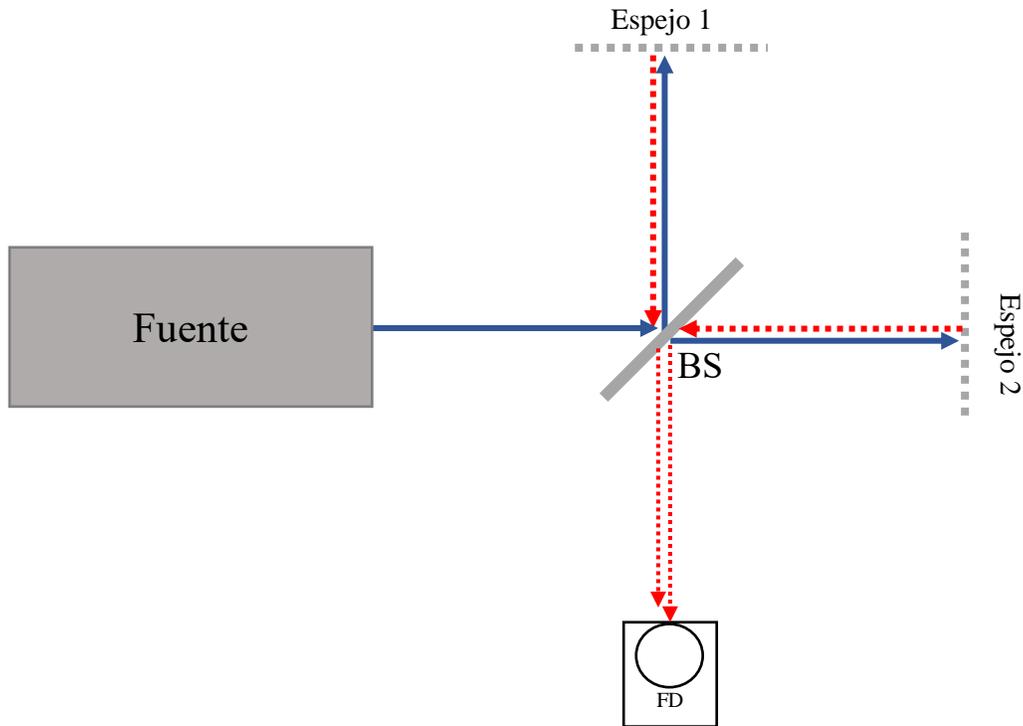
Lo atractivo de los interferómetros Mach-Zehnder es que pueden integrarse monolíticamente con otros componentes en sustratos semiconductores como el silicio, haciéndolo muy útil en la integración en un sistema láser semiconductor[11].



*Figura 1.14 Esquema de un interferómetro Mach-Zehnder.*

El interferómetro de Michelson, el cual lo diseñó Albert Abraham Michelson[11], consiste en usar un solo divisor de haz (BS) para separar y recombinar los haces. Este cuenta con dos espejos alineados de tal manera que el haz dividido tenga una incidencia exactamente

perpendicular generando que este interferómetro únicamente tenga una sola salida y una alimentación óptica, tal como se puede observar en la Fig. 1.14.

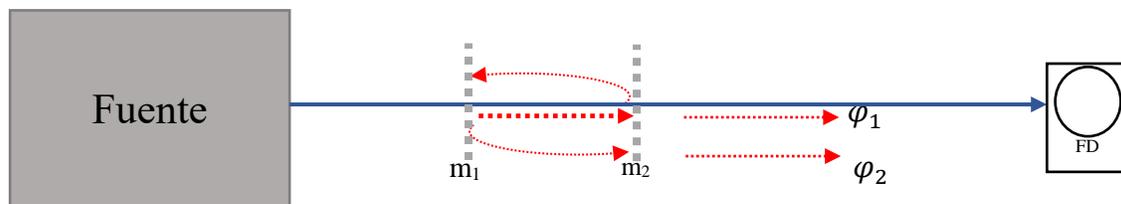


*Figura 1.14 Esquema de un interferómetro de Michelson donde se expresa la trayectoria del haz y su alimentación óptica.*

Si la diferencia entre la longitud de la trayectoria es diferente de cero, la interferencia constructiva o destructiva se puede lograr con un ancho de banda óptico finito, Michelson originalmente utilizó para su interferómetro una fuente de luz de amplio espectro así que él tuvo que construir un interferómetro con una diferencia entre la longitud de los brazos cercana a cero.

Por otro lado, el interferómetro Fabry-Perot consiste en dos espejos semi-reflejantes, de preferencia con ambos espejos teniendo el mismo coeficiente de Reflectividad Fig.1.15. Dicho coeficiente puede ser de 90%, 95% o 99%. La onda que proviene de la fuente láser entrará a la cavidad formada entre los dos espejos y estará rebotando en su interior varias veces. La fase de la luz que atraviesa una sola vez la cavidad está dada por  $\varphi_1 = \frac{2\pi \cdot n}{\lambda} \cdot L$ , mientras que el haz que sale de la cavidad después de rebotar en su interior 2 veces tiene una

fase  $\varphi_2 = \frac{2\pi \cdot n}{\lambda} \cdot 2L$ , siendo  $n$  el índice de refracción del material que está dentro de la cavidad, y  $\lambda$  es la longitud de onda de la fuente de luz utilizada. Si empleamos luz con una longitud de onda  $\lambda$  fija, entonces la diferencia de fase entre los dos haces que interfieren a la salida  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \left(\frac{2\pi \cdot n}{\lambda} \cdot L\right) - \left(\frac{2\pi \cdot n}{\lambda} \cdot 2L\right) = -\frac{2\pi \cdot n}{\lambda} \cdot L$  dependerá solo de la longitud de la cavidad  $L$ . En el caso de que se esté empleando una fuente de amplio espectro, es decir, con un rango de longitudes de onda por ejemplo de 1500nm a 1530nm, entonces, solo las longitudes de onda que hagan que el desfase  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  sea múltiplos pares de  $2\pi$  son las que tendrán la máxima intensidad a la salida en el fotodetector.



*Figura 1.15 Esquema de un interferómetro Fabry-Perot, donde  $m_1$  y  $m_2$  son espejos parcialmente reflejantes.*

Usualmente el haz de entrada de un interferómetro Fabry-Perot es de un diámetro menor que el de los modos de resonancia que puede tener la cavidad resonante dada por la separación de los espejos [11].

Como se sabe es posible adaptar todos los interferómetros anteriormente mencionados en fibra óptica empleando acopladores ópticos en lugar de divisores de haz. Sin embargo, se presenta una dificultad que consiste en que la polarización de la luz se modifica constantemente a lo largo de la fibra, pero esto se puede mejorar utilizando un control de polarización o fibras especiales que mantengan el estado de polarización de la luz en su interior.

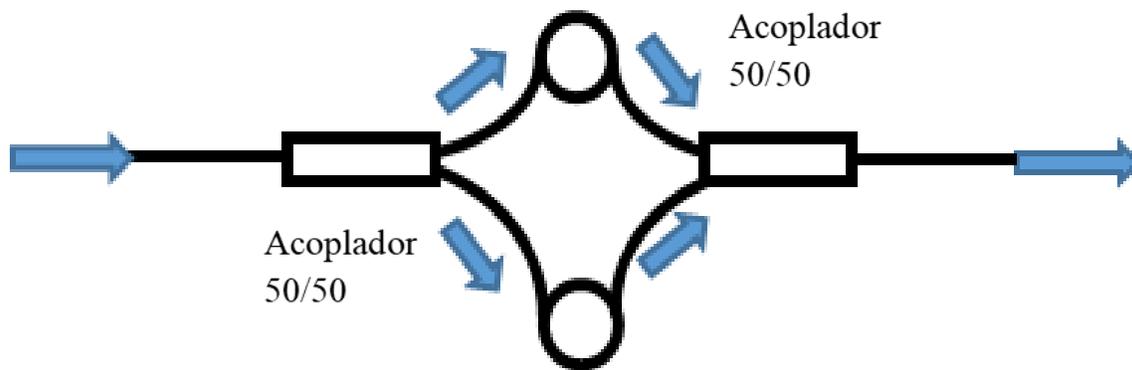
Dependiendo de la aplicación del interferómetro puede emplearse una fuente de luz de amplio espectro o de espectro angosto.

### **1.6 Teoría de interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica**

La interferencia entre dos haces de luz proviene del desfase que puedan tener estos al ser recombinados nuevamente. Si el desfase producido es múltiplo par de  $2\pi$  se producirá un

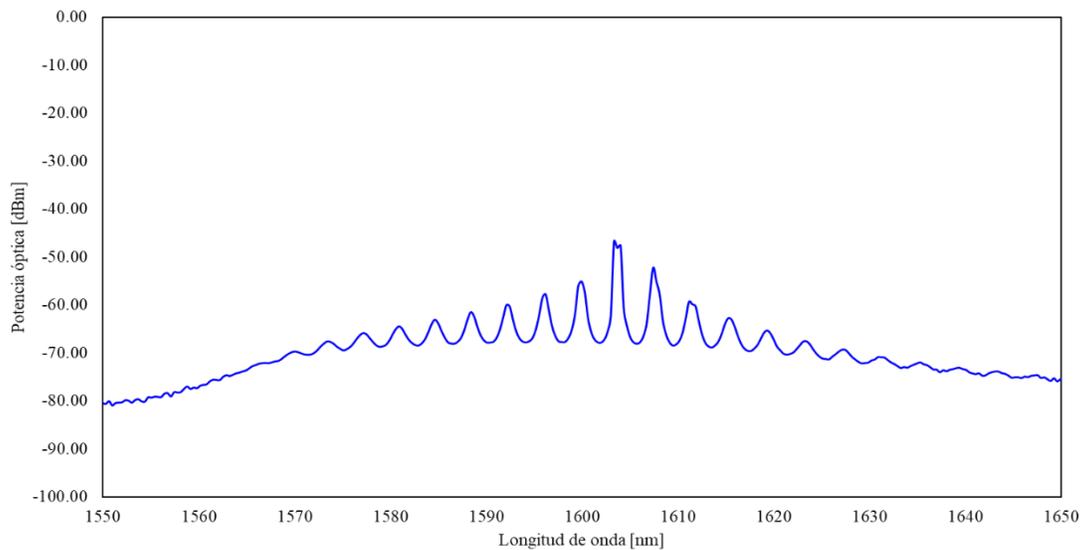
máximo en nuestra señal mientras que si el desfase corresponde a un múltiplo impar de  $\pi$  tendremos un mínimo en la señal, tal como lo sugiere la ecuación (1.2)

El interferómetro Mach Zehnder de fibra óptica (MZI, por sus siglas en inglés Mach-Zehnder Interferometer) que en particular se utilizó para este trabajo está construido por dos acopladores 50/50 de fibra óptica que dividen la luz a la mitad (también llamados splitters 50/50). Las dos salidas del primer acoplador serán las entradas del segundo acoplador formando así los brazos del interferómetro como se muestra en la Fig. 1.16. La interferencia se obtiene después del segundo acoplador que es donde se superpondrán los dos haces de luz.



*Figura 1.16 Interferómetro Mach-Zehnder en fibra óptica formado por dos acopladores 50/50.*

En la entrada del primer acoplador se puede introducir una fuente de luz con amplio espectro como el de la fluorescencia de una fibra dopada con Erblio (mostrado en la Fig. 1.17) cuyo rango de longitudes de onda van de 1500nm a 1600nm. Luego dicha luz se divide en dos partes iguales y ambas se propagan en diferentes brazos del interferómetro hasta llegar al segundo acoplador 50/50. Si un brazo del interferómetro mide  $L_1$  y el otro mide  $L_2$ , el desfase de las dos haces de luz que llegan al segundo acoplador será de  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \left(\frac{2\pi \cdot n}{\lambda} \cdot L_1\right) - \left(\frac{2\pi \cdot n}{\lambda} \cdot L_2\right) = \frac{2\pi \cdot n}{\lambda} \cdot \Delta L$ , donde  $\Delta L = L_1 - L_2$  es la diferencia de longitud de los dos brazos del interferómetro. A la salida del segundo acoplador se pueden obtener interferencias típicas como las observadas en la Fig. 1.17 que corresponde al caso de haber empleado una fuente de luz con amplio espectro como la fluorescencia de una fibra óptica dopada con Erblio.



*Figura 1. 17 Interferencia debida al uso de una fuente de amplio espectro.*

En la figura anterior, se pueden observar máximos y mínimos de intensidad de luz que ocurren a diferentes longitudes de onda dentro del espectro de la fluorescencia de la fibra dopada con Erblio. Las longitudes de onda que tienen máximos de intensidad hacen que el desfase  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi \cdot n}{\lambda} \cdot \Delta L$  a la salida del segundo acoplador tenga un valor múltiplo par de  $2\pi$ . Por lo tanto, cuando incorporamos una fuente de amplio espectro como es el caso de la fluorescencia de una fibra dopada con Erblio vemos que su señal es modificada y se pueden ver los máximos y mínimos formando oscilaciones en la señal de salida del interferómetro.

El campo de desarrollo de los interferómetros basados en fibra óptica ha sido de gran interés en las últimas décadas, es por eso por lo que este tipo de dispositivos ha marcado la pauta para la generación de sensores ópticos [12].

Estos dispositivos son muy atractivos debido a que son realmente fáciles de fabricar, son muy sensibles para detectar cambios en el índice de refracción causados por cambios en temperatura y presión sobre la fibra. Igualmente, este tipo de dispositivos son muy utilizados en dispositivos WDM [13].

### 1.6.1 Aplicación del interferómetro Mach-Zehnder en láseres de fibra óptica

El interferómetro Mach-Zehnder (MZI) como una típica estructura de interferencia óptica ha sido de gran interés para las aplicaciones de dispositivos ópticos y fotónicos [14] debido a sus potenciales aplicaciones en el campo de las comunicaciones ópticas y sensores [15, 16].

Generalmente en los láseres de fibra óptica se emplean rejillas para implementar los interferómetros Mach-Zehnder. Estas rejillas pueden ser de periodo largo uniforme, no uniforme, inclinadas o de corrimiento de fase como se muestra en la Fig. 1.18.

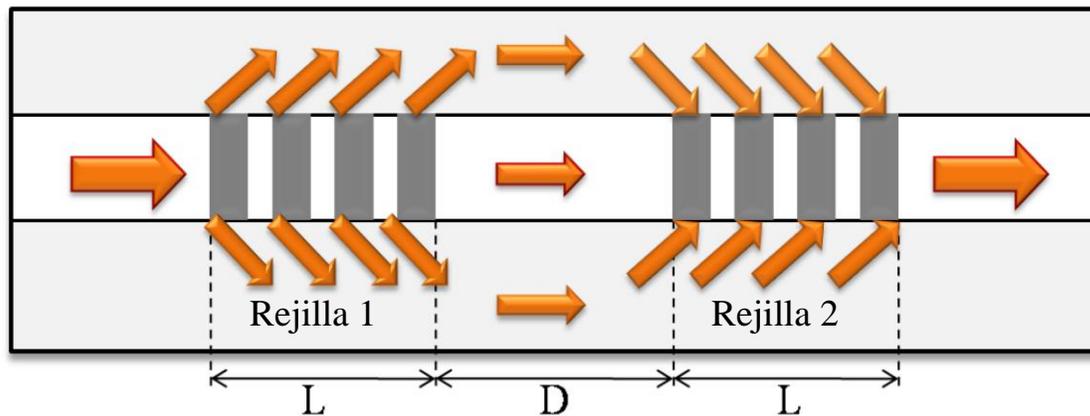


Figura 1. 18 interferómetro MZI formado por dos rejillas de periodo largo [10].

Las rejillas de periodo largo uniforme son rejillas que tienen sus planos perpendiculares y paralelos al eje longitudinal de la fibra, y son generalmente de periodo constante. Este tipo de rejilla acopla la luz del modo de propagación fundamental que viaja en el núcleo con los modos del revestimiento de la fibra, es decir, transfiere un poco de la intensidad lumínica que viaja en el núcleo al revestimiento (ver Rejilla 1 de la Fig. 1.18). La segunda rejilla volverá a introducir la luz que estaba propagándose en el revestimiento nuevamente hacia el núcleo. Justo en ese punto habrá una superposición de dos haces, uno que viajaba en el núcleo y otro que viajaba en el revestimiento. El desfase entre estas dos ondas es producido por una diferencia del índice de refracción entre el núcleo y revestimiento. Es decir,  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \left(\frac{2\pi \cdot n_1}{\lambda} \cdot L\right) - \left(\frac{2\pi \cdot n_2}{\lambda} \cdot L\right) = \frac{2\pi \cdot L}{\lambda} \cdot \Delta n$ , donde  $\Delta n = n_1 - n_2$  es la diferencia de índice de refracción del núcleo y revestimiento respectivamente.

Por otro lado. Si se emplea nuevamente una fuente de amplio espectro, solo las longitudes de onda que hagan que el desfase de las dos ondas sea múltiplos pares de  $2\pi$  tendrán máximos de intensidad obteniendo una señal como se muestra en la Fig. 1.19.

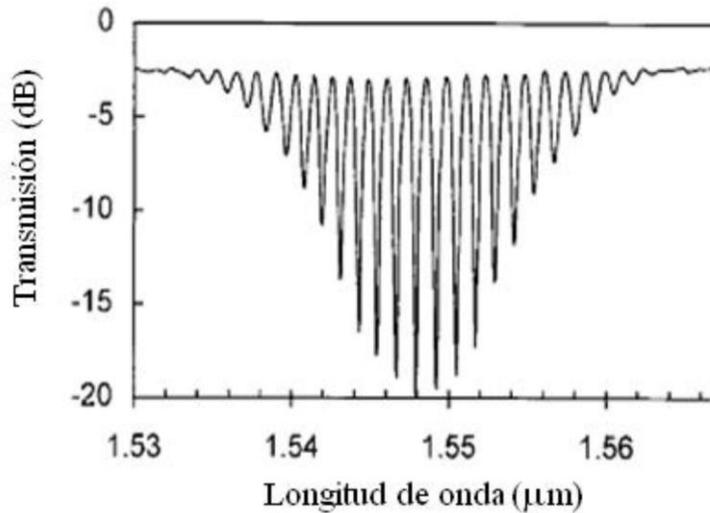


Figura 1. 19 Espectro de transmisión que presentan máximos y mínimos de intensidad en ciertas longitudes de onda [12].

Los interferómetros también se pueden fabricar usando dos “tapers” (adelgazamientos controlados a lo largo de la fibra óptica) como se muestra en la Fig. 1.20, este tipo de interferómetro es relativamente sencillo de implementar ya que los adelgazamientos se realizan con ayuda de una empalmadora de fusión por arco eléctrico.

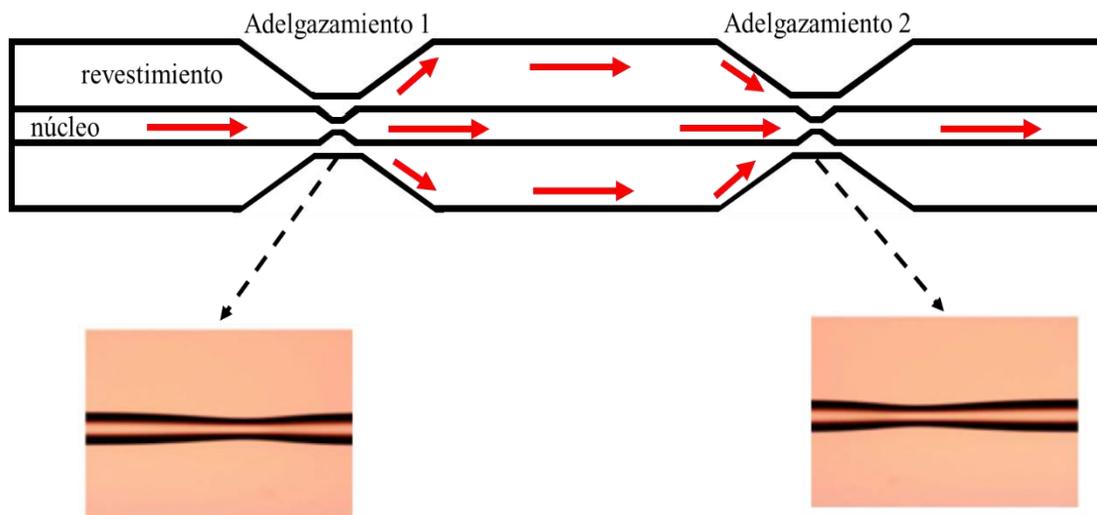


Figura 1. 20 Interferómetro Mach-Zehnder empleando adelgazamientos controlados como divisores de potencia.

Para realizar los adelgazamientos basta con calentar la fibra con el arco eléctrico y estirla paulatinamente procurando no ejercer demasiada tensión para romper la fibra.

En este tipo de interferómetro, la luz que sale en el primer adelgazamiento se divide en dos partes iguales, viajando una parte en el núcleo de la fibra y la otra parte en el revestimiento hasta llegar al segundo adelgazamiento donde se vuelven a juntar superponiéndose y generando una interferencia.

Al emplear este tipo de interferómetros es recomendable mantener el tramo donde están los adelgazamientos encapsulados o cubiertos para evitar perturbaciones externas a la de la luz que viaja en su interior ya que tiende a ser demasiado sensible a cambios externos que pueden afectar su comportamiento.

### 1.6.2 Sintonización de MZI

Existen muchas maneras de sintonizar una señal mediante un MZI implementado por fibra ya que como se sabe este tipo de dispositivos es extremadamente sensible al cambio de temperatura, tensión y torsión e incluso a la polarización de la fibra por lo tanto resultan de gran utilidad al implementarse como sensores.

En la Fig. 1.21 se muestra el cambio que presenta el espectro de transmisión que sufre un interferómetro de fibra óptico al ser sometido a cambios de temperatura, en donde se llevó en un ambiente controlado de temperaturas de los 22°C hasta los 90°C donde se pudo observar que el espectro completo de transmisión se desplaza hacia longitudes de onda mayores (hacia la derecha) conforme aumenta la temperatura.

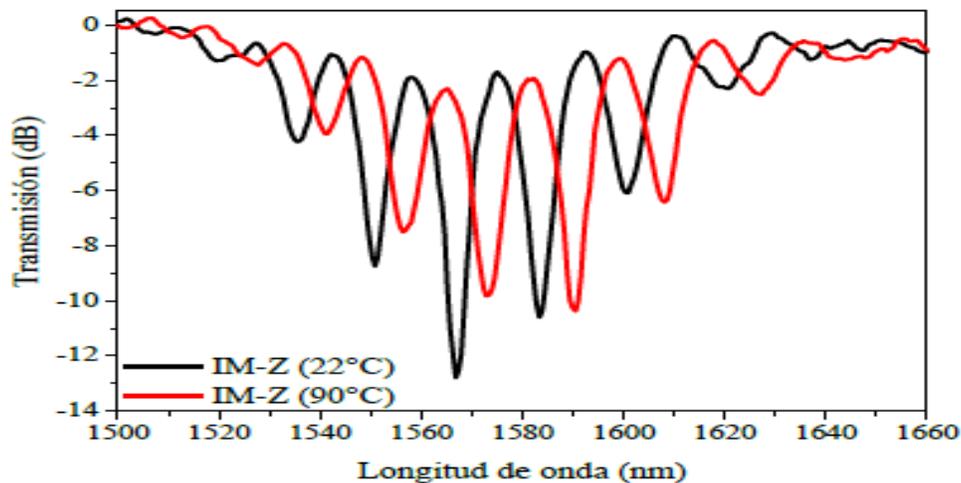


Figura .1 21 Cambio en el espectro de transmisión del MZI cuando se somete a temperatura [12].

El patrón de interferencia observado a la salida del MZI se puede modificar calentando la fibra porque el material del núcleo y revestimiento son diferentes, lo cual al calentar estos materiales su densidad cambia de manera diferente. Haciendo esto, es posible que los índices de refracción cambien y permitan que el patrón de interferencia se mueva hacia longitudes de onda mayores.

Los resultados reportados en la literatura donde muestran la respuesta del MZI a la temperatura [17] fueron comprobados experimentalmente [12] lo que también permite su aplicación como sensores de temperatura.

Así como la temperatura puede afectar el espectro de transmisión otro factor importante que se debe tomar en cuenta al realizar interferómetros en fibra óptica es la tensión ya que este factor puede afectar el comportamiento del espectro de transmisión como se puede ver en la Fig. 1.22 donde se muestra el cambio del espectro de transmisión, este cambio es muy similar al que presenta un interferómetro, pero con la diferencia que el espectro de transmisión se desplaza hacia longitudes de onda corta (hacia la izquierda) [12].

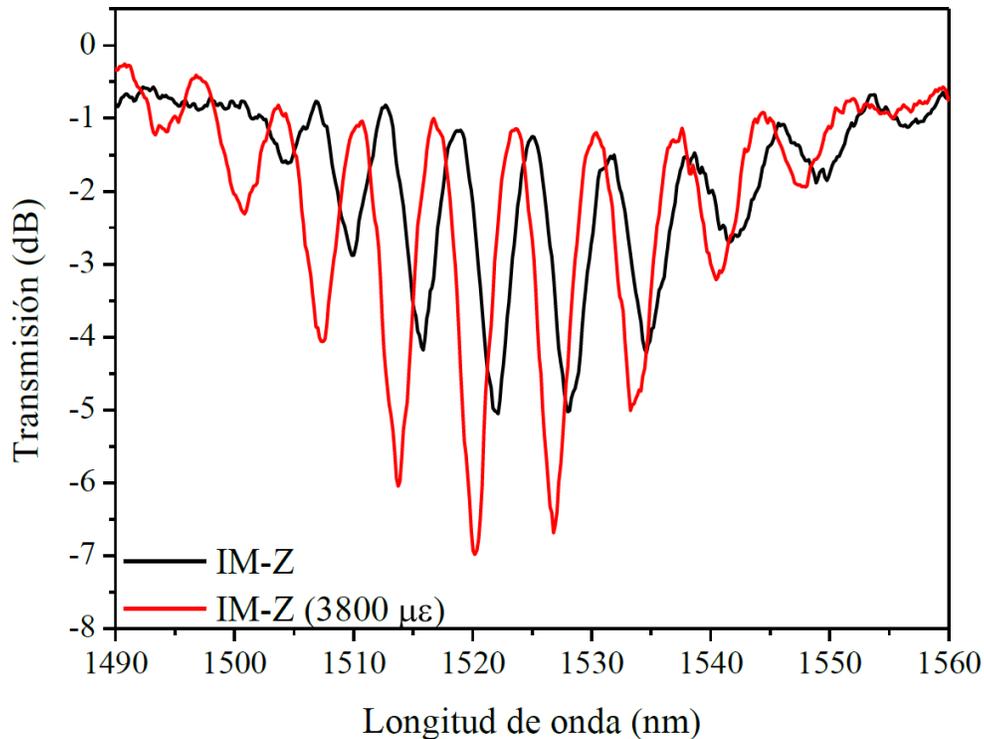


Figura 1. 1 Cambio en el espectro de transmisión del IM-Z cuando se somete a tensión [12].

Con los resultados mostrados anteriormente se puede observar la alta sensibilidad que presentan los interferómetros de fibra óptica ante las perturbaciones externas, de esta manera se puede lograr una sintonización hacia longitudes de onda mayores o menores dependiendo el uso. Es por esto por lo que este tipo de interferómetros deben de estar lo suficientemente controlados y protegidos para evitar perturbaciones externas no deseadas.

### **1.7 Teoría del Amplificador óptico de semiconductor**

El termino de amplificador Óptico de Semiconductor (SOA, por sus siglas en inglés Optical Semiconductor Amplifier) también se puede encontrar en la literatura con alguno de los siguientes nombres: Amplificador de Diodo Láser (LDA), Amplificador de Onda Viajera (TWA), Amplificador Láser de Semiconductor (SLA) y Amplificador Fabry-Perot (FPA), pero siguen haciendo referencia al mismo dispositivo.

El SOA es muy similar a un láser de semiconductor, pero con la diferencia que no cuenta con una cavidad óptica, la mayor parte de las estructuras de semiconductor disponibles que se encuentran hoy en día están basadas en un semiconductor tipo P-N.

El desarrollo del SOA está estrechamente relacionado con el de los láseres de semiconductor ya que en un principio los amplificadores ópticos de semiconductor eran diodos láser normales conducidos bajo el umbral de saturación. No fue hasta que en 1965 se logró hacer la primera demostración de un SOA [18] y posteriormente, 5 años más tarde en 1969 se demostró la doble hetero estructura [19]. Durante la segunda mitad de la época de los 80's se consiguió la primera transmisión experimental empleando un SOA [20].

Fue hasta la segunda mitad de la década de los 90 donde el SOA además de solo usarse en institutos para investigaciones, también se logró producir comercialmente por algunas compañías. Para que el SOA pudiera alcanzar un desempeño aceptable para aplicaciones prácticas era necesario ver como poder producir realimentación óptica eficiente y como hacer que la ganancia sea insensible a la polarización [21].

Un amplificador óptico de semiconductor está basado en los principios convencionales de un sistema semiconductor láser que consiste en una región activa que se encuentra entre una placa de material tipo P y otra placa de material tipo N, un voltaje de polarización (bombeo)

que cuando es aplicado logra el acercamiento de portadores positivos y negativos, y con ello crear pares de electrón-hueco.

Después, a medida que la luz con una longitud de onda específica es acoplada en el medio activo, la emisión estimulada toma lugar causando la recombinación de pares de electrón-hueco generando más fotones de la misma longitud de onda de la señal óptica incidente, para luego lograr la amplificación óptica.

Para conseguir una mejor eficiencia de acoplamiento de la señal óptica en la región activa, las paredes de los extremos del SOA se recubren con materiales antirreflejantes como se puede ver en la Fig. 1.23 [22].

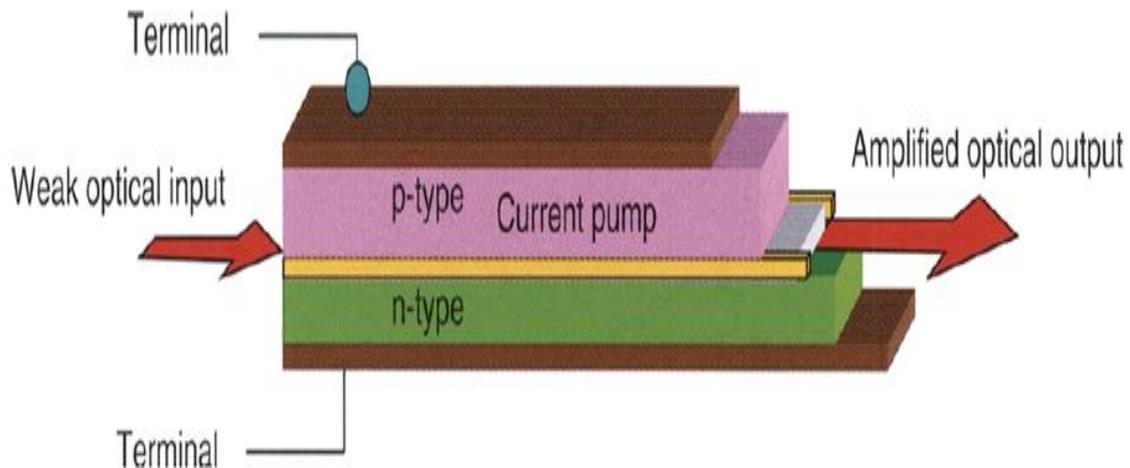


Figura 1.23 Vista transversal de un amplificador óptico de semiconductor [22].

Dependiendo de la estructura pueden ser clasificados como:

- Amplificador óptico de onda viajera.
- Amplificador Fabry-Perot.
- Amplificador laser por inyección de realimentación de corriente distribuida.

Dentro de las características sobresalientes de los SOAs están:

- Alta ganancia 25 + 30 dB
- Potencia de saturación de salida en el rango de 5 a +13 dBm
- Distorsiones no lineales

- Amplio ancho de banda
- Respuesta espectral en regiones de longitud de onda comprendidas entre 0.8, 1.3 y 1.5  $\mu\text{m}$
- Los SOA están hechos con InGaAsP, son de tamaño pequeño y fácilmente se pueden integrar con otros componentes ópticos y semiconductores.

Es bien sabido que el SOA no es el único amplificador óptico que existe ni el único en ser empleado en sistemas de comunicaciones ópticas mediante fibra óptica.

Los SOA presentan comportamientos similares a los amplificadores eléctricos y electrónicos que se conocen, por lo cual también comparten una de sus principales características conocida como la saturación de la ganancia, la cual se explica más adelante.

En un SOA también existe lo que se conoce como amplificación uniforme en un ancho de banda determinado y la amplificación lineal para un intervalo de potencia limitado, lo que permite que la potencia de una señal que se encuentra dentro de este ancho de banda o intervalo de potencia será amplificada de una manera estable [23].

Un factor indispensable que se debe conocer en un SOA y en todo amplificador es la saturación de ganancia, el factor de saturación indica que si se aplica una señal de entrada con una potencia que se encuentra en el intervalo lineal de amplificación obtendremos a la salida una amplificación de acuerdo a esa linealidad, en cambio si la señal supera el intervalo de potencia de entrada el amplificador dejará de amplificar linealmente.

Cuando la amplificación del SOA deja de ser lineal con respecto a la potencia de entrada en el SOA se le llama potencia de saturación, en la Fig. 1.24 se ilustra el proceso de saturación de una señal que es introducida a un SOA.

El nivel de potencia de saturación está determinado por la geometría del dispositivo y diversas características del material como: la energía de saturación, el factor de confinamiento, y el coeficiente de pérdidas.

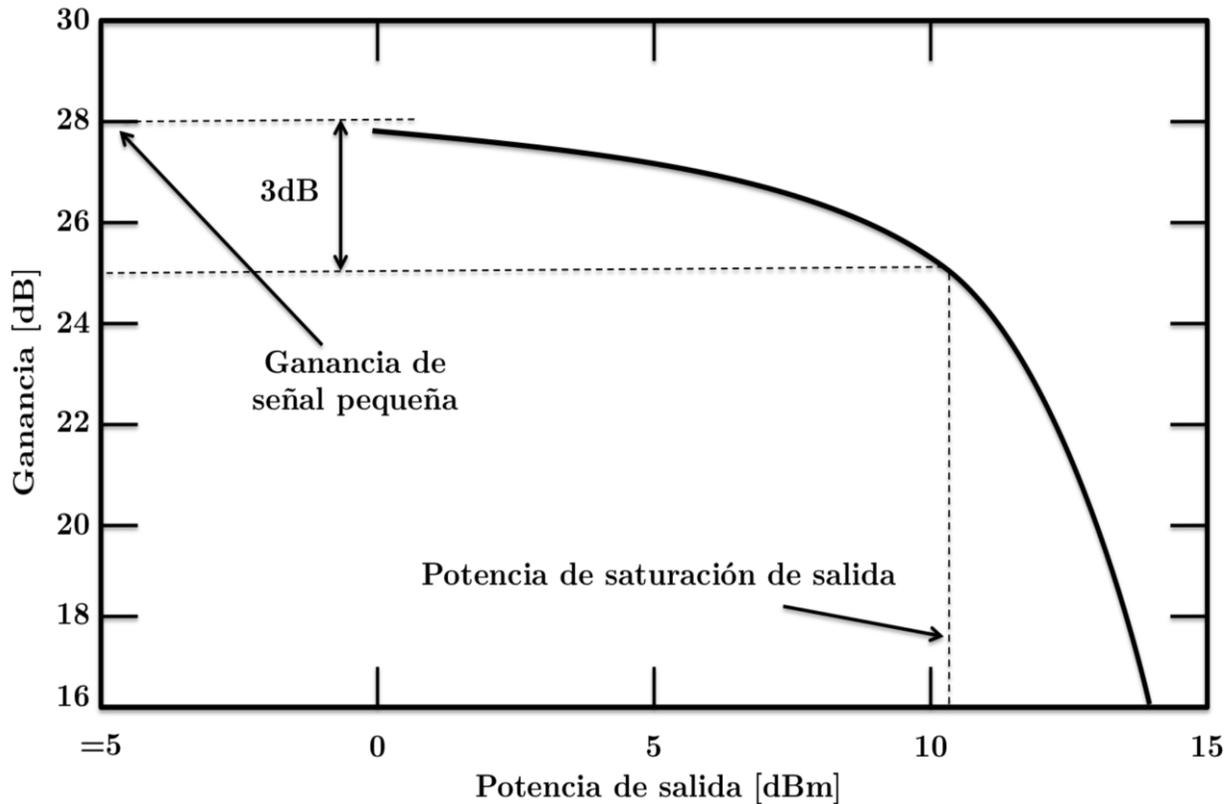
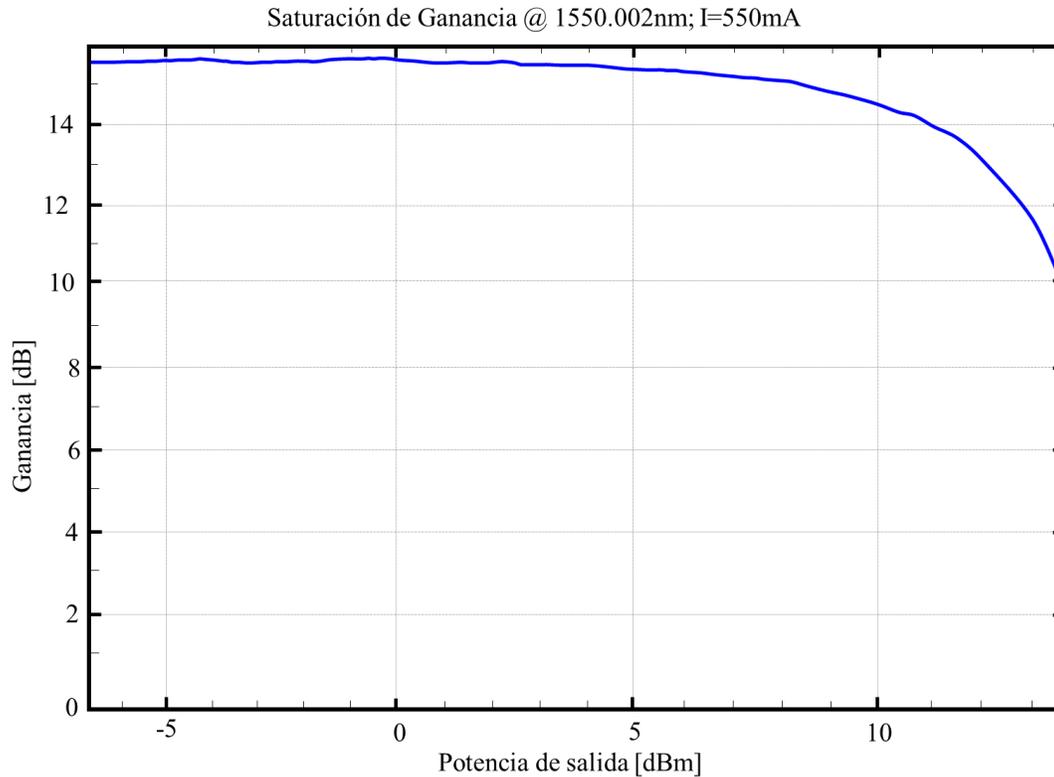


Figura 1. 24 Gráfica de saturación de un amplificador [23].

Existe un parámetro en el SOA llamado ganancia de pequeña señal que indica la mayor ganancia posible del SOA, esta ganancia corresponde al rango de amplificación uniforme y lineal en donde cualquier señal que no sobrepase el rango de potencia será amplificada con mayor notoriedad con respecto a señales de entrada más grandes.

En el presente trabajo de tesis se utilizó el SOA IPSAD1513 (1550 nm) el cual cuenta con la curva de saturación de ganancia mostrada en la Fig. 1.25, donde podemos ver que nos permite tener una ganancia máxima de casi 16 dB en el régimen de pequeña señal.

También se puede observar que la potencia de saturación de salida toma lugar al llegar a los 10 dBm en la potencia de salida.



*Figura 1.25 Gráfica de saturación de ganancia del SOA IPSAD1513.*

Como podemos ver, el SOA nos permitirá amplificar en mayor escala todas aquellas señales que se encuentren en el régimen de pequeña señal y estas señales tendrán su máxima amplificación con respecto a las demás señales que puedan entrar en el SOA.

También los SOA's tienen la ventaja de que pueden ser bien integrados de manera monolítica con otros componentes (como guías de onda o acopladores) para realizar funciones aún más complejas, son compactos, requieren un bombeo eléctrico en lugar de óptico y tienen un amplio ancho de banda óptico para poder operar.

## Capítulo 2: Diseño propuesto

En este capítulo se describe el diseño y los materiales empleados en el desarrollo experimental del presente trabajo de tesis. Para la implementación de un láser en configuración de anillo se debe garantizar la flexibilidad en el sentido en el que se pudieran realizar modificaciones en la cavidad para evitar realizar cortes a la fibra al momento de integrar nuevos componentes o de sustituir estos por otra variante posteriormente.

A continuación, se presenta una lista del equipo y material empleado para implementar el diseño de un láser de fibra óptica dopada con Erblio capaz de emitir múltiples longitudes de onda.

1. Controlador de corriente y temperatura para diodos láser de bombeo LDR1000E.
2. Diodo láser con longitud de onda de emisión de  $\lambda = 980$  nm, y potencia óptica pico de  $P = 700$  mW.
3. Acoplador WDM 980 nm /1550 nm.
4. 2 m de fibra dopada con Erblio ER80 4/125, con fluorescencia en 1530-1610 nm.
5. Acoplador 90/10.
6. Acopladores 50/50.
7. Amplificador óptico de semiconductor.
8. Aislador 1530-1570 nm.
9. Analizador de espectro óptico.
10. Conectores FC-PC.
11. Adaptadores FC-FC.

En la Fig. 2.1 se muestra el esquema del láser de fibra dopada multi-longitud de onda con los diversos dispositivos que se emplearon para poder obtener un láser de fibra dopada con Erblio en configuración de anillo capaz de presentar a la salida una emisión en múltiples longitudes de onda.

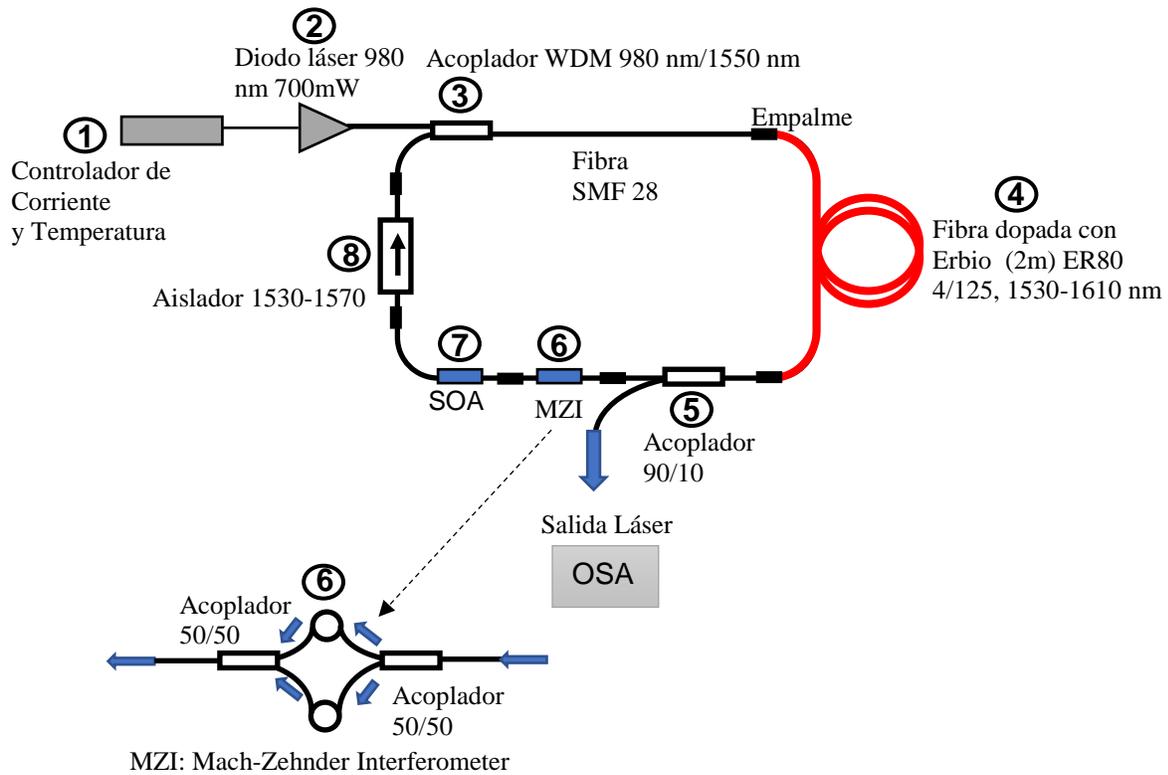


Figura 2. 1 Esquema de la configuración de anillo del láser de fibra óptica dopada con erbio empleando un interferómetro Mach-Zehnder y un SOA incorporados a la cavidad.

Mediante el uso del controlador de corriente y temperatura (1) alimentamos el diodo láser (2) produciendo la señal de bombeo óptica a 980 nm la cual entrará a la cavidad láser mediante el acoplador (3). Posteriormente el bombeo entra a la fibra dopada que absorberá la luz de 980 nm y empezará a emitir fluorescencia en un rango entre 1530nm a 1570nm. Posteriormente la fluorescencia entrará al acoplador (5) donde el 10% de la potencia se podrá extraer de la cavidad para medirla en el OSA y el 90% continuará su propagación dentro del anillo hacia los componentes (6) y (7) los cuales se van a ir incorporando uno a uno conforme se requiera de su uso en las siguientes etapas. La función del aislador (8) es hacer que la luz circule por la cavidad de anillo solamente en una dirección, debido a que la fluorescencia cuando se produce puede viajar en ambas direcciones de la fibra, es por esto que se coloca el aislador, para bloquear la luz que viene en sentido contrario y permitir únicamente que circule en sentido de las manecillas del reloj.

En la Fig. 2.2 se muestra una fotografía del diseño propuesto del láser de fibra óptica dopada multi-longitud de onda, en la cual se observa la configuración de anillo en el resonador y la trayectoria que va tomando la luz desde la fuente hasta el analizador de espectro óptico.

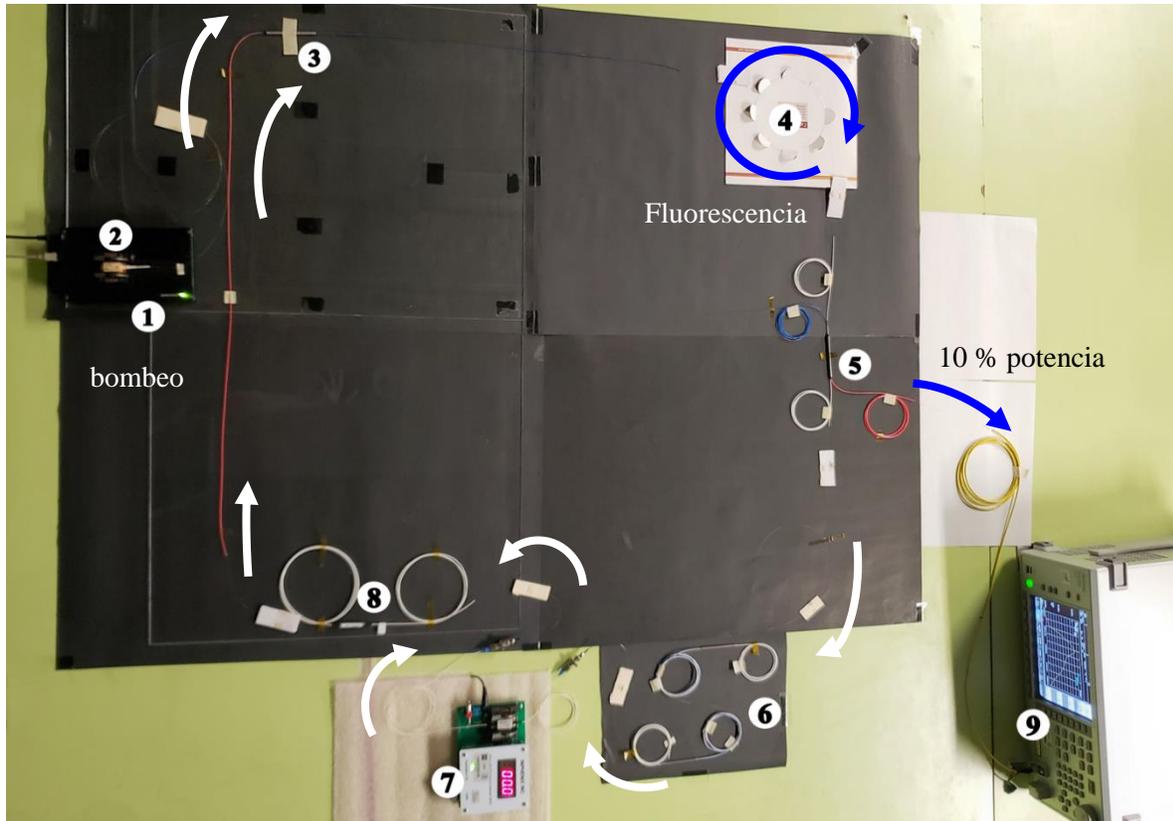


Figura 2. 2 Fotografía de la implementación del prototipo del láser de fibra dopada con erbio multi-longitud de onda. (1) Control de corriente y temperatura, (2) diodo láser empleado para el bombeo, (3) acoplador WDM 980/1550, (4) fibra dopada de erbio, (5) acoplador 90/10, (6) MZI, (7) SOA, (8) Aislador y (9) Analizador de espectros óptico.

La implementación en configuración de anillo de este láser permite que la potencia óptica se esté realimentando a lo largo de la cavidad generando los procesos cuánticos de absorción, emisión espontánea y emisión estimulada en el medio de ganancia que es la fibra dopada de Erbio. Pasando por un acoplador 90/10 el cual permite que el 90% de la potencia óptica siga circulando en la cavidad y que al llegar al interferómetro se presenten las oscilaciones que nos generan los canales WDM a la salida de la emisión. Posteriormente el SOA va a amplificar una zona de la emisión láser, logrando con esto tener una emisión multi-longitud de onda. Finalmente se incorpora un aislador óptico a la cavidad el cual permite que solo las longitudes de onda entre 1530-1570 nm sean las que sigan circulando por la cavidad láser mediante el acoplador 50/50 que se encuentra justo después del diodo láser.

## Capítulo 3: Resultados experimentales

El trabajo consistió en tres etapas experimentales, durante las cuales se registraron resultados parciales obtenidos en cada una de las distintas etapas. Estas etapas consisten en:

- Etapa 1: Emisión láser de la fibra dopada de Erblio en cavidad en forma de anillo.
- Etapa 2: Emisión láser incorporando el MZI a la cavidad.
- Etapa 3: Emisión láser incorporando el MZI y el SOA a la cavidad.

### 3.1 Etapa 1: Láser de fibra óptica dopada con Erblio en configuración de anillo

El diodo láser empleado para el bombeo necesita de un controlador de corriente y temperatura para poder operar, este tiene una interfaz gráfica la cual permite que se pueda ir modificando gradualmente estos parámetros para iniciar con el funcionamiento.

El diodo láser tiene una terminación pigtail, la cual se empalma al acoplador WDM 50/50, el cual inserta la señal de bombeo a la cavidad resonante.

La señal de bombeo excita átomos que se encuentran en la fibra dopada con Erblio, que trabaja como el medio de ganancia donde se llevan a cabo los procesos cuánticos que permiten la emisión láser, esta emisión pasa a través de un acoplador 90/10 donde solamente el 10% de la potencia es la que monitoreamos permitiendo que el 90% continúe en la cavidad a manera de retroalimentación pasando por un aislador óptico que se empalma al WDM cerrando la cavidad y formando así la configuración de anillo.

En la Fig. 3.1 se muestra la evolución de la emisión láser de la fibra dopada de Erblio conforme se va aumentando la corriente del diodo láser empleado para generar un bombeo de 980nm. Esta emisión corresponde a la Etapa 1 donde aún no se incorpora el MZI ni el SOA.

En esta etapa se comenzó aumentando la corriente del diodo láser a partir de 100mA hasta 107mA en donde ya se podía distinguir que había una cierta cantidad de potencia óptica que podía discriminarse del ruido. A los 109mA se observó que presentaba un pico que podía considerarse como una emisión láser en una  $\lambda = 1601\text{nm}$  con una potencia de -14.50dBm.

Finalmente, cuando se aumentó la corriente del diodo láser a 112mA se obtuvo una emisión láser estable a  $\lambda = 1601.32\text{nm}$  con una potencia de  $-9.41\text{dBm}$  determinado así que esta corriente es la mínima que necesita el láser para poder operar con estabilidad. Los parámetros anteriores están expresados detalladamente en la Tabla 2.

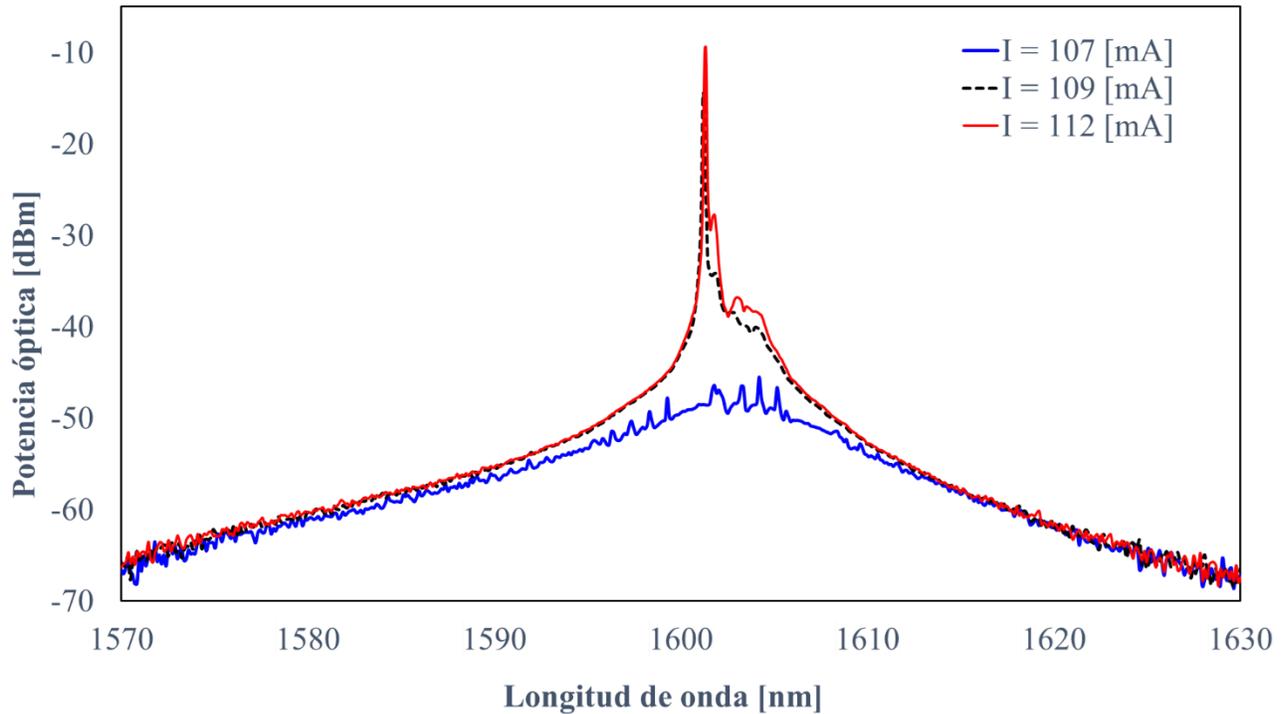


Figura 3. 1 Evolución del láseo de la etapa 1 donde no se incorpora MZI ni SOA.

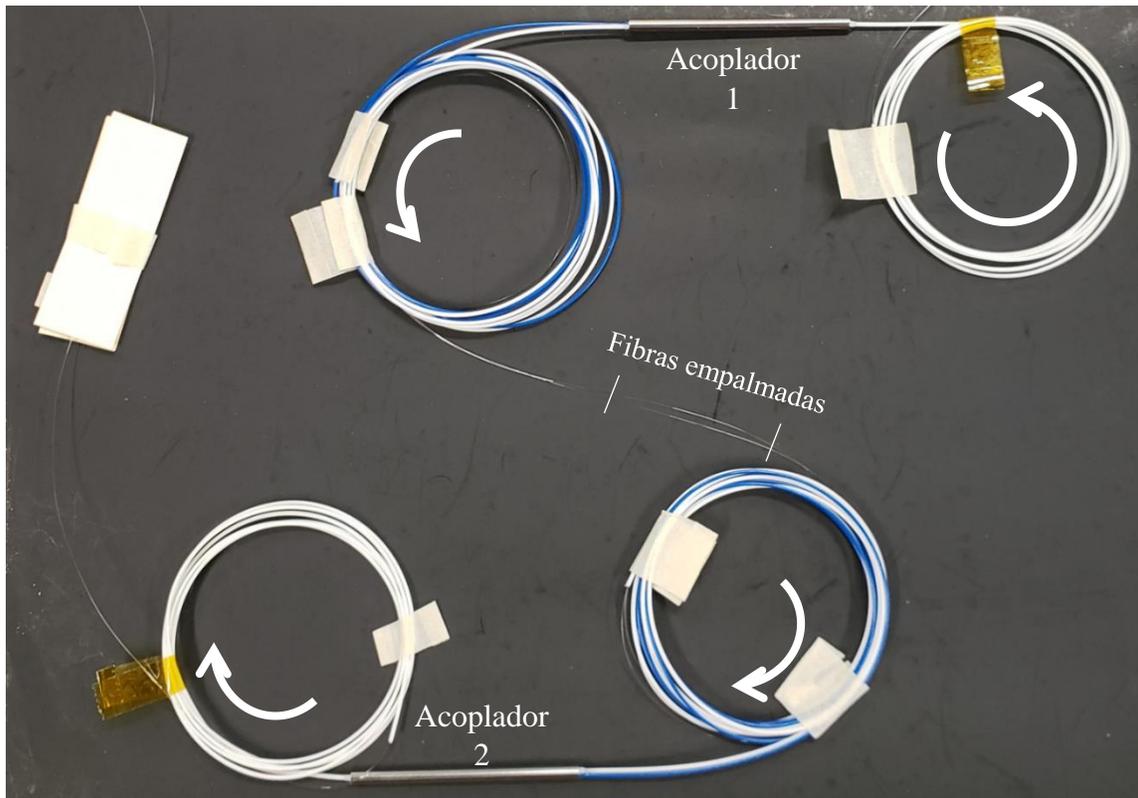
Tabla 2 Parámetros mínimos para una emisión láser donde en 112 mA obtenemos una emisión estable.

Corriente de operación [mA]	$\lambda$ [nm]	Potencia [dBm]
107	1601.32	-48.57
109	1601.2	-14.5
112	1601.32	-9.41

### 3.2 Etapa 2: Implementación del láser de fibra óptica con un MZI acoplado

En la Fig. 3.2 se muestra una fotografía del interferómetro usando dos acopladores 50/50 empalmados por las salidas, permitiendo que esta configuración actuará como un interferómetro de tipo Mach-Zehnder.

La luz que viaja dentro de la fibra será dividida por el primer acoplador viajando 50% de su potencia por la fibra de color azul y el otro 50% por la fibra de color blanco. Las dos fibras están empalmadas a otro acoplador idéntico. El segundo acoplador recombina las señales a la salida de este mismo produciendo el fenómeno de interferencia explicado en el capítulo 2.



*Figura 3.2 Fotografía de la configuración del interferómetro empleando dos acopladores 50/50 empalmados.*

Luego se incorporará el interferómetro anterior a la cavidad láser. Se observa que los espectros de emisión cambian al de la etapa 1 ya que se empiezan a presentar oscilaciones en el espectro de emisión del Erblio.

El procedimiento de esta etapa consistió en ir aumentando la corriente del diodo láser comenzando desde los 100mA hasta obtener una emisión estable determinando así la corriente mínima de operación de esta etapa.

Se puede ver en la Fig. 3.3 que si se aumenta la corriente a 108mA empieza a crecer un pico del espectro, pero aún no se puede considerar emisión láser. Es a partir de los 110mA que el espectro presenta una emisión estable teniendo lugar en  $\lambda = 1603.36$  nm con una potencia de -11.83 dBm.

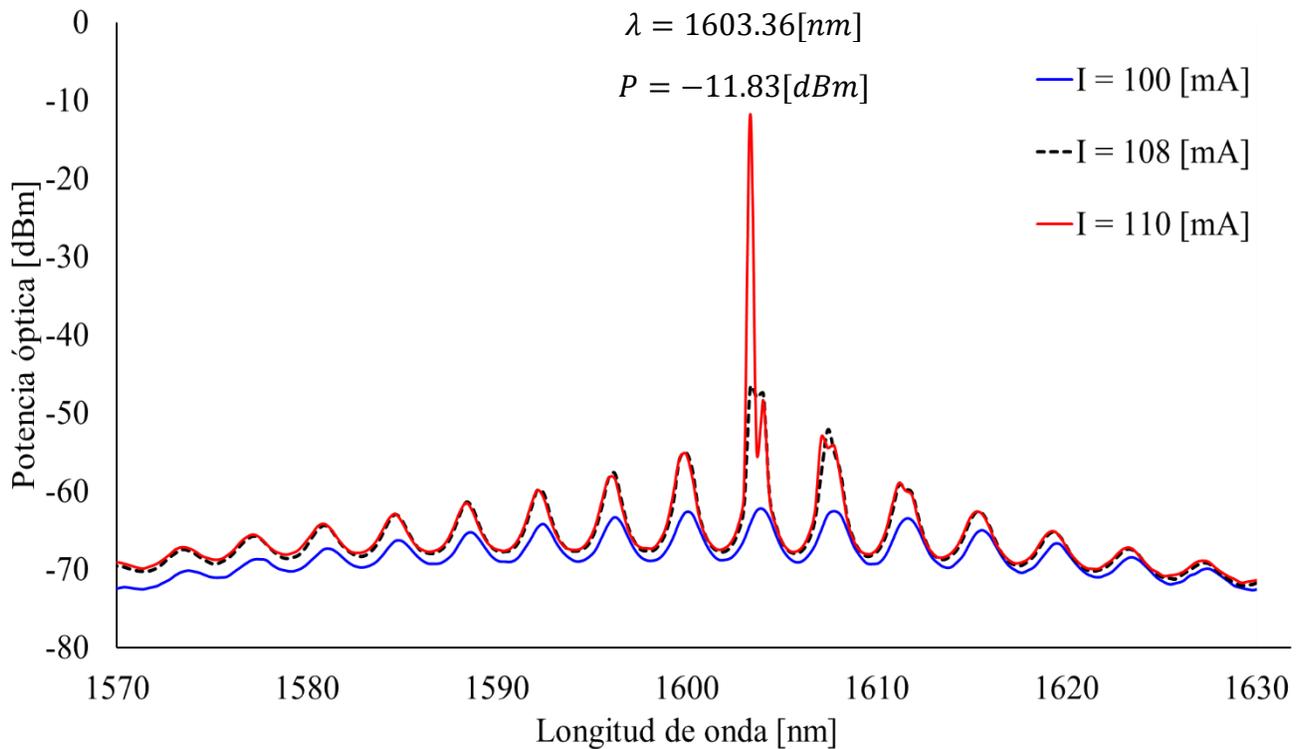


Figura 3. 3 Evolución de emisión láser de la cavidad con MZI acoplado donde podemos ver su pico de emisión y la potencia que tiene al llegar a la corriente mínima de operación.

Si se compara la emisión láser de la etapa 1 donde únicamente era la cavidad resonante con la emisión de la etapa 2 podemos ver que el láser se desplazó aproximadamente 2 nm y que es atribuido a la inclusión del interferómetro en la cavidad.

Una vez que se obtuvo la emisión láser se procedió a aumentar la corriente paulatinamente, al aumentar la corriente hasta 220 mA se puede observar que se forma un segundo canal vecino a  $\lambda = 1604.4$  nm. Teniendo ahora una emisión dual debido al interferómetro como lo podemos ver en la Fig. 3.4.

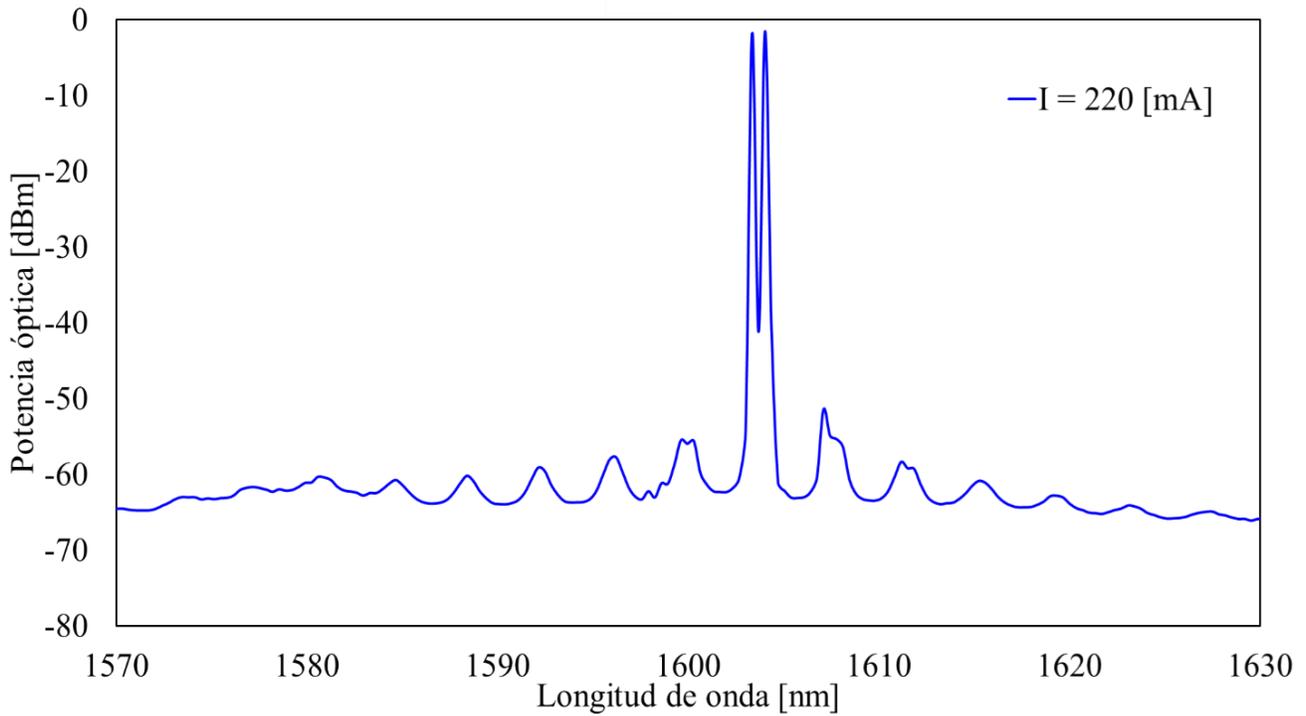


Figura 3. 4 Aparición del canal vecino.

En la Fig. 3.5 a) se ilustra como el canal vecino se empezó a recorrer conforme la corriente de bombeo aumentaba, la emisión de  $\lambda = 1604.4\text{nm}$  que se observó en la Fig. 4.6 desapareció y apareció una nueva emisión en  $\lambda = 1599.62\text{ nm}$ . este canal se mantuvo con ligeras oscilaciones hasta llegar a una corriente de bombeo máxima de 550mA donde se mantuvieron estables las oscilaciones y se tenían una emisión cuasi ecualizada para los dos canales como se muestra en la Fig. 3.5 b). Estos valores mencionado se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 Longitudes de onda y potencias de las dos emisiones láser.

Corriente de bombeo [mA]	$\lambda_1$ [nm]	Potencia [dBm]	$\lambda_2$ [nm]	Potencia [dBm]
350	1599.62	-36.63	1603.7	-8.59
550	1599.62	-19.83	1603.7	-16.59

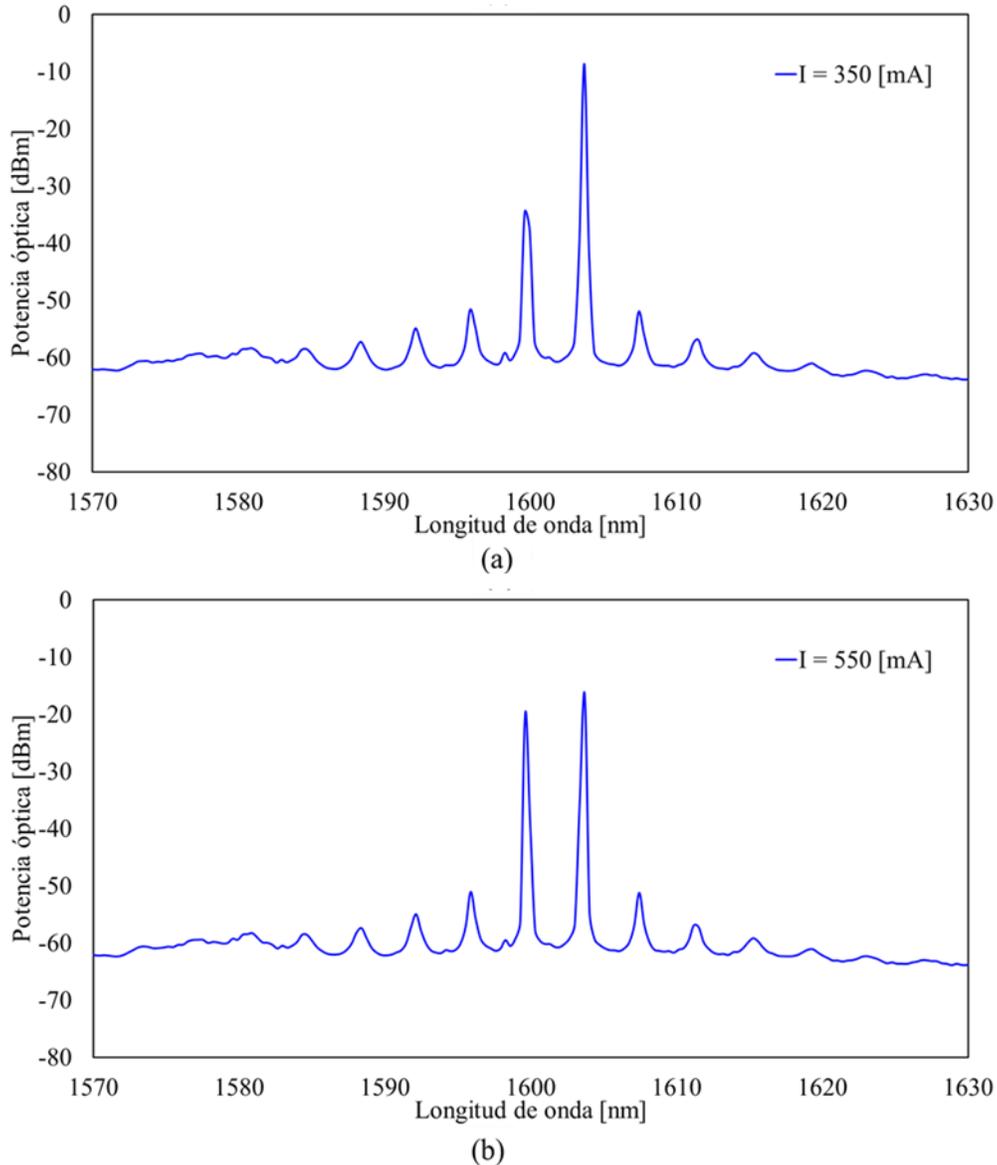


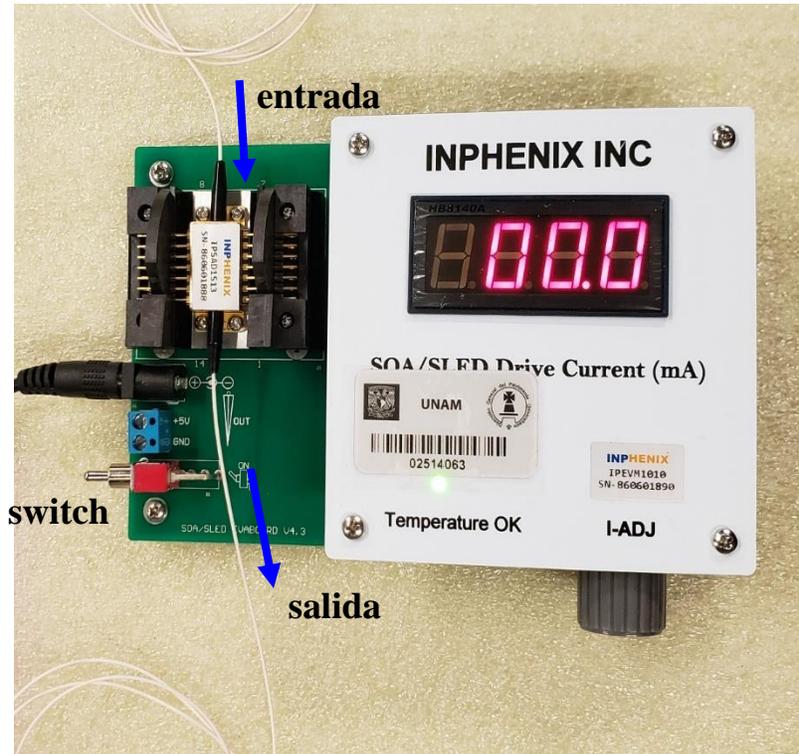
Figura 3.5 Evolución de doble emisión que se fue presentando mientras aumentaba la corriente de bombeo.

### 3.3 Etapa 3: Implementación del láser de fibra óptica con un MZI y SOA acoplado

En esta última etapa se incorpora el MZI junto con el SOA a la cavidad láser empalmando unos adaptadores FC-FC para evitar empalmar directamente el SOA a la cavidad y que este se pudiera retirar posteriormente con gran facilidad.

En la Fig. 3.6 se muestra una fotografía del SOA de la marca INPHENIX con el controlador de corriente, el cual cuenta con una perilla que permite regular la cantidad de corriente que

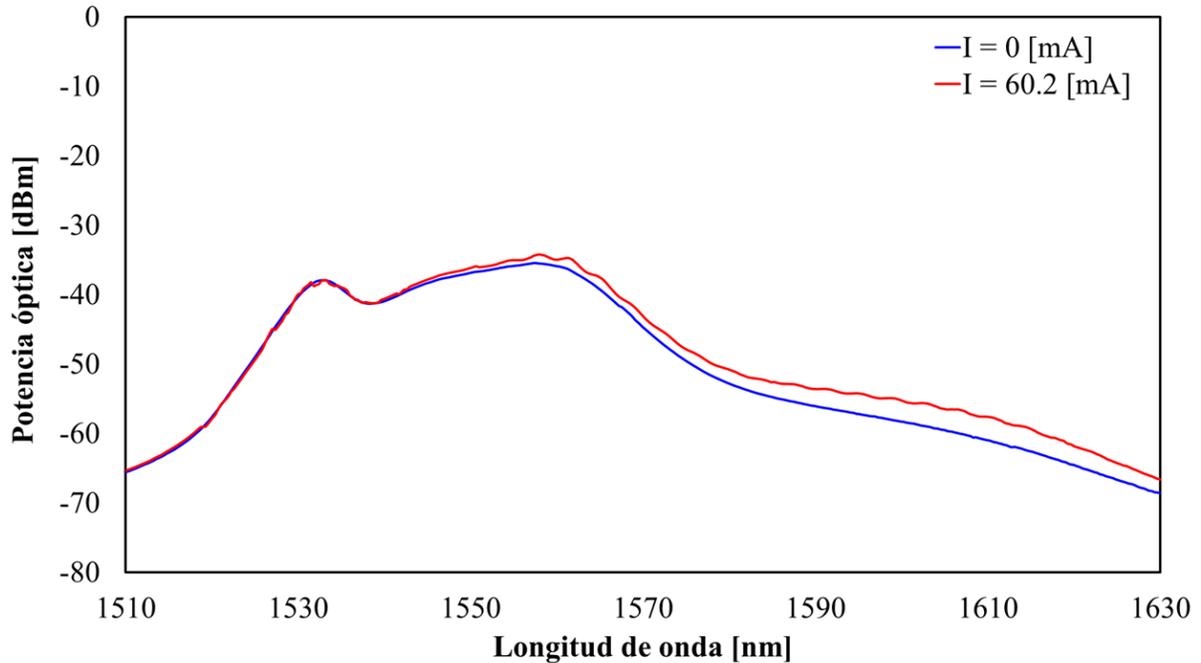
se le está suministrando indicada en el display. Este controlador tiene un switch para encender o apagar justo debajo del cable de alimentación eléctrica. Este dispositivo fue el que se incorporó dentro de la cavidad láser.



*Figura 3.6 Fotografía del SOA con su respectivo controlador de corriente el cual nos permite la fácil manipulación de este.*

Para desarrollar esta última etapa en la cual consistía en la generación de múltiples emisiones láser, esta vez se fijó la corriente de bombeo del diodo láser en 100 mA, garantizando la emisión del Erblio para posteriormente aumentar paulatinamente la corriente de operación del SOA.

En la Fig. 3.7 se observa cómo es que al aumentar ligeramente la corriente ya se pueden apreciar ligeras oscilaciones en el espectro del Erblio, debido al interferómetro que se encuentra acoplado a la cavidad.



*Figura 3.7 Espectro de emisión del Erbio en la cavidad láser incorporando un SOA y su relativo aumento al aplicar una corriente de operación pequeña al SOA.*

Al ir aumentando la corriente de operación del SOA se puede apreciar que se empieza a generar una emisión láser pero también se generan múltiples oscilaciones en el espectro original dando a entender que mientras se siga aumentando la corriente de operación del SOA las oscilaciones del MZI seguirán aumentando siendo una relación directa entre estos dos dispositivos.

En la Fig. 3.8 se visualiza mejor la evolución que presenta el espectro de emisión al aumento constante de corriente del SOA generando una emisión láser y posteriormente una doble emisión utilizando una corriente de operación menor a 100mA.

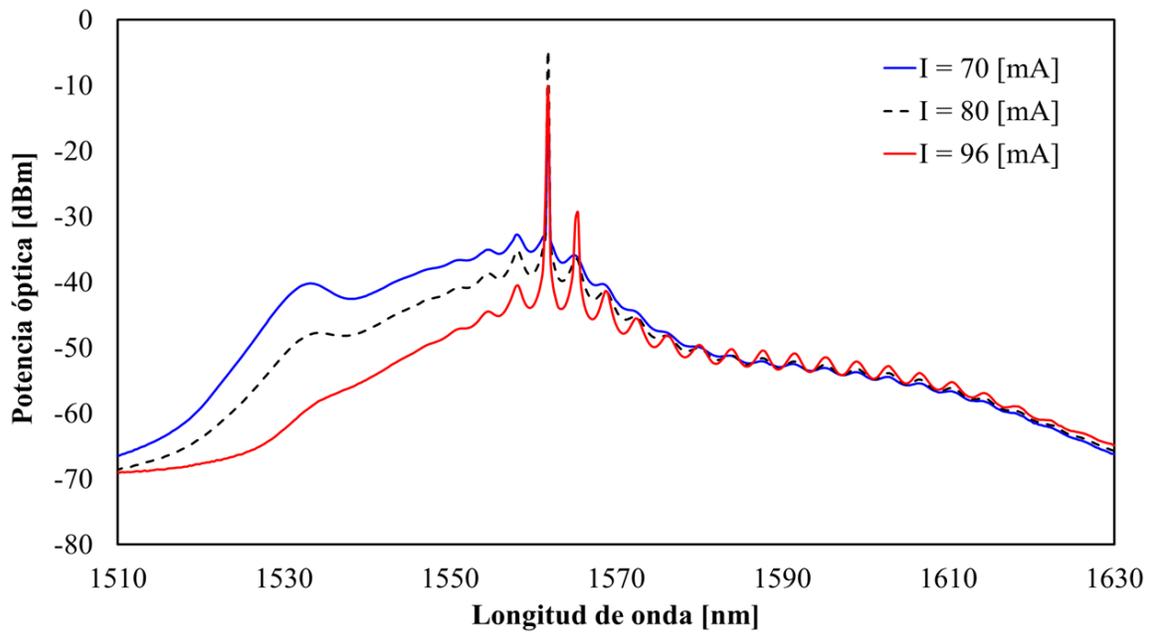


Figura 3.8 Evolución de la emisión láser con corriente menor a 100mA.

La emisión láser que se produjo se presentó en  $\lambda = 1561.8$  nm, dicha emisión se mantuvo constante hasta que la corriente de operación de SOA fue de 96mA apreciando a su vez que un segundo pico localizado en  $\lambda = 1565.4$  nm comienza a aparecer. Estos datos quedaron registrados en la Tabla 4

Tabla 4 Características de la evolución de la emisión láser con corriente menor a 100 mA

Corriente [mA]	$\lambda$ [nm]	Potencia [dBm]	$\lambda_2$ [nm]	Potencia [dBm]
70	1561.8	-12.44	-	-
80	1561.8	-4.71	-	-
96	1561.8	-10.2	1565.4	-29.42

Se aumento la corriente de operación del SOA para verificar si podrían crecer los canales adyacentes y durante este proceso la ganancia de los picos adyacentes continuaba creciendo de una manera oscilante, hasta que se llegó a una corriente de 130 mA donde se generó una tercera emisión como lo muestra la Fig. 3.9 a). Se continúo aumentando la corriente de SOA hasta obtener una cuarta emisión controlada a 140 mA como se ilustra en la Fig. 3.9 b).

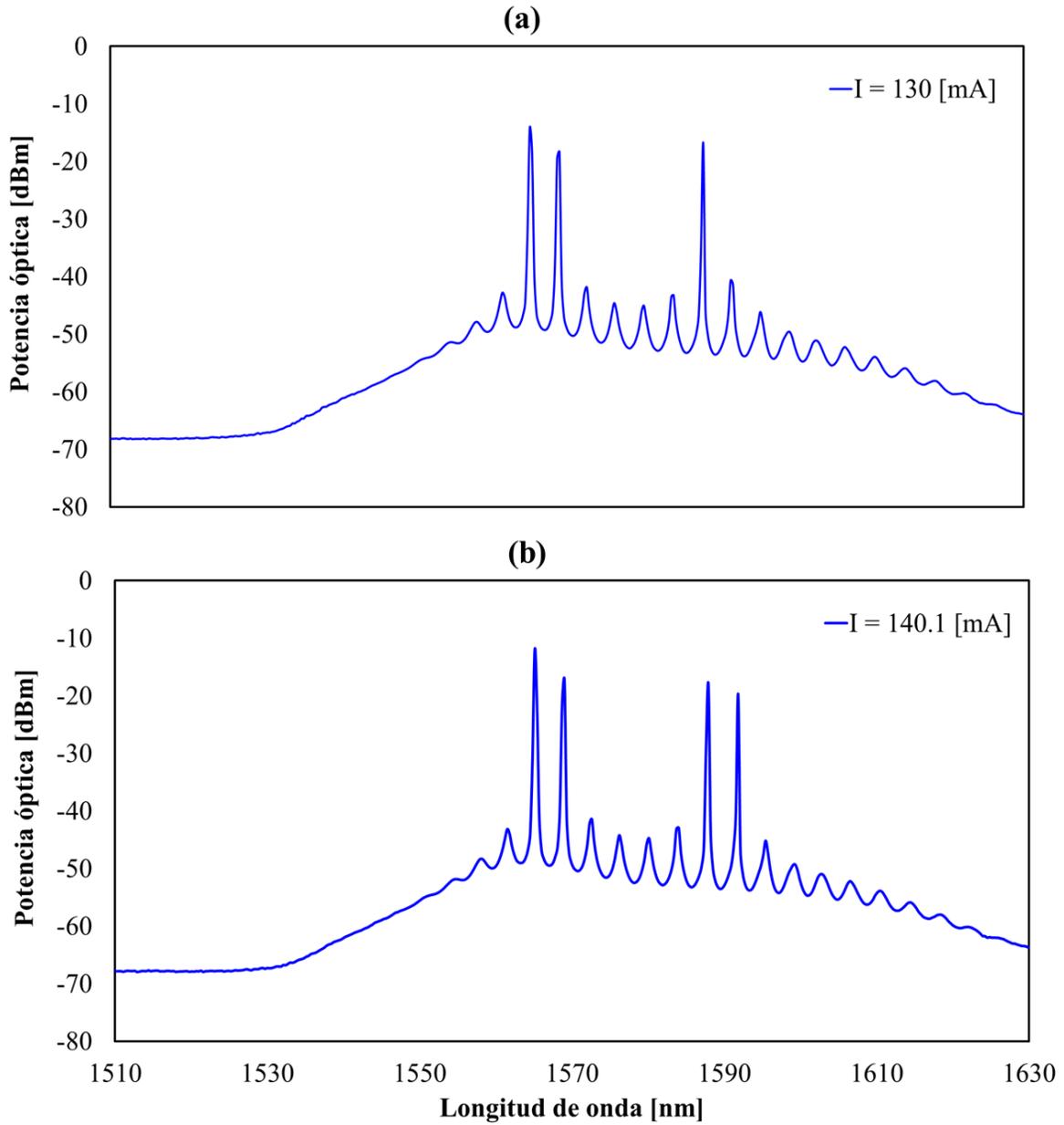


Figura 3.9 Emisiones múltiples generadas por el SOA mientras aumentaba la corriente de operación.

En la Tabla 5 se presentan las características de cada pico que se pudo observar durante la generación de las 4 emisiones láser.

Tabla 5 Características de las emisiones múltiples representadas en la Figura 4.11

Corriente [mA]	$\lambda$ [nm]	Potencia	$\lambda 2$ [nm]	Potencia	$\lambda 3$ [nm]	Potencia	$\lambda 4$ [nm]	Potencia
130	1565.1	-14.15	1569	-18.34	1587.9	-16.78	-	-
140.1	1565.1	-12.01	1569	-17.33	1587.9	-18.14	1591.8	-19.7

La corriente del SOA continuó aumentando y se pudo apreciar algo interesante, donde los picos empiezan a agruparse de manera tal que ahora se tienen tres canales semiordenados entre 1560 y 1600 nm como se ve en la Fig. 3.10 y las características de cada pico o canal están descritas en la tabla 6.

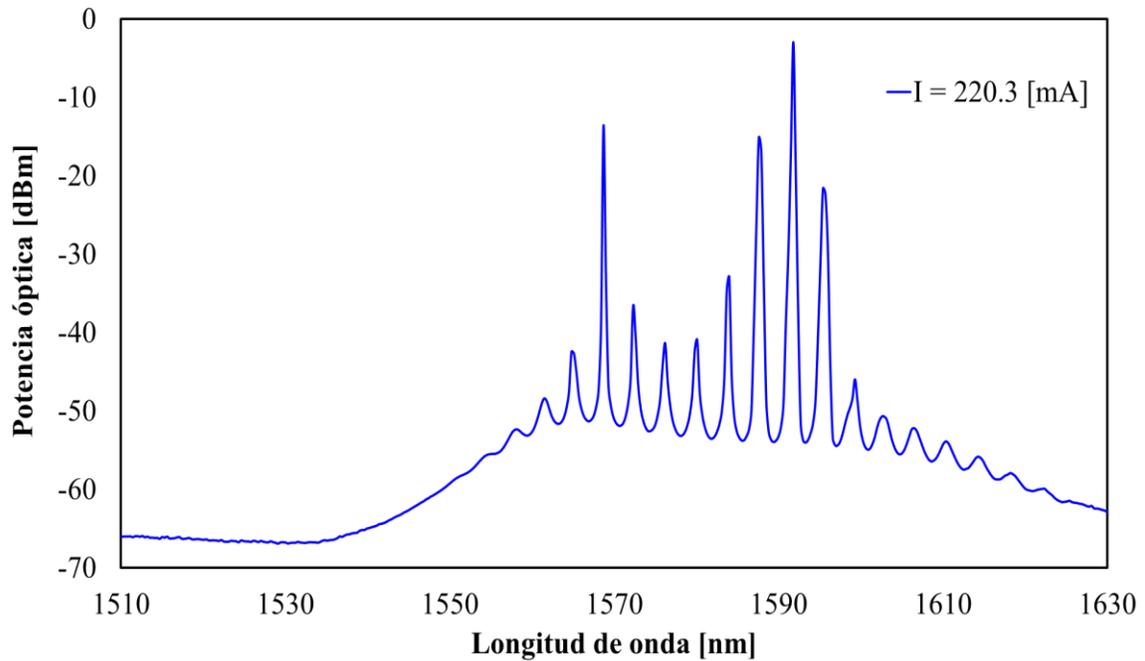


Figura 3.10 Emisiones láser agrupándose alrededor de 1590nm.

Tabla 6 Características de los picos de las múltiples emisiones láser

Corriente [mA]	$\lambda$ [nm]	Potencia [dBm]	$\lambda_2$ [nm]	Potencia [dBm]	$\lambda_3$ [nm]	Potencia [dBm]	$\lambda_4$ [nm]	Potencia [dBm]
220.3	1568.7	-13.64	1587.6	-15.16	1591.8	-3.02	1595.7	-22.35

Para poder agrupar los picos se aumentó la corriente en el SOA hasta llegar a 260mA lo que provocó que los picos se agruparan alrededor de los 1590nm y con esto garantizamos que los picos adyacentes estuvieran afectados por la ganancia del SOA. Al seguir aumentando la corriente del SOA se podrían generar nuevas emisiones adyacentes como lo muestra la Fig. 3.11.

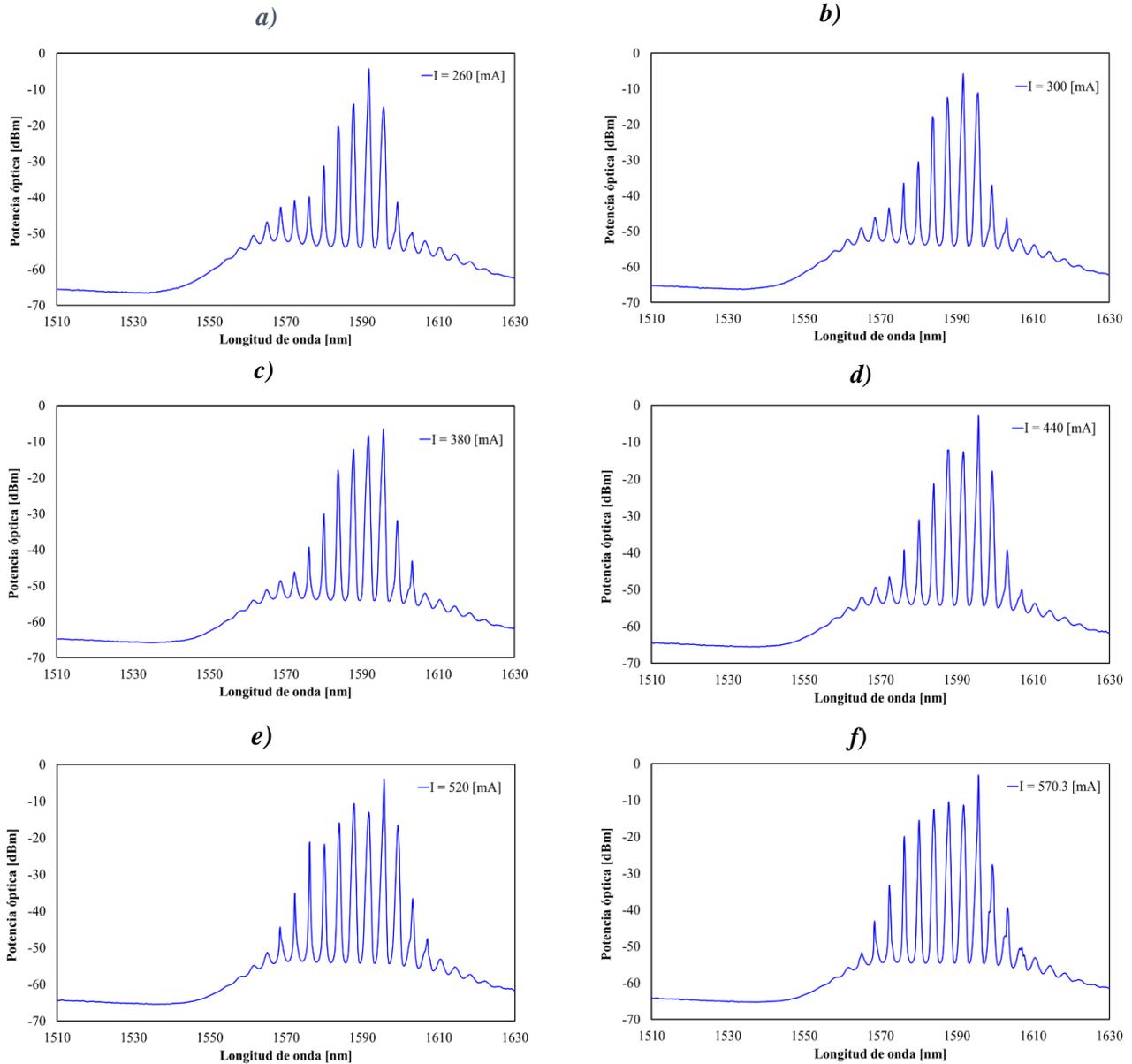


Figura 3.11 Evolución de múltiples emisiones mientras se aumenta la corriente del SOA de 260 hasta 570mA.

En la Tabla 7 se muestran las características de cada emisión distribuidas de izquierda a derecha detallando las longitudes de onda y las potencias que presentaron.

Tabla 7 Características de las distintas emisiones láser a partir de una corriente de operación del SOA de 26 0mA hasta llegar a los 520 mA.

Gráfica	Corriente [mA]	$\lambda$ [nm]	potencia [dBm]	$\lambda_2$ [nm]	potencia [dBm]	$\lambda_3$ [nm]	potencia [dBm]	$\lambda_4$ [nm]	potencia [dBm]	$\lambda_5$ [nm]	potencia [dBm]	$\lambda_6$ [nm]	potencia [dBm]	$\lambda_7$ [nm]	potencia [dBm]
a	260	1584	-20.44	1587.9	-14.31	1591.8	-4.25	1595.7	-14.95	-	-	-	-	-	-
b	300	1584	-18.62	1587.6	-12.57	1591.8	-5.98	1595.7	-11.32	-	-	-	-	-	-
c	320.2	1580	-30.86	1584	-18.82	1587.6	-11.6	1591.8	-7.04	1595.7	-9.65	-	-	-	-
d	380	1580	-30.21	1583.7	-18.13	1587.9	-12.51	1591.8	-8.57	1595.7	-6.85	-	-	-	-
e	440	1580	-31.05	1584	-21.43	1587.9	-12.18	1591.8	-12.85	1595.7	-2.85	1599.3	-17.84	-	-
f	520	1576	-21.12	1580.1	-21.83	1584	-16.18	1587.9	-10.83	1591.8	-13.2	1595.7	-4.05	1599.3	-16.54

Para finalizar con las mediciones de esta etapa se llevó al punto máximo de corriente del SOA logrando así tener 6 emisiones continuas y estables y cuasi ecualizadas con separación entre cada canal de 3.9nm, en la Fig. 3.12 se logran ver 3 de las 6 emisiones de una manera muy uniforme con una potencia promedio de -9 dBm y otras 2 emisiones tienen una potencia de -12 dBm, todas las características de las emisiones se describen en la Tabla 8.

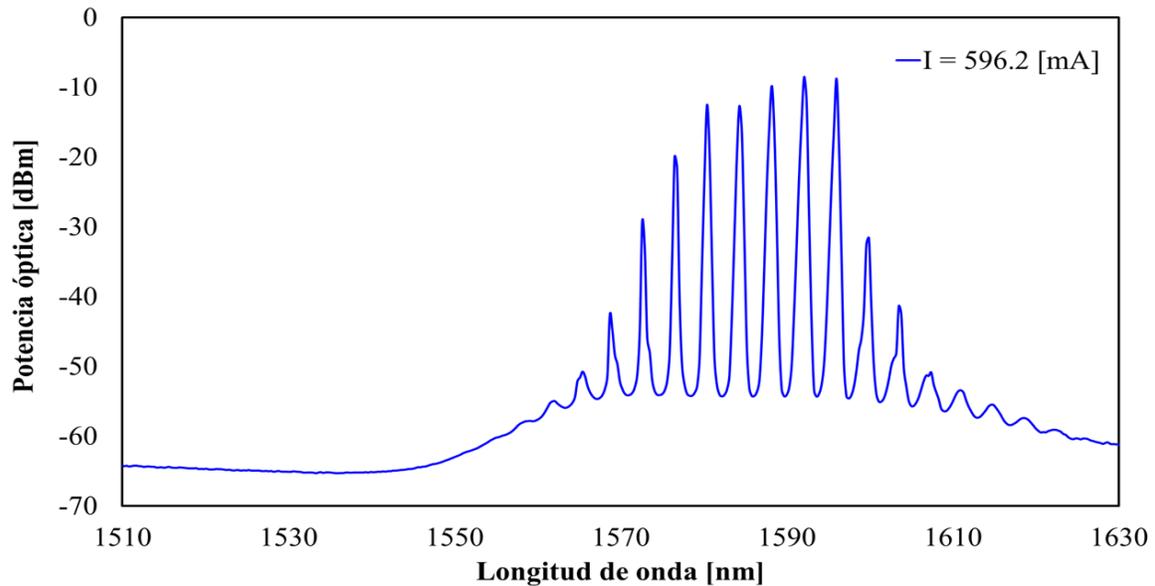


Figura 3.12 Emisión láser multi-longitud de onda generada por la el SOA.

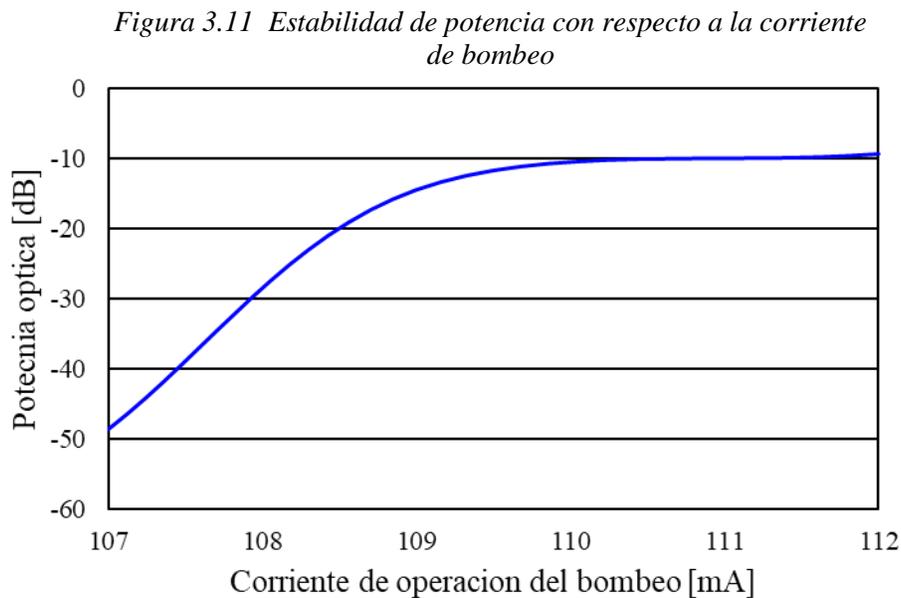
Tabla 8 Características de cada emisión láser presentada en la Fig. 4.14.

Corriente [mA]	$\lambda$ [nm]	potencia [dBm]	$\lambda_2$ [nm]	potencia [dBm]	$\lambda_3$ [nm]	potencia [dBm]	$\lambda_4$ [nm]	potencia [dBm]	$\lambda_5$ [nm]	potencia [dBm]	$\lambda_6$ [nm]	potencia [dBm]
596.2	1576.5	-20	1580.4	-12.58	1584.3	-12.74	1588.2	-9.86	1592.1	-8.56	1596	-8.82

## Capítulo 4: Análisis de resultados y conclusiones

Durante la primera etapa del experimento se logró determinar una corriente óptima de operación del diodo de bombeo, la cual fue de 11mA. A partir de esta corriente de operación se obtuvo una emisión láser estable en  $\lambda = 1601.32\text{nm}$  con una potencia de -9.41 dB correspondiente a la fluorescencia de la fibra dopada con Erbio. Dicha emisión láser se encuentra dentro del rango de operación de la banda L. Para fines experimentales se continuó aumentando la corriente esperando que la potencia también aumentara, pero no fue de esa manera ya que la potencia alcanzó un punto de estabilidad máxima y se mantuvo constante.

Con los datos obtenidos en el experimento se pudo obtener la Fig. 3.11 en donde se observa como la potencia se estabiliza conforme aumenta la corriente del diodo de bombeo.



En la etapa 2 al incorporar el MZI dentro de la cavidad láser se empezaron a producir oscilaciones en el espectro de emisión del Erbio, estas oscilaciones tenían una separación de 4nm entre sí. La separación de estos picos se mantuvo constante y no se vio afectada por el incremento de la corriente de bombeo hasta antes de llegar a  $I = 200\text{mA}$ .

Cuando la corriente de bombeo fue de  $I = 220\text{mA}$  se originó un segundo canal el cual se encontraba en  $\lambda = 1604.4\text{nm}$ , este canal tenía una separación de 3.08nm con respecto al canal original.

Cuando la corriente de bombeo se aumentó a 350mA los picos de la emisión láser cambiaron su posición encontrándose ahora en  $\lambda_1 = 1599.62\text{nm}$  y  $\lambda_2 = 1603.7\text{nm}$  teniendo ahora una nueva separación entre canales de 4.08nm.

Finalmente, al aumentar la corriente de bombeo a 550mA hubo incremento de potencia del primer canal y el decremento de la potencia en el segundo canal quedando cuasi ecualizados con potencias de -19.83dBm y -16.59dBm respectivamente. La separación entre estos canales se mantuvo de 4.08 nm mientras que la separación entre cada canal fue de 3.74nm.

Al incorporar el SOA y el MZI dentro de la cavidad y al suministrarle una corriente de operación al SOA de 60mA, la potencia del espectro de emisión del Erbio aumento ligeramente además de que ya eran visibles las oscilaciones debidas al interferómetro.

El SOA permitió generar una emisión doble con una corriente de 96mA. Esta emisión se generó en  $\lambda_1 = 1561.8\text{nm}$  y  $\lambda_2 = 1565.4\text{nm}$  con una separación entre canales de 3.6 nm.

Al aumentar la corriente del SOA a 130mA se generó una tercera emisión en  $\lambda = 1587.9\text{nm}$  la cual se encontraba a una distancia de 18.9nm correspondiente a la emisión producida al aplicarle una corriente de 96mA.

Al aumentar la corriente del SOA en 140mA, se generó una cuarta emisión en  $\lambda = 1591.8\text{nm}$  teniendo un espaciamiento de 3.9 nm con respecto a la emisión anterior de 1597.9nm.

Se continuó aumentando la corriente del SOA a 220mA y es aquí donde se tenían 4 emisiones láser por encima de los -30 dBm, conformando emisiones que se encuentran en el rango de operación de la banda L.

Al aumentar la corriente del SOA en 520mA se generaron 6 emisiones múltiples por encima de los -30dBm las cuales eran inestables y se encontraban en un rango de 1576nm hasta 1600nm con separaciones alrededor de 4nm entre canales.

Al aumentar la corriente del SOA en 596mA este nos permitió obtener 6 emisiones láser estables y estas se encontraban en un rango que comprende de  $\lambda = 1576.5\text{nm}$  hasta  $\lambda = 1596\text{nm}$  con separación entre cada canal de 3.9nm y una potencia promedio de -12.09dBm.

## Capítulo 5: Conclusiones y trabajo a futuro

En este trabajo se demostró que empleando un láser de fibra dopada con Erblio en cavidad de anillo e incorporando un MZI y un SOA dentro de dicha cavidad puede funcionar como una fuente multi longitud de onda, consiguiendo hasta 6 emisiones láser que se encuentran en el rango de operación de las bandas C y L. Las emisiones obtenidas cuentan con una separación entre canales de 3.9 nm causadas por la configuración del MZI.

En la etapa experimental se comprobó, que la fluorescencia del Erblio actúa como una fuente de amplio espectro, y que el interferómetro utilizado genera oscilaciones en el espectro de emisión del erblio. Posteriormente el SOA amplificará los picos de estas oscilaciones que se encuentren bajo el rango de saturación de ganancia de este y así generar canales WDM con una gran estabilidad.

Al aumentar la corriente de operación del SOA al máximo se generaron algunos picos con baja potencia que se encontraban en el rango de emisión de 1600nm a 1620nm. Estos picos son de interés ya que pueden dar lugar a la correcta operación del láser en banda U. Actualmente todos los sistemas DWDM instalados en campo trabajan en las bandas C+L y no se conocen muchos láseres que operen en banda U [24] y este prototipo de fuente láser puede ser de interés para dicho propósito.

### 5.1 Trabajo a futuro

- El prototipo de fuente láser se puede integrar en sistemas DWDM si se cuenta con un DMUX y aplicando las técnicas necesarias de modulación externa que permitan introducir señales codificadas en los distintos canales obtenidos.
- Se puede sintonizar el interferómetro de tal manera que las oscilaciones principales se encuentren en un rango de 1620nm a 1650nm para que al incorporar el SOA podamos obtener más canales WDM.
- El interferómetro empleado podría encapsularse para evitar perturbaciones externas o se podría implementar alguna configuración distinta del MZI, como puede ser un interferómetro todo en fibra, rejillas de periodo largo, adelgazamientos controlados, para disminuir su sensibilidad a los cambios externos de la fibra.
- Se podría reducir las dimensiones del prototipo para optimizar espacio.

## Referencias

- [1] Centro de Láseres Pulsados, «Centro de Láseres Pulsados,» 02 01 2013. [En línea]. Available: <https://clpu.es/divulgacion/bits/que-tipos-de-laseres-hay>.
- [2] oemarket.com, «oemarket.com,» oemarket.com, [En línea]. Available: [http://www.oemarket.com/catalog/index.php/opto-electronics-laser-diodes-c-35\\_43](http://www.oemarket.com/catalog/index.php/opto-electronics-laser-diodes-c-35_43).
- [3] I. P. K. G. P. A. PAUL L. KELLEY, Semiconductor Lasers 1 fundamentals, San Diego: ACADEMIC PRESS, 1999.
- [4] E. F. Pinzón Escobar, ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE EMISIÓN LÁSER EN FUENTES DE FIBRA ÓPTICA DOPADA CON ERBIO E ITERBIO, México DF, 2012.
- [5] F. J. S. Remacha, Láseres de fibra dopada con erbio con emisión multilínea empleando láminas plano-paralelas como filtro, Departamento de Física Aplicada, 2003.
- [6] D. R. Paschotta, «RP-Photonics.com Encyclopedia of Laser Physics and Technology,» Encyclopedia of Laser Physics and Technology, [En línea]. Available: [https://www.rp-photonics.com/population\\_inversion.html](https://www.rp-photonics.com/population_inversion.html).
- [7] H. S. a. M. H. M. Shimizu, «High-efficiency Nd-doped fibre lasers using direct-coated dielectric mirrors,» Electronics Letters, vol. 23, n 15, pp. 768-769, 1987.
- [8] l.-w. contributors, «Wikipedia,» 2016 11 1. [En línea]. Available: [https://luz.izt.uam.mx/wiki/index.php/Optica:\\_Interferencia](https://luz.izt.uam.mx/wiki/index.php/Optica:_Interferencia). [Último acceso: 20 04 2019].
- [9] M. J. Digonnet, Rare-Earth-Doped Fiber Laser and Amplifiers, Second Edition ed., U.S.A: Marcel Dekker Inc, 2001.
- [10] D. R. Paschotta, «Encyclopedia of Laser Physics and Technology,» Wiley-VCH, 2008. [En línea]. Available: <https://www.rp-photonics.com/interference.html>. [Último acceso: 03 01 2019].
- [11] D. R. Paschotta, «RP-Photonics.com Encyclopedia of Laser Physics and Technology,» Encyclopedia of Laser Physics and Technology, [En línea]. Available: <https://www.rp-photonics.com/interferometers.html>. [Último acceso: 12 9 2018].
- [12] K. M. Salas Alcántara, «Interferómetro Mach Zehnder en fibra óptica utilizando rejillas de periodo largo,» de Interferómetro Mach Zehnder en fibra óptica utilizando rejillas de periodo largo, León, Guanajuato, Centro de investigaciones en óptica, A.C., 2010, pp. 64 -84.

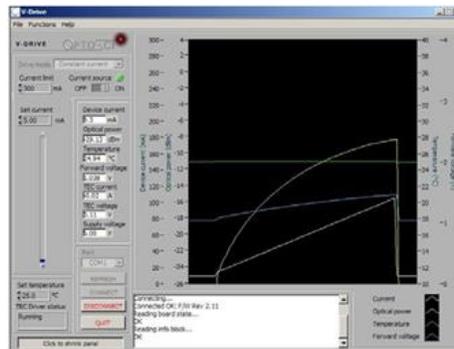
- [13] S. W. J. a. R. P. T. Richard P. Murphy, «Multiplexing of Fiber-Optic Long-Period Grating-Based Interferometric Sensors,» JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, vol. 25, n° 3, pp. 825 - 829, 2007.
- [14] Z.-G. G. a. S. He, «Coherence Multiplexing System Based on Asymmetric Mach–Zehnder Interferometers for Faraday Sensors,» IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, vol. 19, n° 23, pp. 1907-1909, 2007.
- [15] Y. L. a. L. Tong, «Mach-Zehnder interferometers assembled with optical microfibers or nanofibers,» OPTICS LETTERS, vol. 33, n° 4, pp. 303 - 305, 2008.
- [16] G. W. Y. C. Q. S. R. L. P. P. S. a. D. L. J. Wo, «Refractive index sensor using microfiber-based Mach–Zehnder interferometer,» OPTICS LETTERS, vol. 37, n° 1, pp. 67-69, 2012.
- [17] X. L. a. H. X. Tao Wei, «iber inline Core–Cladding-Mode Mach–Zehnder Interferometer Fabricated by Two-Point CO<sub>2</sub> Laser Irradiations,» IEEE Photon Technol. Lett, vol. 21, n° 10, p. 669, 2009.
- [18] C. A. A. D. O. A. M. F. M. P. S. G. G. a. R. D. A. A. Corchia, «Dispersion compensation using mid-span specspectral inversion without frequency shift,» Photonics Technology Letters, vol. 11, n° 2, pp. 275-277, 1998.
- [19] G. P. A. a. N. K. Dutta, Semiconductor Lasers, Norwel: Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [20] H. Ghafouri-Shiraz, Fundamentals of Laser Diode Amplifiers, Chichester: Willey, 1996.
- [21] C. Holtmann, Polarization insensitive semiconductor optical amplifiers in InGaAsP/InP for 1.3{mü}m wavelengths exploiting bulk ridge-waveguide structure device development characteristics and selected applications, Zürich: ETH Zürich, 1997.
- [22] S. V. Kartalopoulos, Optical Components, Michigan: SPIE Optical Engineering Press, 2000.
- [23] J. J. M. Rodríguez, Análisis de un amplificador óptico de semiconductor como modulador óptico para un sistema de telecomunicaciones, Ciudad de México, 2017.
- [24] [www.almalaboratorios.com](http://www.almalaboratorios.com)

## Anexo 1: Especificaciones del controlador de corriente y temperatura para diodos láser



### 1A Digital Laser Current & TEC Controller Module

LDR1000E



The LDR1000E laser driver module provides a versatile and user friendly platform for stable current and TEC control of laser diodes, SOAs, SLDs, 980nm pump lasers etc. The fully integrated digital Eurocard modules are designed for device characterisation, prototype development and experimental systems and offer easy device integration, full PC control and monitoring, or set & forget operation utilising the on-board EPROM.

LDR module includes power supply, ZIF mount & heatsink for 14-pin butterfly package, USB interface & PC communications cable and full V-DRIVE control software for easy operation straight out of the box.

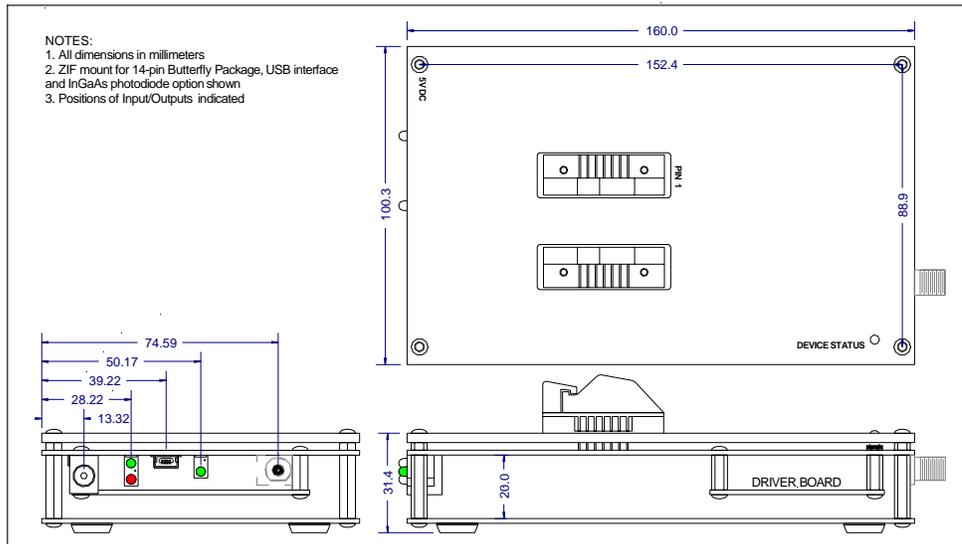
#### Features

- Device Drive Current up to 1A and TEC to 2.5A to ensure precise and stable device current and temperature control for a wide range of devices.
- Comprehensive driver software (V-DRIVE) supplied for full PC control and monitoring of the device. Optional V-DRIVE add-on for monitoring of up to 5 units simultaneously via USB interface.
- Microcontroller operation allows remote setting of device drive parameters via USB and eliminates the problems associated with manual setting of analogue potentiometers.
- Continuous traces of device drive parameters (power, current, forward voltage and temperature) are available on screen to enable ongoing monitoring of the device.
- V-DRIVE software includes LVI plotter allowing direct device characterisation with test data readily available in csv format.
- Device current & temperature settings can be saved to driver EPROM for set & forget operation with no need for connection to a PC.
- Integrated heatsink with demountable 14-pin Butterfly connectors as standard for easy device connection or changeover.
- User reconfigurable pin connections to suit various device pin out arrangements
- Custom modules available. Contact us to discuss custom device drivers with different specifications or other features.

## Specification

ITEM	SPECIFICATION	COMMENT
<b>Current Source Subsystem</b>		
Drive Current	10 □ 1000 mA	User adjustable in 0.1mA increments
Current stability (CC mode)	≤ 0.05%	8 hours @ 20°C, after warm up
Forward Voltage	≤ 4 V	
<b>TEC Subsystem</b> (Temperature specifications assume a standard 10k NTC thermistor)		
TEC Current	≤ 2.5 A	
Temp. set-point range	10 □ 40°C	User adjustable in 0.1°C increments
Temp. control stability	±0.02°C	8 hours @ 20°C, after warm up
<b>External Power Monitor (optional)</b>		
Input Optical Power	≤ 2.0 mW	
<b>PC Communications</b>		
Protocol	USB	USB connector
<b>General Data</b>		
Supply Voltage	4.5 □ 5.5 V	DC
Supply Current	≤ 3.5 A	Depends on TEC draw
Update Rate	3 Hz	
Operating Temperature	0 □ 35°C	
Storage Temperature	-10 □ 60°C	
Dimensions (LxWxH)	160 x 100 x 50 mm	Including 14-pin device connector
Weight	0.325 kg	
V-Drive Software Compatibility	Windows 98SE/NT/2000/XP	
Common Device Suitability	SOA, SLED, 980nm Pump Laser	14-pin Butterfly
Device Pin Compatibility <sup>1</sup>		

1. LD – Laser Diode, PD – Photodiode, GK – Grounded Cathode, GA – Grounded Anode, FL – Floating



### Ordering Information:

**LDR 1000 E-** 

**Driver:** .....  
 1000            1000mA LDR Driver

**Photodiode:** .....  
 IF            External InGaAs photodiode in FC receptacle  
 NO            None  
 CU            Custom Option

**Example:** *LDR1000E-IF - LDR, 1000mA Eurocard LDR controller, with ZIF mount & heatsink for 14-pin Butterfly package, USB interface and InGaAs photodiode in FC receptacle*

### Included Items

The LDR laser current and TEC controller modules are supplied with the following items as standard to allow quick and easy operation straight out of the box.

- Full V-DRIVE control software
- ZIF mount & heatsink for 14pin butterfly package
- USB interface & PC communications cable
- 5V mains power supply
- Operators manual

For other options and device mounts please contact OptoSci.

### Operation

A full operating manual is supplied describing the set-up and operation of the LDR1000E module and the V-DRIVE software.

Since OPTOSCI are committed to continuously improving the design and performance characteristics of our products, these specifications are subject to change without notice.

Date: November 2010

## Anexo 2: Especificaciones del diodo láser 980 nm 700mW



### SINGLE-MODE PUMP LASERS

600 mW, 700 mW Kink-Free Output Power Options

#### AC1409 SERIES

The Gooch & Housego line of single-mode, cooled 980 nm pump lasers deliver >700 mW of kink-free fiber-coupled power. The modules are packaged using unique laser-weld packaging technology for high reliability over harsh operating conditions. Improved PER is achieved using advanced fiber pigtail construction techniques.

The hermetically sealed 14-pin butterfly package is available with a fiber Bragg grating and includes thermoelectric cooler, thermistor, monitor photodiode and UniDry™ getter. The fiber Bragg grating precisely locks the center wavelength over extended power and temperature range.

Center wavelengths in the range of 976 nm to 980 nm are available with tight wavelength control.

G&H's pump lasers are tested to meet the requirements outlined in Telcordia GR-468-CORE.



#### Wavelengths Available

- 974, 976, 980 nm and custom wavelengths available

#### Features

- Internal cooler and themistor
- Optional fiber Bragg grating (FBG)
- Tested to Telcordia GR-468-CORE

#### Applications

- Defense
- Industrial
- Life sciences

AC1409 SERIES SINGLE-MODE PUMP LASER

Data sheet ref DS-7067 / Revision No. 03

As part of our policy of continuous product improvement, we reserve the right to change specifications at any time.

September 2017

Page 1

## Ordering Information

Example part number: AC1409-0976-0700-PM

Order code		①	②	③	④												
A	C	1	4	0	9	-				-					-		
①	Model Code	Standard AC1409															
②	Kink free power	600 mW						700 mW									
	Code	0600						0700									
③	Wavelength <sup>1</sup>	974 nm					976 nm					980 nm					
	Code	0974					0976					0980					
④	Fiber type	Polarization-maintaining					Single-mode fiber (non PM)					No grating					
	Code	PM					SM (976 only)					00					

<sup>1</sup> Other wavelength options available, contact sales for more information.

Contact sales if connector required.

### For further information

T: +1-781-275-7501  
E: bostonales@goochandhousego.com

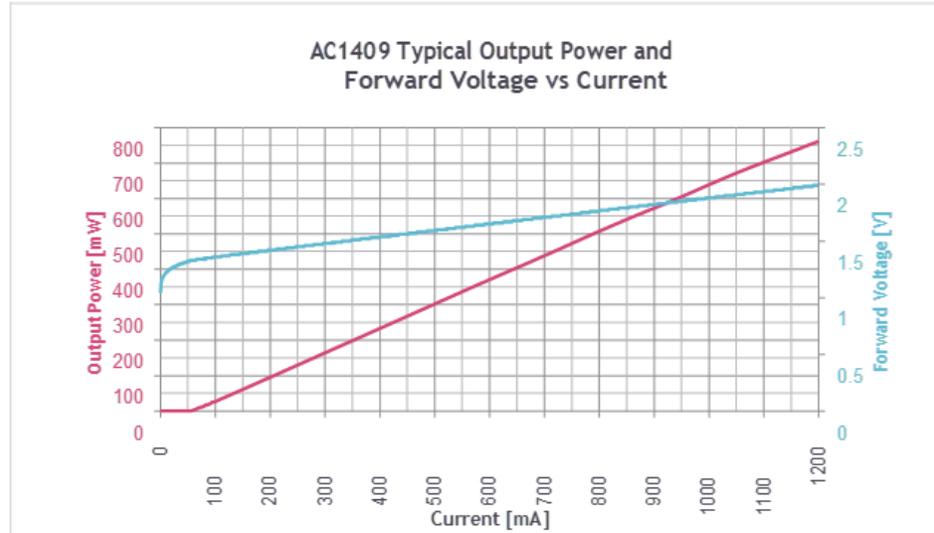
goochandhousego.com

## Typical Operating Characteristics

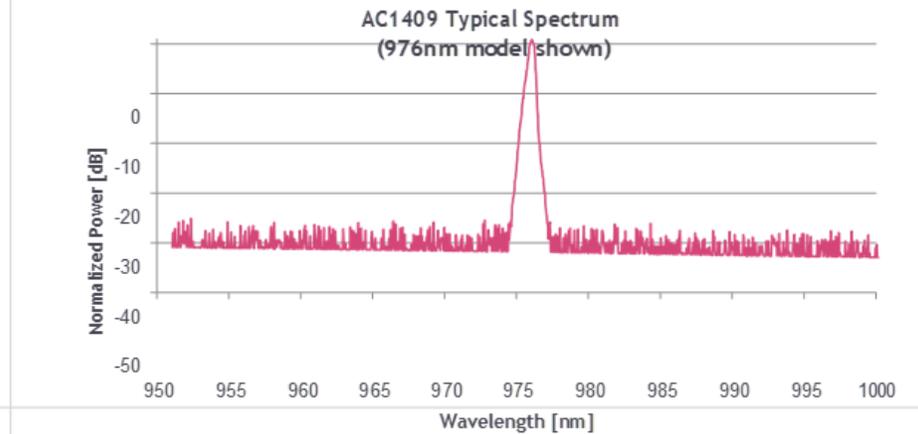
$T_{OP} = 25^{\circ}C$

Output power and voltage vs laser diode input

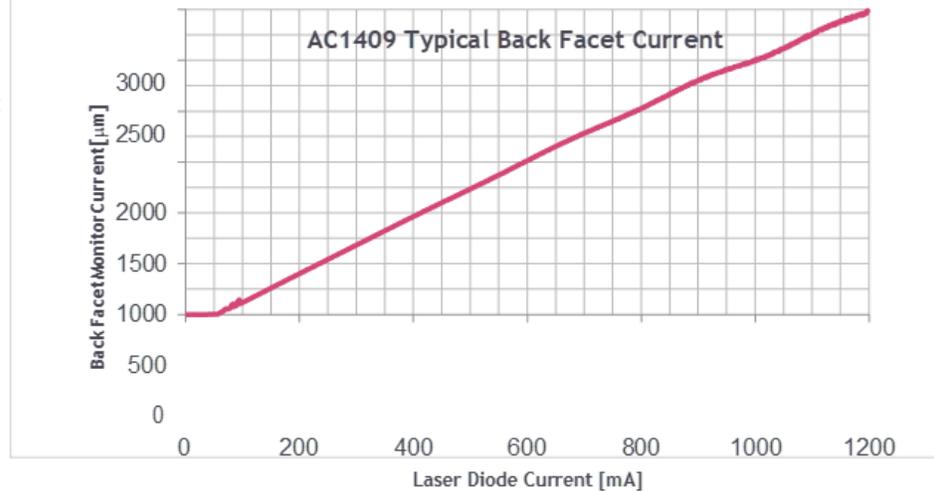
current.



Typical spectrum

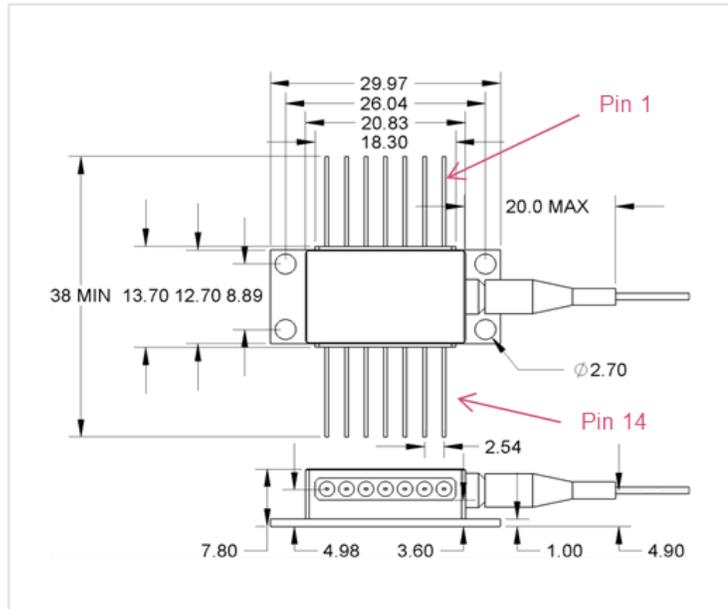


Typical back facet photodiode monitor current vs input current



## Pinout and Mechanical Drawing

Pin	Description	Pin	Description
1	TEC+	14	TEC-
2	Thermistor	13	Case GND
3	Monitor PD anode	12	NC
4	Monitor PD cathode	11	Laser cathode
5	Thermistor	10	Laser anode
6	NC	9	NC
7	NC	8	NC



Absolute Maximum Ratings*	Sym	Min	Max	Unit
Storage temperature	T <sub>STG</sub>	-40	+85	°C
Operating case temperature	T <sub>OP</sub>	-20	+65	°C
Laser forward current	I <sub>F</sub>		1.2	A
Laser reverse voltage	V <sub>R</sub>		2.0	V
Photo diode photo current	I <sub>PD</sub>		10	mA
Photo diode reverse voltage	V <sub>PD</sub>		20	V
TEC current	I <sub>TEC</sub>		6.0	A
TEC voltage	V <sub>TEC</sub>		4.0	V
Thermistor current			2	mA
Thermistor voltage			5	V
Lead soldering time			10	s
Lead soldering temperature			250	°C
ESD (human body model)			500	V

\* Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and operation of the device at or beyond these conditions is not implied. Exposure to absolute maximum ratings for extended periods of time may affect device reliability.

## Ordering Information

Example part number: AC1409-0976-0700-PM

Order code		①	②	③	④												
A	C	1	4	0	9	-				-					-		
①	Model Code	Standard AC1409															
②	Kink free power	600 mW						700 mW									
	Code	0600						0700									
③	Wavelength <sup>1</sup>	974 nm					976 nm					980 nm					
	Code	0974					0976					0980					
④	Fiber type	Polarization-maintaining					Single-mode fiber (non PM)					No grating					
	Code	PM					SM (976 only)					00					

<sup>1</sup> Other wavelength options available, contact sales for more information.

Contact sales if connector required.

### For further information

T: +1-781-275-7501

E: [bostonales@goochandhousego.com](mailto:bostonales@goochandhousego.com)

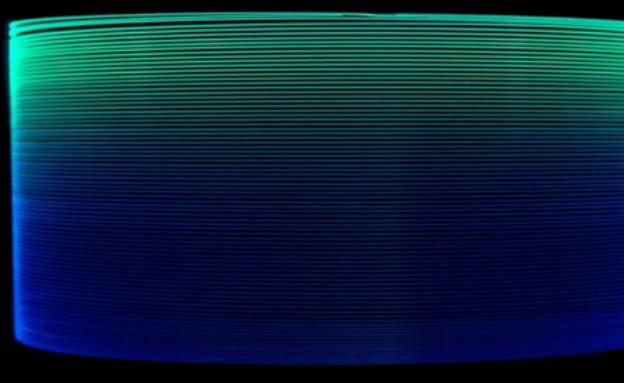
[goochandhousego.com](http://goochandhousego.com)

## Anexo 3: Especificaciones la fibra dopada con Erblio (2m) ER80 4/125, 1530-1610 nm

LIEKKI®

Er80-8/125 – Large Mode Area Erbium Doped Fiber

LIEKKI® Er80-8/125 fiber is a very highly doped large mode area erbium fiber suitable for medium-power amplifiers and lasers. Good spliceability, high doping and a large core make these fibers ideal for medium peak power pulse amplification in the eye-safe 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength region. The high erbium concentration reduces the required application fiber length considerably while providing strong gain and reduced non-linear effects.



### Features

- Excellent batch consistency of erbium peak absorption and spectral shape
- Ideal for pulse amplification in the 1550 nm range
- Very short fiber lengths (typically less than 2 m) reduces non-linear effects like FWM, SRS and SBS
- Very good temperature behavior
- Suitable for both 980 nm and 1480 nm pumping
- Dual layer UV-cured acrylate coating
- Telecom-like geometry with good spliceability to standard single mode and 1060 pigtail fibers (SMF-28)

### Applications

- Short pulse amplifiers
- Medium power, low non-linearity applications
- LIDAR
- Medical
- Sensing

### Typical Fiber Specifications

Fiber		LIEKKI® Er80-8/125
Optical	Units	
Mode Field Diameter at 1550 nm	$\mu\text{m}$	$9.5 \pm 0.8$
Peak Core Absorption at 1530 nm	dB/m	$80.0 \pm 8.0$
Core Numerical Aperture (nominal)		0.13
Cut-off Wavelength	nm	$1250 \pm 150$
Geometrical and mechanical		
Core Concentricity Error, $\leq$	$\mu\text{m}$	0.7
Cladding Diameter (flat-to-flat)	$\mu\text{m}$	$125 \pm 2$
Cladding Geometry		Round
Coating Diameter		$245 \pm 15$
Coating Material		Dual coated high index acrylate
Proof Test, $\geq$	kpsi	100

## Anexo 4: Especificaciones del acoplador WDM 980nm/1550nm

**THORLABS**

### Wavelength Division Multiplexer



WD9850BB

#### Description

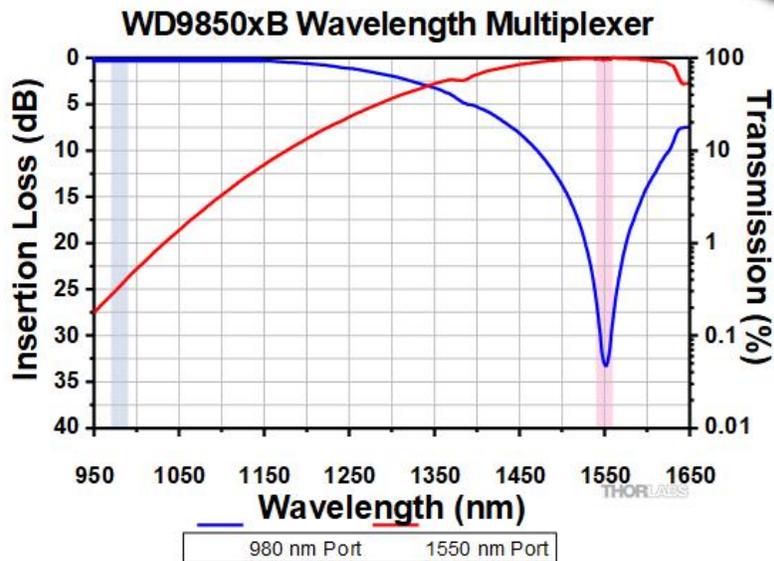
Thorlabs' WD9850BB Wavelength Division Multiplexer (WDM) is designed to combine light from two inputs into a single fiber. This WDM is designed for 980 nm and 1550 nm wavelengths. Like all fused fiber devices, it is bidirectional: it can be used to split two wavelengths from a single input into two outputs.

#### Specifications

	Port 1	Port 2
Wavelength	980 nm	1550 nm
Bandwidth	±10 nm	±10 nm
Insertion Loss <sup>a</sup>	≤0.3 dB	≤0.3 dB
Transmission <sup>b</sup>	≥93%	≥93%
Isolation <sup>a,c</sup>	980 nm 1550 nm	N/A ≥19 dB N/A
Polarization-Dependent Loss (PDL) <sup>a</sup>		≤0.2 dB
Optical Return Loss/Directivity <sup>a</sup>		≥60 dB
Max Power Level <sup>d</sup>		1 W (Bare Fiber) 5 W (Spliced)
Fiber Type <sup>d</sup>		HI1060 FLEX
Fiber NA		0.22
Port Configuration		1x2
Fiber Lead Length and Tolerance		0.8 m +0.075 m/-0.0 m
Connectors		No Connectors, Scissor Cut
Package Size		Ø0.12" x 2.95" (Ø3.2 mm x 75.0 mm)
Jacket		Ø900 µm Hytrel <sup>®</sup> Loose Tube
Pigtail Tensile Load		10 N
Operating Temperature Range		-40 to 85 °C
Storage Temperature Range		-40 to 85 °C

- All values are specified over the bandwidth without connectors.
- Calculated from insertion loss specification above.
- Isolation represents the maximum crosstalk between the channels.
- Specifies the total maximum power allowed through the component. Coupler performance and reliability under high-power conditions must be determined within the user's setup. See Usage Tips for safety and handling information.
- Other fiber types are available upon request. Please contact techsupport@thorlabs.com with inquiries.

## Typical Performance Plot

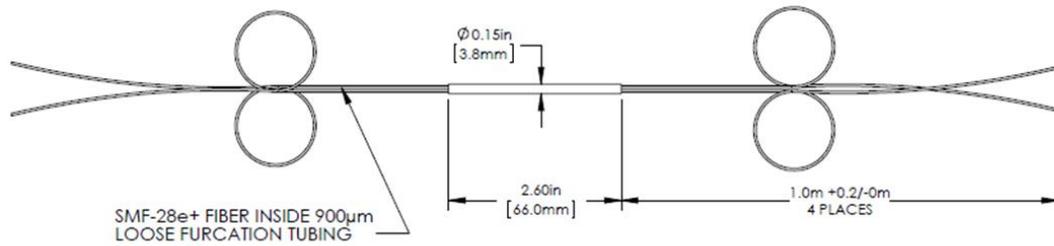
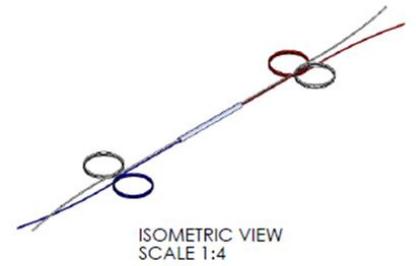


This plot shows the spectral performance of a typical 980 nm / 1550 nm WDM. The lines represent the spectral response of each channel, while the colored regions denote the bandwidth around the center wavelengths. This data was measured without connectors.

## Usage Tips

- 1) Before connecting a component to a system, make sure the light source is turned off. Inspect both the input and output fiber ends; debris or contamination on the end face can lead to fiber damage when operated at high powers.
- 2) After connecting the component, the system should be tested and aligned using a light source at low power. The system power can be ramped up slowly to the desired output power while periodically verifying all components are properly aligned and that coupling efficiency is not changing with respect to optical launch power.
- 3) The device can be spliced into a setup for operation at higher optical powers. Fiber ends should always be cleaned and cleaved prior to splicing.

## Anexo 5: Especificaciones del Acoplador 90/10



COUPLING SPECIFICATIONS	
CENTER WAVE LENGTH	1310/1550 nm
OPERATING BAND WIDTH	$\pm 40$ nm
COUPLING RATIO	90:10
INSERTION LOSS	12.7/0.8 dB
TYPICAL EXCESS LOSS	0.2 dB
PDL	<0.15 dB
DIRECTIVITY	>60 dB
OPERATING TEMPERATURE °C	-40 TO 85 °C

FOR INFORMATION ONLY  
NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES

DRAWING PROJECTION			<b>THORLABS</b> www.thorlabs.com	
NAME	DATE	2X2, 1310/1550nm SM COUPLER 90:10		
DRAWN TDG	24/OCT/11	MATERIAL	N/A	REV B
APPROVAL KH	9/NOV/11	ITEM #	10202A-90	APPROX WEIGHT 0.09 kg
COPYRIGHT © 2013 BY THORLABS				
VALUES IN PARENTHESES ARE CALCULATED AND MAY CONTAIN ROUND-OFF ERRORS				

## Anexo 6: Especificaciones del acoplador 50/50

# 1x2/2x2 Single Mode Super Wideband Couplers - 1260~1620nm



This coupler is made using fused fiber technique to achieve a super-wide operating bandwidth. It operates from 1260nm to 1620nm. It is suitable for applications that require compatibility across the whole operation window of the 9/125 micron single mode optical fiber.

At this stage, only **3dB coupler (50/50)** is available for this product.

### Features:

- Super-wide operating wavelength range
- High directivity
- Low PDL
- Dia3.0mm steel tube package

### Applications:

- Telecommunications
- Test systems
- R&D

### Specifications:

Parameter	Values
Operating Wavelength (nm)	1260~1620
Configuration	1x2 or 2x2
Max. Excess Loss (dB)	0.3
Max. Insertion Loss (dB) – 50/50 Coupler	3.80
Min. Directivity (dB)	50
Max. PDL (dB)	0.15
Max. Uniformity (dB)	0.8
Fiber Type	SMF-28e
Operating Temperature (°C)	0 ~ +70
Storage Temperature (°C)	-40 ~ +85
Package Dimension (mm)	Dia3.0x54

## Anexo 7: Especificaciones del amplificador óptico de semiconductor

Product Specification, Revision 1.50

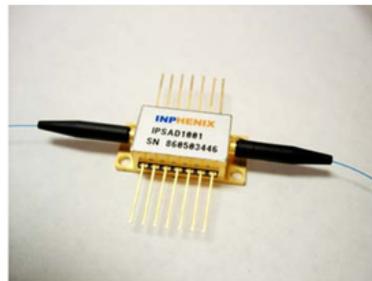
# INPHENIX

### Semiconductor Optical Amplifier Device (Switch Type)

#### IPSAD1513 (1550nm)

##### Features

- Wide Optical Bandwidth
- Fast Switching Speed
- High Extinction Ratio
- Low Polarization Sensitivity
- MQW or Bulk Structure



##### Applications

- Optical Gate Switching with Loss Compensation
- Wavelength Routing
- Matrix Switch

##### Device Specifications

Parameter	Symbol	Specifications			Unit	
		Min.	Typ.	Max.		
Drive Current	$I_F$	-	500	600	mA	
Operating Wavelength	$\lambda_o$	1528	-	1562	nm	
3dB Optical Bandwidth	$\Delta\lambda_{3dB}$	-	-	-	nm	
Small Signal Gain @ -25dBm Signal	$G_{max}$	10	13	-	dB	
Gain Ripple with Respect to $\lambda$	$\Delta G$	-	0.2	1	dB	
Saturation Output Power	$P_{sat}$	12	14	-	dBm	
Noise Figure	NF	-	-	9.5	dB	
Polarization Dependent Gain	PDG	-	1	1.8	dB	
Extinction Ratio	ER	-	60	-	dB	
Switching Properties	Rise Time	$t_r$	-	1000	-	ps
	Fall Time	$t_f$	-	1000	-	ps

All information contained herein is believed to be accurate and is subject to change without notification. No responsibility is assumed. Please contact InPhenix for more information. InPhenix and the InPhenix logo are trademarks of InPhenix Inc. All rights are reserved.

# INPHENIX

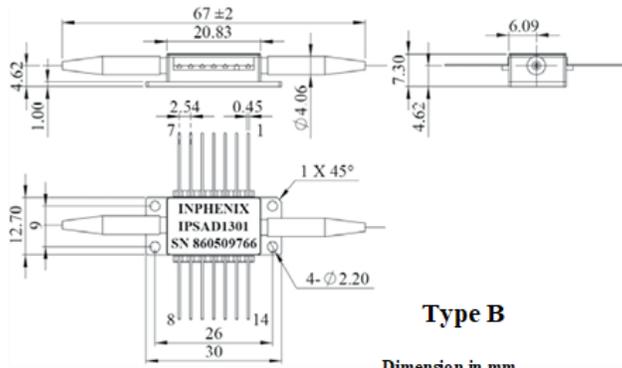
## Absolute Maximum Ratings

Parameter	Min.	Max.	Unit
Operating Temperature	- 20	70	°C
Storage Temperature	- 40	85	°C
SOA Forward Current	-	1000	mA
SOA Reverse Voltage	-	2.5	V
TEC Drive Current	-	1.5	A
TEC Drive Voltage	-	3.6	V
Thermistor Resistance	10kΩ @ 25°C		
SOA Chip Temperature Setting	25°C		
Fiber Type	SMF/PMF/MMF ClearCurve Fiber		
Fiber Jacket	250μm tight buffer with/without 900μm loose tube, or 900μm tight buffer		
Package	14-pin Butterfly		

All information contained herein is believed to be accurate and is subject to change without notification. No responsibility is assumed. Please contact InPhenix for more information. InPhenix and the InPhenix logo are trademarks of InPhenix Inc. All rights are reserved.

# INPHENIX

## Package Dimensions



**Type B**

Dimension in mm  
Tol: ±0.13

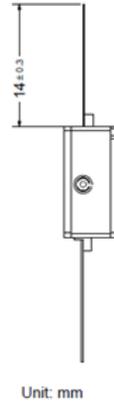
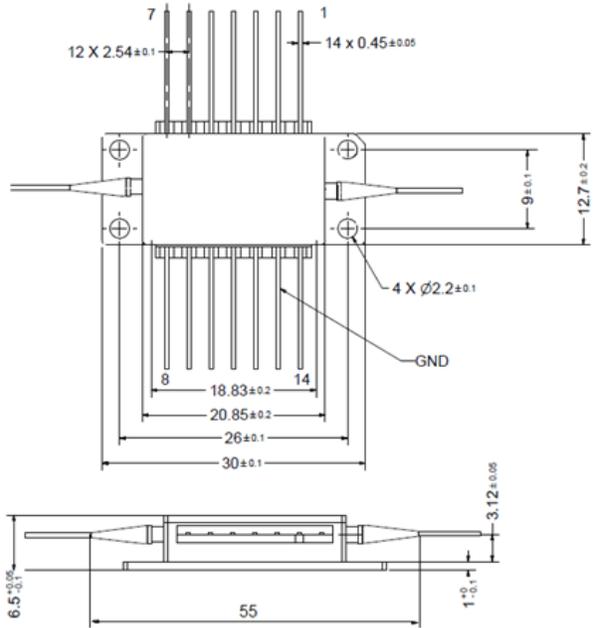
## Pin Definition

Pin	14-pin Butterfly
1	TEC(+)
2	NC
3	Thermistor *
4	Thermistor *
5	NC
6	NC
7	NC
8	NC
9	NC
10	SOA(+)
11	SOA(-)
12	NC
13	Case
14	TEC(-)

Option: Pin 2 & Pin 5 for thermistor

All information contained herein is believed to be accurate and is subject to change without notification. No responsibility is assumed. Please contact InPhenix for more information. InPhenix and the InPhenix logo are trademarks of InPhenix Inc. All rights are reserved.

# INPHENIX



## Type C

Dimension in mm  
Tol: ±0.13

### Pin Definition

Pin	14-pin Butterfly
1	TEC(+)
2	NC
3	Thermistor *
4	Thermistor *
5	NC
6	NC
7	NC
8	NC
9	NC
10	SOA(+)
11	SOA(-)
12	NC
13	Case
14	TEC(-)

Option: Pin 2 & Pin 5 for thermistor

All information contained herein is believed to be accurate and is subject to change without notification. No responsibility is assumed. Please contact InPhenix for more information. InPhenix and the InPhenix logo are trademarks of InPhenix Inc. All rights are reserved.

# INPHENIX

## Part Numbering System



**Model:**

IPSAD1302: 1310nm Switch-type SOA Device  
IPSAD1502: 1550nm Switch-type SOA Device

**Package:**

5: 14-pin Butterfly, Type B  
6: 14-pin Butterfly, Type C

**Fiber Type:**

1: SM fiber                    3: MM fiber  
2: PM fiber                    8: SM ClearCurve fiber

**Jacket Type:**

1: 900µm  
2: 250µm

**Connector Type:**

0: No Connectors  
3: FC/APC  
4: FC/UPC  
7: SC/APC  
8: SC/UPC

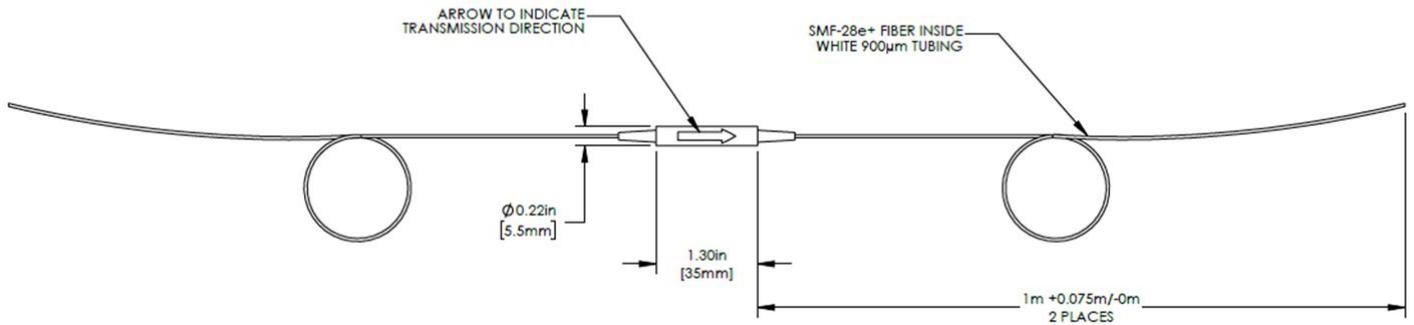
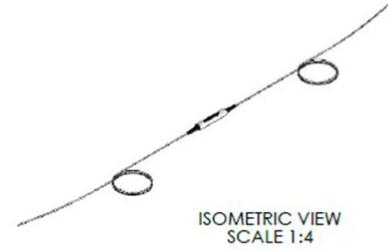
**Example:** IPSAD1302-5110: 1310nm Switch-type SOA in 14-pin Butterfly Package with 900µm SM Fiber with no Connectors.

**Corporate Office**

250 North Mines Rd  
Livermore, CA 94551  
Tel: 925.606.8809  
Fax: 925.606.8810  
[www.inphenix.com](http://www.inphenix.com)  
[sales@inphenix.com](mailto:sales@inphenix.com)

All information contained herein is believed to be accurate and is subject to change without notification. No responsibility is assumed. Please contact InPhenix for more information. InPhenix and the InPhenix logo are trademarks of InPhenix Inc. All rights are reserved.

## Anexo 8: Especificaciones del aislador 1530-1570



ISOLATOR SPECIFICATIONS	
OPERATING WAVELENGTH	1550±20nm
POWER	≤ 300mW
MINIMUM ISOLATION (@ 25°C)	29dB
TYPICAL INSERTION LOSS (@ 25°C)*	≥ 0.5dB
MAXIMUM INSERTION LOSS 0~70°C	≤ 0.70dB
PDL (@ 23°C)	≤ 0.15dB
RETURN LOSS (INPUT/OUTPUT)	≥ 55/50dB
OPERATING TEMPERATURE (°C)	0 ~+70
STORAGE TEMPERATURE (°C)	-40 ~+85

\*ISOLATION IS BOTH WAVELENGTH AND TEMPERATURE DEPENDENT.  
\*ALL SPECIFICATIONS ARE GIVEN BASED ON NON-CONNECTORIZED MODEL

FOR INFORMATION ONLY  
NOT FOR MANUFACTURING PURPOSES

DRAWING PROJECTION				<b>THORLABS</b> www.thorlabs.com	
DRAWN	NAME	DATE	FIBER ISOLATOR, 1550nm, LOW POWER, FIBER TO FIBER		
APPROVAL	CL	09/JAN/13	MATERIAL	N/A	REV B
COPYRIGHT © 2013 BY THORLABS			ITEM #	10-H-1550	APPROX WEIGHT
VALUES IN PARENTHESIS ARE CALCULATED AND MAY CONTAIN ROUND-OFF ERRORS					5 g