



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**Optimización de un Sistema Óptico que
Atenúa Ruido ASE por Medio de un
Interferómetro de Sagnac que se usa como
Filtro Pasa Banda**

**TRABAJO DE TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
Ingeniero en Redes**

**PRESENTA
Br. Ediel Gámez Avilés**

**DIRECTOR DE TESIS
Ing. Francisco Méndez Martínez**

ASESORES

Dr. Homero Toral Cruz

Dr. Freddy Ignacio Chan Puc

Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta

Dr. Jaime Silverio Ortegón Aguilar



**UNIVERSIDAD DE
QUINTANA ROO
SERVICIOS ESCOLARES**





UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**TRABAJO DE TESIS ELABORADO BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ
DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO EN REDES**

Comité de Trabajo de Tesis

DIRECTOR:

Ing. Francisco Méndez Martínez

ASESOR:

Dr. Homero Toral Cruz

ASESOR:

Dr. Freddy Ignacio Chan Puc



DCI DIVISIÓN DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD DE
QUINTANA ROO
SERVICIOS ESCOLARES
TITULACIONES

CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2016

Dedicatoria

A MI DIOS

Todo Poderoso por haberme dado una Familia maravillosa, y haberme permitido llegar hasta donde estoy.

A MI FAMILIA

A mi madre a quien admiro y respeto. Sra. Lucia Aviles Rodríguez y de quien me siento orgulloso de mencionar por la educación, consejos, disciplina y darme el apoyo que necesité en el tiempo que estuve cursando la carrera en Ingeniería en Redes, hasta la conclusión de la misma. A mis hermanos Nely y Fidel por su comprensión y apoyo.

A MIS MAESTROS

Dr. Manuel May Alarcón, Dr. Francisco Méndez Martínez y el Dr. Homero Toral Cruz por el apoyo incondicional que me brindaron, a todos mis maestros de la División de Ciencias e Ingenierías, por haberme apoyado y transmitido sus conocimientos.

Agradecimientos

A la universidad de Quintana Roo (UQROO) en conjunto con la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR) por permitirme realizar mi sueño de terminar la carrera de Ingeniería en Redes.

Resumen

En este trabajo se presenta la optimización y caracterización de un arreglo experimental que es utilizado para realizar la atenuación del ruido ASE para una señal de prueba utilizando un interferómetro de Sagnac (SI) como filtro pasa banda, que utiliza fibra de alta birrefringencia (Hi-Bi) [1] con una longitud adecuada la cual es calentada a diversas temperaturas para la obtención de la máxima transmitancia en 1548.4 nm y la mínima en 1530nm. Una vez implementado el arreglo experimental, se caracterizó para conocer la condición del arreglo. Las principales optimizaciones que se realizaron fueron la eliminación de los excesos de empalmes que se encontraban, dejando solo los necesarios, el ajuste de potencia del diodo de bombeo, y se obtuvo la longitud adecuada de la fibra de Hi-Bi.

Para realizar dicha optimización se generó un conjunto de gráficas y tablas a partir de los resultados de la caracterización realizada a la señal transmitida por el SI en el arreglo optimizado y finalmente se realizó la comparación con los parámetros obtenidos antes de dicha optimización.

Dentro del presente trabajo de tesis se presentan las bases teóricas necesarias para la comprensión del mismo y la explicación del funcionamiento del arreglo experimental. Los parámetros que se caracterizaron fueron la transmitancia y la reflectancia del interferómetro de Sagnac. Como resultados principales se presentan las mejoras que se obtuvieron al realizar dicha optimización.

Finalmente se dio una opinión referente a la optimización del arreglo experimental, el cual puede ser utilizado en futuros proyectos.

<u>ÍNDICE DE FIGURAS</u>	<u>7</u>
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
<u>LISTA DE ACRÓNIMOS</u>	<u>9</u>
<u>CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>10</u>
1.1 ANTECEDENTES.....	10
1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	11
1.3 PROPUESTA DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA.....	11
1.4 JUSTIFICACIÓN	12
1.5 OBJETIVO GENERAL	12
1.5.1 OBJETIVOS PARTICULARES	12
1.6 METODOLOGÍA.....	12
1.8 CONTENIDO DE LA TESIS	13
<u>CAPÍTULO II BASES TEÓRICAS.....</u>	<u>14</u>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	14
2.2 LA BIRREFRINGENCIA EN LAS FIBRAS ÓPTICAS.....	15
2.3 DESCRIPCIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN, ATENUACIÓN Y PÉRDIDAS	16
2.4 TEMPERATURA	20
2.5 POLARIZACIÓN.....	20
2.6 INTERFERÓMETROS	22
2.7 INTERFERÓMETRO DE MICHELSON.....	22
2.8 INTERFERÓMETRO DE SAGNAC.....	23
2.9 INTERFERÓMETRO DE SAGNAC DE FIBRA ÓPTICA TORCIDA 90 GRADOS.....	24
<u>2.8 RUIDO ASE</u>	<u>31</u>
<u>2.9 RESUMEN</u>	<u>31</u>
<u>CAPÍTULO III ARREGLO EXPERIMENTAL.....</u>	<u>32</u>
INTRODUCCIÓN	32
3.1 ¿POR QUÉ SE HACE?	32
3.2 ARREGLO EXPERIMENTAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA ÓPTICO QUE ATENÚA RUIDO ASE POR MEDIO DE UN INTERFERÓMETRO DE SAGNAC.....	33
RESUMEN.....	39

<u>CAPÍTULO IV RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</u>	<u>40</u>
INTRODUCCIÓN	40
4.1 ANÁLISIS Y RESULTADOS	40
<u>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....</u>	<u>60</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>62</u>

Índice de figuras

<i>Ilustración 1 Arreglo experimental propuesto para optimizar el sistema óptico que atenúa el ruido ASE</i>	<i>11</i>
<i>Ilustración 2 Pérdida por absorción</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 3 Pérdida de rayleigh.....</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 4 Interferómetro de Michelson.....</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 5 Interferómetro de Sagnac.....</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 6 Interferómetro de Sagnac.....</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 7 Arreglo Experimental.....</i>	<i>33</i>
<i>Ilustración 8 arreglo experimental utilizado para la optimización de un sistema óptico que atenúa ruido ASE dividido en 1) EDFA, 2) circulador y 3) SI</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 9 EDFA</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 10 Circulador.....</i>	<i>35</i>
<i>Ilustración 11 Interferómetro de Sagnac.....</i>	<i>36</i>
<i>Ilustración 12 Arreglo con exceso de empalmes</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 13 Ubicación de acoplador 90/10.....</i>	<i>37</i>
<i>Ilustración 14 Diodo Laser 980 nm.....</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 15 Arreglo experimental optimizado.....</i>	<i>39</i>
<i>Ilustración 16 Comparación del exceso de empalmes en el arreglo (Antes).....</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 17 comparación del exceso de empalmes en el arreglo (Después)</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 18 Grafica de la transmitancia del SI a temperatura ambiente.....</i>	<i>42</i>
<i>Ilustración 19 Grafica de la salida 3 del circulador (reflectancia) a temperatura ambiente</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 20 Grafica de transmitancia a 30°C.....</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 21 Grafica de transmitancia a 33.1°C.....</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 22 Grafica de transmitancia a 42°C.....</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 23 Grafica de transmitancia a 46.2°C.....</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 24 Grafica de transmitancia a 62.5°C.....</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 25 Grafica de transmitancia a 67.7°C.....</i>	<i>49</i>

<i>Ilustración 26 Grafica de transmitancia a 78.1°C</i>	50
<i>Ilustración 27 Grafica de transmitancia a 87.4°C</i>	51
<i>Ilustración 28 Grafica de transmitancia a 95.8°C</i>	52
<i>Ilustración 29 Grafica de transmitancia a 103.2°C</i>	53
<i>Ilustración 30 Transmitancia a 30 °C a 1V</i>	54
<i>Ilustración 31 Transmitancia a 33.1 °C a 2V</i>	54
<i>Ilustración 33 Reflectancia a 30 °C a 1V</i>	55
<i>Ilustración 32 Reflectancia a 33.1 °C a 2V</i>	55

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Comparación de los niveles de potencia a diferentes temperaturas</i>	55
<i>Tabla 2 Potencia de bombeo 70-100 a 30°C</i>	56
<i>Tabla 3 Potencia de bombeo 70-100 a 33.1°C</i>	56
<i>Tabla 4 Potencia de bombeo 70-100 a 42° C</i>	56
<i>Tabla 5 Potencia de bombeo 70-100 a 46.2° C</i>	57
<i>Tabla 6 Potencia de bombeo 70-100 a 62.5° C</i>	57
<i>Tabla 7 Potencia de bombeo 70-100 a 67.7° C</i>	57
<i>Tabla 8 Potencia de bombeo 70-100 a 78.1° C</i>	58
<i>Tabla 9 Potencia de bombeo 70-100 a 87.4° C</i>	58
<i>Tabla 10 Potencia de bombeo 70-100 a 95.8° C</i>	58
<i>Tabla 11 Potencia de bombeo 70-100 a 103.2° C</i>	59

Lista de acrónimos

EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier – Amplificador de Fibra Dopada con Erbio
WDM	Wavelength Division Multiplexing—Multiplexaje por División de Longitud de Onda
OSA	Optical Spectrum Analyzer—Analizador de Espectros Ópticos
ASE	Amplified Spontaneous Emission—Emisión Espontánea Amplificada
FBG	Fiber Bragg Grating—Rejillas de Bragg de Fibra Óptica
SI	Sagnac interferometer – Interferómetro de Sagnac
LASER	Amplification by Stimulated Emission of Radiation-- Luz Amplificada por la Emisión Estimulada de Radiación
Hi-Bi	High Birrefringence- Alta Birrefringencia
dBm	Decibel-Milliwatts
He-Ne	Helio-Neón

Capítulo I Introducción

1.1 Antecedentes

A nivel general se han realizado investigaciones experimentales donde se aplica un filtro térmico sintonizable, basado en el interferómetro de Sagnac (SI, *sagnac interferometer*) que es un dispositivo que está compuesto por un acoplador 50/50 y un lazo de fibra de alta birrefringencia (Hi-Bi, *high birrefringence*) donde la birrefringencia es la diferencia entre los valores de los índices modales correspondientes a ambas constantes de propagación de la fibra, la palabra birrefringencia [2] indica la existencia de dos índices de refracción diferentes. Las fibras de alta birrefringencia han sido ampliamente utilizadas para el control de la polarización en sensores de fibra óptica, en instrumentos ópticos de precisión y en sistemas de comunicación óptica. Una de las aplicaciones de la fibra Hi-Bi es en el interferómetro de Sagnac que se usa para eliminar la mayor contribución del ruido producido por amplificación de emisión espontánea (ASE, *Amplified Spontaneous Emission*) en una fibra dopada con erbio. Si en el SI se selecciona adecuadamente la longitud de la fibra de Hi-Bi en el lazo y debido a su alta sensibilidad a variaciones de temperatura, es posible ajustar la transmitancia del SI y emplearlo como filtro térmicamente sintonizable [3],[4]. Los resultados experimentales que se han obtenido a nivel general muestran que es posible eliminar la mayor contribución del ruido de ASE por lo que este dispositivo ofrece un gran potencial para ser empleado en amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA, *Erbium-doped fiber amplifiers*) [5].

A nivel local se ha realizado la construcción de un arreglo experimental que es utilizado para disminuir la atenuación del ruido ASE en una señal de prueba de 1548.4 nm. El arreglo experimental está conformado por un interferómetro de Sagnac que utiliza Hi-Bi con las longitudes de 8 cm, 22 cm y 110 cm, las cuales fueron calentadas a diversas temperaturas, donde el SI se utiliza como filtro pasa-banda y tiene la función de realizar la atenuación del ruido ASE. También se ha realizado la caracterización y comparación de las potencias de salida a diferentes temperaturas de una rejilla de Bragg con un espejo de lazo óptico no lineal o interferómetro de Sagnac que pueden ser utilizados en un amplificador para aumentar una señal de entrada proporcionada por un diodo láser. La rejilla de Bragg es un dispositivo donde su principal propiedad es reflejar la luz que tiene la misma longitud de

onda de Bragg y deja pasar todas aquellas longitudes de onda que no coinciden con la longitud de Bragg [6], [7].

1.2 Identificación del problema

Optimizar el arreglo experimental de un trabajo previo enfocándose en 3 parámetros importantes, la potencia de bombeo, la longitud adecuada de fibra de alta birrefringencia y la atenuación introducida por exceso de empalmes.

1.3 Propuesta de solución al problema

Llevar el arreglo a su nivel óptimo ajustando la potencia de bombeo adecuada, mediante la utilización de un tramo de fibra dopada con erbio de 10 m, la optimización de la longitud de Hi-Bi del lazo del interferómetro de Sagnac haciendo que la señal de prueba esté en la transmitancia máxima y la señal de ruido del espectro ASE esté en la transmitancia mínima, y eliminación de la mayor cantidad posible de empalmes que atenúan la señal. En la *Ilustración 1* se presenta el arreglo experimental óptimo propuesto.

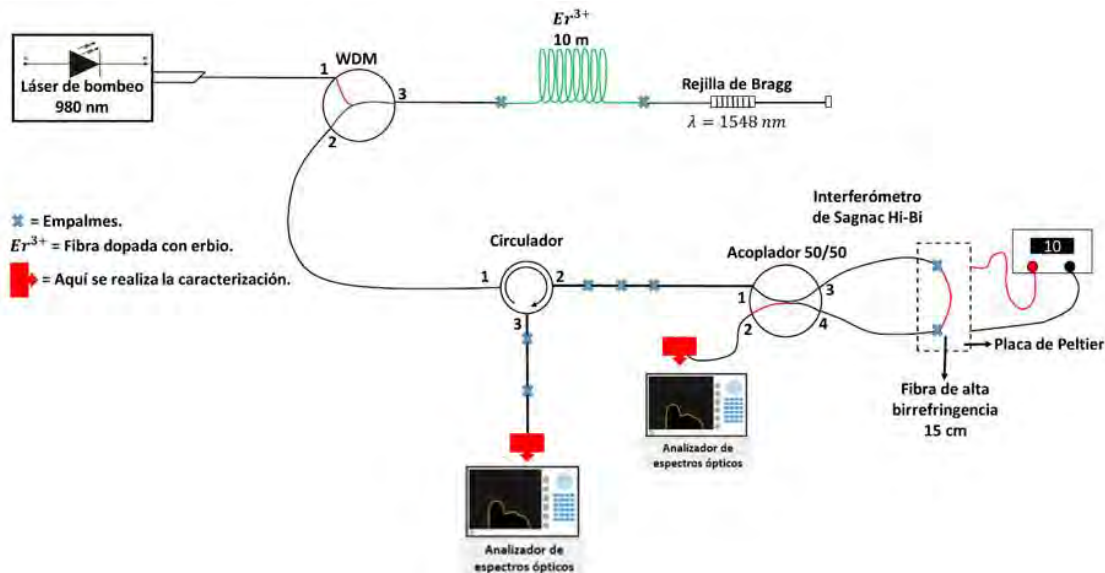


Ilustración 1 Arreglo experimental propuesto para optimizar el sistema óptico que atenúa el ruido ASE

1.4 Justificación

Al optimizar el lazo óptico no lineal o interferómetro de Sagnac utilizado como filtro pasa banda para la atenuación del ruido ASE permite conocer parámetros importantes como son la transmitancia y la reflectancia las cuales dependen de las variaciones de temperatura y de potencia de bombeo; los beneficios de estos resultados proporcionan una mejor calidad en la transmisión de datos, la amplificación de señales más pequeñas y una mayor relación señal a ruido y se pueden aplicar para trabajos futuros en el área de sensores de fibra óptica así como servir de referencia para futuras investigaciones.

1.5 Objetivo general

Optimizar la transmitancia de un interferómetro de Sagnac mejorando parámetros de bombeo, longitud de fibra de Hi-Bi, y disminución del número de empalmes.

1.5.1 Objetivos particulares

- Optimizar el número de empalmes utilizados en el sistema.
- Optimizar la potencia de bombeo
- Empalmar la longitud de fibra óptica de alta birrefringencia adecuada para tener la máxima transmitancia en 1548.4 nm y la mínima en 1530 nm.
- Caracterizar el sistema a temperatura ambiente.
- Ajustar por medio de temperatura el punto mínimo y máximo de la transmitancia.
- Caracterizar el Interferómetro de Sagnac con cambios de temperatura sobre la fibra de Hi-Bi.

1.6 Metodología

- Localizar en el arreglo experimental los empalmes que se encuentran en exceso para eliminarlos y dejar solo los necesarios.
- Utilizar una fibra dopada con erbio con una longitud de 10 m.
- Optimizar el bombeo adecuado obtenido por las caracterizaciones del diodo de bombeo.

- Calcular la longitud adecuada de fibra de Hi-Bi por medio de la siguiente ecuación:

$$L = \frac{\lambda^2}{(\Delta\lambda)(\Delta n)}$$

- Optimizar el SI con respecto a la longitud obtenida de la fibra de Hi-Bi para que deje pasar la longitud de onda de 1548.4 nm y bloquee la de 1530 nm.
- Empalmar la fibra de alta birrefringencia a la medida determinada por la ecuación antes mencionada.
- Realizar la caracterización del arreglo a temperatura ambiente y tomar los datos obtenidos.
- Realizar la caracterización del arreglo con variaciones de temperatura para ajustar los parámetros máximos y mínimos de la transmitancia y tomar los datos obtenidos.
- Graficar mediante un software especializado los resultados obtenidos (Origin pro 8).
- Analizar los resultados.

1.8 Contenido de la tesis

El capítulo 2 presenta las bases teóricas en las cuales se fundamenta este trabajo de tesis: optimización, atenuación, ruido ASE, interferómetro Mach-Zehnder, Michelson y Sagnac, temperatura y polarización.

El capítulo 3 presenta el arreglo experimental que se utiliza para la realización de esta tesis, el cual está formado por la sección del EDFA, la sección del interferómetro de Sagnac y la placa de Peltier.

El capítulo 4 presenta los resultados obtenidos en la experimentación al optimizar el arreglo experimental en 3 puntos importantes, potencia de bombeo adecuada, eliminación de exceso de empalmes y la utilización de una longitud de fibra de alta birrefringencia de 15cm. La fibra de alta birrefringencia es sometida a variaciones de temperatura, también se realiza el análisis de dichos resultados, así como también la discusión de los mismos.

El capítulo 5 se presentará las conclusiones finales del trabajo de tesis.

Capítulo II Bases teóricas

2.1 Introducción

En la actualidad, dentro de la industria de las telecomunicaciones se requiere de los mejores sistemas para la transmisión de datos y comunicación, por lo tanto las comunicaciones por medio de fibra óptica, compuesta principalmente por un filamento muy delgado de vidrio o silicio que conduce luz a grandes velocidades, es uno de los medios donde se puede transmitir una gran cantidad de información debido a su gran ancho de banda y de manera muy rápida a grandes distancias sin tener muchas pérdidas comparadas con otros sistemas de comunicación utilizados actualmente, la fibra óptica se clasifica fundamentalmente en dos grupos según el modo de propagación: en multimodo y monomodo. La fibra óptica multimodo está diseñada para distancias de transmisión cortas, comúnmente utilizada en sistemas LAN y para videos de vigilancia, multimodo indica que pueden ser guiados muchos modos o rayo luminosos, cada uno sigue un camino diferente dentro de la fibra óptica. La fibra monomodo está diseñada para distancias de transmisión largas haciéndola muy útil para telefonía y para los sistemas de radio difusión, monomodo indica que solo permite la propagación de un único modo o rayo, el cual se propaga directamente sin reflexión. Algunas fibras agregan determinadas imperfecciones para diversas aplicaciones como es el caso de las fibras dopadas con iones de tierras raras que es el componente clave para los sistemas avanzados de comunicación, las cuales tienen diversas aplicaciones como: láseres basados en fibra óptica, interruptores ópticos, amplificadores ópticos y una gran variedad de componentes no lineales, tales como el amplificador óptico EDFA. Existen fibras de alta y baja birrefringencia las cuales son utilizadas como sensores como es el caso de la fibra de alta birrefringencia que se utiliza en el interferómetro de Sagnac.

En este capítulo se muestran las bases teóricas que respaldan el presente trabajo de tesis, así como las definiciones de algunos parámetros de la fibra óptica como la birrefringencia, polarización y dispersión. Además, se describe uno de los problemas más comunes en comunicaciones por fibra óptica, que es la atenuación que conlleva a la necesidad de amplificar la señal mediante medios electrónicos u ópticos. Sin embargo, al hacerlo por medios ópticos como el amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA), se tiene la presencia de ruido inherente conocido como ruido ASE.

2.2 La birrefringencia en las fibras ópticas.

Hay materiales que tienen dos índices de refracción diferentes, estos materiales se dice que son birrefringentes, son materiales anisótropos, cuyas propiedades ópticas no son las mismas en todas direcciones. Según el modelo mecánico, las fuerzas de enlace sobre los electrones serán anisótropas. Según este modelo mecánico un electrón que se desplaza del equilibrio a lo largo de una dirección paralela a una serie de muelles, oscilara con una frecuencia de resonancia diferente de la que lo hace en otra dirección.

El índice de refracción está determinado por la diferencia entre la frecuencia del campo incidente y la frecuencia natural. Si los enlaces a lo largo de dos ejes fueran igual de fuertes, mientras que el enlace a lo largo del otro eje fuera más débil, se tendrían dos índices de refracción diferentes. Un material que tiene dos índices de refracción diferentes, se dice que es birrefringente.

La fibra óptica no es perfectamente circular razón por la cual presenta dos índices de refracción diferentes, es decir, es birrefringente, la cual es producida por la propia fabricación del material, por dobleces, torsiones y tensión.

Al descomponer la luz que viaja en una fibra óptica monomodo en sus componentes ortogonales puede pensarse que dentro de ella se propagan 2 modos polarizados linealmente de forma ortogonal, de tal forma que el término monomodo se aplica a la propagación de la luz en una forma particular. Los modos son degenerados con igual constante de propagación en las direcciones x e y , si la luz viajara en z , de esto se puede decir que los modos se propagan a la misma velocidad para un núcleo perfectamente circular [10], en este caso se dice que la fibra no tiene birrefringencia y por lo tanto se puede propagar cualquier estado de polarización sin ser modificado.

Debido a los dos índices de refracción diferentes, los modos viajan a diferentes velocidades de propagación por lo cual se dice que la fibra contiene birrefringencia modal, donde el grado de birrefringencia modal está definido por la siguiente expresión:

$$B = |n_x - n_y| = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{2\pi / \lambda_0}, \quad (2.1)$$

donde β_x y β_y son las constantes de propagación de fase de los dos modos de polarización y λ_0 es la longitud de onda en el vacío.

La diferencia en la velocidad de fase causa que la fibra presente un retardo lineal ϕ que depende de la longitud de la fibra z y está dada por la siguiente ecuación:

$$\phi = (\beta_x - \beta_y)z. \quad (2.2)$$

Otro de los parámetros es la longitud de repetición L_B , en la que el estado de polarización es repetido periódicamente y se representa por $L_B = \lambda / B$. Esta L_B es la longitud en la que la luz pasa por todos los estados de polarización [7].

La birrefringencia total de la fibra, así como el estado de polarización no se puede predeterminedir ya que varía con el tiempo y la temperatura. La variación del estado de polarización presenta inconvenientes en algunas aplicaciones que requieren polarización sensitiva en óptica integrada [5] como en interferómetros y en esquemas de detección de fase coherente para sistemas de comunicación [5]. Una solución para obtener una buena estabilidad en la polarización en las fibras es incrementando la birrefringencia interna, entonces la guía de onda mantiene la polarización en toda su longitud y así un solo modo polarizado linealmente puede ser seleccionado y sostenido.

En algunas fibras la magnitud de birrefringencia intrínseca es relativamente pequeña, se dice que son fibras de baja birrefringencia lineal cuando estas son del orden de 10^{-6} , si las fibras tienen valores de birrefringencia del orden de 10^{-4} a 10^{-2} [1] se dice que son fibras de alta birrefringencia.

Como ya hemos dicho, toda fibra óptica tiene birrefringencia, si esta birrefringencia es introducida en la fibra por esfuerzo térmico o por asimetría en la geometría, esta birrefringencia se considera intrínseca debido a que ninguna fuerza externa puede fácilmente eliminarla. Además de esta birrefringencia intrínseca hay otro tipo, la cual puede ser lineal y la cual es introducida solamente después de que la fibra ha sido fabricada [1].

2.3 Descripción de la optimización, atenuación y pérdidas

Optimizar es un verbo que designa la acción de buscar la mejor forma de hacer algo. Como tal, es un verbo transitivo que se conjuga como “realizar”. La palabra optimizar se compone del vocablo “óptimo”, superlativo de ‘bueno’, que proviene del latín *optimus*, y del sufijo “-izar”, del latín *-izāre*. [8] La importancia de optimizar es que se busca mejores resultados,

mayor eficacia en el desempeño a la hora de implementar el sistema para realizar la atenuación del ruido ASE por medio del interferómetro de Sagnac [5].

La atenuación de la señal es una de las principales desventajas de las fibras ópticas porque determina la separación de los amplificadores o de los repetidores entre transmisor y receptor. Debido a que los amplificadores y repetidores son caros para fabricar, instalar, y darles mantenimiento, el grado de atenuación en una fibra tiene una gran influencia en el costo del sistema [17]. La atenuación de la fibra se define de manera práctica como la disminución de la potencia de la señal a medida que ésta se propaga por kilómetro de fibra óptica. En una fibra óptica, y para un determinado modo de propagación, dicha reducción de la potencia se produce de manera exponencial con respecto a su longitud recorrida. Esta relación se expresa en unidades logarítmicas la cual hacen referencia a los decibeles. El decibel, que se usa para comparar dos niveles de potencia, se puede definir para una determinada longitud de onda como el cociente entre la potencia óptica a la entrada de la fibra P_i y la potencia óptica de salida P_o según la siguiente fórmula

$$A\left(\frac{dB}{Km}\right) = \frac{10}{L} \log_{10} \frac{P_o}{P_i} \quad (2.3)$$

Donde:

$A(dB)$ = atenuación de la luz a través de la fibra

P_o = potencia de salida de la fibra (watts)

P_i = potencia de entrada en la fibra (watts)

La atenuación, es adimensional ya que no tiene unidades, pero se expresa en dB/Km para fines científicos y escolares. La atenuación depende de la longitud de onda de operación, para las fibras de óxido de silicio convencionales, la atenuación es mínima alrededor de 1550nm, con un valor de $0.2 \frac{dB}{km}$, [18] es por esto que la señal que se transmite en fibras ópticas mayormente es a la longitud de onda de 1550nm, porque como se menciona es donde tiene mejor respuesta debido a que tiene menos atenuación. En resumen, se puede mencionar que la atenuación se manifiesta, por una reducción de la potencia óptica conforme las señales viajan a lo largo de la vía de transmisión y es expresada en dB/km. La atenuación es causada por distintos motivos, como la disminución en el ancho de banda del

sistema, velocidad, eficiencia. La fibra multimodal tiene mayor pérdida debido a que la onda luminosa se dispersa originadas por las impurezas [9].

La absorción de la luz por el material del que está hecha la fibra óptica ocurre por las impurezas que ahí se encuentran (como son Hierro, Cobre, Cromo, Manganeso, iones de Hidróxido y otras). Todo material absorbe en mayor o menor medida la luz a determinadas longitudes de onda, reduciendo así su nivel de transparencia. El material con el que está hecha la fibra óptica absorbe parte de la luz que ahí viaja, disminuyendo la energía de la señal óptica que llega al detector. En la fibra, gran parte de esta energía que se absorbe y se convierte en calor [20]. Cualquier impureza que permanece en la fibra después de la fabricación bloquea la luz, los principales responsables de este fenómeno son los iones de hidroxilo y trazas de metales. Los iones de hidroxilo son formas de agua que causan las pérdidas y los rastros metálicos causan absorción de energía; las pérdidas de este fenómeno van de 1 a 1000 dB/km. Las pérdidas por este fenómeno se ha reducido de manera constante en el tiempo con la mejora de la fabricación [14] [13].

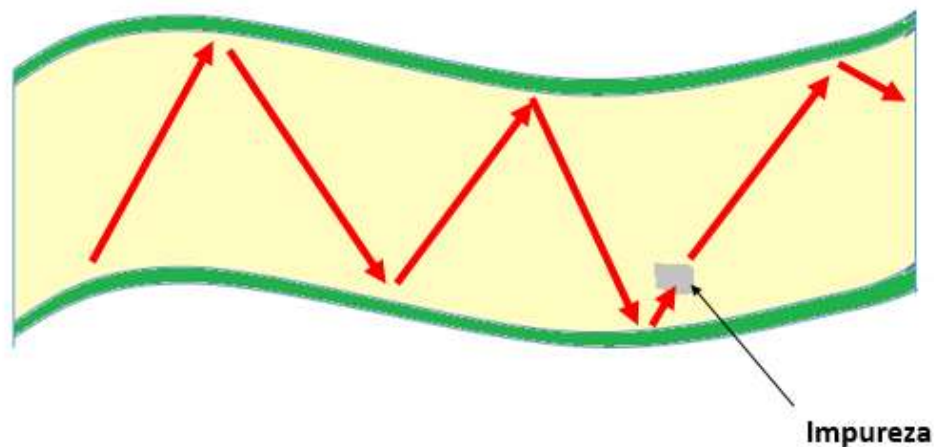


Ilustración 2 Pérdida por absorción

Este efecto se debe a pequeñas fluctuaciones de la densidad específica del material en el núcleo de la fibra y en el material de revestimiento, los cuales causan la constitución de pequeñas zonas donde se presenta una variación microscópica del índice de refracción. Este es un problema imposible de eliminar por completo ya que en la mezcla de los ingredientes

dentro de los procesos de fabricación siempre existen ligeras fluctuaciones. Otra causa son los ligeros cambios en la densidad al enfriar el material lo cual provoca que la luz se disperse en todas las direcciones. Por otro lado, la luz que se encuentra en un ángulo de incidencia menor al ángulo crítico puede escapar del núcleo y se pierde [9] [13].

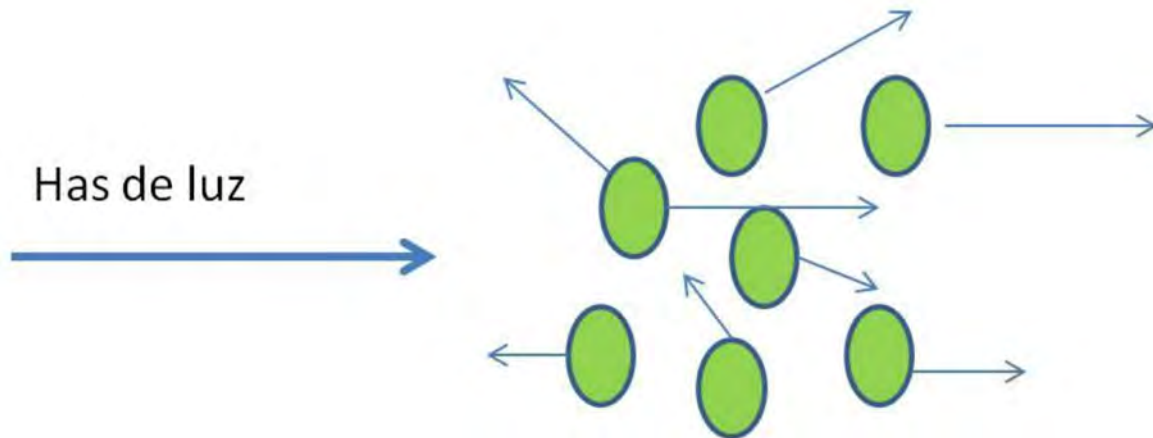


Ilustración 3 Pérdida de rayleigh

La característica más importante de una fibra después de la pérdida de transmisión es la dispersión, la cual es la distorsión de un pulso debido a las diferentes velocidades de propagación, esto limita la velocidad de datos máxima alcanzable. Imaginemos que lanzamos dos rayos diferentes de luz en una fibra, ya que ambos rayos están viajando en el material con mismo índice de refracción, si seguimos estos dos rayos de luz diferentes que han entrado en el núcleo al mismo tiempo, podemos ver que uno de ellos viajará una distancia más larga que la otra, a este efecto se denomina propagación de dispersión. En fibras multimodo hay dos tipos de dominantes de dispersión, modal y cromática. La dispersión modal se refiere al hecho de que los diferentes modos viajaran a diferentes velocidades y esto causa ensanchamiento de pulsos. La dispersión cromática que ocurre debido a diferentes longitudes de onda de la luz, se propagan a diferentes velocidades en la fibra [9] [14].

Otro factor importante es la exposición de la fibra a daño de la radiación ionizante. Hay muchos factores que pueden afectar a la susceptibilidad de radiación de la fibra óptica, incluyendo el tipo de fibra, el tipo de radiación, la dosis total, la temperatura, la longitud de onda.

La fibra se dopa intencionalmente para controlar el índice de refracción del núcleo y revestimiento, así como propiedades de dispersión. Hay dos mecanismos dominantes: la

radiación por oscurecimiento inducido y centelleo. La alta energía puede interactuar con dopantes, impurezas o defectos en la estructura de vidrio para producir que el centro absorba fuertemente la longitud de onda operativa. Esta radiación por oscurecimiento inducido aumenta la atenuación de la fibra; en algunos casos, es parcialmente reversible cuando se retira la radiación, aunque en los niveles altos o la exposición prolongada puede dañar de forma permanente a la fibra. El segundo efecto, centelleo, es causado cuando la radiación interactúa con impurezas para producir la luz difusa. Esta luz es generalmente de banda ancha, pero tenderá a degradar la tasa de error de bit en el receptor; de centelleo es un efecto más débil que la radiación inducida por oscurecimiento. La presencia de intensa luz en la longitud de onda adecuada puede revertir parcialmente los efectos de oscurecimiento en una fibra [15].

Las pérdidas de acoplamiento se dan cuando existen uniones en la fibra y se deben a problemas de alineamiento. Esto a menudo se pasa por alto. Siempre que se utilice un acoplador, tiene que ser unido al resto del circuito. Esto implica dos pares de conectores y un empalme en cada extremo. Las pérdidas causadas por estos conectores o empalmes se deben añadir a las pérdidas introducidas por el acoplador. La pérdida de potencia también depende del espectro de modo longitudinal del semiconductor láser [7] [13] [14].

2.4 Temperatura

La temperatura es muy utilizada en el interferómetro de Sagnac ya que la fibra de alta birrefringencia es muy perceptible a cambios de temperatura la cual se utiliza para mover los máximos y mínimos de la transmitancia. La temperatura es una propiedad de un cuerpo que determina la dirección del flujo de calor cuando se pone en contacto con otro cuerpo, el cual pasa del cuerpo de temperatura más alta al de temperatura más baja. Viene definida por el principio cero de termodinámica. La temperatura se percibe por la sensación de caliente y frío y se mide con una sola escala basada en alguna propiedad adecuada [16].

2.5 Polarización

La polarización es un fenómeno que se da en las fibras ópticas estándar, dopadas y de Hi-Bi donde las fibras estándar y dopadas no persiste la misma polarización a diferencia de las fibras Hi-Bi. Este fenómeno puede producirse en las ondas electromagnéticas, como es

la luz, donde el campo eléctrico oscila en un plano denominado plano de polarización. Este plano puede definirse por dos vectores, uno de ellos paralelo a la dirección de propagación de la onda y otro perpendicular a esa misma dirección el cual indica la dirección del campo eléctrico.

En una onda linealmente polarizada con amplitudes iguales que viaja a través de la dirección Z , sus vectores del campo eléctrico son colineales, es decir, tienen la misma fase y oscilan a lo largo de una línea recta en el plano (x, y) . La onda se puede resolver en dos componentes ortogonales a lo largo de los ejes (x, y) lo cual se representa con las siguientes ecuaciones [12] [11]:

$$\bar{E}_x(z, t) = \hat{i} E_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad (2.4)$$

$$\bar{E}_y(z, t) = \hat{j} E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \quad (2.5)$$

La polarización circular se da cuando surge la superposición a lo largo de los ejes (x, y) de dos ondas linealmente polarizadas de igual amplitud pero que difieren en fase $\varepsilon = -\pi/2 + 2m\pi$, donde $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$. Esto da lugar a la luz polarizada circular donde el campo eléctrico describe un círculo que gira en sentido horario o sentido anti horario de acuerdo con la relación de la fase, y se representa con las siguientes ecuaciones [12] [11]:

$$\bar{E}_x(z, t) = \hat{i} E_0 \cos(kz - \omega t) \quad (2.6)$$

$$\bar{E}_y(z, t) = \hat{j} E_0 \sin(kz - \omega t) \quad (2.7)$$

La polarización elíptica es el resultado de la superposición a lo largo de los ejes (x, y) de dos ondas linealmente polarizadas de diferentes amplitudes y diferencia de fase, ósea una luz lineal y una circular, esto significa en general que el vector del campo eléctrico resultante va a rotar y cambiar su magnitud formando una elipse, se representa con las siguientes ecuaciones [12] [11]:

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad (2.8)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \quad (2.9)$$

2.6 Interferómetros

Existen dos clases de interferómetros que son los interferómetros de división de amplitud y los interferómetros de división del frente de onda. Para el presente trabajo de tesis se utiliza un interferómetro de división de amplitud, por tanto, a continuación vamos a describir los interferómetros de esta clasificación. Los interferómetros de división de amplitud más conocidos son: El interferómetro de Mach-Zehnder, Michelson, y Sagnac.

El interferómetro de Mach-Zehnder es un dispositivo de división de amplitud, consiste de dos divisores de haz y de dos espejos totalmente reflectores. Las dos ondas dentro del instrumento viajan a lo largo de caminos separados. Puede producirse una diferencia de fase entre las señales en la interferencia por una ligera inclinación de uno de los divisores de haz. Dado que los dos caminos están separados, el interferómetro es relativamente difícil de alinear, sin embargo, el interferómetro puede aplicarse dentro de la óptica y comunicaciones ópticas. Incluso se ha usado de forma algo alterada pero conceptualmente análoga, para obtener franjas de interferencia de electrones [19] [12].

2.7 Interferómetro de Michelson

El Interferómetro de Michelson es un dispositivo experimental importante que utiliza la interferencia para realizar mediciones precisas de longitudes de onda y de distancias muy pequeñas. Este dispositivo funciona como se muestra en la *Ilustración 4*, un rayo de luz proveniente de una fuente monocromática A incide en el divisor de haz C que es una placa de vidrio con un fino revestimiento de plata del lado derecho, parte de la luz, el rayo 1 pasa a través de la superficie plateada y de la placa compensadora D y se refleja en el espejo E1 luego regresa a través de D y se refleja en la superficie plateada de C hacia el observador, el resto de la luz el rayo 2 se refleja en la superficie plateada en el punto P hacia el espejo E2 y regresa hacia el observador a través de C, el propósito de la placa compensadora D es asegurar que los rayos 1 y 2 pasen a través de un mismo espesor de vidrio, la placa D se corta del mismo vidrio que la placa C con lo cual el espesor de ambas placas es idéntico, la posición del espejo E2 se puede ajustar con un tornillo micrométrico muy fino y preciso, si las distancias L1 y L2 son exactamente iguales y los espejos E1 y E2 están exactamente en el ángulo recto la imagen virtual (I) coincide con el espejo E2, si L1 y L2 no son exactamente iguales la imagen (I) presenta un leve desplazamiento respecto a E2 y si los

espejos no son exactamente perpendiculares la imagen de E1 forman un ángulo muy pequeño con E2 en estas condiciones el espejo E2 y la imagen virtual (I) desempeñan los mismos papeles que las dos superficies de una película fina y la luz que se refleja en esas superficies forman franjas de interferencia, si se desplaza lentamente el espejo E2 hacia arriba o hacia abajo cada franja se desplaza a la izquierda o a la derecha una distancia igual a la separación entre franjas, si observan las posiciones de las franjas a través de un telescopio y M franjas cruzan al mover el espejo una distancia (Y) entonces podemos afirmar lo siguiente, si se conoce la longitud de onda se puede medir una distancia (Y) con solo contar las franjas cuando E2 se desplaza esta misma distancia $Y = M \frac{\lambda}{2}$, también si M es de varios miles la distancia (Y) se puede medir con buena exactitud y se obtiene un valor exacto de la longitud de onda $\lambda = \frac{2Y}{M}$, de esta forma es posible medir distancias del orden de una longitud de onda de luz con relativa facilidad [12].

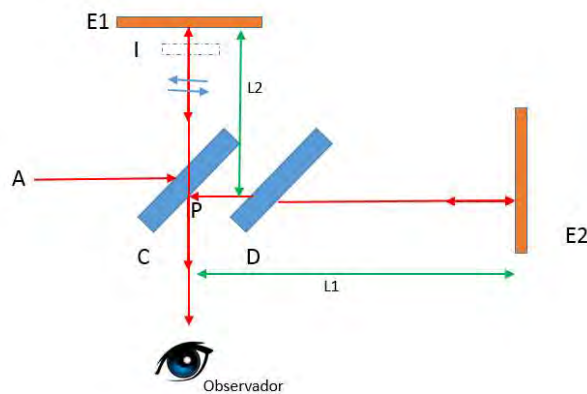


Ilustración 4 Interferómetro de Michelson

2.8 Interferómetro de Sagnac

El interferómetro de Sagnac convencional [20], se muestra en la figura de la Ilustración 5, se muestra como el haz de la fuente se lanza al divisor de haz, el cual es dividido en dos haces, que siguen dos caminos idénticos pero opuestos. Un haz hace el recorrido en sentido de las manecillas del reloj y otro en sentido contrario a las manecillas del reloj, después del recorrido vuelven a llegar al divisor de haz donde una porción de la energía del haz que

hizo su recorrido en sentido contrario a las manecillas del reloj, y pasa al detector, mientras que una porción del haz que hizo su recorrido en sentido de las manecillas del reloj es reflejada por el divisor de haz y direccionada al detector donde hacen interferencia con la porción de haz que se transmitió por el otro haz.

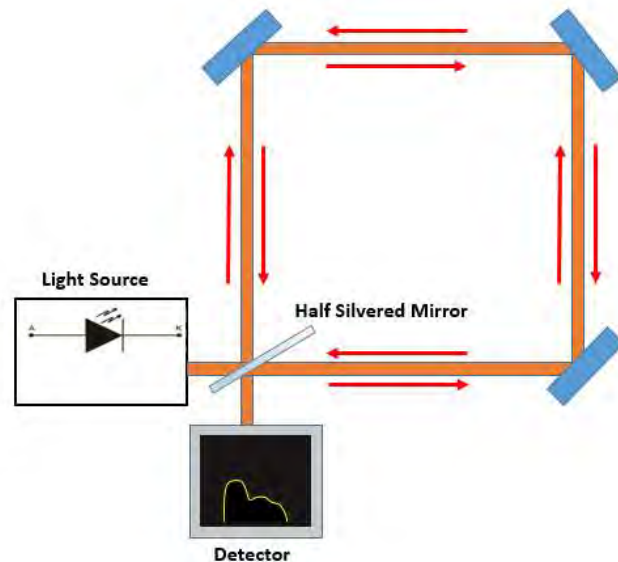


Ilustración 5 Interferómetro de Sagnac

2.9 Interferómetro de Sagnac de fibra óptica torcida 90 grados.

El interferómetro de Sagnac de fibra óptica es un dispositivo muy utilizado en los sistemas de comunicación por fibra óptica ya que bajo ciertas condiciones puede mejorar la recepción de la señal. Estos dispositivos tienen bajas pérdidas, menor tamaño y alto desempeño al utilizarlo como un filtro. El interferómetro de Sagnac o también llamado espejo de lazo óptico no lineal es un dispositivo que está compuesto por un acoplador o divisor de haz de cuatro puertos en los cuales dos de los puertos de salida han sido unidos para formar una trayectoria cerrada, añadiéndole un lazo de fibra de alta o baja birrefringencia, el cual hace que la potencia de la luz de entrada se divida en dos señales con potencias iguales o diferentes de acuerdo a las características del acoplador. Una vez que se ha dividido el haz, cada una de las potencias viaja dentro del lazo de fibra, en direcciones contrarias uno en sentido horario y otro en sentido anti horario, la interferencia se da cuando el par de pulsos regresa hacia el acoplador; es aquí donde la interferencia se presenta, sin embargo para que la interferencia dependa de la potencia se debe introducir una asimetría en el esquema, por lo tanto estos haces viajan a lo largo del lazo de fibra pero

al pasar por la fibra birrefringente este haz de luz se desfasa, para entrar nuevamente al acoplador, para recombinarse y producir un haz de salida que se conoce como señal transmitida[21].

La evolución de la polarización en varios tipos de fibra, se incluye fibras de baja y alta birrefringencia, fibras torcidas y fibras en espiral, las cuales son usadas en sistemas de comunicación por fibra óptica y sensores de fibra. Hay varios factores que han sido conocidos para afectar el estado de polarización en una fibra óptica. Ya se mencionó que una asimetría axial interna, ya sea por diseño intencional práctico o simplemente por imperfecciones de fabricación, así como el dopaje de las fibras ocasionan la birrefringencia lineal. Pero además, factores mecánicos como presión, dobleces y cambios del medio ambiente pueden afectar el estado de polarización. Ciertos dispositivos de fibra son diseñados y pueden ser utilizados como sensores de presión, temperatura y campo magnético externo, por lo cual el estado de polarización debe ser el principal parámetro a ser investigado.

La fibra de alta birrefringencia debe poseer una cantidad considerable de birrefringencia lineal. Esta fibra de alta birrefringencia frecuentemente es abreviada como “fibra HI-BI” [1], en esta clase de fibra la birrefringencia lineal debe estar entre 10^{-4} y 10^{-2} . Para estas fibras HI-BI, el parámetro que se utiliza con más frecuencia es la longitud de repetición. Una birrefringencia de 10^{-3} corresponde a una longitud de repetición de alrededor de 1 *mm* si se utiliza una fuente de luz de He-Ne con una longitud de onda de 632 *nm*. Esta cantidad de birrefringencia lineal no puede ser medida por métodos ordinarios excepto por el llamado método de tensión térmica. En este método se coloca un par de lóbulos cerca del núcleo de la fibra para que mantenga presionado al núcleo.

El interferómetro de lazo es uno de los dispositivos de fibra más prácticos, debido a su gran estabilidad y además es insensible a perturbaciones externas. Para este interferómetro el tramo de fibra que forma el lazo es de alta birrefringencia, este tramo de fibra se empalma a los puertos 3 y 4 que se consideran puertos de salida cuando la señal entra por el puerto 1 del acoplador, mientras que los haces que se contra-propagan por el lazo de la fibra después de su recorrido, al volver a llegar al acoplador y pasar a los puertos 1 y 2 que se consideraban puertos de entrada, ahora se considera que los puertos 1 y 2 serían los puertos de salida [5].

Normalmente se supone que los 2 haces que se contra-propagan tienen polarización lineal y son paralelos entre sí. En este caso la diferencia de fase acumulada durante el tramo recorrido es 0, por lo que en el puerto 1 la interferencia es constructiva, mientras que en el puerto 2 la interferencia es totalmente destructiva por una diferencia de fase de π , pero no debida a una diferencia de fase por el tramo recorrido, sino porque el acoplador introduce un cambio de fase de $\pi/2$, al pasar del puerto 1 al 3 y del puerto 4 al 3, debido a esto el interferómetro actúa como un espejo con un coeficiente de reflexión muy cercano a 1.

Si en este dispositivo a la fibra óptica de alta birrefringencia se le aplica una torsión de $\pi/2$, entonces los dos haces que se propagan en la fibra están polarizados ortogonalmente, y el coeficiente de reflexión depende de la diferencia de fase entre ellos. Esto puede dar origen a un coeficiente de reflexión bajo para potencia baja y un coeficiente alto para potencia alta, por lo cual da la posibilidad de usar este dispositivo como un sensor de ambiente.

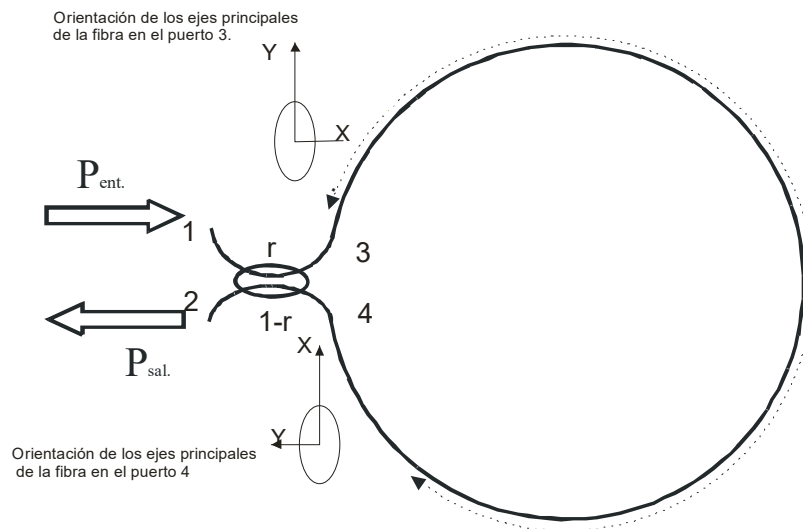


Ilustración 6 Interferómetro de Sagnac

La *Ilustración 6*, muestra un interferómetro de Sagnac con fibra de alta birrefringencia y con torsión de $\pi/2$.

Introduciendo el haz de un láser al lazo de fibra de alta birrefringencia a través del interferómetro de Sagnac de la *Ilustración 6* a través del puerto 1 del acoplador y saliendo en los puertos 3 y 4, las ecuaciones son las mismas que las del interferómetro de Sagnac convencional con la diferencia de que el primero tiene una torsión de $\pi/2$.

Para facilitar el análisis, se considera primero que los haces en los puertos 3 y 4 tienen polarización lineal y coinciden con el eje x en el puerto 4 y con el eje y en el puerto 3. Los ejes x e y son los ejes principales de la fibra birrefringente y presentan como es muy sabido, diferentes índices de refracción. Como se representa en la *Ilustración 6*, los haces que recorren la fibra en direcciones opuestas están polarizado de manera ortogonal dentro de la fibra. Debido a estos diferentes índices de refracción tienen velocidades de fase y de grupo diferentes. Después de que estos haces contra- propagándose recorren el anillo y salen de la fibra, estos tienen polarización lineal y paralela uno con otro, pero tienen polarización ortogonal con respecto a la polarización de entrada al lazo de fibra. Estos haces interfieren en el acoplador, por lo que la potencia del haz en la salida depende de la diferencia de fase entre los haces. Esta diferencia de fase depende de la birrefringencia de la fibra, longitud de la fibra y de la longitud de onda.

Usando la función de transferencia de un acoplador de fibra de cuatro puertos, los campos de entrada y salida del acoplador pueden ser estudiados por un análisis de los modos acoplados [22] y haciendo un análisis en la región lineal, obtenemos los campos de salida [23] dados por:

$$E_3 = r^{1/2} E_1 + i(1-r)^{1/2} E_2; \quad (2.10)$$

$$E_4 = i(1-r)^{1/2} E_1 + r^{1/2} E_2. \quad (2.11)$$

Donde E_1 y E_2 son las amplitudes de los campos de entrada a los puertos 1 y 2 respectivamente, y E_3 y E_4 son las amplitudes de los campos de salida de los puertos 3 y 4 respectivamente.

De las ecuaciones (2.10) y (2.11) y haciendo la entrada $E_2 = 0$, con una polarización arbitraria de la luz en el puerto 1, los campos en la salida del acoplador pueden ser representados por las siguientes expresiones:

$$E_3^{|} = r^{1/2} E_1^{|}; \quad (2.12)$$

$$E_4^{|} = i(1-r)^{1/2} E_1^{|}, \quad (2.13)$$

$$E_3^\perp = r^{1/2} E_1^\perp; \quad (2.14)$$

$$E_4^\perp = i(1-r)^{1/2} E_1^\perp, \quad (2.15)$$

donde E^{\parallel} y E^\perp son los campos paralelos al eje x e y respectivamente de la fibra en la salida 3. Debido a la torsión de la fibra, en la salida 4, los campos E^{\parallel} y E^\perp son paralelos a y y x respectivamente.

El campo E^{\parallel} para el haz que recorre el lazo en sentido contrario a las manecillas del reloj acumula una fase de $k_y z$, donde k_y es el número de onda de la luz con polarización paralela al eje y , y z es la longitud de la fibra que une los puertos de salida del acoplador para formar el lazo.

De manera semejante para el haz que recorre el lazo en sentido de las manecillas del reloj, tenemos que la fase acumulada del campo E^{\parallel} durante todo el recorrido es $k_x z$, donde k_x es el número de onda de la luz con polarización paralela al eje x .

Para obtener los campos a la salida del interferómetro, es necesario aplicar ciertos artificios matemáticos a los campos de entrada E_3 y E_4 . El campo de salida $E_{2,sal}^{\parallel}$ en el puerto 2 se representa mediante la siguiente expresión:

$$E_{2,sal}^{\parallel} = i(1-r)^{1/2} \left[i(1-r)^{1/2} E_{ent}^{\parallel} e^{ik_y z} \right] + r^{1/2} \left[r^{1/2} E_{ent}^{\parallel} e^{ik_x z} \right]. \quad (2.16)$$

Mediante algunos artificios algebraicos podemos simplificar para reducir la expresión hasta obtener la siguiente ecuación:

$$E_{2,sal}^{\parallel} = E_{ent}^{\parallel} e^{ik_x z} \left[(r-1) e^{i(k_y - k_x)z} + r \right], \quad (2.17)$$

donde, $E_{2,sal}^{\parallel}$ es la componente E^{\parallel} en la salida del puerto 2 del acoplador y E_{ent}^{\parallel} es también la componente E^{\parallel} a la entrada del puerto 1. De una manera análoga, se puede hacer el análisis para las componentes del campo E^\perp , con la cual obtenemos la siguiente expresión:

$$E_{2,sal.}^{\perp} = E_{ent.}^{\perp} e^{ik_y z} \left[(r-1)e^{i(k_x - k_y)z} + r \right]. \quad (2.18)$$

Ya obtenidos los campos paralelos y perpendiculares podemos obtener la potencia a la salida en el puerto 2, la cual es la suma del módulo de las componentes al cuadrado, la cual se representa mediante la siguiente expresión:

$$P_{2,sal.} = \left| E_{2,sal.}^{\parallel} \right|^2 + \left| E_{2,sal.}^{\perp} \right|^2. \quad (2.19)$$

Sustituyendo los campos de la ecuación (2.15) y (2.16) en la ecuación (2.17) y simplificando tenemos que la potencia en la salida del puerto 2 se representa por la siguiente expresión:

$$P_{2,sal.} = P_{1,ent.} [1 - 2r(1-r)(1 + \cos \Delta\varphi)], \quad (2.20)$$

donde $P_{1,ent.} = \left| E_{ent.}^{\parallel} \right|^2 + \left| E_{ent.}^{\perp} \right|^2$ es la potencia de entrada en el puerto 1, y $\Delta\varphi$ es la diferencia de fase que adquieren las componentes del campo al viajar en lazo del interferómetro y $P_{2,sal.}$ es la potencia de salida en el puerto 2.

Si consideramos el caso donde las pérdidas son despreciables, la potencia de salida en el puerto 1 está dada por la siguiente ecuación:

$$P_{1,sal.} = P_{1,ent.} - P_{2,ent.}. \quad (2.21)$$

Sustituyendo la ecuación (2.27) en la ecuación (2.28) tenemos que la ecuación para la potencia de salida en puerto 1 $P_{1,sal.}$ se puede representar por la siguiente ecuación:

$$P_{1,sal.} = 2P_{1,ent.} r(1-r)(1 + \cos \Delta\varphi). \quad (2.22)$$

De las ecuaciones (2.17) y (2.19) vemos que la potencia de salida en los puertos 2 y 1 depende del corrimiento de fase entre las ondas contra propagándose ortogonalmente polarizadas en la fibra con alta birrefringencia. También podemos ver de estas ecuaciones, que las potencias en la salida no dependen de la polarización de entrada, ya que el campo en la entrada lo consideramos como dos campos que se propagan ortogonalmente en los

ejes principales de la fibra y de esta manera podemos considerar cualquier polarización, donde es claro de estas ecuaciones que la potencia de salida depende de sus amplitudes, pero no de sus direcciones.

El corrimiento de fase de las ondas que se propagan en el lazo en direcciones contrarias, puede ser cambiado por una acción externa y por lo tanto este interferómetro con fibra de alta birrefringencia puede ser usado como un sensor polarimétrico [24]. Esta diferencia de fase también puede ser alterada por otros parámetros como presión, y campo eléctrico. Esta configuración con fibra de alta birrefringencia y torcida tiene una dependencia del coeficiente de reflexión con respecto a la birrefringencia de la fibra. Debido a esta propiedad es que se puede utilizar en el desarrollo de sensores.

2.8 Ruido ASE

En comunicación por fibra óptica se denomina ruido a la señal no deseada que se mezcla con la señal utilizable que se quiere transmitir. Esto se da por diversos tipos de perturbaciones que afectan la información cuando se presenta dentro de su ancho de banda. El ruido ASE que es originado por la amplificación de emisión espontánea se debe a la utilización de un amplificador de señal como es el EDFA el cual puede ofrecer una mayor potencia de salida de la señal introducida, pero a la vez introduce este ruido que afectan también la amplitud y la fase de la señal [25]. El Erblio es un elemento de las tierras raras que al ser excitado sus electrones pasan a un estado permaneciendo tiempos muy cortos y decaen a niveles llamados metaestables el tiempo en el que permanecen en este estado es mucho más grandes, si en este tiempo no son obligados a decaer al estado fundamental, entonces ellos decaen de manera espontánea. Al decaer liberan su energía en forma de fotones que tienen muchas direcciones de los cuales algunos pueden coincidir con la dirección de los fotones de la señal. Cuando estos fotones coinciden con la dirección de los fotones de la señal los cuales pueden ser amplificados, por lo que esta emisión espontánea es amplificada, por ello se le conoce como emisión espontánea amplificada, ASE.

2.9 Resumen

Es este capítulo se describieron parámetros importantes involucrados en la fibra óptica como son, las pérdidas, la birrefringencia, la temperatura y la polarización. En una fibra óptica a pesar de ser muy eficiente en la transmisión de luz, presenta pérdidas que cuando llegan a ser considerables se tiene la necesidad de amplificar. Una de las maneras de amplificar es a través de un EDFA, sin embargo, este presenta de manera inherente ruido ASE. Este ruido se puede atenuar mediante el dispositivo de Sagnac, el cual mediante interferencia, selecciona las longitudes de onda que desea transmitir y cual desea atenuar. Una de las maneras de atenuar el ruido ASE es con el interferómetro de Sagnac de fibra óptica. Este dispositivo utiliza un tramo de fibra de alta birrefringencia Hi. Bi. Esta fibra tiene la característica que mantiene la polarización.

Capítulo III Arreglo experimental

Introducción

En esta capítulo se presenta la importancia del porque se realiza y como se realiza esta tesis, ya que juega un papel muy importante en la experimentación. Se podrá observar las herramientas, dispositivos y software a utilizar para que posteriormente se empiece a abordar los objetivos específico ya plantados en el capítulo uno y de esta manera cubrir el objetivo general de esta tesis, el cual consiste en la optimización del arreglo experimental utilizado para realizar la disminución del ruido ASE con variaciones de temperatura para la obtención del desplazamiento de la transmitancia máxima en 1548.4 nm y la mínima en 1530nm con ayuda del interferómetro de Sagnac.

3.1 ¿Por qué se hace?

Debido a que en un arreglo experimental es de suma importancia que este se encuentre en excelentes condiciones y optimizado para su excelente desempeño. El arreglo que se muestra en la Ilustración 7, ha sido utilizado ampliamente en trabajos previos, sin embargo se encontraron ciertas deficiencias relacionadas con el ruido ASE, por tal motivo, en el presente proyecto de tesis se abordan las deficiencias encontradas y se proponen mejoras para incrementar su desempeño.

3.2 Arreglo experimental para la optimización de un sistema óptico que atenúa ruido ASE por medio de un interferómetro de Sagnac

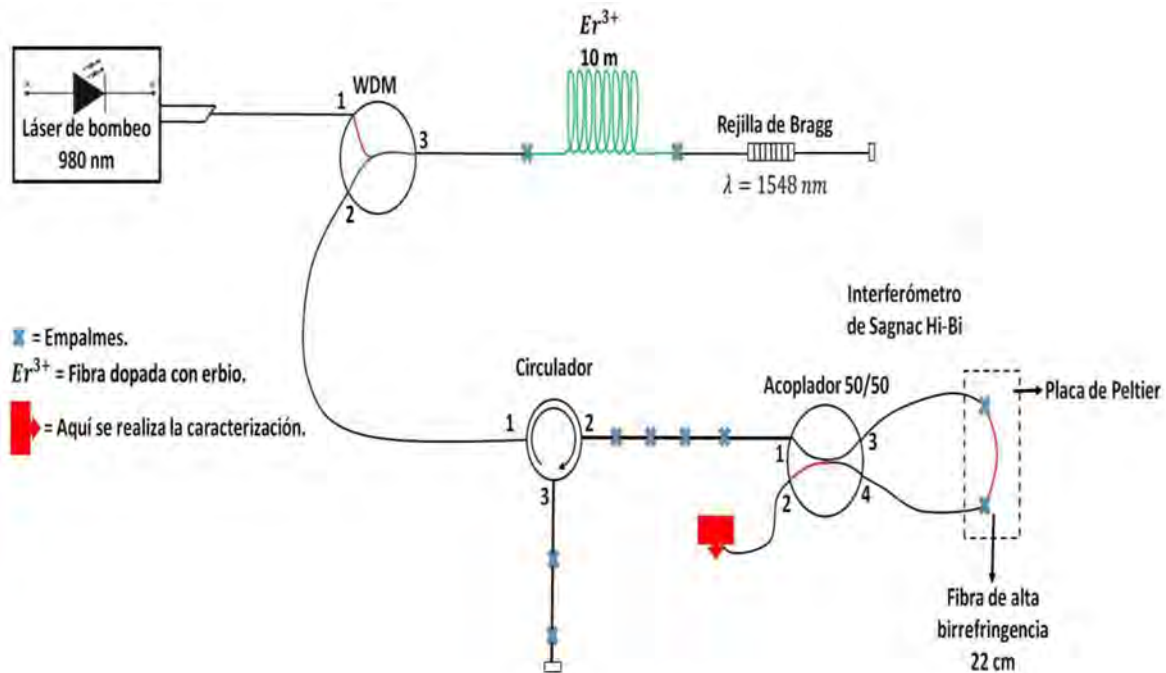


Ilustración 7 Arreglo Experimental

El arreglo experimental presentado en la *Ilustración 7* muestra el esquema de un EDFA, la principal función del arreglo experimental es amplificar la señal a transmitir, el circulador funciona para obligar a la luz a viajar en una sola dirección para tener la menor pérdida posible, al momento de llegar al interferómetro de Sagnac este funciona como un espejo y divide el haz de luz por medio de un acoplador 50/50. Para una mejor comprensión de este arreglo experimental se ha dividido en 3 segmentos que se explicaran a continuación.

1. EDFA
2. La Interfaz que une al EDFA con el SI
3. El interferómetro de Sagnac

El arreglo experimental utilizado para este trabajo consiste en tres secciones 1) EDFA, 2) la interfaz que une al EDFA con el SI en este caso un circulador y 3) el SI con la placa de Peltier, como se observa en la *Ilustración 8*.

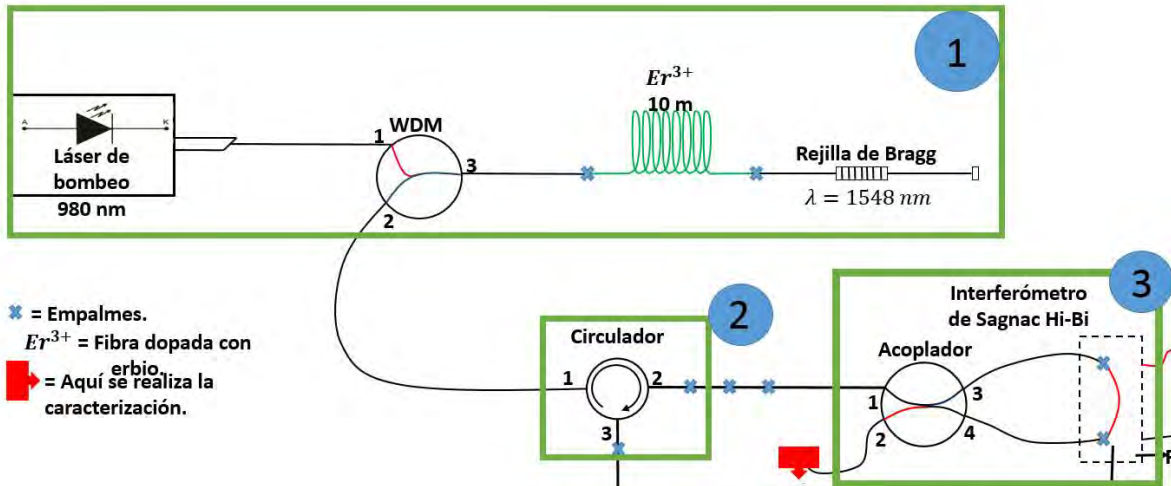


Ilustración 8 arreglo experimental utilizado para la optimización de un sistema óptico que atenúa ruido ASE dividido en 1) EDFA, 2) circulador y 3) SI

La sección 1 que corresponde al EDFA que fue modificado para su optimización, está formado por un diodo láser Ophotonics QFBGLD980-250 de 980 nm que funciona como fuente de bombeo, al cual se le incide mayor potencia de bombeo de forma óptima en un rango de 70 a 100 mW; un WDM que funciona como multiplexor por división de onda, el cual se utiliza para acoplar distintas longitudes de onda sin que se interfieran entre sí; fibra dopada con erbio, la cual funciona como medio amplificador ya que amplifica la señal de 980 nm a un rango de 1500 a 1600 nm y se utilizó una longitud de 10 m y que va conectada a la salida 3 del WDM; una rejilla de Bragg, la cual crea una señal de prueba de 1548 nm con un extremo mal cortado para evitar que funcione como espejo. La señal de prueba que arroja la rejilla de Bragg pasa por el WDM y sale por la salida 2 hacia el circulador.

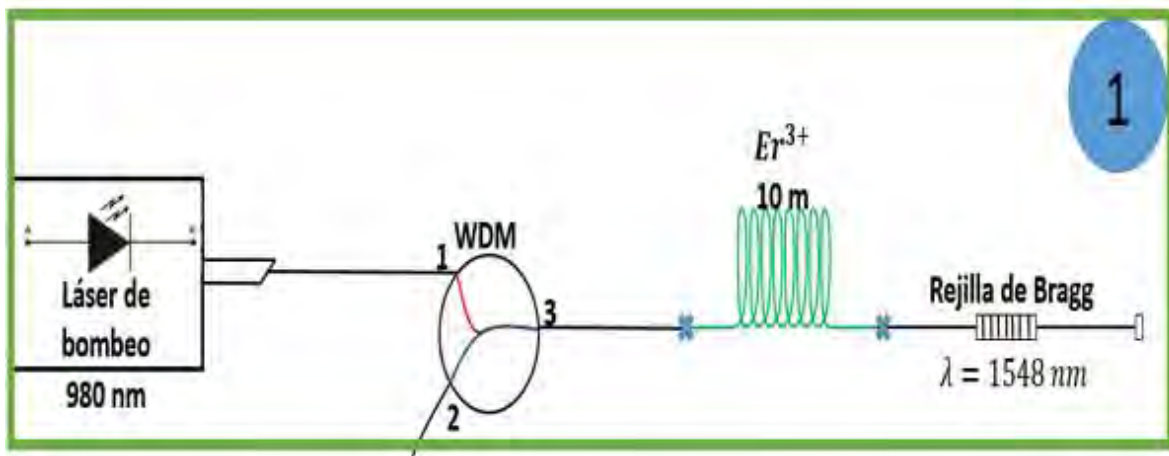


Ilustración 9 EDFA

La sección 2 está compuesta por un circulador, el cual se encarga de unir el EDFA con el SI, en un circulador la potencia de entrada emerge en el segundo puerto, la potencia del segundo puerto emerge al tercer puerto donde se mide la reflectancia, el circulador separa la transmisión y recepción de ondas en cada terminal.

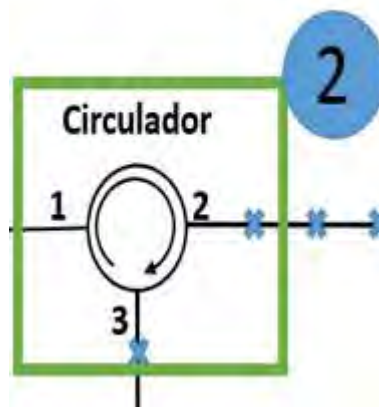


Ilustración 10 Circulador

La sección 3 la forman el interferómetro de Sagnac el cual tiene la función de filtrar la señal de prueba y disminuir la atenuación producida por el ruido ASE, está formado por un acoplador 50/50 en el cual dos de sus terminales denominadas 3 y 4 se encuentran unidas por una fibra de Hi-Bi optimizada a la medida de longitud de 15 cm, la cual esta sobrepuesta en la placa de Peltier y es sometida a variaciones de voltaje, donde dicha placa se calienta por medio de una fuente de voltaje donde a mayor voltaje mayor temperatura y a menor voltaje menor temperatura. De la terminal 2 del SI se obtiene la transmitancia de la señal de prueba, donde se midió a manera experimental la disminución de la atenuación

producido por el ruido ASE. Para la medición se utilizó un analizador de espectros ópticos YOKOGAWA AQ7360C, con una resolución de 0.2 nm, mediante el cual se mide la transmitancia y reflectancia del arreglo experimental.

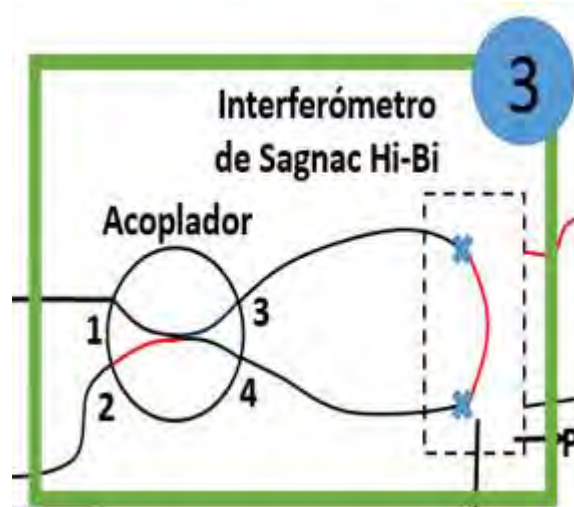


Ilustración 11 Interferómetro de Sagnac

El proceso que se realizó para la optimización del arreglo y disminuir la atenuación del ruido ASE consiste en:

1. Optimizar el arreglo experimental, para ello se realizó la minuciosa búsqueda y localización de todos los empalmes que contenía nuestro arreglo experimental, como podemos observar en la Ilustración 11, donde existe una “x” se tiene ubicado un empalme. Una vez ubicados los empalmes se realizó la tarea de la eliminación de los excesos de empalmes del arreglo inicial ya que por cada empalme la señal pierde potencia.

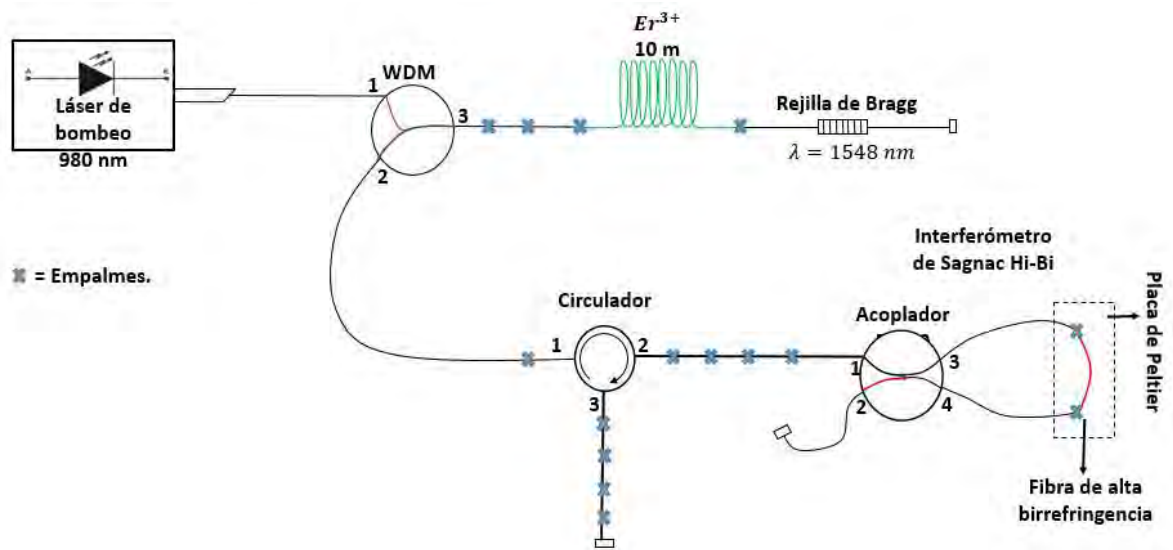


Ilustración 12 Arreglo con exceso de empalmes

- Al arreglo experimental se le agregó una fibra dopada con erbio con una longitud de 10 m, con el objetivo de amplificar la señal recibida.
- El arreglo contaba con un acoplador 90/10 como podemos observar en la Ilustración 12, el cual fue sustituido por un circulador de 3 puertos que realiza el acoplamiento del EDFA con el SI, donde el puerto 1 recibe la señal y la trasmite al puerto 2 hacia el SI y de la salida 3 se obtiene la reflectancia.

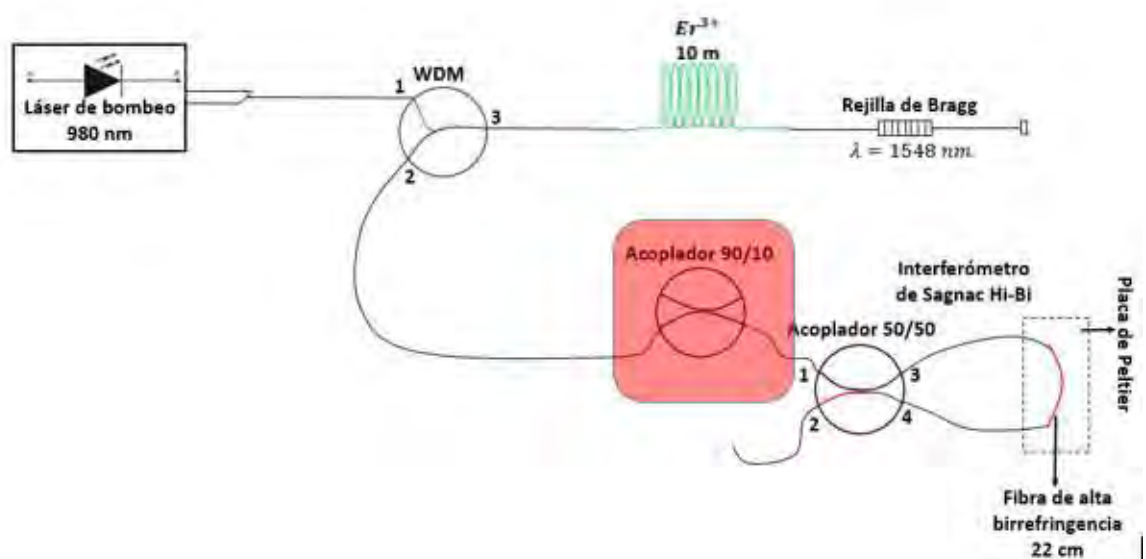


Ilustración 13 Ubicación de acoplador 90/10

4. Se optimizó el bombeo del diodo láser, mediante el ajuste de la potencia, incrementándola en un rango de 30 a 100 mW. El diodo laser funciona como fuente de bombeo de 980nm y alimenta el sistema EDFA con lo cual se tiene una señal de prueba con ruido ASE de 1548nm.



Ilustración 14 Diodo Laser 980 nm

5. Para saber la longitud adecuada de fibra Hi-Bi se realizó un análisis matemático por medio de la ecuación (3.1) donde λ es la longitud de la señal de prueba, $\Delta\lambda$ es el periodo de la transmitancia que nos permitirá suprimir la mayor contribución de ruido ASE y Δn es la diferencia del índice de refracción entre los ejes lento y rápido de la fibra de Hi-Bi:

$$L = \frac{\lambda^2}{(\Delta\lambda)(\Delta n)} \quad (3.1)$$

6. Una vez que se tiene la longitud de la fibra Hi-Bi y el ajuste del bombeo, la señal que viene de la salida 2 del WDM al circulador, se introduce al SI por medio de la terminal 1 del acoplador 50/50, una vez que la señal pasa por el SI se obtiene una señal por la terminal 2 del acoplador 50/50, la cual será llamada transmitancia. Para localizar donde se necesita la existencia de un máximo o un mínimo de transmitancia, se realizaron caracterizaciones, sometiendo la fibra Hi-Bi a cambios de temperatura mediante un Peltier. Los cambios de temperatura fueron desde temperatura ambiente 27 °C hasta 100°C.

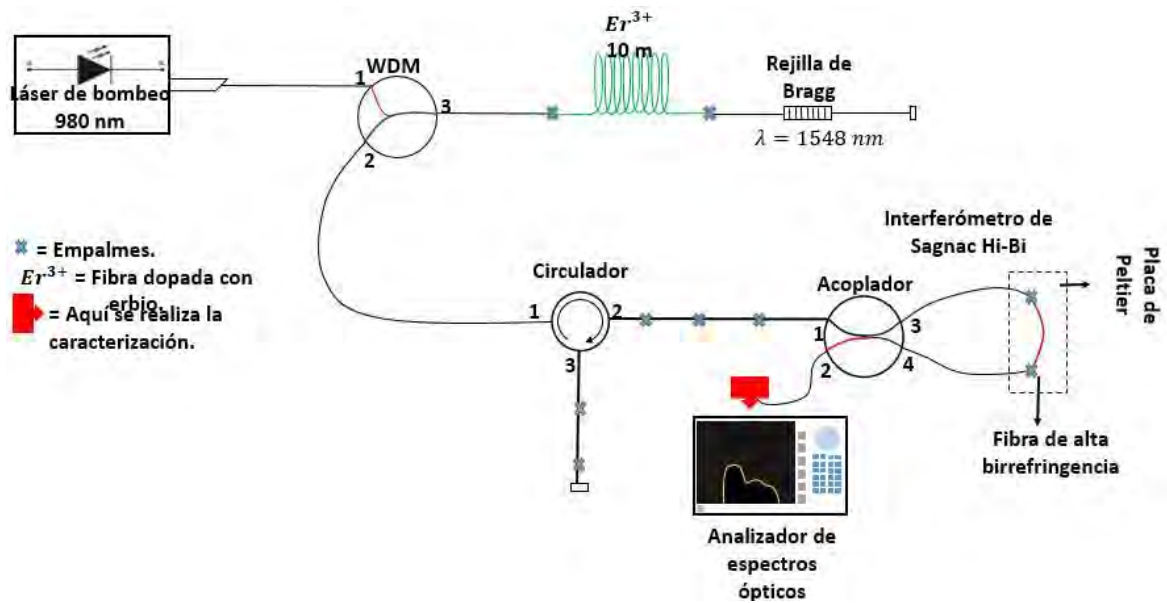


Ilustración 15 Arreglo experimental optimizado

Resumen

El capítulo 3 de esta tesis, se centró en el arreglo experimental, con el fin de minimizar la atenuación producida por el ruido ASE de manera óptima y se detalló cada uno de los elementos, como funcionan y que procedimiento se realizó para llegar a los resultados esperados.

Capítulo IV Resultados y análisis

Introducción

Como en toda investigación científica, nunca estará completa sin tener resultados concretos, que avalen el trabajo realizado. Este capítulo tiene el objetivo de dar a conocer de forma detallada los análisis y resultados del arreglo experimental que se obtuvieron durante el proceso de optimización, en el cual se observa la importancia de optimizar para disminuir la atenuación producida por el ruido ASE.

4.1 Análisis y resultados

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos al incrementar la potencia de bombeo, al aplicar diversos niveles de temperatura sobre la fibra de Hi-Bi, y al eliminar empalmes innecesarios.

La optimización realizada al arreglo experimental mediante la eliminación del exceso de empalmes permitió mejorar la potencia de la señal de -17 dBm a -2.2 dBm a temperatura ambiente de 27.3 °C, por tanto queda comprobado que las pérdidas por exceso de empalmes afectan notoriamente la potencia de la señal. En la *Ilustración 16* e *Ilustración 17* se puede observar la cantidad de empalmes originales y los optimizados.

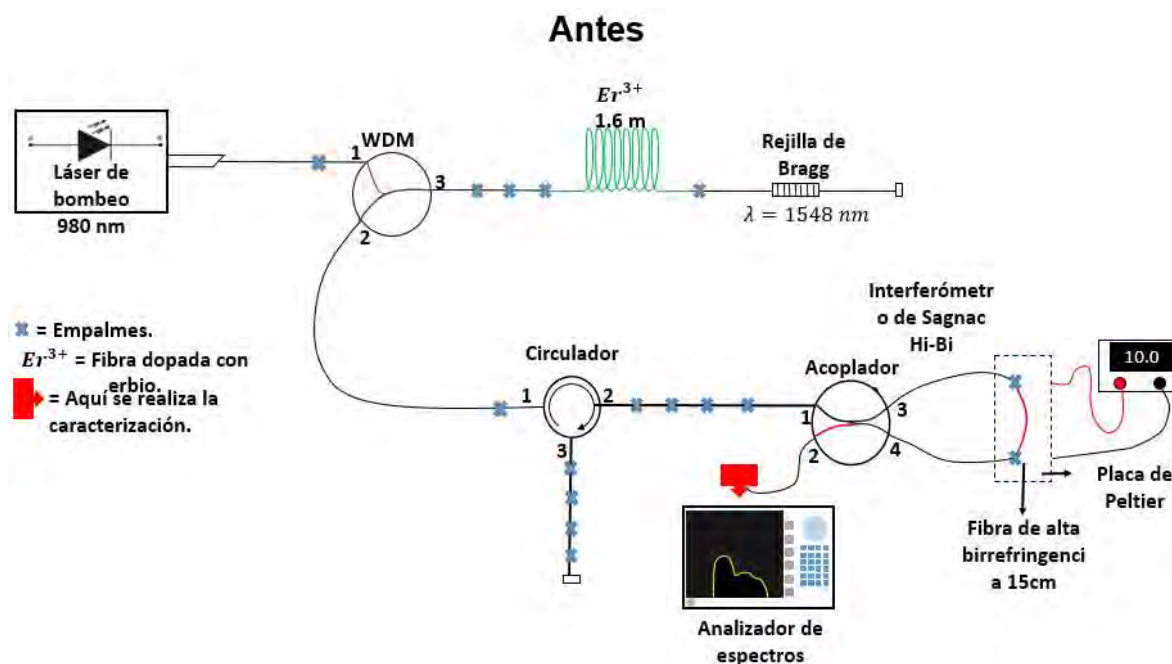


Ilustración 16 Comparación del exceso de empalmes en el arreglo (Antes)

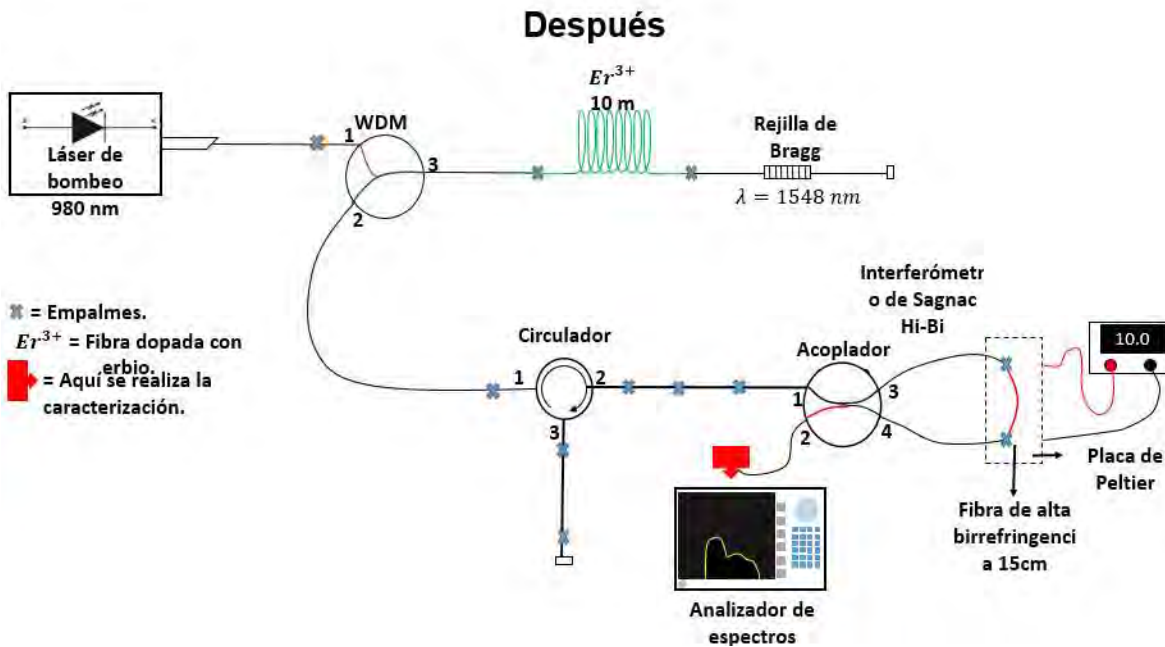


Ilustración 17 comparación del exceso de empalmes en el arreglo (Después)

El arreglo experimental contaba con un acoplado 90/10 el cual unía el EDFA con el SI, donde la salida de 10 del acoplador se utilizaba para medir la reflectancia. Dicho acoplador fue sustituido por el circulator, el cual emerge la señal de entrada al puerto 2 y el puerto 2 emerge al puerto 3, con el objetivo de medir mejor la reflectancia.

Al diodo láser de bombeo que sirve como fuente para el sistema EDFA, se le incremento la potencia mediante el aumento de la longitud de fibra dopada con erbio, el rango que se manejó de potencia fue de 70 a 100mW.

Posteriormente se calculó la longitud adecuada de fibra de Hi-Bi mediante la ecuación (3.1) como se había mencionado anteriormente, λ es la longitud de onda de la señal de prueba, igual a 1548nm, el periodo de transmitancia es $\Delta\lambda = 40nm$, esta transmitancia nos asegura una separación de 20nm entre el mínimo y máximo de la transmitancia, lo que nos permitirá suprimir la mayor contribución de ruido de ASE producido por una EDFA ajustando la transmitancia mínima en 1530 nm y la máxima en 1548 nm, $\Delta n = 4.22 \times 10^{-4}$ es la diferencia del índice de refracción entre los ejes lento y rápido de la fibra de Hi-Bi. Por lo tanto, mediante la ecuación (4.1) se calcula dicha longitud.

$$L = \frac{1548m^2}{(40nm)(4.22 \times 10^{-4})} \quad (4.1)$$

$$L \approx 15 \text{ cm}$$

Después del cálculo realizado mediante la ecuación (4.1) se encontró que la longitud óptima de fibra de Hi-Bi es de alrededor de 15 cm, por lo siguiente se procedió a cortar la longitud calculada, debido a que el arreglo anterior contaba con una longitud de 22 cm.

Los resultados obtenidos para una longitud de 15 cm de fibra de Hi-Bi se muestran en la *Ilustración 18*, cabe destacar que para que el SI funcione como un filtro pasa banda se debe seleccionar la región de longitud de onda donde se desea trabajar, la mejor atenuación del ruido ASE se logra en la región de 1530 nm. En la *Ilustración 18* se muestra gráficamente que existe una atenuación en la transmitancia con respecto a la señal de prueba, debido a que un mínimo de la transmitancia se encuentra muy cercano a la región de 1530 nm a temperatura ambiente 26.5°C con variación de potencia de bombeo de 70 a 100 mA y la mayor transmitancia se encuentra en 1548 nm y también se puede observar que la transmitancia en su punto máximo alcanza una potencia aproximada de -8.44 dBm.

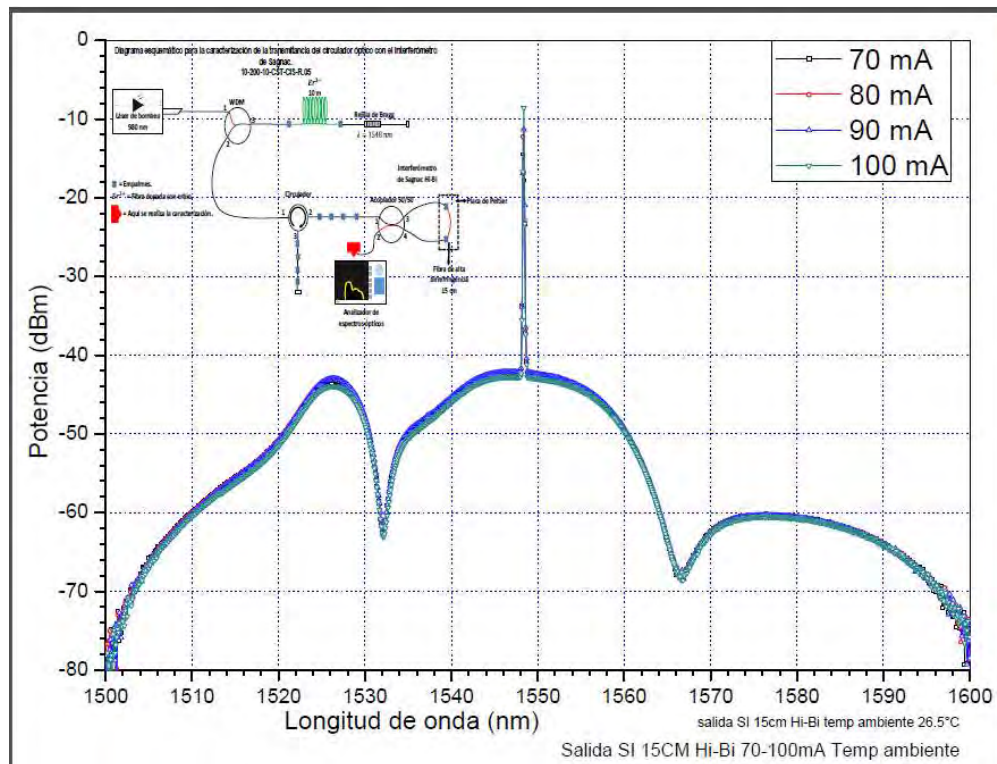


Ilustración 18 Grafica de la transmitancia del SI a temperatura ambiente

La *Ilustración 19* muestra la salida 3 del circulator a temperatura ambiente 26.5 °C, correspondiente a la reflectancia del arreglo experimental, como se puede observar el pico máximo de la reflectancia se encuentra en 1548 nm con una potencia de -2.86 dBm y la señal de 1530 nm se encuentra con una potencia de -26.65 dBm, de igual manera se realizaron variaciones de potencia de 70 a 100 mA en la fuente de bombeo.

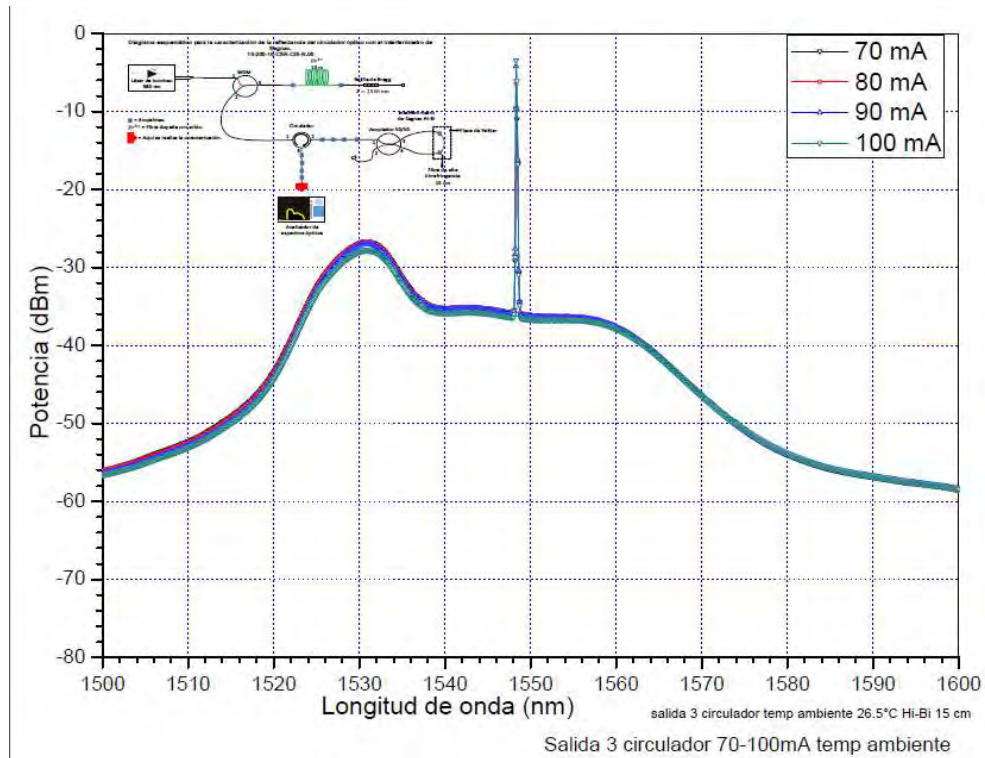
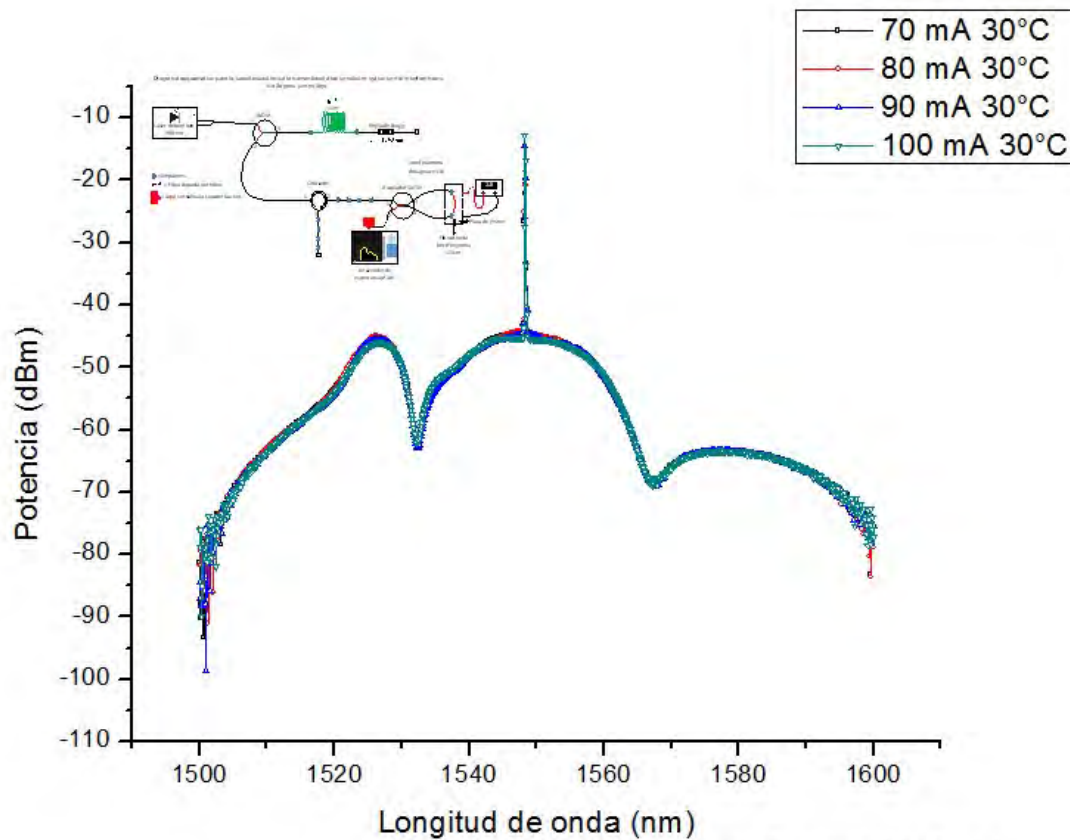


Ilustración 19 Grafica de la salida 3 del circulator (reflectancia) a temperatura ambiente

Ahora bien, para que la mínima transmitancia quede en 1530 nm se procedió a calentar la fibra de Hi – Bi por medio de la placa de peltier y una fuente de voltaje conectada a la placa con variaciones de voltaje de 1 a 10 V, los resultados obtenidos se pueden observar en las Ilustraciones 20-29.

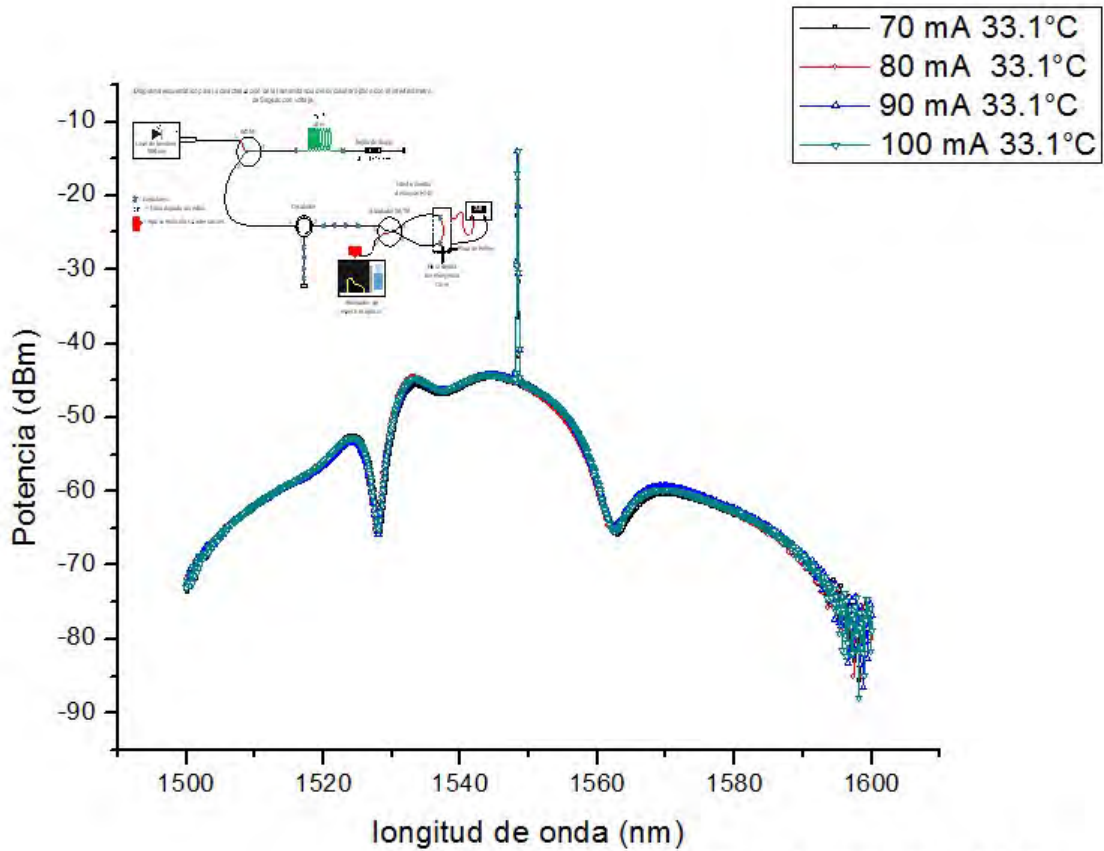
En la Ilustración 20 se observa el resultado de la salida del SI equivalente a la transmitancia de la señal de prueba, donde la potencia inducida por el diodo laser va desde los 70 mA a los 100 mA. También se le introdujo 1 volt a la placa de Peltier la cual mantuvo una temperatura de 30° C. En esta Ilustración se puede observar que la señal pico de 1548nm obtuvo una potencia de aproximadamente -12.74 dBm, la señal de 1530nm una potencia de -49.85 dBm y la señal de 1532 nm una potencia de -62.15 dBm.



salida SI 15cm Hi-Bi temp 30°C 1V

Ilustración 20 Grafica de transmitancia a 30°C

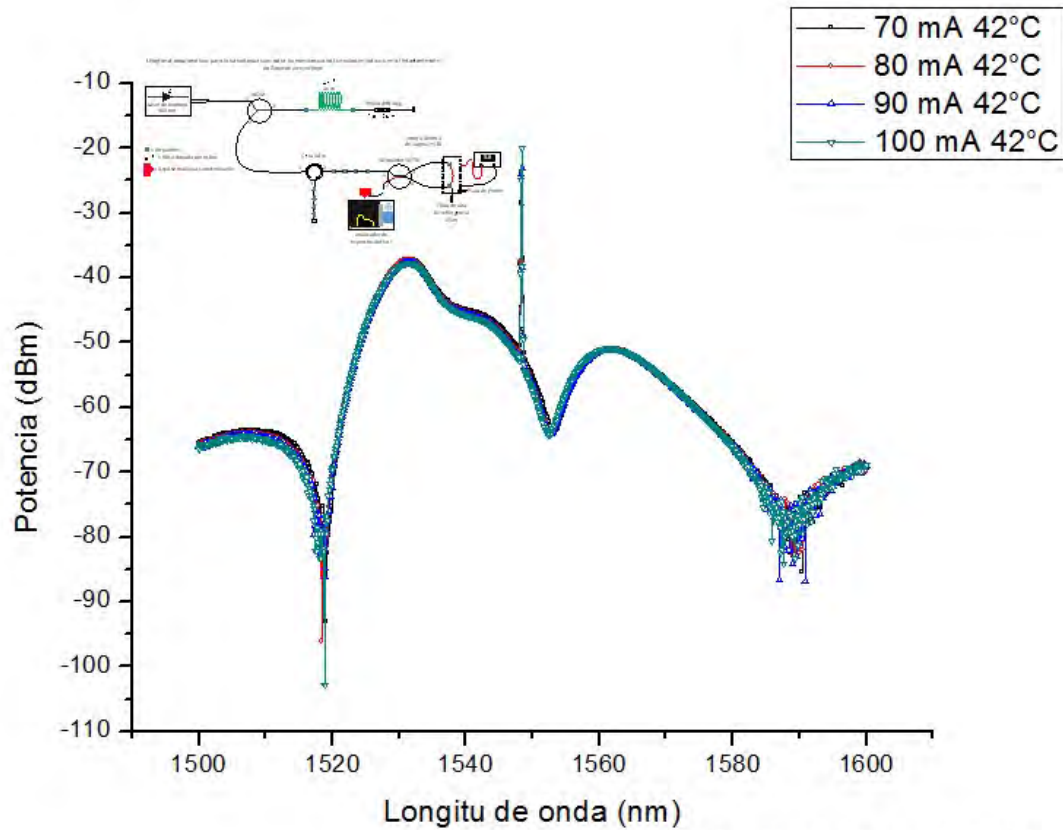
En la siguiente *Ilustración 21* se observa el resultado de la transmitancia de la señal de prueba, donde la potencia inducida por el diodo laser va desde los 70 mA a los 100 mA y se le introdujo 2 volts a la placa de Peltier, la cual mantuvo una temperatura de 33° C. En esta Ilustración se puede observar que la señal pico de 1548nm obtuvo una potencia de aproximadamente -14.07 dBm, la señal de 1530nm se mantuvo a una potencia de -51.1 dBm y la señal de 1532 nm una potencia de -65.79 dBm.



salida SI 15cm Hi-Bi temp 33.1°C 2V

Ilustración 21 Grafica de transmitancia a 33.1°C

En la *Ilustración 22* se observa el resultado de la transmitancia de la señal de prueba donde la potencia inducida por el diodo laser va desde los 70 mA a los 100 mA y se le introdujo 3 volts a la placa de Peltier, la cual mantuvo una temperatura de 42° C. En esta Ilustración se puede observar que la señal pico de 1548nm obtuvo una potencia de aproximadamente -20.02 dBm, y la señal en 1530nm se estableció a una potencia aproximada de -38.06 dBm.



salida SI 15cm Hi-Bi temp 42°C 3V

Ilustración 22 Grafica de transmitancia a 42°C

En la *Ilustración 23* se observa el resultado de la transmitancia de la señal de prueba, donde la potencia inducida por el diodo laser va desde los 70 mA a los 100 mA y se le introdujo 4 volts a la placa de Peltier, la cual mantuvo una temperatura de 46.2 °C. En esta Ilustración se puede observar que la señal pico de 1548nm obtuvo una potencia de aproximadamente -19.34 dBm y la señal en 1530nm se estableció a una potencia aproximada de -37.36 dBm.

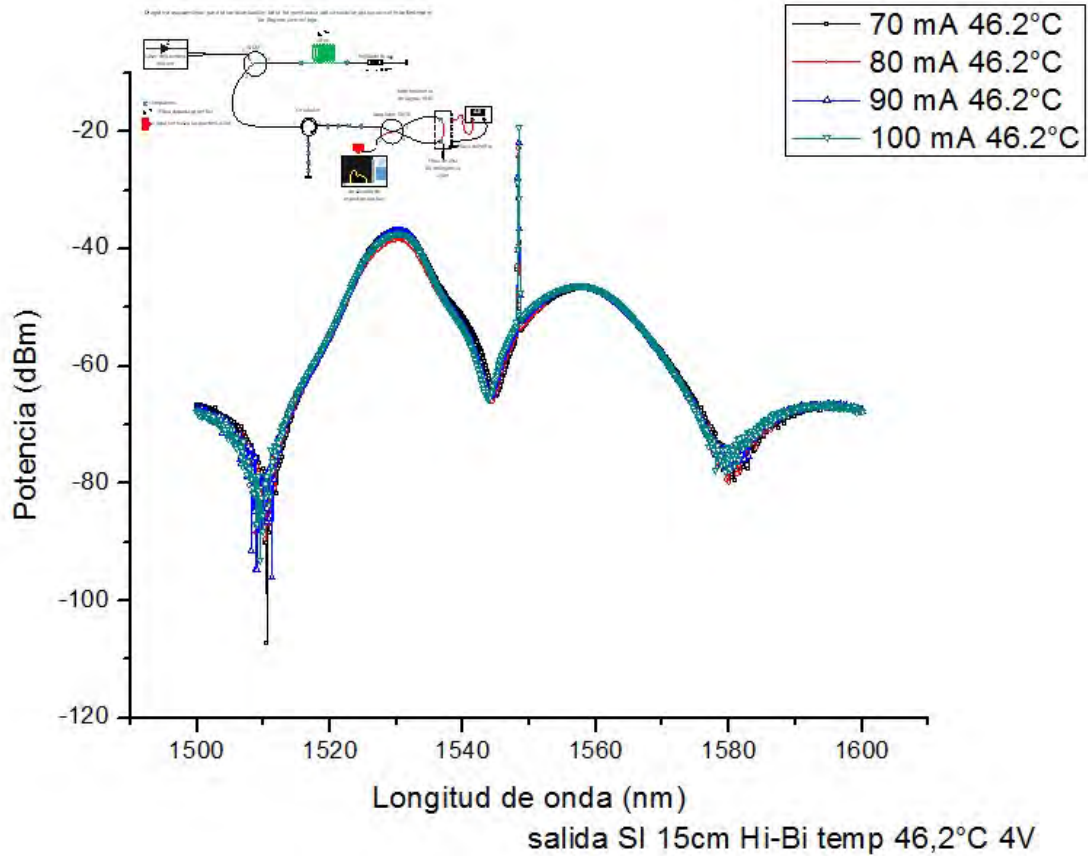
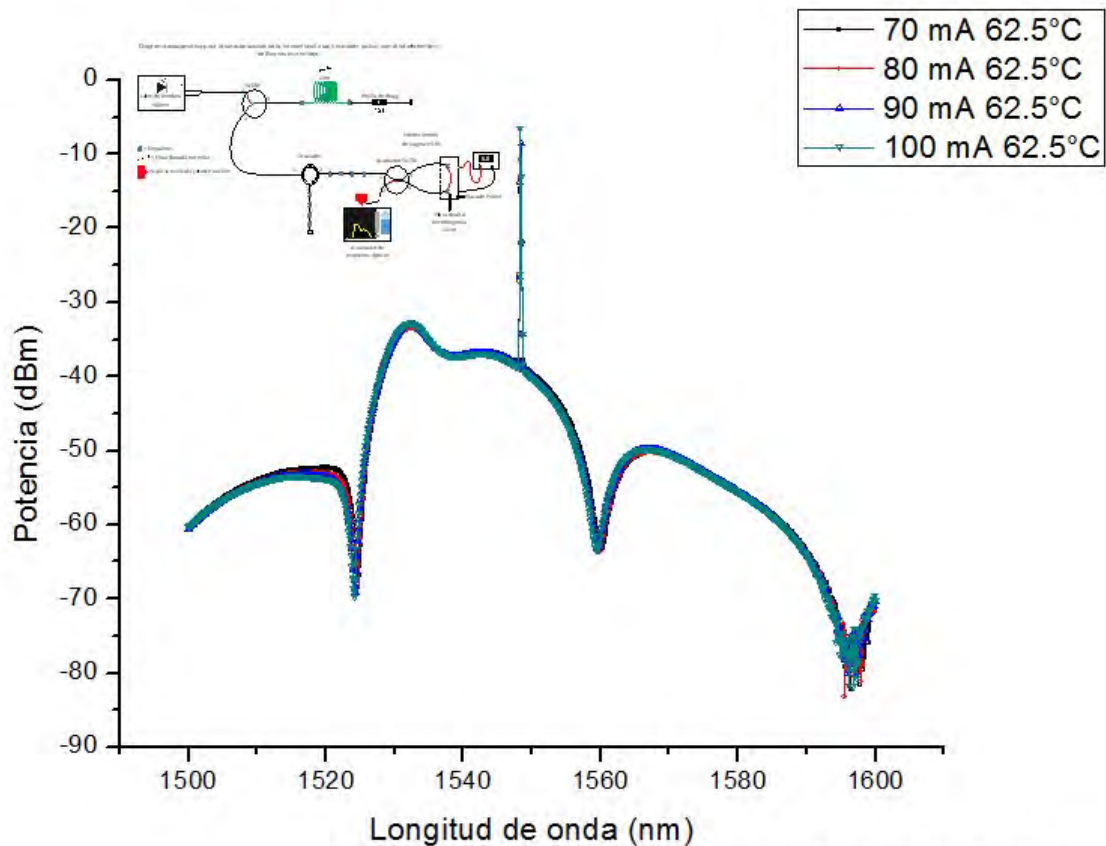


Ilustración 23 Grafica de transmitancia a 46.2°C

En la *Ilustración 24* se observa el resultado de la transmitancia de la señal de prueba, donde la potencia inducida por el diodo laser va desde los 70 mA a los 100 mA y se le introdujo 5 volts a la placa de Peltier, la cual mantuvo una temperatura de 62.5 °C. En esta Ilustración se puede observar que la señal pico de 1548nm obtuvo una potencia de aproximadamente -6.49 dBm y la señal en 1530 nm se estableció a una potencia aproximada de -35.02dBm.



salida SI 15cm Hi-Bi temp 62.5°C 5V

Ilustración 24 Grafica de transmitancia a 62.5°C

En la *Ilustración 25* se observa el resultado de la transmitancia de la señal de prueba, donde la potencia inducida por el diodo laser va desde los 70 mA a los 100 mA y se le introdujo 6 volts a la placa de Peltier, la cual mantuvo una temperatura de 67.7 °C. En esta Ilustración se puede observar que la señal pico de 1548nm obtuvo un gran cambio en la potencia de aproximadamente -16.57 dBm y la señal en 1530nm se estableció a una potencia aproximada de -27.78 dBm.

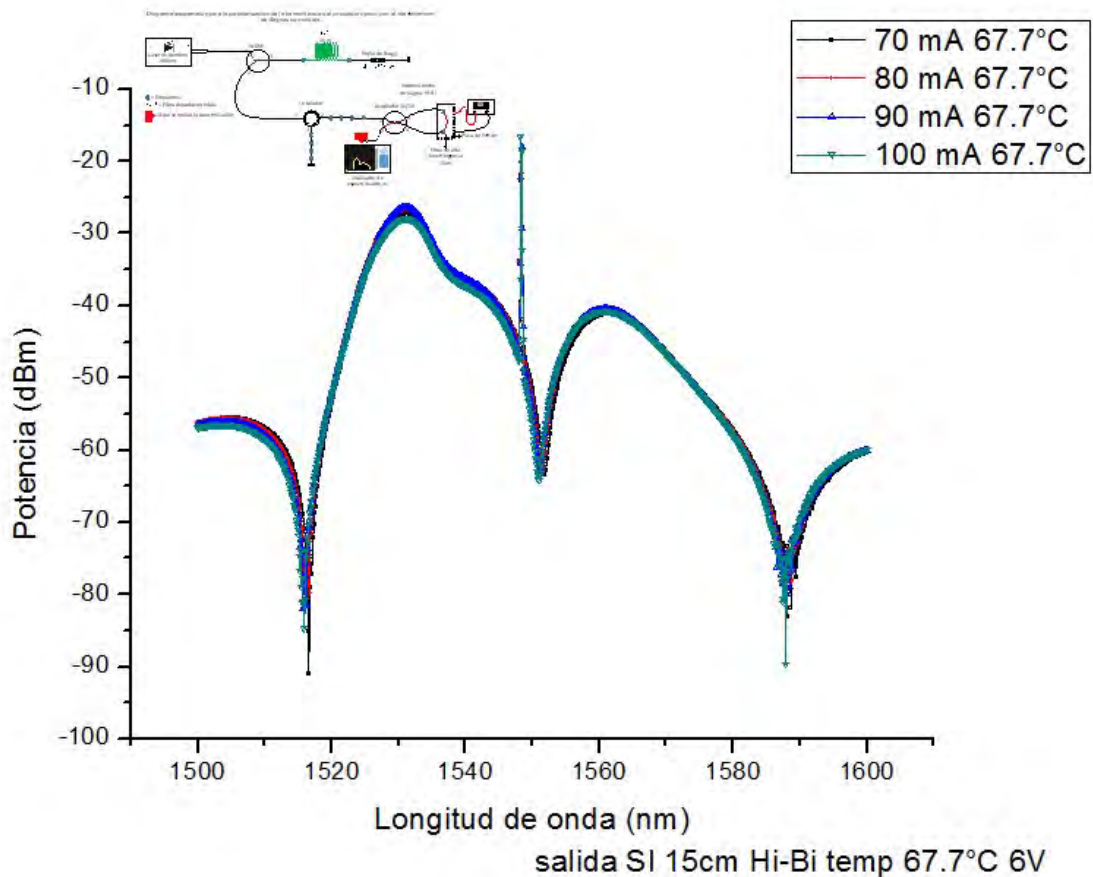


Ilustración 25 Grafica de transmitancia a 67.7°C

En la *Ilustración 26* se observa el resultado de la transmitancia de la señal de prueba, donde la potencia inducida por el diodo laser va desde los 70 mA a los 100 mA y se le introdujo 7 volts a la placa de Peltier, la cual mantuvo una temperatura de 78.1 °C. En esta Ilustración se puede observar que la señal pico de 1548nm obtuvo una potencia de aproximadamente -8.03 dBm y la señal en 1530nm se estableció a una potencia aproximada de -29.32 dBm.

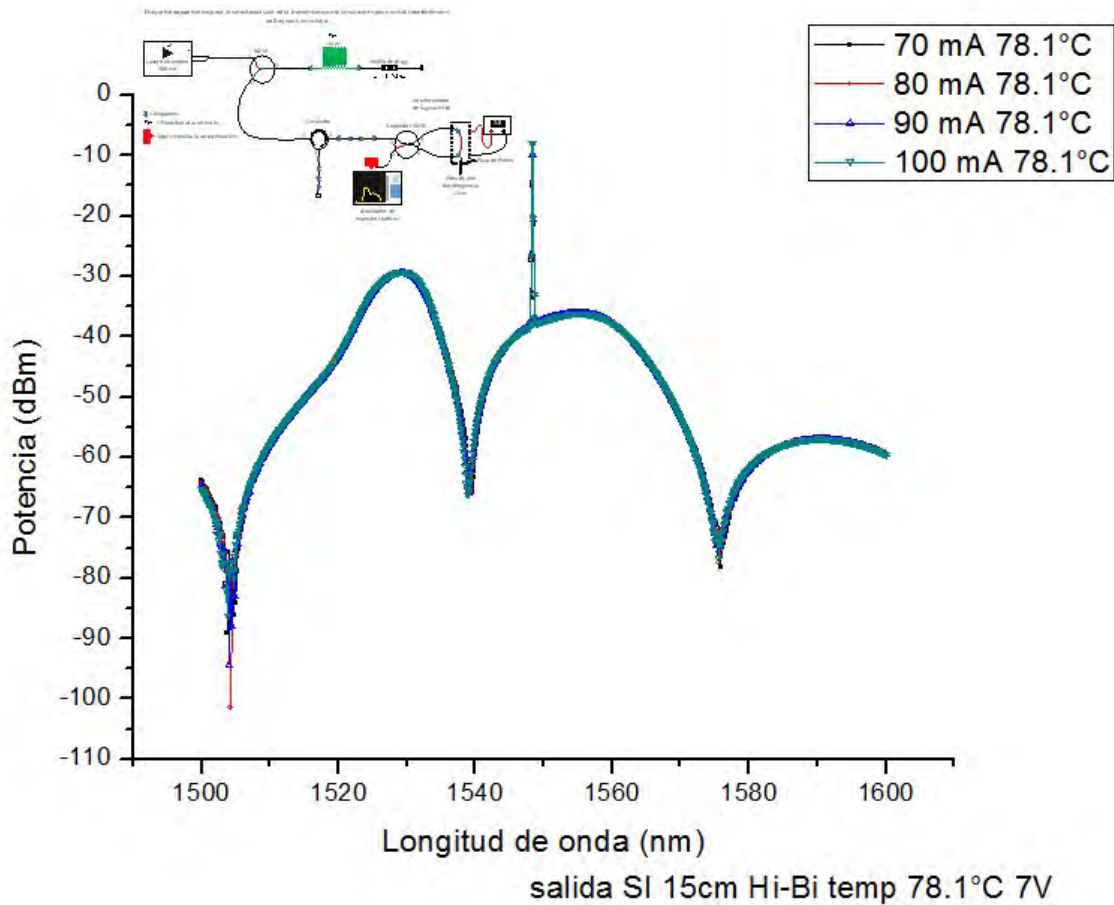


Ilustración 26 Grafica de transmitancia a 78.1°C

En la *Ilustración 27* se observa el resultado de la transmitancia de la señal de prueba, donde la potencia inducida por el diodo laser va desde los 70 mA a los 100 mA y se le introdujo 8 volts a la placa de Peltier, la cual mantuvo una temperatura de 87.4 °C. En esta Ilustración se puede observar que la señal pico de 1548nm obtuvo una potencia de aproximadamente -2.62 dBm y la señal en 1530nm se estableció a una potencia aproximada de -36.25 dBm.

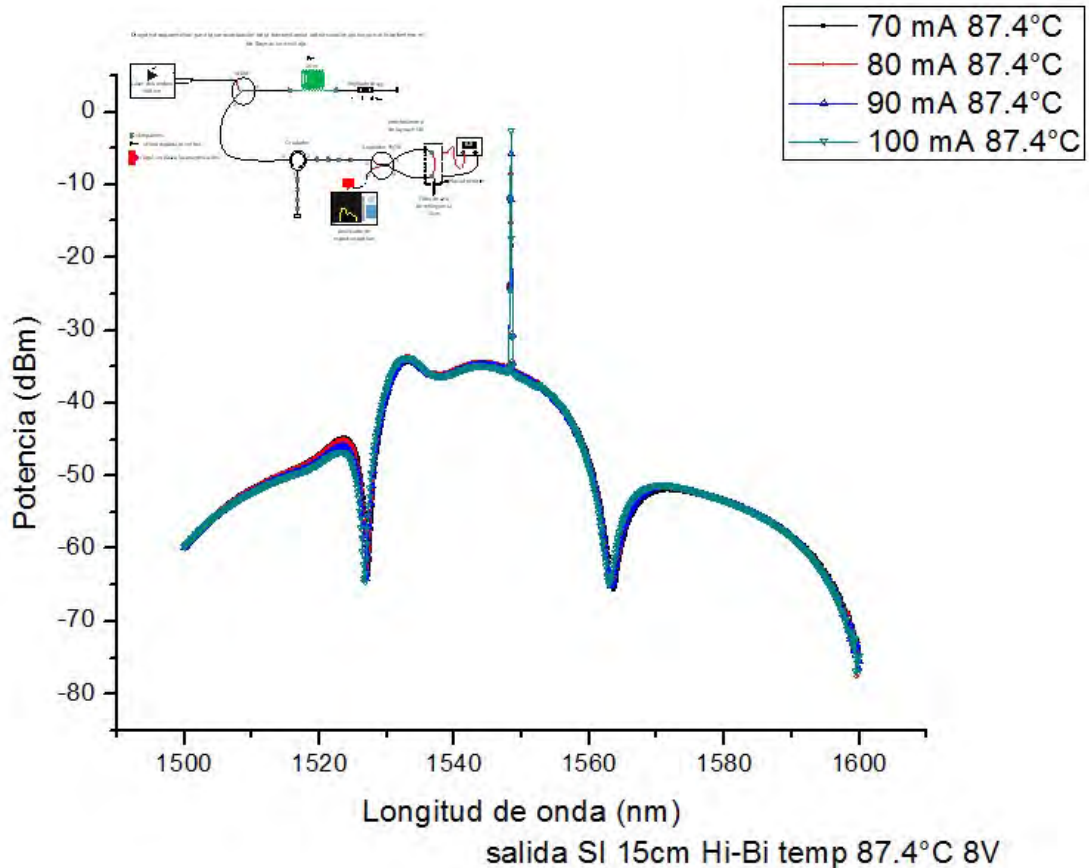


Ilustración 27 Grafica de transmitancia a 87.4°C

En la *Ilustración 28* se observa el resultado de la transmitancia de la señal de prueba, donde la potencia inducida por el diodo laser va desde los 70 mA a los 100 mA y se le introdujo 9 volts a la placa de Peltier, la cual mantuvo una temperatura de 95.8 °C. En esta Ilustración se puede observar que la señal pico de 1548nm obtuvo un gran cambio de potencia de aproximadamente -16.06 dBm y la señal en 1530nm se estableció a una potencia aproximada de -27 dBm.

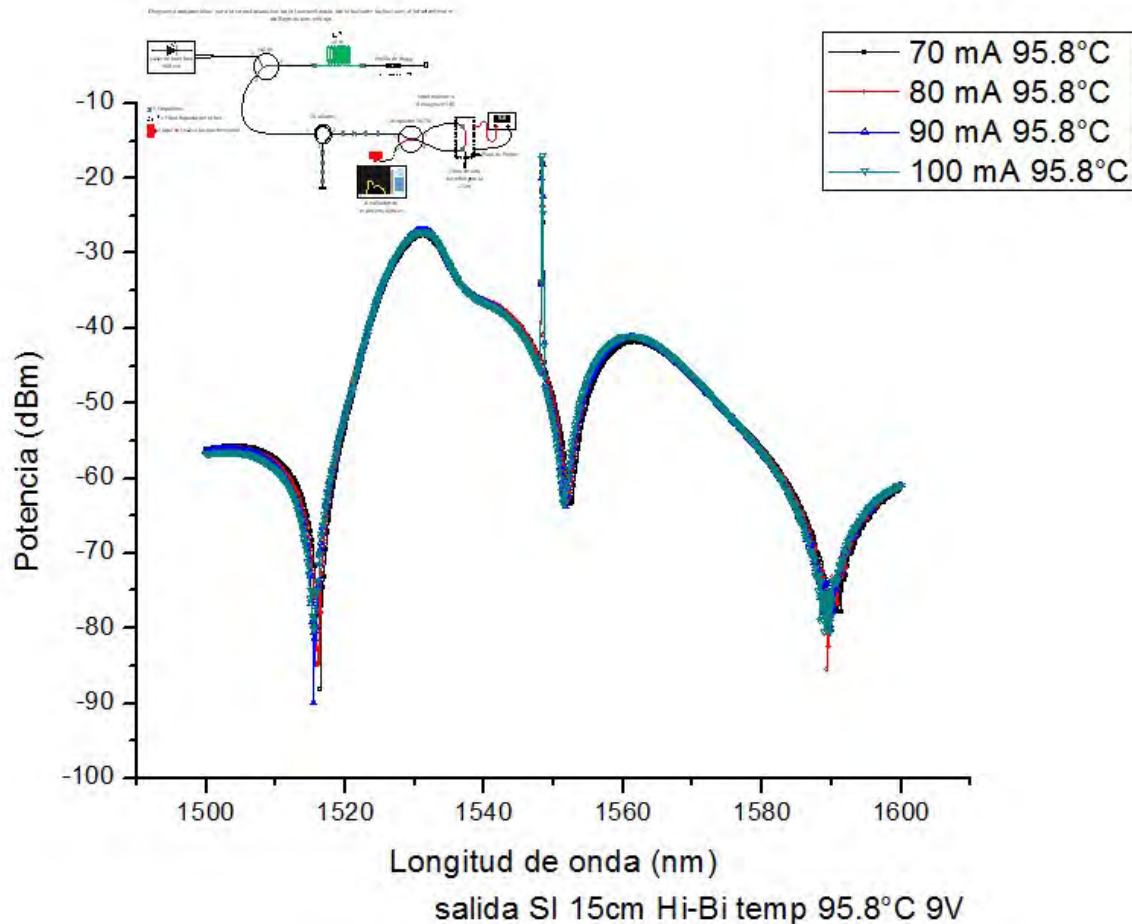


Ilustración 28 Grafica de transmitancia a 95.8°C

En la *Ilustración 29* se observa el resultado de la transmitancia de la señal de prueba, donde la potencia inducida por el diodo laser va desde los 70 mA a los 100 mA y se le introdujo 10 volts a la placa de Peltier la cual mantuvo una temperatura de 103.2 °C. En esta Ilustración se puede observar que la señal pico de 1548nm obtuvo una potencia de aproximadamente -7.09 dBm y la señal en 1530nm se estableció a una potencia aproximada de -29.29 dBm.

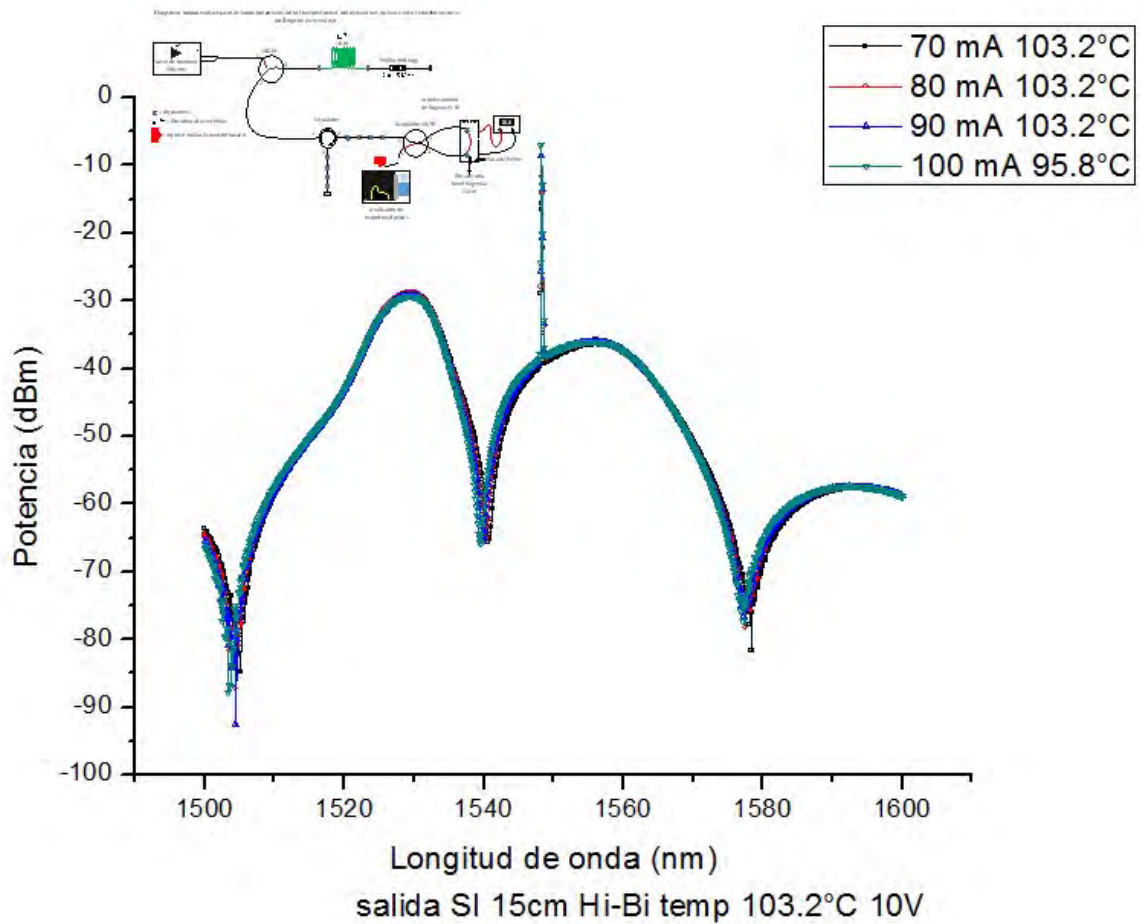


Ilustración 29 Grafica de transmitancia a 103.2°C

Después de observar todos los resultados obtenidos en las Ilustraciones 20-29, con sus correspondientes valores de temperatura, se pudo observar que la mínima transmitancia se obtuvo en 1530 nm y la máxima en 1548 nm, calentando la fibra de Hi-Bi a 30 °C (1V) y a 33.1 °C (2V), respectivamente. A 30°C se obtuvo una ganancia de -12.74 dBm y a 33.1 °C una ganancia de -14.07 dBm, esto nos da una ganancia de 37.11 dBm y 37.03 dBm, respectivamente; comparando con resultados obtenidos antes de la optimización, el cual fue de 29.41 dBm de ganancia, se puede observar la mejora alcanzada. En las Ilustraciones 30 y 31 se pueden observar la señal a estas temperaturas.

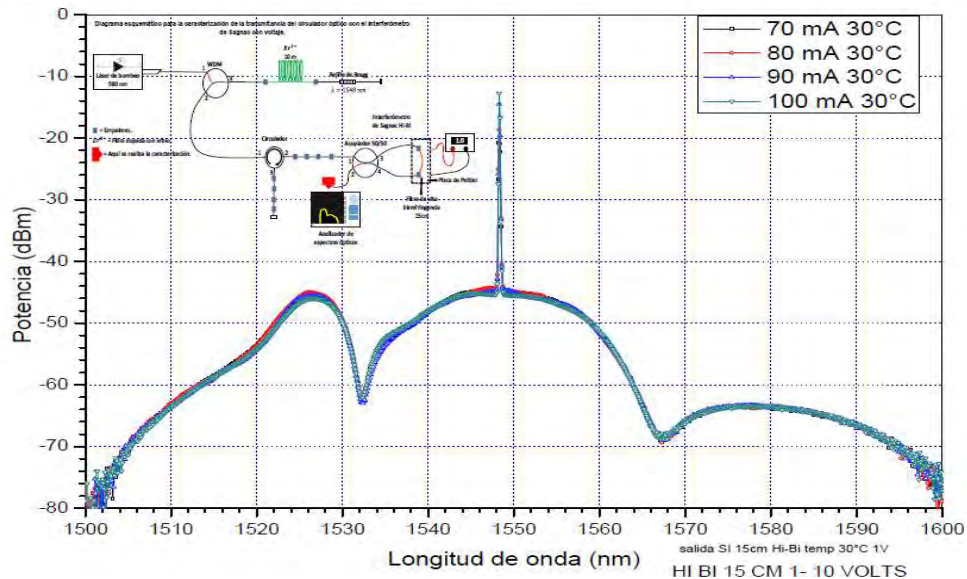


Ilustración 30 Transmitancia a 30 °C a 1V

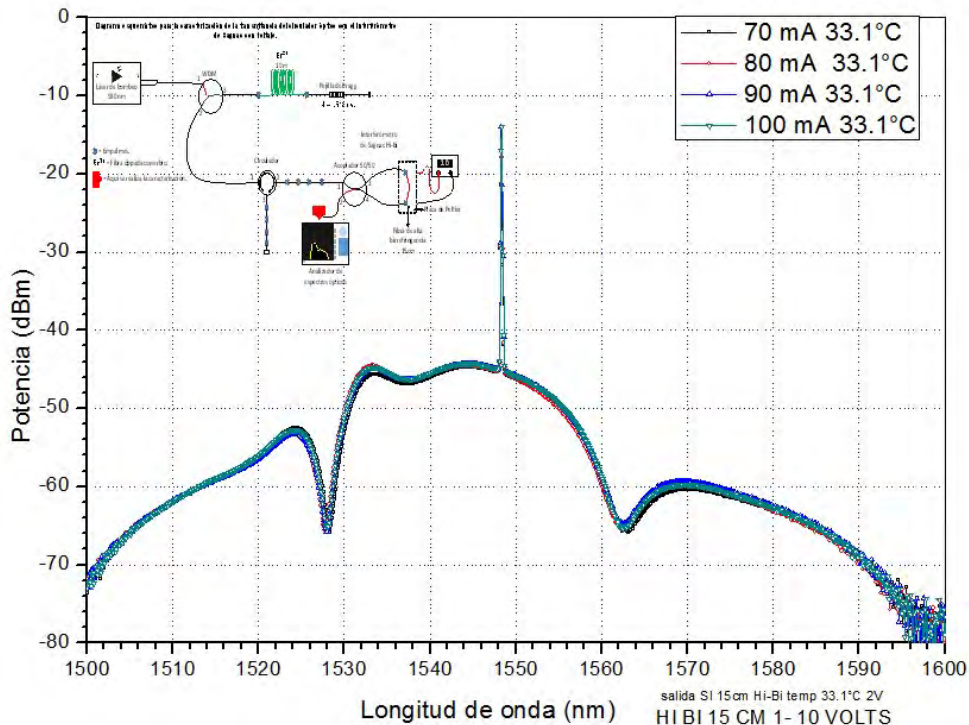


Ilustración 31 Transmitancia a 33.1 °C a 2V

Los resultados de la reflectancia a la misma temperatura y mismo voltaje se pueden observar en las siguientes *Ilustraciones 32 y 33* donde la potencia máxima a 30 °C está a -3.36 dBm y en 33.1 °C se encuentra a -5.08 dBm.

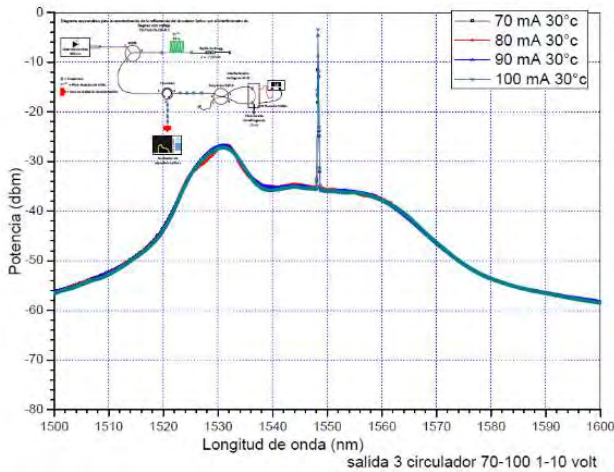


Ilustración 32 Reflectancia a 30 °C a 1V

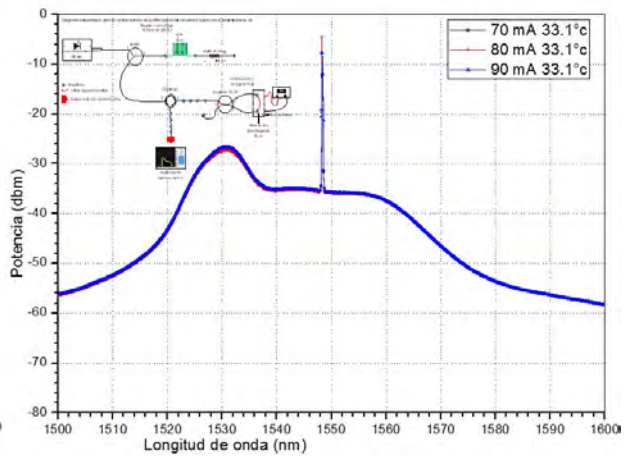


Ilustración 33 Reflectancia a 33.1 °C a 2V

A continuación, se muestra la Tabla 1, donde se compara la potencia de la señal de 1548 nm y 1530 nm con respecto a los diversos valores de temperatura utilizados en esta tesis.

voltaje inducido a la placa de Peltier	Temperatura obtenida	Longitud de onda		Ganancia	
		Máxima transmitancia	Mínima transmitancia	dBm	W
v	°C	1548 nm	1530 nm		
1	30	-12.74	-49.85	37.11	5.14
2	33.1	-14.07	-51.1	37.03	5.04
3	42	-20.02	-38.06	18.04	0.0636
4	46.2	-19.34	-37.36	18.02	0.0633
5	62.5	-6.49	-35.02	28.53	0.7128
6	67.7	-16.57	-27.78	11.21	0.0132
7	78.1	-8.03	-29.32	21.29	0.1345
8	87.4	-2.62	-36.25	33.63	2.3067
9	95.8	-16.06	-27	10.94	0.0124
10	103.2	-7.09	-29.29	22.2	0.1659

Tabla 1 Comparación de los niveles de potencia a diferentes temperaturas

A continuación, se presentan las Tablas 2-11, donde se muestra las potencias de bombeo del diodo láser que van desde los 70 mA a los 100mA y sus correspondientes ganancias obtenidas con respecto a los diferentes valores de temperatura que se utilizaron en esta tesis.

1 volt = 30°C			
	1530nm	1548nm	Ganancia
70mA	-50.22	-20.79	29.43
80mA	-50.01	-18.76	31.25
90mA	-49.8	-14.54	35.26
100mA	-49.85	-12.74	37.11

Tabla 2 Potencia de bombeo 70-100 a 30°C

2 volt = 33.1°C			
	1530nm	1548nm	Ganancia
70mA	-52.37	-21.31	31.06
80mA	-50.43	-18.2	32.23
90mA	-50.79	-13.97	36.82
100mA	-51.1	-14.07	37.03

Tabla 3 Potencia de bombeo 70-100 a 33.1°C

3 volt = 42°C			
	1530nm	1548nm	Ganancia
70mA	-37.64	-28.35	9.29
80mA	-37.27	-23.52	13.75
90mA	-37.96	-23.14	14.82
100mA	-38.06	-20.02	18.04

Tabla 4 Potencia de bombeo 70-100 a 42°C

4 voltaje = 46.2°C			
	1530nm	1548nm	Ganancia
70mA	-36.39	-29.14	7.25
80mA	-38.41	-22.83	15.58
90mA	-36.72	-21.86	14.86
100mA	-37.36	-19.34	18.02

Tabla 5 Potencia de bombeo 70-100 a 46.2° C

5 voltaje = 62.5°C			
	1530nm	1548nm	Ganancia
70mA	-34.76	-14.64	20.12
80mA	-34.89	-10.74	24.15
90mA	-34.65	-8.6	26.05
100mA	-35.02	-6.49	28.53

Tabla 6 Potencia de bombeo 70-100 a 62.5° C

6 voltaje = 67.7°C			
	1530nm	1548nm	Ganancia
70mA	-27.46	-20.23	7.23
80mA	-26.74	-20.08	6.66
90mA	-26.53	-17.97	8.56
100mA	-27.78	-16.57	11.21

Tabla 7 Potencia de bombeo 70-100 a 67.7° C

7 voltaje = 78.1°C			
	1530nm	1548nm	Ganancia
70mA	-29.43	-14.52	14.91
80mA	-29.22	-10	19.22
90mA	-29.35	-10.16	19.19
100mA	-29.32	-8.03	21.29

Tabla 8 Potencia de bombeo 70-100 a 78.1° C

8 voltaje = 87.4°C			
	1530nm	1548nm	Ganancia
70mA	-36.27	-11.66	24.61
80mA	-35.09	-8.67	26.42
90mA	-37.24	-5.65	31.59
100mA	-36.25	-2.62	33.63

Tabla 9 Potencia de bombeo 70-100 a 87.4° C

9 voltaje = 95.8°C			
	1530nm	1548nm	Ganancia
70mA	-27.79	-19.33	8.46
80mA	-27.15	-17.94	9.21
90mA	-26.7	-18.04	8.66
100mA	-27	-16.06	10.94

Tabla 10 Potencia de bombeo 70-100 a 95.8° C

10 voltaje = 103.2°C			
	1530nm	1548nm	Ganancia
70mA	-28.71	-15.65	13.06
80mA	-28.59	-11.51	17.08
90mA	-29.12	-8.53	20.59
100mA	-29.29	-7.09	22.2

Tabla 11 Potencia de bombeo 70-100 a 103.2° C

Resumen

En el capítulo 4, se dieron a conocer los resultados obtenidos de cada temperatura aplicada a la fibra de Hi-Bi del arreglo experimental, estos resultados fueron representados mediante gráficas y tablas. Finalmente, se emitió una opinión referente a los resultados obtenidos, mostrando la mejora obtenida mediante la optimización.

Capítulo 5 conclusiones

Trabajar con dispositivos ópticos es un reto muy interesante, más aún, cuando es un tema completamente nuevo que se desarrolla como proyecto de tesis en el programa de Ingeniería de Redes de la Universidad de Quintana Roo, sin embargo, es muy gratificante concluirlo de manera satisfactoria y con aportaciones que pueden ser validadas mediante referencias sólidas.

En este proyecto de tesis se implementó un arreglo óptico al cual se le optimizaron los siguientes parámetros: optimización de exceso de empalmes en el arreglo, se calculó analíticamente la longitud adecuada de fibra dopada con erbio (10 m), se aplicó mayor potencia de bombeo, se empalmo adecuadamente la longitud de fibra óptica de alta birrefringencia para obtener la máxima transmitancia en 1548 nm y la mínima en 1530 nm, se aplicaron diversos valores de temperatura a la fibra de Hi-Bi para caracterizar el sistema y encontrar los puntos mínimo y máximo de la transmitancia.

Para realizar dicha optimización se generó un conjunto de gráficas y tablas a partir de los resultados obtenidos de la caracterización del sistema óptico y se realizó la comparación con los resultados que se tenían con anterioridad, mostrando las mejoras obtenidas.

Las conclusiones acerca de la optimización de exceso de empalmes podemos decir que hubo una gran mejora de la potencia obtenida en comparación con la que se tenía con el exceso de empalmes.

Las conclusiones con respecto al aplicar mayor potencia de bombeo podemos decir que hubo una mejora de la potencia de la señal ya que muestra mejor definición a los 100mA de potencia de bombeo.

Las conclusiones con respecto al empalmar la longitud adecuada de fibra óptica de alta birrefringencia se pudo notar una mejora, ya que si se utiliza la longitud adecuada, el Interferómetro Sagnac logra la mayor atenuación del ruido ASE producido por el EDFA.

Las conclusiones con respecto a las caracterizaciones en el Interferómetro de Sagnac utilizando diversos valores de temperatura sobre la fibra Hi-Bi podemos decir que los

resultados fueron satisfactorios ya que podemos concluir a que ciertas temperaturas la señal a transmitir alcanza una mejor potencia disminuye.

Bibliografía

- [1] Charles. Tsao, "Optical Fiber Waveguide analysis", Oxford University Press, New York, (1999).
- [2] Eugene Hecht, "Óptica", Edit. Addison Wesley, (2000).
- [3] B. I.-E. E. K. y. J. G.-G. R. Grajales-Coutiño, «Láser de fibra de amarre de modos de figura ocho basado en un espejo de lazo óptico no lineal simétrico,» *Revista Mexicana de Física*, n° 53, p. 381, Octubre 2007.
- [4] A. González- Garcia, O. Pottiez y R. Grajales-coutiño, «Estudio experimental de un láser sintonizable en longitud de onda usando un filtro de Sagnac con selectiva espectral mediante cambios en la temperatura,» *Revista Mexicana de Física*, vol. 56, n° 4, pp. 275-280, Agosto 2010.
- [5] A. Flores-Rosas, E. Kuzin, B. Ibarra-Escamilla y M. Bello-Jiménez, «Eliminación de ruido de ASE en una fibra dopada con erbio empleando un filtro basado en el,» *Revista Mexicana de Física*, vol. 54, n° 2, pp. 130-134, abril, 2008.
- [6] H. Cerecedo-Núñez, «Rejillas de Bragg en núcleo de fibra óptica de vidrio,» *Revista Mexicana de Física*, vol. 44, n° 2, pp. 198-204, abril 1988.
- [7] G. P. Agrawal, *Applications of Nonlinear Fiber Optics*, 2 ed., USA: Elsevier, 2008, pp. 2-3.
- [8] «www.significados.com,» [En línea]. Available: <http://www.significados.com/optimizar>. [Último acceso: 10 julio 2015].
- [9] I. C. A. G. Mayor, «<http://issuu.com>,» [En línea]. Available: http://issuu.com/cesargeronomo2/docs/libro_de_comunicaciones_opticas. [Último acceso: 20 julio 2015].
- [10] G. Keiser, "Optical Fiber Communication", Mc. Graw Hill, Second Edition, (1991).
- [11] P. B. R. F. T. S. Y. Shizhuo Yin, *Fiber Optic Sensors*, 2 ed., New York: Taylor & Francis Group, 2008, pp. 68,69.

- [12] E. H. A. Zajac, ÓPTICA, 4 ed., CANADA: Addison Wesley, 2002, pp. 325-329, 407-408, 411.
- [13] B. E. John Crisp, Introduction to Fiber Optics, 3 ed., Oxford, UK;: Elsevier's Science and Technology, 2005, pp. 52, 53.
- [14] C. DeCusatis, Handbook of Fiber Optic Data, 3 ed., vol. 1, Elsevier Academic Press publications, 2008, p. 65.
- [15] A. S. L. Z. A. B. Y. G. E. L. R. D. MONZÓN, «Interferómetro de Sagnac con selectividad espectral,» *Revista Mexicana de Física*, vol. 43, n° 6, pp. 972-980, 1997.
- [16] "Temperatura", Diccionario de química Física, Barcelona: Díaz de Santos Ediciones, 2005.
- [17] M. M. Alarcón, Radiación Materia y Materiales "Desarrollo de ciencia y tecnología desde la perla del golfo", Carmen, : Unacar, 2010
- [18] M. C. E. Boquera, Comunicaciones ópticas conceptos esenciales y resolución de ejercicios, Madrid: Diaz De Santos, 2005.
- [19] H. J. R. Dutton, Understanding Optical Communications, 1 ed., USA : IBM Corporation, International Technical Support Organization, 1998.
- [20] R. G. Castrejón, Hacia un sistema de comunicaciones completamente óptico., Mexico: Instituto de Ingeniería UNAM, 2005.
- [21] F. Méndez-Martínez, " Estudio teórico y experimental del interferómetro de Sagnac no lineal y su aplicación para formación de los pulsos", tesis de Doctorado, pp. 18 septiembre 2006.
- [22] N.J. Doran, and David Wood, "Nonlinear-optical loop mirror", *Optics Letters*, vol. 13, 56-58, (1988).
- [23] L. F. Stokes, M. Chodorov, and H. J. Shaw, *Opt. Lett*, 22, 507 (1964).
- [24] E. Kuzin, M. Ramirez Renero, B. Ibarra escamilla, J. Sanchez Mondragon y H. Cerecedo Nuñez, *Revista mexicana de física*, 43 No 3 (1997).
- [25] C. J. S. D. Casimer DeCusatis, FIBER OPTIC ESSENTIALS, San Diego, California: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2006, pp. 107, 108.