



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTOS DE POLARIZACIÓN Y SINTONIZACIÓN EN
FIBRAS LÁSER CON AMPLIFICADORES
SEMICONDUCTORES**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**P R E S E N T A :
PABLO VINICIO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ**

TUTOR:

DR. JUAN ARNALDO HERNÁNDEZ CORDERO

2013



JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón.

Secretario: Ing. Margarita Bautista
González.

Vocal: Dr. Juan Arnaldo Hernández
Cordero.

1er. Suplente: Ing. María Teresa Peñuñuri
Santoyo.

2do. Suplente: M.I. Selene Pérez García

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM

TUTOR DE LA TESIS
DR. JUAN ARNALDO HERNÁNDEZ CORDERO

FIRMA

“... Así que vivan y sean felices, amados hijos de mi corazón, y jamás olviden que hasta el día en que Dios se digne a revelar al hombre su porvenir, toda la sabiduría humana estará contenida en estas dos palabras:

Confiar y esperar.”

*Alejandro Dumas en
El Conde de Monte-Cristo.*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de ser alguien, académica, social y moralmente. Algún día podré contar a mis hijos que le devolví una parte de lo que me dio.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería, por su labor subestimada de encaminar a los profesionales del país.

A Juan Hernández, por su confianza y paciencia, pero más que nada por su disciplina en el momento en que más se necesitaba.

A los sinodales, por su entusiasmo y oportunas correcciones.

A mis compañeros y amigos del Instituto de Investigaciones en Materiales por su apoyo y enseñanzas.

A mis amigos de la Facultad, en especial a Luisa, Alfonso, Efrén, Gerardo y Daniel; porque hicimos el mejor equipo dentro y fuera de las clases. Tuvimos muchos retos y estoy seguro que nadie tendrá mejores amigos que los que yo tuve, aunque nunca me agradó el nombre de Troles.

A mis hermanos, porque la vida es tan dura que necesitamos saber que hay alguien que está dispuesto a sacrificarse por ti. Cuando seamos viejitos nos vamos a acordar de lo que vivimos juntos.

A mis padres, porque un día invadí sus vidas y respondieron dándome su mejor herencia: educación. Lo que me alcance la vida para lograr será gracias a ustedes.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - ANTECEDENTES.....	8
OBJETIVO	7
1.1 Fibras ópticas láser	10
1.2 Polarización en fibras láser	14
1.3 Amplificadores semiconductores.....	17
1.4 Sistemas láser de fibra con amplificadores semiconductores.	20
CAPÍTULO 2 - LÁSER DE FIBRA EN ANILLO SINTONIZABLE	22
2.1 Arreglo experimental	24
2.2 Caracterización del arreglo: umbral, pérdidas y potencia de salida	26
2.2.1 Pérdidas en el arreglo.....	26
2.2.2 Umbral de operación.....	30
2.3 Sintonización.	34
2.3.1 Operación en modo Scan.	36
2.3.2 Modo Dither.....	38
2.4 Polarización y características espectrales.....	40
CAPÍTULO 3 - OPERACIÓN EN LONGITUDES DE ONDA MÚLTIPLES.....	46
3.1 Caracterización del filtro peine	48
3.2 Caracterización del filtro birrefringente.....	50
3.3 Emisión láser en longitudes de onda múltiples	57
3.4 Umbral de operación del láser en configuración 8	61

CAPÍTULO 4 - LÁSER SINTONIZABLE CON LONGITUDES DE ONDA MÚLTIPLES	67
4.1 Caracterización del arreglo	69
4.2 Sintonización del láser por polarización	77
4.3 Trayectorias de polarización durante la sintonización	86
CONCLUSIONES.....	96
ANEXO 1 – COMPORTAMIENTO DE LA POTENCIA DE EMISIÓN LÁSER POR LONGITUD DE ONDA	98
ANEXO 2	102
A.1 Especificaciones del SOA.....	102
A.2 Especificaciones del filtro Fabry Perot.....	104
A.3 Especificaciones del Sintetizador de Polarización	108
A.4 Especificaciones de la Fibra HB1500T	110
REFERENCIAS.....	111

OBJETIVO

El objetivo de esta tesis es implementar un arreglo experimental de láser de fibra óptica sintonizable, es decir, capaz de operar en múltiples longitudes de onda; estudiar los efectos de la polarización en la sintonización del láser de fibra y determinar los efectos de la fibra de alta birrefringencia en la obtención de múltiples longitudes de onda.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

En los últimos años ha surgido un interés en desarrollar sistemas láser de fibra óptica que emitan múltiples longitudes de onda. Las fuentes de luz con estas características son de gran relevancia debido a sus potenciales aplicaciones en las comunicaciones ópticas, sensores de fibra óptica y sistemas de medición ópticos [1].

Las fibras láser basadas en amplificadores ópticos semiconductores, o SOAs (*semiconductor optical amplifiers*) tienen ventajas en la emisión de múltiples longitudes de onda sobre otros tipos de amplificadores. Esto se debe sobre todo a las propiedades cuánticas de estos amplificadores, pues se comportan como medios no homogéneos, y esto les da la capacidad de amplificar varias longitudes de onda simultáneamente [2]. El uso de los SOAs en sistemas láser permite entonces producir emisión estimulada de radiación en varias longitudes al mismo tiempo [1].

Los avances tecnológicos en el desarrollo de los amplificadores semiconductores han llevado a fabricar dispositivos capaces de producir ganancia sobre un amplio ancho de banda. De esta manera, el empleo de SOAs ha permitido desarrollar sistemas láser sintonizables a lo largo de un ancho espectral considerable. Asimismo, ha permitido demostrar la existencia de sistemas láser que operan en múltiples longitudes de onda sobre un ancho de banda amplio sin utilizar arreglos demasiado complicados.

Se ha demostrado anteriormente la emisión láser en múltiples longitudes de onda con diversas técnicas [2]. En particular, recientemente se ha obtenido emisión láser sintonizable utilizando un arreglo basado en amplificadores semiconductores. Esto se ha logrado utilizando resonadores en anillo con fibras ópticas que mantienen la polarización (PMF, *Polarization Maintaining Fiber*) y otros dispositivos birrefringentes [2]. Sin embargo, aún no se han establecido las características fundamentales y los límites de operación que pueden obtenerse con este tipo de sistemas. Por ejemplo, los efectos espectrales de alterar la polarización de la luz generada dentro del anillo no han sido estudiados con detalle.

En este trabajo se construyó un sistema láser de fibra óptica con un amplificador semiconductor. Se estudiaron configuraciones sintonizables utilizando un filtro óptico ajustable, y también filtros ópticos birrefringentes capaces de transmitir múltiples longitudes de onda. Además de estudiar sus propiedades de polarización, se determinaron sus características espectrales y los parámetros adecuados para su operación en longitudes de onda múltiples.

1.1 Fibras ópticas láser

Un láser de fibra es, en principio, un convertidor de longitud de onda. Los sistemas láser se basan en materiales que emiten luz a través de procesos luminiscentes, resonadores ópticos y una fuente de energía externa. Este último elemento puede ser un campo eléctrico, una corriente eléctrica o incluso otra fuente de luz [1].

La acción láser es un proceso de amplificación coherente donde la ganancia se presenta como resultado de fotones estimulados que generan a su vez más fotones estimulados en cascada. El proceso inicial de estimulación es producido por un fotón de emisión espontánea.

Los materiales capaces de amplificar luz se conocen como materiales activos o materiales láser. Cuando los electrones de valencia del material se encuentran en equilibrio térmico, al interactuar con la radiación electromagnética, y si la energía de ésta es la adecuada, se produce el fenómeno de absorción, en el que un número determinado de átomos pasa a un estado superior de energía. Después, los átomos pueden regresar a su estado original a través de dos procesos de emisión radiante conocidos como emisión espontánea y emisión estimulada [3]. La emisión espontánea siempre tiene lugar cuando los electrones de una colección de átomos están en un estado excitado. La emisión estimulada es el proceso que permite que tenga lugar la acción láser; un fotón incidente sobre el medio, con una energía igual a la diferencia de energía fundamental y el estado excitado, promueve el decaimiento de un electrón y la creación de un fotón que está en fase con el fotón incidente. Por esta razón la luz producida en la emisión estimulada, presenta un grado de coherencia [4].

Para explicar cómo funcionan los láseres hay que entender primero cómo se produce la emisión de luz a nivel de los átomos. Los átomos poseen valores de energía definidos que se identifican como niveles de transición, los cuales pueden entenderse como una serie de escalones. Un electrón puede pasar de un nivel de energía a otro emitiendo o absorbiendo una unidad de luz, llamada fotón, con una energía igual a la diferencia entre los dos niveles de la transición.

Como se muestra en la figura 1.1, cuando un electrón se encuentra en un nivel de energía elevado, tiende a caer espontáneamente a un nivel de energía inferior y emitir luz como consecuencia de dicho evento, esto es lo que se llama emisión espontánea. Por otro lado, un fotón puede estimular la caída de un electrón a un nivel inferior si tiene una energía igual a la diferencia entre los dos niveles, en ese caso se emitirá un segundo fotón idéntico al que ha inducido la transición; esta es la llamada emisión estimulada [5].

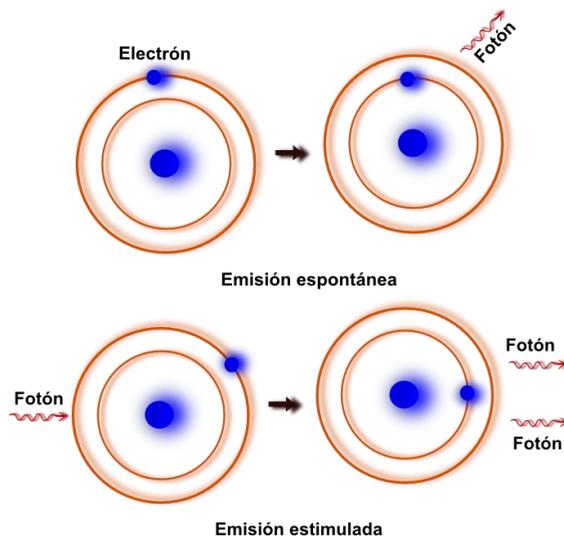


Figura 1.1 – Emisión espontánea y emisión estimulada.

.La absorción de energía genera en el material una condición conocida como inversión de población, término que indica que la población de electrones en el material se encuentra fuera del estado de equilibrio ya que presenta un número mayor de electrones en el nivel de energía superior que en el inferior. Para obtener la inversión de población es necesario llevar a los electrones a un nivel más elevado de energía, razón por la cual, el proceso de excitar el material láser se conoce como bombeo. El bombeo de electrones se logra mediante el suministro de energía externa al material y el tipo de energía requerido para esto depende de las características del material mismo [3].

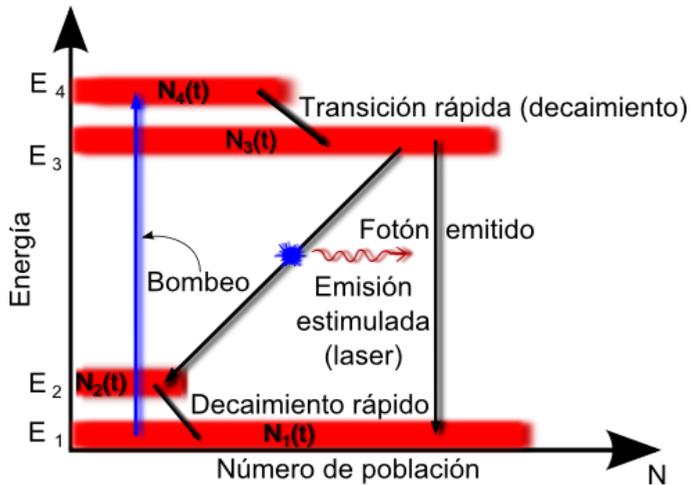


Figura 1.2 – Niveles de energía en un material láser. En el esquema se indican las transiciones electrónicas relevantes para obtener emisión láser.

La figura 1.2 muestra un esquema de los niveles de energía de un material láser de cuatro niveles. Para producir acción láser, debe aportarse energía al sistema. En tal caso habrá más electrones en el nivel de energía E_3 que en el nivel fundamental E_1 . Los electrones son bombeados desde el nivel E_1 hasta el nivel de energía E_4 y permanecen en este nivel un tiempo y decaen a un nivel de energía metaestable E_3 . Si el tiempo de vida del nivel de energía E_3 es amplio, muchos electrones permanecerán en él. Si el bombeo es suficientemente fuerte, se habrá producido una inversión de población, y se podrá producir la acción láser.

El material se debe bombear con un nivel de energía más alto que el nivel de acción láser superior. En otras palabras, los fotones del láser tienen una longitud de onda más larga que los fotones de bombeo. Un rasgo característico de la acción láser es ser un proceso con un umbral distintivo. Cuando se bombea por debajo de la potencia de umbral, la salida es incoherente y espontánea. Cuando se bombea encima del umbral, se produce un estrechamiento espectral y hay una salida de efecto láser que es directamente proporcional a la potencia de entrada de la bomba [4].

Otro elemento importante en un sistema láser es el resonador, que se construye en su forma más simple al colocar dos espejos paralelos entre sí. De esta forma, se da oportunidad de establecer las condiciones de resonancia, y con ellas la ganancia. Es posible considerar que los fotones del láser hacen muchas idas y vueltas en la cavidad, logrando la creación de más fotones estimulados cuando lo hacen, antes de que finalmente salgan a través del espejo de salida. La acción láser se llevará a cabo preferentemente en las frecuencias que satisfacen la condición de resonancia.

De manera general, los dos principales tipos de amplificadores ópticos utilizados en sistemas láser de fibra óptica son: los SOAs (*Semiconductor Optical Amplifiers*) y los DFAs (*Doped-Fiber Amplifiers*). En los SOAs el medio luminiscente se obtiene con combinaciones de elementos semiconductores como el fósforo, el indio, el galio y el arsénico. En los DFA es un núcleo de fibra óptica dopada con iones de tierras raras como el Erblio (Er), el Praseodimio (Pr), el Iterbio (Yb) o el Neodimio (Nd).

La región espectral de ganancia obtenida con estos amplificadores se extiende sobre la gama de frecuencias para las que la amplificación, supera las pérdidas debidas a la absorción, dispersión y las reflexiones parásitas. Esta condición depende directamente del material y su estructura.

1.2 Polarización en láseres de fibra

Los láseres de fibra tienen una amplia variedad de aplicaciones en las que las características de polarización son de suma importancia. Además de su utilidad como fuentes de luz para comunicaciones y aplicaciones médicas, han demostrado ser útiles como sensores polarimétricos para la medición de tensión, temperatura y corriente. En todos estos casos, las características de polarización del láser de fibra tienen que ser conocidos y controlados para evitar efectos espurios en el rendimiento del sistema [4].

La polarización de la luz está determinada por la variación con el tiempo de la dirección del vector de campo eléctrico $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$. Para la luz monocromática, los tres componentes espaciales de $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ varían sinusoidalmente en el tiempo con amplitudes y fases que son generalmente diferentes, así que a cada posición \mathbf{r} , la punta del vector $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ se mueve en un plano y traza de manera general una elipse. El plano, la orientación y la figura de la elipse típicamente varían con la posición. Cuando la elipse se convierte, figura 1.3, en una línea recta o en un círculo, se dice que la onda está polarizada linealmente o circularmente, respectivamente [6].

Cuando un haz se refracta en la superficie de un cristal anisotrópico, el ángulo de refracción depende de la dirección. Debido a que el medio anisotrópico soporta dos modos con dos diferentes velocidades de fase, un haz de luz no polarizada se puede dividir en dos haces con diferentes direcciones y diferentes polarizaciones al golpear las superficies del material. A este efecto se le conoce como doble refracción o birrefringencia, y se presenta cuando el medio tiene un índice de refracción diferente para cada dirección dentro del material [6].

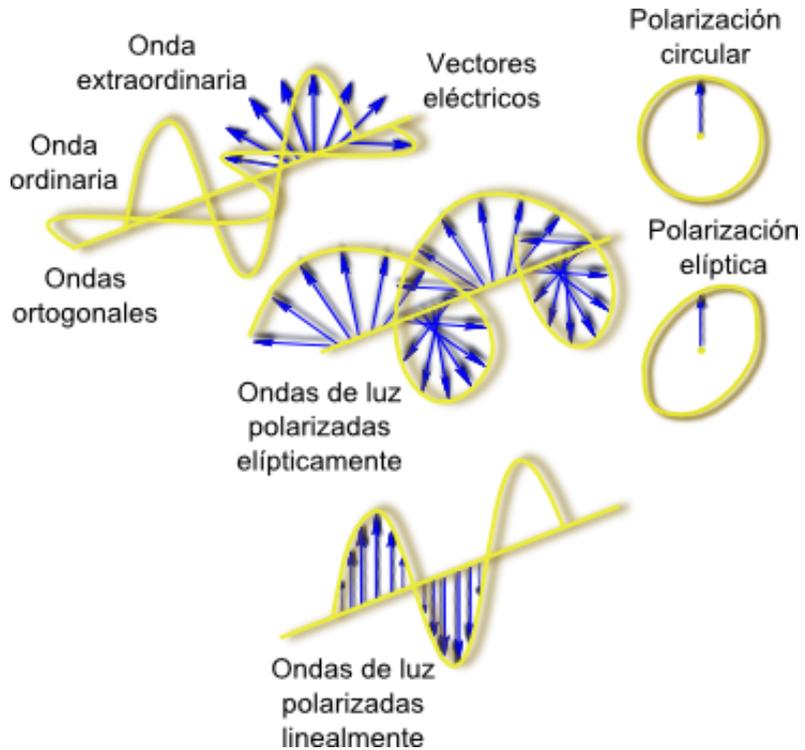


Figura 1.3 – Polarización de la luz

El origen de las propiedades de polarización de los láseres de fibra monomodo se relaciona con las características de birrefringencia de la fibra. Los dos estados propios de polarización del modo fundamental que presenta la fibra tienen estados ortogonales de polarización (SOP), y en una fibra activa se comportan como dos canales de acción láser con parámetros específicos de frecuencia, umbral de operación, y pendiente de eficiencia [7].

En general, los cambios en la birrefringencia de la fibra por perturbaciones externas puede modificar la longitud de onda de resonancia del resonador, y las amplitudes relativas entre oscilaciones láser puede fluctuar. El uso de fibras con baja birrefringencia (Low-Bi) produce características de polarización que pueden ser fácilmente modificadas por medio de controladores de polarización (PC), mientras que las fibras con alta birrefringencia (Hi-Bi) presentan características de polarización más estables [8].

Además, puesto que las propiedades de polarización del láser de fibra también dependen de la orientación de la polarización de la luz de bombeo con respecto a los estados propios de polarización de la fibra, es posible obtener una sola polarización monomodal, así como salidas de doble longitud de onda con doble polarización en un láser de fibra [7].

1.3 Amplificadores semiconductores

La mayoría de los amplificadores ópticos amplifican la luz incidente a través de la emisión estimulada, el mismo mecanismo utilizado por el láser. La estructura de un SOA es muy similar a la de un láser semiconductor pero sin la realimentación que hace que éste oscile. Según cómo se evite esta oscilación se tienen tres subtipos de amplificadores [9].

- **Amplificadores de enganche por inyección**
- **Amplificador Fabry-Perot (FP)**
- **Amplificador de onda viajera (*TWSLA, Travelling Wave SLA*).**

En el amplificador TWLSA se eliminan las reflectividades de los espejos de salida de la cavidad, evitando así la realimentación de la señal, por lo que la amplificación se produce por el paso de la señal una sola vez por el dispositivo.

El ancho de banda de la ganancia en un amplificador óptico, figura 1.4, se define como la anchura total a la mitad de la máxima potencia o FWHM (*full width at half maximum*) del espectro de ganancia G . En otras palabras, es el ancho en Hertz o bien, unidades de longitud de onda que existen desde el punto donde se obtiene el mayor pico hasta donde la potencia cae 3 decibeles.

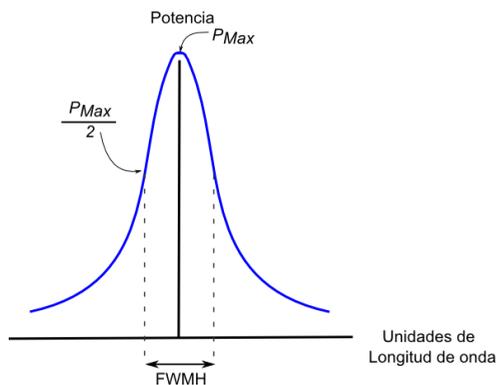


Figura 1.4 – Descripción gráfica del ancho de banda de ganancia.

El factor de amplificación de los SOAs es dependiente de la frecuencia, principalmente la dependencia de la frecuencia con las propiedades de ganancia propias del material. La ganancia del amplificador presenta ondulaciones que reflejan los efectos de las reflectividades de etapas residuales, los cuales se muestran en la figura 1.5 [10].

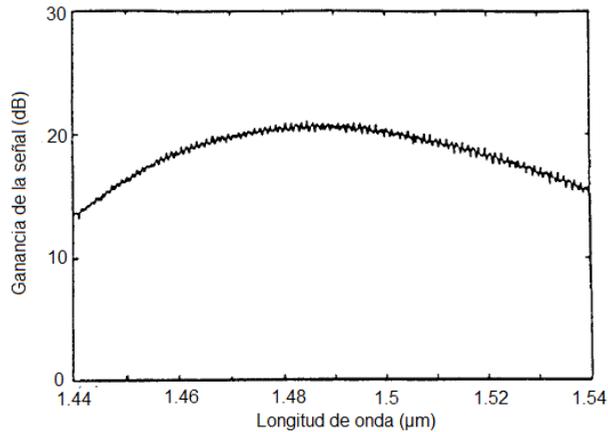


Figura 1.5 – Ganancia del amplificador semiconductor en función de la longitud de onda y su efecto de rizo [10].

Una característica importante de los SOAs es su sensibilidad a la polarización. La ganancia del amplificador puede variar para los modos transversales eléctricos y magnéticos (TE, TM) hasta por factores de 5 a 8 dB. Esto se debe a que tanto la ganancia como el efecto de rizo en la amplificación son diferentes para los dos modos ortogonalmente polarizados [10]. Esta característica hace que la ganancia del amplificador sea sensible al estado de polarización del haz de entrada, una propiedad indeseable para los sistemas de ondas de luz en la que el estado de polarización presenta cambios de polarización con la propagación a lo largo de la fibra (a menos que se utilicen fibras que mantengan de polarización o PMF).

Aunque los SOAs se pueden utilizar para amplificar varios canales simultáneamente, sufren de un problema fundamental relacionado con su respuesta relativamente rápida. Idealmente, la señal de cada canal debe ser amplificada por el mismo factor. En la práctica, varios fenómenos no lineales en los SOAs inducen diafonía entre canales, una característica indeseable que debe reducirse al mínimo para sistemas prácticos de onda de luz.

1.4 Sistemas láser de fibra con amplificadores semiconductores

Al igual que otros sistemas de láser, los láseres semiconductores están hechos de un material que genera y amplifica la radiación ofreciendo ganancia. Normalmente, en el caso de un láser semiconductor, este material es un semiconductor compuesto de dos o más elementos. Actualmente el material más común es GaAs. En un láser semiconductor, la capa para la generación de la luz es sólo aproximadamente 3 a 10 nm de espesor [8].

Un láser semiconductor se hace funcionar mediante la inyección de portadores en el pozo de potencial del material a un nivel de alta energía mediante la aplicación de una tensión eléctrica. Cuando los electrones caen en un nivel inferior, la luz se genera. Debido a la retroalimentación positiva, la luz en la cavidad del láser se amplifica y se inicia la emisión estimulada.

Entre las principales ventajas de un SOA contra los amplificadores a base de fibras dopadas (*DFAs*) se puede mencionar la capacidad de amplificar simultáneamente varias longitudes de onda. En estudios se ha demostrado que la ganancia de los SOA, y con ella la potencia de los múltiples canales que puedan ser amplificados por ellos; no varía con el número de canales o longitudes de onda [11].

El espectro de ganancia de un amplificador de fibra dopada de Erbio (*EDFA*) típicamente abarca desde 1525 hasta 1565 nm, las propiedades espectrales de un SOA están determinadas por la composición del semiconductor, para un SOA el espectro de amplificación puede variar desde 1200 a 1650 nm [11].

El espectro de ganancia no es la única diferencia entre las *EDFAs* y los dispositivos semiconductores, los SOAs son dispositivos extremadamente pequeños, del orden de unos cuantos milímetros comparados contra una *EDFA* con dimensiones de varios metros. Las dimensiones típicas de un amplificador *EDFA* son de 45x70x12 mm contra un SOA que llega a medir 30x12.5x12.5 mm [11].

Otra importante diferencia se encuentra en la capacidad de los láseres de emitir en una polarización única, mientras que los SOAs son capaces de amplificar señales de entrada independientemente de la polarización que presenten [11].

En el siguiente capítulo se hablará de la caracterización de un láser en anillo, amplificador de onda viajera, basado en un SOA. Se muestran algunas de las propiedades mencionadas en esta introducción.

CAPÍTULO 2

LÁSER DE FIBRA EN ANILLO SINTONIZABLE

Los resonadores más utilizados en la elaboración de láseres de fibra son el Fabry–Perot y el de configuración de anillo. El primero consta de dos espejos planos paralelos entre sí y es quizás el más utilizado en sistemas láser. El resonador en anillo se conoce también como resonador de onda viajera, pues la luz recorre trayectorias cerradas definidas por tres o más espejos. Para sistemas láser de fibra óptica, los resonadores en anillo se implementan también utilizando acopladores de fibra óptica.

La respuesta en frecuencia de un resonador Fabry-Perot, es periódica. La intensidad del haz a la salida del resonador es alta cuando se cumplen las condiciones de resonancia y relativamente baja cuando ocurre lo contrario.

Los resonadores de anillo tienen una respuesta similar, aunque en el caso de resonadores de fibra óptica, las propiedades espectrales del acoplador determinan también las características del espectro de transmisión.

Los acopladores basados en fibra óptica funcionan como dispositivos direccionales para separar o combinar señales guiadas en las fibras (figura 2.1). Los acopladores más utilizados se conocen como acopladores fusionados, pues se fabrican mediante un proceso de calentamiento y estirado de dos o más fibras ópticas. Típicamente, un acoplador tiene dos fibras de entrada y dos fibras de salida, y el

acoplamiento entre las fibras se logra cuando los núcleos se encuentran muy cercanos entre sí. La luz que viaja por una de las fibras de entrada (puerto 1), emerge del dispositivo dividida de manera que una porción (K) es acoplada a una de las fibras de salida (puerto 3), y la porción restante ($1 - K$) sale por la fibra restante (puerto 4). El factor K se conoce como coeficiente de acoplamiento, y puede tomar valores entre cero y la unidad. Este coeficiente de acoplamiento queda determinado por características tales como la proximidad de los núcleos, la longitud de la interacción entre ambas fibras y la longitud de onda de la luz incidente.

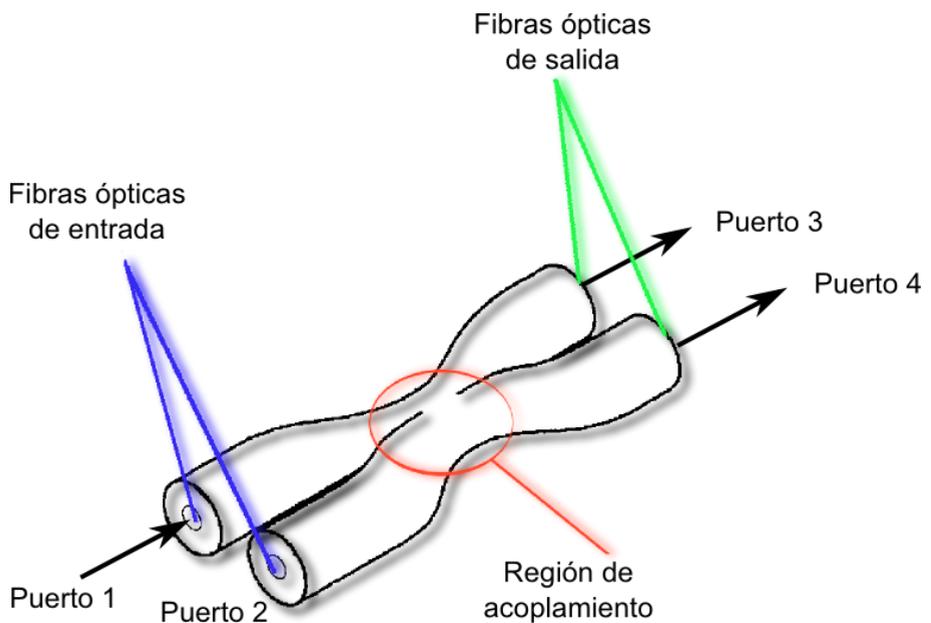


Figura 2.1 – Diagrama de un acoplador basado en fibra óptica.

Es posible implementar un resonador en anillo utilizando acopladores basados en fibra óptica, como se mostrará en la figura 2.1, donde una de las salidas permite muestrear la señal confinada dentro del resonador para su monitoreo y medición; mientras que el resto de la señal se mantiene dentro del arreglo para realimentar el resonador. Los experimentos que este capítulo reporta, se obtuvieron a partir de un resonador en anillo sintonizable utilizando un acoplador de fibra óptica.

2.1 Arreglo experimental

En este experimento se utilizó una configuración de láser de fibra en anillo, y en términos generales, se empleó un arreglo como el que se muestra en la figura 2.1. Se utilizó un amplificador semiconductor como medio de ganancia, un aislador de fibra óptica que permite la transmisión de luz únicamente en una dirección y evita también posibles reflexiones hacia el amplificador. El sistema láser puede sintonizarse mediante un filtro Fabry-Perot controlado con señales eléctricas, y la señal de salida se obtiene con un acoplador 90/10 de fibra óptica colocado dentro del anillo.

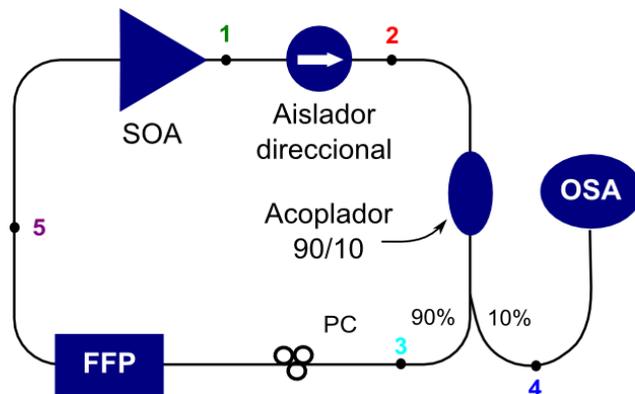


Figura 2.1 – Láser configuración anillo basado en filtro Fabry-Perot.

El filtro Fabry-Perot tiene la función de hacer sintonizable al arreglo láser. El espectro de transmisión del filtro puede ajustarse mediante una señal eléctrica, ya que el dispositivo incluye un elemento piezo-eléctrico. Al ajustar el voltaje alimentado al piezo-eléctrico se ajusta la separación entre los espejos del filtro y con ello la longitud de onda del arreglo láser.

El filtro sintonizable Fabry-Perot (FFP) tiene dos modos de operación: *Scan* y *Dither*, que permiten seleccionar una longitud de onda inicial y mantenerla fija, respectivamente; estos modos de operación se describirán más adelante. El controlador de voltaje del FFP (Figura 2.3) permite ajustar tanto la amplitud como la frecuencia de la señal suministrada al dispositivo. La amplitud de la señal está relacionada con el cambio en longitud de onda y el la frecuencia indica la velocidad de barrido en las longitudes de onda.

El amplificador semiconductor (SOA) utilizado en los experimentos es marca Thorlabs, modelo SOA 1013-0-0-T-S-S-A-A. La ganancia típica proporcionada por el amplificador es de 19 dB a una corriente de 500 mA. La corriente suministrada al SOA se controla mediante un controlador de corriente y temperatura ILX-Lightwave, modelo LDC-3724B. Con este equipo se puede mantener la temperatura del semiconductor en el valor especificado por el fabricante (24°C), y permite también limitar la corriente máxima que se alimenta al SOA (500 mA).

El acoplador de fibra óptica incorporado al anillo se utiliza para obtener la señal de salida del resonador. Este dispositivo envía el 10% de la luz hacia los sistemas utilizados para detección y análisis de la señal láser. El restante 90% de la señal se hace pasar por el FFP sintonizable y nuevamente pasa hacia el amplificador semiconductor.

Para analizar la señal láser se usa un analizador de espectros óptico (OSA); el modelo utilizado es un *Agilent 861405B*, con un rango de operación espectral de 600 a 1700 nm, resolución de hasta 0.06 nm y una sensibilidad ajustable hasta -90 dBm. Para algunos experimentos se utilizó también un fotodiodo pin con 1 GHz de ancho de banda, y en otros casos se utilizó también un analizador de polarización. Las características de estos elementos se indican más adelante. De manera general, todas las fibras ópticas utilizadas en el láser de anillo son monomodales estándar (Corning, smf28e) con diámetros de revestimiento de 125 micras. Para algunos experimentos se utilizaron también fibras ópticas de alta birrefringencia; en estos casos, las características de estas fibras se especifican en la sección correspondiente.



Figura 2.2 – Filtro Fabry-Perot (izquierda) y su controlador (derecha).

2.2 Caracterización del arreglo: umbral, pérdidas y potencia de salida

2.2.1 Pérdidas en el arreglo.

Las pérdidas ópticas dentro de un sistema láser determinan características importantes de su funcionamiento. Por esta razón, para la caracterización inicial del arreglo de la figura 2.1 se registraron las pérdidas dentro del

resonador en anillo. Para lograr esto se obtuvieron mediciones espectrales de potencia a la salida de cada uno de los dispositivos utilizados en el arreglo, esto es:

1. Salida del amplificador.
2. Salida del aislador.
3. Salida 90% del acoplador (sin filtro).
4. Salida 10% del acoplador (sin filtro).
5. Salida del arreglo láser (con filtro).

La señal de salida del amplificador, aislador y el acoplador únicamente se diferencian entre sí por el espectro de potencia, es decir que mantienen el mismo ancho de banda y frecuencia. Esto se debe a que la transmitancia de estos dispositivos no presenta una dependencia espectral importante en el rango de operación del SOA.

En la figura 2.5 se muestra una emisión láser típica del arreglo mencionado, se puede apreciar cómo los picos de transmisión láser son periódicos, siendo la separación entre dos picos consecutivos lo que se conoce como Rango espectral libre o FSR (Free Spectral Range), característico de los filtros FFP. En un filtro Fabry Perot, el FSR es, en términos generales, el intervalo de longitudes de onda en que se tiene la mínima transmitancia, este rango es ajustado en el controlador cuando se modifica el voltaje que se aplica al filtro. En este caso, el FSR es de 86 nm.

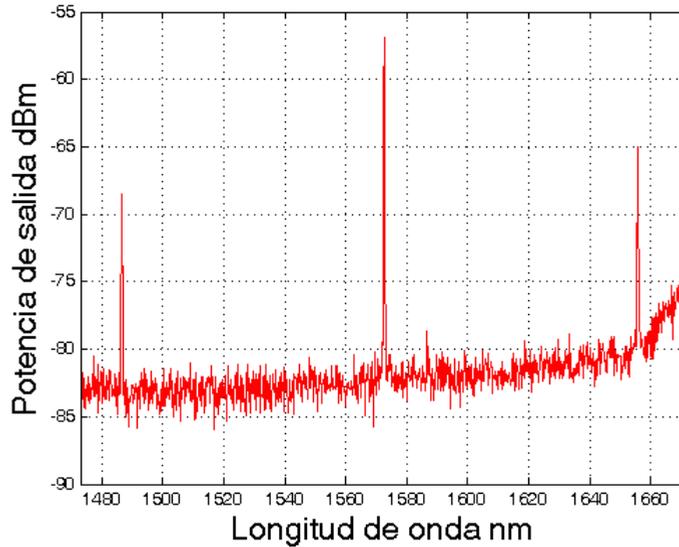


Figura 2.3 – Emisión láser típica del arreglo, la separación entre las líneas de emisión se deben al FSR del filtro.

Las pérdidas registradas a la salida de cada dispositivo pueden calcularse utilizando la Figura 2.6. Las pérdidas en el aislador son de 2.4 dB (aproximadamente 42%), mientras que los puertos de 90% y 10% en el acoplador implican una caída en potencia de 1.54 dB y 9.44 dB, respectivamente. Es natural encontrar que en la práctica los puertos no extraen con exactitud 90% y 10%, en este experimento los valores reales fueron 71.38% y 8.07% para cada puerto. La diferencia de 4.17 dB (20.55%) se debe a las pérdidas por inserción provocadas por los conectores de las fibras.

La amplitud de la señal a la salida del filtro decae significativamente, y el ancho espectral se reduce mostrando la gran selectividad del FFP. El ancho espectral a la salida del filtro es de aproximadamente 1 nm, y las pérdidas de transmisión en el filtro son despreciables. Es importante mencionar que las posibles pérdidas se deben sobre todo a los empalmes realizados en las fibras de entrada y salida del FFP. Estas no deben rebasar los valores especificados por el fabricante (1.5 dB) si se utiliza un filtro con los conectores adecuados. Las pérdidas del arreglo son las que determinan el umbral de operación del láser, umbral en el que la ganancia del SOA es suficiente para compensar las pérdidas del arreglo.

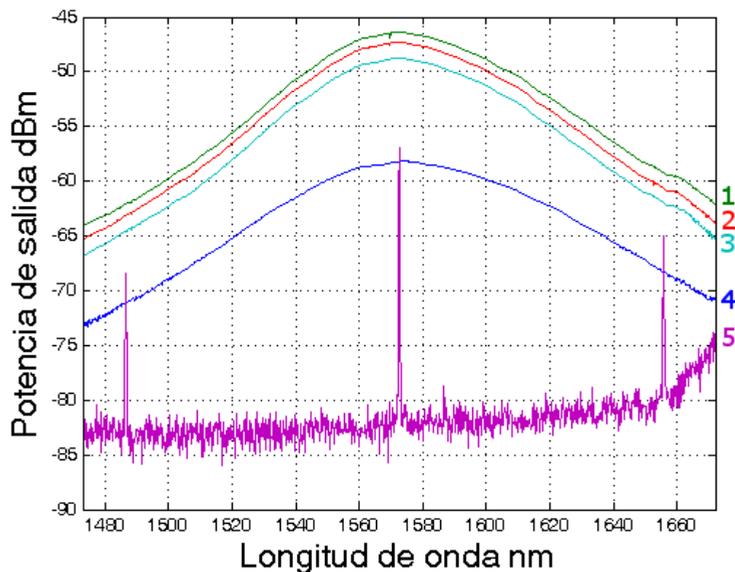


Figura 2.4 – Espectro en cada etapa del arreglo experimental. Se observan las pérdidas entre las distintas etapas del arreglo, no se presenta distorsión

Resolución: 0.1 nm.

A la salida del filtro se obtiene una salida láser de 1 nm de ancho con el costo de perder más de 10 dB en potencia en discriminar longitudes de onda no deseadas.

Punto de medición	Potencia dBm	Pérdidas dB
1	-46.38	-
2	-47.32	0.94
3	-48.77	2.39
4	-58.22	11.84
5	-56.94	10.56

Tabla 2.1 – Relación de pérdidas entre las etapas del arreglo, mencionadas en la figura 2.1, para una longitud de onda de 1573 nm.

En la figura 2.4 se observan las pérdidas en cada una de las etapas del arreglo mencionadas arriba, de acuerdo con la tabla 2.1 existe una pérdida de 10.54 dB entre la salida del filtro y la salida del amplificador, esto sí debe ser considerado una pérdida, puesto que se debe compensar de alguna forma con la ganancia del amplificador. Siempre debe existir esta condición para extraer energía del láser.

2.2.2 Umbral de operación.

La tabla 2.1 muestra la potencia obtenida en el láser de salida cuando se manipula la corriente que se suministra al SOA, se puede observar en ella que la respuesta es causal y lineal, esto es: la potencia que entrega el SOA en la salida aumenta de manera proporcional conforme aumenta la corriente en el mismo y no hay factores externos que la modifiquen.

Para determinar el umbral de operación del arreglo láser se obtuvieron mediciones de potencia de salida en función de la corriente suministrada al SOA. El rango de corrientes para las cuales se obtuvieron datos fue de 120 mA a 480 mA. Se sabe que la relación entre la potencia de salida de un sistema láser y la energía de bombeo (en este caso la corriente) debe ser lineal; de esta manera, al obtener esta relación de manera experimental es posible estimar el umbral del láser mediante un ajuste lineal.

Corriente de Bombeo [mA]	Potencia en la salida 10% [dBm]	Potencia en la salida 10% [mW]
480	3.41	2.193
470	2.95	1.972
460	2.82	1.914
450	2.72	1.871
440	2.63	1.832
430	2.5	1.778
420	2.39	1.734
410	2.25	1.679
400	2.11	1.626
390	1.95	1.567
380	1.81	1.517
370	1.65	1.462
360	1.49	1.409
350	1.29	1.346
340	1.12	1.294
330	0.96	1.247
320	0.75	1.189
310	0.54	1.132
300	0.29	1.069

Corriente de Bombeo [mA]	Potencia en la salida 10% [dBm]	Potencia en la salida 10% [mW]
290	0.03	1.007
280	-0.21	0.953
270	-0.48	0.895
260	-0.82	0.828
250	-1.17	0.764
240	-1.54	0.701
230	-1.95	0.638
220	-2.39	0.577
210	-2.93	0.509
200	-3.51	0.446
190	-4.18	0.382
180	-5.09	0.310
170	-6.1	0.245
160	-7.54	0.176
150	-9.51	0.112
140	-12.53	0.056
130	-26.82	2.08E-03
120	-46.87	2.06E-05

Tabla 2.2 – Potencia de salida del sistema láser en función de la corriente suministrada al SOA

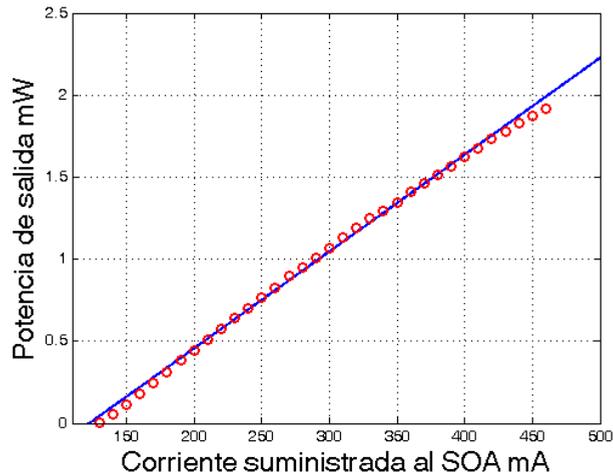


Figura 2.5 – Potencia de salida láser en función de la corriente suministrada al SOA. Los círculos representan los resultados experimentales y la recta corresponde al ajuste lineal de los datos obtenidos.

La curva de potencia de salida en función de la corriente aplicada al amplificador se muestra en la Figura 2.5. El ajuste lineal de los puntos experimentales genera una ecuación característica de la forma $P_{\text{láser}} = 0.0059 I_{\text{SOA}} - 0.7239$, de tal manera que la ordenada al origen de la curva es de 122.7 mA. Este valor representa la corriente de umbral del láser, y fue obtenido con el filtro sintonizado a una longitud de onda de 1572 nm. La potencia máxima de salida obtenida, 3.41 dBm, se presentó al administrar la máxima corriente al dispositivo; de igual manera la potencia más baja, -46.87 dBm, se obtuvo con la mínima corriente en el SOA. Las variaciones de este parámetro en función de la longitud de onda se comentarán en la siguiente sección.

2.3 Sintonización.

La sintonización del arreglo láser está determinada por las características del FFP. Aunque el ancho espectral del SOA es bastante amplio, es la combinación del filtro con el resto de los dispositivos del resonador lo que finalmente determina el rango de operación del sistema láser. Esto se debe a que el umbral de operación puede variar con la longitud de onda, de tal forma que para algunas regiones espectrales la ganancia del SOA puede no ser suficiente como para superar las pérdidas del resonador.

La sintonía del láser se caracterizó tomando lecturas de la potencia de salida en función de la longitud de onda. También se registró la longitud de onda de emisión en función del voltaje aplicado al FFP.

Para evaluar las variaciones en la potencia de salida se realizaron 625 mediciones de potencias de salida en función de la longitud de onda que fueron registradas en 4 intervalos dentro del rango de operación del filtro. El resultado, mostrado en la figura 2.6, indica que la ganancia en función de la longitud de onda es mayor para las longitudes entre 1500 y 1540 nm, con potencias de salida de hasta 2.54 dBm. En el rango de 1580 a 1600 nm se obtuvieron las menores potencias de salida, donde además se encuentran variaciones importantes entre las series de mediciones. Esto se debe principalmente a que para la ventana de 1580 a 1600 nm la ganancia del SOA no es uniforme. Hay que considerar también que las pérdidas del FFP varían también en función de la longitud de onda.

Los resultados mencionados implican que para la ventana baja, 1500 a 1540 nm, el umbral de operación se encuentra en una posición más baja que para la ventana alta (1580 a 1600 nm), es decir, que para la ventana baja es posible obtener emisión láser suministrando menor cantidad de corriente al SOA.

La gráfica de longitud de onda en función del voltaje aplicado al filtro se muestra en la figura 2.7. Como puede verse, se obtienen 4 rectas en cinco rangos de voltajes diferentes. Esto ocurre debido a que el rango espectral libre (*FSR*) está siendo desplazado con las variaciones de voltaje hasta un punto en que se alcanza un mismo punto en longitud de onda con respecto a donde se inició el barrido.

Para cada caso se obtuvo un ajuste lineal de los puntos experimentales y la pendiente más pronunciada fue para el rango 27.68 a 39.9 V, con un valor de 32.38 nm. Esto sucede porque, para esta región, la respuesta del filtro a los cambios de voltaje es más sensible.

Es importante hacer notar que la región con mayor pendiente está ubicada en voltajes superiores a 40 V que indica que en esta zona la sensibilidad de la longitud de onda es mayor que la que se presenta con voltajes inferiores.

2.3.1 Operación en modo Scan.

Este modo funciona ajustando el voltaje aplicado al interferómetro Fabry-Perot para seleccionar la longitud de onda de operación del filtro. Al utilizar la perilla de frecuencia y realimentar el controlador del filtro con la señal del anillo se logra un ajuste más fino al filtro.

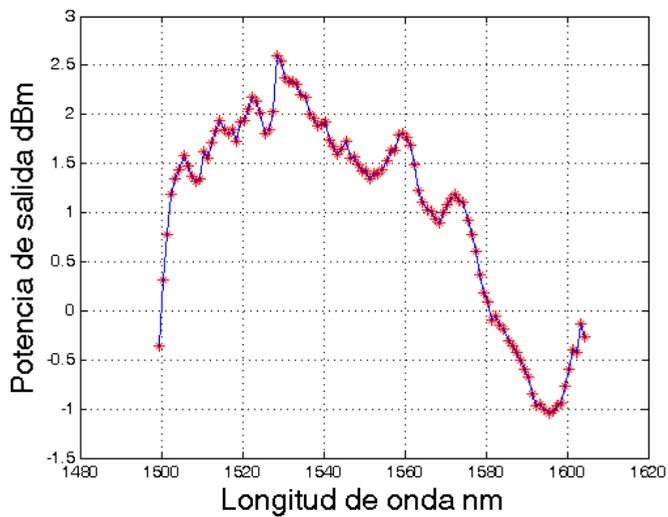


Figura 2.8 – Potencia de salida del láser contra la longitud de onda de emisión

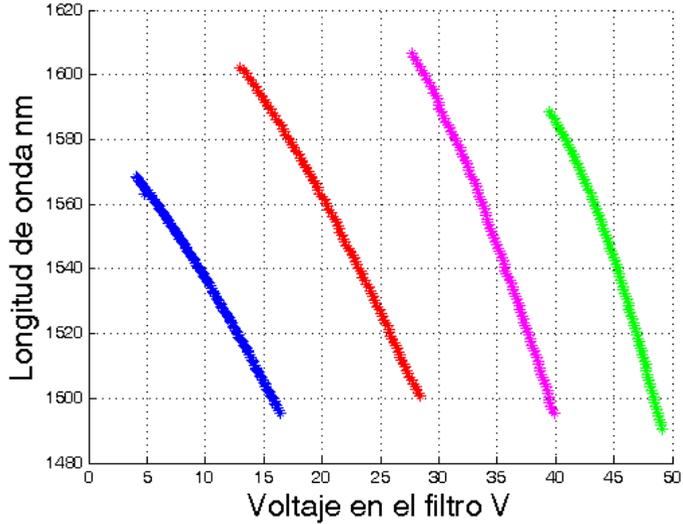


Figura 2.9 – Longitud de onda contra voltaje en el filtro. Los saltos en la curva se deben al FSR del filtro.

Esta forma de operación del filtro no es capaz de mantener fija la longitud de onda de resonancia, con el tiempo la longitud de onda cambia significativamente. Esto se debe principalmente a la estabilización del filtro y el cambio en la temperatura de operación del filtro.

Para conocer el detalle de cuánto se desvía la longitud de onda con el paso del tiempo se midió la longitud de onda en un tiempo inicial y se monitoreó cada 10 segundos el cambio en la longitud de onda del láser.

La caracterización muestra que la desviación en longitud de onda es de 0.0022 nm/s hacia abajo, esto significa que en cada muestra se movió 0.022 nm y que para cuando hayan transcurrido 8 minutos se habría desviado más de 1 nm.

2.3.2 Modo Dither.

El modo *Dither* del controlador sirve para ajustar la frecuencia de resonancia del filtro y mantenerla dentro de un rango deseado, mediante el control automático del voltaje, se muestra un diagrama en la figura 2.8. Los resultados de este modo pueden optimizarse por medio de la realimentación en el controlador.

La forma de utilizar este modo de operación es ajustar la longitud de operación con el voltaje mientras el indicador *unlock* está activo, una vez seleccionada la longitud de onda se asegura con el botón *lock*. La perilla de frecuencia sirve para ajustar el margen de corrimiento que se desea mantener.

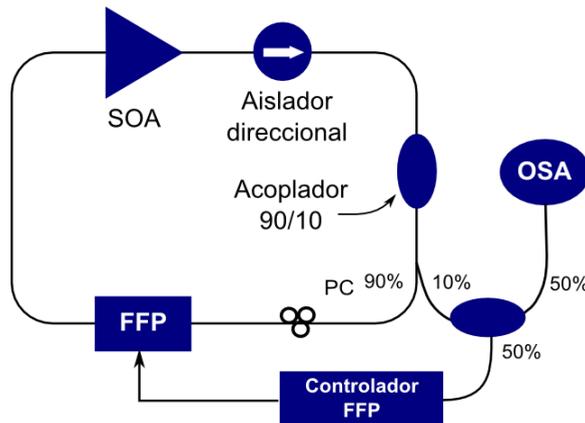


Figura 2.8 – Configuración con realimentación al controlador para modo *Dither*.

Para evaluar la estabilidad del filtro cuando trabaja dentro de este modo, se realizó la misma prueba de longitud de onda en función del tiempo empleada en el modo *Scan*. Se tomó registro de la longitud de onda del láser en un tiempo inicial, la cual fue 1603.828 nm, con repeticiones cada 10 segundos durante 6 minutos. Al final de la evaluación la desviación promedio fue de 0.0299 nm, o bien, 0.000004 nm hacia arriba cada 1 s.

Al comparar las figuras 2.9 y 2.10 se observa que el modo Dither permite un control significativo de la longitud de onda de resonancia en el filtro, lo que permite que el arreglo láser tenga mayor estabilidad frente a los cambios de temperatura.

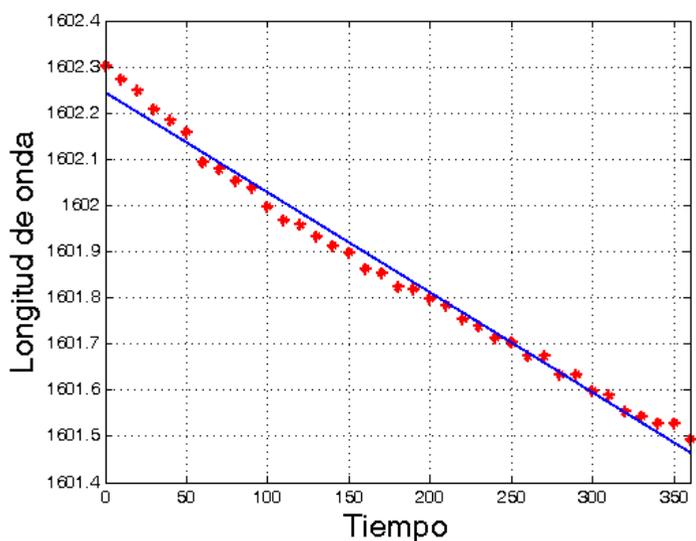


Figura 2.9 – Sintonización en modo *Scan*. La ecuación de la recta de ajuste lineal es $\lambda = -0.002165 t + 1602.243 \text{ nm}$.

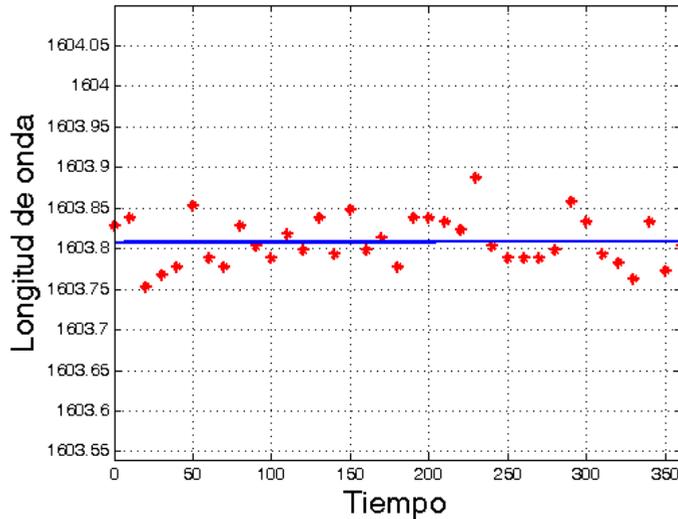


Figura 2.10 – Sintonización en modo Dither. La ecuación de la recta de ajuste lineal es $\lambda = 4.149 \times 10^{-6} t + 1603.808 \text{ nm}$.

2.4 Polarización y características espectrales.

Siendo la luz un tipo de radiación electromagnética, posee tanto campo eléctrico como campo magnético y es precisamente su campo eléctrico el que produce el fenómeno de la polarización. Para determinar la forma completa del estado de polarización de un haz de luz, bien sea natural o parcialmente polarizado, son necesarios tres parámetros independientes.

A estos parámetros se les llama parámetros de Stokes y son utilizados con el propósito de poder describir en forma matemática la luz parcialmente polarizada. Constan de cuatro parámetros que determinan por completo la elipse de polarización. Estos parámetros están definidos en términos de θ y φ que son los ángulos que describen su posición en la esfera de Poincaré.

Un punto importante en la caracterización del láser fue conocer la respuesta de la sintonización cuando se ajusta la polarización de la luz que circula por el mismo. Por medio del Sintetizador de Polarización (PSY) Polaflex 101 y su controlador por computadora Synthesizer Polaview es posible llevar a cabo el monitoreo y control de la polarización de la luz en la fibra óptica mediante la asignación de los parámetros de Stokes o la ubicación en la esfera de Poincaré. El ajuste de la polarización también es posible utilizando controladores mecánicos de polarización dentro del arreglo, en adelante PC.

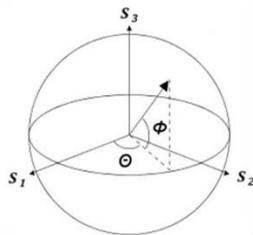


Figura 2.11 – Esfera de Poincaré.

Se observaron las variaciones en la polarización de la luz cuando se modifica la corriente del amplificador semiconductor. Las corrientes utilizadas para estos experimentos fueron de 150, 200, 250, 350 y 450 mA. Como resultado se observó que existe mayor estabilidad en la polarización cuando la corriente es menor, es decir, para 150, 200 y 250 mA y se pierde estabilidad cuando la corriente corresponde a 350 y 450 mA.

El experimento también se realizó para las polarizaciones circular, lineal y elíptica, con los mismos resultados, siendo la polarización circular y lineal donde se observa mayor estabilidad.

En la figura 2.12 se observa que al aumentar la corriente del amplificador, la polarización tiende a la linealidad. Esto se debe a que la señal está compuesta por varias polarizaciones y aunque no son discriminadas por el amplificador, este sí beneficia de manera distinta a las diversas polarizaciones debido al comportamiento de la región activa del SOA.

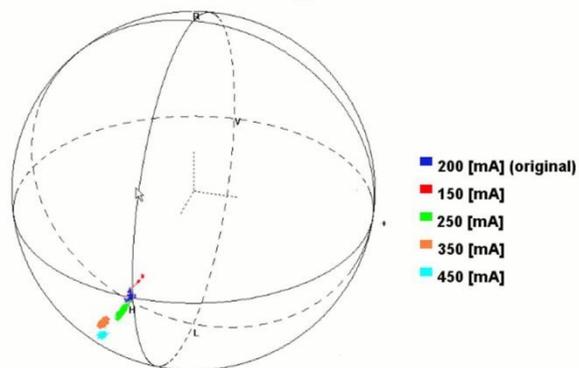


Figura 2.12 – Cambio de la polarización con la corriente en el SOA.

Imaginemos a la región activa como en la figura 2.13, un área dentro del material que cambia de dimensiones en función de la corriente suministrada al SOA. Al aumentar la corriente en el SOA, la región de amplificación no cambia de manera uniforme, por esta razón ciertas polarizaciones son beneficiadas con el cambio de corriente.

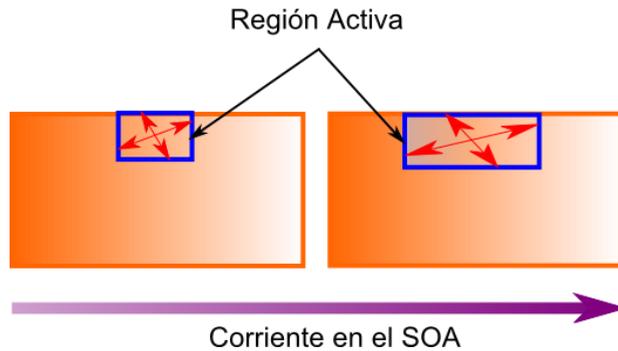


Figura 2.13 – El cambio de corriente provoca un ensanchamiento de las componentes de polarización lineal

Otro fenómeno observado, figura 2.14, fue que al ajustar la polarización se modifica la longitud de onda del láser de salida y la ganancia del mismo. Esto se debe a dos factores mencionados anteriormente en este capítulo:

El primero se trata del corrimiento provocado por el modo de operación del controlador del filtro FFP, para este experimento se utilizó el modo Scan, el cual provoca que la longitud de onda cambie en el orden de 0.02 nm.

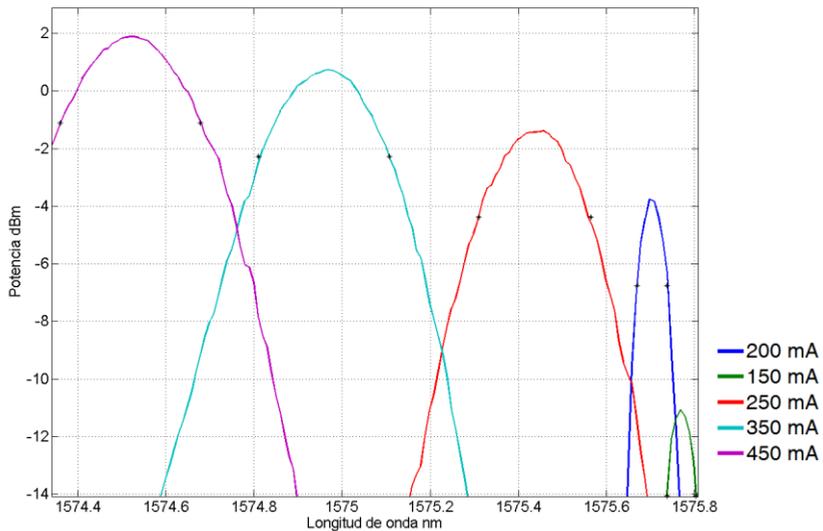


Figura 2.14 – Cambio en la longitud de onda y ancho espectral con corriente.

El segundo ocurre como resultado del fenómeno de la polarización, donde las componentes de distintas polarizaciones tienen respuestas en longitud de onda diferentes. Al beneficiarse ciertas componentes, el láser de salida tiene la longitud de onda propia de dicha componente. Es importante mencionar que la curva de ganancia del SOA no es afectada por estos cambios, de tal forma que cuando el láser se desplaza en longitud de onda, su amplitud y ancho espectral se ven limitados por la curva de ganancia del amplificador, como se muestra en la figura 2.14.

Por esta razón se asumió y comprobó que al modificar directamente la polarización de la luz por medio de controladores de polarización, cuando la corriente en el SOA se mantiene constante, la longitud de onda del arreglo láser se modifica a su vez.

En este capítulo se comprobaron los distintos modos de operación del sistema láser utilizando el SOA como medio de amplificación. La configuración analizada permite sintonizar la emisión láser en un rango de 1500 a 1600 nm y estabilizarlo en una longitud de onda.

En el siguiente capítulo se aprovecharán las características de ganancia del SOA para obtener una configuración que permita al láser operar en longitudes de onda múltiples.

CAPÍTULO 3

OPERACIÓN EN LONGITUDES DE ONDA MÚLTIPLES

Los láseres que operan en longitudes de onda múltiples son de gran utilidad como fuentes de luz en sistemas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Ya se han propuesto con anterioridad algunos sistemas que logran operar en múltiples longitudes de onda con diversas configuraciones, algunas de ellas requieren sistemas de enfriamiento para optimizar su funcionamiento y otras son capaces de operar a temperatura ambiente.

Para aumentar la funcionalidad y la flexibilidad de los láseres de múltiples longitudes de onda, el espaciado de longitud de onda debe ser preferiblemente ajustable. Sin embargo, la gran mayoría de los láseres de fibra de múltiples longitudes de onda se construyen con espaciamiento fijo entre longitud de onda.

Para el experimento que se describe en este capítulo, se tomó como base un arreglo de láser de fibra que utiliza un filtro peine sintonizable formado por polarizadores y fibra que mantiene la polarización o de alta birrefringencia (HiBi). El arreglo es similar al que se muestra en la figura 3.1. En el esquema mostrado en esta figura, la amplificación se lleva a cabo por medio de una fibra dopada con Erbio (EDF) enfriada con nitrógeno líquido. Este experimento fue reportado previamente [9], y es importante notar que en este caso es necesario enfriar el amplificador con nitrógeno líquido para poder obtener longitudes de onda múltiples.

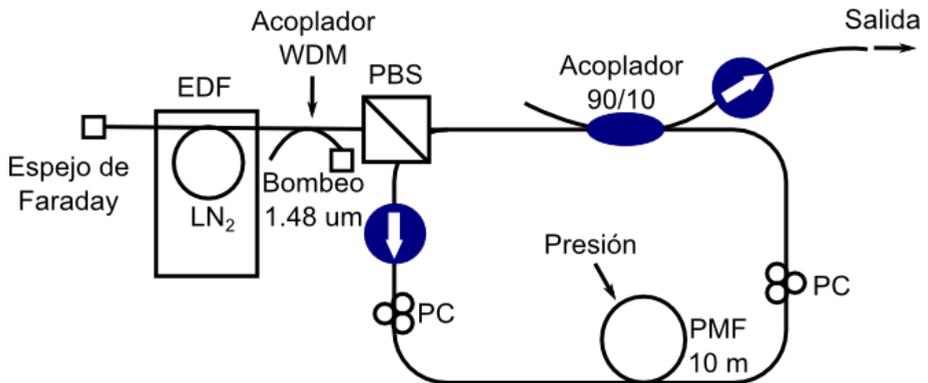


Figura 3.1 – Láser en longitudes de onda múltiples basado en un EDFA refrigerado en nitrógeno líquido [9].

La emisión en múltiples longitudes de onda se logra cuando los controladores de polarización se posicionan a 45° entre ellos y se aplica presión transversalmente a la fibra HiBi. Esto genera el acoplamiento de los modos de polarización en el punto de presión. Al final de la fibra HiBi, se obtienen dos haces de luz alineados con los ejes birrefringentes de la fibra, los cuales tienen un retardo de tiempo en función del punto de presión. La transmisión es entonces una función periódica de la frecuencia dada por [9]:

$$|T|^2 = \frac{1}{2}(1 - \sin 2\theta \cos \Delta\beta L) \quad (1)$$

$$\Delta\beta = \beta_x - \beta_y = \frac{B\omega}{c}$$

Donde θ es la rotación de la polarización por la presión, L es la distancia desde la posición de presión al extremo de entrada, β_x y β_y , son las constantes de propagación en los ejes birrefringentes, ω es la frecuencia angular, B es la birrefringencia de la fibra HiBi, y c es la velocidad de la luz. El espaciamiento de las longitudes de onda $\Delta\lambda$ se expresa como:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{BL} \quad (2)$$

Una característica interesante de este arreglo experimental es que es posible ajustar la separación de las longitudes de onda múltiples cuando se modifica la distancia (L) donde se aplica presión en la fibra HiBi. El objetivo de este capítulo es obtener un láser capaz de operar en múltiples longitudes de onda aprovechando las características de amplificación del SOA.

3.1 Caracterización del filtro peine

En la figura 3.2 se muestra el diagrama del filtro peine que sirve de base al experimento estudiado en este capítulo. Las principales diferencias consisten en la ausencia de un método de refrigeración y la sustitución del amplificador EDF por el amplificador semiconductor (SOA).

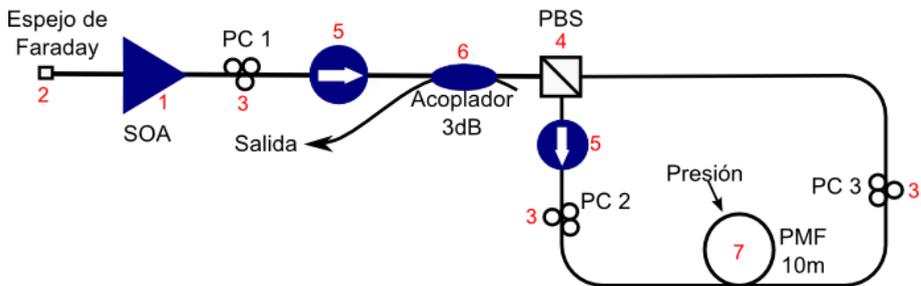


Figura 3.2 – Diagrama del filtro peine.

Los principales dispositivos utilizados fueron:

1. **SOA:** (*semiconductor optical amplifier*): descrito anteriormente en el capítulo 1
2. **Espejo de Faraday:** es un dispositivo donde la luz se transmite a través de un medio transparente que está expuesto a un campo magnético. Si la luz es polarizada linealmente en una dirección, esta dirección de polarización se hace girar 90 grados durante el paso a través del medio [13].
La aplicación del espejo de Faraday en este experimento consiste en proteger al SOA de la luz reflejada dentro del arreglo.
3. **PC (*Polarization Controller*):** Son dispositivos que permiten controlar el estado de polarización de la luz dentro de la fibra aplicando a un segmento de la misma una cantidad variable de presión o torsión; y por lo tanto obtener un estado arbitrario de polarización.
4. **PBS (*Polarizing Beam Splitter*):** es un dispositivo óptico que separa las polarizaciones ortogonales de un haz de luz utilizando materiales birrefringentes.
5. **Aislador óptico:** es un componente óptico que permite la transmisión de la luz en una sola dirección.
6. **Acoplador:** descrito anteriormente en el capítulo 2
7. **PMF (*Polarization Maintaining Fiber*):** son fibras ópticas especialmente construidas con alta birrefringencia HiBi, su función es preservar la polarización de un haz de entrada a lo largo de la fibra.

La primera etapa del experimento consistió en comprobar que fuera posible obtener los mismos resultados del experimento base con un arreglo basado en SOA. Se utilizó un segmento de fibra HiBi modelo HB1500T con una longitud de 10 metros y la presión fue aplicada a una distancia de 2 y 7 metros a lo largo de la fibra.

En una segunda etapa del experimento la fibra HiBi de 10 metros fue sustituida por segmentos de 2.5 y 7.5 metros para conocer cómo contribuye la longitud de la fibra HiBi en el espaciamiento de las longitudes múltiples.

3.2 Caracterización del filtro birrefringente

Al ajustar los PC dentro del arreglo láser fue posible modificar la respuesta en el espectro de salida del mismo. La mayor aportación que se observa ocurre con dos controladores: uno dispuesto entre el PBS y el extremo de salida de la fibra HiBi (PC3); y otro más colocado en el extremo de salida del SOA (PC1). Al observar el espectro con un rango más cerrado se observó además que este presenta un rizo en todo el espectro de emisión del SOA. Este rizo, mencionado en el capítulo 1 es lo que se requiere para la emisión en múltiples longitudes de onda.

En la configuración utilizada, no se presentaron cambios significativos en la separación de las longitudes de onda múltiples al aplicar torsión en diferentes puntos de la fibra HiBi por medio de los controladores de polarización ubicados sobre el arreglo. Los resultados, mostrados en la figura 3.3 eran cambios en la fase y amplitud de la señal de salida únicamente. Esto se debe a las características de la fibra HiBi como una fibra que mantiene la polarización, pues con un razón de extinción de polarización ideal de -32dB [17] y una longitud de impulso (*beat length*) menor a 2 mm[17]; es poco sensible a los cambios de polarización por esfuerzo mecánico.

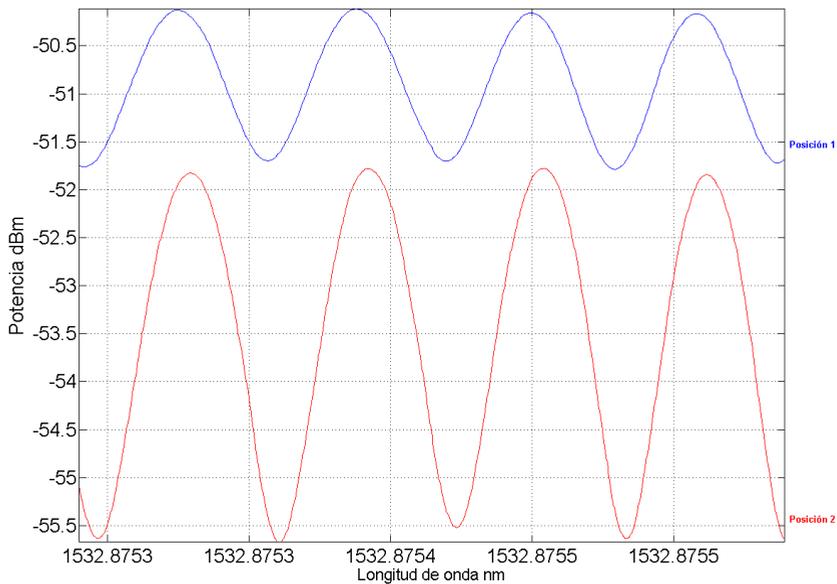


Figura 3.3 – Espectro de emisión del SOA para una ventana de observación de 0.5 nm para dos posiciones diferentes en el PC.

En la figura 3.4 se observa cómo la torsión en los puntos de la fibra HiBi modifica a nivel macro el espectro de salida en amplitud y sintonización, mientras que, cuando se compara con la figura anterior se puede observar que el espaciamiento entre longitudes múltiples permanece constante.

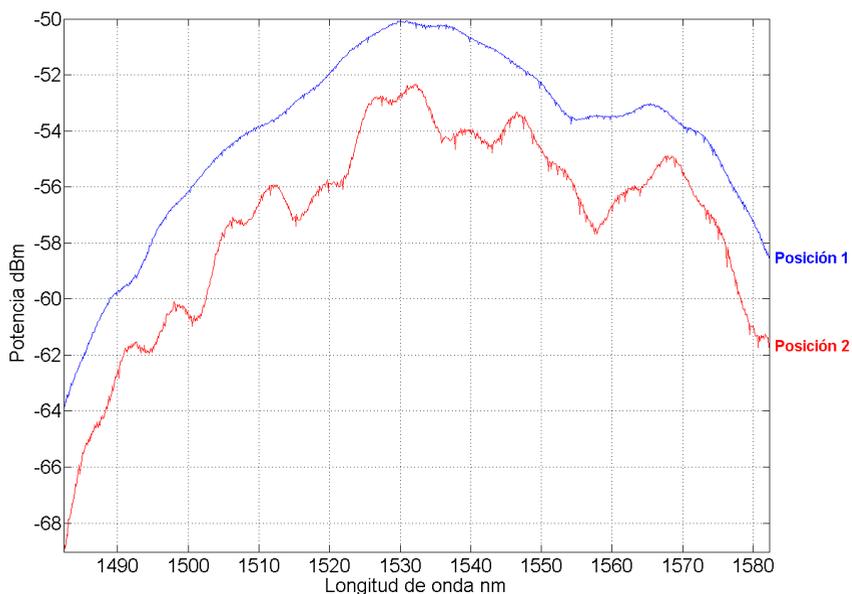


Figura 3.4 – Espectro de emisión del SOA para una ventana de observación de 100 nm para dos posiciones diferentes en el PC.

Al aplicar presión en los puntos seleccionados no se presentaron cambios significativos en la separación de las longitudes de onda múltiples, como se puede observar en la figura 3.5, pues la separación medida entre picos es de 0.8492 nm, tanto para el experimento sin presión como para los experimentos con presión a 2 m, 7 m y ambos puntos simultáneamente.

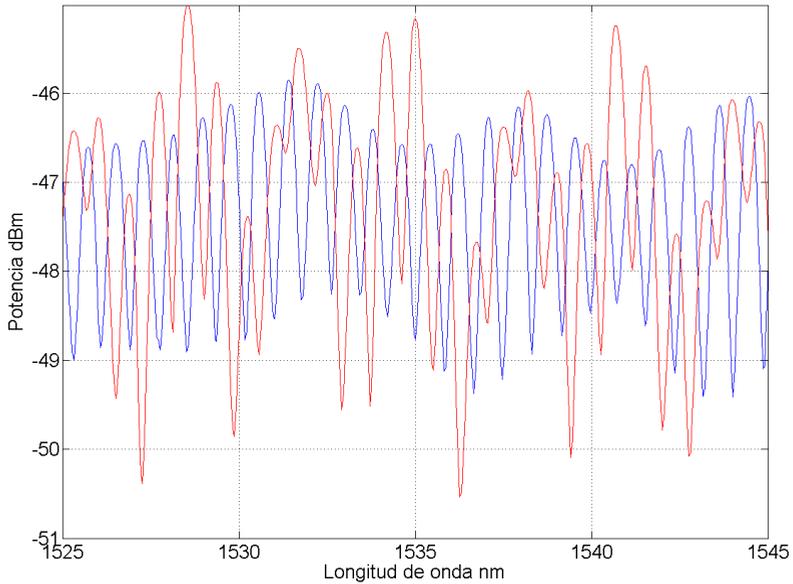


Figura 3.5–Espectros de emisión para experimento sin presión (azul) y con presión a 7 metros de la fibra HiBi (rojo).

Por otra parte, en las figuras 3.6 y 3.7 se muestra que según cómo se aplique la presión en los puntos de la fibra HiBi, se modifica a nivel macro el espectro de salida en amplitud y sintonización, pues al igual que en la etapa anterior se está manipulando la polarización de la luz en la fibra.

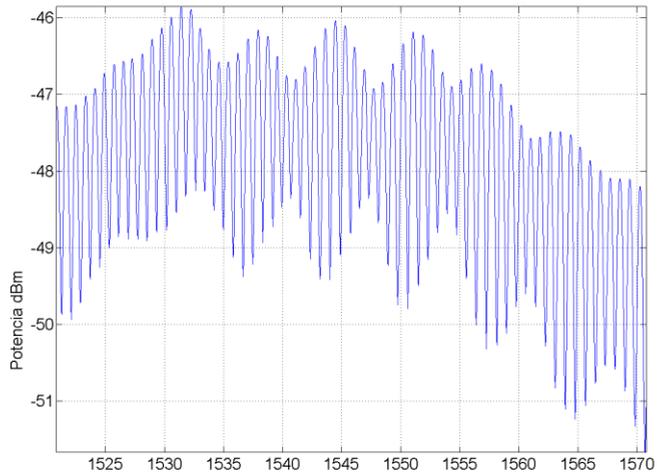


Figura 3.6 – La fibra de 10 metros sin presión como punto de referencia para experimentos con presión en la fibra HiBi.

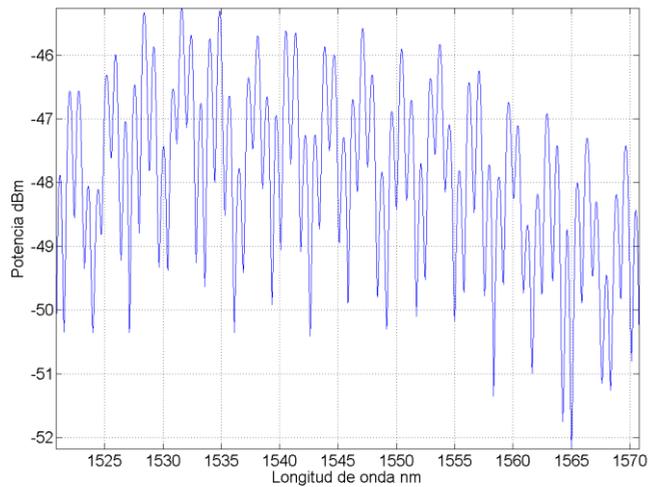


Figura 3.7 – La fibra de 10 metros con presión a los 7 metros de su longitud. La forma espectral se modifica sin alterar la separación entre picos.

Posteriormente se dividió la fibra HiBi de 10 metros a dos segmentos de 2.5 m y 7.5 m. En ambos se colocaron dos puntos de presión a 1/3 y 2/3 de la longitud de la fibra respectivamente. En estos experimentos, los PC permanecieron inmóviles y se observó nuevamente que para este arreglo la presión no tiene efecto en el espaciamiento entre ellas pero modifica la forma espectral.

Al aplicar la presión en el primer tercio de ambos segmentos el cambio es apenas perceptible: el contraste entre picos y valles no varía mientras que con la separación entre longitudes de onda ocurre algo similar. Cuando se aplica presión en el segundo tercio, figura 3.8, se puede apreciar que el espectro para ambos experimentos presenta un corrimiento homogéneo en frecuencia de acuerdo a la distancia donde se ejerce presión.

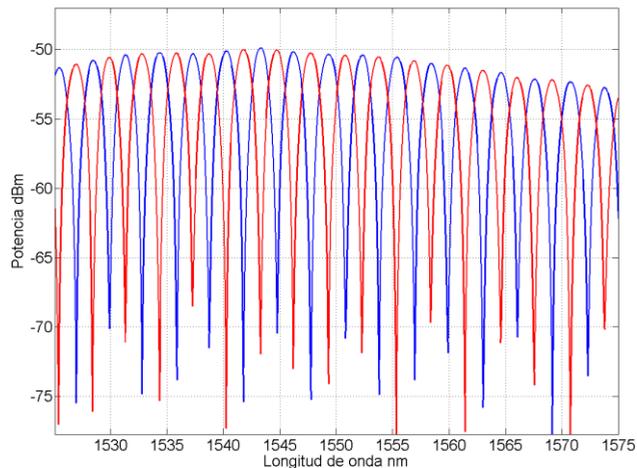


Figura 3.8 – Aplicar presión en la fibra HiBi (rojo) produce un corrimiento del espectro en la frecuencia respecto al experimento sin presión (azul).

Como se muestra en la figura 3.9, la longitud de la fibra HiBi afecta la separación entre longitudes de onda en el filtro. Los casos mostrados en la figura corresponden a longitudes de fibra HiBi de 2.5 m y 7.5 m, y puede observarse que la separación entre picos es de 2.90 nm 0.80 nm, respectivamente. Este espaciamiento permanece para otras posiciones donde se aplique presión y para diversas posiciones de los PC.

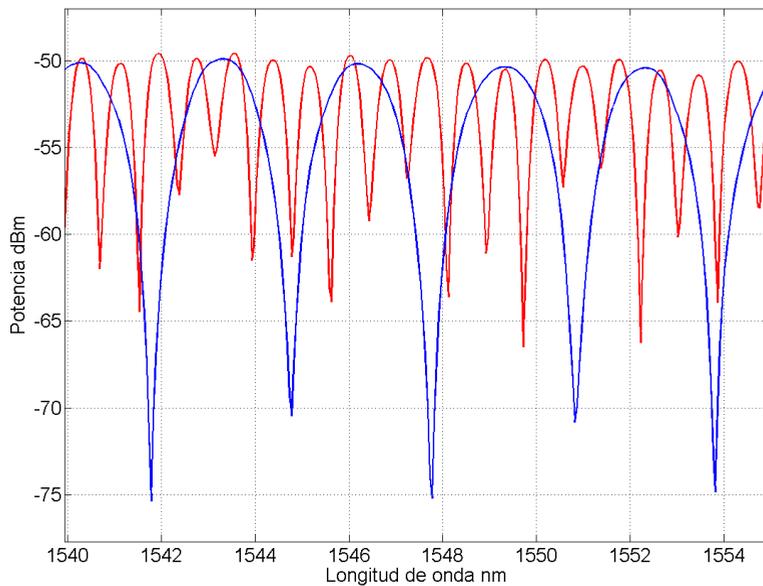


Figura 3.9 – El segmento de fibra larga (rojo) obtiene un espaciamiento entre picos menor que el segmento de fibra corta(azul).

La posición del PC dentro del arreglo es la que determina las variaciones espectrales del arreglo y la longitud del segmento de fibra HiBi quien determina la separación de las múltiples longitudes de onda. A mayor longitud del segmento de fibra HiBi, el espaciamiento entre longitudes de onda múltiples disminuye y viceversa cuando se acorta la longitud de la fibra. Esta separación entre emisiones múltiples puede ser calculada con la ecuación 2, donde L representa la longitud del segmento de fibra HiBi.

3.3 Emisión láser en longitudes de onda múltiples

Ya que la longitud de la fibra de alta birrefringencia determina el espaciamiento entre las múltiples longitudes de onda, se optó por convertir el arreglo en un láser en configuración 8, de acuerdo a la figura 3.10, donde el SOA es realimentado y aislado de reflexiones por un circulador de 3 puertos. El circulador es un tipo de aislador óptico con varios puertos cuya funcionalidad es permitir el paso de toda la luz que entra por uno de sus puertos hacia el siguiente puerto

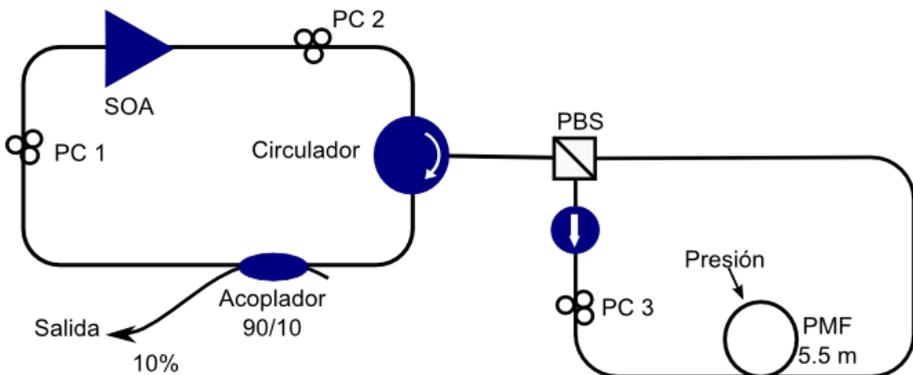


Figura 3.10 – Diagrama del láser

Para este experimento la fibra de alta birrefringencia tiene una longitud de 5.5 m por lo que se espera que la separación entre LAS LONGITUDES DE ONDA de emisión aumente con respecto a la fibra de 7.5 m según las ecuaciones 1 y 2. Con base a los resultados descritos en el capítulo anterior, se aplicó al amplificador una corriente de 250 mA.

Una vez conocido que la polarización modifica la forma del espectro, cambiando el contraste entre las longitudes de onda múltiples, se espera que con el láser se produjera el mismo efecto. Al realizar el experimento, el resultado fue que la posición del controlador de polarización PC3 determina la cantidad de emisiones en el espectro y el contraste entre ellos.

Este efecto se debe su posición a la entrada de la fibra HiBi, ya que se forma un filtro sintonizable en el cual, cuando cambia la orientación de la polarización en el punto donde se ubica PC3, cambia el contraste en la transmisión del filtro formado por la fibra birrefringente, es decir que este se vuelve más selectivo.

Para la figura 3.11 se ajustaron los controladores de polarización de forma que se obtuviera mayor cantidad de emisiones láser en el espectro. Se puede notar que existen más de los enumerados, se toman en cuenta para la Tabla 2 aquellos que se encuentran por encima de -56 dBm.

Es importante hacer notar que para las mediciones el nivel de sensibilidad del Analizador de espectros (OSA) es de -56.83 dBm y su resolución es de 0.06 nm. Esto significa que cualquier valor menor al nivel de sensibilidad debe considerarse ruido y las longitudes de onda registradas tienen un rango de error de ± 0.06 nm.

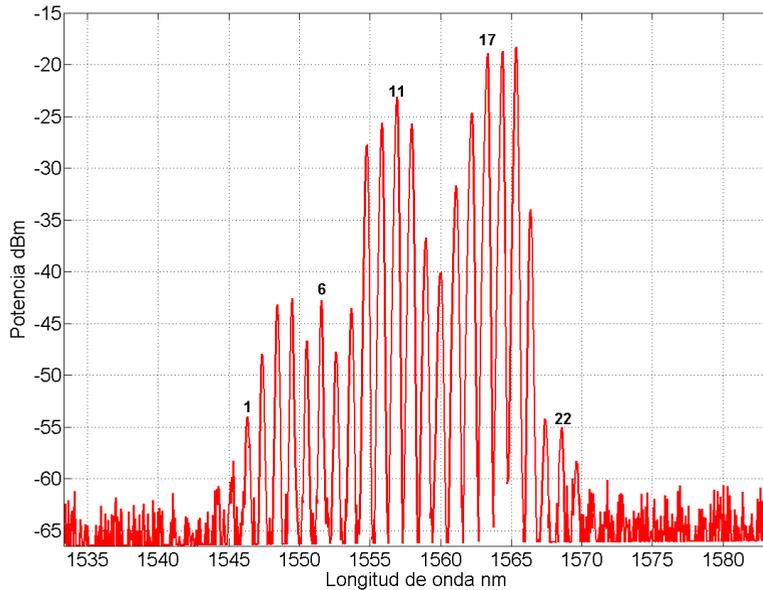


Figura 3.11 – Conteo de emisiones láser. Se enumeraron hasta 22 emisiones por encima de -56 dBm.

En la tabla 3.1 se muestran las características que guardan entre sí las emisiones láser de la figura 3.11. Se puede hacer notar que la separación que existe entre longitudes de onda para cada emisión láser es prácticamente uniforme. El espaciamiento se encuentra en un valor de alrededor de 1 nm; nótese que la resolución del OSA es de 0.06 nm, de tal manera que puede considerarse que esta separación espectral es prácticamente constante. Cada longitud de onda tiene además un ancho espectral de 0.27 nm.

Numero de frecuencia	Longitud de onda central [nm]	Espaciamiento entre emisión [nm]	potencia del pico [dBm]
1	1546.35		-54.05
2	1547.42	1.070	-47.92
3	1548.48	1.060	-43.42
4	1549.53	1.050	-42.71
5	1550.51	0.979	-45.27
6	1551.54	1.031	-42.86
7	1552.61	1.066	-47.41
8	1553.71	1.103	-43.96
9	1554.77	1.063	-28.07
10	1555.86	1.084	-25.37
11	1556.92	1.061	-23.10
12	1557.95	1.037	-24.20
13	1558.98	1.029	-35.74
14	1560.01	1.031	-38.50
15	1561.11	1.094	-31.42
16	1562.22	1.109	-24.36
17	1563.34	1.120	-18.71
18	1564.38	1.039	-18.13
19	1565.38	0.999	-18.13
20	1566.49	1.116	-33.54
21	1567.41	0.923	-54.61
22	1568.59	1.172	-55.56

Tabla 3.1 – Conteo y caracterización de las longitudes emisiones múltiples.

3.4 Umbral de operación del láser en configuración 8

Para conocer la corriente aplicada al amplificador necesaria para empezar a obtener las emisiones láser y observar el comportamiento de las longitudes múltiples conforme esta aumenta, se llevó a cabo un monitoreo del espectro en función de la corriente. El rango de corrientes para este experimento fue desde 130 mA a 480 mA con una polarización de $\Theta=45^\circ$ y $\Phi=0^\circ$, ya que fue una de las posiciones donde se consiguió estabilidad en el arreglo.

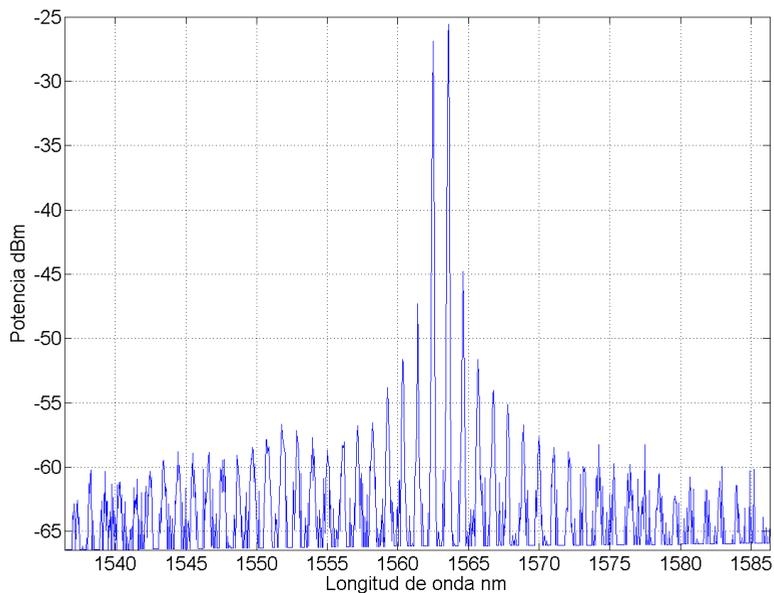


Figura 3.12 – Operación del láser de longitudes de onda múltiple, ubicado en 160 mA.

La emisión láser comenzó a partir de 160 mA con dos longitudes de onda en 1563.3 ± 0.2247 nm y 1564.3 ± 0.2247 nm respectivamente, como se observa en la figura 3.12 y al alcanzar 480 mA, máxima corriente permitida por el controlador amplificador.

Se observa en la figura 3.13 que algunas de las emisiones en otras longitudes de onda llegan a alcanzar las potencias más altas permitidas por longitudes de onda, la máxima potencia experimental alcanzada por una emisión fue -17.068 dBm en 1565.4 ± 0.2247 nm para una corriente de 440 mA. Se observó también durante los experimentos que la forma en que una emisión va aumentando su potencia no es igual a la de otra longitud de onda.

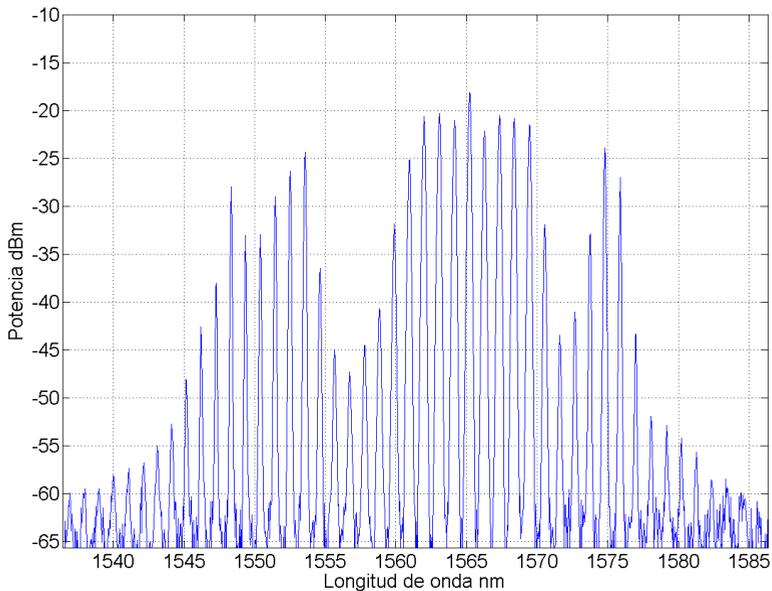


Figura 3.13 – Láser de longitudes de onda múltiples alimentado 480 mA

Un ejemplo de la afirmación anterior es la emisión en 1565.4 ± 0.2247 nm. Al alimentar el arreglo con una corriente de 260 mA se alcanza una potencia de -19.827 dBm, cuando la corriente en el arreglo es 480 mA; la emisión alcanza -18.102 dBm. En condiciones iguales el láser ubicado en 1561.7 ± 0.2247 nm alcanza -29.942 dBm y -20.621 dBm respectivamente.

Esto significa que en el mismo rango la primera emisión mencionada aumenta 1.725 dB pero la segunda emisión tiene un incremento de 9.3 dB. La forma en que aumenta la potencia de la emisión láser respecto la corriente suministrada puede compararse en la figuras 3.14.

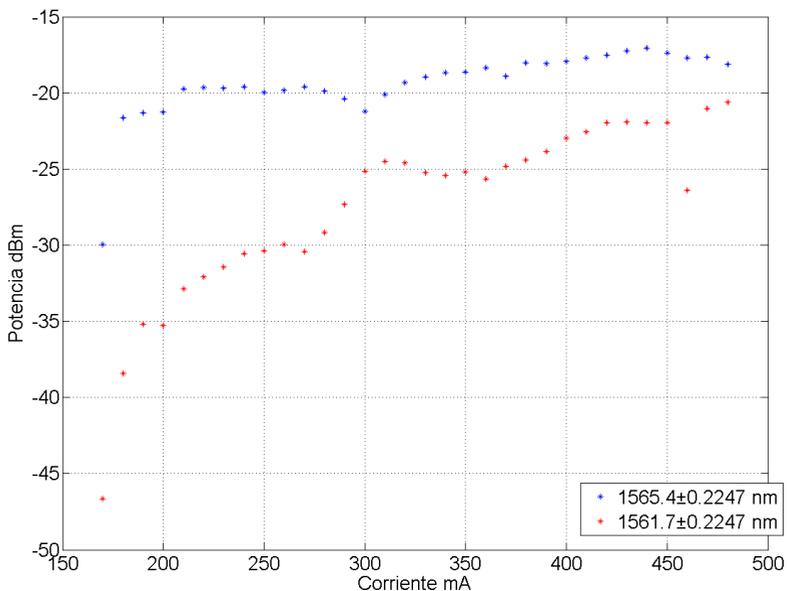


Figura 3.14 – Comportamiento de la potencia de emisión para el láser de 1565.4 ± 0.2247 nm y 1561.7 ± 0.2247 nm.

Se asume que este efecto se debe a que la región del espectro entre 1562.5 nm y 1563.6 nm presenta menos pérdidas y es la primera en alcanzar la máxima ganancia del arreglo, conforme se aumenta la potencia en el SOA, la ganancia en las otras regiones van superando las pérdidas propias del sistema.

Para mostrar de mejor manera esta conclusión, las figura 3.15 muestra dos emisiones que mantienen niveles casi planos y dos emisiones que presentan crecimientos pronunciados. Este fenómeno comienza a presentarse a partir de corrientes mayores a 260 mA.

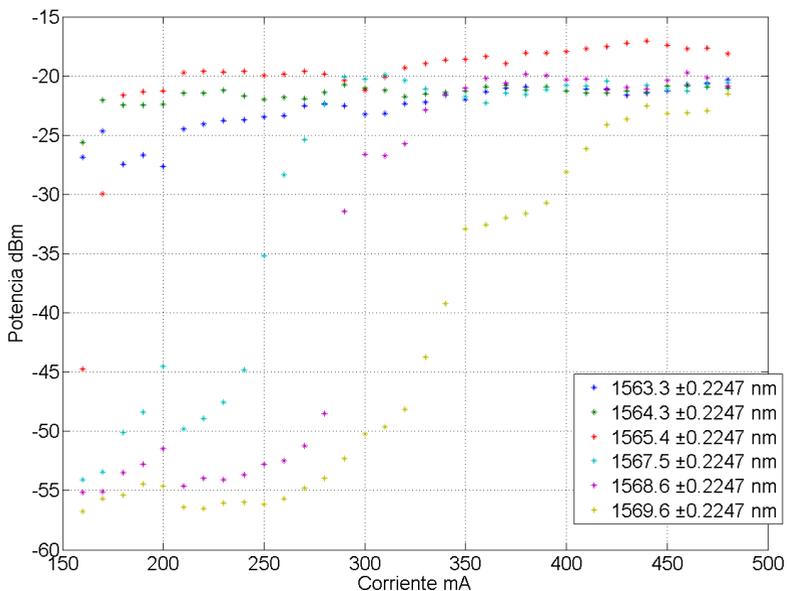


Figura 3.15 – Comparación del comportamiento plano de la potencia de emisión para múltiples longitudes de onda.

Por esta razón, el umbral de operación para cada longitud de onda es distinto, al igual que su recta característica. A la emisión en 1564.3 le corresponde la recta $0.037x + 0.726 \mu A$, mientras que a la emisión en 1552.7 le corresponde la recta $0.00004x - 0.0181 mA$. La tabla Anexo 1 muestra las mediciones realizadas para 33 emisiones sobre el rango de 130 a 480 mA.

Los experimentos realizados en este capítulo permiten obtener una configuración de arreglo láser basado en un SOA, de dimensiones reducidas en comparación con un sistema basado en EDFAs, capaz de producir emisiones en longitudes de onda múltiples, cuya separación es ajustable aprovechando las propiedades de la fibra HiBi, sin la necesidad de mantenerla a bajas temperaturas como su equivalente basado en EDFAs.

En reportes previos [14] se reportaron hasta 19 emisiones láser con una separación de 0.73 nm, y se observa que la cantidad de emisiones es inversamente proporcional a la separación entre las mismas. La máxima potencia obtenida es de -15 dBm y se observa que el contraste entre emisiones es de hasta 10 dB. Debido a la utilización de un amplificador EDFA, la ventana de transmisión es de 1548.2 a 1559.9 nm. En contraste, los experimentos realizados en este trabajo presentan 22 emisiones láser separadas 1 nm entre sí, y estas se distribuyen en un rango entre 1546.3 y 1568.6 nm. Además, el espectro completo puede ser sintonizado debido a que la ventana de transmisión del SOA es más amplia que la que típicamente puede obtenerse con un EDFA.

Una desventaja del arreglo experimental estudiado en este capítulo es que la potencia de las emisiones obtenidas sólo alcanza niveles de -18 dBm. Sin embargo, para obtener mayores potencias sólo sería necesario utilizar una etapa de amplificación adicional a la salida del láser.

En el siguiente capítulo se busca explotar el rango espectral de operación del SOA y sus propiedades con la polarización de la luz para convertir al arreglo en un sistema que permita sintonizar las emisiones en longitudes de onda múltiples.

CAPÍTULO 4

LÁSER SINTONIZABLE CON LONGITUDES DE ONDA MÚLTIPLES

Una onda electromagnética no solamente está caracterizada por su longitud de onda. Como toda onda, lleva asociada una magnitud física que oscila y se propaga. En el caso de la luz, esta magnitud es un campo electromagnético. La dirección de vibración del campo eléctrico asociado puede mantenerse constante a medida que la onda avanza, en cuyo caso se habla de ondas linealmente polarizadas. Por el contrario, se dice que una onda está circularmente polarizada cuando ese plano rota durante la propagación.

En los experimentos previos se observó que es posible alterar el espectro de la señal de emisión láser por la acción del cambio en la polarización de la luz contenida dentro del arreglo láser. El objetivo en este capítulo es obtener un láser sintonizable a partir del arreglo mostrado en la figura 4.1. La diferencia principal entre este sistema láser y el estudiado en el capítulo anterior, es que en este caso se incluye un sintetizador de polarización (PSY). El objetivo de utilizar este sintetizador es el de poder controlar de manera precisa la polarización que entra a la fibra de alta birrefringencia. De esta manera, y de acuerdo a la caracterización del filtro de peine mostrada en el capítulo anterior, se deberá poder ajustar el espectro de emisión del láser en anillo.

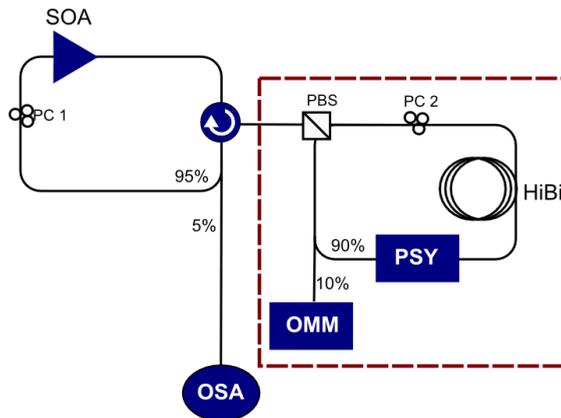


Figura 4.1 – Diagrama del experimento base. La línea punteada muestra el filtro de peine sintonizable.

Dentro del filtro de peine se utiliza también un medidor de potencia óptica para monitorear la potencia de la señal que entra al PSY, la cual no debe superar 300 mW.. Para separar las polarizaciones se usa también un divisor de polarización o PBS (*Polarizing Beam Splitter*), cuyo diagrama es mostrado en la figura 4.2. Este dispositivo está compuesto por una entrada o puerto T por donde incide el láser y dos salidas, puertos 1 y 2 por las cuales se obtienen las polarizaciones ortogonales por separado.

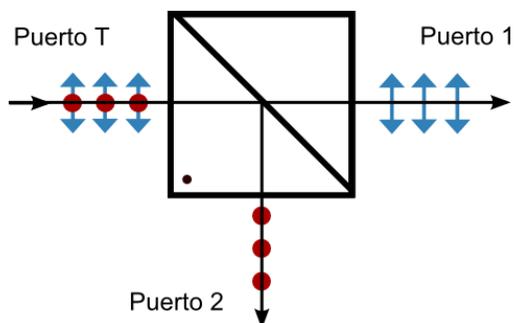


Figura 4.2 – Funcionamiento de un Polarizing Beam Splitter (PBS).

El sintetizador de polarización es un instrumento que puede generar y mantener cualquier estado deseado de polarización (SOP), independientemente del SOP de entrada. El PSY combina un controlador de polarización, un polarímetro y un algoritmo de control en un instrumento que funciona tanto como un generador de estado de polarización determinista y un analizador de polarización. El SOP generado y la correspondiente esfera de Poincaré se pueden visualizar fácilmente en una pantalla de computadora. Las características y especificaciones del PSY se muestran en el anexo 2.

Para generar el SOP deseado se introducen los parámetros de Stokes correspondientes; el instrumento busca automáticamente el SOP y la mantiene contra las fluctuaciones del SOP entrada. Otra característica atractiva es que el usuario puede escanear a través de 6 SOP distintos (0° , 90° , $\pm 45^\circ$ y polarizaciones circular derecha(RHC) y circular izquierda (LHC)). Estas características fueron aprovechadas durante los experimentos de este capítulo para el monitoreo del espectro de salida del arreglo para distintas polarizaciones de luz.

4.1 Caracterización del arreglo

Para comprobar que, por efecto del SOA, no existen longitudes de onda beneficiadas o perjudicadas por polarizaciones ortogonales se utilizó un divisor de polarización para comparar los espectros entre sí. Las pruebas se realizaron para dos segmentos de fibra de alta birrefringencia, de 1.5 m y 5.5 m cada una.

El resultado de este experimento fue que no existen longitudes beneficiadas por la polarización, es decir, ambos puertos presentan las mismas longitudes de onda. Se observa en las figuras 4.3 y 4.4 que únicamente existe una pequeña diferencia de potencias entre las salidas (señales color azul) y la señal de entrada (señal color rojo). Sin embargo, esto es un efecto propio del dispositivo debido a las pérdidas provocadas por el acoplamiento los conectores del dispositivo.

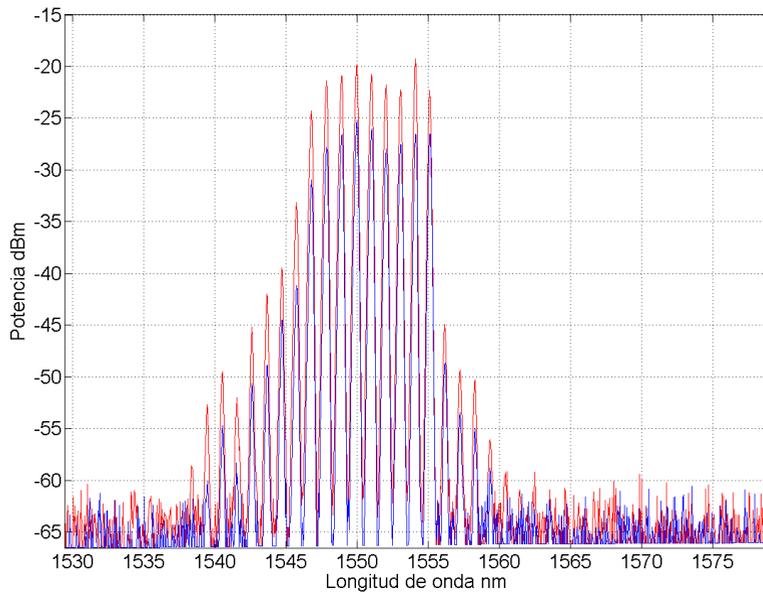


Figura 4.3 – Comparación entre los puertos T y 1 del PBS.

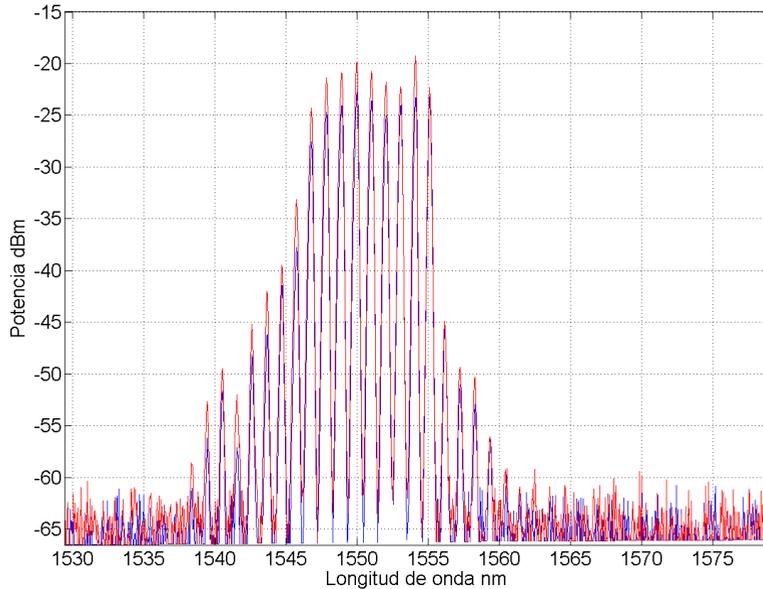


Figura 4.4 – Comparación entre los puertos T y 2 del PBS.

En el capítulo 3 se concluyó que la separación entre longitudes de onda es de 1 nm, dicha separación permanece constante con los cambios de polarización aunque las longitudes de onda tienden a crecer o disminuir en potencia.

Durante los experimentos del capítulo 3 se observó que existen posiciones de los PC para las cuales la cantidad de longitudes onda con potencias altas es mayor que la posición utilizada en el arreglo con operación en longitudes de onda múltiples, con ello se cuestionó si las emisiones conservan la misma posición cuando se modifica la polarización.

Al manipular la polarización de la luz en la fibra es posible variar la cantidad de longitudes de onda por medio de la potencia de las mismas. Esto es, las emisiones están ubicadas y espaciadas de acuerdo a la longitud de la fibra de alta birrefringencia y cuando se modifica la polarización con los controladores se beneficia a unas u otras longitudes. La variación de la corriente agrega un desplazamiento en longitud de onda, efecto ya abordado en el capítulo 1.

Para asegurar que las emisiones obtenidas con el arreglo experimental se encuentran ubicadas en la misma posición donde aparecieron los lóbulos del filtro peine caracterizado en el capítulo 3, se realizaron mediciones y comparaciones entre los espectros de ambos experimentos. Es importante mencionar que hasta este punto no se ha hecho uso del PSY, toda manipulación de la polarización es por medio de controladores de polarización convencionales.

El espaciamiento y posición de las emisiones láser se relaciona con el rizo del filtro birrefringente (esto es, el filtro de peine); esto se aprecia en las figuras 4.5 y 4.6, en donde puede verse que las emisiones láser coinciden con los espectros obtenidos durante la caracterización del filtro birrefringente, por lo tanto la separación permanece constante.

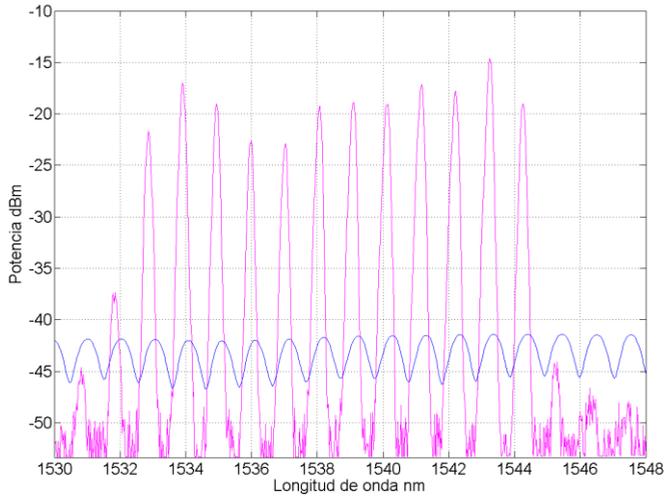


Figura 4.5 – Posicionamiento de las longitudes de onda múltiples para el segmento de 1.5 m.

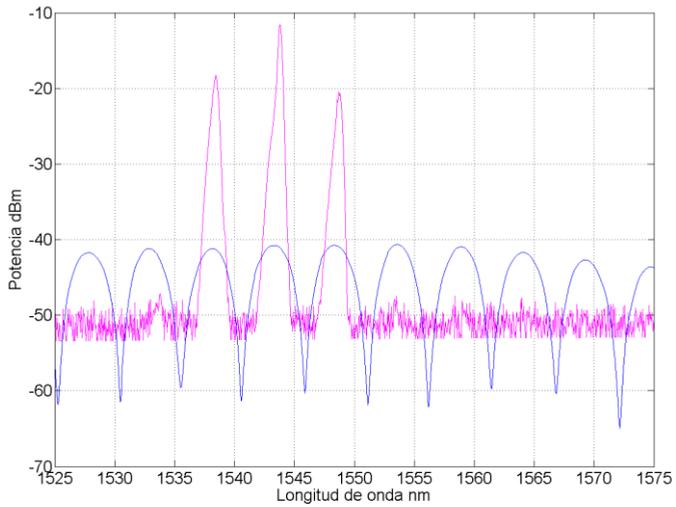


Figura 4.6 – Posicionamiento de las longitudes de onda múltiples para el segmento de 5.5 m.

Con el objetivo de comprobar la sintonización del arreglo láser por medio de la polarización se caracterizaron 3 posiciones de los PC, aquellas con los resultados más representativos: menor cantidad de longitudes de onda, máximo de longitudes de onda y el máximo nivel posible para alguna de las longitudes.

Para el primer caso, mostrado en la figura 4.7, se colocaron los controladores PC1 y PC2 a 45° en sentido horario y a 60° en sentido anti horario respectivamente. El resultado son 3 longitudes de onda, la mayor ubicada en 1539.4 nm con una potencia de -29.7 dBm. La potencia promedio leída por el multímetro fue -13.82 dBm en 1537.8 nm.

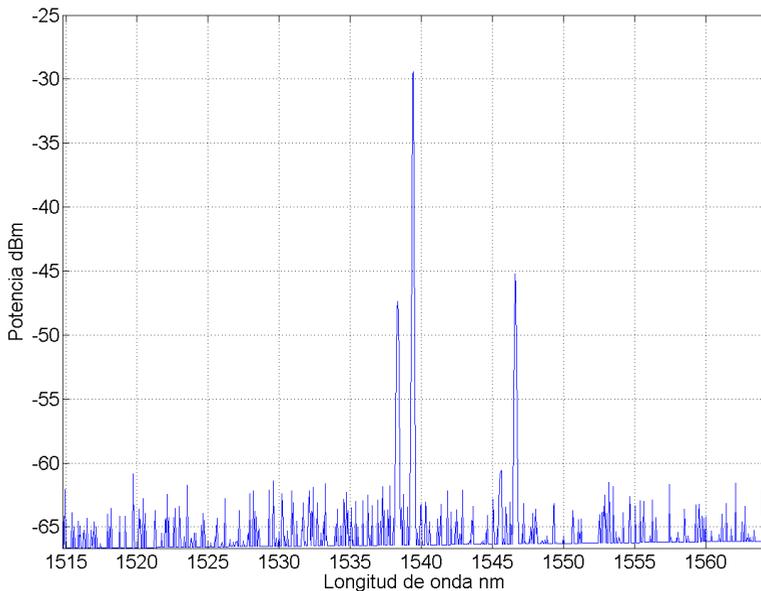


Figura 4.7 – Posición de mínima cantidad de longitudes de onda.

Para el segundo caso: máxima cantidad de longitudes de onda, mostrado en la figura 4.8; se colocaron los controladores PC1 y PC2 a 45° en sentido horario y al máximo en sentido anti horario respectivamente. El resultado son 23 longitudes de onda, la mayor ubicada en 1574.30 nm con una potencia de -25 dBm. La potencia promedio leída por el multímetro fue de -2.94 dBm en 1573.6 nm.

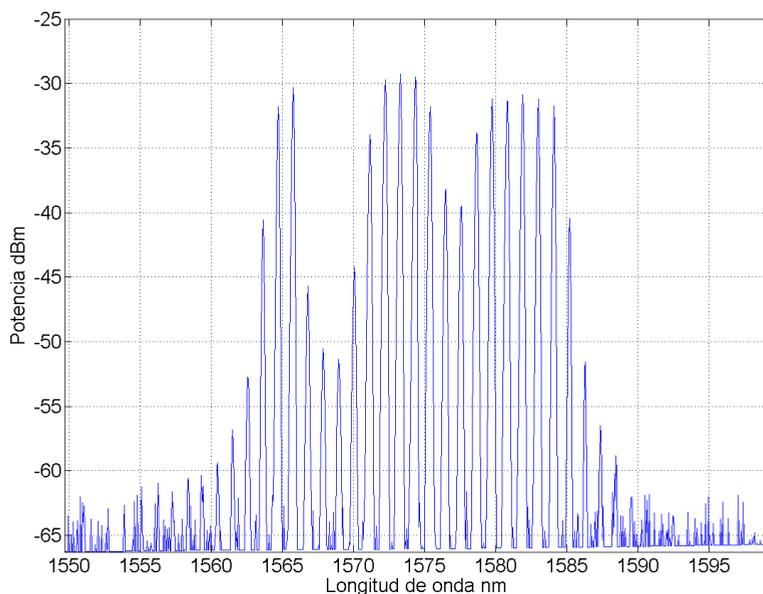


Figura 4.8 – Posición de máxima cantidad de longitudes de onda.

Para el tercer caso: máxima potencia para una de las longitudes de onda, mostrado en la figura 4.9, se colocaron los controladores PC1 y PC2 a 70° en sentido horario y 0° respectivamente. El resultado es una longitud de onda en 1555.4 nm con -23.7 dBm. La potencia promedio leída por el multímetro fue de -3.95 dBm en 1551.7 nm

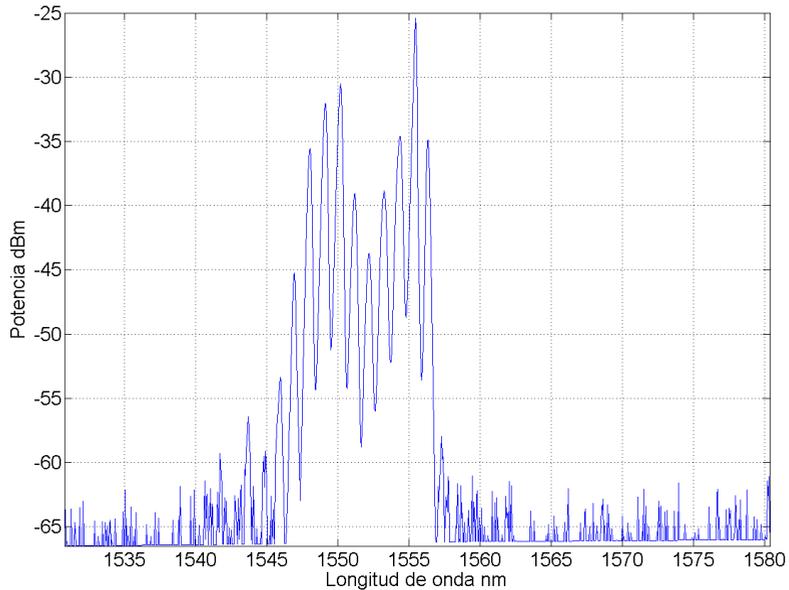


Figura 4.9 – Posición de máxima potencia para una longitud de onda.

El inconveniente en este tercer caso se encuentra en que el contraste entre las longitudes de onda no es muy pronunciado y se observa que las longitudes de onda tienden a colapsarse entre sí formando emisiones con ancho espectral mayor. Este método de sintonización por medio de los controladores mecánicos de polarización, si bien ofrece cierto grado de estabilidad, no permite una medición adecuada de los parámetros de polarización. Por esa razón fueron sustituidos por el sintetizador de polarización (PSY).

4.2 Sintonización del láser por polarización

El uso del PSY permite establecer la polarización de la luz en términos de Θ y Φ , que son las coordenadas esféricas utilizadas para representar el SOP en la esfera de Poincaré. El sintetizador permite determinar las polarizaciones exactas donde se obtiene mayor contraste o mayor cantidad de longitudes de onda. Por ejemplo: es posible determinar experimentalmente que cuando se polariza con un ángulo $\Theta=35^\circ$ y $\Phi=0^\circ$, se tiene un espectro particular que no tiene una polarización con ángulos distintos.

En la tabla 4.1 se toman como consideración aquellas longitudes de onda que presenten potencias mayores a -51 dBm. Se registraron polarizaciones particulares donde se obtiene la mayor cantidad de longitudes de onda o existe un máximo contraste entre las longitudes encontradas.

Al comparar los espectros con las figuras de polarización se concluyó que la estabilidad de la polarización está ligada con los resultados en espectro. En las polarizaciones con más estabilidad es posible alcanzar mayores potencias o máxima cantidad de longitudes de onda, esto se debe a que en las posiciones sin estabilidad, las longitudes de onda presentan múltiples polarizaciones que interfieren entre sí.

Theta	Phi	Longitudes de onda	Theta	Phi	Longitudes de onda
0	0	0	90	0	5
15	-20	14	105	-20	23
	0	12		0	23
	20	21		20	18
25	-30	11	120	-20	19
	20	16		0	19
	30	9		20	26
30	-20	11	135	0	4
	0	22	150	-20	13
	20	22		0	25
45	0	4		20	18
60	-20	7	160	-30	11
	0	35		30	10
	20	23	165	-20	23
70	-30	10		0	18
75	-20	22		20	30
	0	26	LHC		2
	20	23	RHC		6

Tabla 4.1 – Relación de longitudes de onda en función de la polarización

Para algunos ángulos de polarización no se presentó una salida estable, esto significa que al modificar muy rápidamente la polarización, también se modifica la emisión del láser. En la figura 4.10 se pueden observar algunos de los casos analizados con el arreglo. Los puntos en la esfera de Poincaré con mayor dispersión indican condiciones de operación inestable del láser (por ejemplo, $\Theta=0^\circ$ y $\Phi=0^\circ$). En contraste, los puntos con menor dispersión representan las polarizaciones para las cuales el láser opera de manera estable (por ejemplo, $\Theta=60^\circ$ y $\Phi=0^\circ$).

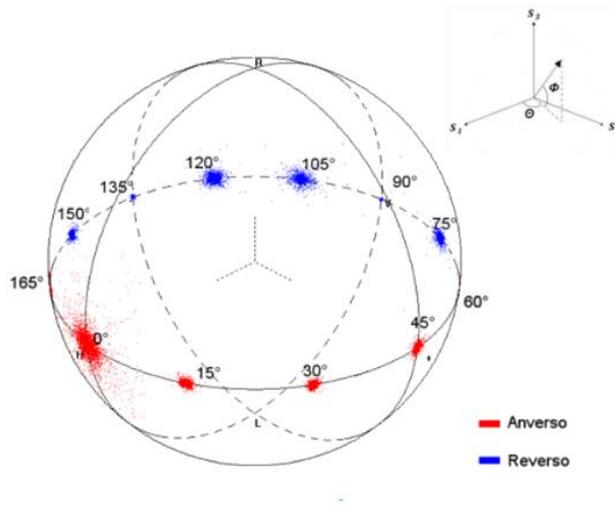


Figura 4.10 – Esfera de Poincaré: Monitoreo de las polarizaciones sobre $\Phi=0^\circ$.

En las figuras 4.10, 4.11 y 4.12 se muestra el monitoreo a las polarizaciones en 3 grandes grupos: $\Phi=0^\circ$, $\Phi=20^\circ$ y $\Phi=-20^\circ$, y $\Phi=30^\circ$ y $\Phi=-30^\circ$. Al igual que en el caso anterior, las posiciones más estables, y por lo tanto las que mejores resultados produjeron, pueden localizarse en la esfera de Poincaré como puntos con dispersión mínima.

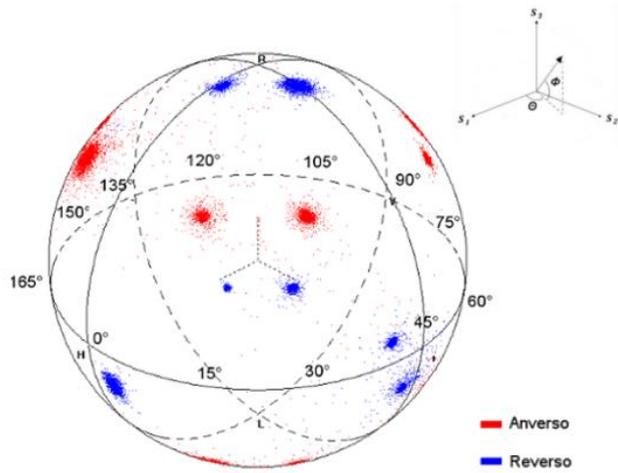


Figura 4.11 – Esfera de Poincaré: Monitoreo de las polarizaciones sobre $\phi=20$ y $\phi= -20^\circ$.

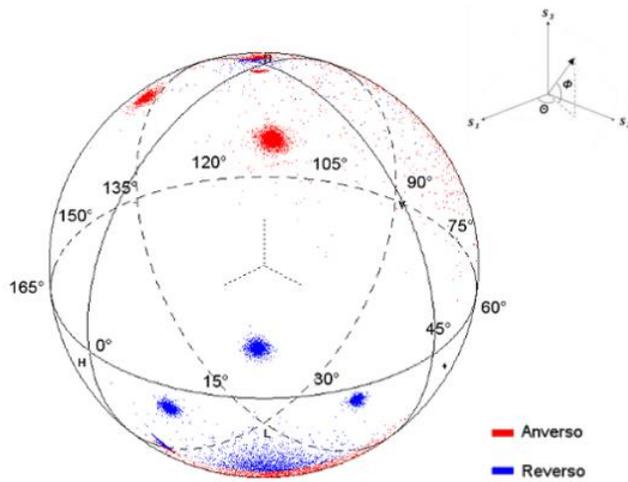


Figura 4.12 – Esfera de Poincaré: Monitoreo de las polarizaciones sobre $\phi=30$ y $\phi= -30^\circ$.

El ejemplo más destacado es para los ángulos $\Theta=60^\circ$ y $\Phi=0^\circ$ donde al observar el espectro de la figura 4.13 es posible contar hasta 30 longitudes de onda por encima de -56 dBm, que es la sensibilidad del OSA. Si se compara con el monitoreo sobre la esfera de Poincaré de la figura 4.10, se puede verificar que este punto presenta una dispersión casi nula.

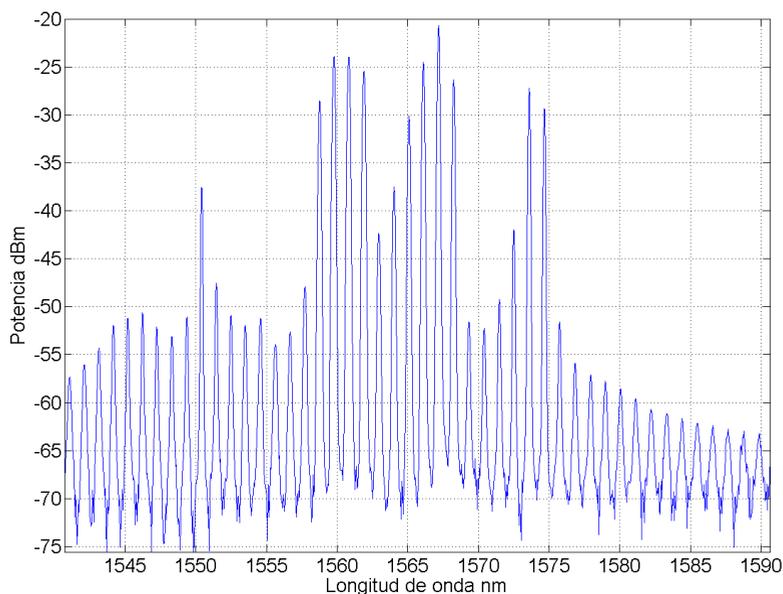


Figura 4.13 – Espectro de la polarización $\Theta=60^\circ$ y $\Phi=0^\circ$.

Para la polarización de $\Theta=70^\circ$ y $\Phi= -30^\circ$ se observó que tiene la componente en longitud de onda más alta de todas con -18 dBm. En general, las polarizaciones restantes presentan potencias alrededor de -21 dBm, además las longitudes que sobresalen mantienen una relación estrecha en potencia. Si se observa este caso en la esfera también se encuentra que se trata de una posición muy estable.

Existen casos como el de $\Theta=0^\circ$ y $\Phi=0^\circ$, $\Theta=25^\circ$ y $\Phi=-30^\circ$, $\Theta=150^\circ$ y $\Phi=20^\circ$, y $\Theta=165^\circ$ y $\Phi=20^\circ$, estos dos últimos mostrados en la figura 4.14, para los cuales se observa que la polarización no logra ser estable. Esto provoca que a pesar de que los resultados en el espectro parezcan favorables en el sentido en que se obtienen múltiples longitudes de onda o potencias altas; no ocurre la mayor parte del tiempo, como en las dos primeras polarizaciones o que las longitudes beneficiadas cambien continuamente en el caso de las últimas dos polarizaciones.

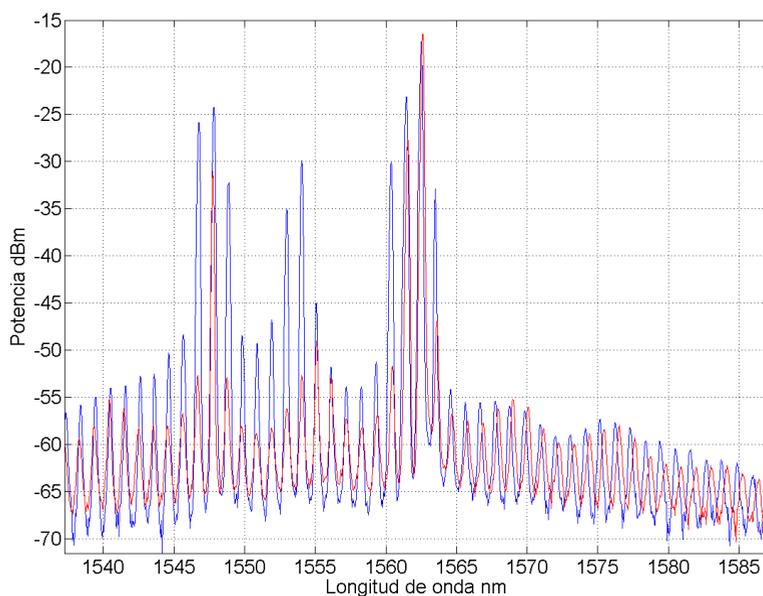


Figura 4.14 – Espectro de las polarizaciones $\Theta=150^\circ$ y $\Phi=20^\circ$ (izquierda) y $\Theta=165^\circ$ y $\Phi=20^\circ$ (derecha).

Para las polarizaciones circulares, figuras 4.15 y 4.16, ocurre que son las más estables, sin embargo presentan pocas longitudes de onda beneficiadas y la potencia de las mismas es Trayectorias de polarización durante la sintonización es relativamente baja con respecto a los otros casos observados.

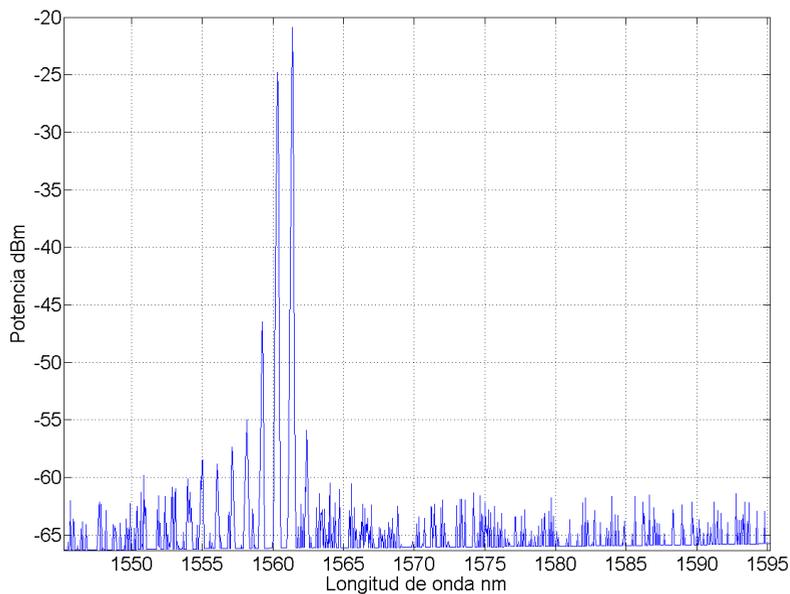


Figura 4.15 – Monitoreo y espectro para polarización circular izquierda.

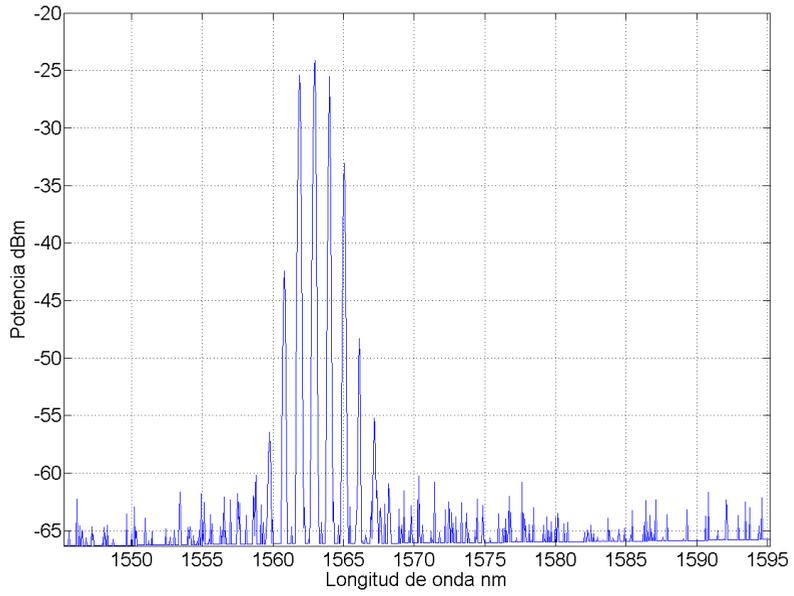


Figura 4.16 – Monitoreo y espectro para polarización circular derecha.

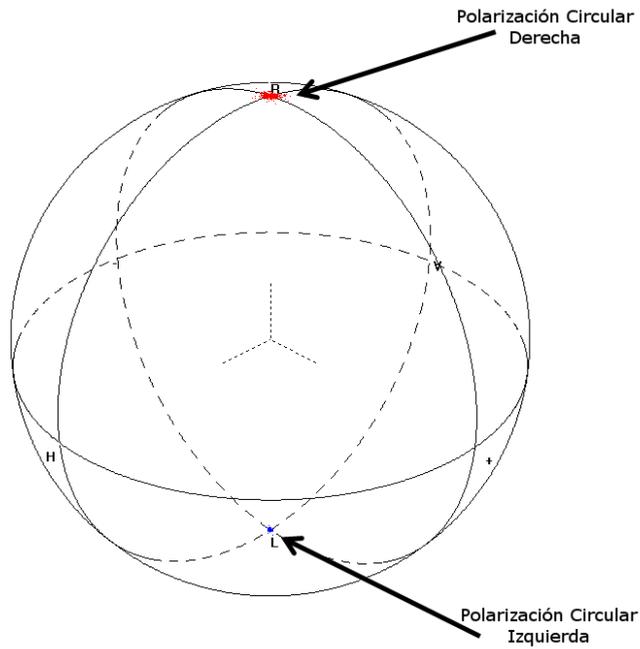


Figura 4.17 – Monitoreo y espectro para polarización circular derecha.

La esfera de Poincaré de la figura 4.17 muestra que las polarizaciones circulares son altamente estables, incluso su representación es prácticamente imperceptible. Es posible utilizarlas, junto con otros puntos igualmente estables, como punto de partida para localizar trayectorias de polarización donde el espectro de salida sea homogéneo.

4.3 Trayectorias de polarización durante la sintonización

La existencia de varias posiciones donde la polarización no es estable, hace suponer que existan zonas dentro de la esfera con este comportamiento. Para atender esta hipótesis recurrió la función del PSY para recorrer la esfera de acuerdo al eje de referencia Θ de la figura 4.18. Los recorridos se realizaron a 0° , 45° , 90° y -45° .

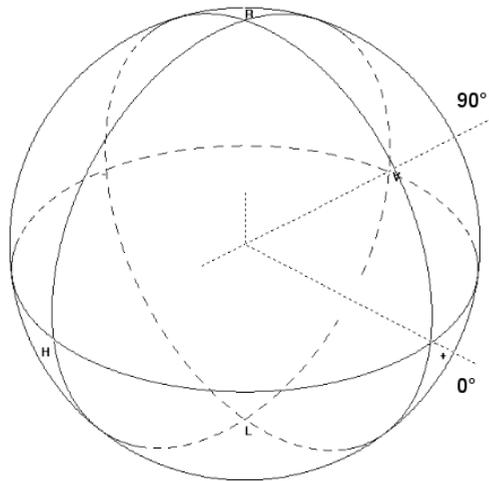


Figura 4.18 – Eje de referencia Θ

En las figuras 4.19 y 4.20 se observan las zonas donde la polarización no es estable. Estas regiones coinciden con los puntos tratados anteriormente, los cuales provocan que el espectro de la señal de salida presente rápidas variaciones.

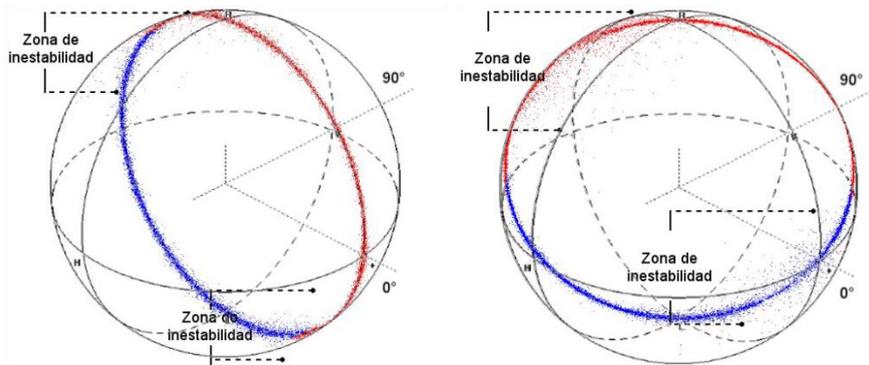


Figura 4.19 – Barrido a 0° (izquierda) y 45° (derecha).

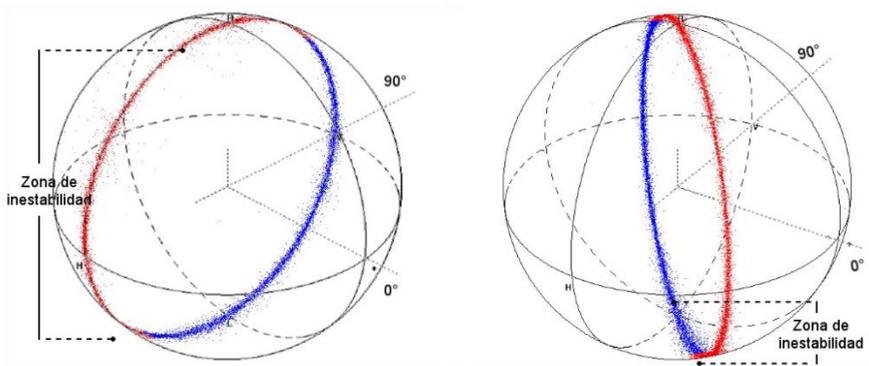


Figura 4.20 – Barrido a 90° (izquierda) y -45° (derecha).

A partir de la observación de las figuras 4.19 y 4.20 se estableció el objetivo de encontrar trayectorias para las cuales sea posible mantener un espectro estable, las emisiones en longitudes de onda múltiples mantengan niveles de potencia similares en cada posición a lo largo de la trayectoria.

Se buscaron tres de estas trayectorias mediante la función del PSY de asignar valores específicos de polarización, en las zonas del barrido donde se obtuvo estabilidad en polarización. Estas trayectorias se muestran en la tabla 4.2, en la cual se reporta un conteo de longitudes de onda en cada posición, así como las medidas de máxima y mínima potencia.

	Theta	Phi	Longitudes	Potencia	
				Máxima	Mínima
Trayectoria 1	24	6	7	-18.86	-26
	27	3	7	-18.86	-27
	30	0	8	-18.86	-39.86
	33	3	7	-20	-31
	36	6	7	-18.86	-38
	36	9	7	-18.86	-43
	33	12	6	-18.29	-38
	30	15	5	-18.86	-26
	27	12	6	-18.86	-25
	24	9	7	-18.86	-28

Tabla 4.2 – Trayectorias de estabilidad

Trayectoria 2	Theta	Phi	Longitudes	Potencia	
				Máxima	Mínima
	70	-25	4	-17.5	-34
	75	-25	4	-16.1	-35
	80	-25	4	-15.45	-35.7
	85	-25	4	-17.33	-30
	90	-25	4	-17.33	-38
	90	-30	5	-17.24	-32
	90	-35	6	-17.23	-37
	90	-40	7	-19	-34
	85	-40	7	-19.2	-37
	80	-40	7	-19.3	-37
	75	-40	7	-20	38
	70	-40	7	-19.8	-31.5
70	-35	6	-18.6	-32	
70	-30	5	-14	-31.7	
Trayectoria 3	Theta	Phi	Longitudes	Potencia	
				Máxima	Mínima
	30	0	6	-19.23	-32
	30	5	5	-17	-35
	30	10	5	-18	-33
	35	10	4	-17	-25
	35	5	4	-17	-25
	35	0	5	-17	-35
	35	-5	6	-20	-33
	35	-10	6	-20	-32
	35	-15	7	-19.72	-34
	35	-20	7	-18.38	-34
	30	-10	7	-19	-32
30	-5	7	-19	-39	

Tabla 4.2 – Trayectorias de estabilidad (Continuación).

Las trayectorias de la tabla son mostradas en las figuras 4.21, 4.22 y 4.23, en ellas se observa cierta estabilidad en de la polarización. El color de la figura indica en qué cara de la esfera se encuentra la trayectoria. Es posible regresar a cualquier posición de la trayectoria y obtener el mismo espectro de emisiones. Este experimento se llevó a cabo comparando las emisiones de múltiples posiciones cercanas a la trayectoria estudiada.

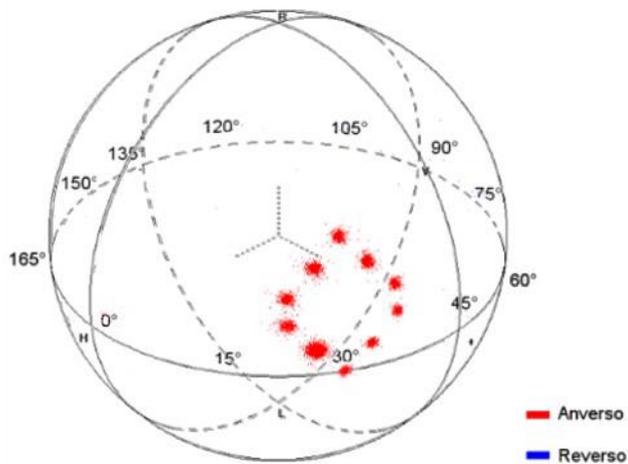


Figura 4.21 – Trayectoria 1.

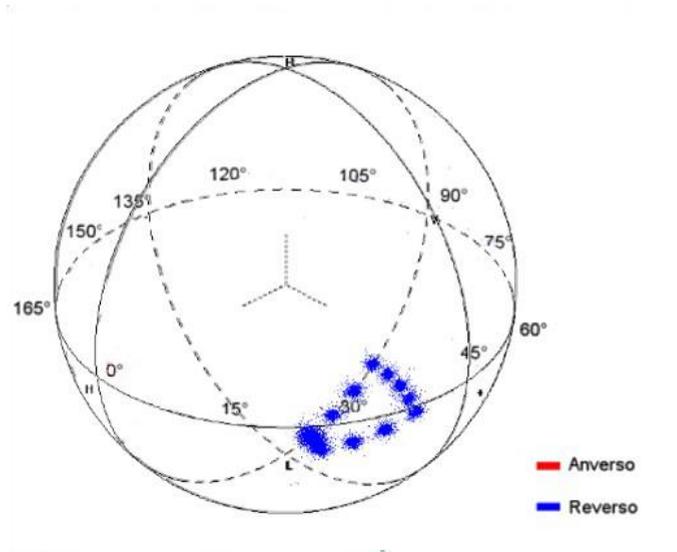


Figura 4.22 – Trayectoria 2.

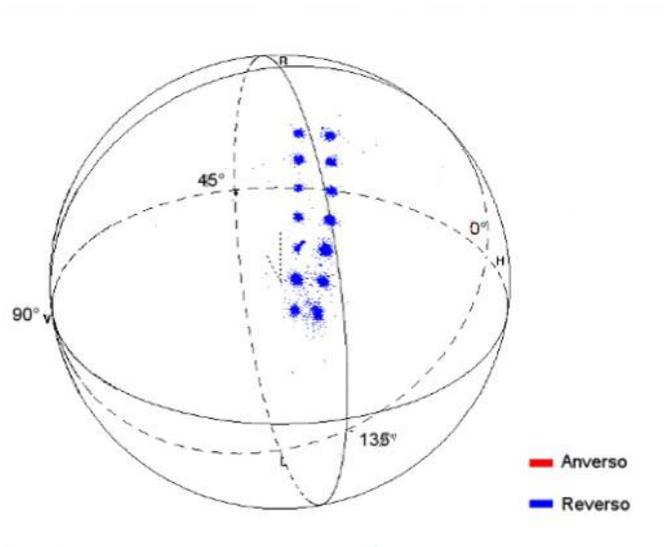


Figura 4.23 – Trayectoria 3.

La evidencia de la conservación del espectro cuando se desplaza la polarización dentro de las trayectorias mencionadas se observa en la figura 4.24. En ella se muestran todas las emisiones de la trayectoria 1 y se aprecia que sólo existe un cambio en la potencia de las emisiones que conforman el espectro, el cual es estable todo el tiempo.

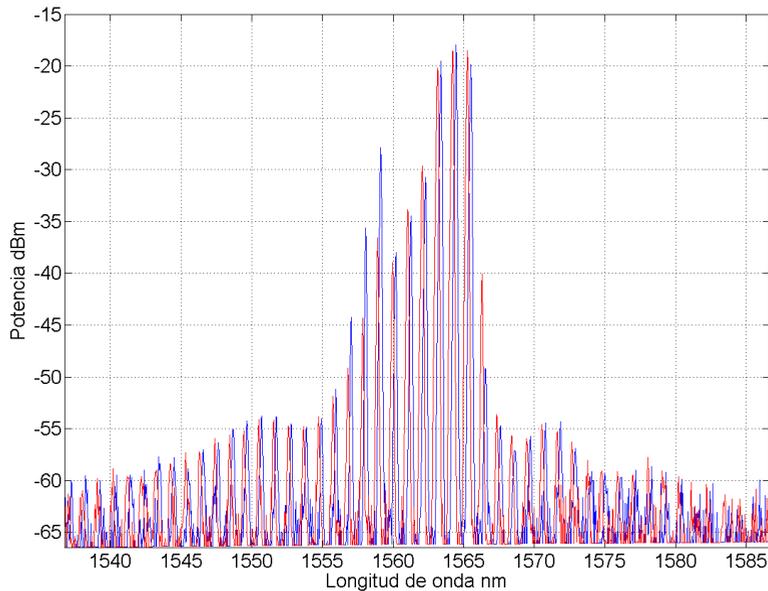


Figura 4.24 – Espectro de polarización $\Theta=35^\circ$ y $\Phi=-15^\circ$ (izquierda) y polarización $\Theta=35^\circ$ y $\Phi=-20^\circ$ (derecha). Las variaciones espectrales son mínimas

Trayectoria 1	Theta	Phi	Longitudes	Potencia	
				Máxima	Mínima
	24	6	7	-18.86	-26
	27	3	7	-18.86	-27
	30	0	8	-18.86	-39.86
	33	3	7	-20	-31
	36	6	7	-18.86	-38
	36	9	7	-18.86	-43
	33	12	6	-18.29	-38
	30	15	5	-18.86	-26
27	12	6	-18.86	-25	
24	9	7	-18.86	-28	
Trayectoria 2	Theta	Phi	Longitudes	Potencia	
				Máxima	Mínima
	70	-25	4	-17.5	-34
	75	-25	4	-16.1	-35
	80	-25	4	-15.45	-35.7
	85	-25	4	-17.33	-30
	90	-25	4	-17.33	-38
	90	-30	5	-17.24	-32
	90	-35	6	-17.23	-37
	90	-40	7	-19	-34
	85	-40	7	-19.2	-37
	80	-40	7	-19.3	-37
	75	-40	7	-20	38
	70	-40	7	-19.8	-31.5
70	-35	6	-18.6	-32	
70	-30	5	-14	-31.7	

Tabla 4.2 – Trayectorias de estabilidad

Trayectoria 3	Theta	Phi	Longitudes	Potencia	
				Máxima	Mínima
	30	0	6	-19.23	-32
30	5	5	-17	-35	
30	10	5	-18	-33	
35	10	4	-17	-25	
35	5	4	-17	-25	
35	0	5	-17	-35	
35	-5	6	-20	-33	
35	-10	6	-20	-32	
35	-15	7	-19.72	-34	
35	-20	7	-18.38	-34	
30	-10	7	-19	-32	
30	-5	7	-19	-39	

Tabla 4.2 – Trayectorias de estabilidad (Continuación).

La característica principal de las trayectorias estudiadas es que mientras la polarización se mantiene dentro de ellas, las emisiones en longitudes de onda múltiples conservan prácticamente las mismas características, el espectro de salida del arreglo se mantiene constante en longitud de onda y presenta algunas variaciones de potencia.

Es importante mencionar que el desplazamiento en longitud de onda que se presenta entre las emisiones producidas en las distintas trayectorias se debe a un efecto natural en el arreglo, donde la estabilización de las longitudes de las emisiones puede ocurrir dentro de un rango espectral alrededor de una longitud de onda central.

En los experimentos de este capítulo fue posible obtener sintonización del filtro de peine mediante la polarización, mediante la caracterización de las zonas dentro de la esfera de Poincaré donde la polarización es estable o inestable. Se comprobó la existencia de trayectorias dentro de estas zonas de estabilidad donde el espectro de emisión permanece prácticamente constante, lo que permite la reproducción de los experimentos con los mismos resultados.

CONCLUSIONES

Los láseres de fibra basados en SOAs tienen la capacidad de amplificar varias longitudes de onda simultáneamente gracias a las propiedades de este tipo de amplificadores. Esta característica es la base de los experimentos reportados en este trabajo para obtener un dispositivo sintonizable con arquitectura compacta, capaz de producir emisiones láser en múltiples longitudes de onda. El estudio de las propiedades de polarización de los láseres de fibra no había sido estudiado con detenimiento en trabajos previos, se aprovechó la sensibilidad de los SOA a la polarización para hacer estudios sobre sus efectos en las características espectrales del láser.

En el rango de amplificación del SOA se presenta un comportamiento lineal con respecto a la corriente que alimenta al diodo, lo que hace posible despreciar los efectos de la distorsión como frecuencias espurias. Los arreglos láser presentados logran una reducción del ancho espectral de un lóbulo de 56 nm a múltiples emisiones separadas 1 nm, con potencias que varían de acuerdo a la polarización de la luz. Si bien, el espaciamiento entre las emisiones no logró ser ajustable por medio de la presión en la fibra, se encontró que existe una relación entre la longitud del segmento de fibra de alta birrefringencia y la separación de las emisiones láser en múltiples longitudes de onda del filtro de peine.

Entre los efectos de la polarización en el espectro de emisión del láser se pueden enlistar el contraste en potencia entre emisiones láser y el número de líneas que pueden obtenerse, situación que fue comprobada al utilizar un sintetizador de polarización. Durante los experimentos no se observaron emisiones beneficiadas por polarizaciones ortogonales.

Es posible encontrar en la esfera de Poincaré zonas de inestabilidad en polarización, que no permiten obtener características espectrales estables, pero existen trayectorias donde la variación de las características espectrales del filtro peine es casi nula en todos los puntos. Las zonas dentro de la esfera de Poincaré con mayor estabilidad tienen como resultado las mejores condiciones espectrales, en cuanto a cantidad de longitudes de onda, contraste y máxima potencia.

Las longitudes de onda que se obtienen del filtro peine son amplificadas por el SOA de acuerdo a sus características de ganancia. De tal manera que se obtiene un límite de amplificación uniforme con el aumento de corriente en el SOA cuando la polarización de la luz se mantiene constante. Las características espectrales de los arreglos son reproducibles, lo que permite obtener los mismos resultados, siempre que se garantice la reproducción de las condiciones de polarización.

El resultado de este trabajo fue la utilización de un SOA para obtener un arreglo de láser de fibra con emisiones en longitudes de onda múltiple capaz de ser sintonizado en una ventana espectral más amplia que en caracterizaciones previas [14], con una corta separación entre emisiones de 1 nm y menores.

ANEXO 1

	Longitud de Onda										
	1543.4	1544.4	1545.4	1546.4	1547.5	1548.5	1549.6	1550.6	1551.7	1552.7	
140	-62.79	-62.062	-61.246	-62.404	-60.882	-60.211	-66.297	-58.854	-60.912	-62.154	
150	-62.429	-63.824	-59.146	-62.967	-66.323	-59.956	-66.297	-58.854	-60.862	-60.191	
160	-60.788	-66.359	-61.019	-65.626	-63.046	-59.435	-65.046	-58.746	-60.497	-56.641	
170	-61.836	-61.402	-63.914	-59.701	-61.205	-66.312	-56.909	-61.658	-55.699	-55.855	
180	-64.272	-65.157	-60.786	-62.884	-61.45	-59.687	-56.12	-56.801	-55.699	-55.215	
190	-64.286	-61.404	-59.418	-63.884	-63.804	-58.704	-58.04	-56.436	-56.114	-55.778	
200	-60.609	-64.884	-61.118	-66.16	-61.389	-56.855	-56.889	-55.995	-55.502	-55.908	
210	-61.867	-61.552	-65.795	-63.191	-58.854	-59.788	-59.132	-58.58	-58.069	-56.554	
220	-63.49	-62.276	-62.829	-61.279	-58.463	-58.304	-57.517	-58.816	-57.86	-56.681	
230	-64.563	-61.26	-62.184	-58.309	-59.633	-57.276	-58.877	-57.486	-56.685	-56.681	
240	-62.988	-60.977	-62.032	-58.928	-58.72	-59.76	-58.247	-58.666	-58.841	-57.674	
250	-60.14	-62.691	-63.888	-59.384	-59.017	-59.152	-56.19	-58.402	-56.815	-56.92	
260	-62.714	-65.388	-63.123	-61.975	-61.45	-60.29	-58.83	-60.224	-57.491	-58.47	
270	-61.219	-59.967	-60.861	-60.131	-59.115	-58.384	-57.529	-57.932	-56.996	-55.675	
280	-59.693	-59.323	-58.897	-57.851	-57.021	-55.475	-54.928	-55.051	-54.722	-54.384	
290	-59.126	-57.721	-57.603	-57.302	-56.655	-56.353	-55.113	-54.704	-54.267	-53.801	
300	-58.67	-57.14	-58.829	-57.495	-56.135	-56.013	-54.973	-54.167	-53.91	-53.564	
310	-60.688	-58.979	-58.409	-56.914	-56.292	-56.131	-54.674	-54.81	-53.73	-52.95	
320	-58.456	-57.895	-56.689	-56.592	-56.119	-55.108	-54.763	-53.954	-53.415	-52.628	
330	-58.756	-58.38	-56.974	-56.348	-55.796	-54.862	-54.557	-53.781	-53.625	-52.777	
340	-58.895	-58.772	-57.784	-56.468	-55.256	-55.372	-54.473	-53.675	-52.363	-51.762	
350	-59.03	-57.83	-57.204	-56.672	-54.922	-54.037	-54.123	-53.077	-52.004	-50.302	
360	-58.713	-57.53	-55.91	-56.311	-54.464	-53.777	-54.086	-52.316	-51.373	-50.113	
370	-58.484	-59.49	-57.848	-54.774	-53.866	-54.576	-53.273	-51.875	-50.22	-49.292	
380	-58.129	-58.866	-56.53	-54.688	-54.665	-53.966	-52.34	-50.881	-49.24	-47.923	
390	-58.803	-57.819	-56.209	-54.738	-54.784	-54.294	-51.75	-49.48	-47.994	-45.788	
400	-58.177	-57.61	-55.881	-54.265	-53.55	-52.486	-50.42	-48.543	-46.412	-44.359	
410	-58.145	-57.901	-55.9	-53.484	-52.867	-51.163	-49.098	-46.756	-42.513	-35.867	
420	-58.099	-56.862	-55.278	-53.333	-51.745	-49.786	-47.486	-45.257	-39.091	-31.867	
430	-57.739	-56.506	-54.566	-52.533	-49.374	-48.1	-47.486	-46.59	-35.548	-30.804	
440	-57.327	-55.662	-54.904	-51.027	-46.862	-47.537	-45.937	-40.454	-32.077	-29.853	
450	-57.128	-55.719	-53.028	-48.23	-41.48	-46.754	-44.888	-38.226	-29.521	-27.534	
460	-56.872	-55.249	-51.482	-42.742	-41.166	-46.048	-41.619	-33.551	-28.93	-27.08	
470	-56.759	-53.161	-49.594	-36.796	-40.522	-42.104	-36.852	-30.293	-29.586	-27.861	
480	-55.089	-52.729	-48.259	-42.558	-38.008	-28.003	-33.0799	-32.949	-28.984	-26.743	

Anexo 1 – Comportamiento de la potencia de emisión para el láser por longitud de onda.

		Longitud de Onda											
	1553.8	1554.841	1555.890	1556.939	1557.988	1559.087	1560.086	1561.185	1562.234	1563.333			
140	-60.721	-61.468	-63.568	-61.604	-61.055	-60.83	-61.801	-63.424	-64.927	-61.289			
150	-60.33	-66.231	-60.203	-61.024	-60.611	-58.745	-60.141	-60.006	-59.641	-59.06			
160	-57.16	-59.756	-64.705	-58.464	-56.755	-56.576	-53.829	-51.864	-47.33	-26.866			
170	-56.078	-56.641	-56.988	-57.231	-56.332	-55.424	-54.003	-51.297	-46.63	-24.667			
180	-55.692	-56.436	-56.283	-56.794	-55.518	-53.75	-51.518	-45.512	-38.396	-27.481			
190	-55.921	-56.894	-56.469	-55.898	-56.547	-54.286	-51.011	-45.299	-35.184	-26.693			
200	-55.243	-56.92	-56.781	-55.96	-55.415	-53.384	-49.405	-40.806	-35.269	-27.643			
210	-56.08	-56.056	-56.3	-56.683	-55.631	-53.519	-51.063	-43.4	-32.875	-24.465			
220	-56.23	-55.948	-55.655	-55.698	-55.142	-53.116	-50.332	-43.978	-32.089	-24.087			
230	-55.752	-55.341	-55.772	-55.628	-55.308	-53.053	-50.887	-41.717	-31.455	-23.797			
240	-55.477	-55.453	-55.442	-55.864	-55.341	-52.152	-49.474	-40.24	-30.538	-23.724			
250	-55.293	-54.937	-55.403	-55.872	-54.707	-51.974	-48.408	-37.954	-30.386	-23.469			
260	-55.565	-55.718	-54.863	-55.106	-55.164	-52.307	-48.821	-38.31	-29.942	-23.945			
270	-55.628	-55.181	-55.261	-55.565	-55.988	-51.386	-48.015	-38.245	-30.435	-22.532			
280	-53.858	-53.968	-54.251	-54.097	-53.382	-48.526	-47.369	-38.97	-29.185	-22.316			
290	-53.676	-54.551	-54.259	-53.942	-53.15	-47.76	-46.796	-39.233	-27.333	-22.512			
300	-53.422	-53.607	-54.619	-54.184	-53.172	-47.456	-46.42	-36.893	-25.153	-23.762			
310	-52.904	-53.678	-54.125	-54.275	-52.8	-46.711	-46.87	-33.464	-24.496	-23.187			
320	-52.769	-53.045	-53.487	-53.468	-52.413	-46.191	-46.505	-30.692	-24.574	-22.314			
330	-52.217	-53.357	-53.397	-53.445	-52.097	-45.927	-44.831	-28.893	-25.243	-22.207			
340	-51.643	-52.378	-52.686	-53.035	-51.464	-46.056	-42.157	-28.193	-25.444	-21.575			
350	-51.166	-52.336	-52.857	-52.962	-51.043	-45.869	-43.62	-27.593	-25.19	-21.959			
360	-48.994	-51.235	-52.593	-52.537	-49.361	-45.443	-41.465	-27.49	-25.64	-21.331			
370	-48.85	-50.927	-51.883	-51.781	-48.361	-44.785	-39.616	-27.47	-24.815	-21.016			
380	-46.721	-49.32	-52.246	-51.855	-47.786	-43.828	-38.878	-28.333	-24.43	-20.924			
390	-44.016	-48.772	-51.181	-50.83	-47.099	-43.216	-39.093	-28.593	-23.851	-21.18			
400	-39.934	-47.615	-51.437	-50.25	-46.996	-42.945	-38.823	-28.551	-22.968	-20.769			
410	-34.546	-46.666	-50.128	-49.462	-46.444	-42.49	-39.446	-28.16	-22.555	-21.102			
420	-31.668	-45.569	-49.548	-49.202	-46.684	-42.679	-38.991	-27.453	-21.946	-21.081			
430	-31.543	-44.247	-48.891	-49.034	-46.387	-42.522	-38.397	-25.822	-21.902	-21.601			
440	-30.626	-43.141	-48.39	-49.226	-46.106	-42.364	-37.521	-24.679	-21.96	-21.432			
450	-28.871	-40.018	-47.725	-48.831	-45.518	-41.928	-35.563	-24.744	-21.946	-21.298			
460	-26.273	-36.74	-47.108	-48.144	-46.034	-40.405	-32.424	-25.09	-26.38	-20.723			
470	-24.974	-36.415	-46.09	-47.467	-44.493	-39.607	-31.56	-25.419	-21.013	-20.606			
480	-24.352	-36.4729	-44.966	-47.325	-44.4769	-40.5099	-31.8649	-25.152	-20.6209	-20.314			

Corriente del amplificador

Anexo 1 (continuación)

Longitud de Onda												
	1563.333	1564.382	1565.431	1566.480	1567.529	1568.628	1569.677	1570.776	1571.825	1572.873		
140	-61.269	-60.723	-62.672	-60.912	-62.013	-59.803	-62.01	-61.306	-63.506	-64.094		
150	-59.06	-57.695	-56.288	-56.901	-58.647	-58.466	-59.787	-60.274	-61.448	-61.465		
160	-26.886	-25.582	-44.766	-51.639	-54.063	-55.127	-56.744	-58.211	-59.359	-63.471		
170	-24.667	-22.07	-29.947	-50.314	-53.433	-55.116	-56.994	-58.974	-57.391	-57.783		
180	-27.481	-22.481	-21.642	-39.685	-50.103	-53.476	-55.39	-56.46	-57.069	-57.513		
190	-26.693	-22.477	-21.331	-27.488	-48.375	-52.785	-54.414	-56.455	-56.334	-57.68		
200	-27.643	-22.411	-21.242	-23.629	-44.493	-51.481	-54.639	-55.232	-56.595	-58.981		
210	-24.465	-21.458	-19.72	-24.629	-49.83	-54.626	-56.417	-56.775	-57.558	-58.981		
220	-24.087	-21.438	-19.628	-23.274	-48.935	-53.961	-56.495	-57.977	-58.422	-56.807		
230	-23.759	-21.212	-19.681	-21.338	-47.536	-54.109	-56.022	-56.822	-56.52	-56.951		
240	-23.724	-21.712	-19.608	-19.132	-44.815	-53.686	-56.014	-56.399	-56.003	-56.684		
250	-23.499	-21.993	-19.99	-17.973	-35.153	-52.803	-56.153	-55.736	-55.075	-55.87		
260	-23.345	-21.783	-19.827	-17.629	-28.319	-52.49	-55.68	-56.001	-57.133	-56.222		
270	-22.532	-21.91	-19.596	-17.808	-25.4	-51.206	-54.822	-56.087	-55.619	-56.287		
280	-22.316	-21.364	-19.872	-17.984	-22.42	-48.522	-53.982	-54.836	-55.569	-56.045		
290	-22.512	-20.756	-20.408	-18.756	-20.082	-31.426	-52.325	-53.229	-53.97	-54.148		
300	-23.262	-21.041	-21.215	-19.134	-20.26	-26.611	-50.226	-52.749	-53.253	-52.613		
310	-23.187	-21.2	-20.104	-18.872	-19.931	-26.756	-49.65	-52.142	-52.449	-52.448		
320	-22.314	-21.719	-19.306	-18.881	-20.38	-25.726	-48.167	-51.459	-51.933	-50.817		
330	-22.207	-21.503	-18.943	-18.656	-21.121	-22.891	-43.769	-50.867	-51.374	-50.01		
340	-21.575	-21.387	-18.661	-18.366	-21.601	-21.564	-39.227	-50.463	-50.463	-47.386		
350	-21.959	-21.26	-18.614	-19.146	-21.756	-21.017	-32.927	-49.135	-49.254	-46.135		
360	-21.331	-20.922	-18.364	-19.528	-22.267	-20.206	-32.548	-49.521	-48.982	-44.882		
370	-21.016	-20.81	-18.928	-19.908	-21.442	-20.593	-31.968	-48.981	-48.981	-46.024		
380	-20.924	-21.221	-18.05	-19.666	-21.588	-19.844	-31.621	-48.556	-47.311	-41.983		
390	-21.18	-20.941	-18.062	-19.979	-21.165	-19.959	-30.746	-46.318	-46.318	-41.444		
400	-20.769	-21.287	-17.943	-19.749	-20.784	-20.342	-28.13	-45.623	-45.433	-40.667		
410	-21.102	-21.459	-17.691	-19.746	-20.854	-20.245	-26.152	-43.026	-44.815	-41.041		
420	-21.081	-21.448	-17.538	-20.27	-20.44	-21.181	-24.153	-40.6	-45.097	-40.811		
430	-21.601	-21.298	-17.245	-20.299	-20.983	-20.965	-23.64	-40.267	-45.325	-41.753		
440	-21.432	-21.306	-17.068	-21.083	-20.815	-21.074	-22.548	-41.566	-46.285	-41.309		
450	-21.298	-20.84	-17.393	-21.514	-21.175	-20.409	-23.197	-41.386	-46.645	-40.822		
460	-20.723	-20.857	-17.711	-22.043	-21.257	-19.749	-23.11	-40.993	-44.934	-39.688		
470	-20.606	-20.933	-17.652	-21.956	-20.654	-20.121	-22.912	-37.2	-43.794	-38.677		
480	-20.314	-21.061	-18.102	-22.131	-20.556	-20.8679	-21.51	-31.9549	-43.497	-41.039		

Corriente del amplificador

Anexo 1 (continuación)

	Longitud de Onda									
	1573.972	1575.021	1576.120	1577.219	1578.268	1579.367	1580.466	1581.515		
140	-61.416	-62.112	-64.6	-64.928	-64.837	-65.095	-66.004	-65.993		
150	-62.084	-59.788	-66.045	-62.801	-59.825	-61.862	-62.665	-65.131		
160	-60.625	-61.836	-66.045	-59.767	-66.023	-66.014	-62.748	-62.33		
170	-63.556	-66.052	-59.07	-63.686	-63.602	-64.283	-59.837	-65.993		
180	-59.885	-58.328	-61.578	-59.233	-60.209	-61.311	-59.487	-63.7		
190	-58.859	-58.47	-64.332	-58.896	-58.286	-60.234	-61.004	-62.098		
200	-58.662	-57.745	-64.588	-58.563	-57.658	-60.428	-60.569	-61.657		
210	-57.932	-60.658	-58.391	-63.488	-60.331	-59.907	-60.171	-61.749		
220	-57.229	-59.331	-60.976	-61.394	-59.198	-61.945	-64.565	-60.531		
230	-60.313	-60.713	-60.961	-61.528	-59.948	-59.772	-59.882	-61.472		
240	-57.457	-58.953	-62.497	-59.006	-58.17	-59.063	-59.038	-62.162		
250	-56.862	-57.61	-62.92	-60.22	-58.74	-59.468	-58.98	-59.156		
260	-56.731	-58.001	-63.379	-60.858	-58.269	-60.196	-60.757	-61.798		
270	-57.269	-56.81	-59.338	-58.591	-59.607	-59.615	-58.508	-59.658		
280	-55.672	-56.855	-58.276	-58.215	-59.604	-58.613	-58.293	-59.081		
290	-53.931	-54.726	-56.291	-57.43	-57.119	-58.086	-57.077	-58.271		
300	-52.673	-52.944	-55.119	-56.48	-57.215	-56.932	-58.057	-57.654		
310	-51.968	-52.608	-55.022	-55.711	-56.997	-57.297	-57.182	-58.371		
320	-50.075	-52.451	-54.403	-55.725	-56.116	-56.52	-56.814	-57.836		
330	-47.843	-50.493	-54.047	-55.735	-55.545	-56.135	-56.402	-57.403		
340	-39.854	-48.828	-53.895	-55.369	-56.18	-56.917	-57.186	-57.389		
350	-35.025	-44.687	-52.176	-54.982	-55.757	-56.264	-56.625	-57.305		
360	-28.486	-37.455	-50.612	-53.813	-55.01	-56.323	-56.303	-56.948		
370	-27.301	-32.087	-47.796	-51.477	-54.818	-56.026	-56.161	-57.117		
380	-26.361	-28.838	-44.705	-50.937	-54.133	-55.849	-56.543	-58.037		
390	-26.204	-28.028	-43.353	-49.247	-53.374	-55.796	-56.705	-57.394		
400	-27.438	-25.837	-40.877	-48.176	-52.783	-55.42	-55.903	-57.298		
410	-28.242	-24.762	-37.526	-46.876	-52.894	-54.781	-55.542	-57.494		
420	-29.402	-23.822	-35.914	-46.786	-52.359	-54.688	-54.839	-56.656		
430	-29.274	-23.068	-32.913	-45.226	-52.317	-54.694	-55.144	-55.874		
440	-30.388	-23.056	-31.091	-44.949	-51.826	-54.037	-55.36	-56.159		
450	-28.917	-22.586	-30.802	-43.66	-51.911	-54.38	-54.963	-56.349		
460	-28.708	-22.808	-29.156	-43.269	-54.804	-54.027	-54.786	-56.373		
470	-30.118	-23.388	-27.966	-43.161	-51.851	-53.324	-54.066	-56.606		
480	-32.896	-23.943	-27.013	-43.334	-51.927	-52.896	-54.2289	-55.673		

Corriente del amplificador

Anexo 1 (continuación)

A2.1 Especificaciones del SOA



Covega Corporation
 10335 Guilford Road, Jessup, MD 20794, USA
Phone: +1 877.226.8342 **Fax:** +1 240.456.7200
Email: sales@covega.com **Web:** <http://www.covega.com>

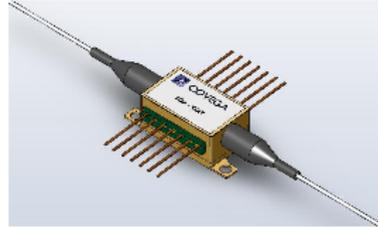
SOA 1013: 1550nm C-band Semiconductor Optical Amplifier

7.1.2.SP.1013 Rev E

Description

COVEGA's 1013 SOA is a polarization insensitive optical amplifier housed in a standard 14-pin butterfly package. Advanced epitaxial wafer growth and opto-electronic packaging techniques enable high output saturation power, low noise figure, and large gain across a broad spectral bandwidth.

Packaging options include input and output isolators, SMF and PMF fiber tails and choice of connectors.



Features

Applications

- ✓ Optical Booster and In-line Amplification in WDM Metro Network Systems
 - ✓ Optical Loss Compensator
 - Channel Launch (Modulator)
 - Mid-Stage (Add/Drop)
 - ✓ Pre-Amplifier
 - ✓ High Speed optical on/off switch
- High Fiber-to-Fiber Gain
 - Broad Spectral Bandwidth
 - High Fiber-to-Fiber Gain

Specifications

CW; T (Chip) = 25°C, T (Case) = 0 - 70°C

Parameter		Min	Typ	Max	
Operating Current	I_{OP}		500	600	mA
Operating Wavelength Range: C-band	Λ	1528		1562	nm
Peak Wavelength	λ_C	1480	1500	1520	nm
Optical 3 dB Bandwidth	BW	70	74		nm
Saturation Output Power @ -3 dB	P_{SAT}	12	14		dBm
Small Signal Gain over C-band Λ @ Pin = -20 dBm	G	10	13		dB
Gain Flatness over C-band Λ @ Pin = -20 dBm	ΔG		5	7	dB
Gain Ripple (p-p) @ I_{OP}, λ_C	δG		0.1	0.5	dB
Polarization Dependent Gain	PDG		1.0	1.5	dB
Noise Figure	NF		8	9.5	dB
Forward Voltage	V_F		1.6	1.8	V
TEC Operation (typ / max @ $T_{CASE} = 25^\circ C / 70^\circ C$)					
- TEC Current	I_{TEC}		0.23	1.5	A
- TEC Voltage	V_{TEC}		0.5	3.5	V
- Thermistor Resistance	R_{TH}		10K		Ω

SPECIFICATIONS ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE

The picture is a representation. The actual part may vary from the one shown.

A2.1 Especificaciones del SOA

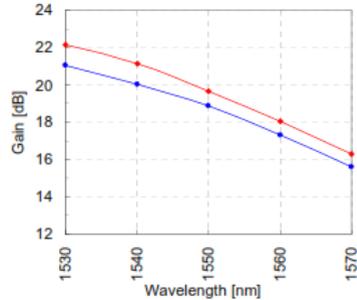
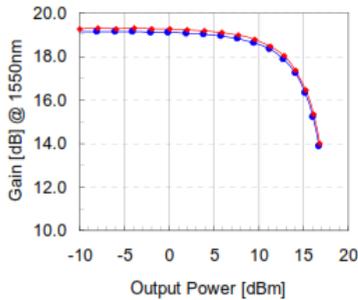


COVEGA

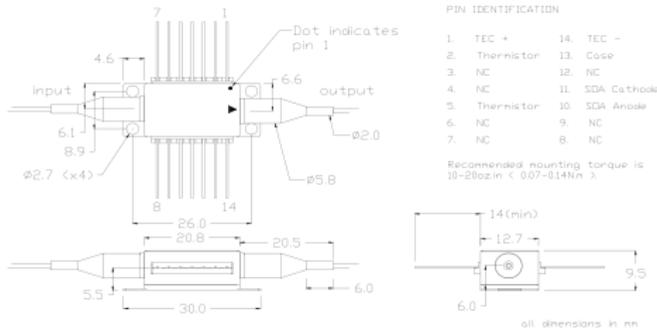
Covega Corporation
 10335 Guilford Road, Jessup, MD 20794, USA
 Phone: +1 877.226.8342 Fax: +1 240.456.7200
 Email: sales@covega.com Web: <http://www.covega.com>

SOA 1013

Performance



Packaging



Ordering Information

SOA 1013 - X - 0 - X - X - X - X - X

X	0	X	X	X	X	X	Numeric
Isolator	Reserved	Fiber jacket configuration*	Input Fiber	Output Fiber	Input Connector	Output Connector	Reserved
0 = none		U = SMF-8, loose tube	S = SMF	S = SMF	A = FC/APC	A = FC/APC	
1 = input only		T = SMF-28, tight jacket	P = PMF#	P = PMF#			
2 = output only		V = PMF 1550 nm, loose tube#					
3 = input & output							

Isolators are available only on SM fiber configurations

* see separate fibertail options datasheet

© Covega Corporation - All rights reserved

A2.2 Especificaciones del Filtro Fabry Perot



Applications

- Optical Performance Monitoring
- Spectrum Analysis
- Tunable Optical Noise Filtering
- Tunable Channel Drop for Ultra DWDM
- Tunable Sources
- Optical Sensing

Features

- Ideal for low cost, high volume applications
- High resolution for precise spectrum analysis
- Large dynamic range permits accurate measurements
- Efficient low loss design
- Tunable across O, E, S, C & L bands
- Wide ranges of user-specified parameters
- Thermally stable
- Vibration and shock resistant
- Small footprint
- Low power requirements
- Qualified for Telcordia GR 2883
- All-fiber platform
- Compact for OEM application

Description

The Micron Optics FFP-TF2 Fiber Fabry-Perot (FFP) Tunable Filter is a specialized filter based on the all-fiber Fabry-Perot etalon technology. The FFP tunable filter passes wavelengths that are equal to integer fractions of the cavity (etalon) length; all other wavelengths are attenuated according to the Airy function.

The key to the elegant design of the FFP tunable filter is the lensless fiber construction. There are no collimating optics or lenses, thus the FFP tunable filter achieves high finesse and maintains a low loss transmission profile. Micron Optics has eliminated the pitfalls of other Fabry-Perot component technologies, including misalignment, environmental sensitivity, and extraneous modes.



The all-fiber FFP tunable filter follows the Airy function so closely that engineers can design it into the opto-electronic systems with a high degree of confidence that it will provide results very close to the theoretical mathematical model. Low loss, high isolation, and accurate power or wavelength measurements are just a few of the characteristics resulting from an ideal Airy function.

The FFP-TF2 design provides improved etalon alignment for stable long-term, high reliability, and Telcordia-qualified performance at a more attractive price. Several standard low-cost configurations are readily available for quick delivery. Custom high performance multi-band configurations are also available for special uses including sensing, biotech, and scientific applications. Options available include full-band tuning from 1260nm to 1620nm along with the largest finesse range in the industry (from finesse 10 to 16,000). The FFP-TF2 is not a direct drop-in replacement for the original FFP-TF (due to drive voltage and packaging differences), but these filters are now more suitable in many volume applications.



Products displaying the "Micron Optics Tuned" logo include Micron Optics tunable technologies insuring high quality and performance.

1

A2.2 Especificaciones del Filtro Fabry Perot

Fiber Fabry-Perot Tunable Filter| FFP-TF2

Specifications

FFP-TF2

Optical Properties

Operating Wavelength Range ¹ (Custom)	800 - 1200 nm			
Operating Wavelength Ranges ¹ (Standard)	O-Band	1260 - 1360 nm	C-Band	1520 - 1570 nm
	E-Band	1360 - 1480 nm	L-Band	1570 - 1620 nm
	S-Band	1480 - 1520 nm	C & L Band	1520 - 1620 nm
Free Spectral Range (fixed FSR but selectable within this range)	100 to 45,000 GHz (800 pm to 340 nm at 1550 nm)			
Standard Finesse Values (nominal)	10, 40, 100, 200, 500,			
(For non-standard finesse values up to 16,000 - Contact Micron Optics)	650, 1000, 2000, 4000			
3dB Bandwidth	Equals desired FSR/Finesse			
Insertion Loss ²	<1.5 dB			
Polarization Dependent Loss ²	<0.2 dB			
Input Power (Maximum) ³	< 100mW (for finesse <200)			
Glitch Free Dynamic Range (GFDR)	> 15 dB			

Electrical Properties

Tuning Voltage/FSR	< 18 V
Capacitance	< 3.0 µF
Cycling Speed Over 1 FSR	800 Hz (max)
Maximum Tuning Voltage	70 V

Mechanical Properties

Dimensions	13.5 mm x 25.8 mm x 57.2 mm
------------	-----------------------------

Weight	53 g
Mounting Holes	(4) #1-72 UNF x 0.16 inch deep
Cable Jacket (loose)	900 µm buffer tubing
Cable Length	>1 m
Connector	See Options

Environmental Properties ^{2,4}

Operating Temperature ¹	-20° to 80°C
Δ Operating Voltage/Operating Temperature	< 18 V
Δ Insertion Loss/Operating Temperature (dependent on FSR)	< 0.5 dB
Δ Insertion Loss/Vibration	< 0.5 dB

Notes:

1. Specifications are dependent on filter configuration. Please contact Micron Optics for final specifications.
2. Typical value; final value is dependent on Free Spectral Range and Finesse.
3. Maximum input power level depends on finesse value. Generally, the higher the finesse, the lower the maximum input power level.
4. These parameters are not available for all possible configurations. Please contact Micron Optics for details.

Ordering Information

FFP-TF2 - www-bbbufff-ii

(Example: FFP-TF2 -1550 -040G0200 -2.5)

www: Wavelength Band	bbb: Bandwidth	u: Bandwidth Unit	fff: Finesse	ii: Insertion Loss
1310 (1260 - 1360 nm)	Specify bandwidth (i.e: 040 = 40GHz)	G GHz	Specify finesse (i.e: 0200=Finesse of 200)	Specify Loss (i.e: 2.5=2.5dB loss)
1550 (1520 - 1570 nm)				
1420 (1360 - 1480 nm)				
1600 (1570 - 1620 nm)				
1500 (1480 - 1520 nm)				
1580 (1520 - 1620 nm)				

Options

060 FC/SPC Connectors (Fusion Spliced)	061 FC/APC Connectors (Fusion Spliced)	062 SC/SPC Connectors (Fusion Spliced)
063 SC/APC Connectors (Fusion Spliced)	065 FC/APC Connectors (Connectorized)	069 Other Connectors



Micron Optics, Inc.
1852 Century Place NE
Atlanta, GA 30345 USA
phone 404 325 0005
fax 404 325 4082
www.micronoptics.com

Copyright ©2010, Micron Optics, Inc FFP-TF2_0906.b_0906.1

ANEXO 2 - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS PRINCIPALES DISPOSITIVOS

A2.2 Especificaciones del Filtro Fabry Perot

Fiber Fabry-Perot Tunable Filter| FFP-TF2

Applications

Optical Performance Monitor

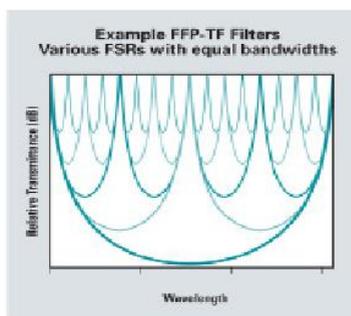
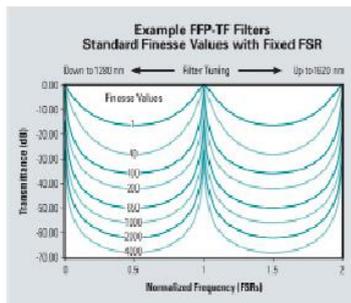
Micron Optics FFP Technology is the base for the highest performing optical performance monitor available today, monitoring up to 400 channels in the C band alone. The high resolution, deep dynamic range and continuous smooth tuning combine to allow accurate dense channel analysis. For example, Micron Optics Finesse 10,000 filters have a contrast factor of 76 dB.

Tunable Optical Noise Filtering & Channel Locking

Micron Optics FFP Technology is used in telecom systems around the world for optical noise filtering and dynamic channel locking. A key attribute is the extreme low loss nature (to less than 1.5 dB) of the filter and its reliable locking capability. Data from thousands of filters in the field has shown a projected reliability of less than 80 FITs. The resulting benefit is an extremely low bit error rate and high network receiver sensitivity.

Tunable Channel Drop for Ultra DWDM (< 25 GHz spacing)

The rapid tuning and locking capabilities of the Micron Optics FFP Technology enables reliable channel selection and dropping applications in dynamic optical networks. The high degree to which the FFP filters follow the Airy Function theory allows optical engineers to accurately design system performance parameters, without the overhead of allowing for imprecise measurements. See the table below for a listing of our standard filters used for the most common applications.



To assist in filter selection, three of the highest volume applications are listed below. These filters typically have short lead times. In addition to these standard filters, Micron Optics will be pleased to produce custom filters. Call or e-mail our sales engineers to best match our filter specifications to your applications.

FFP-TF2 Standard Filters (for common applications)

Parameter (Nominal Values)	Unit	Channel Drop	Optical Channel Monitor	Optical Channel Analyser
Wavelength Range		C + L Band		
Bandwidth	pm	500	133	50
	GHz	62.5	16.67	6.25
Free Spectral Range (FSR)	nm	100	100	100
	GHz	12,500	12,500	12,500
Finesse		200	750	2,000
Insertion Loss	dB	<1.5	<2.0	<2.5

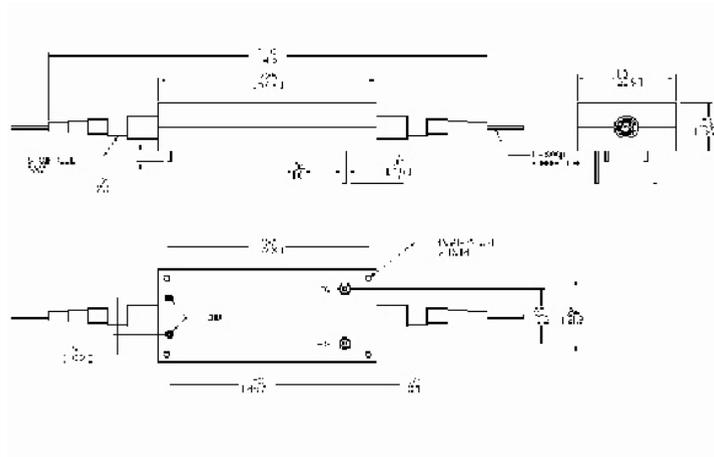


Copyright ©2010, Micron Optics, Inc FFP-TF2_0906.b_0906.1

A2.2 Especificaciones del Filtro Fabry Perot

Fiber Fabry-Perot Tunable Filter| FFP-TF2

Dimensions



Notes:
All dimensions in inches.
[mm]

A2.3 Especificaciones del Sintetizador de Polarización

INSTRUMENTS

Polarization Synthesizer/Analyzer – PolaFlex™



PolaFlex™ is a turn-key instrument that can generate and maintain any desired state of polarization (SOP), regardless of the input SOP. It combines General Photonics' patented polarization controller, in-line polarimeter, and control algorithm into an instrument that functions as both a deterministic polarization state generator and a polarization analyzer. The generated SOP and the corresponding Poincaré Sphere can be readily displayed on a computer screen via USB interface. To generate a desired SOP, a user simply inputs the corresponding Stokes parameters using the front panel keypad. The instrument automatically searches for the SOP and maintains it against input SOP fluctuations. Another attractive feature is that the user can scan through 6 distinct SOPs (0°, 90°, ±45°, RHC and LHC) sequentially with user defined speed for Mueller matrix calculations, or select any of the 6 states with the touch of a button. Furthermore, the user can select multiple predetermined SOP traces for the instrument to generate, emulating certain common polarization variations. The instrument can also function

as a polarization scrambler, generating random SOP scans with user-defined scanning speed. Finally, with the internal polarization controller disabled, PolaFlex™ can function as an in-line polarimeter, displaying the instantaneous SOP and DOP of the input light beam. This instrument can be quickly and easily calibrated using its built-in self-calibration program to optimize DOP and SOP measurement and control at special wavelengths and temperatures. PolaFlex™ puts all of the tools necessary for polarization management at your fingertips.

Specifications:

Operating Wavelength	1550 ± 50 nm
Insertion Loss	1.2 dB, typical
SOP tracking accuracy ¹	0.5°
SOP step time (trace mode)	3 ms/ degree
SOP measurement accuracy	± 1%
Target SOP Resolution	0.1°
DOP accuracy	± 2%
Input Stokes Parameter Resolution	0.01
Optical Power Accuracy	± 0.25 dB
Return Loss	55 dB
PDL	< 0.25 dB.
PMD	< 0.1 ps
Operating Power Range	-15 to +10 dBm
Optical Power Damage Threshold	300 mW
Operating Temperature	0 ~ 40 °C
Storage Temperature	-20 ~ 60 °C
Power Supply	100 - 120 VAC, 50 - 60 Hz or 200 - 240 VAC, 50 - 60 Hz
Communication Interfaces	RS-232, USB, Ethernet, GPIB
Software	PolaView™ (included)
Dimensions	2U, 19" half rack width 3.5" (H) x 8.5" (W) x 14" (L)

Note: Values are referenced without connectors.

1. At power > 0 dBm.

Features:

- Multiple Operation Modes
- Deterministic SOP generation
- Deterministic SOP trace generation
- Polarization analysis
- Polarization scrambling
- Input polarization independent

Applications:

- Deterministic SOP generation
- SOP/DOP monitoring
- Polarization Analysis
- Polarization Stabilization
- Optical SNR
- Sensor systems

General Photonics Corporation 909.590.5473 <http://www.generalphotonics.com> -9-

A2.3 Especificaciones del Sintetizador de Polarización

INSTRUMENTS

Polarization Synthesizer/Analyzer – PolaFlex™

Typical Performance Data:

Polarization stabilization

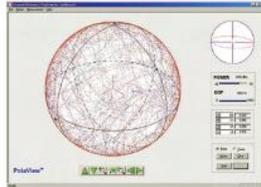


Fig. 1 Input polarization pattern: saw wave scramble at 5 Hz, taken over 20 sec.

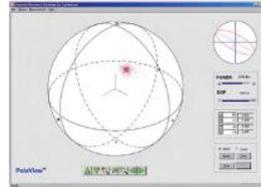


Fig. 2 Output polarization stabilized by PSY-101 against the same polarization scrambled input, taken over 20 sec.

Special polarization state/trace generation

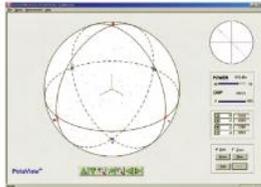


Figure 3. Poincaré sphere pole state generation

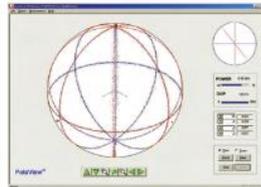


Figure 4. Trace scans

Scrambling

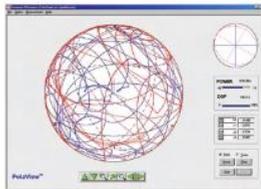


Figure 5. Saw scramble trace, 1Hz after 1 minute

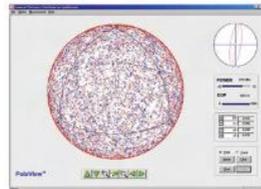


Figure 6. Random scramble, 100 Hz after 1 minute

Ordering Information:

PSY – 101 –

Connector Type:
FC/PC, FC/APC
SC/PC, SC/APC
Others specify

Note: Please specify power supply when ordering

Accessories

NoTail™ Polarizer p. 78
NoTail™ Isolator p. 79

ANEXO 2 - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS PRINCIPALES DISPOSITIVOS

A2.4 Especificaciones de la fibra HB1500T



Polarization-Maintaining Fiber: Bow-Tie Style



HB1500T

Description

Thorlabs' HB fiber is ideal for fundamental research applications, and is available at various wavelengths between 450 and 1500 nm. The HB1500T has a nominal MDF of 10.5 μm , and is ideally suited to both laser and integrated optic chip pigtailed.

Specifications

Geometrical & Mechanical	
Cladding Diameter	125 \pm 1 μm
Coating Diameter	400 μm \pm 5%
Core-Clad Concentricity	<0.6 μm
Coating Material	Dual-Layer Acrylate
Proof Test Level	100 or 200 kpsi (1% or 2%)

Optical	
Numerical Aperture (nominal)	0.11 - 0.13
Attenuation ¹	<2 dB/km
Design Wavelength ²	1550 nm
Cut-Off Wavelength	1290 - 1540 nm
Mode Field Diameter ³	10.5 μm
Beat Length ⁴	<2.0 mm



¹Attenuation is a worst-case value, quoted for the shortest design wavelength.
²The Design Wavelength is the wavelength (or wavelengths) at which the fiber is typically used. In practice, the fiber will transmit the TEM₀₀ mode at wavelengths of up to approximately 200 nm longer than the cut-off wavelength.
³The Mode Field Diameter is a nominal, calculated value, estimated at the operating wavelength(s) using a typical value of numerical aperture and cut-off wavelength.
⁴Beat Length is measured at 633 nm for all HB fiber types. To a first approximation, beat-length scales directly with operating wavelength.

US, Canada, & South America: +1-973-300-3000 | France: +33 (0) 970 444 844 | Europe: +49 (0) 8131-5956-0 | UK & Ireland: +44 (0)1353-654440
 Brazil: +55-16-3413 7062 | Scandinavia: +46-31-733-30-00 | Japan & Asia: +81-3-5979-8889 | China: +86 (0)21-60561122

www.thorlabs.com

April 2, 2013
12420-S01, Rev C

REFERENCIAS

- [1] Deyu Zhou, Paul R. Prucnal, Ivan Glesk, "A Widely Tunable Narrow Linewidth Semiconductor Fiber Ring Laser," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 10, No. 6, pp. 781-783, junio de 1998.
- [2] Hongxin Chen, "Multiwavelength fiber ring laser by use of a semiconductor optical amplifier", Optics Letters, Vol. 30, No. 6, pp. 619-621, marzo de 2005.
- [3] S. Pascual Vázquez, Juan Hernández Cordero "Fibras ópticas láser: cómo cocinar vidrio para generar luz", Materiales Avanzados, Número 9, pp. 5-14, 2007.
- [4] Paul Urquhart, "Review of rare earth doped fibre lasers and amplifiers" IEEE Proceedings, Volumen 135, Número 6, pp. 385-407, diciembre 1998.
- [5] <http://www.clpu.es/en/science-and-education/180.html> ¿Qué son la emisión espontánea, la emisión estimulada y la inversión de población?, Centro de Láseres Pulsados Ultracortos Ultraintensos, Universidad de Salamanca, fecha de consulta: marzo de 2013.
- [6] Violeta A. Márquez Cruz, Sensores polarimétricos de fibra óptica para la caracterización de películas delgadas (Tesis de Maestría), Facultad de Ingeniería, UNAM, 2007.
- [7] Juan Hernández Cordero, Valery A. Kozlov, Adrian L. G. Carter, T. F. Morse, "Polarization effects in a high-birefringence elliptical fiber laser with a Bragg grating in a low-birefringence fiber", Applied Optics, Vol. 39, Número 6, pp. 972-977, febrero 2000.
- [8] Andrea Rosales García, Iván Cruz Torres, Juan Hernández Cordero, "Fiber lasers with hybrid birefringence resonators", Optics and lasers in engineering, Volumen 44, pp. 1027-1038, 2006.
- [9] <http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/index.htm> Tutorial de comunicaciones ópticas, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad de Valladolid, fecha de consulta: noviembre de 2012.

- [10] Govind P. Agrawal, "*Fiber optic communication systems*", tercera edición, ed. John Wiley & Sons, 2002.
- [11] Donald R. Zimmerman, Leo H. Spiekman, "*Amplifiers for the Masses: EDFA, EDWA, and SOA. Amplets for Metro and Access Applications*", Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, No. 1, 2004.
- [12] Luis A. Zenteno, Donnell T. Walton, "*Novel fiber lasers and applications*", Optics and Photonics News, 1047-6938, pp. 38-62, 2003.
- [13] Rüdiger Paschotta, <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html> *Encyclopedia of laser physics and technology*, actualizada: noviembre de 2008, fecha de consulta: noviembre de 2012.
- [14] S. Yamashita, T. Baba, "*Spacing-tunable multiwavelength fibre laser*", Electronics Letters Volumen 37, Número 16, agosto 2001.
- [15] A. González García, O. Pottiez, R. Grajales Coutiño, "*Estudio experimental de un láser sintonizable en longitud de onda usando un filtro de Sagnac con selectividad espectral mediante cambios en la temperatura*", Revista Mexicana de Física, Volumen 56, Número 4, agosto 2010.
- [16] Yong Wook Lee, Jaehoon Jung, Byoung-ho Lee, "*Multiwavelength-Switchable SOA-Fiber Ring Laser Based on Polarization-Maintaining Fiber Loop Mirror and Polarization Beam Splitter*", IEEE Photonics Technology Letters, Volumen 16, Número 1, enero 2004
- [17] FIBERCORE, "*FIBERCORE-HB-T-Telcom-Polarization-Maintaining-Fiber-Spec-Sheet.pdf*", fecha de consulta: agosto de 2013.
- [18] Welkom Bij Diamond Kimberlit Bv, http://diamond-kimberlit.nl/nieuw/media/library/docs/PM_Technology.pdf Actualizada: no disponible, fecha de consulta: agosto de 2013.