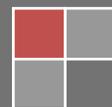


2012

SISTEMAS LÁSER CON AMPLIFICADORES SEMICONDUCTORES Y DE FIBRA ÓPTICA

Comparación de las características espectrales y regímenes de operación que pueden obtenerse con sistemas láser de fibra óptica utilizando dos tipos de amplificadores ópticos: amplificadores de fibra de erbio (EDFAs) y amplificadores semiconductores.





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES

**SISTEMAS LÁSER CON AMPLIFICADORES
SEMICONDUCTORES Y DE FIBRA ÓPTICA**

Tesis para optar al grado de Ingeniero en Telecomunicaciones

Miguel Ángel Yépez Torres

Tutor: Dr. Juan Hernández Cordero

México, D.F.

2012

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico con todo cariño principalmente a mis padres y a Dios que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento.

Gracias por todo su apoyo y amor, por estar conmigo durante este largo y a veces difícil camino, por aconsejarme y brindarme su apoyo incondicional, gracias por la paciencia y la confianza que depositaron en mí.

Se la dedico también a mi hermana que ha estado acompañándome y siendo parte de esta familia tan maravillosa que Dios me dio.

Los quiero mucho y les dedico este trabajo que se que será el final de un capítulo en mi vida pero también el inicio de una etapa que nos depara muchas sorpresas así como incontables experiencias y alegrías.

Puedes ser lo que deseas, sólo existe un obstáculo: tú mismo.

Anónimo

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas aquellas personas que hicieron posible este trabajo con su valiosa participación.

A mis padres, les agradezco su apoyo, su comprensión y sobretodo su cariño, sin ellos no hubiera sido posible la realización de este tan anhelado sueño.

A mi hermana, por su compañía, paciencia y palabras de aliento en momentos difíciles.

A mi tutor y profesor, agradezco su paciencia, consejos, enseñanzas y la fe que deposito en mí y en este proyecto.

A mis compañeros y amigos, por haberme permitido formar parte de sus vidas durante este excitante recorrido dentro y fuera de las aulas de la universidad.

A mis profesores, que con tanta pasión y dedicación compartieron sus conocimientos y vastas experiencias conmigo y mis compañeros.

A la UNAM y al IIM, por todo lo que me han brindado.

Gracias a todos.

ÍNDICE

OBJETIVO	- 5 -
MÉTODO	- 5 -
RESUMEN	- 6 -
CAPÍTULO 1:INTRODUCCION	- 7 -
<i>1.1 Antecedentes</i>	<i>- 7 -</i>
<i>1.2 Fibras ópticas especiales</i>	<i>- 9 -</i>
<i>1.2.1 Dispersion Shifted Fiber (DSF).....</i>	<i>- 9 -</i>
<i>1.2.2 Nonzero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF).....</i>	<i>- 11 -</i>
<i>1.2.3 Polarization Maintaining Fiber (PMF)</i>	<i>- 12 -</i>
<i>1.3 Representación Gráfica de la Polarización.....</i>	<i>- 16 -</i>
<i>1.4 Amplificación óptica.</i>	<i>- 18 -</i>
<i>1.4.1 Amplificadores de fibra de erbio (EDFAs).....</i>	<i>- 20 -</i>
<i>1.4.2 Amplificadores ópticos semiconductores (SOAs)</i>	<i>- 22 -</i>
<i>1.5 Sistemas láser.....</i>	<i>- 24 -</i>
CAPÍTULO 2:SISTEMAS LÁSER DE FIBRA CON EDFA,OPERACION PULSADA. - 26	-
<i>2.1 Arreglo experimental.....</i>	<i>- 27 -</i>
<i>2.1.1 Caracterización del switch de polarización</i>	<i>- 30 -</i>
<i>2.2 Resultados y Análisis.....</i>	<i>- 33 -</i>
<i>2.3 Resumen</i>	<i>- 45 -</i>
CAPÍTULO 3:SISTEMAS LÁSER CON SOA,OPERACION PULSADA.....	- 49 -
<i>3.1 Arreglo experimental.....</i>	<i>- 49 -</i>
<i>3.2 Resultados y Análisis.....</i>	<i>- 51 -</i>
<i>2.3 Resumen</i>	<i>- 59 -</i>
CAPÍTULO 4:SISTEMAS LÁSER DE FIBRA CON EDFA Y SOA, OPERACION EN	
LONGITUDES DE ONDA MULTIPLES.....	- 62 -
<i>4.1 Características Generales de un Arreglo experimental basado en EDFA.....</i>	<i>- 63 -</i>

4.2 Arreglo experimental propuesto para un sistema en longitud de onda múltiple basado en SOA..... - 66 -

4.3 Resultados y Análisis..... - 68 -

4.4 Resumen - 75 -

CONCLUSIONES GENERALES - 78 -

REFERENCIAS..... ¡Error! Marcador no definido.

ANEXO..... - 86 -

OBJETIVO

Comparar las características espectrales y regímenes de operación que pueden obtenerse con sistemas láser de fibra óptica utilizando dos tipos de amplificadores ópticos: amplificadores de fibra de erbio (EDFAs) y amplificadores semiconductores (SOAs).

MÉTODO

1. Investigación bibliográfica acerca de los EDFAs y SOAs.
2. Familiarización con el equipo de laboratorio necesario para realizar los experimentos.
3. Implementación de resonadores ópticos para sistemas láser haciendo uso de distintos dispositivos de fibra óptica utilizando EDFAs y un SOA como medio de ganancia.
4. Caracterización de las propiedades espectrales y de polarización para sistemas láser de fibra utilizando EDFAs y SOAs.
5. Estudio de los regímenes de operación en modo continuo y pulsado para ambos tipos de sistemas láser.

RESUMEN

El tema desarrollado en las siguientes páginas es una comparación de los distintos modos de operación que pueden obtenerse en un sistema láser de fibra utilizando amplificadores ópticos semiconductores y fibras ópticas láser.

Los arreglos experimentales descritos a lo largo de este trabajo funcionan en dos modos de operación, el primero de ellos corresponde a la operación en longitudes de onda múltiples; el segundo modo estudiado corresponde a sistemas en operación pulsada. Se describen características espectrales y temporales así como las características de polarización para ambos tipos de sistemas láser.

Al final del trabajo se demuestra la factibilidad de desarrollar sistemas láser con longitudes de onda múltiples operando de manera simultánea mediante la implementación de un sistema simple basado en un resonador de anillo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La creciente necesidad del hombre por comunicarse constantemente con sus semejantes a pesar de la distancia propició, la creación de sistemas de comunicaciones cada vez más rápidos, eficientes y seguros.

Gracias al desarrollo de la tecnología eléctrica-electrónica, el hombre ha sido capaz de comunicarse a través de distancias enormes, con grandes capacidades de información disponibles; sin embargo, los insaciables requerimientos de la humanidad han llevado al desarrollo de sistemas opto-electrónicos, gracias a los cuales nos es posible tener sistemas cientos de veces más veloces y con mucho mayor seguridad que los sistemas puramente electrónicos.

A pesar de que este tipo de tecnología comenzó a ser investigada a mediados del siglo pasado, no fue sino hasta la creación de las fibras ópticas y de los dispositivos láser que estos sistemas comenzaron con su enorme desarrollo. Hoy en día nos es casi imposible imaginar la vida sin las bondades que nos ofrece esta tecnología, sin embargo, a pesar de ello todavía no hemos explorado y mucho menos explotado la inmensa gama de oportunidades que nos brinda esta interesante rama de la ciencia.

Los sistemas ópticos de comunicaciones tal como los conocemos hoy en día son un complejo conjunto de elementos que permiten explotar eficientemente las propiedades de la fibra óptica como medio de transmisión. En las secciones siguientes se abordan brevemente algunos de estos elementos que son de gran relevancia tanto para la implementación de sistemas de telecomunicaciones como para los arreglos experimentales que se estudian en este trabajo.

Los sistemas laser de fibra en operación de longitud de onda múltiple y los sistemas laser en operación pulsada, han sido estudiados ampliamente dada su extensa variedad de aplicaciones en sistemas de comunicaciones DWDM, sensores ópticos, prueba de instrumentos ópticos y espectroscopia, entre otras. El tema central a desarrollar es una comparación de los distintos modos de operación que pueden obtenerse en un sistema láser de fibra utilizando amplificadores ópticos semiconductores y fibras ópticas láser. En este sentido, es importante remarcar algunos aspectos básicos sobre los elementos más relevantes para este trabajo: las fibras ópticas especiales y los amplificadores ópticos.

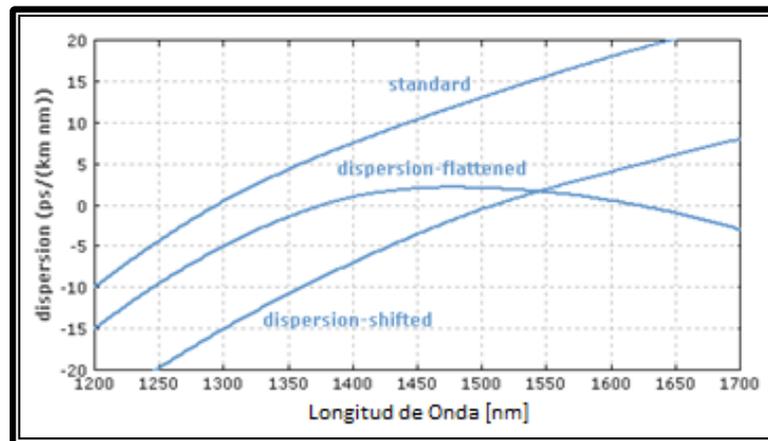
1.2 Fibras ópticas especiales

En la actualidad han sido desarrolladas fibras ópticas cuyos fines son brindar soluciones a diversos problemas que una fibra estándar (*Single Mode Fiber*, SMF) presenta. Estas fibras son conocidas como fibras especiales, y entre ellas las más populares son las *Dispersion Shifted Fiber*, *Nonzero Dispersion Shifted Fiber*, *Polarization Maintaining Fiber* y las fibras dopadas de tierras raras usadas para amplificación (Capítulo 1.3, Amplificación Óptica). La función de estas fibras se explica brevemente a continuación.

1.2.1 Dispersion Shifted Fiber (DSF)

Las fibras estándar para comunicaciones ópticas poseen una dispersión cromática nula en la región de 1300 nm, lo cual resultaba conveniente para los sistemas que operaban alrededor de esta longitud de onda, en la segunda ventana de transmisión. Sin embargo, posteriormente la región de 1550 nm se volvió más importante debido a que en esta zona espectral la atenuación es menor y además, se desarrollaron los EDFAS (*Erbium-Doped Fiber Amplifiers*), capaces de amplificar señales ópticas dentro de la fibra óptica en la tercer ventana. El problema con esta región espectral es que las fibras estándar presentan una dispersión cromática muy elevada, lo cual puede provocar problemas limitando de manera importante tanto las tasas de transmisión de señales como las distancias permitidas en el enlace.

Para mitigar los problemas de dispersión es que las llamadas *dispersión shifted fibers* fueron desarrolladas, ya que permiten tener una dispersión cromática nula en la región de 1550 nm (Figura 1.2.1.1) y con ello eliminar las limitaciones en cuanto a tasa de transmisión y distancias permitidas.



http://www.rp-photonics.com/dispersion_shifted_fibers.html

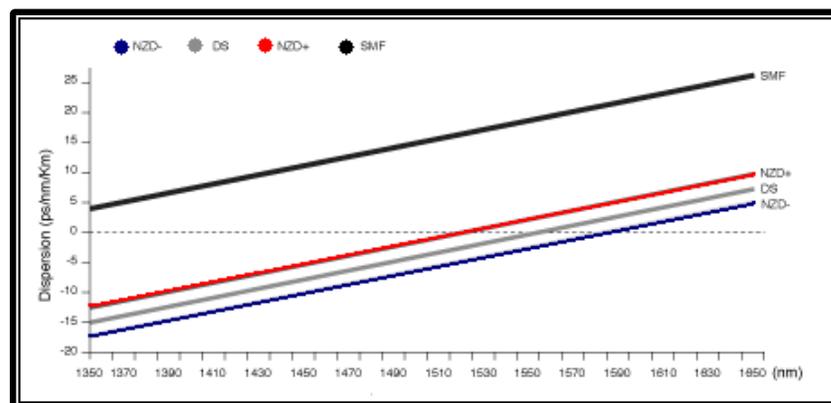
Figura 1.2.1.1: Dispersión Temporal de la Señal vs. Longitud de Onda de las fibras estándar, DSF y DFF.

A pesar de que no presentan dispersión en la región de 1550 nm, las DSF no son ideales para la transmisión de datos, especialmente si se utilizan canales múltiples, ya que este tipo de fibras es sumamente sensible a efectos no lineales tales como el mezclado de cuatro ondas (*Four wave mixing*) introduciendo así interferencias significativas entre canales.

1.2.2 Nonzero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)

Haciendo uso de este tipo de fibra es posible reducir significativamente los problemas ocasionados por los efectos no lineales presentes en las DSF. Esto se logra desplazando el punto de dispersión cromática nula fuera de los rangos de transmisión, logrando con esto tener una pequeña pero finita cantidad de dispersión en la ventana de 1550 nm y minimizar los efectos no lineales presentes en la transmisión de datos en multiplexación densa por división en longitudes de onda (*Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM*) tales como el mezclado de cuatro ondas (*Four wave mixing, FWM*), la auto-modulación de fase (*Self phase modulation, SPM*) y la modulación de fases cruzadas (*Cross phase modulation, XPM*).

Dependiendo de si el valor con dispersión cromática nula se presenta antes o después de la ventana de transmisión, este tipo de fibras ópticas se pueden clasificar como NZDSF+ o NZDSF-, respectivamente.



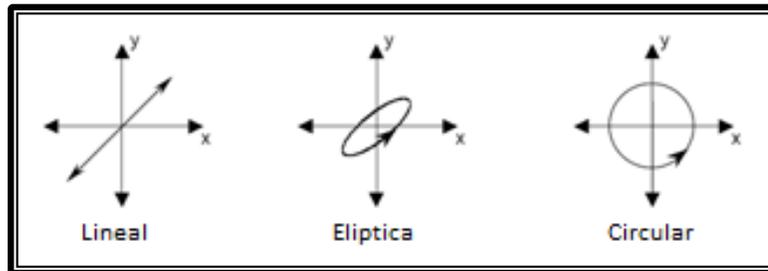
<http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=170740&seqNum=7>

Figura 1.2.2.1: Fibras estándar (SMF, ●), NZDSF+ (●), DSF (●) y NZDSF- (●)

Dentro de esta categoría de fibras también se encuentran las llamadas *dispersión-flattened fibers (DFF*, ver figura 1.2.1.1), en las cuales se tiene un rango más o menos constante de un valor relativamente pequeño de dispersión cromática, es decir, se puede tener un valor cercano al cero en cuanto a dispersión en la banda C [1530-1565 nm] de comunicaciones ópticas. Estas fibras son sumamente empleadas en transmisiones DWDM.

1.2.3 Polarization Maintaining Fiber (PMF)

La polarización de la luz puede definirse considerando la trayectoria que define la punta del vector de campo eléctrico de la onda electromagnética. Si tomamos como referencia un punto en el espacio y consideramos la dirección y la amplitud de la vibración del campo eléctrico a través del tiempo, se puede clasificar la polarización de la luz en lineal, elíptica o circular. La polarización lineal es la más simple de describir, en este caso el vector del campo eléctrico sólo varía de arriba abajo en una dirección específica. Otros casos de interés en fibras ópticas incluyen las polarizaciones elípticas (la más general) y la circular.



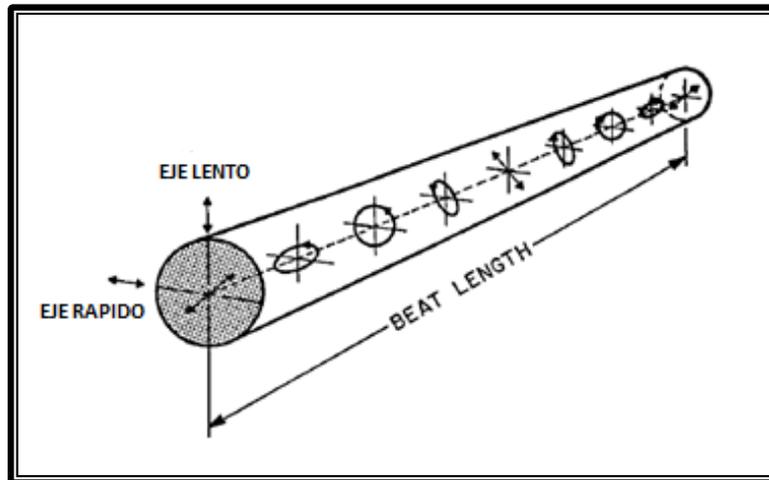
Polarization maintaining fiber optic technology, página 1

Figura 1.2.3.1: Principales estados de polarización

Los sistemas ópticos que mantienen la polarización requieren fibras y conectores especiales así como de un cuidado especial al ensamblar y alinear los distintos dispositivos ópticos. El impacto que tiene la dispersión por polarización (PMD) en las telecomunicaciones es considerable debido a las grandes distancias involucradas en los enlaces por fibra óptica, por ello es que las PMF ofrecen un valor constante de birrefringencia con el fin de mitigar este efecto lo más posible a pesar de las distancias.

Las fibras ópticas que mantienen la polarización pueden ser clasificadas por medio de dos parámetros: la longitud de abatimiento (“*beat length*”), o bien, la birrefringencia. Este último parámetro proporciona una medida de la diferencia en la constante de propagación entre dos modos de polarización ortogonales entre sí. Estos parámetros son inversamente proporcionales, de tal manera que una birrefringencia alta genera un *beat length* muy pequeño. Una manera de lograr esto es a través de una distribución asimétrica de esfuerzos residuales alrededor del núcleo de la fibra óptica. Esto rompe la simetría circular de la fibra creando dos ejes de transmisión principales dentro de ella conocidos como eje lento y eje

rápido. Cuando el índice de refracción extraordinario es más pequeño que el ordinario, el eje extraordinario se llama eje rápido y el ordinario, eje lento. La luz polarizada en el eje rápido se propaga más rápidamente que en el eje lento, creando así un desfase que genera un estado de polarización distinto.



Fiber-Optic Communication Systems, Figure 2.6

Figura 1.2.3.2: Representación gráfica del “beat length” en una fibra óptica.

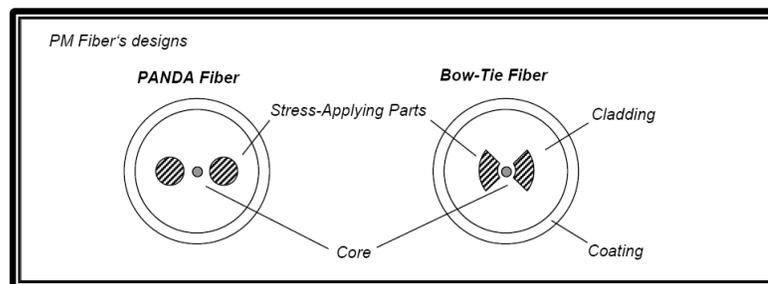
Una fibra HiBi (High Birefringence) o PMF ideal es aquella en la que dos modos de polarización son perfectamente preservados, sin embargo, en la práctica, la potencia de los dos modos se acopla entre ambos. Esta característica se especifica en términos de un parámetro llamado *cross-talk* o parámetro de acoplamiento de modos h ; este parámetro es una medida del acoplamiento de las potencias entre los dos modos, y para propósitos

prácticos limita la longitud de la fibra sobre la cual se conserva alguno de los modos de polarización,

En una fibra que mantiene la polarización siempre es deseable que los valores de todos estos parámetros sean lo más pequeños posibles, a excepción de la birrefringencia que siempre debe tener un valor grande.

1.2.3.1 Fibras Panda y Bow-Tie

Actualmente la PMF más popular en la industria es la fibra Panda, seguida por la fibra *Bow-Tie* o corbata de moño. Una ventaja de la fibra Panda sobre otro tipo de fibras es que el tamaño del núcleo y su apertura numérica son compatibles con la fibra monomodo regular, lo cual asegura el mínimo de pérdidas en dispositivos o sistemas que hagan uso de ambos tipos de fibra.



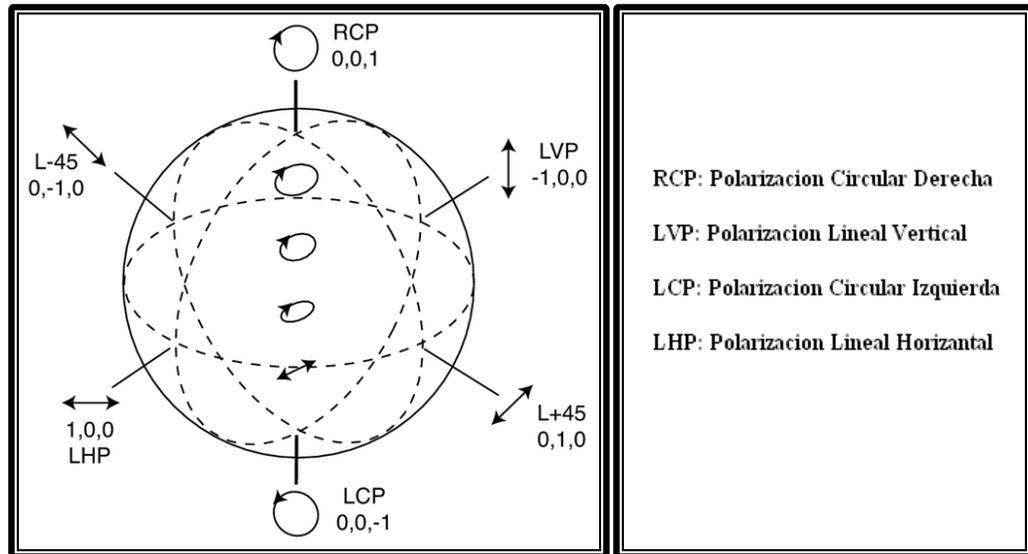
Polarization maintaining fiber optic technology, página 1

Figura 1.2.3.1.1: Fibras Panda y Corbata de moño

Mientras que en la teoría es posible producir luz perfectamente polarizada linealmente, en la práctica existe una polarización residual elíptica con comportamiento aleatorio. Para medir la calidad del haz polarizado uno de los parámetros más comunes es la razón de extinción, ER por sus siglas en inglés (*Extinction Ratio*). La eficiencia de la fibra para mantener la luz depende de manera importante de las condiciones en que esta fue acoplada a la fibra. El factor más importante en este tipo de fibras es el alineamiento angular entre el eje de polarización de la luz y el eje lento de la fibra.

1.3 Representación Gráfica de la Polarización

Para el análisis de la polarización en los distintos sistemas que se estudian en los capítulos siguientes, se requirió de una forma de representar los estados de polarización presentes así como variaciones a lo largo del tiempo conforme la señal viaja a través de la fibra óptica. Una de las formas más sencillas de representar la polarización de un sistema es mediante la esfera de Poincaré. Esta es una forma convencional de representar la polarización y la evolución de la misma durante la propagación de una onda electromagnética.



<http://www.newport.com/Tutorial-Polarization-in-Fiber-Optics/849671/1033/content.aspx>

Figura 1.3.1: Representación de estados de polarización en la esfera de Poincaré

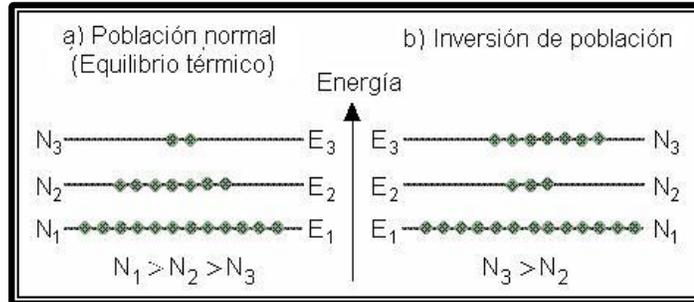
En la representación de Poincaré, cada polarización existente es representada por punto único en la esfera. Los polos representan las polarizaciones circular derecha y circular izquierda, respectivamente (Figura 1.3.1). Los puntos ubicados a lo largo del ecuador representan estados de polarización lineales y cualquier otro punto sobre la superficie de la esfera, fuera de los ya mencionados, representa una polarización elíptica

Gracias al uso de la esfera de Poincaré es posible analizar el comportamiento de la polarización en sistemas láser. Para este trabajo, los efectos de polarización generados en los sistemas láser de fibra implementados fueron estudiados con base en la esfera de Poincaré. El poder monitorear los cambios de polarización permite comprender algunos fenómenos que tienen lugar en los sistemas láser de fibra.

1.4 Amplificación óptica.

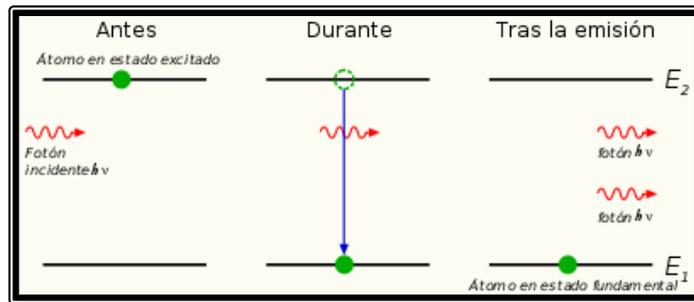
En un sistema de comunicaciones la distancia de un enlace está limitada por las pérdidas de la fibra, si se desea tener sistemas que cubran grandes distancias, inevitablemente se tendrá que hacer uso de amplificadores. Una de las opciones más eficientes para realizar esta tarea es por medio de amplificadores ópticos, mismos que fueron desarrollados durante los años 80 con el fin de desplazar y eventualmente remplazar a los complejos, ineficaces y costosos amplificadores opto-electrónicos.

La mayoría de los amplificadores ópticos hacen uso de la emisión estimulada para lograr la amplificación de una o más señales de entrada. La emisión estimulada se logra mediante una fuente de bombeo, gracias a la cual se genera una inversión de población; la inversión de población se logra cuando una cantidad significativa de los electrones presentes en el sistema, pasan de un estado basal a un estado de excitación (Figura 1.4.1). En el estado de excitación, un fotón incidente puede provocar la liberación de la energía absorbida por los electrones en forma de fotón (Figura 1.4.2), el cual tendrá la misma fase y frecuencia del fotón incidente. De esta manera un solo fotón se multiplica exponencialmente durante el recorrido a través de un amplificador óptico.



<http://www.um.es/LEQ/laser/Ch-2/F2s6p1.htm>

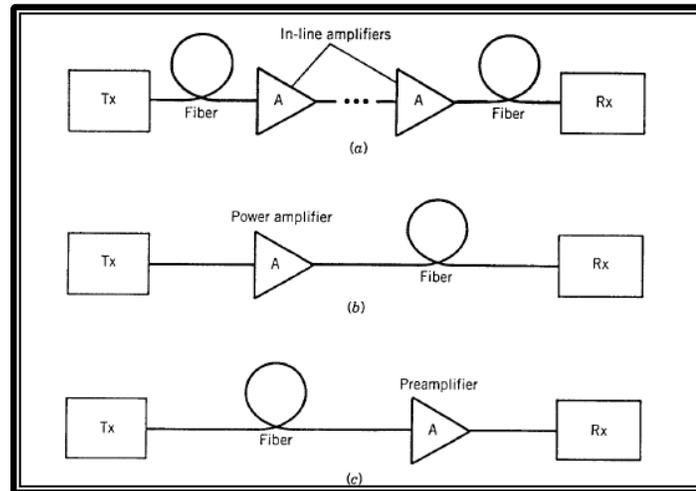
Figura 1.4.1: Inversión de población



<http://es.wikipedia.org/wiki/Fot%C3%B3n>

Figura 1.4.2: Emisión estimulada

Los amplificadores ópticos tienen una gran variedad de aplicaciones dentro de un sistema óptico de comunicaciones, las tres más comunes son: amplificador de línea, amplificador de potencia y pre-amplificador, Figura 1.4.3.

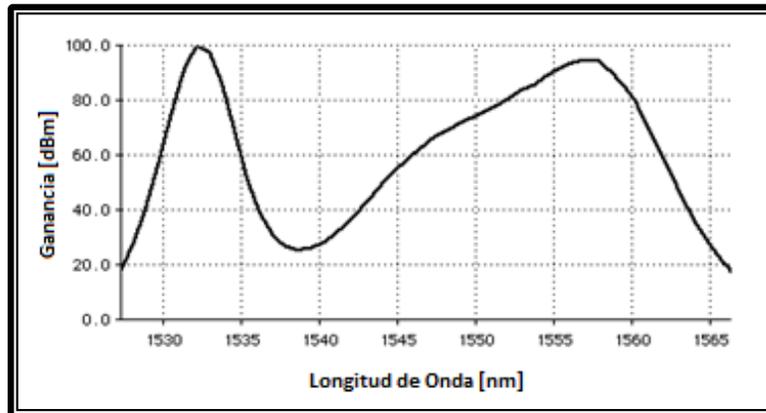


Fiber-Optic Communication Systems, Figure 6.3

Figura 1.4.3: Aplicaciones de un amplificador en un sistema óptico de comunicaciones

1.4.1 Amplificadores de fibra de erbio (EDFAs)

Existen varios tipos de fibras ópticas con capacidad para amplificar señales ópticas. Las más utilizadas son las fibras ópticas dopadas con iones de erbio, elemento que pertenece a las tierras raras y que se incorpora al núcleo de la fibra para que esta pueda funcionar como medio amplificador. Los amplificadores desarrollados con base en estas fibras se conocen como EDFAs, por sus siglas en inglés (*“Erbium-Doped Fiber Amplifiers”*), y son de un gran interés porque permiten amplificar señales ópticas en la región espectral de 1550 nm, utilizada comúnmente en los sistemas de comunicaciones ópticos (Figura 1.4.1.1).



<http://www.sspectra.com/designs/gainflat.html>

Figura 1.4.1.1: Espectro típico de un EDFA

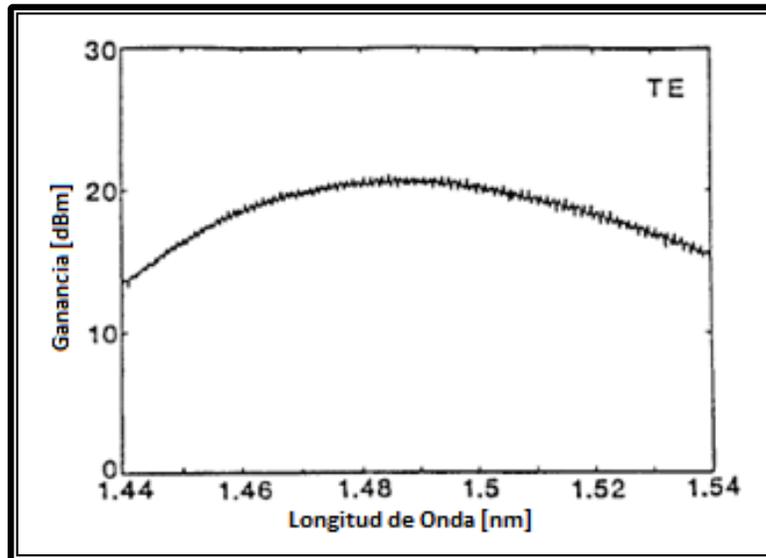
Estos amplificadores necesitan de una señal de bombeo externa con una frecuencia ligeramente superior a la que amplifican. Típicamente las longitudes de onda de bombeo son 980 nm o 1480 nm.

A pesar de que este tipo de tecnología estuvo disponible a mediados de los años 60, no fue sino hasta la década de los 80 que su uso fue práctico, esto debido a que durante este periodo se logró perfeccionar la técnica de fabricación y caracterización de las fibras ópticas utilizadas en ellos.

1.4.2 Amplificadores ópticos semiconductores (SOAs)

Una de las opciones disponibles para la amplificación de señales ópticas es el empleo de materiales semiconductores. A pesar de la alta disponibilidad comercial de diodos láser desarrollados con estos materiales, el uso de amplificadores semiconductores (SOAs, del inglés “*Semiconductor Optical Amplifiers*”) como elementos de ganancia para sistemas láser no ha sido estudiado de manera extensa. Se sabe que estos amplificadores permiten regenerar señales a distintas longitudes de onda de manera simultánea, y sus tiempos de respuesta son menores en comparación con los amplificadores basados en fibras ópticas dopadas de tierras raras, EDFAs principalmente.

La investigación de los amplificadores semiconductores comenzó poco después de que los láser semiconductores surgieran, dado que su funcionamiento es similar. Sin embargo, no fue sino hasta los años 80 que se logró implementar un amplificador que tuviera un uso práctico.



Fiber-Optic Communication Systems, Figure 6.5

Figura 1.4.2.1: Espectro clásico de un SOA

Una de las principales características que ofrece este tipo de amplificadores es su amplio rango espectral de operación (Figura 1.4.2.1); para un amplificador convencional el ancho de banda de 3 dB es de aproximadamente 70 nm.

1.5 Sistemas láser

Un sistema de telecomunicaciones se compone de tres elementos principales:

- a) El emisor
- b) La vía o canal de comunicación
- c) El receptor

Los sistemas de comunicaciones ópticos pueden utilizar diodos o láseres semiconductores como emisores. En el caso específico de un sistema láser, como su nombre lo indica, el emisor se trata de un láser, típicamente este es un dispositivo de inyección de corriente (semiconductor), siendo su principal función la de convertir las señales eléctricas en un señales ópticas capaces de propagarse por la fibra óptica (canal o vía de transmisión)

En este trabajo, los experimentos llevados a cabo se concentran en la primera parte de los sistemas de comunicaciones: el emisor. Los arreglos experimentales descritos a lo largo de este trabajo funcionan en dos modos de operación, el primero de ellos corresponde a la operación en longitudes de onda múltiples; estos pueden ser fácilmente adecuados a sistemas de multiplexado de longitud de onda (WDM). El segundo modo estudiado corresponde a sistemas en operación pulsada, los cuales pueden ser utilizados en sistemas de transmisión digital de datos, y en sistemas de medición ópticos, entre otros.

Cabe mencionar que los estudios plasmados en los capítulos posteriores de este trabajo no sólo limitan sus aplicaciones a los sistemas de comunicaciones ópticas, por el contrario, están abiertos a adaptarse a distintas aplicaciones de cualquier ámbito que puedan sacar ventaja de ellos.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS LÁSER DE FIBRA CON EDFA, OPERACIÓN PULSADA

En este capítulo se muestra el desarrollo experimental de un sistema láser basado en EDFA diseñado para funcionar en operación pulsada; el funcionamiento del arreglo está basado en la conmutación de polarización, la cual es controlada por medio de una señal eléctrica que define la velocidad de conmutación de las polarizaciones que viajan a través del sistema de fibra óptica, generando con ello las condiciones propicias para lograr el régimen pulsado en el dominio temporal.

A lo largo de las siguientes páginas se describen los resultados obtenidos durante la experimentación con el objetivo de caracterizar y comparar el rendimiento del sistema con un arreglo similar basado en SOA, el cual se muestra en el capítulo siguiente.

2.1 Arreglo experimental

En la figura 2.1.1 se muestra el diseño del arreglo experimental que se implementó, y está basado en un láser en configuración en anillo. La generación de la señal comienza con una fuente de bombeo, en este caso un diodo láser (*Laser Diode*, LD) operando a una longitud de onda de 980 nm. Este láser proporciona energía de excitación a los iones de erbio, mismos que emiten fotones de manera estimulada de acuerdo a los procesos explicados en la sección 1.4. La emisión de la fibra de erbio está alrededor de los 1550 nm, y esta se propaga a través del sistema hasta llegar al conmutador de polarización (PS). Este dispositivo permite conmutar de manera controlada la polarización entre dos estados ortogonales lineales. La frecuencia de operación puede ajustarse entre los 100 Hz y los 15 KHz mediante una señal eléctrica de control que se suministra al dispositivo.

De manera natural, el láser en anillo opera en forma bi-direccional, esto es, la luz puede circular en sentido horario y anti-horario de manera simultánea. Esta forma de operación generalmente induce inestabilidades en la operación del láser, y por esta razón siempre es conveniente forzar a que la luz se propague únicamente en una dirección. Para lograr esto, fue necesario incluir un aislador (*Isolator*, ISO), que es un dispositivo óptico de fibra que únicamente permite el paso de luz en una sola dirección. Finalmente, las señales emitidas por el EDFA y por el LD son multiplexadas en la entrada del sistema para cerrar el resonador en anillo.

La salida del sistema se obtiene utilizando un acoplador de fibra óptica (*Coupler*, C). En este caso se emplea un acoplador 95/5, y la salida del láser se toma del puerto correspondiente al 5% de la potencia contenida en el sistema. Para filtrar el bombeo residual, esto es señal de bombeo que no haya sido absorbida por la fibra de erbio, se incluyó en el anillo un multiplexor/demultiplexor de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexer*, WDM), el cual separa las señales de 1550 nm y 980 nm.

Para el registro y análisis de la emisión láser se colocó un divisor de potencias 90/10 a la salida del anillo. Con esto se logró observar simultáneamente los efectos de la conmutación de polarización utilizando distintos equipos de medición. Uno de los brazos del acoplador, se conectó al analizador de espectros óptico (*Optical Spectrum Analyzer*, OSA) con el fin de monitorear los cambios en el espectro de emisión del láser. La salida restante se utilizó para conectar un tercer acoplador (C3) para poder observar los resultados tanto en el dominio del tiempo, mediante un detector óptico y un osciloscopio (OSC), como el comportamiento de la polarización de la señal que se propaga en el sistema a través del analizador/sintetizador de polarización utilizado en los experimentos (PSY-101, General Photonics). Con el fin de controlar la polarización de la señal del sistema, se colocaron 2 controladores de polarización (*Polarization Controllers*, PC) a lo largo del anillo.

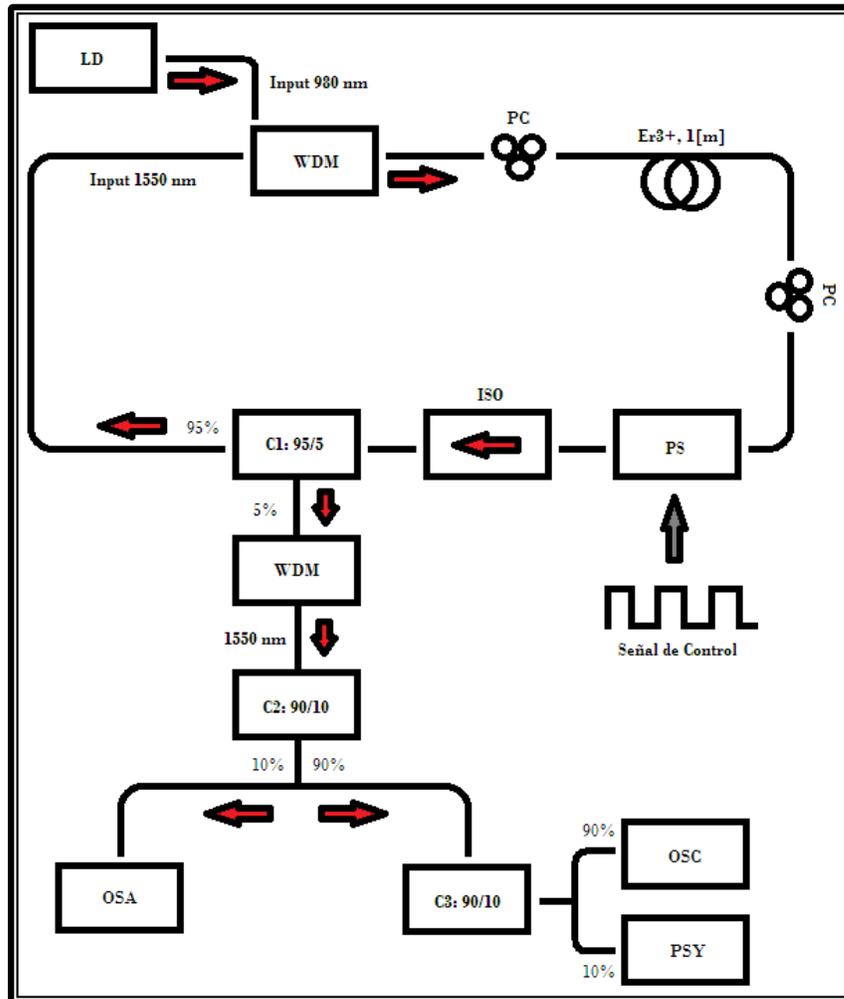


Figura 2.1.1: Arreglo experimental, Sistema láser en operación pulsada con EDFA

El arreglo mostrado tiene una longitud aproximada en el anillo de 14.2 m. Con este dato podemos calcular el espaciamiento entre las frecuencias resonantes o modos del resonador. En este caso las frecuencias de resonancia están dadas por:

Donde c es la velocidad de la luz, n es el índice de refracción del núcleo de la fibra ($n=1.458$), m es un número entero positivo y d es la longitud del anillo. La frecuencia fundamental ($m=1$) es aproximadamente:

$$f=14.5 \text{ MHz}$$

Todas las frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental ($m=1$) serán frecuencias resonantes.

2.1.1 Caracterización del switch de polarización

El switch de polarización (PS) utilizado dentro del resonador es un dispositivo de disponibilidad comercial y se controla mediante una fuente de voltaje con señal cuadrada. Este dispositivo está fabricado con un material electro-óptico y tiene un circuito equivalente que se muestra en la figura 2.1.1.1. Las especificaciones completas del PS pueden consultarse en el anexo.

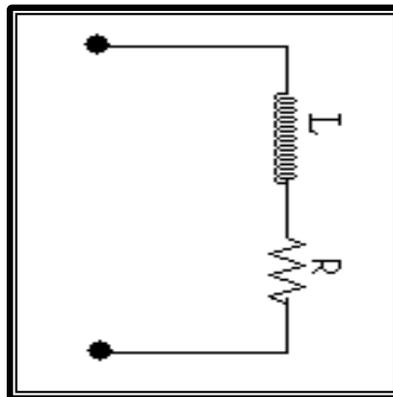


Figura 2.1.1.1: Circuito Equivalente del PS

Como se puede apreciar dentro del circuito hay una carga inductiva que por sus características dinámicas afecta la señal de control al cambiar de polaridad. Esto afecta el desempeño del PS, como puede observarse en la figura 2.1.1.2, en donde se observa que la señal de control de conmutación presenta transitorios en los bordes de la señal cuadrada.

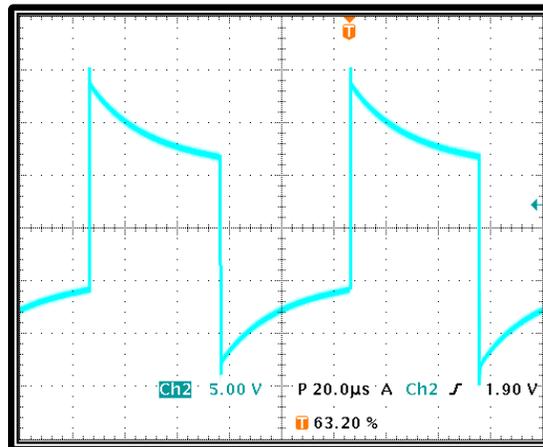
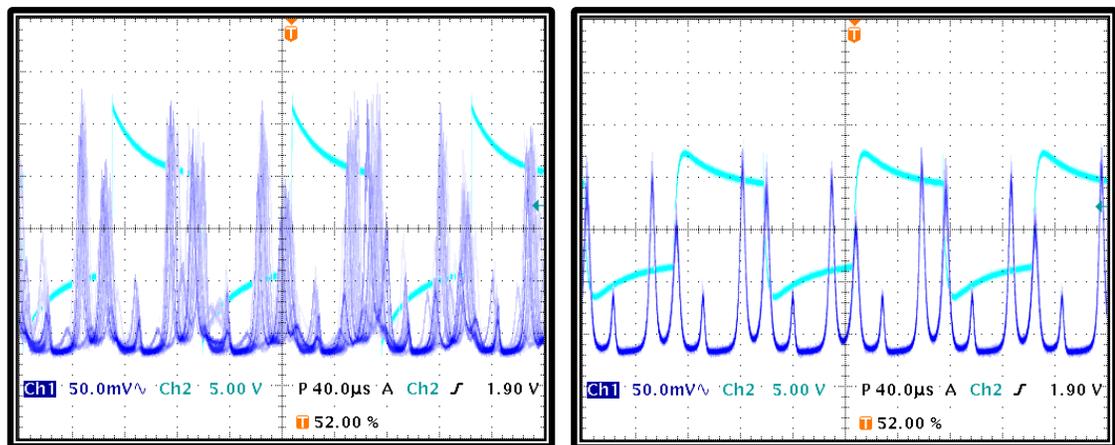


Figura 2.1.1.2: Señal de control del PS bajo el efecto inductivo

Debido al efecto inductivo, la señal presenta una fuerte carga al cambiar de flanco. En el caso ilustrado en la figura, la señal registrada en las terminales del PS registra un efecto transitorio de aproximadamente 10 V, que es el doble de amplitud de la señal suministrada, la cual es de 5 Vp. Esto propicia que el PS se sature y su funcionamiento no sea óptimo, por lo cual es necesario minimizar este efecto.

Para disminuir al mínimo el efecto inductivo en el PS se utilizó un arreglo capacitivo en paralelo, compuesto por un capacitor cerámico equivalente de 320 nF y una resistencia de 60 ohmios. En la figura 2.1.4 se muestra una comparación del funcionamiento del PS con y sin el arreglo capacitivo incluido. Puede observarse que al reducir el efecto inductivo el PS tiene un comportamiento más estable y la señal de emisión de la fibra láser (mostrada en la traza (b) del osciloscopio) presenta menos fluctuaciones en el tiempo.



a) Señal original del PS

b) Señal del PS con RC en paralelo

Figura 2.1.4: Respuesta en el tiempo del sistema, antes y después de reducir el efecto inductivo presente en el PS

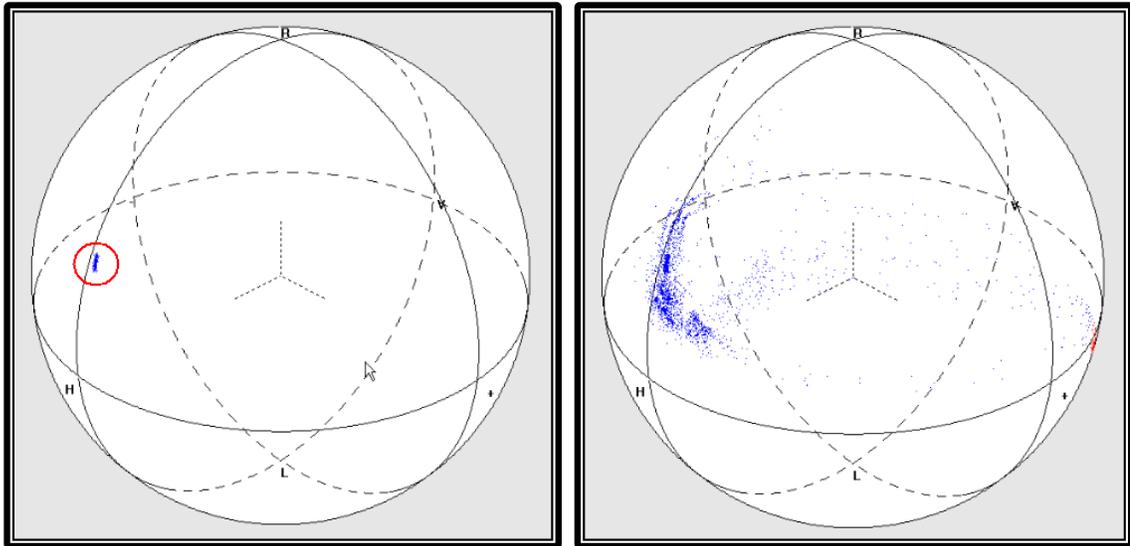
De acuerdo a las especificaciones del fabricante (General Photonics, ver anexo), la señal de control del PS debe encontrarse en el rango de 7 a 10 Vpp. Sin embargo, con estos experimentos se observó que una señal muy débil no permite una conmutación correcta, mientras que una señal cercana

al límite (10 Vpp) satura al PS llevando a un funcionamiento inestable. De esta manera, se encontró que con 8 Vpp era un valor óptimo para el funcionamiento adecuado del dispositivo y este fue el voltaje utilizado para todas las pruebas realizadas.

2.2 Resultados y Análisis

Como se muestra en el diagrama del arreglo experimental (figura 2.1.1), la polarización fue monitoreada con ayuda del PSY, el cual por medio de un software permite monitorear en la esfera de Poincaré la polarización de la emisión láser.

En la figura 2.2.1 (b) se aprecia el comportamiento de la polarización debido a la conmutación generada por el PS, mientras que la imagen (a) muestra un estado de polarización estático cuando el PS se encuentra apagado.



(a) Sistema sin conmutación de polarización (b) Sistema láser conmutando

Figura 2.2.1: Comportamiento del estado de polarización del sistema

El comportamiento ilustrado en la figura anterior no presenta mayor dependencia de la polarización, es decir, para cualquier tipo de polarización fijada inicialmente en el anillo con ayuda de los controladores de polarización, los resultados obtenidos son idénticos. Esto indica que la conmutación de polarización para este arreglo es insensible o independiente a la polarización inicial del láser de fibra.

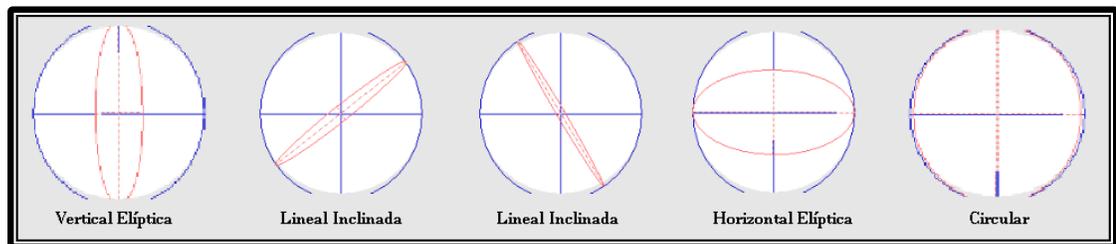


Figura 2.2.2: Variedad de Polarizaciones obtenidas con el láser de fibra.

En la figura 2.2.2 se pueden observar mediante otro tipo de gráficos algunas de las diferentes polarizaciones que se pueden obtener con ayuda de los controladores de polarización. Estas imágenes fueron registradas en el PSY sin señal de conmutación.

La metodología a seguir para encontrar los rangos óptimos de funcionamiento con conmutación de polarización fue la siguiente: se dejó estable la densidad de corriente de bombeo del diodo láser y se fue manipulando la frecuencia de la señal de conmutación del PS hasta encontrar un régimen pulsado estable y lo más definido posible. Después se repitió esta secuencia para otras corrientes de bombeo, de tal manera que se obtuvieron frecuencias distintas de operación para cada corriente de bombeo. Algunos resultados se muestran en las siguientes figuras, en donde pueden verse las características de los pulsos y los espectros de la emisión láser obtenidos durante la conmutación de polarización a distintas frecuencias de operación.

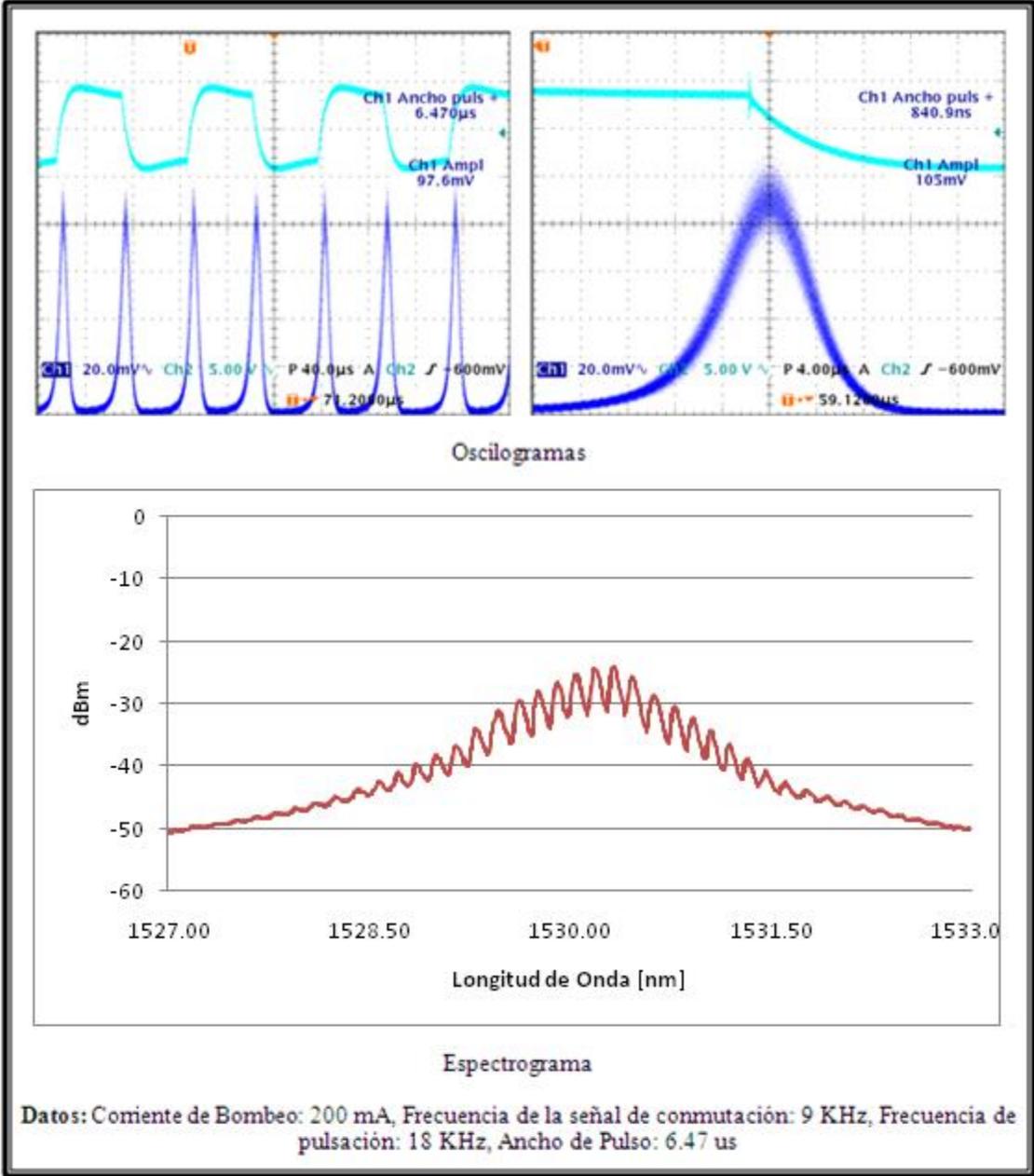


Figura 2.2.3: Formas de onda para la operación pulsada mediante EDFA, $F(PS)=9$ KHz

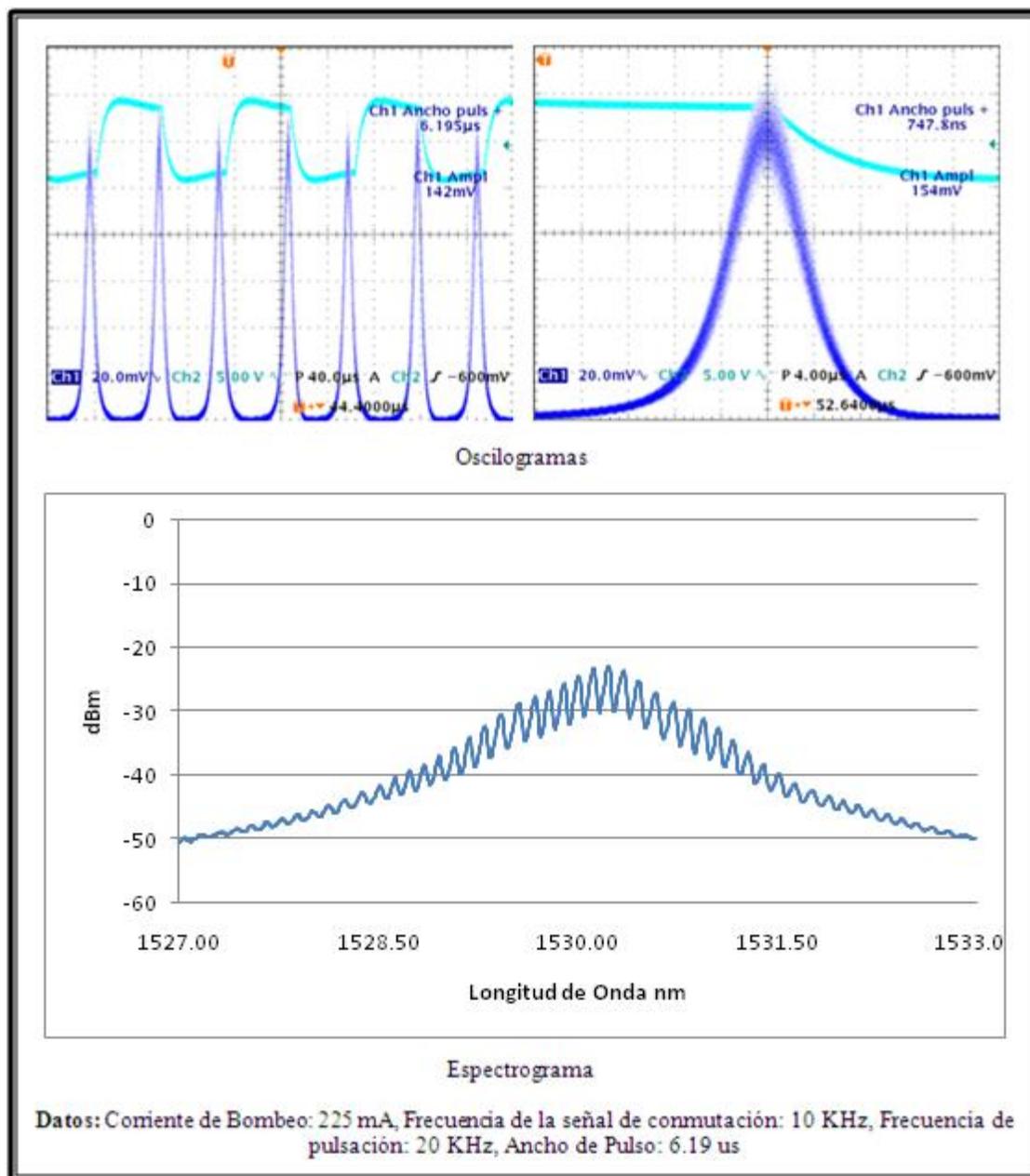


Figura 2.2.4: Formas de onda para la operación pulsada mediante EDFA, $F(PS)=10$ KHz

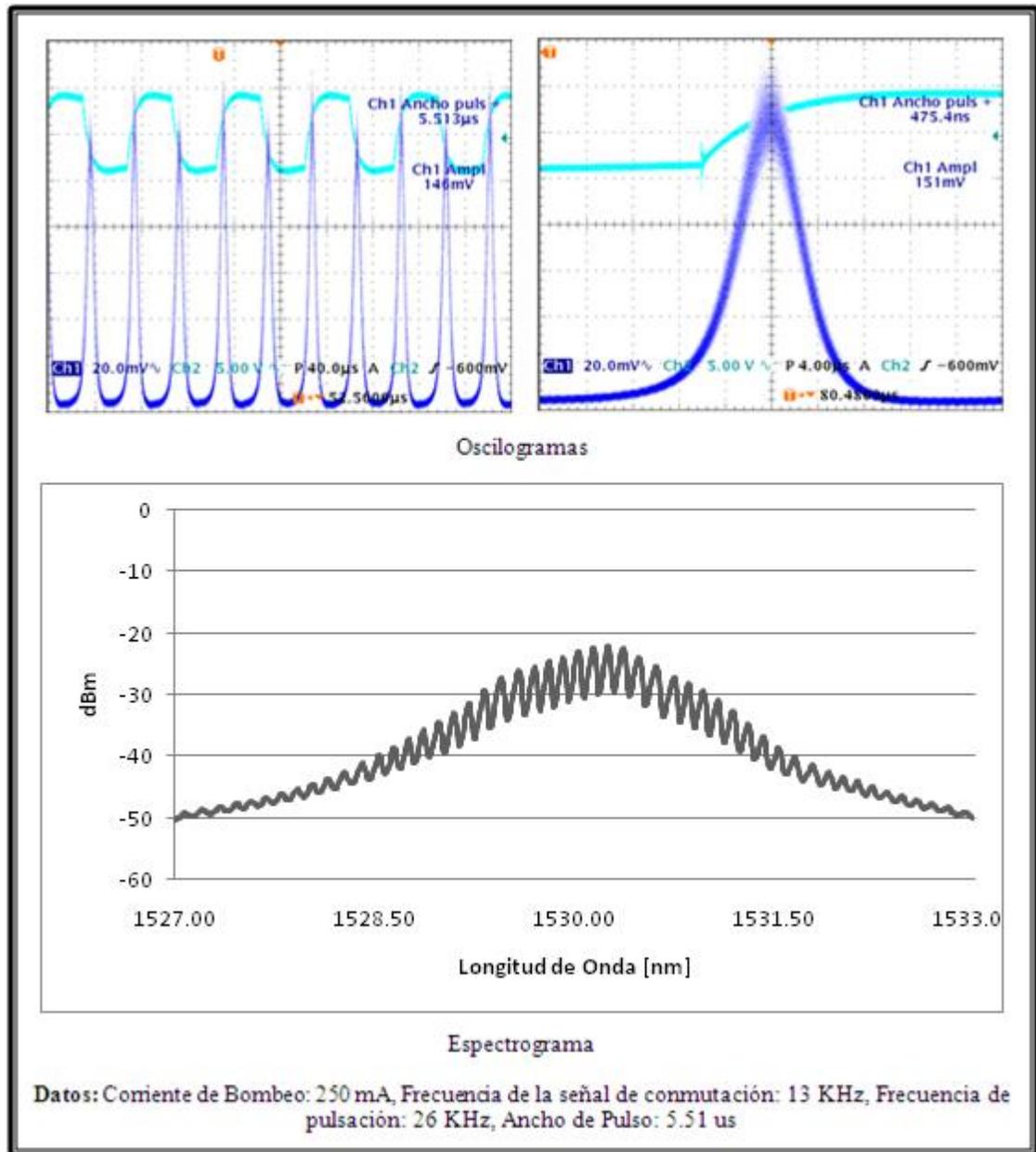


Figura 2.2.5: Formas de onda para la operación pulsada mediante EDFA, $F(PS)=13$ KHz

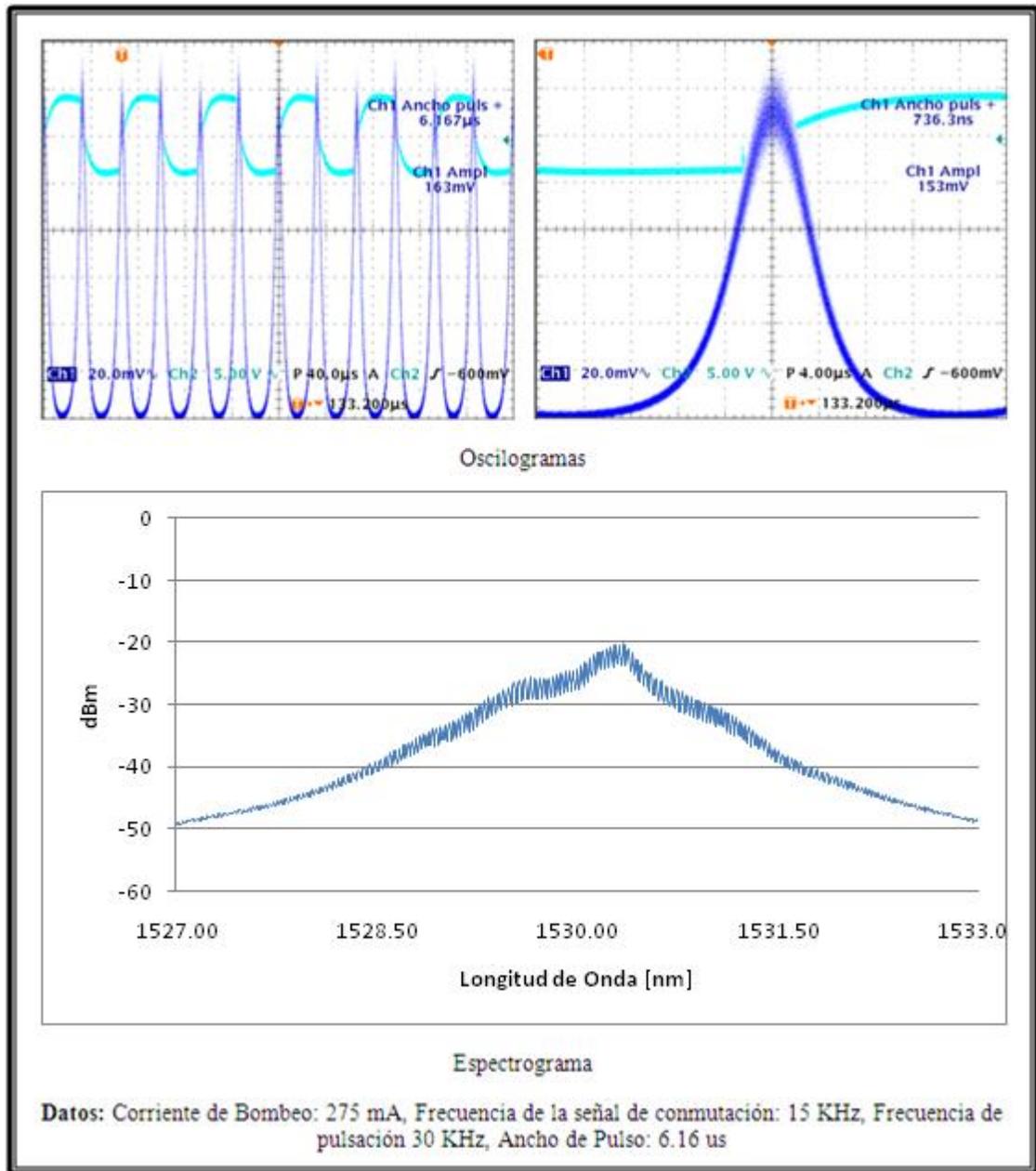


Figura 2.2.6: Formas de onda para la operación pulsada mediante EDFA, $F(PS)=15$ KHz

Las figuras mostradas anteriormente representan distintas condiciones a las cuales el anillo entra en operación pulsada. Se observa que cada pulso del tren se dispara en las transiciones de nivel de la señal de control de conmutación de la polarización. Si consideramos que se tienen 2 pulsaciones por ciclo o periodo de la señal de conmutación, podemos inferir que cada pulso corresponde a una polarización ortogonal respecto a la del pulso anterior.

En las figuras anteriores (Figuras 2.2.3-2.2.6) se puede ver que cuando el sistema entra en modo de operación pulsada el espectro muestra un efecto de modulación estable, además de simetría respecto al máximo, el cual se encuentra alrededor de los 1530 nm. Se aprecia claramente que conforme la corriente de bombeo aumenta, la amplitud del tren de pulsos es mayor. Esto es de esperarse pues se genera más potencia a la salida del láser al aumentar la energía de bombeo.

Los oscilogramas que muestran un sólo pulso en las figuras 2.2.3-2.2.6 se obtuvieron con la finalidad de poder medir con una mejor resolución el ancho de los pulsos al 50 % de su amplitud máxima. En la secuencia de figuras anteriores puede apreciarse que el ancho de los pulsos va decreciendo conforme la corriente de bombeo aumenta, a excepción del último caso en el cual esta vuelve a incrementarse. Sin embargo, si se observa el espectro obtenido para estas condiciones, se puede ver que la modulación no se presenta de manera tan pronunciada como en los demás casos, esto puede deberse a que para estas condiciones es necesario realizar ajustes más finos tanto en la corriente de bombeo como en la frecuencia de

modulación. Este tipo de ajustes son comúnmente realizados en sistemas láser operando en régimen *mode locking*, en donde se busca utilizar frecuencias de modulación que sean múltiplos enteros o racionales de la frecuencia de oscilación del láser.

En los dos distintos oscilogramas mostrados en cada figura se puede apreciar que el valor del ancho de pulso registrado por el osciloscopio es distinto. Nótese sin embargo que el valor mostrado en los pulsos obtenidos a máxima resolución (rango de ns, oscilograma de la derecha) es inconsistente con la realidad, pues la escala de osciloscopio no corresponde con este valor. Esto se verificó manualmente calculando con la escala adecuada del osciloscopio, y con esto se obtuvieron los valores del ancho promedio de los pulsos (rango de microsegundos, oscilograma de la izquierda).

La limitación más importante para caracterizar la respuesta temporal del láser fue el ancho de banda de los distintos dispositivos y equipos utilizados en los experimentos. Las especificaciones de este parámetro son de 1 GHz para el detector y 500 MHz en el caso del osciloscopio, lo que condicionó la resolución de los datos obtenidos, aunque a pesar de ello fue posible obtener datos representativos de buena calidad.

Otro aspecto importante que se observó es el comportamiento del tren de pulsos para distintas frecuencias de conmutación de la polarización. A menor frecuencia de la señal de control de conmutación, la respuesta en el dominio del tiempo presenta una mayor cantidad de pulsaciones por ciclo, sin embargo estos son inestables, irregulares y de una amplitud desigual

como se muestra en la figura siguiente (figura 2.2.7). En los casos para los que la señal es estable, mostrados en las figuras anteriores, tenemos un factor constante, la frecuencia de pulsación es del doble de la frecuencia de conmutación de la polarización.

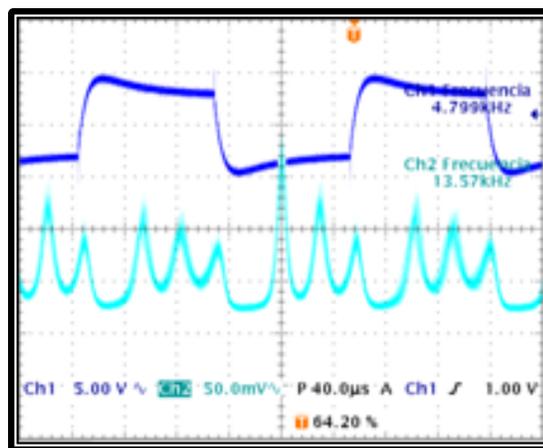


Figura 2.2.7: Pulsos fuera de resonancia con baja frecuencia (4.8 KHz.)

La inestabilidad de los pulsos obtenidos mediante una conmutación de baja frecuencia se debe a que el cambio de polarización ocurre con una velocidad menor, y esto da pie a que exista competencia por la energía entre las distintas polarizaciones existentes en el láser. Esto genera una mayor inestabilidad en la respuesta conforme se reduce la frecuencia de conmutación.

Hasta ahora todas las pruebas reportadas se realizaron con un ciclo de trabajo (CT) del 50% para la señal de conmutación. Para estas condiciones de operación los tiempos de existencia de las distintas polarizaciones, ortogonales entre sí, son iguales. Si modificamos el CT de la señal del PS alteramos por ende los tiempos de existencia de cada polarización que circula por el anillo. Los efectos de variar el CT durante la conmutación de polarización fueron estudiados en otra serie de experimentos siguiendo la misma metodología descrita anteriormente.

Como se muestra en la figura 2.2.8, los cambios en el CT alteran la respuesta del sistema, ocasionando que uno de los pulsos presentes por cada ciclo o periodo de la señal de control modifique su amplitud. Cuando el CT es diferente al 50% es posible nivelar las amplitudes de los pulsos haciendo modificaciones a la polarización del anillo con ayuda de los controladores de polarización (figura 2.2.9). Nótese que para ciertas posiciones de los controladores de polarización es posible obtener únicamente un pulso por cada dos flancos de la señal de control para el PS. Esto podría indicar que el láser opera únicamente en una polarización, y la conmutación del PS genera una modulación en las pérdidas del resonador láser.

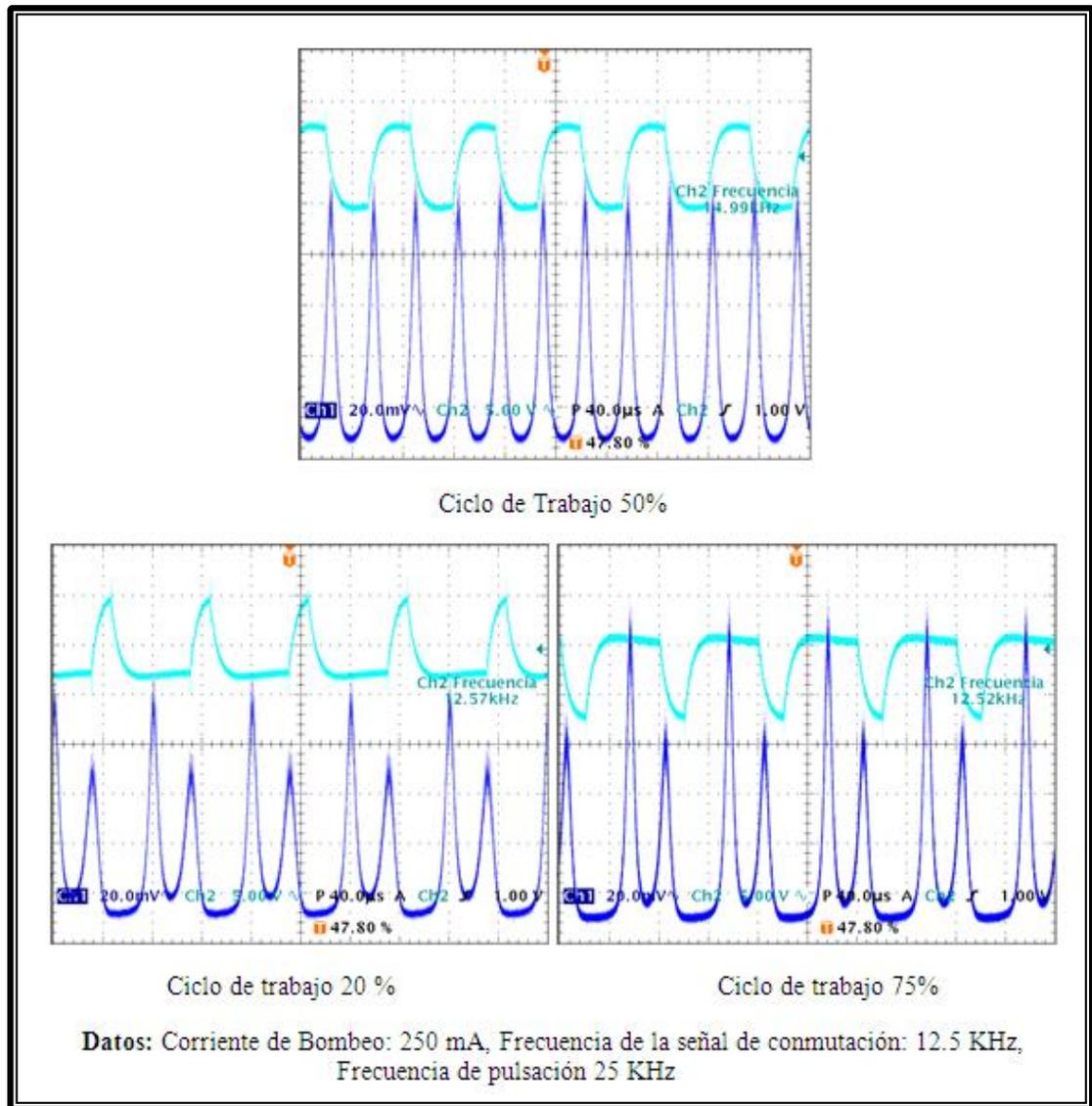


Figura 2.2.8: Formas de onda para la operación pulsada mediante EDFA, CT 50, 20 y 75%

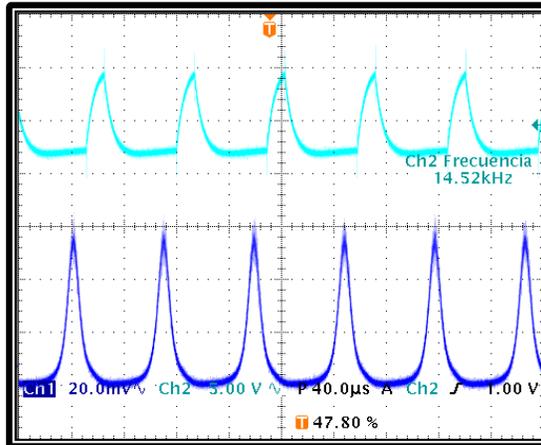


Figura 2.2.9: Oscilograma de la operación pulsada mediante EDFA, CT 20%; manipulación de las amplitudes mediante los PC's

2.3 Resumen

En esta sección se muestran de una manera puntual los resultados más significativos que se obtuvieron a lo largo de la experimentación realizada. A través de las gráficas que se muestran a continuación se caracteriza el arreglo propuesto para un sistema en operación pulsada.

- ✘ La conmutación de polarización para este arreglo es insensible o independiente a la polarización. Esto es, siempre es posible lograr conmutación entre dos estados de polarización ortogonales.
- ✘ A mayor corriente de bombeo se requiere de una mayor frecuencia en la señal de control del PS para lograr una operación pulsada definida y estable. El sistema sigue un comportamiento casi lineal tal como se puede apreciar en la Figura 2.3.1

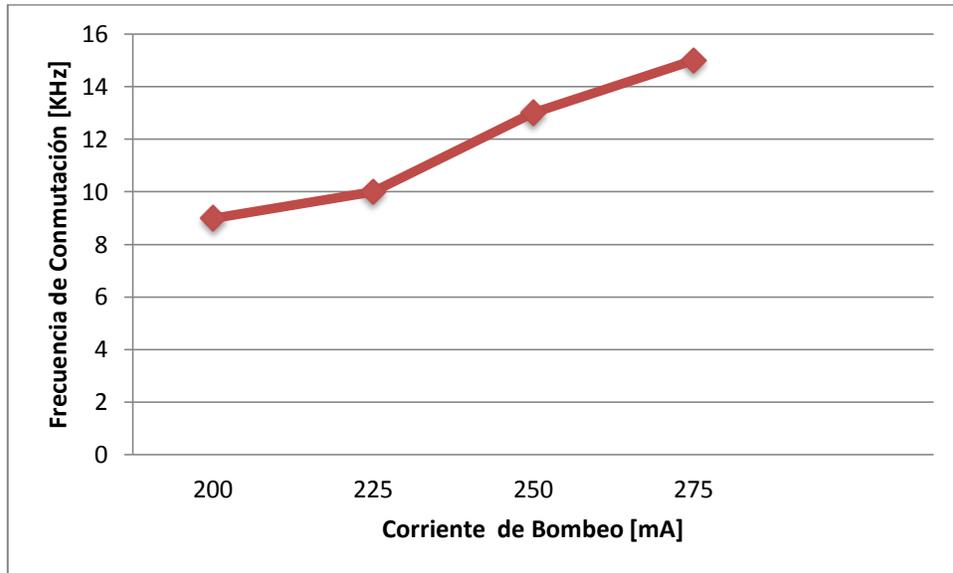


Figura 2.3.1: Grafica experimental Corriente de Bombeo Vs Frecuencia de Conmutación del PS

- ✘ A mayor corriente de bombeo el ancho de los pulsos obtenidos es menor, alcanzando el punto óptimo a 250 mA con un ancho de pulso de 5.51 [μs]. Como consecuencia del punto anterior se tienen que al aumentar la frecuencia de conmutación el ancho de los pulsos se reduce. El último punto es el único que no sigue esta tendencia, pero las características espectrales del láser para estas condiciones de operación muestran que la modulación no es tan adecuada como en los tres casos anteriores. Figura 2.3.2.

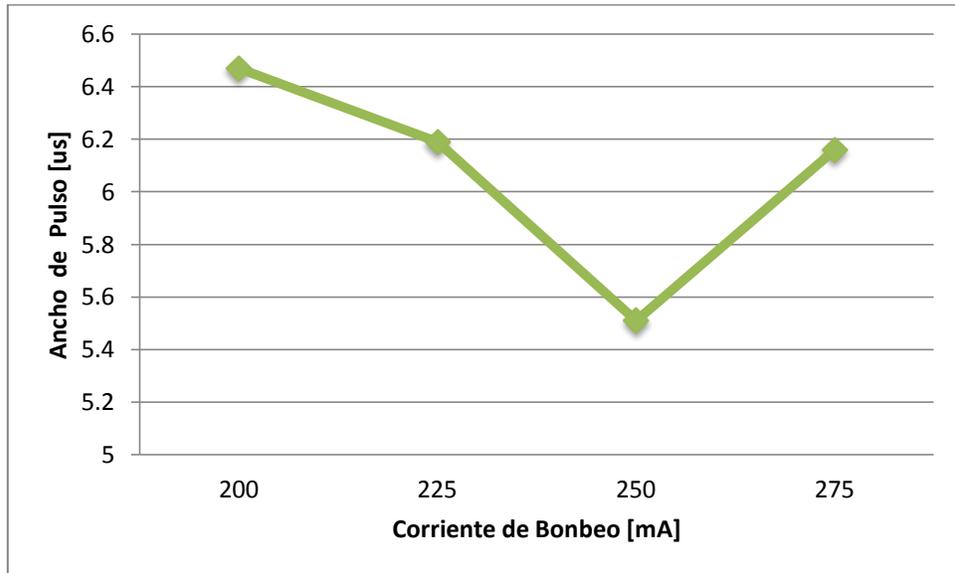


Figura 2.3.2: Grafica experimental Corriente de Bombeo Vs Ancho de Pulso

✘ Cuando el sistema entra en modo de operación pulsado, el espectro que obtiene es simétrico respecto al máximo y presenta lo que aparenta ser un modo de encadenamiento o “*mode locking*” de mayor intensidad al acercarse al máximo que presenta el espectrograma (aproximadamente 8 dBm como máximo)

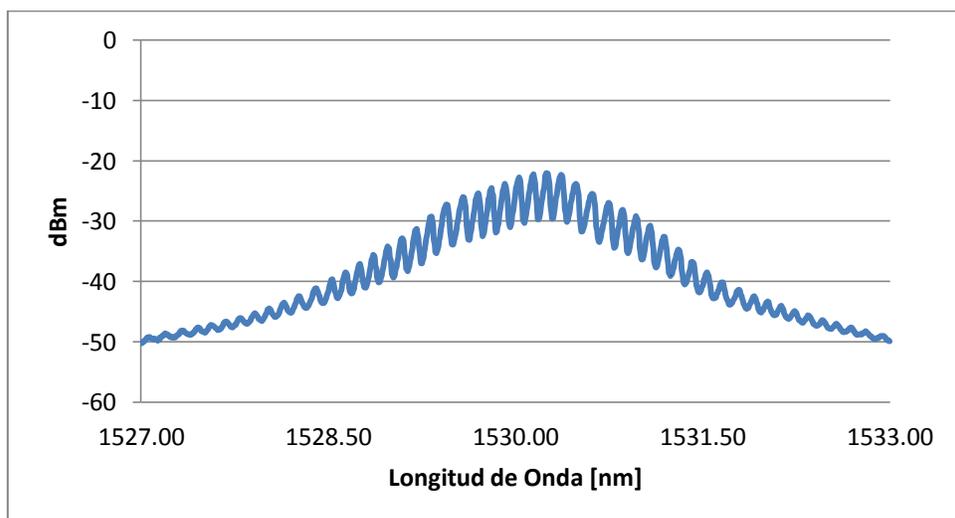


Figura 2.3.2: Espectro típico experimental en operación pulsada

- ✘ Los cambios en el CT alteran la respuesta del sistema, ocasionando que uno de los pulsos presentes por cada ciclo o periodo de la señal de control modifique su amplitud, ver figura 2.3.3

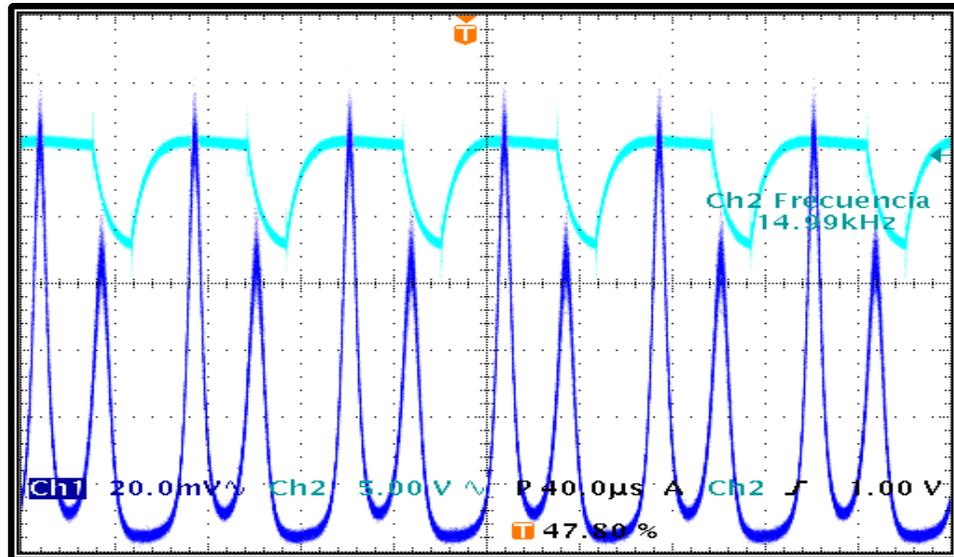


Figura 2.3.2: Oscilograma con CT=75%

CAPÍTULO 3

SISTEMAS LÁSER DE FIBRA CON SOA: OPERACIÓN PULSADA

En este capítulo se muestra el desarrollo experimental de un sistema láser basado en un amplificador óptico semiconductor (SOA) para funcionar en operación pulsada aplicando conmutación de polarización; el arreglo propuesto es idéntico al estudiado en el capítulo anterior, la única diferencia es que se utilizó un SOA como medio de ganancia para el láser en anillo.

A lo largo de las siguientes páginas se plasman los resultados obtenidos durante la experimentación con el objetivo de caracterizar y comparar el rendimiento del sistema con el sistema láser con amplificador EDFA mostrado en las secciones anteriores de este trabajo.

3.1 Arreglo experimental

La figura 3.1.1 muestra el arreglo que se diseñó e implementó para lograr la operación pulsada a través de un amplificador semiconductor. La funcionalidad de cada elemento está descrita en la primera sección del capítulo anterior, exceptuando al SOA, cuya descripción se puede encontrar en el capítulo 1, en la sección de amplificación óptica.

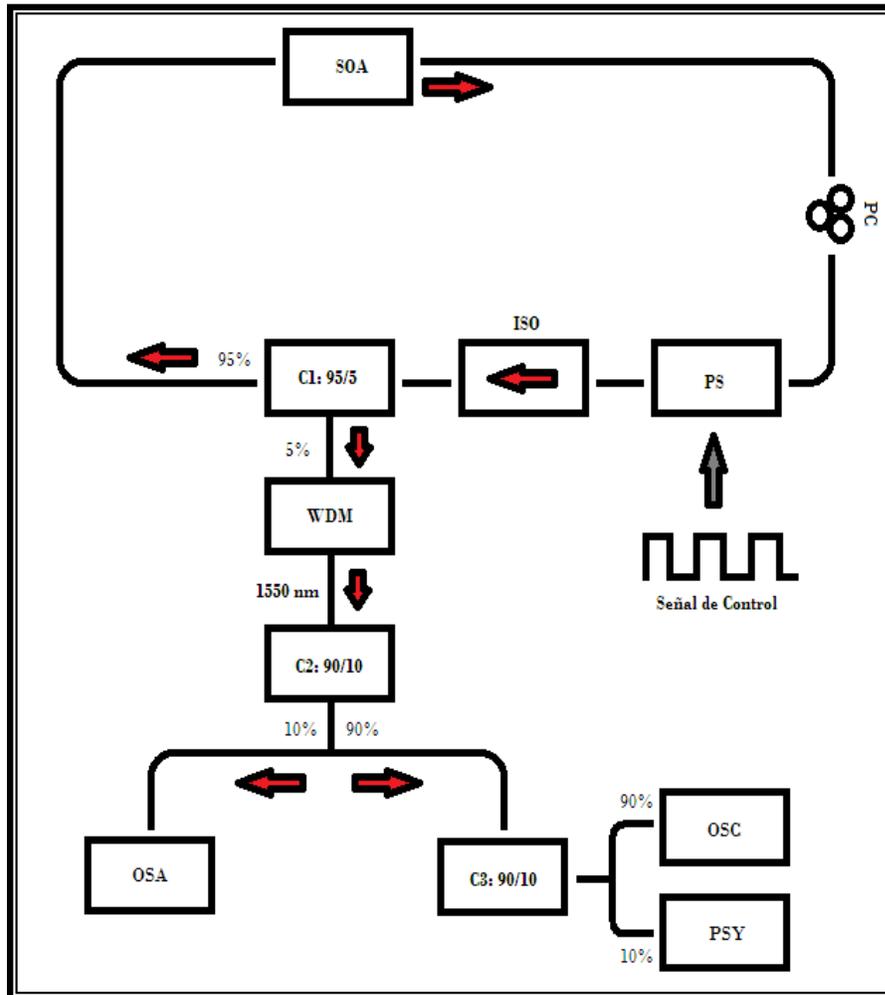


Figura 3.1.1: Arreglo experimental, Sistema láser en operación pulsada con SOA

El arreglo mostrado tiene una longitud aproximada en el anillo de 13.5 m. Una vez conocida la longitud del anillo podemos calcular las frecuencias resonantes del arreglo, las cuales están dada por:

Donde c es la velocidad de la luz, n es el índice de refracción del núcleo de la fibra ($n=1.458$), m el número del modo en resonancia y d es la longitud del anillo, por lo tanto, para $m=1$, la frecuencia de resonancia del arreglo mostrado es aproximadamente:

$$f=15.24 \text{ MHz}$$

Como se explicó en el capítulo anterior, considerando que m puede tener cualquier valor (entero), todas las frecuencias múltiplos de la fundamental ($m=1$) serán frecuencias resonantes.

El método empleado para el análisis del arreglo fue el mismo que el utilizado en el caso anterior (Capítulo 2); debido a que el sistema es muy similar, el nivel de la señal de conmutación para el PS se conservó en 8 Vpp, de igual manera se hizo uso del arreglo RC, descrito en el capítulo 2 para optimizar el funcionamiento de este dispositivo.

3.2 Resultados y Análisis

Como se muestra en el capítulo 1.4.2 (Amplificadores Ópticos Semiconductores), el espectro típico de este tipo de amplificadores es de un amplio rango espectral, en la siguiente figura podemos apreciar el comportamiento de la ganancia del sistema dependiendo de la intensidad de la corriente de bombeo suministrada al SOA

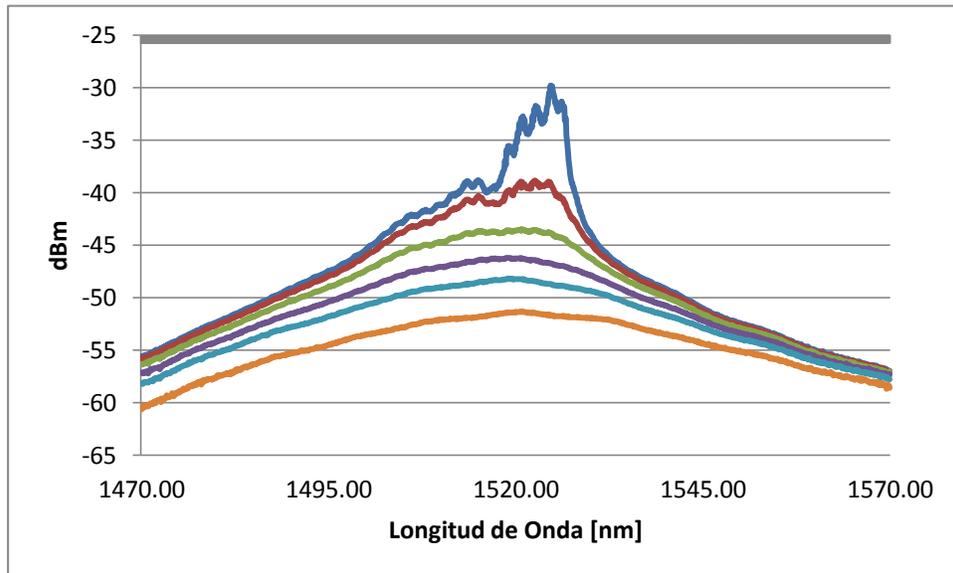


Figura 3.2.1: Ganancia del sistema a diversas corrientes de bombeo del SOA (490{azul}, 450{rojo}, 430{verde}, 410{morado}, 390{turquesa}, 350{naranja} [mA])

En la figura 3.2.1 se aprecia que el umbral de la corriente para que el sistema presente una operación pulsada se encuentra entre los 430 [mA] y los 450 [mA] de corriente en el SOA, lo cual indica que el sistema propuesto requiere de una alta intensidad de corriente para lograr entrar en régimen pulsado.

En la figura 3.2.2 se observa que la conmutación de la polarización que se lleva a cabo en este arreglo es muy diferente a lo observado en el capítulo 2. En este caso la polarización sigue un patrón estable definido por la polarización inicial del sistema y la frecuencia de conmutación del PS.

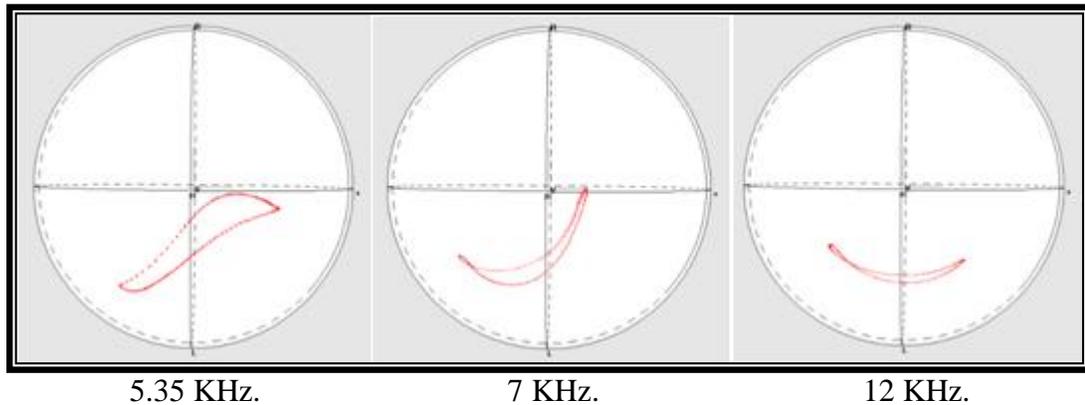


Figura 3.2.2: Diferentes patrones de polarización, a distintas frecuencias de conmutación

Una de las características más importantes de este arreglo es su gran dependencia de la polarización, lo que permitió, con ayuda del controlador de polarización, conseguir que a casi cualquier frecuencia de conmutación el anillo entrara en un régimen de operación pulsado.

A pesar de la estabilidad de la polarización, los resultados obtenidos en el plano temporal no fueron tan buenos como los registrados con el láser con EDFA. La siguiente secuencia de oscilogramas (Figuras 3.2.3-3.2.6) muestra algunos datos representativos obtenidos con el arreglo.

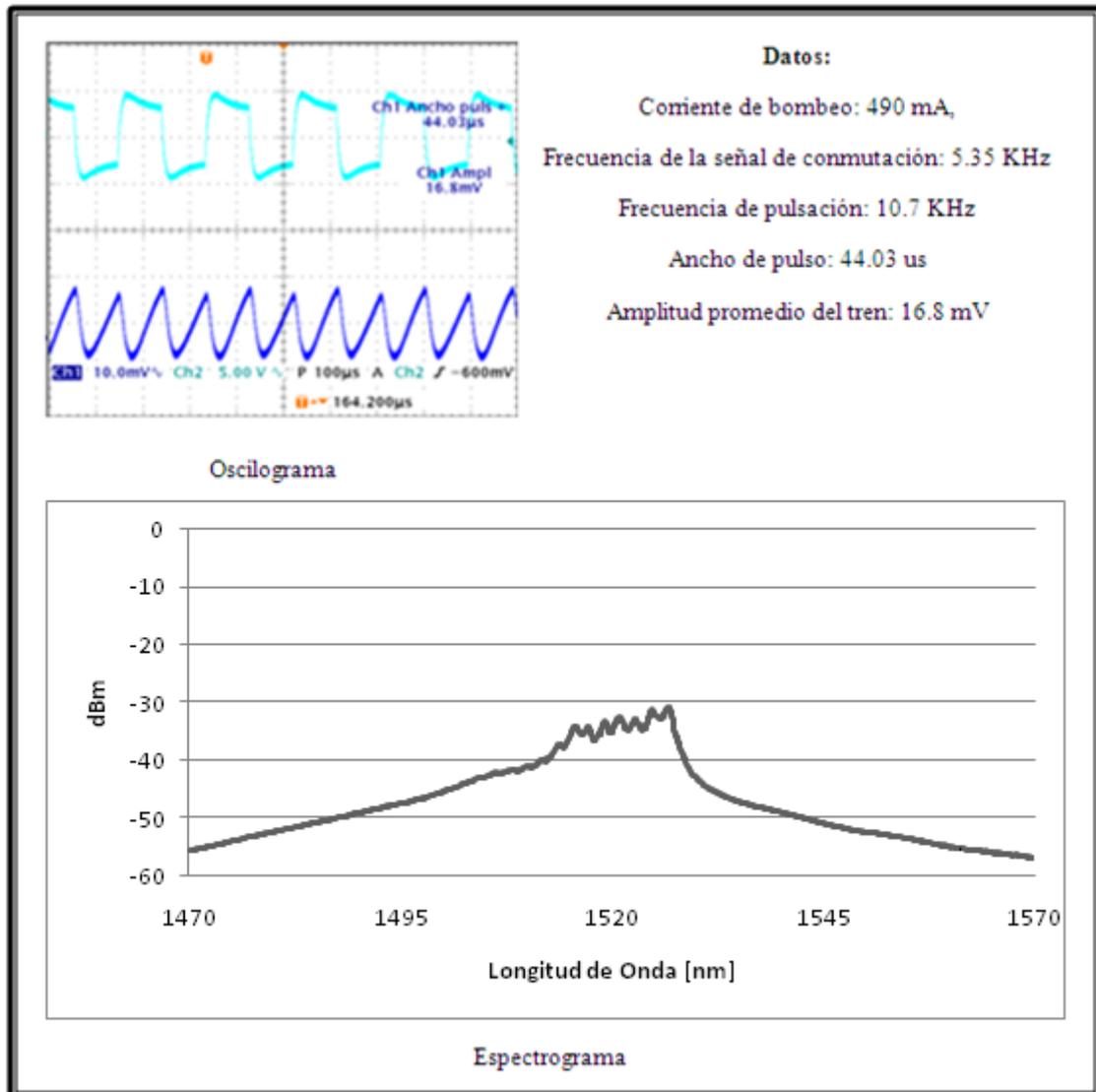


Figura 3.2.3: Formas de onda para la operación pulsada mediante SOA, $F(S)=4.35$ KHz

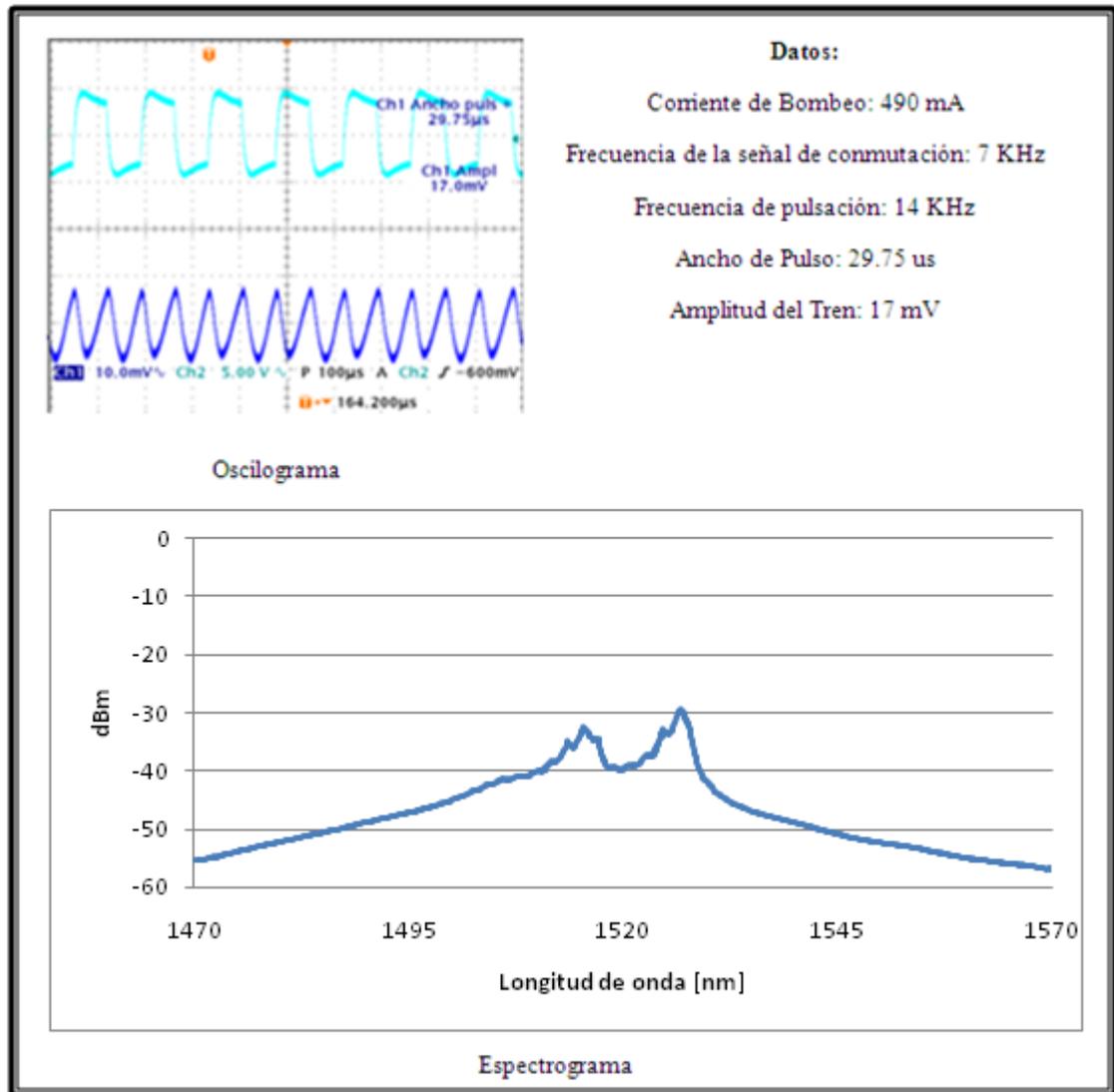


Figura 3.2.4: Formas de onda para la operación pulsada mediante SOA, $F(S)=7$ KHz

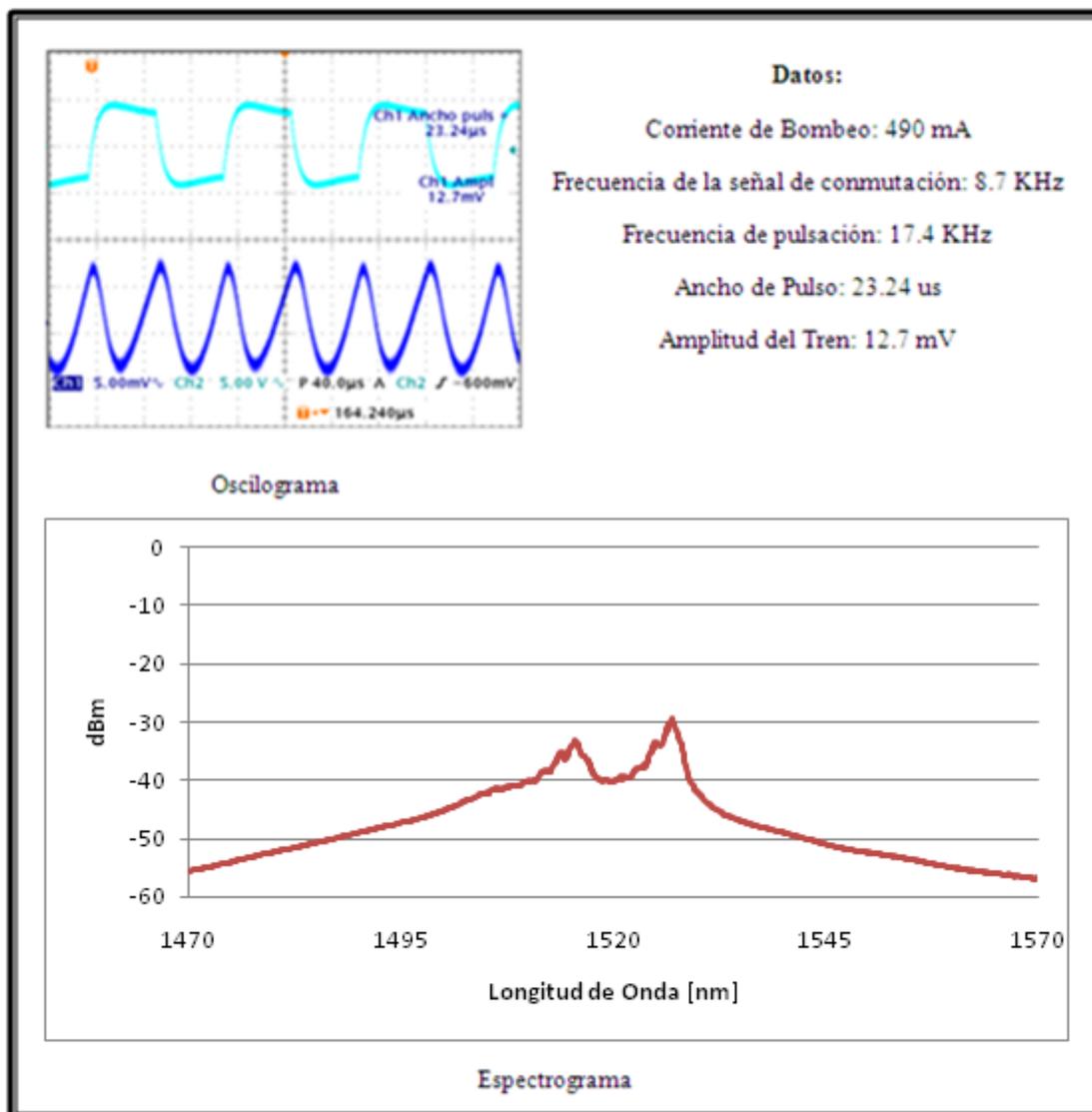


Figura 3.2.5: Formas de onda para la operación pulsada mediante SOA, $F(S)=8.7$ KHz

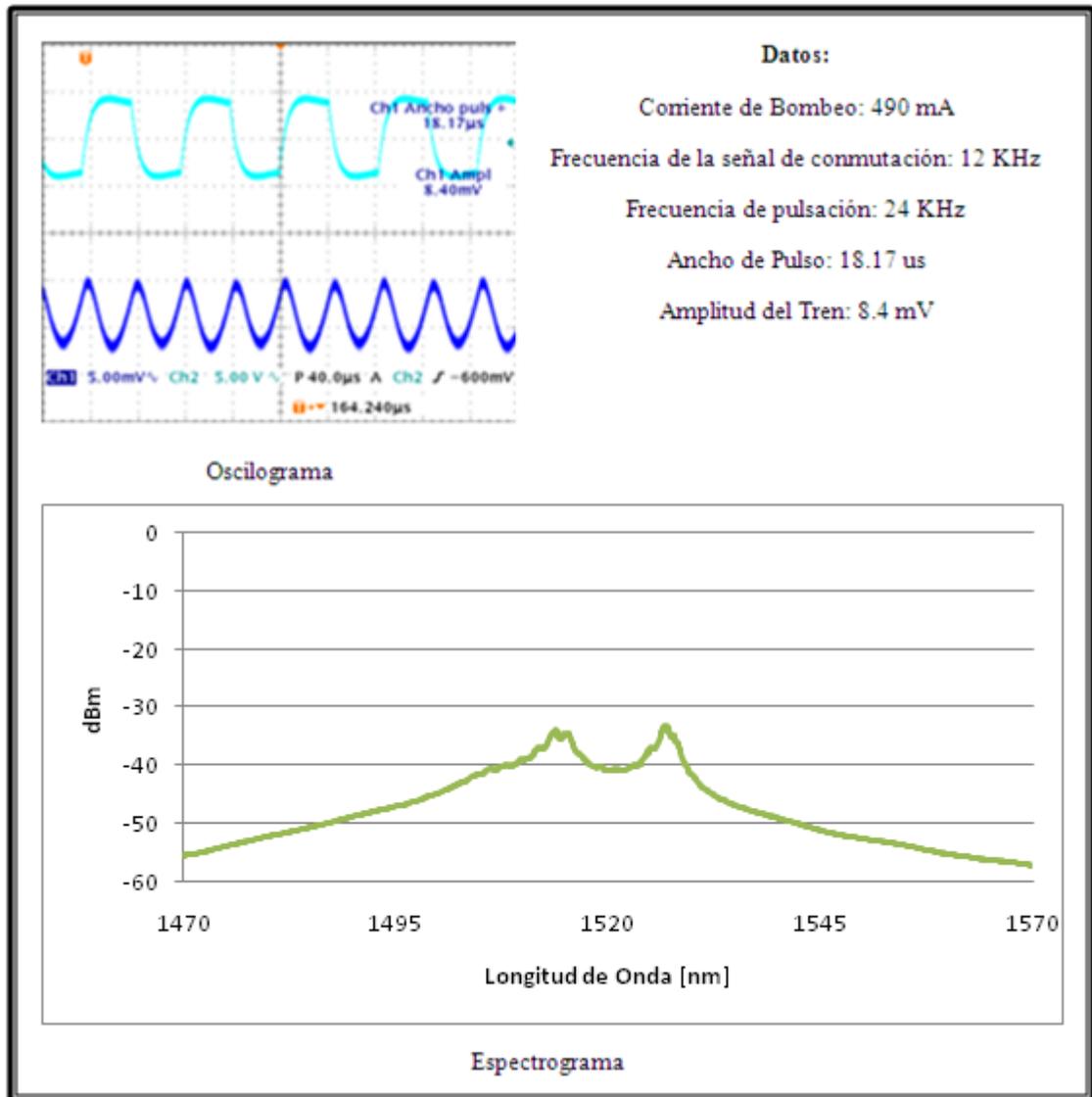


Figura 3.2.6: Formas de onda para la operación pulsada mediante SOA, $F(S)=12$ KHz

Las figuras mostradas anteriormente (Figuras 3.2.3-3.2.6) representan distintas condiciones a las cuales el anillo entra en operación pulsada. En los resultados mostrados se aprecia que los pulsos poseen una amplitud muy reducida, siendo dicha amplitud función de la frecuencia de conmutación. Nótese también que a mayor frecuencia en la señal de control menor es la amplitud de la emisión.

La relación de pulsaciones obtenidas por periodo es del doble respecto a la frecuencia de conmutación de polarización en el PS. El ancho de los pulsos resultantes es considerable, superior a los 15 μ s, estando este parámetro por encima de los valores obtenidos mediante el EDFA.

Se puede apreciar también que los pulsos no son completamente simétricos respecto al máximo, en ocasiones incluso pueden aparentar más un diente de sierra en lugar de un tren de impulsos. Esto se debe a que, como se indica al principio de la sección, el arreglo requiere de una corriente de bombeo muy elevada; sin embargo, la corriente máxima de operación permitida para el SOA es de 500 [mA]. De esta manera, se puede deducir que la ganancia del sistema no es suficiente para que este entre en un modo de pulsación bien definido.

Cabe destacar que, como se indica el capítulo 1, la ganancia de un EDFA es superior a la ganancia que presenta un SOA, por lo que en teoría si se lograra incrementar la ganancia del sistema sería posible obtener resultados similares a los analizados en el capítulo anterior.

Al modificar el CT de la señal de control del PS el anillo sale del régimen de operación pulsada a medida que este se aleja del 50%, sin embargo, con ayuda del PC es posible estabilizar la emisión obtenida.

2.3 Resumen

En esta sección se muestran de una manera puntual los resultados más significativos que se obtuvieron a lo largo de la experimentación realizada. A través de las gráficas que se muestran a continuación se caracteriza el arreglo propuesto para un sistema en operación pulsada.

- ✘ La conmutación de polarización para este arreglo es totalmente dependiente de la polarización.
- ✘ La polarización sigue patrones estables dependientes de la frecuencia de conmutación y de la polarización inicial en el sistema. Figura 3.2.2

✘ A mayor frecuencia de conmutación de la polarización menor es el ancho de los pulsos obtenidos, ver figura 2.3.2.

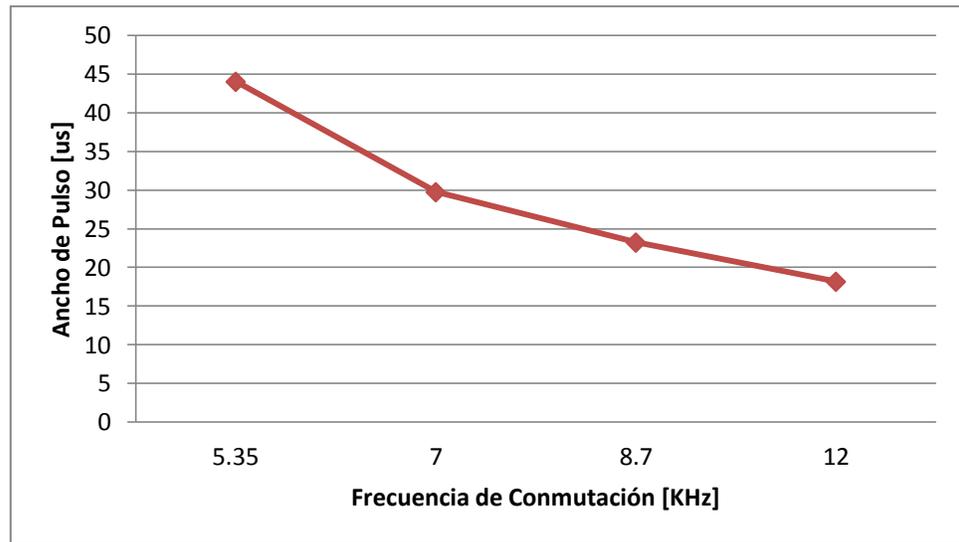


Figura 2.3.2: Grafica experimental Frecuencia de conmutación del PS Vs Ancho de Pulso

✘ A mayor frecuencia de conmutación de polarización se obtiene una menor amplitud en el tren de pulsos. Figura 2.3.3.

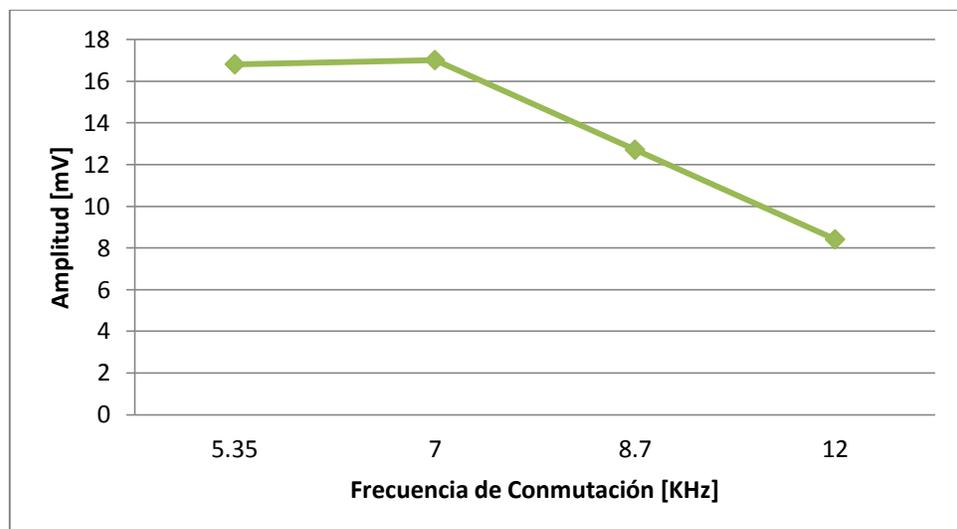


Figura 2.3.3: Grafica experimental Frecuencia de conmutación Vs Amplitud del tren de pulsos

- ✘ En ningún caso los espectros obtenidos muestran la característica de una operación “mode-locking”, lo cual puede estar relacionado a que los “pulsos” obtenidos no son simétricos. Para lograr el estado de operación pulsada son necesarios ajustes de polarización más finos, los cuales no se pueden obtener con el sistema estudiado. Figura 2.3.4

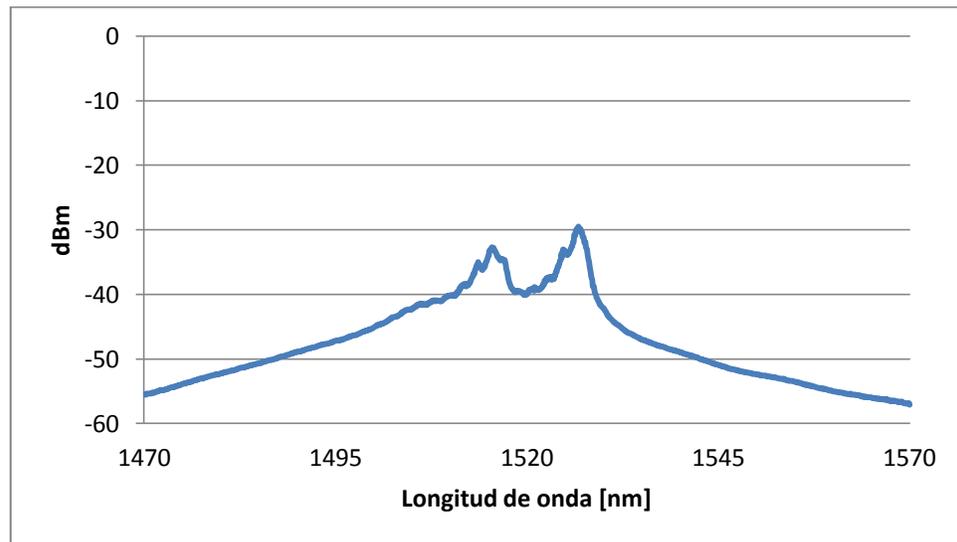


Figura 2.3.4: Espectro típico experimental, operación pulsada basada en SOA

- ✘ El SOA brinda una ganancia menor al sistema en relación al EDFA, siendo insuficiente para lograr un estado de operación pulsada completamente definido.
- ✘ Considerando que el SOA está diseñado para ser independiente de la polarización (Ver anexo) se concluye que el sistema contribuye a tener mayores pérdidas para ciertos estados de polarización, lo que genera complicaciones para obtener un estado de operación pulsada.
- ✘ Las alteraciones a la respuesta causadas por el CT pueden ser compensadas con ayuda del controlador de polarización.

CAPÍTULO 4

SISTEMAS LÁSER DE FIBRA CON EDFA Y SOA: OPERACIÓN EN LONGITUDES DE ONDA MÚLTIPLES

En esta sección se hace un estudio comparativo generalizado entre los beneficios que nos brindan los dos distintos tipos de amplificadores, EDFA y SOA. Así mismo, se exponen algunas de las características principales de los sistemas láser de fibra operando en longitudes de onda múltiples.

En el trabajo experimental desarrollado en esta tesis sólo se implementó el sistema basado en el SOA, debido a que los sistemas basados en EDFAs resultan más complejos y requieren de equipo que no estaba disponible en el laboratorio. Sin embargo, se tomaron como referencia publicaciones relacionadas al tema con el fin de tener punto de comparación con el desempeño del sistema láser con SOA implementado.

4.1 Características Generales de un Arreglo experimental basado en EDFA

Para lograr una emisión en múltiple longitud de onda estable haciendo uso de un amplificador de fibra dopado con erbio (EDFA), se requieren de técnicas relativamente complicadas que combinan una serie de elementos y/o dispositivos que van desde las fibras sensibles a los efectos no lineales hasta filtros birrefringentes basados en fibras hechas de cristales fotónicos¹. Se ha reportado también el uso de interferómetros, rejillas de Bragg, y otros dispositivos que propician la selección de varias longitudes de onda.

El uso de los efectos no lineales, principalmente el *four wave mixing* o mezclado de cuatro ondas (FWM) y el *nonlinear polarization rotation* o rotación de polarización no lineal (NPR) para producir emisiones múltiples controladas, provoca que el láser de fibra sea un sistema altamente dependiente a factores externos. La temperatura o los esfuerzos externos, por ejemplo, generan cambios muchas veces indeseables en la operación del láser añadiendo así variables aleatorias que dificultan aún más el diseño de un arreglo funcional.

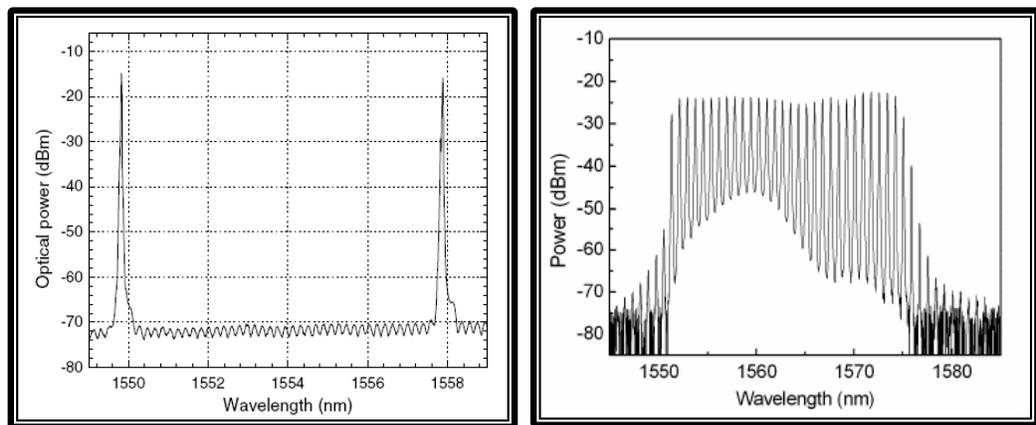
¹ ORLANDO FRAZAO, JOSÉ M. BAPTISTA, and JOSÉ L. SANTOS. "Recent Advances in Hi-Birefringence Fiber Loop Mirror Sensors". 26 November 2007 / Sensors 2007, 7, 2970-2983

La operación en longitud de onda múltiple de un EDFA resulta complicada, entre otras razones, debido a su amplio rango de ganancia (capítulo 1.3) lo que se traduce en un funcionamiento inestable debido, principalmente, a la competencia de las múltiples longitudes de onda por la energía disponible en el sistema. Esto es característico de los iones de erbio cuando se incorporan en la matriz de dióxido de silicio (SiO_2), es decir, es un comportamiento típico en EDFAs fabricados en fibras ópticas convencionales. La manera más simple de explicar esta limitación es que el amplificador, dentro de este sistema, no puede suministrar ganancia para operar en longitudes de onda múltiples de manera simultánea, así que la longitud de onda que experimente menos pérdidas dentro del resonador se quedará con toda la energía disponible y el resto de las longitudes de onda dejará de oscilar. Estos efectos son más notables si las longitudes de onda tienen una separación espectral pequeña, y dependen también de otros factores como por ejemplo, la polarización de la luz dentro del resonador.

A pesar de lo anteriormente mencionado se han logrado desarrollar una gran variedad de arreglos capaces de funcionar de manera estable en longitudes de onda múltiple. Una manera de lograr esto es enfriando el amplificador con nitrógeno líquido, aunque esto no resulta muy práctico para aplicaciones de campo². Otras técnicas demostradas con éxito incluyen sistemas láser de fibra utilizan dispositivos tales como rejillas de Bragg, fibras de alta birrefringencia (PMFs) y filtros Lyot-Sagnac, entre otros.

² N. Park and P. F. Wysocki, "24-line multiwavelength operation of erbium doped fiber-ring laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 11, pp. 1459–1461, Nov. 1996

Algunos espectros de emisión obtenidos con estos filtros dentro del resonador láser se muestran en la Figura 4.1.1 A. Otro ejemplo basado en filtros Fabry-Perot y polarizadores se muestra en la Figura 4.1.1 B. Se ha demostrado también arreglos más complejos con los cuales se pueden obtener más de 25 longitudes de onda simultáneas.



A)

B)

A) Single-longitudinal-mode dual-wavelength fiber ring laser by incorporating variable saturable absorbers and feedback fiber loops

B) Stable and uniform multiwavelength erbium doped fiber laser using nonlinear polarization rotation

Figura 4.1.1: A) Operación en longitud de onda dual; B) Operación en longitud de onda múltiple, 28 longitudes de onda.

4.2 Arreglo experimental propuesto para un sistema en longitud de onda múltiple basado en SOA

En la figura 4.2.1 se muestra el diseño del arreglo experimental que se implementó, el cual está basado en un láser en configuración en anillo. El amplificador semiconductor (SOA) se utiliza para generar ganancia óptica en el anillo y generar emisión láser. La señal se propaga a través del sistema hasta llegar a un separador de haces polarizados (PBS); este dispositivo permite dividir la luz polarizada original en dos señales con polarizaciones lineales ortogonales entre sí. En la salida de cada una de las polarizaciones obtenidas por el PBS se encuentra un brazo de un acoplador que mantiene la polarización (PMC), en el que ambas señales se unen de nuevo para formar una señal de salida con características distintas a la señal de entrada.

Como se mencionó en el capítulo 2, de manera natural, el láser en anillo opera en forma bi-direccional, esto es, la luz láser puede circular en sentido horario y anti-horario de manera simultánea. Para lograr que la luz se propague únicamente en una dirección y evitar inestabilidad en la operación del láser fue necesario incluir un aislador (*Isolator*, ISO). La salida del sistema se obtiene utilizando un acoplador de fibra óptica (C). En este caso se emplea un acoplador 95/5, y la salida del láser se toma del puerto correspondiente al 5% de la potencia contenida en el anillo.

Para el registro y análisis de la emisión láser se colocó un divisor de potencias (acoplador de fibra óptica 50/50) a la salida del anillo. Con esto se lograron observar simultáneamente tanto los efectos en la polarización como los cambios obtenidos en el espectro de la emisión. Para esto se emplearon el analizador de polarización (PSY) y el analizador de espectros (OSA), respectivamente. Con el fin de controlar la polarización de la señal del sistema, se colocó un controlador de polarización (PC) en el anillo. Este se ubicó a la entrada del PBS, pues esto ofrece la posibilidad de ajustar la potencia que circula en el anillo para cada polarización.

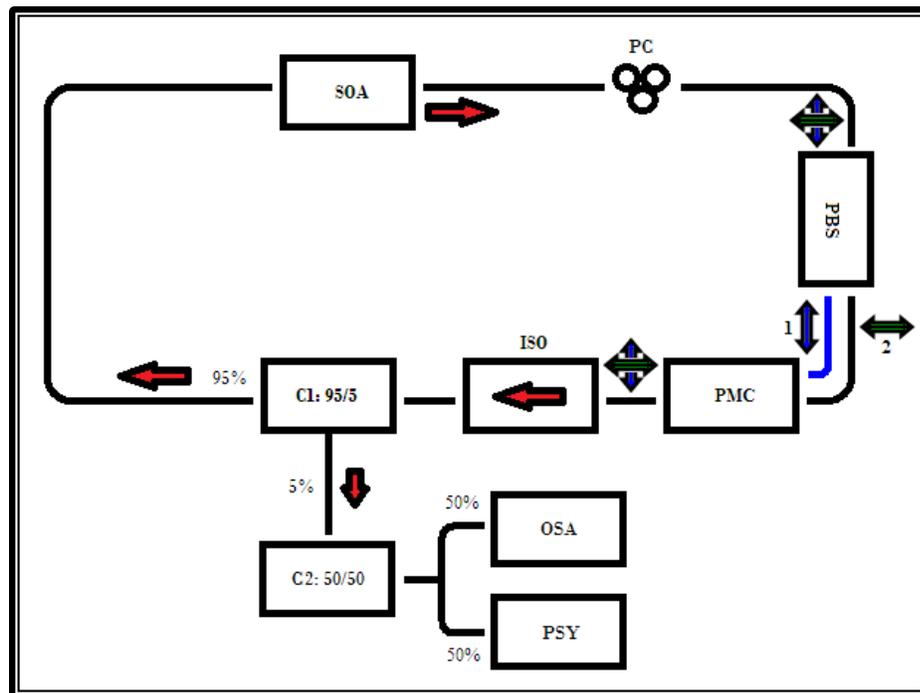


Figura 4.2.1: Diagrama del arreglo experimental, Sistema láser: Operación en longitudes de onda múltiples.

4.3 Resultados y Análisis

El primer punto relevante que se obtuvo, para el arreglo de la figura 4.2.1, es que el estado de polarización es estable, lo que indica que pese a la división de la señal original en dos componentes ortogonales, esta conserva sus características de polarización.

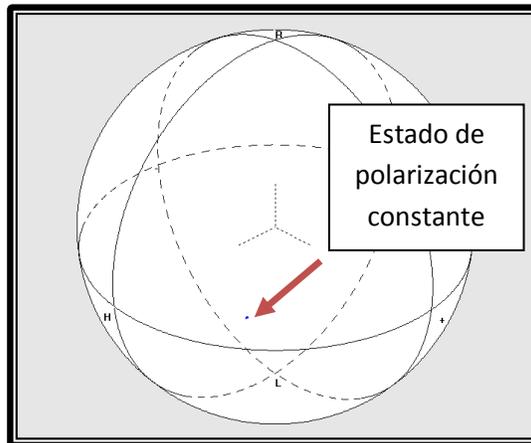
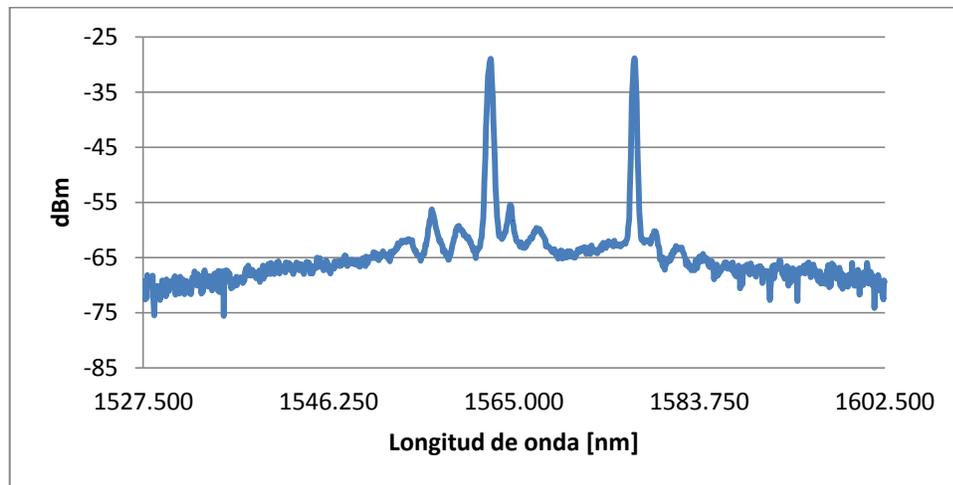


Figura 4.3.1: Estado de polarización estable a la salida del sistema, $I=130$ [mA]

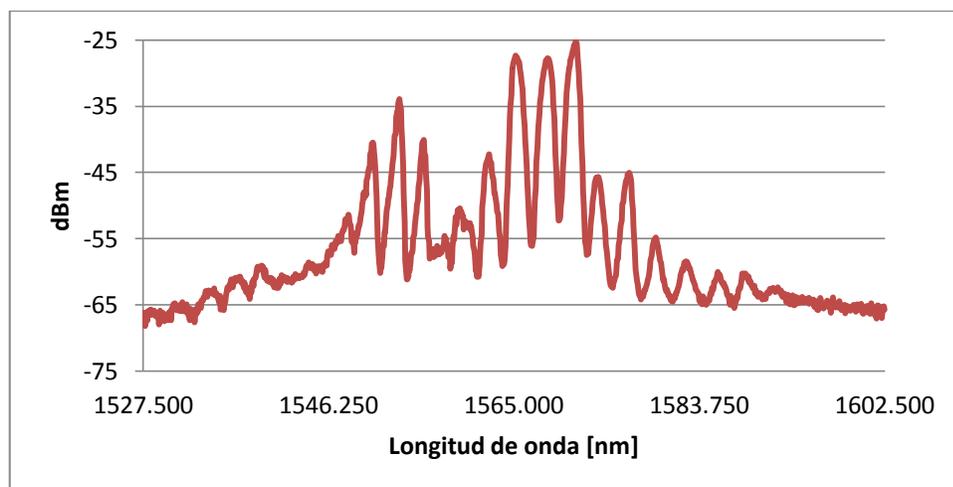
Modificando gradualmente la densidad de corriente en el SOA se concluyó que el número de longitudes de onda obtenidas aumenta en función de la corriente de bombeo. Para contabilizar el número de longitudes de onda, M , se consideraron únicamente aquellas que tuvieran una relación de señal a ruido de al menos 5 dB. Esta se midió a del pico de la longitud de onda a la base del espectro. Estos resultados se resumen en la tabla 4.3.1, mientras que la Figura 4.3.2. muestra un par de espectros típicos obtenidos con este sistema láser.

Tabla 4.3.1: Número de λ , M , obtenidas de acuerdo a la corriente de bombeo, I

Corriente, I [mA]	Potencia Salida, P [dBm]	No. de λ , M
130	-20.1	2
160	-14.2	3
190	-12.0	9
220	-10.9	11
250	-9.9	11
485	-6.4	14



A) $I=130$ [mA], $M=2$

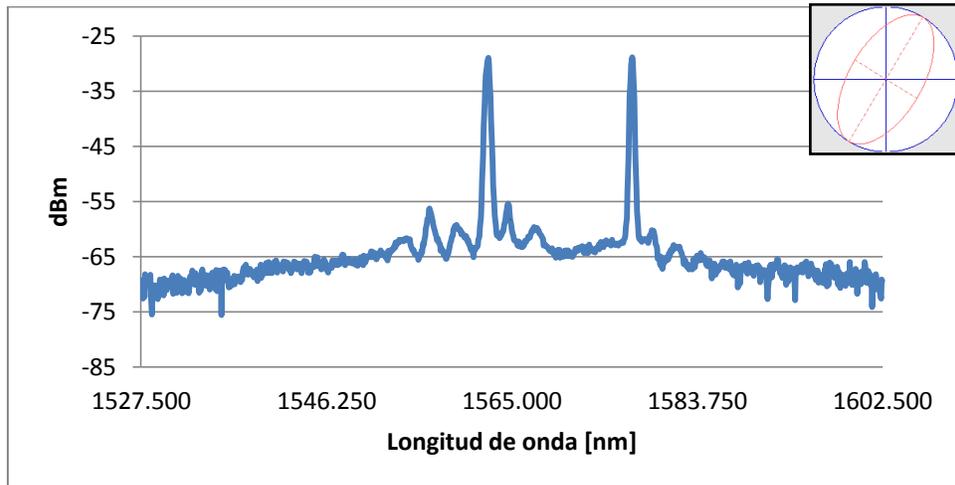


B) $I=190$ [mA], $M=9$

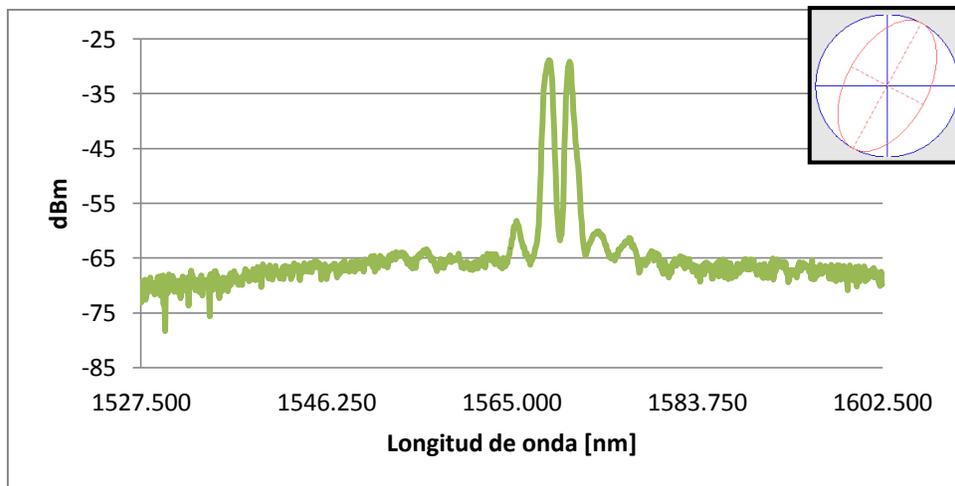
Figura 4.3.2: Espectros experimentales a distintas corrientes de bombeo

En la figura 4.3.2 podemos apreciar que no sólo el número de longitudes de onda aumenta, sino también el ruido. Esto genera que se reduzca la relación de señal a ruido (SNR, “*Signal Noise Ratio*”). Comparando los dos espectros de la Figura, podemos ver que la figura 4.3.2 (A) tiene una SNR de 25 dB, mientras que el espectro con más longitudes de onda, figura 4.3.2 (B) tiene una SNR que oscila entre los 30 y los 5 dB dependiendo de la longitud de onda de la emisión. En general, a potencias de trabajo menores, las emisiones obtenidas se acercan más a ser emisiones de longitud de onda única, con un ancho espectral más angosto que los que pueden obtenerse cuando el láser opera en longitudes de onda múltiples.

Una vez establecida la emisión múltiple de longitudes de onda, es posible manipular la separación entre longitudes de onda con ayuda de finos ajustes en el controlador de polarización (PC). Esto se ilustra en la Figura 4.3.3, obtenida para dos posiciones diferentes del controlador de polarización. Estos cambios en la distancia entre las longitudes de onda son más sencillos en el caso de una emisión de longitud de onda dual, a medida que el número de las emisiones aumenta, resulta mucho más complejo obtener longitudes estables. Dado que la señal de salida no pasó por ningún tipo de filtro espectral, la polarización registrada por el PSY representa el estado de polarización de ambas longitudes de onda. Nótese que los parámetros del estado de polarización (parámetros de Stokes) varían poco al ajustar el controlador de polarización. Esto indica que la polarización de la emisión láser se mantiene estable a pesar de que la separación entre las longitudes de onda se reduce.



A) $I=130$ [mA], Separación=14.55 [η m]
Polarización: $S1=-0.277$, $S2=-0.522$, $S3=-0.807$, Elipticidad =-0.507



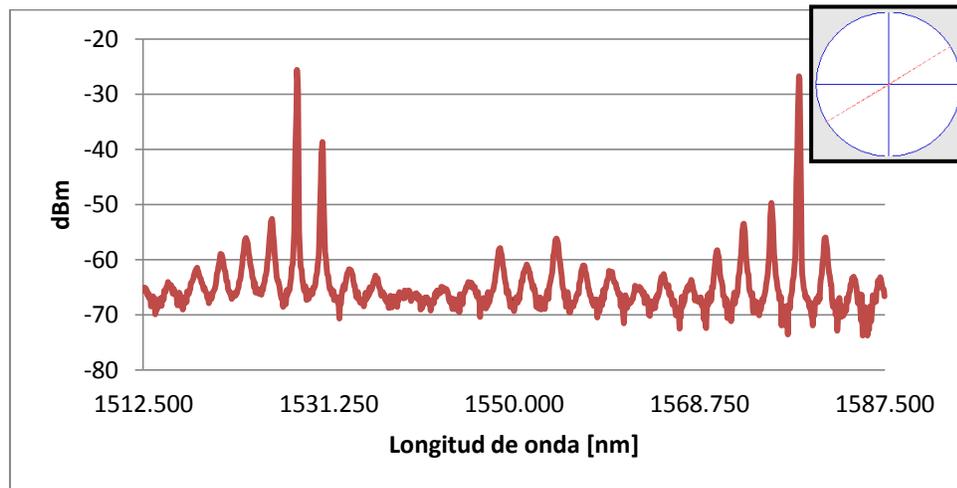
B) $I=130$ [mA], Separación=2.02 [η m]
Polarización: $S1=-0.283$, $S2=-0.425$, $S3=-0.860$, Elipticidad =-0.569

Figura 4.3.3. Manipulación de la separación de las múltiples longitudes de onda con ayuda de la polarización.

Para determinar los efectos de utilizar dos polarizaciones dentro del láser en anillo se desconectó un puerto un puerto del PBS. Con esto se logra seleccionar únicamente una polarización circulando dentro del resonador.

Los resultados obtenidos son similares a los mostrados anteriormente en algunas variables, por ejemplo, las dependencias entre la corriente y las longitudes de onda se conservan, y el estado de polarización obtenido se conserva estable.

En el espectro obtenido con esta configuración (Figura 4.3.4) se aprecia que en la base del espectro de emisión (esto es, la señal de emisión espontánea amplificada, *ASE*, por sus siglas en inglés) se tiene un patrón periódico de longitudes de onda equidistantes. Esto contrasta con el caso anterior, pues como puede apreciarse en las figuras correspondientes, la periodicidad del espectro de *ASE* se pierde en algunas regiones espectrales cuando se ajusta el controlador de polarización. Esto indica que la configuración que utiliza dos polarizaciones genera dos tipos de patrones periódicos espectrales que pueden interferir de manera constructiva o destructiva al recombinarse en el PMC. Cada una de las dos componentes de polarización tiene asociada una serie de longitudes de onda específicas y para ciertas posiciones del controlador de polarización, el patrón de longitudes de onda puede desaparecer en ciertas regiones espectrales. Con esto se logra que sólo oscilen las longitudes de onda dominantes de acuerdo al patrón espectral generado.



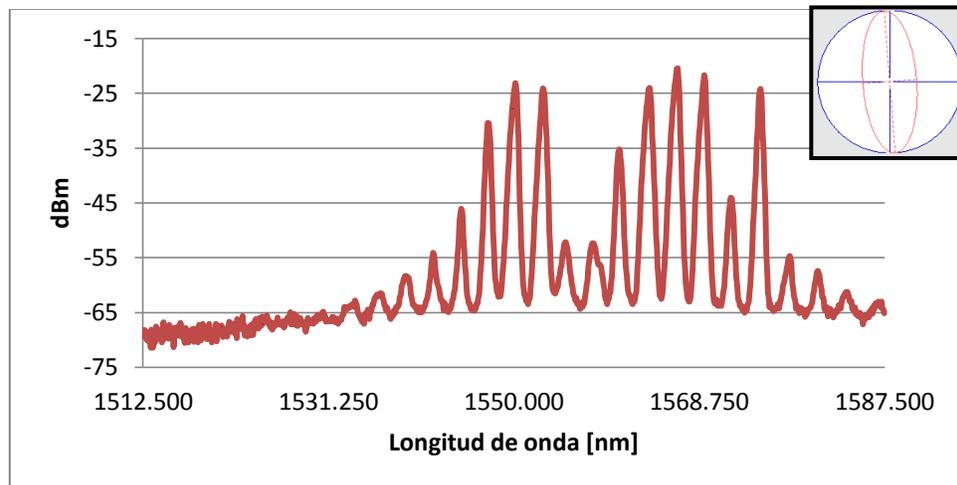
$I=200 [mA]$, $Separación=50.78 [\eta m]$
Polarización: $S1=0.445$, $S2=-0.896$, $S3=0.000$, $Elipticidad = 0$

Figura 4.3.4: Espectro de la operación en longitud de onda múltiple con un solo puerto del PBS conectado al sistema.

El patrón de oscilación que se obtiene en el espectro de la ASE se debe a la birrefringencia del resonador. Cada polarización tiene un valor de birrefringencia y esta puede ajustarse hasta cierto grado cambiando la posición del controlador de polarización (PC). Cuando se utiliza sólo una polarización, no existen interacciones entre dos polarizaciones en el anillo, y esto genera una respuesta es más estable, incluso se puede alcanzar un mayor número de longitudes de onda emitidas. Los resultados se muestran en la Tabla 4.3.2, y la Figura 4.3.5 muestra uno de los espectros obtenidos con esta configuración. Nótese que en este caso la polarización registrada a la salida del láser es lineal. A medida que aumenta la corriente del amplificador, aumenta el número de longitudes de onda y la polarización comienza a ser elíptica.

Tabla 4.3.2: Número de λ obtenidas de acuerdo a la corriente de bombeo

Corriente [mA]	Potencia Salida [dBm]	No. de λ
170	-17.61	10
200	-14.02	11
250	-11.35	14
370	-8.41	16
450	-7.25	16



$I=370$ [mA], Separación=2.9 [η m]
Polarización: $S1=-0.740$, $S2=0.111$, $S3=-0.663$

Figura 4.3.5: Espectro de la operación en longitud de onda múltiple

4.4 Resumen

Los resultados más significativos que se obtuvieron con esta configuración para el sistema láser pueden resumirse como sigue:

- ✘ Es posible obtener un estado de emisión de longitud de onda múltiple estable mediante un arreglo basando en SOA, que a diferencia de los sistemas de emisión múltiple basados en EDFA, resulta mucho más simple.
- ✘ El estado de polarización es estable en el sistema.
- ✘ El número de longitudes de onda obtenidas son función de la corriente de bombeo, es decir que conforme la corriente aumenta, mayor es el número de longitudes obtenidas. Los datos experimentales se señalan en la figura 4.4.1.

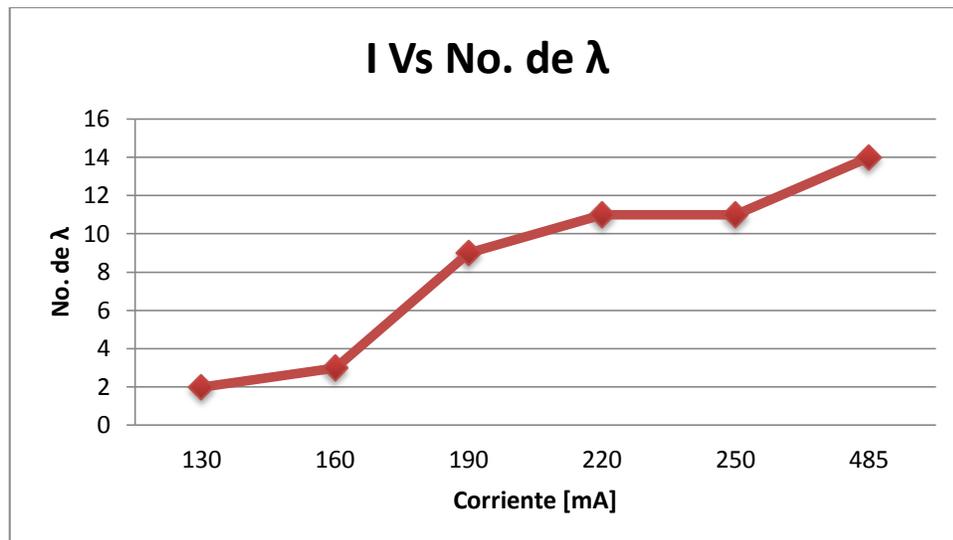


Figura 4.4.1: Relación grafica entre la corriente de bombeo y el numero de longitudes de onda obtenidos

Este fenómeno se debe a que con corrientes de bombeo bajas la energía disponible en el sistema es limitada y sólo las longitudes de onda dominantes, o con mayor ganancia, son las que se hacen presentes. Sin embargo, al aumentar la energía en el anillo las longitudes de onda menos dominantes comienzan a recibir la energía necesaria para lograr una emisión láser.

- ✘ A potencias de trabajo menores, las emisiones obtenidas se acercan más a ser en una longitud de onda única.
- ✘ Es posible manipular la separación entre longitudes de onda con ayuda de finos ajustes en el controlador de polarización (PC). Figura 4.3.3
- ✘ En el caso de tener solo una componente en el anillo se tiene un patrón periódico de longitudes de onda equidistantes. Cada una de las dos componentes de la polarización original tiene asociada una serie de longitudes de onda específicas. Esto se debe a la birrefringencia del anillo para cada polarización (Figura 4.3.4).
- ✘ Filtrando una de las dos componentes obtenidas del PBS es posible obtener una señal más estable que permite alcanzar un mayor número de longitudes emitidas, Figura 4.4.2

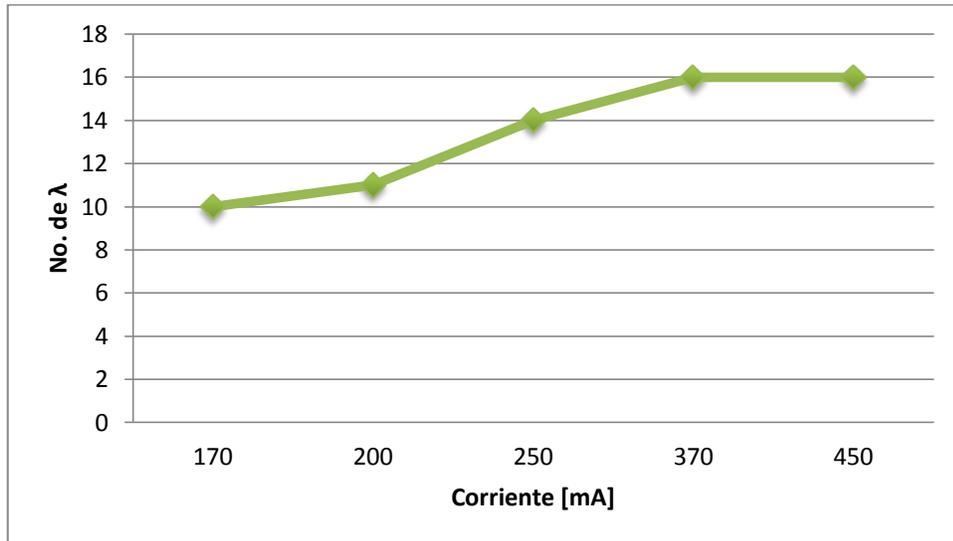


Figura 4.4.2: Relación grafica entre la corriente de bombeo y el numero de longitudes de onda obtenidos, utilizando solo un brazo del PBS.

La estabilidad se logra debido a que en el sistema no ocurren tantas interacciones constructivas y/o destructivas como ocurre al tener las dos componentes de la señal original circulando por el anillo.

CONCLUSIONES GENERALES

Durante el desarrollo de este trabajo fue posible evaluar algunas de las diferencias en el funcionamiento entre un EDFA y un SOA cuando estos se utilizan en un sistema láser de fibra. En particular, se trataron de identificar las ventajas y desventajas ofrecidas por estos dispositivos en modos de operación pulsada y con longitudes de onda múltiples. A pesar de que de manera natural los EDFAs son amplificadores altamente compatibles con dispositivos de fibra óptica, estos amplificadores presentan ciertas limitaciones prácticas para lograr algunas de las características deseadas en sistemas de comunicaciones ópticos (por ejemplo, emisión a longitudes de onda múltiple). Por otro lado, los SOAs han comenzado a utilizarse en sistemas láser de fibra gracias a que pueden acoplarse de manera sencilla con este tipo de guías de onda. Aunque no presentan algunas de las limitantes observadas en EDFAs, los SOAs no permiten obtener los mismos niveles de ganancia obtenidos con los amplificadores de fibra óptica, y esto impone otras limitantes en algunos regímenes de operación.

El EDFA, gracias a su alto nivel de ganancia y su dependencia al estado de polarización, ofrece facilidad a la hora de trabajar en modo de operación pulsada, sin embargo su dependencia a factores externos, principalmente la temperatura, hacen que su manejo sea complejo y costoso. Desde el punto de vista práctico, estas características implican que para emplear este amplificador en un sistema láser de fibra operando en

múltiples longitudes de onda, es necesario enfriar el amplificador con técnicas relativamente complicadas. Aunque existen alternativas para lograr operar en este tipo de régimen, estas involucran más dispositivos ópticos que hacen más complejo el sistema láser de fibra.

El SOA ofrece estabilidad ante los cambios en los estados de polarización, lo que permite poder manipular las diferentes componentes de la señal. Esta característica nos permitió obtener buenos resultados en la operación en longitudes de onda múltiples con un arreglo simple, en el cual se obtuvieron por encima de 10 longitudes operando simultáneamente. Esta característica se logra gracias a que el SOA puede proporcionar ganancia a varias longitudes de onda simultáneamente sin que exista competencia entre ellas. Además, la separación entre longitudes de onda puede ser pequeña (hasta 0.8 nm), lo cual es muy difícil de lograr en un EDFA. Por otra parte, su menor ganancia comparada con la del EDFA, hace que se requiera de una cantidad muy elevada de corriente de bombeo para obtener un nivel de ganancia que permita obtener resultados comparables a los obtenidos mediante un EDFA en régimen de operación pulsada. Esto implica que las pérdidas en los resonadores que empleen SOAs como medios de ganancia tienen que minimizarse.

Hablando exclusivamente del régimen de operación pulsada, el desempeño del EDFA es muy superior al del SOA, ya que la energía necesaria para obtener un régimen estable es mucho menor para un láser basado en EDFA que para uno con SOA. Además, el ancho temporal óptimo registrado en los pulsos obtenidos en los experimentos va de los

5.5 μs a los 18.1 μs . Este factor puede resultar determinante en la tasa de transmisión máxima si se desea emplear este tipo de láseres en un sistema de comunicaciones.

En un sistema ideal de alta capacidad, la tendencia sería hacer uso de dispositivos totalmente ópticos, ya que los sistemas eléctricos en la actualidad limitan en varios aspectos principalmente la velocidad de respuesta y el acoplamiento. Además, los dispositivos ópticos ofrecen transparencia en tanto en transmisión como en recepción, es decir, que no importando la polarización o la codificación las señales pueden ser “procesadas” por estos dispositivos.

Basándonos en los resultados obtenidos, la solución ideal para la implementación de un sistema láser simple y eficiente, sería la combinación de los dos amplificadores en un dispositivo que pudiera sacar provecho de las mejores bondades que nos ofrecen en la actualidad cada uno de estos dispositivos; por ejemplo el bombeo óptico resultó ser más eficiente que un bombeo eléctrico, cualidad que nos brinda el EDFA, mientras que la independencia al estado de polarización que presenta el SOA es de gran utilidad en la implementación de algunos sistemas de fibra láser.

En resumen, cada uno de los amplificadores ofrecen características distintas que pueden ser explotadas de diferentes maneras y en diferentes ámbitos, los nuevos resultados obtenidos en este trabajo permiten sacar provecho de ellas para obtener un funcionamiento óptimo con los sistemas simples y eficientes que permitan innovar y ampliar los horizontes de la tecnología.

REFERENCIAS

- 1) GOVIND P. AGRAWAL. 2001. Applications of Nonlinear Fiber Optics, Academic Press. 458p.
- 2) GOVIND P. AGRAWAL. 2002. Fiber-Optic Communication Systems. Third Edition. NY. Wiley-Interscience. 546p.
- 3) P. MARTÍN-RAMOS, J. MARTÍN-GIL, P. CHAMORRO-POSADA. Amplificadores de fibra óptica dopada con Erbio e Iterbio (EDFAs y YEDFAs). Dpto. de Teoría de la Señal e Ingeniería Telemática, y Dpto. de Ingeniería Agrícola y Forestal, Universidad de Valladolid, Junio 2010.
Disponible en versión digital en la página:
<http://www.scribd.com/doc/33388581/Amplificadores-de-fibra-optica-dopada-con-Erbio-e-Iterbio-EDFAs-y-YEDFAs>
- 4) JEAN PIERRE NÉROU, Introducción a las Telecomunicaciones por Fibra Óptica, México, Trillas, 1991 (reimp. 2001), 345p.
- 5) ZU XING ZHANG, KUN XU, JIAN WU, XIAO BING HONG, and JIN TONG LIN. “Two Different Operation Regimes of Fiber Laser Based on Nonlinear Polarization Rotation: Passive Mode-Locking and Multiwavelength Emission”. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 20, NO. 12, JUNE 15, 2008
- 6) A.P. LUO, Z.C. LUO, and W.C. XU. “Channel-spacing switchable multi-wavelength fiber ring laser with one segment of polarization maintain fiber”. Laser Phys. Lett. 6, No. 8, 598–601 (2009) / DOI 10.1002/lapl.200910041.

- 7) ORLANDO FRAZAO, JOSÉ M. BAPTISTA, and JOSÉ L. SANTOS. “Recent Advances in Hi-Birefringence Fiber Loop Mirror Sensors”. 26 November 2007 / Sensors 2007, 7, 2970-2983
- 8) ZUXING ZHANG, LI ZHAN, KUN XU, JIAN WU, YUXING XIA, and JINTONG LIN. “Multiwavelength fiber laser with fine adjustment, based on nonlinear polarization rotation and birefringence fiber filter”. OPTICS LETTERS / Vol. 33, No. 4 / February 15, 2008
- 9) XINHUAN FENG, HWA-YAW TAM, and P. K. A. WAI. “Stable and uniform multiwavelength erbium doped fiber laser using nonlinear polarization rotation”, 4 September 2006 / Vol. 14, No. 18 / OPTICS EXPRESS 8205
- 10) YANGE LIU, BO LIU, XINHUAN FENG, WEIGANG ZHANG, GUANG ZHOU, SHUZHONG YUAN, GUIYUN KAI, and XIAOYI DONG. “High-birefringence fiber loop mirrors and their applications as sensors”, APPLIED OPTICS / Vol. 44, No. 12 / 20 April 2005
- 11) M. ALAM, D. GUERTIN, J. FARRONI, J. ABRAMCZYK, N. JACOBSON AND K. TANKALA, “Small form-factor PANDA type HiBi fiber for sensing applications”, InProc. SPIE vol.5272: IndustrialHighwaySensorsTechnology, October28-30, 2003
- 12) ANÓNIMO, “Polarization maintaining fiber optic technology”, Consulta: 04 de agosto de 2011, Disponible en linea http://www.diamond-kimberlit.nl/nieuw/media/library/docs/PM_Technology.pdf

- 13) MABLE P. FOK and CHESTER SHU, “Tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser stabilized by four-wave mixing in a 35-cm highly nonlinear bismuth-oxide fiber”, 14 May 2007 / Vol. 15, No. 10 / OPTICS EXPRESS 5925
- 14) D. CHEN and L. SHEN, “Switchable and tunable Erbium-doped fiber ring laser incorporating a birefringent and highly nonlinear photonic crystal fiber”, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Laser Phys. Lett. 4, No. 5, 368–370, 2 January 2007
- 15) JUNQIANG SUN, XIUHUA YUAN, XINLIANG ZHANG, DEXIU HUANG, “Single-longitudinal-mode dual-wavelength fiber ring laser by incorporating variable saturable absorbers and feedback fiber loops”, Optics Communications 273 (2007) 231–237
- 16) X.P. DONG, SHENPING LI, K.S. CHIANG, M.N. NG and B.C.B. CHU, “Multiwavelength erbium-doped fibre laser based on a high-birefringence fibre loop mirror”, ELECTRONICS LETTERS 14th September 2000 Vol. 36 No. 79
- 17) YOUNG-GEUN HAN, JU HAN LEE, SANG BAE LEE, LUCA POTI, and ANTONELLA BOGONI, “Novel Multiwavelength Erbium-Doped Fiber and Raman Fiber Ring Lasers With Continuous Wavelength Spacing Tunability at Room Temperature”, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 25, NO. 8, AUGUST 2007

- 18) CHENGHOU TU, WENGANG GUO, YONGNAN LI, SHUANGGEN ZHANG, FUYUN LU, “Stable multiwavelength and passively mode-locked Yb-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation”, Optics Communications 280 (2007) 448–452
- 19) JIAN LIU, JIANPING YAO, JIAN YAO and TET HIN YEAP, “Single-Longitudinal-Mode Multiwavelength Fiber Ring Laser”, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 16, NO. 4, APRIL 2004
- 20) HENDRIK SABERT and ERNST BRINKMEYER, “Pulse Generation in Fiber Lasers with Frequency Shifted Feedback”, JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 12, NO. 8, AUGUST 1994
- 21) XINHUAN FENG, HWA YAW TAM, CHAO LU, P. K. A. WAI and BAIYOU GUAN, “Multiwavelength Erbium-Doped Fiber Laser Employing Cavity Loss Modulation”, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 21, NO. 18, SEPTEMBER 15, 2009
- 22) Encyclopedia of Laser Physics and Technology,
<http://www.rp-photonics.com/dispersion_shifted_fibers.html>,
consulta: 03 de agosto de 2011
- 23) Fiber-Optic Technologies (CISCOPRESS),
<<http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=170740&seqNum=7>>,
consulta: 03 de agosto de 2011

- 24) Newport, Polarization in Fiber Optics,
<http://www.newport.com/Tutorial-Polarization-in-Fiber-Optics/849671/1033/content.aspx>, consulta 24 de agosto de 2011

ANEXO

Digital Phosphor Oscilloscopes

► TDS3000B Series



The TDS3000B Series of Digital Phosphor Oscilloscopes Provides Unmatched Performance and Portability at an Affordable Price

The TDS3000B Series packs the power of a DPO, digital real-time (DRT) sampling technology, WaveAlert waveform anomaly detection, OpenChoice documentation and analysis solutions and five application-specific modules into a lightweight, battery-capable design.

A DPO Provides a Greater Level of Insight into Complex Signals

The TDS3000B Series DPO delivers 3,600 wfms/s continuous waveform capture rate to capture glitches and infrequent events three times faster than comparable oscilloscopes. Some oscillo-

scope vendors claim high waveform capture rates for short bursts of time, but your oscilloscope needs to deliver these fast waveform capture rates on a continuous basis – saving minutes, hours or even days by quickly revealing the nature of faults so advanced triggers can be applied to isolate them. In addition, the TDS3000B DPO's real-time intensity grading highlights the details about the "history" of a signal's activity, making it easier to understand the characteristics of the waveforms you've captured.

► Features & Benefits

- 100 to 500 MHz Bandwidths
- 5 GS/s Maximum Real-time Sample Rate, with $\sin(x)/x$ Interpolation
- 3,600 wfms/s Continuous Waveform Capture Rate
- 2 or 4 Channels
- Full VGA Color LCD
- 25 Automatic Measurements
- FFT Standard
- Multi-language User Interface
- QuickMenu Graphical User Interface for Easy Operation
- WaveAlert® Automatic Waveform Anomaly Detection
- OpenChoice® Solutions Simplify Instrument Control, Documentation and Analysis
 - e*Scope® Web-based Remote Control
 - Built-in Ethernet Port
 - GPIB, RS232, VGA
 - TDSPCS1 OpenChoice Software
 - WaveStar™ Software
 - Integration with Third-party Software

- Application Modules for Specialized Analysis
 - Advanced Analysis Module
 - Limit Testing Module
 - Telecommunications Mask Testing Module
 - Extended Video Module
 - 601 Serial Digital Video Module

Optional Internal Battery Operation Up to 3 Hours Without Line Power

Plug-in Printer for Portable Documentation of Results

TekProbe® Interface Supports Active, Differential and Current Probes for Automatic Scaling and Units

► Applications

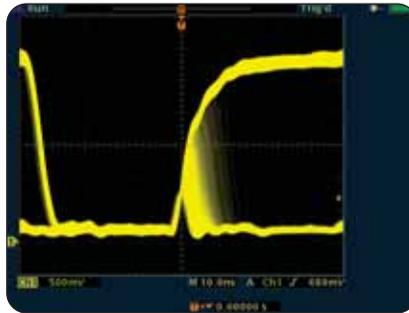
- Digital Design and Debug
- Video Installation and Service
- Power Supply Design
- Education and Training
- Telecommunications Mask Testing
- Manufacturing Test
- General Bench Test

Digital Phosphor Oscilloscopes

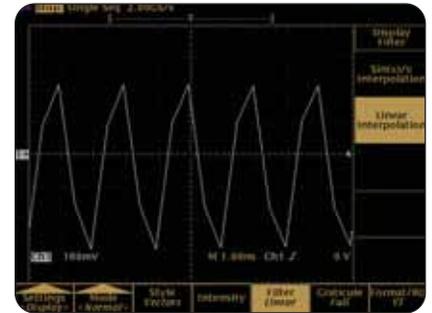
► TDS3000B Series

Higher Speeds Demand Greater Bandwidth

You face faster clock rates and edge speeds, increasingly complex signals and mounting time-to-market pressures. The higher the bandwidth of your oscilloscope, the more accurate the reproduction of your signal. The TDS3000B Series offers a wide range of bandwidths from 100 MHz to 500 MHz to best suit the needs of your most demanding projects, so that you can complete your tasks on time and with confidence.



► The TDS3000B Series DPO provides unmatched insight into complex signal behavior, such as metastable events.



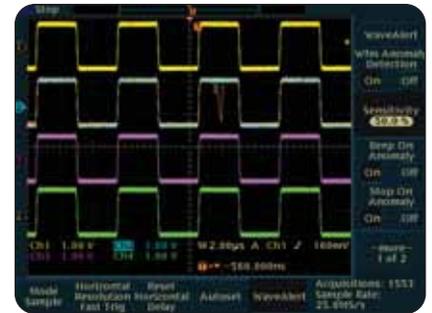
► Even with 2 GS/s sample rate, which exceeds the Nyquist requirement of 2X oversampling, this 500 MHz oscilloscope with linear interpolation does not provide accurate reconstruction of the same 500 MHz sine wave.

Quickly Debug and Characterize Signals with DRT Sampling Technology and sin(x)/x Interpolation

The TDS3000B Series combines unique digital real-time (DRT) sampling technology with sin(x)/x interpolation to allow you to accurately characterize a wide range of signal types on all channels simultaneously. This sampling technology makes it possible to capture high-frequency information, such as glitches and edge anomalies, that eludes other oscilloscopes in its class, while sin(x)/x interpolation ensures precise reconstruction of each waveform. The result – a complete view of your signal to speed debug and characterization.



► The TDS3054B's 5 GS/s real-time sample rate and sin(x)/x interpolation ensure accurate reconstruction of a 500 MHz sine wave.

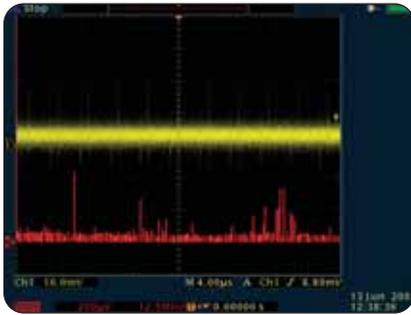


► WaveAlert waveform anomaly detection alerts you to any waveform that deviates from the “normal” input, such as the glitch on channel 2.

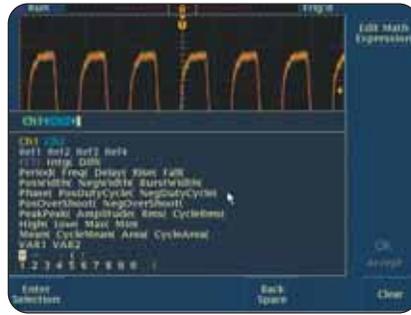
Enhanced Troubleshooting Ability

WaveAlert® waveform anomaly detection speeds your troubleshooting tasks by helping you find those elusive problems faster. WaveAlert detection monitors the incoming signals on all channels and will detect and highlight any waveform that deviates from the normal waveform being

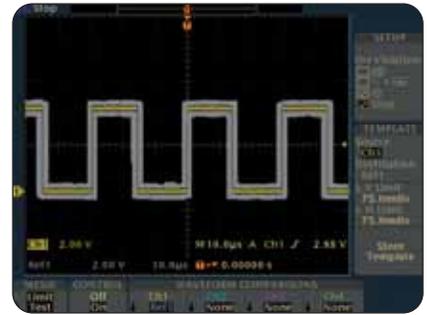
acquired. Because the TDS3000B oscilloscope can stop acquisition, sound a beep, make a hard copy or save the waveform when it detects an anomaly, you can run tests over long time periods – even unattended – to find those challenging, very infrequent failures.



► Look for unintentional circuit noise with the TDS3000B Series' FFT capability.



► TDS3AAM Advanced Analysis Module delivers advanced waveform math.



► The TDS3000B DPO with the TDS3LIM limit testing module is ideal for manufacturing test applications where fast Go/No-Go decisions are required.

Simple, Speedy Documentation and Analysis

OpenChoice® solutions deliver simple, seamless integration between the oscilloscope and the PC. Using a standard built-in Ethernet port, e*Scope web-based remote control allows you to control your TDS3000B oscilloscope from anywhere, using the Internet and your PC. With the TDS3GV optional communication module, floppy disk, TDSPCS1 OpenChoice software and integration with third-party software, the TDS3000B Series provides you with multiple choices to easily capture, transfer, document and analyze your measurement results. This seamless integration extends the power and value of these brilliantly engineered, affordable oscilloscopes.

Flexible Features for Every Application

Optional application modules enable you to transform your oscilloscope into a specialized tool for limit testing, telecommunications mask testing, and video troubleshooting.

And, with its lightweight, compact size and battery pack, the TDS3000B Series oscilloscope can go wherever it is needed. It weighs only 4.5 kg (9.8 lbs.), with battery installed. Use the optional plug-in thermal printer to instantly document your work, even in the field.

TDS3AAM Advanced Analysis Module – Adds extended math capability, arbitrary math expressions, measurement statistics and additional automated measurements.

TDS3LIM Limit Testing Module – Offers fast, accurate Go/No-Go verification that tested circuits are operating within intended parameters.

TDS3TMT Telecommunications Mask Testing Module – Pass/Fail compliance of ITU-T G.703 and ANSI T1.102 standards, custom mask testing and more.

TDS3VID Extended Video Editing Module – Adds Video QuickMenu, autoset, holdoff, line count trigger, video picture mode, vectorscope mode,¹ HDTV format triggering graticules and more.

TDS3SDI 601 Serial/Digital Video Module – Identify and analyze ITU-R BT.601 video signals, video picture mode with bright line select, vectorscope mode,¹ HDTV format triggering and more.

¹ Vectorscope does not support composite video.

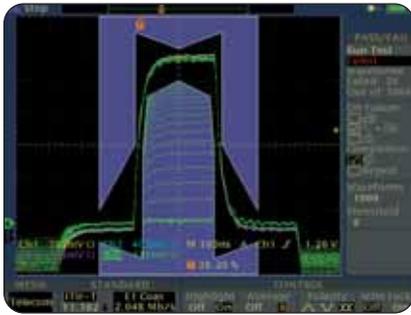
Digital Phosphor Oscilloscopes

► TDS3000B Series

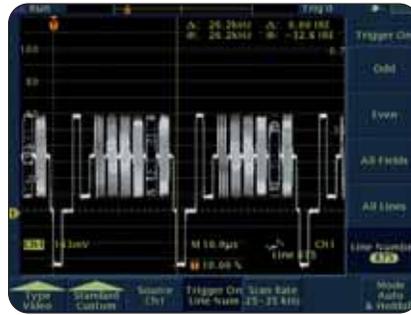
► Characteristics

► TDS3000B Series Electrical Characteristics

	TDS3012B	TDS3014B	TDS3024B	TDS3032B	TDS3034B	TDS3044B	TDS3052B	TDS3054B
Bandwidth	100 MHz	100 MHz	200 MHz	300 MHz	300 MHz	400 MHz	500 MHz	500 MHz
Channels	2	4	4	2	4	4	2	4
Sample rate on Each Channel	1.25 GS/s	1.25 GS/s	2.5 GS/s	2.5 GS/s	2.5 GS/s	5 GS/s	5 GS/s	5 GS/s
Maximum Record Length	10 K points on all models							
Vertical Resolution	9-Bits on all models							
Vertical Sensitivity (/div)	1 mV to 10 V on all models							
Vertical Accuracy	±2% on all models							
Max Input Voltage (1 M Ω)	150 V _{RMS} CAT I on all models (300 V CAT II with standard 10X probe)							
Position Range	± 5 div on all models							
BW Limit	20 MHz	20 MHz	20, 150 MHz	20, 150 MHz	20, 150 MHz	20, 150 MHz	20, 150 MHz	20, 150 MHz
Input Coupling	AC, DC, GND on all models							
Input Impedance Selections	1 M Ω in parallel with 13 pF or 50 Ω on all models							
Time Base Range	4 ns to 10 s/div	4 ns to 10 s/div	2 ns to 10 s/div	2 ns to 10 s/div	2 ns to 10 s/div	1 ns to 10 s/div	1 ns to 10 s/div	1 ns to 10 s/div
Time Base Accuracy	20 ppm on all models							
Display (VGA)	Color active matrix LCD on all models							



▶ TDS3000B DPO provides breakthrough test speeds for telecommunications line card testing. The telecom QUICKMENU puts all the commonly used telecom testing functions on a single menu.



▶ Custom video trigger allows the TDS3000B to trigger on standards such as RS343 (26.2 kHz scan rate).



▶ Trace and identify ITU-R BT.601 video signals with the TDS3SDI 601 Serial Digital Video Module.

Acquisition Modes

DPO – Captures and displays complex waveforms, random events and subtle patterns in actual signal behavior. DPOs are able to provide 3 dimensions of signal information in real time: Amplitude, time and the distribution of amplitude over time.

Peak Detect – High frequency and random glitch capture. Captures glitches as narrow as 1 ns.

WaveAlert® – Monitors the incoming signals on all channels and alerts the user to any waveform that deviates from the normal waveform being acquired.

Sample – Sample data only.

Envelope – Max/Min values acquired over one or more acquisitions.

Average – Waveform data from 2 to 512 (selectable) acquisitions is averaged.

Single Sequence – Use the Single Sequence button to capture a single triggered acquisition sequence at a time.

Trigger System

Main Trigger Modes – Auto (supports Roll Mode for 40 ms/div and slower), Normal.

B Trigger – Trigger after time or events.

Trigger After Time Range – 13.2 ns to 50 s.

Trigger After Events Range – 1 to 9,999,999 events.

External Trigger Input – >1 MΩ in parallel with 17 pF; Max input voltage is 150 V_{RMS}.

Trigger Types

Edge – Conventional level-driven trigger. Positive or negative slope on any channel. Coupling selections: DC, noise reject, HF reject, LF reject.

Video – Trigger on all lines, odd, even or all fields. With TDS3VID or TDS3SDI, trigger on individual lines and on analog HDTV formats (1080i, 1080p, 720p, 480p).

Logic –

PATTERN: Specifies AND, OR, NAND, NOR when true or false for a specific time.

STATE: Any logic state. Triggerable on rising or falling edge of a clock. Logic triggers can be used on combinations of 2 inputs (not 4).

Pulse –

WIDTH (or GLITCH): Trigger on pulse width less than, greater than, equal to or not equal to a selectable time limit ranging from 39.6 ns to 50 s.

RUNT: Trigger on a pulse that crosses one threshold but fails to cross a second threshold before crossing the first again.

SLEW RATE: Trigger on pulse edge rates that are either faster or slower than a set rate. Edges can be rising, falling or either.

Comm (requires TDS3TMT) – Provides isolated pulse triggering required to perform DS1/DS3 telecommunications mask testing per ANSI T1.102 standard.

Alternate – Sequentially uses each active channel as a trigger source.

Measurement System

Automatic Waveform Measurements – Period, Frequency, +Width, –Width, Rise Time, Fall Time, +Duty Cycle, –Duty Cycle, +Overshoot, –Overshoot, High, Low, Max, Min, Peak-to-Peak, Amplitude, Mean, Cycle Mean, RMS, Cycle RMS, Burst Width, Delay, Phase, Area,¹ Cycle Area.¹

Display any four measurements from any combination of waveforms. Or display all measurements with measurement snapshot feature. Measurement statistics.¹

Thresholds – Settable in percentage or voltage.

Gating – Measurements can be gated using the screen or vertical cursors.

¹ Requires TDS3AAM module.

Digital Phosphor Oscilloscopes

► TDS3000B Series

Waveform Processing

Deskew – Channel-to-channel deskew ± 10 ns may be manually entered for better timing measurements and more accurate math waveforms.

Arithmetic Operators – Add, subtract, multiply, divide, arbitrary math expressions.*¹

Autoset – Single-button, automatic setup on selected input signal for vertical, horizontal and trigger systems.

Display Characteristics

Waveform Style –

Dots, vectors and variable persistence.

Graticules – Full, grid, cross-hair and frame. NTSC, PAL, SECAM and vectorscope (100% and 75% color bars) with optional TDS3VID and TDS3SDI video application modules.

Format – YT, XY and Gated XYZ (XY with Z-axis blanking available on TDS30X4B only).

I/O Interface

Hard Copy Port (Standard) –

Centronics-type parallel.

Ethernet Port (Standard) –

10Base-T LAN, RJ-45 female.

TDS3GV Communications Module – GPIB

(IEEE 488.2) programmability: Full talk/listen modes; control of all modes, settings and measurements.

VGA: Monitor output for direct display on large VGA-equipped monitors. DB-15 female connector, 31.6 kHz sync rate, EIA RS-343A compliant.

RS-232-C interface programmability: Full talk/listen modes; control of all modes, settings and measurements. Baud Rate up to 38,400. DB-9 male connector. Programmer manual: 071-0381-02.

*¹ Requires TDS3AAM module.

Hard Copy Capability

Graphics File Formats – Interleaf (.img), TIF, PCX (PC Paintbrush), BMP (Microsoft Windows) and Encapsulated Postscript (EPS).

Printer Formats – Bubblejet, DPU-3445, Thinkjet, Deskjet, Laserjet, Epson (9- and 24-Pin).

Environmental and Safety

Temperature – +5 °C to +50 °C (operating),

–20 °C to +60 °C (nonoperating).

Humidity – 20% to 80% RH below 32 °C, derate to 30% RH at 45 °C (operating), 5% to 90% RH below 41 °C, derate to 30% RH at 60 °C (nonoperating).

Altitude –

To 3,000 m (operating), 15,000 m (nonoperating).

Electromagnetic Compatibility – Meets or exceeds EN55011 Class A radiated and conducted emissions; EN50082-1; FCC 47 CFR, Part 15, Subpart B, Class A; Australian EMC framework; Russian GOST EMC regulations.

Safety –

UL3111-1, CSA1010.1, EN61010-1, IEC61010-1.

Physical Characteristics

Instrument

Dimensions	mm	in.
Width	375.0	14.8
Height	176.0	6.9
Depth	149.0	5.9
Weight	kg	lbs.
Instrument only	3.2	7.0
with battery installed	4.5	9.8

Instrument Shipping

Package Dimensions	mm	in.
Width	502.0	19.8
Height	375.0	14.8
Depth	369.0	14.5

Rackmount

Dimensions	mm	in.
Width	484.0	19.0
Height	178.0	7.0
Depth	152.0	6.0

► Ordering Information

**TDS3012B, TDS3014B,
TDS3024B, TDS3032B,
TDS3034B, TDS3044B,
TDS3052B, TDS3054B**

TDS3000B Digital Phosphor Oscilloscopes.

Standard Accessories

Probes: 2 each P3010 10X passive probes (TDS3012B), 4 each P3010 10X passive probes (TDS3014B), 2 each P6139A 10X passive probes (TDS3032B and TDS3052B), 4 each P6139A 10X passive probes (TDS3024B, TDS3034B, TDS3044B and TDS3054B).

Documentation: User manual, quick reference manual and programmer's manual.

Power Cord.

Accessory Tray.

Protective Front Cover: Has holder for user manual and/or 3.5 in. floppy disks.

NIST-Traceable Certificate of Calibration.

Please specify power plug and manual version when ordering.

Recommended Accessories

TDS3TMT – Telecom mask testing application module.

TDS3AAM – Advanced analysis module.

TDS3LIM – Limit test module.

TDS3VID – Extended video application module.

TDS3SDI – 601 serial digital video module. Requires a 4-channel TDS3000B Series oscilloscope.

TDS3GV – GPIB, VGA, RS-232 interfaces and TDSPCS1 OpenChoice® PC Communication Software.

TDSPCS1 OpenChoice PC Communication Software – A collection of programs that enable fast and easy transfer communication between MS Windows PCs and Tektronix oscilloscopes. Available in single-license packages and included in TDS3GV communication module. Minimum system requirements: MS Windows 98 SE/XP Professional/ME/2000. MS Office 2000 or XP (for TDS toolbars only) – Excel 2000 or 2002; Word 2000 or 2002.



► TDS3BATB – Lithium Ion battery pack delivers up to 3 hours continuous operation without line power.



► TDS3PRT – Plug-in printer provides instant, portable documentation of your work.



► Tektronix probes are expressly designed for your oscilloscope, with identical quality standards and built-in compatibility for optimum performance.

WaveStar™ Software for Oscilloscopes – Microsoft Windows 98/ME/2000/NT 4.0 Application.

TDS3BATB – Lithium Ion battery pack for up to 3 hours continuous operation without line power.

TDS3CHG – Fast charger for battery pack.

TDS3PRT – Plug-in printer adds easy, portable documentation capability to your TDS3000B oscilloscope.

016-1907-00 – 5-roll pack of paper for TDS3PRT plug-in thermal printer.

AC3000 – Soft case for carrying instrument.

HCTEK4321 – Hard plastic case for carrying instrument (requires AC3000).

RM3000 – Rackmount kit.

Service Manual (TDS3000B Series) – English only (071-0972-00).

TNGTDS01 – Self-paced self-study operator training kit.

For customer training on this product outside the U.S. call 1-503-627-7510, inside the U.S. call 1-800-833-9200 ext. 77510.

Recommended Probes

ADA400A – 100X, 10X, 1X, 0.1X high gain differential amplifier.

P6243 – 1 GHz, ≤ 1 pF input C 10X active probe.

P5205 – 1.3 kV, 100 MHz high voltage differential probe.

P5210 – 5.6 kV, 50 MHz high voltage differential probe.

P5100 – 2.5 kV, 100X high-voltage passive probe.

TCP202 – 50 MHz, 15 A AC/DC current probe.

TCP303^{*1} – 15 MHz, 150 A current probe.

TCP305^{*1} – 50 MHz, 50 A current probe.

TCP312^{*1} – 100 MHz, 30 A current probe.

TCPA300 – 100 MHz probe amplifier.

TCP404XL^{*2} – 2 MHz, 500 A current probe.

TCPA400 – 50 MHz probe amplifier.

International Power Plugs

Opt. A0 – North America power.

Opt. A1 – Universal EURO power.

Opt. A2 – United Kingdom power.

Opt. A3 – Australia power.

Opt. A5 – Switzerland power.

Opt. A6 – Japan power.

Opt. A10 – China power.

Opt. A99 – No power cord.

^{*1} Requires TCPA300 probe amplifier.

^{*2} Requires TCPA400 probe amplifier.

Language Options

(Includes front panel overlay.)

Opt. L0 – English.

Opt. L1 – French.

Opt. L2 – Italian.

Opt. L3 – German.

Opt. L4 – Spanish.

Opt. L5 – Japanese.

Opt. L6 – Portuguese.

Opt. L7 – Simplified Chinese.

Opt. L8 – Traditional Chinese.

Opt. L9 – Korean.

Opt. LR – Russian.

Opt. L99 – No manual.

Service

Opt. C3 – Calibration Service 3 years.

Opt. C5 – Calibration Service 5 years.

Opt. D1 – Calibration Data Report.

Opt. D3 – Calibration Data Report 3 years (with Opt. C3).

Opt. D5 – Calibration Data Report 5 years (with Opt. C5).

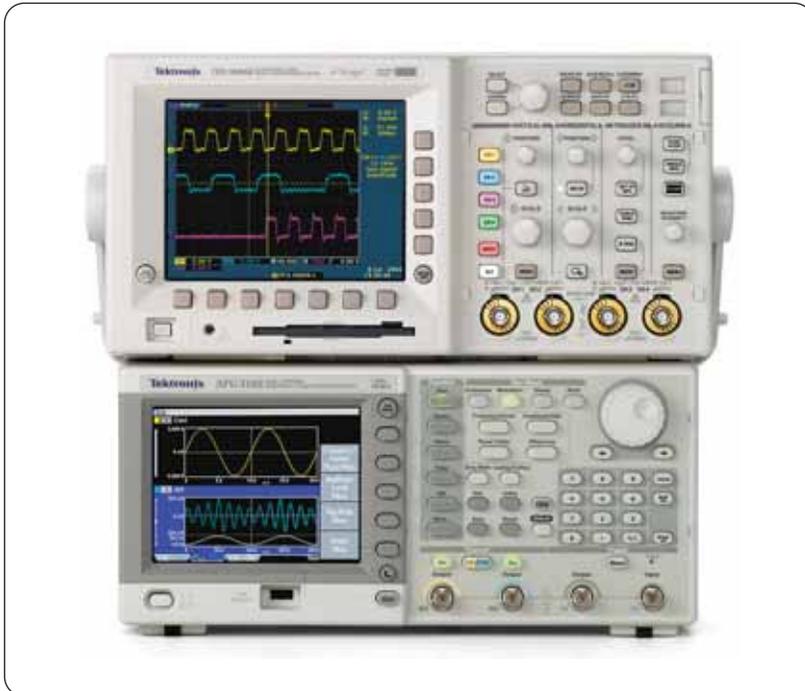
Opt. R5 – Repair Service 5 years.

Warranty

Three year warranty covering all labor and parts, excluding probes.

Digital Phosphor Oscilloscopes

► TDS3000B Series



- **A Critical Component of the Complete Measurement Solution.** The AFG3000 Series arbitrary function generator pairs with the TDS3000B, TPS2000, TDS2000 and TDS1000 Series digital oscilloscopes to deliver the two elements of a complete measurement solution – stimulus and acquisition. When combined with the TDS3000B Series oscilloscopes, it provides you with a common look and feel between both instruments to increase your productivity; high performance in a small footprint; and stackability, saving valuable workbench space – all at a price you can afford.
- **Tektronix Support Completes the Solution.** We know you depend on Tektronix instrument solutions when you make and meet critical commitments. So we make and meet a support commitment you can depend on. Anytime you need support, anywhere in the world,

Tektronix Support gives you the lowest possible exposure to inconvenience, delay or disruption of operations.

- Unsurpassed technical expertise and experience with 24-hour response to technical questions
- Interactive, online support to request assistance, check service status or arrange for training
- Industry-leading service turn-around time
- Credible, reliable support with demonstrated on-time delivery
- 90-day unconditional service warranty
- No fine print, no exclusions, no surprises
- Global support in more than 50 countries

Depend on Tektronix.
Visit www.tektronix.com/support

Contact Tektronix:

ASEAN / Australasia (65) 6356 3900

Austria +41 52 675 3777

Balkan, Israel, South Africa and other ISE Countries +41 52 675 3777

Belgium 07 81 60166

Brazil & South America 55 (11) 3741-8360

Canada 1 (800) 661-5625

Central East Europe, Ukraine and the Baltics +41 52 675 3777

Central Europe & Greece +41 52 675 3777

Denmark +45 80 88 1401

Finland +41 52 675 3777

France & North Africa +33 (0) 1 69 86 81 81

Germany +49 (221) 94 77 400

Hong Kong (852) 2585-6688

India (91) 80-22275577

Italy +39 (02) 25086 1

Japan 81 (3) 6714-3010

Luxembourg +44 (0) 1344 392400

Mexico, Central America & Caribbean 52 (55) 56666-333

Middle East, Asia and North Africa +41 52 675 3777

The Netherlands 090 02 021797

Norway 800 16098

People's Republic of China 86 (10) 6235 1230

Poland +41 52 675 3777

Portugal 80 08 12370

Republic of Korea 82 (2) 528-5299

Russia & CIS 7 095 775 1064

South Africa +27 11 254 8360

Spain (+34) 901 988 054

Sweden 020 08 80371

Switzerland +41 52 675 3777

Taiwan 886 (2) 2722-9622

United Kingdom & Eire +44 (0) 1344 392400

USA 1 (800) 426-2200

For other areas contact Tektronix, Inc. at: 1 (503) 627-7111

Updated 5 January 2006

Our most up-to-date product information is available at:
www.tektronix.com

Product(s) are manufactured
in ISO registered facilities.



Copyright © 2006, Tektronix. All rights reserved. Tektronix products are covered by U.S. and foreign patents, issued and pending. Information in this publication supersedes that in all previously published material. Specification and price change privileges reserved. TEKTRONIX and TEK are registered trademarks of Tektronix, Inc. All other trade names referenced are the service marks, trademarks or registered trademarks of their respective companies.

2/06 HB/WOW

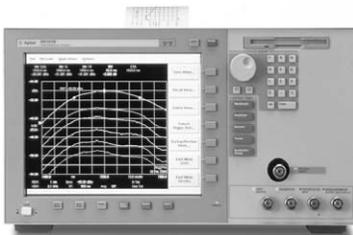
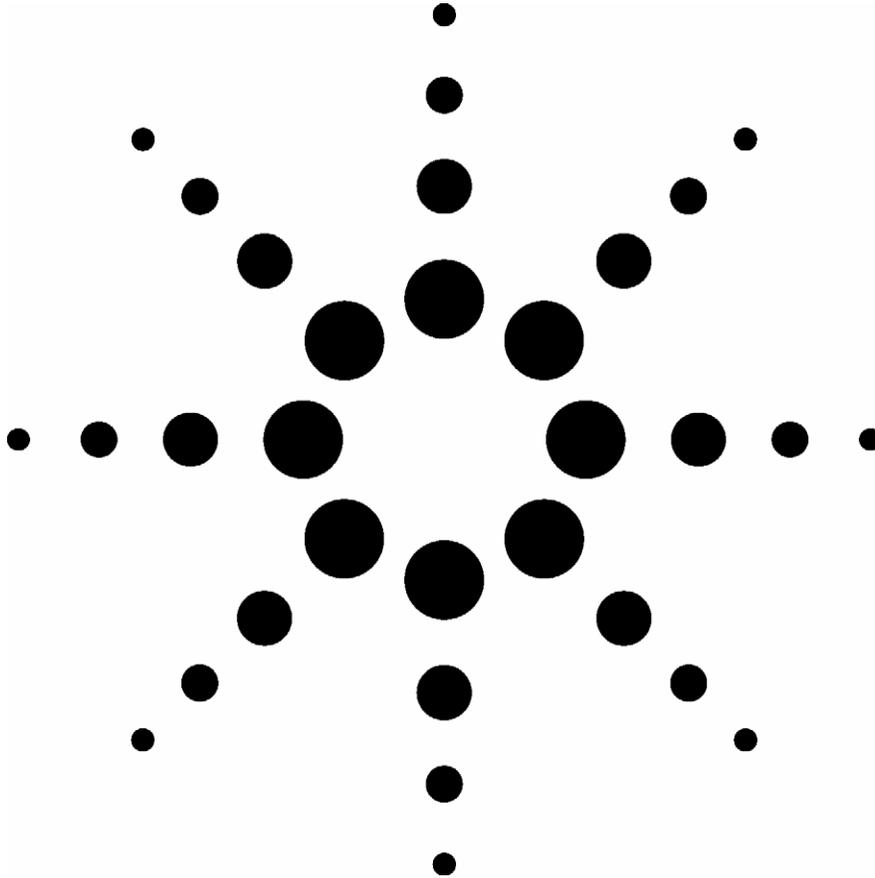
41W-12482-15

Tektronix
Enabling Innovation

Agilent 86146B Optical Spectrum Analyzer

Technical Specifications

November 2005



- **Full-Feature Optical Spectrum Analyzer**
Exhibits excellent speed and dynamic range with convenient and powerful user interface.
- **Filter Mode**
Wavelength - filtered signal can be coupled to a single-mode fiber output for tunable-filter and channel-drop applications.
- **Dispersion penalty calculation**
Dispersion Penalty calculation software combines 86146B and 86100C to measure time-resolved chirp and calculate dispersion penalty.



Agilent Technologies

Specifications

Characteristics and Specifications

The distinction between specifications and characteristics is described as follows:

- Specifications describe warranted performance.
- Characteristics provide useful, but non-warranted information about the functions and performance of the instrument.

The **specifications** apply to all functions, with video bandwidth autocoupled, over the temperature range 0 to 55° C and relative humidity <95% (unless otherwise noted).

All specifications apply after the instrument's temperature has been stabilized after 1hour continuous operation and the auto-align routine has been run. Unless otherwise noted, specifications apply without USER CAL.

Standard operation mode (not filter mode)

T(#) indicates temperature range and dependence.

Wavelength	Agilent 86146B	Notes
Range	600 nm to 1700 nm	
Reproducibility	±0.002 nm	With applied input fiber 9/125 µm; ≤ 1min
Span Range	0.2 nm to full range and zero span	
Accuracy After calibration with internal source and with enhanced wavelength calibration for specified range. 1480-1570 nm 1570-1620 nm	Typ ±0.01 nm Typ ±0.025 nm	At room temp; with applied input fiber 9/125 µm
After calibration with external reference source(s) ±10 nm of calibration reference point(s)	Typ ±0.01 nm	At room temp, with applied input fiber 9/125 µm
After user calibration over full wavelength range (600-1700 nm)	±0.2 nm	T(20-30°C), with applied input fiber 9/125 µm
Absolute Accuracy	±0.5 nm	Factory cal. 2 yr. cycle; T(20-30°C); with applied input fiber 9/125 µm
Tuning Repeatability	±0.002 nm	With applied input fiber 9/125 µm; ≤ 1min
Span Linearity 1525-1570 nm for spans <40 nm	Typ ±0.01 nm, Typ ±0.02 nm	T(20-30°C); with applied input fiber 9/125 µm
Resolution Bandwidth (RBW)		
FWHM (3 dB Bandwidth)	0.06, 0.07, 0.1, 0.14, 0.2, 0.33, 0.5, 1, 2, 5, 10 nm	Resolution of 10 nm is available for first order grating response only; with applied input fiber 9/125 µm
Noise Marker Bandwidth Accuracy using noise markers 1525-1610 nm ≥0.5 nm 0.2 nm 0.1 nm 0.06 nm	±2% ±3% ±7% ±12%	T(20-30°C)

Amplitude	Agilent 86146B	Notes
Sensitivity		Sensitivity is defined as signal value > 6 x RMS noise value.
600-750 nm	-60dBm	T(0-30°C), 2 nd order
750-900 nm	-75 dBm	
900-1250 nm	-75 dBm	T(0-30°C)
1250-1610 nm	-90 dBm	
1610-1700 nm	-80 dBm	T(20-30°C)
Maximum Measurement Power		Resolution bandwidth setting < channel spacing.
1525-1700 nm	Typ +15 dBm per channel, +30 dBm total	
600-1000 nm	Typ +15 dBm per channel, +30 dBm total	
1000-1525 nm	Typ +12 dBm per channel, +30 dBm total	
Maximum Safe Power		
Total safe power	+30 dBm	
Total power within any 10 nm portion of the spectrum	+23 dBm	
Absolute Accuracy at -20dBm, 1310 nm/1550 nm	± 0.5 dB	For resolution ≥ 0.1 nm, with applied input fiber 9/125 μm
Scale Fidelity		Excluding amplitude errors at low power levels due to noise, T(20-30°C), with applied input fiber 9/125 μm
Autorange off	± 0.05 dB	
Autorange on	± 0.07 dB	
Display Scale (log scale)	0.01-20 dB/DIV, -120 to +90 dBm	
Amplitude Stability (1310 nm, 1550 nm), 1 minute	±0.01 dB	For signals within 8 dB of top of screen, with applied input fiber 9/125 μm
15 minutes	±0.02 dB	Typ., with applied input fiber 9/125 μm
Flatness		With applied input fiber 9/125 μm
1290-1610 nm	±0.2 dB	Absorption of light by atmospheric moisture affects flatness at 1350-1420 nm
1250-1610 nm	±0.7 dB	
Polarization Dependence		For resolution ≥0.2 nm, at room temp, with applied input fiber 9/125 μm
1310 nm	±0.12 dB	
1530 nm, 1565 nm	±0.05 dB	
1600 nm	±0.08 dB	
1250-1650 nm	±0.25 dB	
Dynamic Range		
In 0.1 nm Resolution Bandwidth		Excluding multiple order grating response, With applied input fiber 9/125 μm
1550 nm at ±0.8 nm (±100 GHz at 1550 nm) at ±0.5 nm (±62.5 GHz at 1550 nm) at ±0.4 nm (±50 GHz at 1550 nm) at ±0.2 nm (±25 GHz at 1550 nm)	-60 dB -58 dB -55 dB Typ -40 dB	Average of all states of polarization
Monochromator Input	Agilent 86146B	Notes
Input Return Loss Straight connector (9/125 μm)	>35 dB	Depends on the quality of the attached connector; With applied 9/125 μm straight connector

Sweep		
Max. Sweep Rate	Typ 40 nm/56.3 ms	
Max. Sampling Rate in Zero Span	Typ 50 μ s/trace point	
Sweep Cycle Time 50 nm span, auto zero off 50 nm span, auto zero on 100 nm span 500 nm span	Typ < 180 ms Typ < 340 ms Typ < 400 ms Typ < 650 ms	
ADC Trigger Accuracy Jitter (distributed uniformly) Trigger delay range	Typ < \pm 0.5 μ s Typ 2 μ s-6.5 ms	
Pulse Mode Accuracy		
Turn On (\geq 2 μ s after rising edge)	Typ. < \pm 0.2 dB	(starting from dark)
Turn Off (\geq 10 μ s after falling edge)	Typ. < \pm 0.2 dB (30 dB extinction)	

Operation using Filter Mode

Insertion Loss Stability

1550 nm, 15 minutes	0.5 dB	Immediately following enhanced single point auto align, at constant temperature
---------------------	--------	---

Insertion Loss

1550 nm	Typ. 10 dB	At room temperature
---------	------------	---------------------

Filter Bandwidth: (From 1530 nm to 1610 nm)

	0.5 dB	1.0 dB	3.0 dB
RBW Nominal Setting	Actual Bandwidth (nm)		
0.04 nm	Typ 0.016	Typ 0.023	Typ 0.039
0.05 nm	Typ 0.019	Typ 0.026	Typ 0.045
0.07 nm	Typ 0.033	Typ 0.044	Typ 0.063
0.1 nm	Typ 0.076	Typ 0.089	Typ 0.115
0.2 nm	Typ 0.134	Typ 0.147	Typ 0.173
0.3 nm	Typ 0.257	Typ 0.270	Typ 0.297
0.5 nm	Typ 0.421	Typ 0.434	Typ 0.460
	\pm 20%		

Filter Bandwidth: Adjacent Channel Rejection (at 1550 nm)*

	12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz
	\pm 0.1 nm	\pm 0.2 nm	\pm 0.4 nm	\pm 0.8 nm
0.04 nm	Typ 40 dB	Typ 50 dB	Typ 55 dB	Typ 55 dB
0.05 nm	Typ 40 dB	Typ 50 dB	Typ 55 dB	Typ 55 dB
0.07 nm	N/A	Typ 50 dB	Typ 55 dB	Typ 55 dB
0.1 nm	N/A	Typ 40 dB	Typ 50 dB	Typ 55 dB
0.2 nm	N/A	Typ 40 dB	Typ 45 dB	Typ 55 dB
0.3 nm	N/A	N/A	Typ 45 dB	Typ 55 dB
0.5 nm	N/A	N/A	Typ 45 dB	Typ 50 dB

*Adjacent Channel Rejection limited to 60 dB below total integrated power

Filter Bandwidth: Polarization Dependence

1550 nm	Typ \pm 0.2 dB	for 0.2 nm filter bandwidth and greater, at room temperature
---------	------------------	--

Computer Interfacing	Agilent 86146B	Notes
Remote Control	Web enabled controls	
Compatibility	IEEE-488.1, IEEE-488-2 (100%)	
Interfaces	LAN, GPIB, Parallel Printer Port, External VGA Monitor, Keyboard and Mouse (PS/2)	
Floppy Disk	3,5" 1.44 MB, MS-DOS	MS-DOS is a U.S. registered trademark of Microsoft Corporation
Data export	Spreadsheet and Word Processor Compatible (CSV ASCII)	
Graphics export	CGM, PCL, GIF	
Instrument Drivers	Universal Instrument Drivers (PNP), Compatible with VEE, Labview, Visual Basic and C++	Labview is a U.S. registered trademark of National Instruments.

General Specifications	
Dimensions	222mm high x 425mm wide x 427 mm long
Weight	16.5 kg
Environmental Temperature* Humidity EMI	Operating 0°C to 55°C, Storage –40°C to 70°C Operating <95% RH, Storage: Noncondensing Conducted and radiated interference is in compliance with CISPR pub 11, IEC 801-3, IEC 801-4 and IEC 555-2
Power Requirements Voltage and frequency Maximum power consumption	90 Vac to 260 Vac, 44 to 444 Hz 230W

*Floppy disk and printer operating temperature range 0°C to 45°C



Options and Accessories

Options (available on new instruments only)	Agilent 86146B
Current Source	86146B-001
White Light Source *	86146B-002
Built-in 1310 & 1550 nm EELED Source *	86146B-004
Wavelength Calibrator	86146B-006
DWDM Spectral Analysis Application	Included
Passive Component Test Application	Included
Amplifier Test Application	Included
Source Test Application	Included
Connector Interface	FC/PC: 81000FI SC/PC: 81000KI DIN: 81000SI ST: 81000VI E2000: 81000PI LC: 81002LI MU: 81002MI
Certificate of Calibration	Included

* 86146B-002 and 004 are exclusive.

OSA Fiber Sizes

Model Number	Optical Input	86146B-002* (White Light Source)	86146B-004* (1310/1550 EELED)	86146B-006 (Calibrator)	Photodiode Input	Mono Output 1
86146B	9 μm	62.5 μm	9 μm	9 μm	50 μm	9 μm

* 86146B-002 and 004 are exclusive.

Options and Accessories: Specifications

86146B-001 Current Source	Agilent 86146B
Range	0 to ± 200 mA (source or sink)
Resolution	Typ 50 μ A steps
Accuracy	2% ± 50 μ A
Clamp Voltage (nominal)	± 2.7 V
Noise Density at 1 kHz	Typ < 4 nA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Stability Within 30 Minutes	Typ < 100 ppm ± 500 nA
Temperature Drift	Typ $< (100 \text{ ppm } \pm 500 \text{ nA})/K$
Pulse Mode	
Pulse Range	10 μ s to 6.5 ms
Pulse Resolution	100 ns
Duty Cycle Range	Pulse width/1 s to 100%

86146B-002 White Light Source	
Wavelength*	900 nm to 1700 nm
Minimum Output Power Spectral Density** (9/125 μ m fiber) 900 to 1600 nm 900 to 1600 nm 1600 to 1700 nm	-67 dBm/nm (0.2 nW/nm) Typ -64 dBm/nm (0.4 nW/nm) -70 dBm/nm (0.1 nW/nm)
Minimum Output Power Spectral Density*** 50/125 μ m fiber 62.5/125 μ m fiber	Typ -50 dBm/nm (10 nW/nm) Typ -46 dBm/nm (25 nW/nm)
Output Stability**	Typ ± 0.02 dB over 10 minutes
Lamp Lifetime, Mean Time Between Failures** (MTBF)	Typ > 5000 hours

* filtered below 850 nm

** with applied input fiber 9/125 μ m

*** typ; includes power in full numerical aperture of fiber

86146B-004 EELED Sources	
Minimum Spectral Power Density 1300 to 1320 nm, 1540 to 1560 nm 1250 to 1620 nm	> -40 dBm/nm (10nW/nm) Typ > -60 dBm/nm (1nW/nm)
Return Loss With straight connector	Typ > 25 dB
Stability (ambient temp. $< \pm 1^\circ\text{C}$) Over 15 minutes Over 6 hours	Typ $< \pm 0.02$ dB Typ $< \pm 0.05$ dB

86146B-006 Wavelength Calibrator

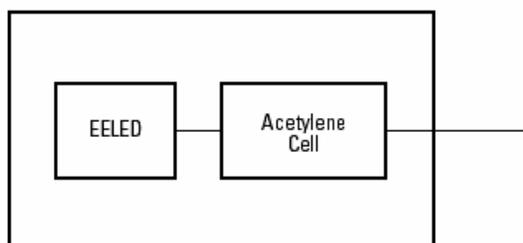


Figure 1: Wavelength calibrator block

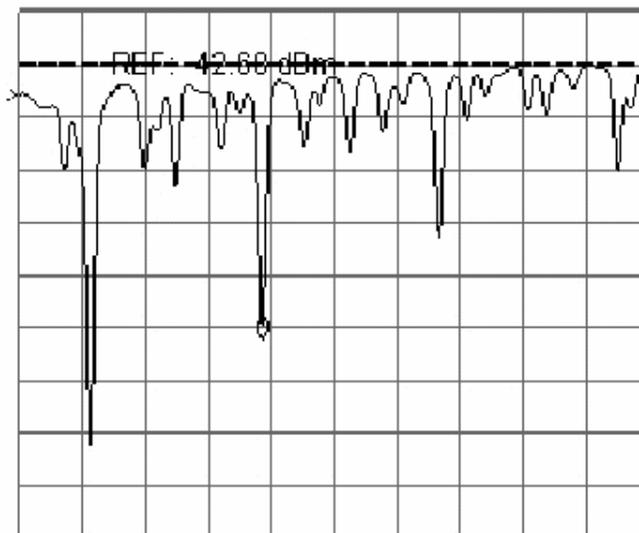


Figure 2: Wavelength calibrator absorption spectrum

The wavelength calibrator option provides an onboard wavelength reference that can be used to automatically calibrate the optical spectrum analyzer. The calibrator is based on an EELED and an Acetylene gas absorption cell, Figure 1. The Acetylene absorbs light at very specific wavelengths based on the molecular properties of gas. The cell is illuminated by an EELED and the OSA uses the absorption pits to perform a wavelength calibration, Figure 2. Since the absorption of the Acetylene gas is a physical constant it never needs calibrating.

The wavelength calibrator enhances the OSA to achieve better than ± 10 pm wavelength accuracy and removes the need to use a tunable laser source and multi-wavelength meter as an external reference.

Additional Parts and Accessories	Agilent 86146B
Printer Paper (5 rolls / box)	9270-1370
Additional Connector Interfaces	See Agilent 81000 series
9 μm Single Mode Connector Saver	Standard
Rack-mount Flange Kit	86146B-AX4
Transit Case	9211-2657
BenchLink Lightwave Software*	Standard

* Agilent N1031A BenchLink Lightwave allows transfer of measurement results over a GPIB Interface to a PC for the purposes of archiving, printing and further analysis. Not usable with Windows XP.

Definition of Terms

Wavelength

- Absolute Accuracy (after user cal) refers to the wavelength accuracy after the user has performed the internal wavelength calibration using a source of known wavelength.
- Reproducibility refers to the amount of wavelength drift, which can occur over the specified time while the OSA is swept across a source of known wavelength.
- Tuning Repeatability refers to the wavelength accuracy of returning to a wavelength after having tuned to a different wavelength.

Resolution

- FWHM refers to the Full-Width-Half-Maximum resolutions that are available. This indicates the width at half power level of the signal after passing through the resolution slits.

Amplitude

- Scale Fidelity refers to the potential errors in amplitude readout at amplitudes other than at the calibration point. This specification is sometimes called linearity.
- Flatness defines a floating band, which describes the error in signal amplitude over the indicated wavelength range. (This error may be removed at a given wavelength by performing the user amplitude calibration).
- Polarization Dependence refers to the amplitude change that can be seen by varying the polarization of the light entering the OSA. This is not to be confused with amplitude variations caused by the varying distribution of energy between the different modes in fiber that are multimode at the wavelength of interest.

Sensitivity

- Sensitivity is defined as the signal level that is equal to six times the RMS value of the noise. Displayed sensitivity values are nominal. Slightly lower values may have to be entered to achieve specified sensitivity.

Dynamic Range

- Dynamic Range is a measure of the ability to see low-level signals that are located very close (in wavelength) to a stronger signal. In electrical spectrum analyzers, this characteristic is generally called shape factor.

Sweep Time

- Maximum Sweep Rate refers to the maximum rate that the instrument is able to acquire data and display it. This rate may be limited by multiple internal processes when using default number of trace points.
- Sweep Cycle Time refers to the time required to make a complete sweep and prepare for the next sweep. It can be measured as the time from the start of one sweep to the start of the next sweep.

Agilent Technologies Test and Measurement Support, Services, and Assistance

Agilent Technologies aims to maximize the value you receive, while minimizing your risk and problems. We strive to ensure that you get the test and measurement capabilities you paid for and obtain the support you need. Our extensive support resources and services can help you choose the right Agilent products for your applications and apply them successfully. Every instrument and system we sell has a global warranty. Support is available for at least five years beyond the production life of the product. Two concepts underlie Agilent's overall support policy: "Our Promise" and "Your Advantage."

Our Promise

Our Promise means your Agilent test and measurement equipment will meet its advertised performance and functionality. When you are choosing new equipment, we will help you with product information, including realistic performance specifications and practical recommendations from experienced test engineers. When you use Agilent equipment, we can verify that it works properly, help with product operation, and provide basic measurement assistance for the use of specified capabilities, at no extra cost upon request. Many self-help tools are available.

Your Advantage

Your Advantage means that Agilent offers a wide range of additional expert test and measurement services, which you can purchase according to your unique technical and business needs. Solve problems efficiently and gain a competitive edge by contracting with us for calibration, extra-cost upgrades, out-of-warranty repairs, and on-site education and training, as well as design, system integration, project management, and other professional engineering services. Experienced Agilent engineers and technicians worldwide can help you maximize your productivity, optimize the return on investment of your Agilent instruments and systems, and obtain dependable measurement accuracy for the life of those products.

By Internet, phone, or fax, get assistance with all your test & measurement needs

Online assistance:

www.agilent.com/comms/lightwave

Related Agilent Literature

<http://www.agilent.com/comms/octspectral>

Phone or Fax

United States:

(tel) 1 800 829 4444

(fax) 1 800 829 4433

Canada:

(tel) 1 877 894 4414

(fax) 1 800 746 4866

Europe:

(tel) +31 20 547 2111

(fax) +31 20 547 2190

Japan:

(tel) 120 421 345

(fax) 120 421 678

Latin America:

(tel) +55 11 4197 3600

(fax) +55 11 4197 3800

Australia:

(tel) 800 629 485

(fax) 800 142 134

Asia Pacific:

(tel) +852 800 930 871

(fax) +852 800 908 476

Product specifications and descriptions in this document subject to change without notice.

Copyright © 2005 Agilent Technologies

November 24, 2005

5989-4403EN



Agilent Technologies

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

INSTRUMENTS

Polarization Synthesizer/Analyzer – PolaFlex™

Typical Performance Data:

Polarization stabilization

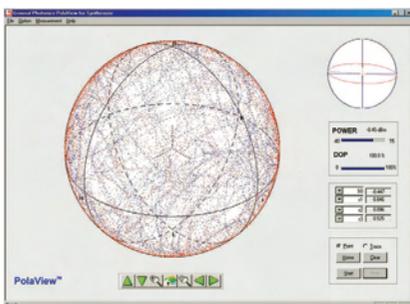


Fig. 1 Input polarization pattern: saw wave scramble at 5 Hz, taken over 20 sec.

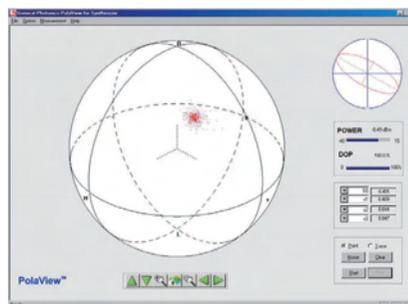


Fig. 2 Output polarization stabilized by PSY-101 against the same polarization scrambled input, taken over 20 sec.

Special polarization state/trace generation

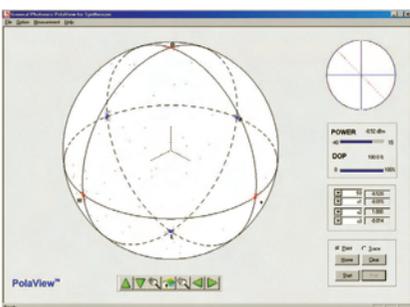


Figure 3. Poincaré sphere pole state generation

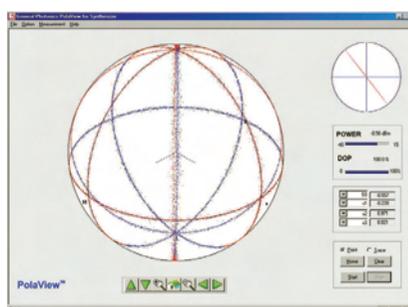


Figure 4. Trace scans

Scrambling

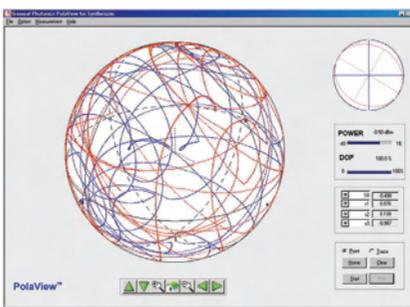


Figure 5. Saw scramble trace, 1Hz after 1 minute

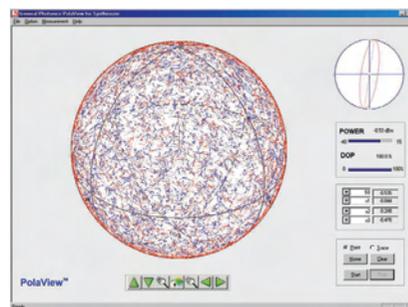


Figure 6. Random scramble, 100 Hz after 1 minute

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

Polarization Switch

- **PolaSwitch™**

General Photonics' all solid-state polarization switch can quickly and repeatably rotate the incoming SOP via a fixed angle, either at 45 or 90 degrees. Both single mode and PM fiber pigtailed versions are available. With the PM option, the device functions as a TE to TM converter to switch the SOP between being aligned with the slow and the fast axes of the PM fiber, or between the slow axis and 45 degrees from the slow axis. With SM option, the device simply rotates the polarization eclipse either 45 or 90 degrees. The device can be used for PMD monitoring, polarization modulation, polarization detection, and polarization metrology.



General Photonics Corp.
5228 Edison Ave.
Chino, CA 91710

Tel: 909.590.5473
Fax: 909.902.5536

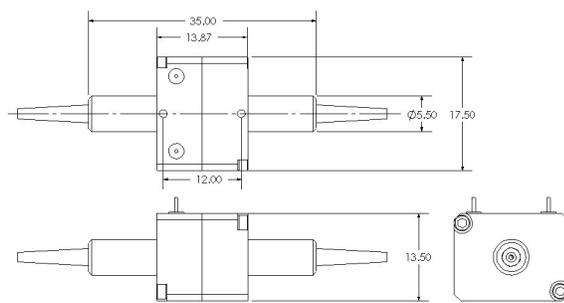
Email:
info@generalphotonics.com

Website:
www.generalphotonics.com

Preliminary Specifications

Operating Wavelength	1550 ± 30 nm
Polarization Rotation (@ 1550nm, 23°C)	45° ± 0.5° or 90° ± 0.5°
Polarization Rotation (all wavelength, all temp.)	45° ± 5° or 90° ± 5°
Insertion Loss	< 0.5 dB
Return Loss	> 55 dB
Switching Current	< 130 mA
Switching Voltage	3.5 ~ 5 V
Latching Current	~ 80 mA
Latching Voltage	2 ~ 3 V
Switching Time	100 μs typical
Extinction Ratio	> 18 dB for PM model
Dimensions	35.0 (L) x 17.5 (W) x 13.5 (H) mm
Operation Temperature	0°C to 50°C
Storage Temperature	-40°C to 85°C
Fiber Type	Fujikura PM Panda, Corning SMF-28 or compatible

Dimensions (in mm)



Applications:

- Polarization diversified detectors and sensors
- Polarization multiplexing
- Polarization metrology
- Polarization modulator
- Coherent communication
- PMD monitoring

Unique Features:

- Fast speed
- No moving parts
- Low insertion loss
- Compact size

Ordering Information:

PSW - 001 - XX - XX - XX

Polarization Rotation
90 = 90°
45 = 45°

Fiber Type
SS = SM to SM
PP = PM to PM

FC/PC, FC/APC or
NC = No Connectors



INTRODUCTION

Most ILX Lightwave laser diode current sources and controllers have an external modulation input. The purpose of this technical note is to give a quick overview on setting up an ILX Lightwave laser diode controller for sine wave modulation. A more detailed discussion on modulation can be found in ILX Lightwave Application Note #22: Modulating Laser Diodes.

REQUIRED EQUIPMENT

For this technical note we will be using an ILX Lightwave LDC-3724B and Agilent Waveform Function Generator model 33120. Using the modulation function on the LDC-3724B is very similar to all other ILX Lightwave laser diode current source and controllers.

1. You should check the specifications of the modulation input; this can be found in the user manual. The specifications for modulation are listed as Input, Transfer Function, and Bandwidth.
 - a. Input typically refers to a voltage and resistance. Voltage is the allowable voltage that can be input into the modulation circuit, for the LDC-3724B it is from 0 – 10 Volts. The resistance refers to the input impedance of the modulation circuit. Since the modulation frequency of the laser diode driver is lower than 10MHz having mismatched impedance will not affect the output of the driver.
 - b. The Transfer Function is typically referenced in mA/V. On most ILX Lightwave laser diode drivers the transfer function is listed below the modulation input connector. For the LDC-3724B the transfer function is 20mA/V and 50mA/V for the two respective ranges of output current.
 - c. The bandwidth is the frequency range that can be supported without having a significant change in the output and is dependent on modulation waveform. Most ILX Lightwave laser diode drivers have two modes for current outputs either I or I_{HBW}. The I mode is designed for low bandwidth and to give the best low noise performance. In I_{HBW} it allows for high bandwidth modulation of the output current. For the LDC-3724B the low bandwidth range (I) operates from DC to 10 kHz and for the high bandwidth range (I_{HBW}) from DC to 1 MHz.
2. Locate the modulation input on the controller. On the LDC-3724B the modulation input is a BNC connector on the right hand side of the controller with the description of “MOD” above it. Connect the waveform function generator to the LDC-3724B using a BNC to BNC cable.
3. Before turning on the output it is important to set the current limit, as there is a potential at overdriving the laser diode while modulating. Like all ILX Lightwave current sources the LDC-3724B has a clamping circuit that will not allow you to overdrive the laser even while modulating. To learn more about the clamping circuit please read technical note “TN3525-3: Clamping Limit of an LDX-3525 Precision Current Source.”

TECH NOTE

- As an example if you wanted to modulate the LDC-3724B from 120mA to 80mA at 100 kHz. You will need to set the LDC-3724B to I_{HBW} with a 100mA output current. Next set the waveform function generator to output a sine wave, at a frequency of 100 kHz with a peak to peak voltage of 1 Volt. Figure 1 shows the output that you will see on an oscilloscope.

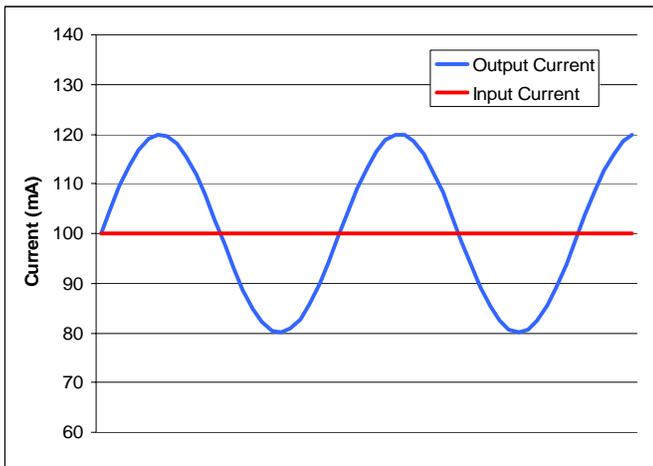


Figure 1: Modulated Current Output

D400FC InGaAs Fiber Optic Photo Detector

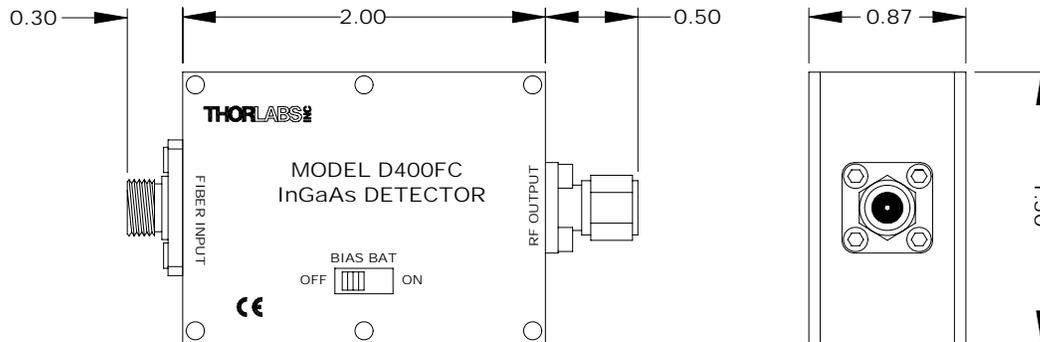
DESCRIPTION

Thorlabs DC400FC is a ready-to-use very high-speed photo detector. The unit comes complete with an FC/PC bulkhead connector / Detector and an internal 12V bias battery enclosed in a ruggedized insulated housing. A FC/PC type fiber optic bulkhead connector provides easy coupling to fiber based light sources. The output uses a SMA style jack for maximum frequency response.

SPECIFICATIONS

Detector:	InGaAs Pin	Housing:	Black Anodized Aluminum
Spectral Response:	800-1700nm	Size:	2.8" x 1.5" x 0.9"
Peak Response:	0.95 A/W @ 1550nm	Bias:	12V Battery (Type A23)
Rise/Fall Time:	0.1ns	Output:	SMA Plug
Diode Capacitance:	0.7pF (typ)	Input:	FC/PC bulkhead fiber connector
NEP @ 1550nm:	$1.0 \times 10^{-15} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$	Ball Lens Size:	$\varnothing 0.058"$ ($\varnothing 1.47 \text{ mm}$)
Dark Current:	0.7nA (typ) 1.0nA (max)	Reflective Index of lens:	1.482 @ 675nm
PD Active Diameter:	0.1 mm	Coupling Efficiency:	92% (typ) into both single and multi-mode fibers over full spectral response of detector.
Bandwidth:	1GHz (min)	Field of View (FOV):	48°
Operating Temp:	0 to 40°C		
Storage Temp:	0 to 40°C		
Damage Threshold:	70 mW (max)		

* Note: The D400FC is not compatible with FC/APC fiber connectors.



Reference Thorlabs Drawing No. 2121-E01 Rev B.
All units in inches.

OPERATION

Thorlab's D400FC is ideal for measuring both pulsed and CW light sources. The unit includes a reverse biased PIN photo diode, 12V bias battery, ON/OFF switch, and a FC bulkhead connector, all packaged in a ruggedized housing. The SMA output signal is the direct photocurrent out of the photo diode anode and is a function of the incident light power and wavelength. The Responsivity, $\mathfrak{R}(\lambda)$, can be read from Figure

1 to estimate the amount of photocurrent to expect. Most users will wish to convert this photocurrent to a voltage for viewing on an oscilloscope or DVM. This is accomplished by adding an external load resistance, R_{LOAD} . The output voltage is derived as:

$$V_O = P * \mathfrak{R}(\lambda) * R_{LOAD}$$

The bandwidth, f_{BW} , and the rise-time response, T_R , are determined from the diode

capacitance, C_J , and the load resistance, R_{LOAD} :

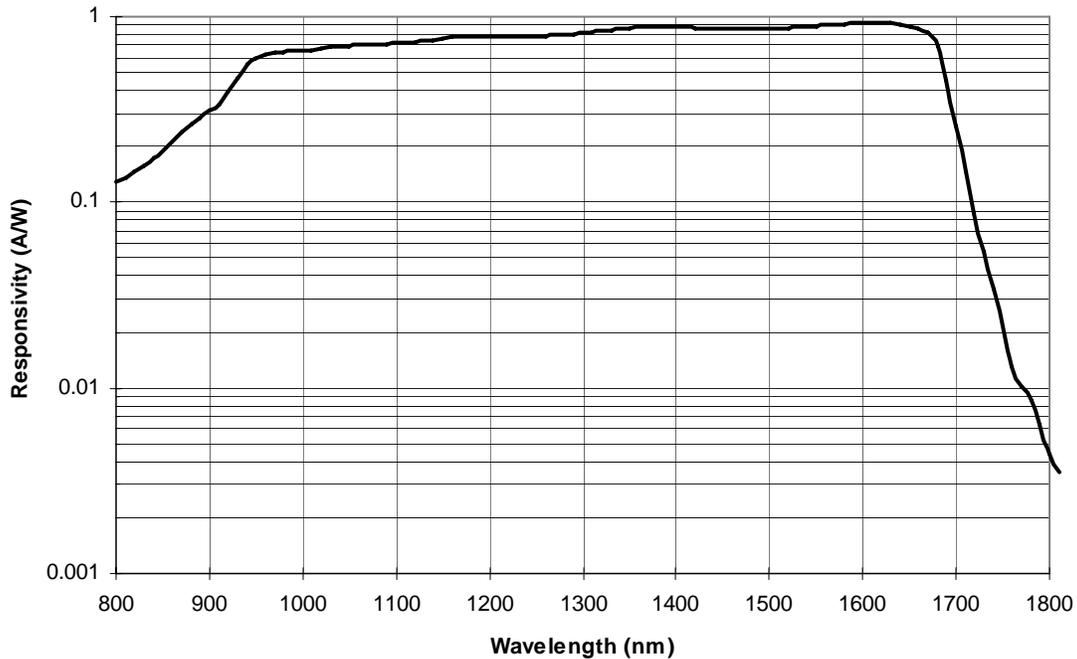
$$f_{BW} = 1/(2\pi * R_{LOAD} * C_J), T_R = 0.35/f_{BW}$$

For maximum bandwidth, we recommend using a direct connection to the measurement device having a 50Ω input impedance. If this is not possible, an SMA - SMA cable with a 50Ω terminating resistor at the end can be used. This will also minimize ringing by matching the coax with its characteristic impedance. If bandwidth is not important, you can increase the amount of voltage for a given input light by increasing the R_{LOAD} up to a maximum of $10k\Omega$

Also Available: Misc. SMA adapters (*T4285, T4291, T4289*), Misc. SMA coax cables (*T4846-BB-24, T4846-BB-48, T4813-BB-24, T4813-BB-48, T4935-BB-24, T4935-BB-48*), fiber pigtailed InGaAs detectors (*FGA03, FGA10*)

Note: The detector has an AC path to ground even with the switch in the off position. It is normal to see some output response to an AC signal with the switch in this state. However, because the detector is unbiased, operation in this mode is not recommended.

FGA10 Responsivity



Battery Replacement

To replace the battery:

1. Turn the D400FC Bias Bat switch to OFF.
2. Remove the 6 Phillips flat head screws used to secure the top cover.
3. Remove the existing battery from the unit.
4. Place the new A23 12V battery in the battery socket. Make sure the battery is positioned so that the positive terminal is pointed toward the + on the battery socket.
5. Secure the top cover using the 6 screws.

A replacement battery can be purchased through Thorlabs. The part number to reference is A23.

WEEE

As required by the WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) of the European Community and the corresponding national laws, Thorlabs offers all end users in the EC the possibility to return “end of life” units without incurring disposal charges.

This offer is valid for Thorlabs electrical and electronic equipment

- sold after August 13th 2005
- marked correspondingly with the crossed out “wheelie bin” logo (see fig. 1)
- sold to a company or institute within the EC
- currently owned by a company or institute within the EC
- still complete, not disassembled and not contaminated

As the WEEE directive applies to self contained operational electrical and electronic products, this “end of life” take back service does not refer to other Thorlabs products, such as

- pure OEM products, that means assemblies to be built into a unit by the user (e. g. OEM laser driver cards)
- components
- mechanics and optics
- left over parts of units disassembled by the user (PCB’s, housings etc.).

If you wish to return a Thorlabs unit for waste recovery, please contact Thorlabs or your nearest dealer for further information.

Waste treatment on your own responsibility

If you do not return an “end of life” unit to Thorlabs, you must hand it to a company specialized in waste recovery. Do not dispose of the unit in a litter bin or at a public waste disposal site.

Ecological background

It is well known that WEEE pollutes the environment by releasing toxic products during decomposition. The aim of the European RoHS directive is to reduce the content of toxic substances in electronic products in the future.

The intent of the WEEE directive is to enforce the recycling of WEEE. A controlled recycling of end of live products will thereby avoid negative impacts on the environment.



Crossed out “wheelie bin” symbol