

TESIS DEFENDIDA POR
Adrián M. Gutiérrez Garduño
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Horacio Soto Ortiz.
Director del Comité.

Dr. Elena Tchaikina Kolesnikova.
Miembro del Comité.

Dr. José Rosario Gallardo López.
Miembro del Comité.

Dr. Arturo Arvizu Mondragón.
Miembro del Comité.

Dr. Arturo Velásquez Ventura.
*Coordinador del programa de
posgrado en Electrónica y
Telecomunicaciones.*

Dr. Raúl Ramón Castro Escamilla.
Director de Estudios de Posgrado.

Junio de 2007

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE
ENSENADA**



DIVISIÓN DE FÍSICA APLICADA

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CONVERSIÓN DE DOS SEÑALES ÓPTICAS DE DOS NIVELES A UNA SOLA
SEÑAL ÓPTICA DE CUATRO NIVELES POR MEDIO DEL FENÓMENO DE LA
MODULACIÓN CRUZADA DE LA POLARIZACIÓN EN AMPLIFICADORES
ÓPTICOS DE SEMICONDUCTOR.**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS presenta:

ADRIAN M. GUTIERREZ GARDUÑO

Ensenada, Baja California, México. Junio de 2007.

RESUMEN de la tesis presentada por **Adrián M. Gutiérrez Garduño**, como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** en **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**. Ensenada, Baja California, México. Noviembre del 2004.

CONVERSIÓN DE DOS SEÑALES ÓPTICAS DE DOS NIVELES A UNA SOLA SEÑAL ÓPTICA DE CUATRO NIVELES POR MEDIO DEL FENÓMENO DE LA MODULACIÓN CRUZADA DE LA POLARIZACIÓN EN AMPLIFICADORES ÓPTICOS DE SEMICONDUCTOR.

Resumen aprobado por:

Dr. Horacio Soto Ortiz
Director del Comité

En un mundo globalizado las telecomunicaciones son una herramienta indispensable y sinónimo del desarrollo de los países. Un parámetro indiscutible del crecimiento exponencial que han sufrido las redes de telecomunicaciones es el uso cotidiano de Internet. En los países punta de lanza en el ámbito de las telecomunicaciones hasta un 68% de su población utiliza Internet. Paralelamente al crecimiento del volumen de usuarios de las redes de comunicación, los servicios que ofrecen las redes comunicaciones cada vez son más complejos y más aceptados e incorporados a la vida diaria de las personas.

Las redes basadas en fibra óptica han probado una eficiencia y eficacia superior a las de las redes de señales eléctricas disponibles hoy en día. Por lo mismo se predice una migración hacía redes totalmente ópticas, en las cuales todo el enrutado y procesado de las señales se realice en el dominio óptico.

En comparación a las redes que utilizan cobre y/o señales eléctricas, las señales ópticas no tienen el problema de diafonía (cross-talk), no disipan tanto calor, sus pérdidas a lo largo de la fibra son moderadas e independientes de la tasa de bit de las señales. Todo esto facilita y exhorta el desarrollo de enlaces de larga distancia que utilicen redes ópticas minimizando la necesidad de incluir nodos intermedios para regenerar las señales.

El mayor reto para lograr redes transparentes o 100% ópticas, es lograr todo el enrutamiento y procesamiento de las señales en el dominio óptico. Actualmente, todos estos procesos se realizan en el dominio eléctrico. El cambio del dominio óptico al eléctrico de las señales para su procesamiento y viceversa, no sólo representa grandes inversiones monetarias sino que también grandes pérdidas de tiempo.

Gracias a las propiedades físicas inherentes a los amplificadores ópticos de semiconductor (AOS), éstos han podido ser utilizados en el desarrollo de dispositivos para redes ópticas de telecomunicaciones. Entre los dispositivos más importantes que se han realizado están los convertidores de longitud de onda, puertas lógicas, conmutadores, multicanalizadores,

demulticanalizadores, etc. Los principales responsables de la versatilidad de usos que tienen los AOS son los fenómenos no lineales de la modulación cruzada de la polarización XPolM, la modulación cruzada de la ganancia XGM, y el mezclado de cuatro señales FWM, por mencionar los más importantes.

El principal objetivo de este trabajo de tesis es realizar un dispositivo en el dominio óptico que convierta dos señales ópticas de dos niveles de potencia a una sola señal óptica de cuatro niveles de potencia utilizando el fenómeno de la XPolM dentro de un AOS. Los principales beneficios del convertidor son: optimizar el ancho de banda disponible en un canal óptico de transmisión al modular en una sola señal óptica la información contenida en dos de ellas. Particularmente se analizará el desempeño del convertidor en términos de su tasa de extinción, simetría existente entre los cuatro niveles de amplitud de la señal convertida, y la compatibilidad de la velocidad de respuesta con las tasas de datos utilizadas en los protocolos SDH/SONET hasta llegar a una velocidad máxima de 2.5Gbps.

Palabras clave: AOS, XPolM, XGM, EEA, Tasa de extinción, SDH/SONET, Redes Transparentes.

ABSTRACT of the Thesis presented by **Adrián M. Gutiérrez Garduño**, as a partial requirement to obtain the **MASTER in SCIENCE** degree in **ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS**. Ensenada, Baja California, México. October 2004.

**“ALL-OPTICAL 2-TO-4 LEVEL ENCODER BASED ON CROSS
POLARIZATION MODULATION IN A SEMICONDUCTOR
OPTICAL AMPLIFIER UTILIZED TO DEVELOP AN ALL-OPTICAL
2 INPUT DIGITAL MULTIPLEXER.”**

Approved by:

Dr. Horacio Soto Ortiz
Thesis Director

In today's globalized world, telecommunications have proven to be an indispensable tool and a modern synonym for development. The exponential growth that telecommunications networks have suffered can be corroborated by the popular use of the Internet. In countries with cutting edge technology in the telecommunications field as much as 68% of their population have access to and utilize the Internet. At the same time, as the volume of users increases, the services offered by carriers are more complex and have become accepted and incorporated into the everyday life of the people.

Networks based on fiber optics have proven to be more efficient and effective than those based on electric signals. For that reason, specialists in the subject matter predict a migration to totally optical networks, in which all of the routing and processing of signals is done in the optical domain.

In comparison to networks based on electrical signals, optical signals do not suffer from cross-talk, they do not dissipate as much heat, and their losses along the fiber are more moderate and independent to the bit rate of the signals. Based on this, long distance transmissions are facilitated without having to include nodes to regenerate signals.

The most important challenge in developing transparent or 100% optical networks is to achieve all of the routing and signal processing within the optical domain. Nowadays, all of these processes are done in the electrical domain. A change from signals in the optical domain to the electrical domain and vice versa does not only represent significant monetary inversions, but also represents a considerable loss of time. Thanks to the physical properties inherent to semiconductor optical amplifiers SOAs, they have been utilized to develop components for optical networks. Among the most important components developed are the wavelength converters, logic gates, commutators, multiplexers and demultiplexers. The main characteristics responsible for the versatility of the SOAs are the non-linear phenomena better known as: cross polarization modulation XPoLM, cross gain modulation XGM, and four-wave mixing FWM.

This thesis' main objective is to develop a component in a totally optical environment that converts two two-level signals into one four-level signal based on the XPolM effect inside a SOA. The converter will aim to optimize the available bandwidth by modulating the information of two theoretical users into a single optical signal. Special care will focus on the converter's development regarding its extinction ratio, all four power levels should be equidistant, and its response to signals compatible with the bit rates utilized in SDH/SONET protocols reaching a maximum speed of 2.5Gbps.

Keywords: SOA, XPolM, XGM, EEA, Extinction Ratio, SDH/SONET, Transparent Networks

DEDICATORIA

*A mis padres, hermano, abuelos, tíos, primos, amigos
y a todos los que han alumbrado mi camino con su amor y su apoyo.
Pero sobre todo a mi mujer, Esther,
a mi pequeña Paola y a mis hijos por venir que son la fuente de energía de mi vida.*

*“No existe nada imposible para aquel que todo lo intenta.”
Alejandro Magno*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por enseñarme con su ejemplo a luchar estoicamente en ser persona día con día, y más que nada, por haberme dado el don de soñar.

A Esther, por ser mi copiloto, musa, apoyo, fuerza, compañera y cómplice en esta vida.

A Paola, por ser mi luz con esa sonrisa inefable que todo lo puede.

A mi hermano por su apoyo incondicional.

A mi director de tesis, Horacio Soto Ortiz, por compartir sus conocimientos, su tiempo, y por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto. Pero sobre todo, por su paciencia y apoyo a lo largo de este tramo del camino.

A mis sinodales, Dr. Elena Tchaikina Kolesnikova, Dr. Arturo Arvizu Mondragón y al Dr. José Rosario Gallardo López por su valiosa contribución en este trabajo de tesis.

A mis “hermanos” Mireya, Penélope, Paco, Armando, Pepe y Eric porque sí.

A mis compañeros: Iván, Damián, Rogelio, Rafael y Gabriel que hicieron más ligero y divertido el viaje.

Al Dr. Enrique Mitrani Abenchuchan por su apoyo y ayuda en todos los proyectos, pero al margen de éstos, y por encima de todo, por su amistad.

Al Dr. Arturo Arvizu Mondragón por aguantarme intensivamente todo un trimestre y compartir su exquisito gusto musical.

A Ramón Muraoka por toda su ayuda en el laboratorio.

A mis maestros de CICESE por compartir sus conocimientos.

A CICESE por darme la oportunidad de crecer y formar parte de sus estudiantes.

A CONACYT por el apoyo económico que me brindó para la realización de esta maestría.

Índice

i.1	Antecedentes.....	3
i.2	Objetivos Principales.....	8
I	Capítulo I.....	9
I.1	Funcionamiento de la XGM y la XPolM.....	9
I.2	Modulación cruzada de la ganancia (XGM por sus siglas en inglés).....	10
I.3	Modulación cruzada de la polarización (XPolM por sus siglas en inglés).....	12
II	Capítulo II.....	22
II.1	Principio de operación del convertidor.....	22
II.2	Esquema Experimental.....	28
III	Capítulo III.....	31
III.1	Obtención de la función de transferencia en estado estático del convertidor.....	31
III.2	Caracterización de la XGM.....	42
III.3	Caracterización de la XPolM.....	47
III.4	Generación de la función de transferencia para el haz CW en estado estático.....	55
IV	Capítulo IV.....	63
IV.1	Demostración de la conversión de 2 señales binarias a una señal de 4 niveles por medio de la XPolM en un amplificador óptico de semiconductor.....	63
IV.2	Resultados experimentales.....	66
V	Conclusiones.....	74
VI	Aportaciones.....	77
VII	Trabajo futuro.....	79
VIII	Literatura citada.....	80
A	Apéndice A: Fenómenos y mecanismos no lineales presentes en los amplificadores ópticos de semiconductor.....	83
B	Apéndice B. Alineación entre lentillas de Grin con cada faceta de emisión del AOS.....	89
C	Apéndice C. Caracterización de la auto-modulación de la fase (SPM por sus siglas en inglés).....	93
D	Apéndice D. Análisis de la discontinuidad que se presentó en los resultados donde se caracterizó la XPolM.....	96
E	Apéndice E. Equipo utilizado en este trabajo de tesis.....	103

Índice de figuras

Figura 1. Comparación entre las pérdidas de potencia en enlaces basados en cable coaxial y en fibra óptica.	5
Figura 2. Ganancia de simple paso VS potencia de entrada.	10
Figura 3. El principio de operación de un convertidor de longitud de onda basado en la XGM.	11
Figura 4. Estructura física de un AOS.	13
Figura 5. Muestra del desfase inducido entre componentes ortogonales de una señal óptica provocado por la birrefringencia inducida en su paso a través de un AOS.	15
Figura 6. Cambio de un estado de polarización lineal a 45 grados a uno elíptico inducido por un desfase entre las componentes de la señal.	16
Figura 7. Cambio del estado de polarización debido a distintos ganancias para los ejes TE y TM provocado por la exacerbación de la anisotropía de la ganancia material.	17
Figura 8. Cambio de un estado de polarización circular a uno elíptico al amplificar en mayor proporción una componente de la señal provocada por la exacerbación de la anisotropía de la ganancia material.	18
Figura 9. Trayectoria de propagación del máximo de intensidad dentro de la guía de onda de un AOS resultante de la interferencia coherente de distintos modos excitados dentro del amplificador.	20
Figura 10. Evolución del estado de polarización de la señal CW desde su inyección hasta su salida a través del polarizador colocado a la salida del amplificador.	24
Figura 11. Correspondencia entre los 4 niveles de amplitud de la señal convertida S3 y la combinación de los niveles de amplitud de las señales S1 y S2.	27
Figura 12. Esquema Experimental del Convertidor.	28
Figura 13. Representación de la emisión de EEA que atraviesa un solo filtro y dos de ellos colocados en cascada.	30
Figura 14. Representación de la función de transferencia en estado estático para el haz CW.	31
Figura 15. Fenómenos que gobiernan la función de transferencia de amplitud en estado estático para el haz CW.	32
Figura 16. Relación entre la de potencia total de las señales binarias de entrada al AOS y la potencia del haz CW a la salida del amplificador gobernada por la XGM.	33

Índice de figuras (Continuación)

Figura 17. Ilustración de la esfera de Poincaré.....	34
Figura 18. Relación entre el total de potencia de las señales binarias y la translación inducida en el estado de polarización de la señal CW a través de la XPolM obtenido en la esfera de Poincaré.	35
Figura 19. Relación entre la potencia total de las señales binarias y el factor de transmisión de potencia de la señal CW provocado por la XPolM y el polarizador colocado a la salida del AOS.....	36
Figura 20. Emulación matemática de la función de transferencia de un polarizador.	37
Figura 21. Generación de la gráfica (enmarcada en rojo) que representa la evolución de la potencia del haz CW en función de la suma de las potencias individuales de las señales binarias partiendo de la multiplicación entre los ejes verticales de las gráficas mostradas en la figura 16 y 19.....	38
Figura 22. Generación de los cuatro niveles de potencia en la señal CW a partir de la combinación de potencias de las señales binarias.....	39
Figura 23. Esquema con el cual se caracterizó la XGM.	43
Figura 24. Relación entre la potencia de entrada de la haz de bomba con la potencia de salida de la señal de sonda.....	45
Figura 25. Relación entre la potencia de entrada de la haz de bomba con la potencia de salida de la señal de sonda.	46
Figura 26. Esquema de medición utilizado para caracterizar el efecto de la XPolM.	47
Figura 27. Representación de la translación del estado de polarización de la señal CW a la salida del AOS a través de la XPolM.....	51
Figura 28. Representación de la evolución de la translación del estado de polarización de la señal CW provocado por la XPolM.....	53
Figura 29. Representación de la evolución de la translación del estado de polarización de la señal CW provocado por la XPolM.....	54
Figura 30. Efecto de un polarizador con eje de transparencia TE a la salida del AOS sobre la señal CW.....	56
Figura 31. Relación entre la de potencia de salida del haz CW y la potencia de la bomba.....	57

Índice de figuras (Continuación)

Figura 32. Relación entre los 4 niveles de potencia de salida del haz CW y los diferentes valores de potencia total que pueden producir las señales binarias de entrada.	58
Figura 33. Efecto de un polarizador con eje de transparencia TM a la salida del AOS sobre la señal CW.....	59
Figura 34. Relación entre la potencia del haz CW y la potencia de la haz de bomba.	60
Figura 35. Relación entre los 4 niveles de potencia de salida del haz CW y los diferentes valores de potencia total que pueden producir las señales binarias de entrada.	61
Figura 36. Esquema final del convertidor.....	64
Figura 37. En la gráfica se muestra la conversión de dos señales binarias a una de cuatro niveles discretos.....	66
Figura 38. Conjunto de gráficas que ilustran los estados lógicos de la señal convertida de cuatro niveles y los respectivos estados lógicos de las señales binarias. Las líneas amarillas verticales marcan la transición entre valores lógicos.....	68
Figura 39. Diagrama de ojo de la señal de cuatro niveles discretos.....	69
Figura 40. Conversión experimental de dos señales binarias a una de cuatro a una velocidad de 2.5Gbps.....	70
Figura 41. Conversión experimental de dos señales binarias a una de cuatro a una velocidad de 2.5Gbps.....	71
Figura 42. Evolución del SHB, CH y la inyección de portadores.....	84
Figura 43. Esquema con el cual se caracterizó la XGM para el AOS disponible para realizar el convertidor.....	89
Figura 44. Trayectoria de los haces de sonda, bomba, y EEA del AOS vista desde arriba....	90
Figura 45. Vista transversal de las trayectorias de los haces de sonda, bomba y AOS a la entrada de las lentillas de Grin.....	91
Figura 46. Trayectoria de los haces de bomba (verde) y sonda (azul) en contra-propagación dentro del AOS.....	92
Figura 47. Auto modulación de la fase SPM (por sus siglas en inglés).....	95
Figura 48. Relación entre la potencia del haz de bomba y la rotación del estado de polarización provocado en la señal de sonda.....	97

Índice de figuras (Continuación)

Figura 49. Comparación del grado de polarización de la señal de sonda y la XPolM.	99
Figura 50. Espectros de emisión espontánea amplificada en los ejes TE, TM y a 45° grados de la EEA para cada una de las facetas del AOS.	100

Índice de tablas

Tabla I. Pérdidas por inserción y captura.....	44
Tabla II. Parámetros resultantes de la función de transferencia en estado estático para el segundo caso analizado.....	62
Tabla III. Tasas de datos y de extinción resultantes.	72
Tabla V. En esta tabla se muestran los parámetros de potencia y del estado de polarización de las señales a la entrada del AOS.	72
Tabla VI. Relación entre el estado de polarización de entrada del haz de prueba y la rotación de su estado de polarización a la salida del AOS.....	94

Introducción

La utilización de amplificadores ópticos de semiconductor (AOSs) en el desarrollo de dispositivos empleados en redes de comunicaciones ópticas es cada vez mayor. Gracias a los mecanismos no lineales inherentes a las propiedades físicas de los AOSs es que se han podido explotar los fenómenos de la modulación cruzada de la polarización (XPolM), la modulación cruzada de la ganancia (XGM), y el mezclado de cuatro ondas (FWM) - por mencionar los más importantes -, con los cuales, se ha logrado desarrollar múltiples dispositivos en el dominio totalmente óptico. Éstos dispositivos incluyen convertidores de longitud de onda, puertas lógicas, conmutadores, multicanalizadores, demulticanalizadores, etc. [H. Soto, E. Alvarez et al, 2002] [H.J.S. Dorren et al, 2003].

El principal objetivo de este trabajo de tesis es realizar un dispositivo totalmente óptico que convierta dos señales ópticas digitales de dos niveles de potencia en una señal óptica de cuatro niveles de potencia utilizando preponderantemente el fenómeno de la XPolM dentro de un AOS. Aunque el fenómeno esencial del convertidor es la XPolM, la XGM estará inevitablemente presente y será determinante en el diseño del mismo. La utilidad de este convertidor es optimizar el ancho de banda disponible en un canal óptico de transmisión al insertar en una sola señal la información contenida en dos de ellas.

Inicialmente se presentará un procedimiento que permite el diseño en estado estático de una función de transferencia del convertidor propuesto (con respecto a la señal en que se producirán los cuatro niveles) tomando en cuenta los mecanismos no lineales involucrados en el proceso de conversión tales como la XPolM y la XGM. En otras palabras, el concepto de “estado estático” se refiere simplemente a que las señales utilizadas en esta parte no variarán

su amplitud en el tiempo tal como lo haría una señal modulada o dinámica. Con lo que respecta a la función de transferencia estática, se refiere a establecer las circunstancias óptimas en el AOS, dispositivos y en las señales involucradas tomando en cuenta los estados de polarización, niveles de potencia, longitudes de onda y los niveles de potencia de las señales involucradas necesarios para generar la conversión exitosa.

Finalmente, tomando en cuenta los resultados encontrados en la obtención de la función de transferencia en estado estático del convertidor (con respecto a la señal en la que se crearán los cuatro niveles) se diseñará el esquema experimental que permite la demostración del convertidor en estado dinámico, cuidando utilizar el menor número posible de elementos. Posteriormente se presentarán las diferentes pruebas que se realizaron a distintas velocidades de tasa de datos para evaluar el funcionamiento del convertidor en redes multicanalizadas por división de longitud de onda (WDM por sus siglas en inglés). En particular se analizará la tasa de extinción y la simetría existente entre los cuatro niveles de la señal convertida. Las señales ópticas que se utilizaron en los experimentos poseen longitudes de onda que se encuentran dentro del ancho de banda útil de los sistemas de comunicaciones ópticas. Por otra parte, las velocidades de transmisión empleadas fueron seleccionadas en función de aquellas utilizadas por el modelo OSI llegando hasta una tasa de bits máxima de 2.5Gbps.

i.1 Antecedentes.

La globalización es una realidad en la que el estar a la vanguardia de los avances tecnológicos mundiales es indispensable para que una nación pueda desarrollarse. En este contexto las telecomunicaciones son un factor de desarrollo que siempre debe ser actualizado. En los países punta de lanza, que sirven obviamente como referencia, los sistemas de comunicaciones ópticas han sostenido un crecimiento exponencial que empezó en la década de los 90 [Internet World Stats, 2007]. La Internet es la tecnología con la tasa más alta de crecimiento sobre el planeta y esto ha sido posible básicamente gracias a las fibras ópticas [The International Engineering Consortium, 2005]. Inclusive, hay quienes aseguran que con el fervor de los fanáticos de la Internet, muchos inversionistas visualizan a las fibras ópticas como el santo grial de ésta [Kathleen Pender, 2000].

Estadísticas actuales indican que en los Estados Unidos, el 68% de la población utiliza Internet, seguido por los países de Oceanía con un 49.2%, Europa con un 36.8%, Latinoamérica con un 12.5%, Asia y Medio Oriente con un poco más del 8%, y finalmente África con un 2%. La población total que resulta de estos porcentajes representa un 14.6% de la población mundial actual, es decir que en el mundo hay arriba de 900 millones de usuarios que dependen de las redes basadas en fibra óptica [Internet World Stats, 2007]. Aparte de los usuarios de la Internet hay una enorme cantidad de personas que utiliza redes de fibra óptica para contar con servicios bancarios, teléfono, video por cable, acceso a distribuidores de dinero, acceso a librerías, y agencias de viaje, etc. [The International Engineering Consortium, 2005] [Lightwave, 2004].

Teniendo en cuenta este panorama, para mejorar el servicio que proporcionan las redes de comunicaciones ópticas existentes y hacerlas más eficientes se ha recurrido a técnicas como la multicanalización por división de longitud de onda (WDM por sus siglas en inglés) y la multicanalización por división de tiempo (OTDM por sus siglas en inglés). En particular, el sistema WDM hace el uso de gran parte del ancho espectral de las fibras ópticas, ya que en vez de tenerse una sola señal por cada fibra, éste multicanaliza varias señales en una misma fibra, cada una transmitida en una longitud de onda diferente [M.C. Edith García Cárdenas et al, 2003]. Actualmente se habla de 160 canales o longitudes de onda por fibra, donde cada canal se transmite a una tasa de 10Gbps y de 40Gbps en sistemas menos densos [Richard C. Dorf, 2003].

Es importante mencionar que aún cuando la mayoría de las redes de comunicaciones dependen principalmente de dispositivos electrónicos, poco a poco ha habido una migración hacia sistemas donde parte del enrutamiento y conmutación se llevan a cabo en el dominio óptico, lo que se denomina como sistemas opacos o redes ópticas de segunda generación. Debido al éxito de la óptica en las redes de comunicaciones, muchos expertos predicen una evolución a lo que se conoce como redes totalmente ópticas, transparentes o de tercera generación. [Andrej Jajszczyk, 2005] En general, a diferencia de los sistemas basados en cobre, las señales ópticas no son afectadas por campos magnéticos por lo que no tienen el problema de diafonía (cross-talk). Además, el nivel de seguridad de los sistemas de comunicaciones ópticas es muy elevado ya que es muy difícil robar señales ópticas. Por otra parte, estos sistemas no disipan tanto calor y las pérdidas de potencia a lo largo de las fibras son moderadas y no dependen de la tasa de bits de las señales, lo que facilita el desarrollo de

enlaces de larga distancia (e.g., mayores a 100km) sin necesidad de regeneración (véase la figura 1).

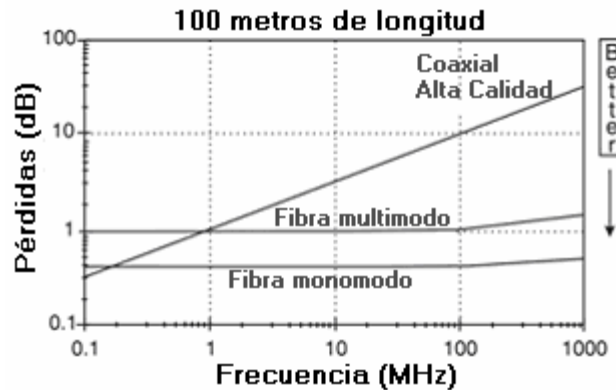


Figura 1. Comparación entre las pérdidas de potencia en enlaces basados en cable coaxial y en fibra óptica.

Otra característica importante de estos sistemas es que proporcionan anchos de banda y tasas de datos muy superiores a los proporcionados por los sistemas basados en cobre. De hecho los sistemas de comunicaciones ópticas permiten transmitir a velocidades por encima de los Tbps, utilizando una sola fibra óptica y una sola longitud de onda que porta una gran cantidad de información.

No obstante, a pesar de que al utilizar la óptica en las redes de comunicaciones se obtienen todas las ventajas antes mencionadas, aún sigue siendo mucho más sencillo y barato desarrollar redes con algunos componentes electrónicos en lugar de redes transparentes.

Dentro de las redes basadas en fibra óptica las redes ópticas pasivas (PON por sus siglas en inglés) son las que más se han desarrollado. El éxito de éstas radica en el hecho de

que permiten proporcionar servicios de banda ancha y altas tasas de bits vía fibra óptica al vecindario, acera y hogar. [The International Engineering Consortium, 2005][M.C. Edith García Cárdenas et al, 2003] Un estudio realizado por el grupo In-Stat-MDR indica que los ingresos generados por las redes PONs será de 833.5 millones de dólares sólo en el año 2006[Optical Networking, 2002]. La ventaja de las redes ópticas pasivas es que no utilizan dispositivos activos entre la oficina central y las instalaciones de los usuarios. Esto se refleja en ahorros para el proveedor de servicios ya que no tiene que abastecer de energía ni dar servicios de mantenimiento a los diferentes componentes que constituyen los enlaces de la red. Es interesante mencionar que las grandes compañías desarrolladoras de infraestructura para telecomunicaciones así como las proveedoras de servicios se han aliado para unir esfuerzos y crear grupos que desarrollen y promuevan los estándares para las redes PONs. Los dos principales grupos son el Alianza de Ethernet en la primera milla (EFMA-IEEE por sus siglas en inglés) y el Redes de Acceso de Servicio Completo (FSAN-ITU-T por sus siglas en inglés) en los que participan compañías como Cisco Systems, Texas Instruments, Analog Devices, Alcatel, Ericsson, Fujitsu, Hitachi(OpNext), Lucent y Marconi por mencionar las más conocidas [Ponforum, 2005].

Con el ímpetu mostrado en el desarrollo y perfeccionamiento de las redes PONs, así como con el advenimiento de los amplificadores de fibra contaminada con erbio (EDFA por sus siglas inglés), los láseres sintonizables y las fibras ópticas de bajas pérdidas, se ha impulsado también el estudio y el desarrollo de los sistemas de comunicaciones totalmente ópticos o transparentes. Dentro de este tipo de redes, el uso de los AOSs ha sido crucial para desarrollar múltiples aplicaciones basadas en los diferentes fenómenos no lineales que

suscitan dentro de estos dispositivos. Por ejemplo, actualmente se han desarrollado, utilizando AOSs, convertidores de longitud de onda, puertas lógicas, moduladores, conmutadores, multicanalizadores, demulticanalizadores, memorias ópticas, correladores, comparadores, etc., todos en el dominio totalmente óptico [Lightwave, 2004].

En el caso particular de este proyecto de tesis se utilizará el fenómeno de la XPolM en un amplificador óptico de semiconductor para desarrollar un dispositivo que convierta dos señales binarias a una sola señal de cuatro niveles de potencia de una manera totalmente óptica. Este tipo de convertidor jamás ha sido desarrollado en el dominio totalmente óptico, sin embargo ya ha habido demostraciones de convertidores de este tipo con tecnología híbrida que han dado resultados favorables [J. RiishBj et al, 1993] pero con todos los inconvenientes inherentes a esta tecnología.

i.2 Objetivos Principales.

- Realizar una revisión de los fenómenos de la XPolM y la XGM dentro de un AOS.
- Analizar y explicar detalladamente el principio de operación del convertidor propuesto.
- Caracterizar los fenómenos de la XPolM y la XGM en un AOS particular. Con los datos obtenidos, determinar los estados de polarización, las potencias y longitudes de onda de las señales que intervienen en el proceso de conversión para que éste se pueda implementar de manera óptima.
- Diseñar un convertidor completamente óptico de dos señales binarias a una de cuatro niveles.
- Implementar el convertidor.
- Caracterizar el desempeño del convertidor en estado dinámico con señales pseudo aleatorias desde 600Mbps hasta 2.5Gbps.

I Capítulo I.

I.1 Funcionamiento de la XGM y la XPolM.

Los fenómenos de la XGM y la XPolM, entre otros, son manifestaciones propias del comportamiento no lineal de los AOS. La XPolM es producida por los fenómenos de la birrefringencia inducida, la perturbación de los ejes propios y por la exacerbación de la anisotropía de la ganancia material.

Por otro lado, la XGM es producida por la saturación de la ganancia. La magnitud con la que se manifiestan ambos fenómenos depende de la distribución no homogénea en sentido transversal y longitudinal de la densidad de portadores de la región activa del AOS en cuestión. A continuación se dará una mayor explicación de la XGM y de la XPolM.

1.2 Modulación cruzada de la ganancia (XGM por sus siglas en inglés).

La tasa de emisión estimulada en un AOS depende directamente de la potencia óptica de la(s) señal(es) de entrada. Con una alta potencia óptica de inyección, la concentración de portadores libres en la región activa es diezmada por la emisión estimulada hasta el punto en que la ganancia del AOS disminuye 3dB por debajo de la ganancia en pequeña señal como se puede apreciar en la Figura 2. A este efecto se le conoce como saturación de la ganancia y típicamente ocurre para potencias de entrada del orden de $100\mu\text{W}$ o más [Derek Nasset et al, 1998].

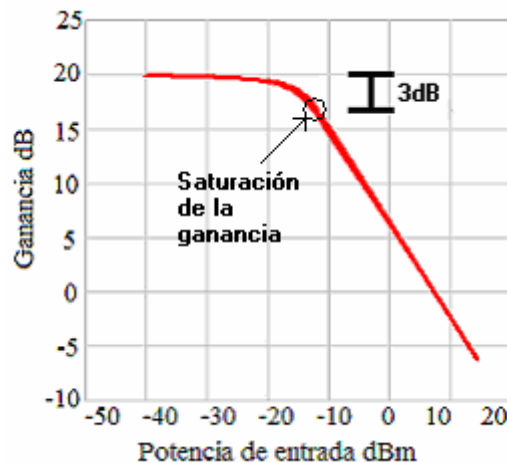


Figura 2. Ganancia de simple paso VS potencia de entrada.

La saturación de la ganancia puede ser utilizada para trasladar la información de una señal con cierta longitud de onda a otra señal con una longitud de onda distinta. Cuando dos señales ópticas son inyectadas simultáneamente dentro de un AOS, una de ellas portando información modulada en amplitud y la segunda teniendo una potencia constante (CW), la

ganancia será modulada si la potencia pico de la señal modulada está cerca de aquella necesaria para inducir la saturación del AOS. En efecto, la ganancia del medio será modulada en sincronía con los cambios de potencia propios de esta señal. De esta manera, cuando la señal modulada presente un nivel alto (1 binario), la ganancia del AOS será saturada. Mientras que cuando ésta presente un nivel bajo (0 binario), la ganancia del AOS será elevada. La modulación de la ganancia afectará directamente a la señal de potencia constante (CW) y como resultado se obtendrá una réplica invertida de la señal modulada original como se puede ver en la Figura 3.



Figura 3. El principio de operación de un convertidor de longitud de onda basado en la XGM.

La XGM es atractiva para diseñar convertidores de longitud de onda ya que es simple de implementar, presenta una aceptable eficiencia de conversión e independencia a la polarización cuando se utiliza el AOS adecuado. No obstante, es pertinente mencionar que la principal desventaja de los convertidores de longitud de onda que utilizan la XGM es la pobre tasa de extinción de salida.

1.3 Modulación cruzada de la polarización (XPoIM por sus siglas en inglés).

El fenómeno de la XPoIM se presenta cuando se inyecta una señal de control con un nivel de potencia lo suficientemente alto como para perturbar significativamente tanto la ganancia como el índice de refracción efectivo de la región activa del AOS en cuestión. Bajo estas circunstancias cualquier otra señal (a la que por cuestiones prácticas se le denomina de prueba) que sea inyectada simultáneamente dentro del AOS sufrirá una perturbación no lineal de su estado de polarización cómo se explicara más adelante. La magnitud de la perturbación inducida en el estado de polarización de la señal de prueba dependerá tanto de la potencia de la señal de control y como de la de prueba, así como de los estados de polarización de entrada y de las longitudes de onda de ambas.

Específicamente, la XPoIM en los AOSs es debida principalmente a los fenómenos de perturbación de la birrefringencia estructural o birrefringencia inducida, a la modificación de los ejes propios y a la diferencia inducida en las ganancias entre los ejes propios TM y TE [J. Riishoj, T.N Nielsen et-al, 1993].

La perturbación de la birrefringencia estructural o birrefringencia inducida está relacionada directamente a la estructura del AOS. En la Figura 4 se muestra la típica estructura de un AOS, donde la región activa o guía de onda, por la cual son guiadas y amplificadas las señales, está resaltada en rojo. Como se puede observar la estructura del AOS no es simétrica transversalmente, de hecho, tanto las dimensiones como el arreglo de

los materiales del eje horizontal son distintos a aquellos del eje vertical del mismo. Esto provoca que los índices efectivos de refracción para los modos TE y TM sean diferentes.

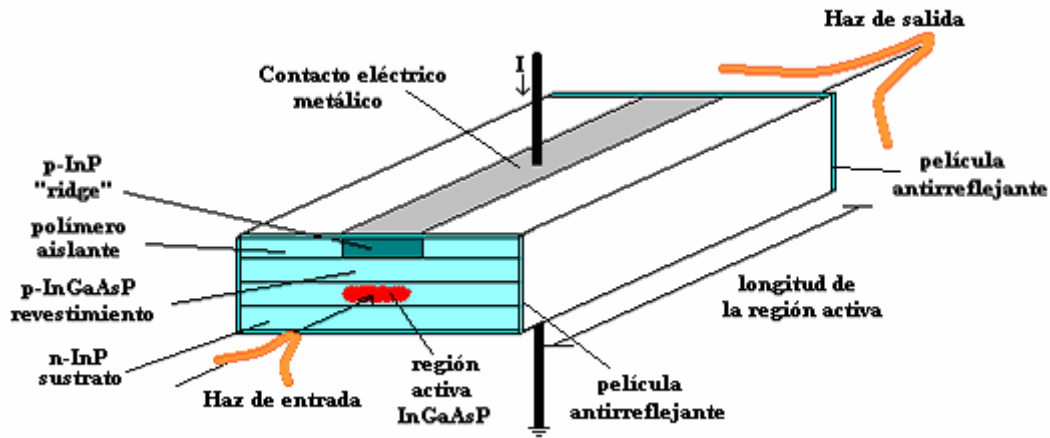


Figura 4. Estructura física de un AOS.

A la asimetría en los índices efectivos de refracción para los modos TE y TM debida a la estructura física del AOS se le conoce como birrefringencia estructural y a la variación en la magnitud de estos índices efectivos de refracción provocada por un cambio del índice de refracción local de la región activa inducido por el consumo de portadores libres por parte de una señal que se propaga dentro del AOS es a lo que se le denomina birrefringencia inducida. En el inciso "a" de la Figura 5 se muestra la guía de onda de un AOS, se incluye un plano vertical resaltado con color rojo para indicar el eje TM y otro en color azul para indicar el eje TE. En el inciso "b" se muestran las componentes "x" y "y" en fase de una señal a la entrada de la guía de onda del AOS. Los rectángulos con borde azul y rojo muestran la evolución o el cambio del índice de refracción provocado por la birrefringencia

inducida a lo largo de la guía de onda, donde el eje horizontal de cada rectángulo representa la distancia física de la guía de onda del AOS y el eje vertical representa al índice de refracción. Finalmente, en el inciso “c” se muestra un ejemplo ilustrativo del desfase inducido entre las componentes de la señal provocado por la diferencia de índices efectivos para TE y TM, que a su vez, induce velocidades de propagación diferentes para cada una de las componentes ortogonales. La magnitud del desfase depende del valor de la diferencia de índices de refracción, la longitud de onda y la potencia de la señal entrante, la corriente de inyección y de la longitud del amplificador. Es importante aclarar que este fenómeno sólo afecta a señales con un estado de polarización que no coincida con los ejes propios del AOS (TE y TM).

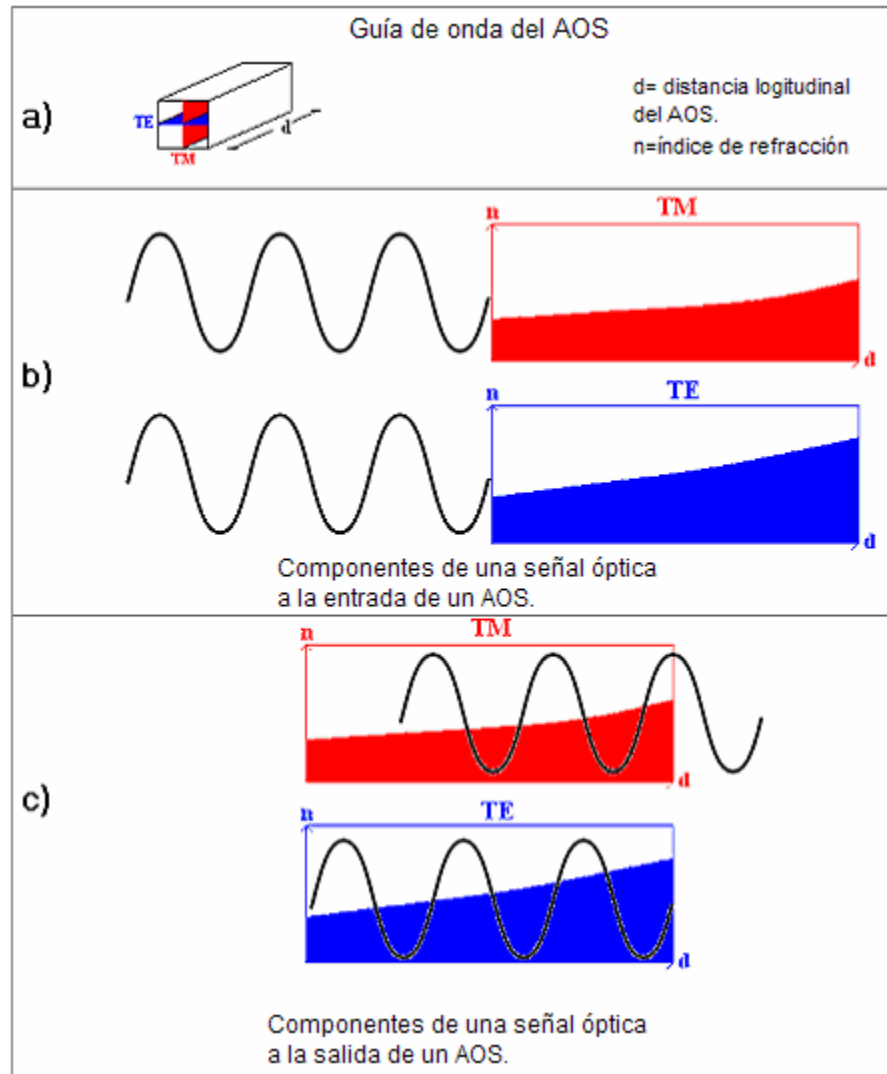


Figura 5. Muestra del desfase inducido entre componentes ortogonales de una señal óptica provocado por la birrefringencia inducida en su paso a través de un AOS.

En la Figura 6 se muestra un ejemplo de cómo un desfase en las componentes ortogonales de una señal óptica puede afectar su estado de polarización. En este ejemplo se muestra un estado de polarización inicial lineal inclinado a 45° de una señal óptica (en la parte superior izquierda de la figura) es cambiado a un estado de polarización elíptico (parte inferior izquierda de la figura). Se resalta con una flecha en color rojo el valor instantáneo

del vector de campo eléctrico de la señal óptica. Como se puede ver en la parte derecha de las figuras, en la cual se muestran las componentes respectivas para cada estado de polarización, el único cambio que necesario para modificar el estado de polarización es un desfase de 45° entre las componentes de la señal. Como ya se mencionó, este desfase puede ser inducido fácilmente por un cambio en la velocidad de propagación entre las componentes debido al efecto de la birrefringencia inducida dentro de un AOS.

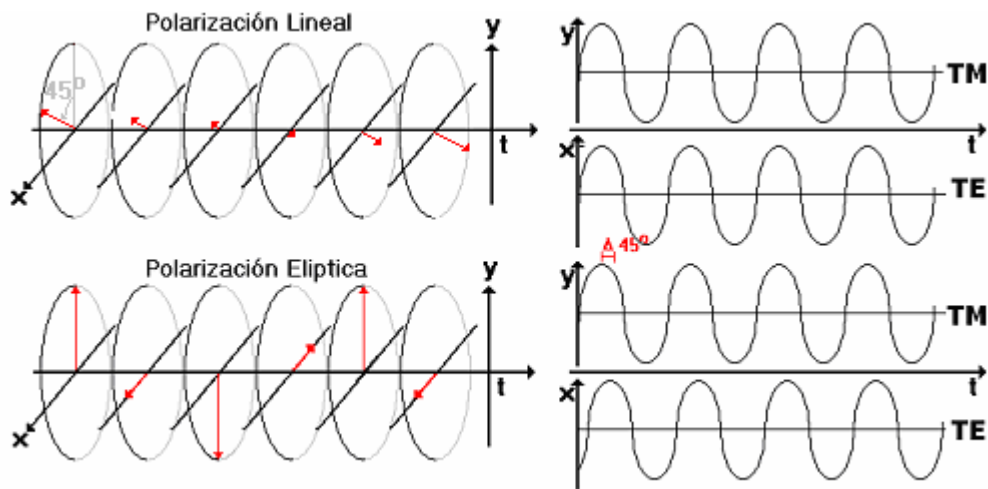


Figura 6. Cambio de un estado de polarización lineal a 45 grados a uno elíptico inducido por un desfase entre las componentes de la señal.

Similarmente, debido a la birrefringencia estructural del AOS, éste presenta diferentes índices de refracción efectivos para los ejes TE y TM, por lo que se producen dos distintos factores de confinamiento que a su vez dan origen a dos distintas ganancias de simple paso. Es decir, el guiado o la propagación, así como la amplificación de señales dentro del AOS favorece a señales con estado de polarización TE. Al existir dos ganancias diferentes para los ejes propios del AOS, cualquier otra señal que se propague simultáneamente con un

estado de polarización distinto a uno lineal horizontal o vertical, sufrirá una amplificación diferente en cada una de sus componentes. Ahora bien, al inyectar en el AOS un haz de alta potencia se perturba la birrefringencia estructural y por tanto se modifican los factores de confinamiento TE y TM y la diferencia que existe entre las ganancias de simple paso para las componentes TE y TM es exacerbada. En la Figura 7 se ilustra la evolución del estado de polarización de una señal que es introducida dentro de un AOS con una polarización circular. En esta Figura 7 se representa la exacerbación de la anisotropía de la ganancia material que se produce al haber una ganancia TM mayor, lo que provoca que a la salida del AOS, la señal cuente con un estado de polarización elíptico.

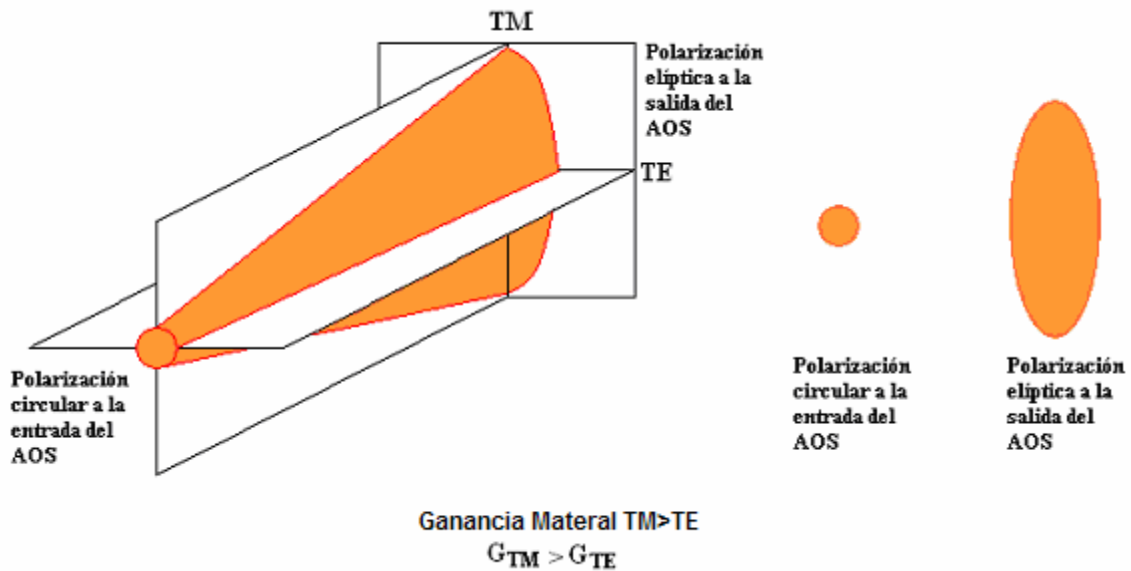


Figura 7. Cambio del estado de polarización debido a distintos ganancias para los ejes TE y TM provocado por la exacerbación de la anisotropía de la ganancia material.

De manera similar, en la Figura 8 se muestra el cambio de un estado de polarización circular a uno elíptico debido a una amplificación mayor en la componente vertical (TM) de la señal. En el caso del estado de polarización circular (parte superior izquierda de la figura),

se puede ver en la parte superior derecha de la figura que sus componentes tienen la misma amplitud y están desfasadas 90° . En el caso del estado de polarización elíptico (parte inferior izquierda de la figura), simplemente se amplificó más la componente TM de la señal con respecto a su componente TE.

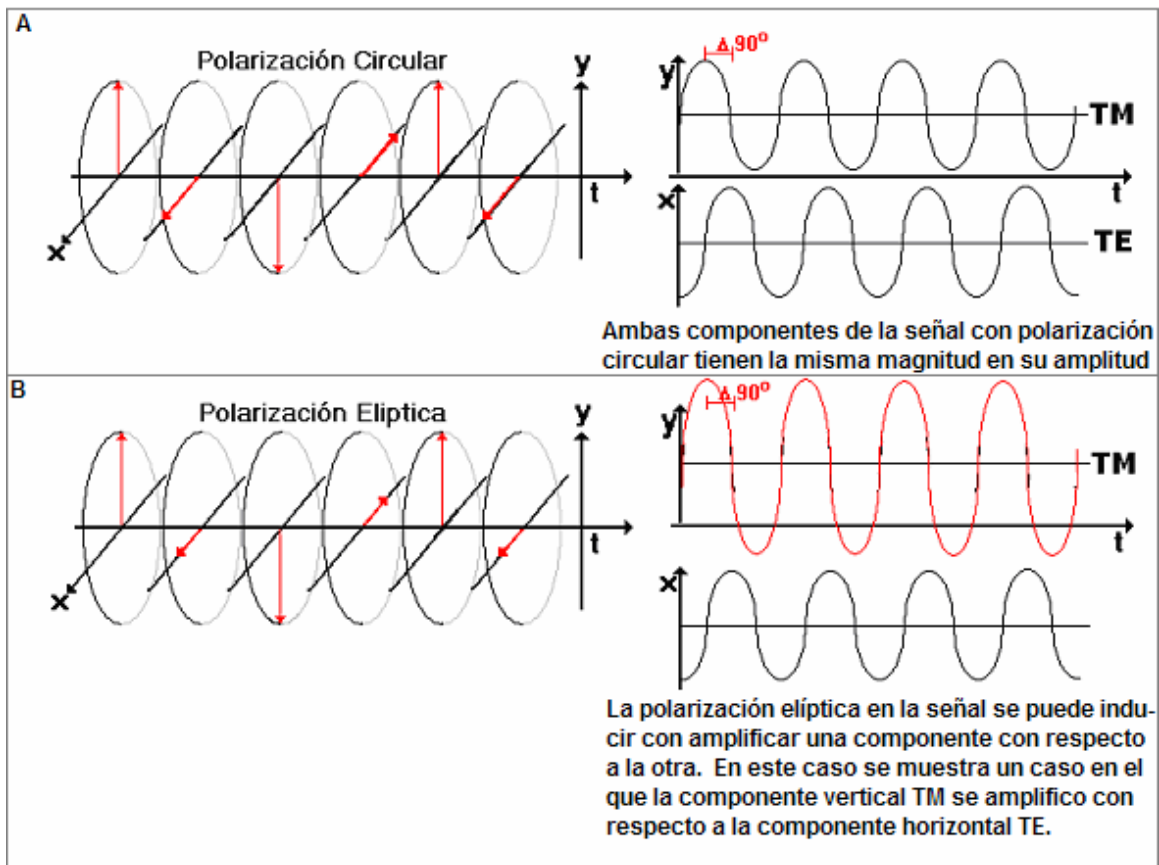


Figura 8. Cambio de un estado de polarización circular a uno elíptico al amplificar en mayor proporción una componente de la señal provocada por la exacerbación de la anisotropía de la ganancia material.

En los dos fenómenos mencionados anteriormente, se aclaró que ellos afectan a señales con estados de polarización distintos a los estados de polarización lineales TE y TM ya que no tienen la capacidad de afectar a los estados de polarización antes mencionados.

Sin embargo, para señales de entrada cuyo estado lineal de polarización es coincidente con alguno de los ejes propios del AOS, de acuerdo a [Soto et al., 1999], se presenta una rotación en el estado de polarización de la señal. A este fenómeno se le conoce como perturbación de los ejes propios y puede ser interpretado de la manera siguiente:

Cuando un haz es introducido dentro de la guía de onda de un AOS, éste es progresivamente amplificado por el mecanismo de la emisión estimulada, el cual en conjunto con la emisión espontánea amplificada produce una distribución longitudinal no homogénea de la densidad de portadores, y como consecuencia, una distribución longitudinal no homogénea del índice de refracción de la región activa del amplificador. Si se inyecta una señal con la potencia suficiente ($> 1\text{mW}$), entonces el índice de refracción aumentará progresivamente hacia la salida del amplificador lo necesario para soportar el guiado de modos de mayor orden dentro de la guía de onda [Soto et al., 2004].

De hecho, debido a que para evitar reflexiones indeseadas, la región activa del amplificador se encuentra inclinada con respecto al plano de inyección, modos de alto orden son excitados desde la entrada del amplificador. En el caso donde la señal no cuente con una potencia importante ($> 1\text{mW}$), las condiciones necesarias (factor de confinamiento y ganancia de simple paso) para mantener el guiado de modos superiores no pueden ser mantenidas; sin embargo, al momento de inyectar un haz con la potencia necesaria para exacerbar estos parámetros se logra el guiado de modos superiores. Éstos se propagan dentro de la guía del amplificador con constantes de propagación distintas y cada modo guiado interfiere con todos los demás. La interferencia entre los modos produce que el máximo de intensidad dentro de la guía de onda se propague con una trayectoria casi-helicoidal, y en consecuencia,

se genera una distribución transversal no homogénea del índice de refracción con un máximo que se distribuye casi-helicoidalmente a lo largo de la guía de onda del AOS como se ilustra en la Figura 9. Como resultado se forma una nueva guía de onda desprovista de ejes propios en donde se suscita lo que se conoce como acoplamiento de modos TE-TM. De esta manera, al no contar con ejes propios dentro de la guía del AOS, cualquier otra señal que sea inyectada simultáneamente al amplificador no conservará su estado de polarización inicial [Soto et al., 2003].

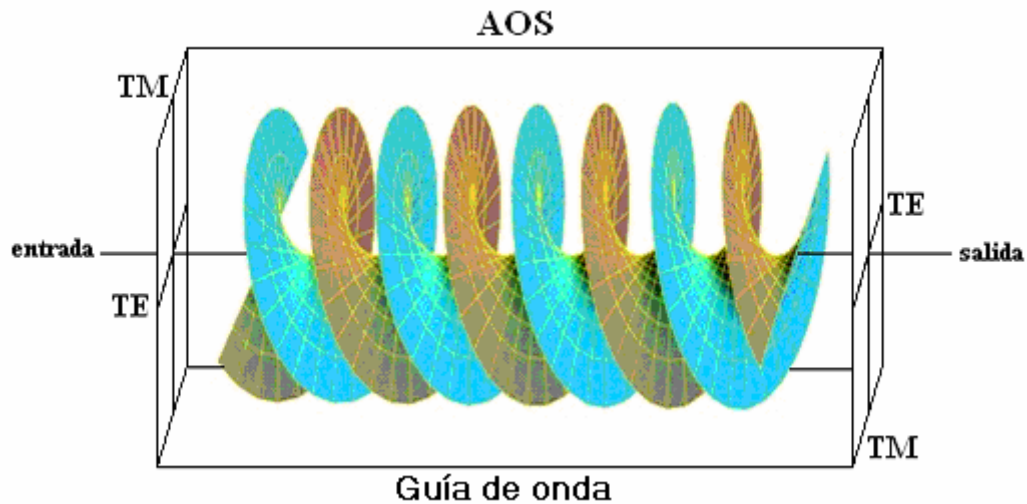


Figura 9. Trayectoria de propagación del máximo de intensidad dentro de la guía de onda de un AOS resultante de la interferencia coherente de distintos modos excitados dentro del amplificador.

Los tres fenómenos descritos anteriormente: la birrefringencia inducida, la perturbación de los ejes propios y por la exacerbación de la anisotropía de la ganancia material, en conjunto son los responsables de la existencia de la XPolM.

Los principales usos del fenómeno de la polarización cruzada en amplificadores ópticos de semiconductor se han enfocado al diseño de dispositivos convertidores de longitud de onda y al diseño de operadores lógicos en el dominio óptico. Entre las características útiles de la polarización cruzada se cuentan una elevada tasa de extinción, menores pérdidas en términos de potencia y mejoramiento de la tasa de error de bit (BER por sus siglas en inglés), etc. [M.F.C. Stephens et al, 1997].

II Capítulo II

II.1 Principio de operación del convertidor.

La función del convertidor propuesto en este trabajo es incluir la información que contienen dos señales ópticas binarias en una sola. Las dos señales de entrada están moduladas en amplitud de manera que sólo cuentan con dos niveles de amplitud. Por otra parte, la señal de salida tendrá cuatro niveles de amplitud con los cuales se representará la información de las dos señales de entrada.

La conversión descrita se logra utilizando conjuntamente los fenómenos de la XPolM y la XGM, los cuales se manifiestan siempre que existan dos o más señales ópticas dentro de un AOS. En particular, con la ayuda de un controlador de polarización y de un polarizador, ambos instalados a la salida del AOS, se sintetizarán los 4 niveles de la señal convertida.

El proceso de conversión involucra la inyección simultánea de dos señales portadoras de la información moduladas en amplitud (S1 y S2), y una de amplitud constante designada como CW (por sus siglas en inglés). Cada una de estas señales posee una longitud de onda distinta, pero comprendida dentro del ancho de banda de operación del AOS. Cabe mencionar que modificando la potencia, la longitud de onda y el estado de polarización de las señales antes mencionadas, se proporcionarán las condiciones necesarias para que a la salida del AOS se genere una sola señal con los cuatro niveles necesarios para representar la información inicialmente contenida en las señales S1 y S2. Específicamente, se propone que los cuatro niveles en orden ascendente, N0, N1, N2 y N3, de la señal de salida S3,

correspondan respectivamente a las cuatro combinaciones “00”, “01”, “10” y “11” de los niveles de las señales de entrada S1 y S2 (‘0’ representa el nivel bajo, ‘1’, el alto).

En el proceso de obtención de los cuatro niveles de la señal de salida, hay tres parámetros fundamentales que se tienen que examinar: la equidistancia entre los 4 niveles, el máximo valor posible de esta distancia y la tasa de extinción entre el segundo y el primer nivel. Tanto la modificación de los parámetros de las señales binarias como la examinación de las variables que precisan la generación óptima de la señal de cuatro niveles se lograrán a través del efecto de la XPolM, XGM, y el polarizador a la salida del amplificador en conjunto.

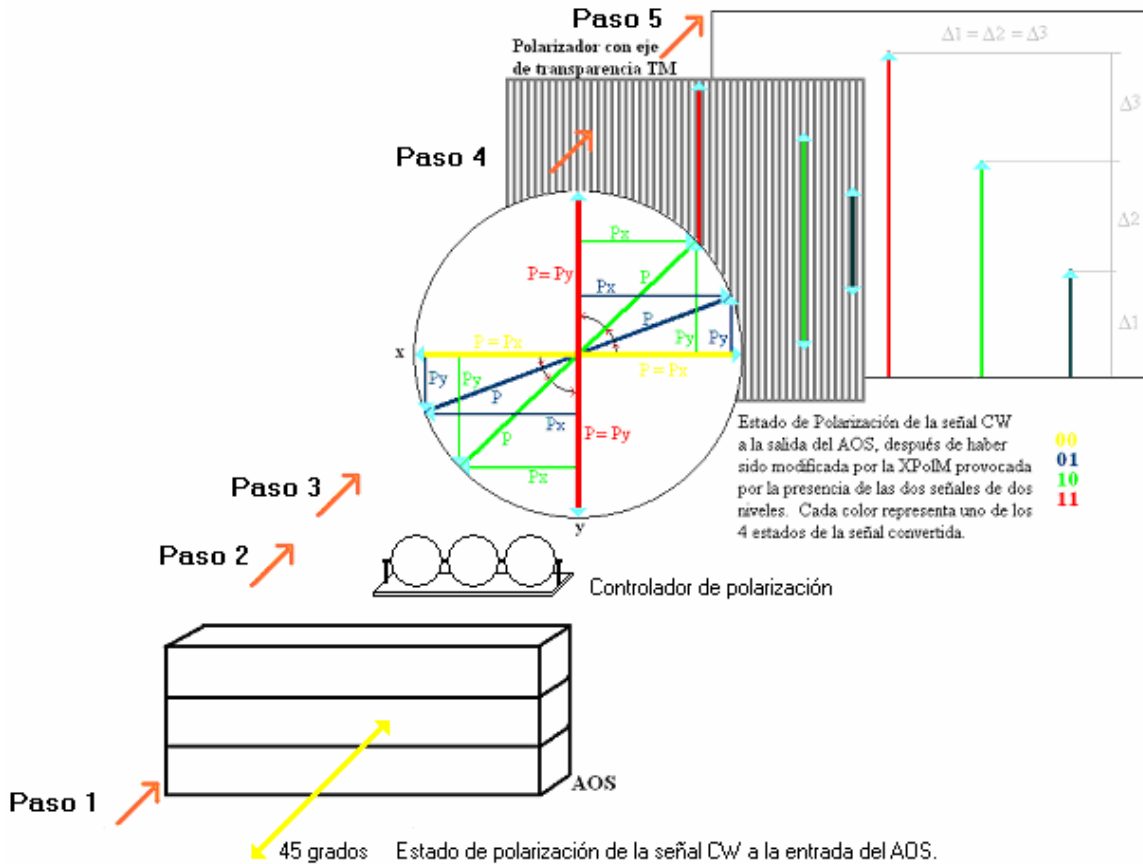


Figura 10. Evolución del estado de polarización de la señal CW desde su inyección hasta su salida a través del polarizador colocado a la salida del amplificador.

Como se puede apreciar en el paso 1 de la Figura 10, se propone asignar un estado inicial de polarización lineal inclinado a 45° para la señal CW a la entrada del AOS. Con este estado de polarización la XPoIM tendrá el mayor efecto posible sobre la señal CW. En el paso 2 se muestra un controlador de polarización (CP) que se encargará de linearizar el estado de polarización de la señal a la salida del AOS. En el paso 3 se puede apreciar un círculo en el que se representan a cuatro estados de polarización distintos para la señal CW. Por cuestiones explicativas, se asume que en el caso en el que las señales S1 y S2 cuenten con un nivel bajo, la señal CW se alineará para tener un estado de polarización inicial lineal

horizontal a la salida del CP. En estas condiciones, si el eje de transparencia del polarizador se orienta perpendicularmente a este estado de polarización del haz CW (paso 4), este dispositivo rechazará casi en su totalidad la potencia del haz CW obteniéndose el nivel discreto más bajo de la señal de cuatro niveles. En el paso 5 se puede corroborar la ausencia de la señal CW (señal ilustrada en amarillo) provocada por el bloqueo de la misma en el polarizador colocado en el paso 4. Para obtener el máximo nivel de amplitud en la señal de salida de cuatro niveles, lo ideal sería que cuando S1 y S2 se encuentren en un estado lógico alto “1”, la XPolM induzca en la señal CW, a la salida del CP, una translación en su estado de polarización suficiente para obtener una polarización lineal vertical. Lo anterior permitiría que toda la potencia de la señal CW pase a través del polarizador. Para lograr el segundo nivel discreto de la señal de cuatro niveles, se requiere que una de las señales binarias (S1) presente un valor lógico alto “1” y la otra (S2) un valor lógico bajo “0”. En este caso, la suma de las potencias de las dos señales binarias S1 y S2 debe inducir un cambio en el estado de polarización del haz CW suficiente para que su componente alineada con el eje de transparencia del polarizador para generar el tercer nivel de la señal. En el caso del tercer nivel discreto de la señal de cuatro niveles, se requiere que una de las señales binarias S1 presente un valor lógico bajo “0” y la otra S2 un valor lógico alto “1”, justo el caso contrario al anterior. Ahora la suma de las potencias de las dos señales binarias debe inducir una perturbación en el estado de polarización del haz CW y obtener el segundo nivel de la señal.

Como se mencionó anteriormente, se debe poner singular atención en obtener una buena tasa de extinción entre el nivel N0 y el nivel N1 de la señal de salida de cuatro niveles,

por lo que es importante optimizar el rechazo del polarizador, el cual debe poseer una excelente tasa de extinción.

En el caso real, como se mencionó al principio de este trabajo de tesis, no solamente la XPolM afecta al haz CW dentro del AOS. Hay otros efectos como el de la auto-modulación de la fase (SPM por sus siglas en inglés) o el de la auto-modulación de la ganancia (SGM por sus siglas en inglés), por mencionar algunos, los cuales afectan el estado de polarización y la amplitud de la señal CW. Sin embargo, adicionalmente al fenómeno de la XPolM, en este trabajo solamente se tomará en cuenta el efecto de la XGM debido a la acción preponderante que ejerce sobre la amplitud de la señal de salida CW, ya que a medida que la potencia de las señales binarias aumente o disminuya, la potencia de la señal CW a la salida del AOS se verá afectada de manera indirectamente proporcional y esto influirá firmemente en la obtención de los 4 niveles.

La Figura 11 muestra el diagrama de niveles discretos que se utilizará para diseñar al convertidor propuesto en este trabajo de tesis. En esta figura se muestra la correspondencia de cada uno de los cuatro niveles de potencia de la señal de salida CW, con una longitud de onda λ_3 (S3), con los niveles de potencia de las dos señales binarias de entrada, con longitudes de onda λ_1 (S1) y λ_2 (S2).

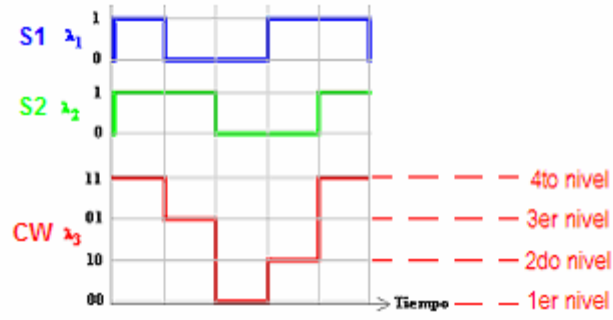


Figura 11. Correspondencia entre los 4 niveles de amplitud de la señal convertida S3 y la combinación de los niveles de amplitud de las señales S1 y S2.

II.2 Esquema Experimental

El esquema experimental con el cual se realizó el convertidor es el mostrado en la Figura 12. Este esquema se basa en la modificación del estado de polarización y en la supresión de ganancia que inducen las dos señales binarias S1 y S2, por medio de la XPolM y la XGM respectivamente sobre el haz CW. Cabe mencionar que las señales S1 y S2 son inyectadas en contra propagación con respecto al haz CW para disminuir al máximo la presencia de las dos señales binarias en la salida del convertidor.

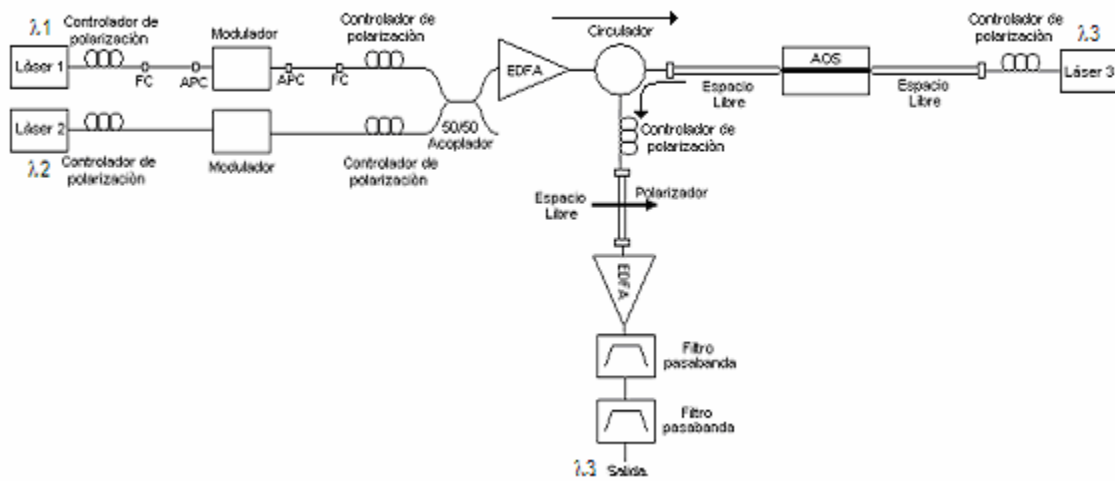


Figura 12. Esquema Experimental del Convertidor.

Los controladores de polarización colocados entre las fuentes láser y los moduladores son necesarios para que éstos produzcan señales con una buena tasa de extinción, ya que son sensibles al estado de polarización de los haces. Por otra parte, con el fin de tener un control del estado de polarización de todas las señales que intervienen en el proceso de conversión se

utilizan los controladores de polarización colocados en frente de los moduladores que generan a las señales S1 y S2 y de la fuente láser que genera al haz CW. El acoplador 50/50 (3dB) reúne a las dos señales binarias en una misma fibra para después ser insertadas dentro de un amplificador de fibra contaminada con erbio (EDFA por sus siglas en inglés) para contar con la potencia necesaria, y contrarrestar las pérdidas, de manera que permita inducir dentro del AOS una XPolM significativa. Para lograr la contra-propagación entre las señales binarias S1 y S2 con el haz CW y para capturar a éste una vez que atravesó al amplificador, se utiliza un circulador. El circulador es un componente óptico pasivo con tres puertos. En cualquiera de los puertos se puede inyectar una señal que únicamente será transferida hacia el siguiente puerto. El dispositivo tiene un sentido de operación, ya que en el sentido opuesto funciona como un aislador óptico. Todas las señales son inyectadas al AOS por aire libre. Por último, se coloca un controlador de polarización y un polarizador para generar la señal de cuatro niveles la salida del convertidor, la cual es amplificada por un EDFA y filtrada para eliminar la emisión espontánea amplificada del AOS, y de los EDFAs utilizados en el esquema, así como cualquier residuo de las señales binarias. La utilización de dos filtros pasa-banda en cascada fue necesaria para sintetizar un filtro de 0.5nm de banda pasante lo cual permite eliminar, lo más posible, la emisión estimulada amplificada del AOS y EDFAs, de manera que el grado de polarización de la señal de cuatro niveles es optimizado. Como se puede apreciar en la Figura 13, la síntesis de un filtro pasa-banda más estrecho es posible debido a lo abrupto de los flancos que limitan las bandas pasantes de los filtros que conforman el arreglo en cascada.

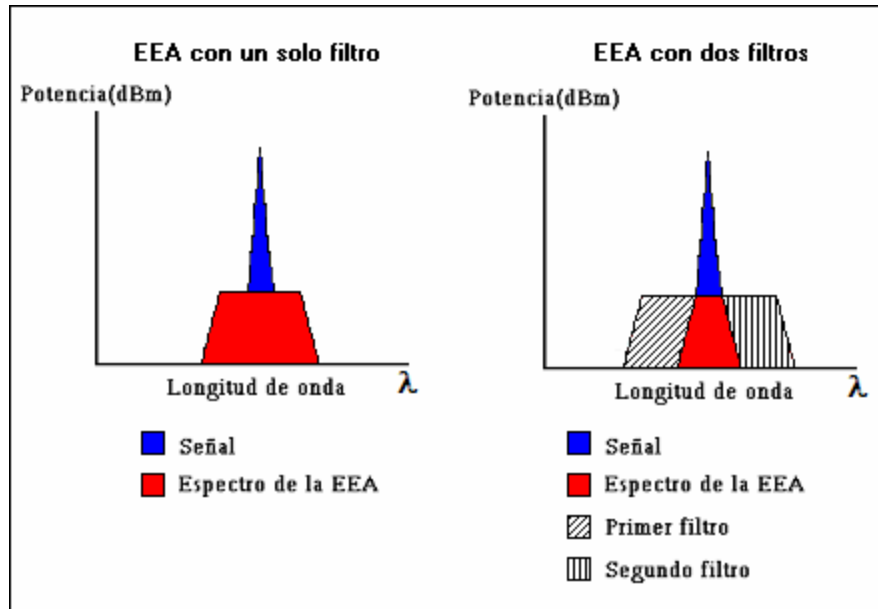


Figura 13. Representación de la emisión de EEA que atraviesa un solo filtro y dos de ellos colocados en cascada.

III Capítulo III.

III.1 Obtención de la función de transferencia en estado estático del convertidor.

La función de transferencia es una herramienta esencial en el desarrollo de todo tipo de dispositivo que cuente con por lo menos una entrada y una salida, ya que con ella se puede predecir o modelar los cambios que sufrirán las señales que entran al sistema.

En particular, una función de transferencia en estado estático se refiere a aquella que es determinada para señales de entrada cuyos parámetros de interés (amplitud, fase, longitud de onda) no dependen del tiempo. Para el caso de este trabajo de tesis la función de transferencia en estado estático, por así llamarla, está estricta y únicamente relacionada tomando como referencia a la señal CW; asimismo, las señales binarias no estarán moduladas (señales con parámetros independientes del tiempo).

Como se puede ver en la Figura 14, la función de transferencia del convertidor puede ser visualizada como una caja negra, dentro de la cual distintos fenómenos o factores modificarán las características iniciales del haz CW.



Figura 14. Representación de la función de transferencia en estado estático para el haz CW.

En el caso del convertidor propuesto hay tres factores significativos que gobiernan la función de transferencia de amplitud para el haz CW, los cuales se pueden ver en la Figura 15 y son la acción de la XGM, el efecto de la XPolM acompañado de la modificación de la amplitud que ejerce el polarizador externo puesto a la salida del AOS.

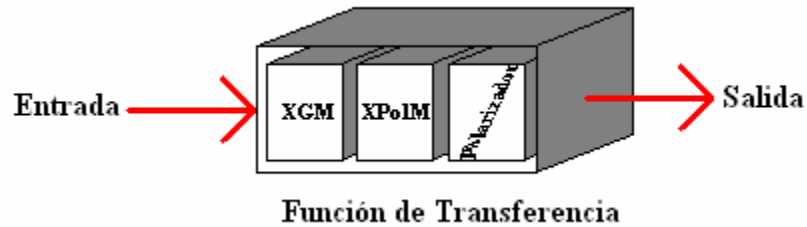


Figura 15. Fenómenos que gobiernan la función de transferencia de amplitud en estado estático para el haz CW.

Por medio de estos factores se modificará la amplitud y el estado de polarización del haz CW dentro y fuera del AOS utilizado, lo cual permitirá generar la señal de salida de 4 niveles de amplitud.

En sentido estricto, el único fenómeno que afectará la amplitud del haz CW dentro del AOS es la XGM. Tanto la XPolM como el efecto del polarizador a la salida del AOS provocan cambios en el estado de polarización del haz CW, sin embargo, manejados convenientemente se pueden traducir en cambios de amplitud.

Para determinar la función de transferencia en estado estático para el haz CW se tendrá que caracterizar primeramente la acción de la XGM con el fin de obtener una curva que muestre la evolución de la potencia del haz CW a la salida del AOS en función de la

potencia total de las señales binarias inyectadas al amplificador. Por simplicidad, en este experimento en particular, se representará la potencia total de entrada de las señales S1 y S2 utilizando un sólo haz de amplitud variable. Una vez obtenida la gráfica de la acción de la XGM, se tendrá una idea clara de la gama de valores requerida en la potencia de las señales S1 y S2 para generar cambios considerables de potencia en el haz CW a la salida del AOS. En la Figura 16 se presenta un ejemplo de la gráfica que se espera generar como resultado de la caracterización de la acción de la XGM sobre el haz CW. En el eje “x” se tendrá la potencia total que representa a las señales binarias a la entrada del amplificador y en el eje “y” se tendrá la evolución del nivel de potencia para el haz CW a la salida del AOS.

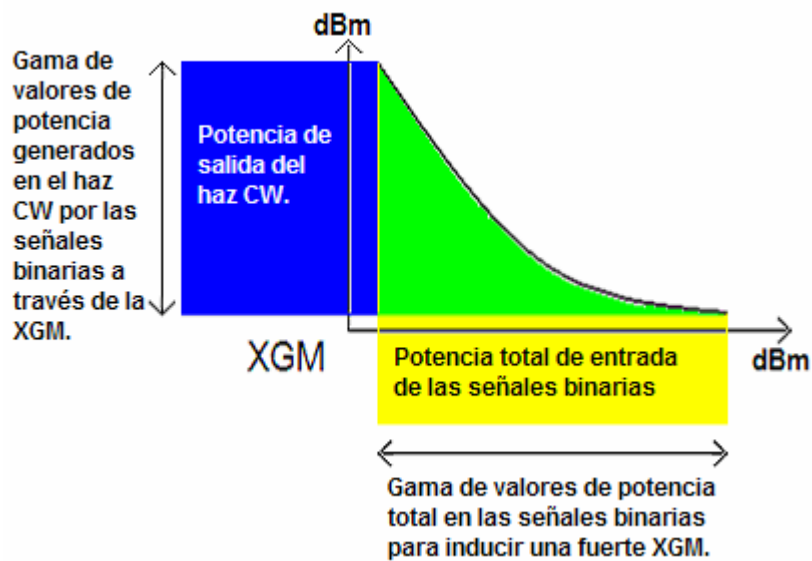


Figura 16. Relación entre la de potencia total de las señales binarias de entrada al AOS y la potencia del haz CW a la salida del amplificador gobernada por la XGM.

Posteriormente, se utilizará la misma gama de valores de potencia empleados para emular a las señales binarias, que produjeron un cambio drástico en la señal CW a través de la XGM, para caracterizar la evolución del estado de polarización del haz CW a la salida del

AOS a través del efecto de la XPolM. Será a través de un analizador de polarización HP8509B que se determinará, utilizando la esfera de Poincaré, la translación total del estado de polarización del haz CW en función de la potencia total de entrada al AOS.

En la Figura 17 se muestra una esfera de Poincaré, en la cual se puede representar cualquier estado de polarización de una señal óptica [HP 8509B Manual]. Como se puede apreciar en la figura, todo el plano ecuatorial de la esfera representa a estados de polarización lineales, los dos polos representan estados circulares y cualquier otro punto dentro de la esfera representa un estado elíptico. La diferencia entre los dos hemisferios de la esfera es la dirección en la que gira el estado de polarización representado. Así el hemisferio superior representa giro a la izquierda y el inferior giro a la derecha.

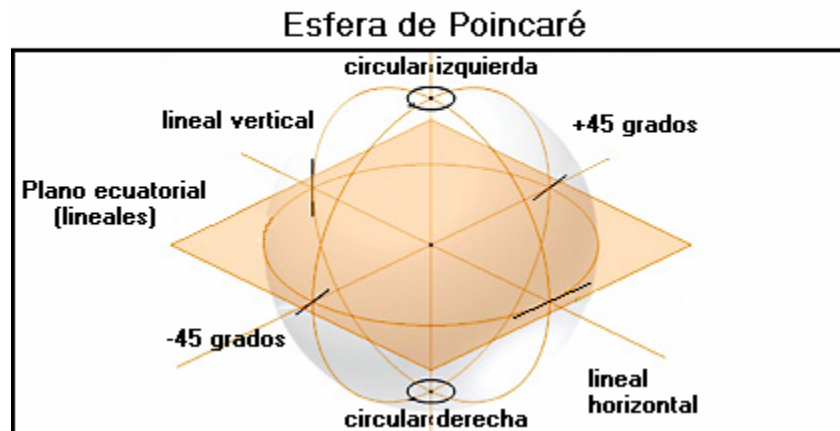


Figura 17. Ilustración de la esfera de Poincaré.

Nótese que si bien, un estado de polarización lineal horizontal está separado 90° de uno lineal vertical en la esfera de Poincaré están separados por 180° . Por esta razón se tendrá que dividir entre dos la distancia angular que separe a dos estados de polarización del haz

CW representados en la esfera de Poincaré del analizador de polarización para poder describir la evolución del estado de polarización de la señal CW inducida por la XPolM.

Con la información obtenida se establecerá una curva que muestre la translación (en grados) que sufre el estado de polarización del haz CW (con respecto a su estado inicial o no perturbado cuando no se encuentra ninguna otra señal presente dentro del AOS) en función de la potencia total de entrada, como se ejemplifica en la Figura 18.

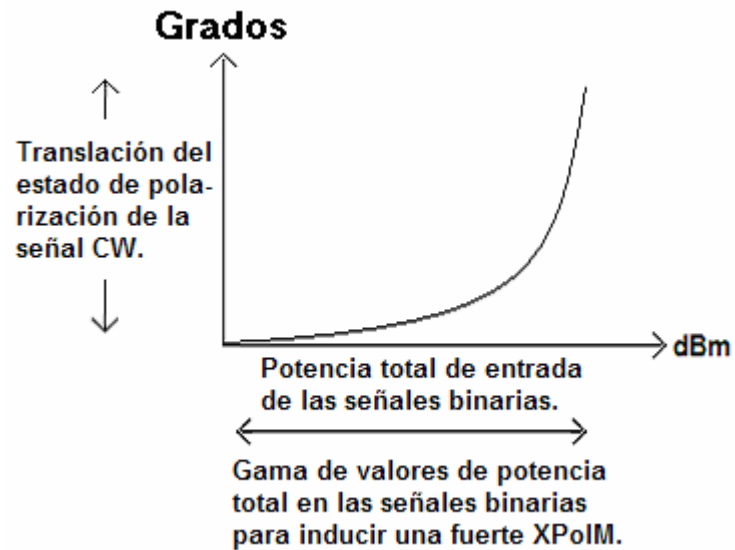


Figura 18. Relación entre el total de potencia de las señales binarias y la translación inducida en el estado de polarización de la señal CW a través de la XPolM obtenido en la esfera de Poincaré.

Hasta este punto, se tendrá registrada la evolución de la amplitud del haz CW generado por la acción de la XGM y otra sobre su estado de polarización en términos de la translación de éste en la esfera de Poincaré generado por la XPolM.

Como tercer paso se tendrá que analizar la acción del polarizador (ubicado a la salida del AOS) sobre la potencia de la señal CW para encontrar su factor de transmisión de potencia asociado a su estado de polarización a la salida del AOS e inducido por las potencias de entrada de las señales binarias (véase la Figura 19). Este factor de transmisión de potencia a través del polarizador es el que afectará de manera definitiva a la amplitud del haz CW.



Figura 19. Relación entre la potencia total de las señales binarias y el factor de transmisión de potencia de la señal CW provocado por la XPolM y el polarizador colocado a la salida del AOS.

La acción que ejerce el polarizador sobre la amplitud del haz CW puede ser simulada matemáticamente por una función seno cuadrado o coseno cuadrado si el estado de polarización de partida del haz es transmitido o rechazado para una señal con polarización lineal horizontal, respectivamente como se puede ver en el ejemplo de la Figura 20.

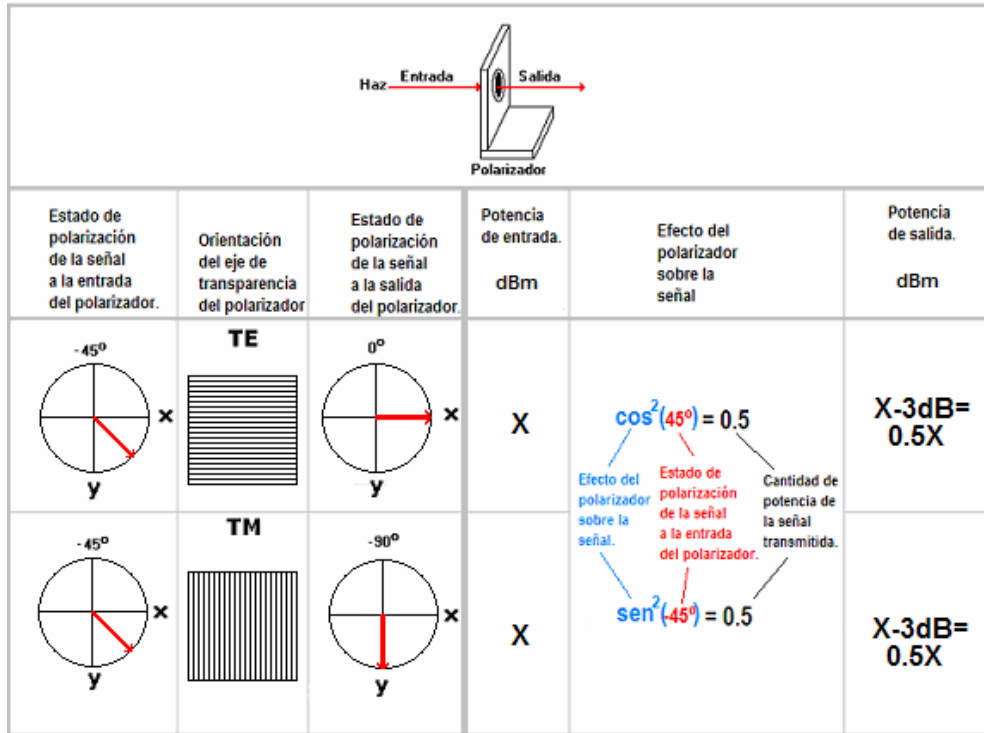


Figura 20. Emulación matemática de la función de transferencia de un polarizador.

Una vez obtenidas las curvas de la evolución de la amplitud del haz CW generadas por la XGM y el polarizador en conjunto con la XPolM, se pueden multiplicar los ejes verticales, de cada una de éstas, para obtener la gráfica que describa la evolución final de la potencia del haz CW a la salida del polarizador (Véase la Figura 21) en función de las señales binarias a la entrada del AOS tomando en cuenta a los tres factores involucrados (XGM, XPolM y polarizador).

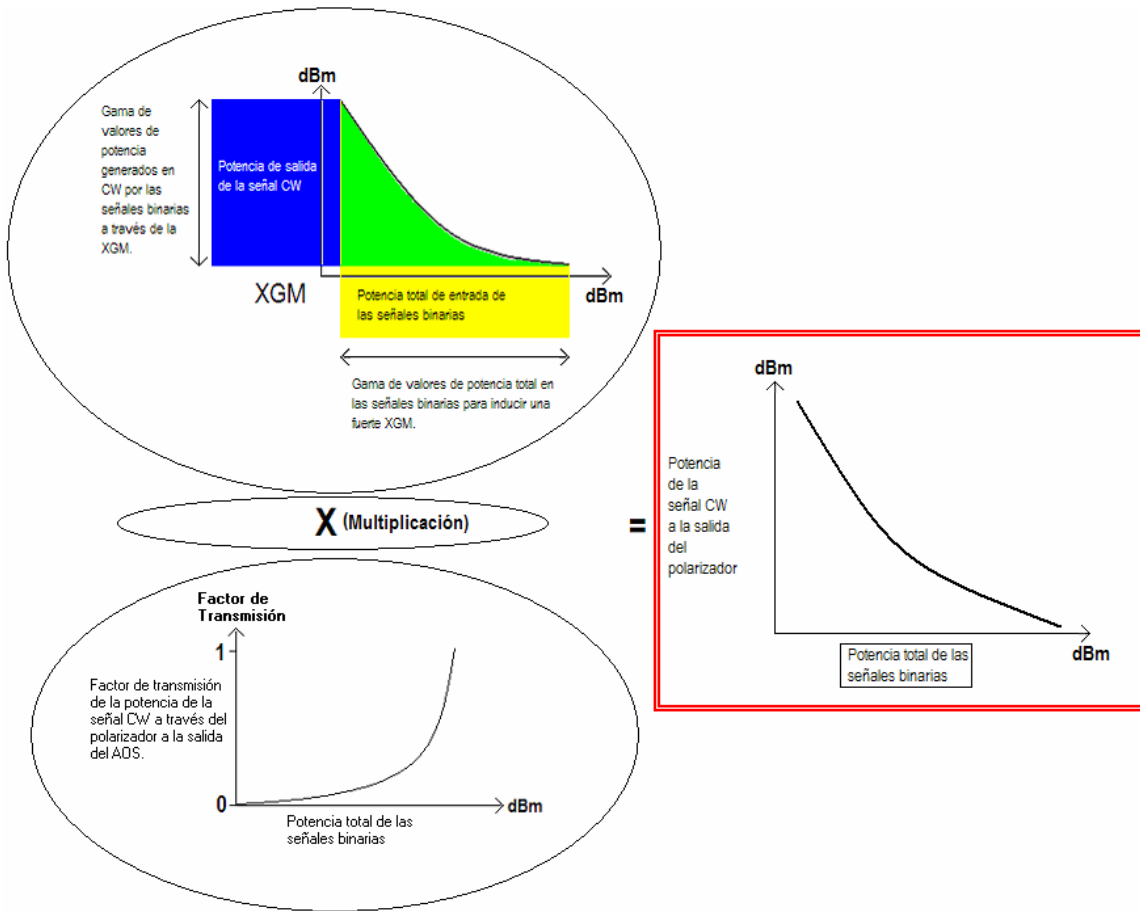


Figura 21. Generación de la gráfica (enmarcada en rojo) que representa la evolución de la potencia del haz CW en función de la suma de las potencias individuales de las señales binarias partiendo de la multiplicación entre los ejes verticales de las gráficas mostradas en la figura 16 y 19.

Con la gráfica resultante se tendrá toda la información necesaria para poder generar los 4 niveles discretos de potencia en el haz CW. En efecto, en el eje horizontal se tiene la potencia total de las señales binarias mientras que en el eje vertical se tiene la potencia del haz CW transmitida a la salida del polarizador. Sólo resta encontrar las potencias individuales necesarias en las señales binarias que puedan generar los cuatro niveles discretos en la señal CW con las características mencionadas anteriormente.

En la Figura 22 se ilustra una manera en que se pueden generar los cuatro niveles de potencia en el haz CW partiendo de una curva hipotética de la evolución de su amplitud en función de la potencia de las señales binarias de entrada.

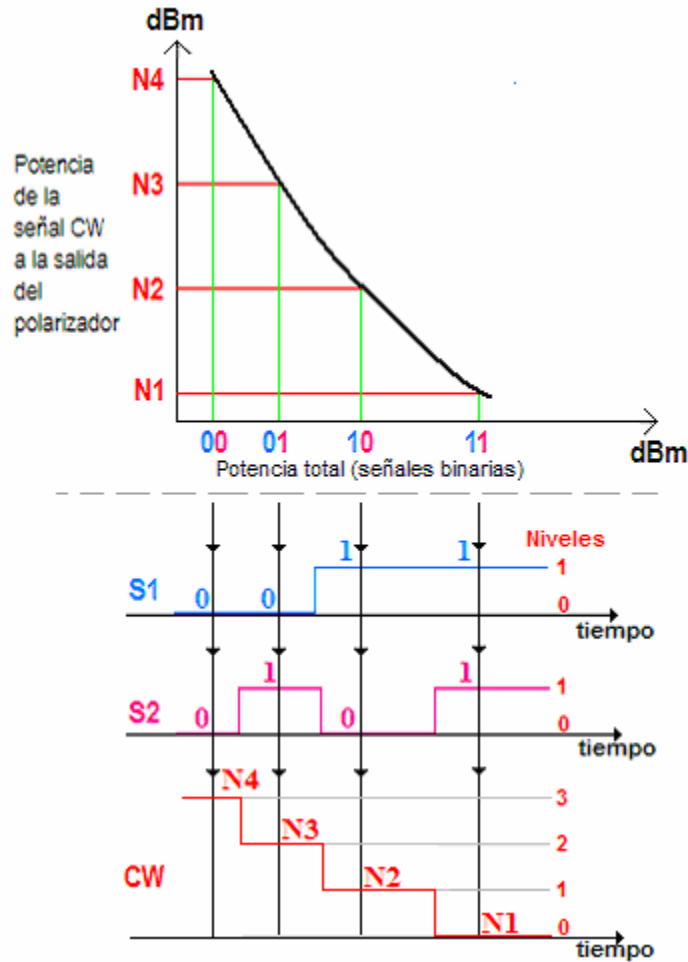


Figura 22. Generación de los cuatro niveles de potencia en la señal CW a partir de la combinación de potencias de las señales binarias.

Primeramente hay que familiarizarse con la figura 22. En la gráfica superior, el eje vertical indica con las etiquetas N1, N2, N3, y N4 los cuatro niveles de potencia de salida para el haz CW. En el eje horizontal se tiene señalada (00, 01, 10, 11) la potencia, que

representa la potencia total de las señales binarias (S1 y S2), necesaria y correspondiente para generar los niveles de potencia N1, N2, N3 y N4. En la gráfica inferior, se trazaron los estados lógicos correspondientes de las señales binarias S1, S2 y los niveles de potencia de salida del haz CW con el objeto de que se pueda ver con mayor claridad a que combinación de potencias de las señales binarias corresponde cada nivel de la señal de cuatro niveles.

Cómo se estableció anteriormente, los cuatro niveles discretos deben ser equidistantes entre si, deben tener la mayor separación posible entre si y el nivel más bajo, N1, debe contar con la menor potencia posible para asegurar una buena tasa de extinción.

En el eje horizontal de la misma gráfica inferior se puede constatar que cada nivel generado en el haz CW (eje vertical) corresponde a una combinación única de los estados lógicos de las señales S1 y S2.

En el caso del nivel N4, las dos señales binarias (S1 y S2) tienen un valor lógico bajo "0", en otras palabras, la única señal presente en ese momento dentro del AOS es la señal CW, por lo que no hay ningún efecto de la XGM o de la XPolM que la perturben. En estas condiciones y alineando el eje de transparencia del polarizador coincidente con el estado de polarización de la señal CW a la salida del AOS permite que pase toda la potencia de la señal CW.

En la generación del nivel N3, está involucrada directamente la señal S2, la cual cuenta con su valor lógico alto, ya que la señal S1 al contar con su valor lógico bajo no está

presente. La potencia de esta señal S2 tiene que ser la necesaria para que a través de la XGM y la XPolM se modifiquen tanto la amplitud como el estado de polarización del haz CW y al pasar este haz por el polarizador solamente pasará la componente del campo eléctrico que coincida con el eje de transmisión del polarizador, la cual deberá tener la potencia suficiente para generar el nivel N3.

La generación del nivel N2 es análoga al caso anterior, con la diferencia que la señal presente con valor lógico alto es S1. En estos ejemplos en particular es obvio, como se puede ver en la evolución de la potencia de la señal CW en la Figura 22, que la potencia para el estado de alto de la señal S1 es mayor al de la señal S2, ya que S1 induce o provoca efectos más pronunciados en la potencia y estado de polarización de la señal CW a través de la XGM y la XPolM.

Por último, es crucial que antes de precisar el cuarto nivel N1 se verifique que la suma de las potencias individuales de las señales S1 y S2 en estado alto sea igual al valor de potencia total necesario "11" para obtener el nivel N1 en la señal CW manteniendo la equidistancia entre sus distintos niveles de potencia. En un caso ideal se espera que la potencia resultante de la suma de las potencias individuales de las señales S1 y S2 modifique lo suficiente los parámetros de potencia y estado de polarización de la señal CW, a través de la XGM y la XPolM, para inducir una rotación de 90 grados en su estado de polarización y obtener un arreglo entre el estado de polarización de la señal y el eje de transparencia del polarizador contrario al presente en la obtención del nivel N4; es decir, que para obtener el

nivel N1 el eje de transparencia del polarizador este orientado perpendicularmente al estado de polarización de la señal CW y bloquee su potencia.

III.2 Caracterización de la XGM.

A continuación se caracterizará el fenómeno de la XGM para el caso particular del AOS disponible para este proyecto con el esquema que se muestra en la Figura 23 (Léase el Apéndice B para cuestiones de alineación de este AOS en particular).

Para este procedimiento no se utilizaron tres fuentes láseres para generar a las señales S1, S2 y CW. De hecho, y por simplicidad, sólo emplearon dos haces, uno de los cuales fue fluctuado en potencia y sirvió para simular la potencia total resultante de la suma de las potencias individuales de las dos señales binarias S1 y S2. Lo anterior se debe a que tanto la XGM como la XPolM se pueden modelar en función de la potencia total que existe dentro del amplificador, lo indispensable es caracterizar la interacción que hay entre el haz CW y la suma de las potencias individuales S1 y S2 por medio de la XGM y la XPolM.

Por cuestiones prácticas, a un haz con longitud de onda λ_1 se le denominará haz de bomba y ésta emulará la suma de las potencias individuales de las dos señales binarias S1 y S2. Por otra parte, a un haz con longitud de onda λ_2 se le denominará haz CW (por sus siglas en inglés) o de amplitud constante como se puede apreciar en el esquema de la Figura 23.

Un amplificador de fibra contaminada con erbio (EDFA por sus siglas en inglés) fue incluido entre la haz de bomba y un controlador de polarización para dar a la señal la potencia necesaria para representar a la potencia total de las señales binarias y al mismo tiempo asegurar una XGM significativa.

Un controlador de polarización se ubicó entre la fuente del haz CW y el AOS para darle la capacidad elegir el estado de polarización que se requiriera a lo largo del experimento. Ambos haces fueron inyectados por espacio libre al AOS. El circulador se utilizó para asegurar el esquema de contra propagación de las señales como se mencionó anteriormente.

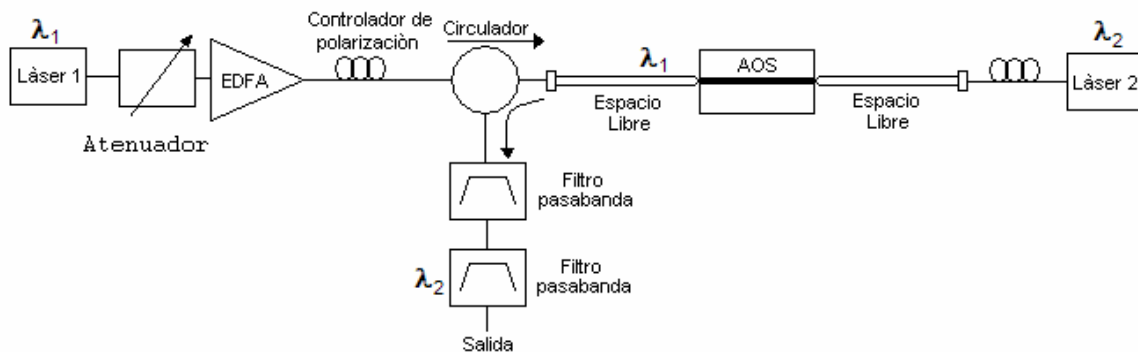


Figura 23. Esquema con el cual se caracterizó la XGM.

Inicialmente, no se controlaron los estados de polarización de las señales y se incluyó un atenuador variable entre el haz de bomba y el EDFA para poder cambiar con pasos controlados el nivel de potencia del haz de bomba. Así, la potencia de esta señal se fluctuó de -33dBm a 3dBm en pasos de 0.5dB a la entrada del AOS. Los niveles de potencia de los haces se midieron en los espacios libres justo a la entrada y a la salida de las lentes objetivos

Meles Griot F-L10B que inyectan la señal al amplificador, ya que para cuestiones de repetibilidad del experimento con éstos es suficiente. De cualquier manera, en caso de requerir los niveles de potencia de entrada y de salida en el amplificador, a continuación se presenta una tabla en la que se incluyen las pérdidas por captura relacionadas al AOS utilizado en este experimento.

Tabla I. Pérdidas por inserción y captura.

	Pérdidas por Inserción (dB)		Pérdidas por Captura (dB)
	Modo TE	Modo TM	
Faceta Izquierda	4.52	5.96	6.12
Faceta Derecha	4.98	6.34	6.51

A la salida del circulador, que a su vez se utilizó como salida del convertidor, se incluyeron dos filtros pasa-banda para eliminar la presencia de señales parásitas o emisión espontánea del AOS y del EDFA. Es importante mencionar que se utilizaron 2 filtros pasabanda en cascada, de ancho espectral de 1nm, para sintetizar uno de banda pasante de 0.5nm. A través de esta salida solamente se propagará el haz CW después de haber sufrido modificaciones en sus parámetros de potencia y estado de polarización por medio de la XGM y la XPolM y será el haz en el que se montarán los cuatro niveles.

Finalmente, la evolución en los niveles de potencia del haz CW fueron medidos con un analizador de espectro HP70951 conectado a la salida del segundo filtro. Los datos obtenidos se muestran en la Figura 24:

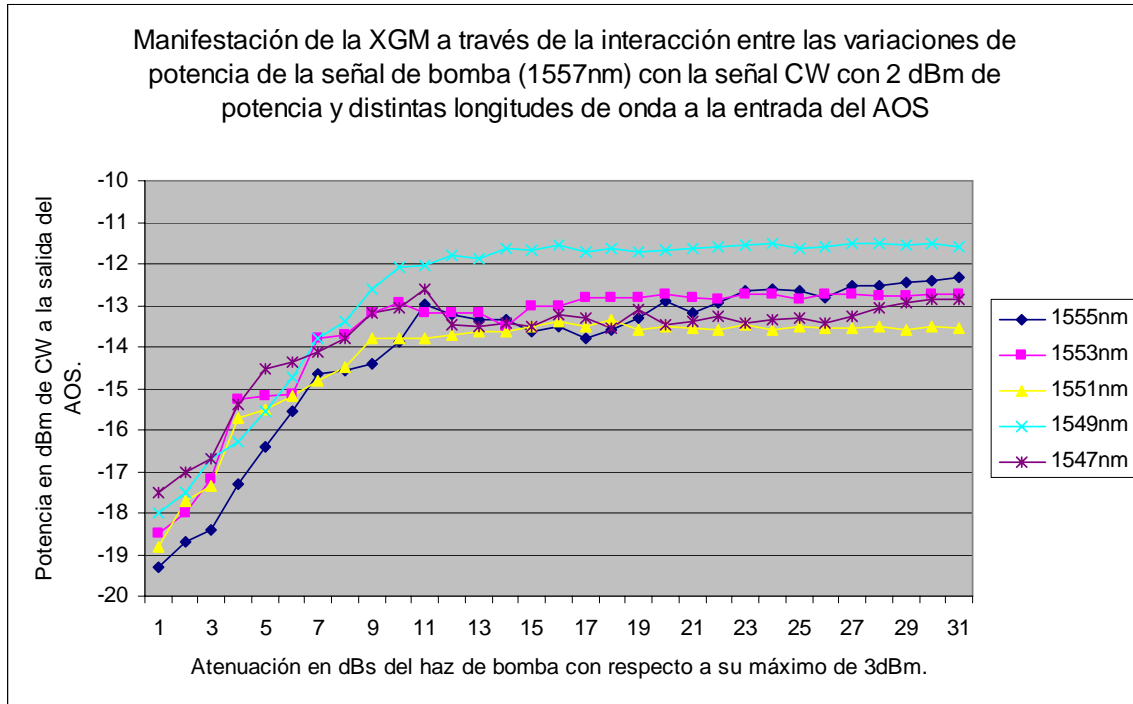


Figura 24. Relación entre la potencia de entrada de la haz de bomba con la potencia de salida de la señal de sonda.

Como se observa en la Figura 24, la manifestación más fuerte de la XGM, reflejada por el cambio más drástico en evolución de la potencia del haz de CW, se ve en los primeros 12dB de atenuación con respecto al máximo de potencia del haz de bomba.

Finalmente, sabiendo que la gama de potencias necesaria en el haz de bomba para inducir una XGM robusta va de -9dBm a 3dBm (12dB de atenuación mencionados anteriormente), ahora se buscarán los estados de polarización en el haz de bomba y CW que exacerben el fenómeno. En la Figura 25 se presentan los resultados obtenidos. En esta gráfica, a diferencia de la anterior, el eje horizontal contiene la potencia neta del haz de

bomba y no la atenuación con respecto a su máximo, por lo que muestra un patrón de evolución descendiente en lugar de ascendiente.

Es importante mencionar que controlando los estados de polarización de las señales se llegó a una supresión máxima de potencia en el haz CW de hasta 14.9dB cuando el haz de bomba tenía un estado de polarización lineal TM y el haz CW uno de 300 grados a sus respectivas entradas al AOS.

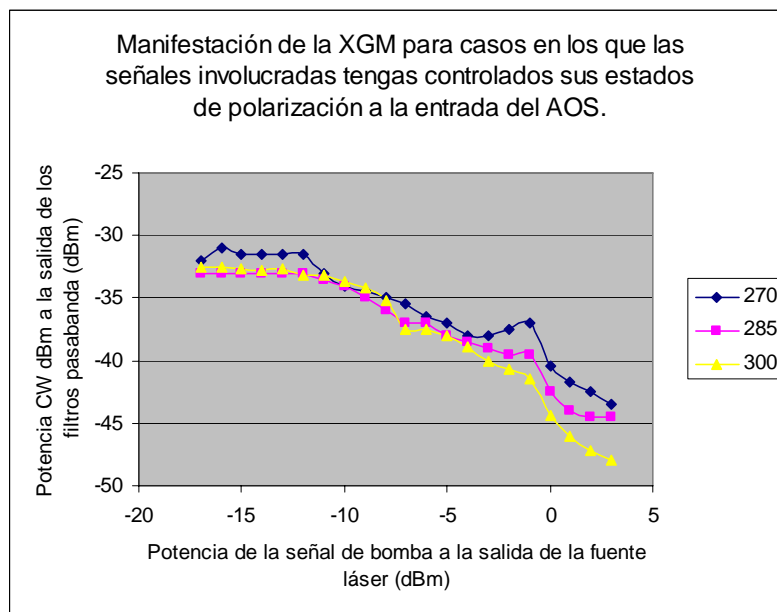


Figura 25. Relación entre la potencia de entrada de la haz de bomba con la potencia de salida de la señal de sonda.

III.3 Caracterización de la XPolM.

El esquema de medición para este fenómeno es prácticamente el mismo que se utilizó para la caracterización de la XGM, solamente se añadió un polarizador en espacio libre entre el controlador de polarización colocado en seguida de la fuente láser 2 y la entrada al AOS, tal como lo muestra la Figura 26.

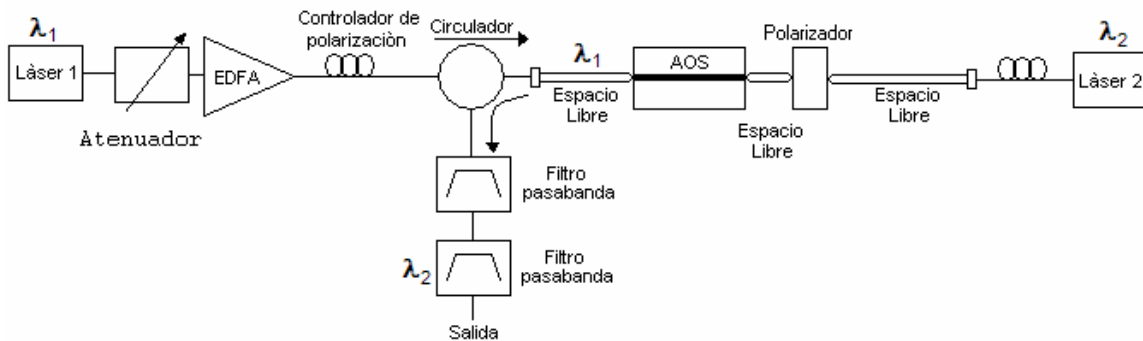


Figura 26. Esquema de medición utilizado para caracterizar el efecto de la XPolM.

En este caso, en vez de usar el analizador de espectro empleado en la caracterización de la XGM, se utilizó un analizador de polarización HP 8509B a la salida del arreglo de dispositivos que conforman el convertidor.

En particular, para determinar los parámetros de estado de polarización, potencia y longitud de onda requeridos para que los haces involucrados suscitara el efecto más intenso del fenómeno de la XPolM, se tomaron cuatro grupos de mediciones en los que se fijó el estado de polarización lineal del haz de bomba a 0, 45, 60 y 90 para cada uno de ellos.

Para cada uno de los cuatro casos, se repitió todo el procedimiento para distintas longitudes de onda en el haz CW (1554nm, 1556nm, 1558nm, y 1562nm) para establecer con cuál se obtiene la mayor translación de su estado de polarización a través de la XPolM. Por último, para cada longitud de onda, se fue variando el estado de polarización de la señal CW en pasos de 15 grados hasta lograr una rotación de 360 grados con el fin de encontrar el estado de polarización incidente con el cual el efecto de la XPolM afectaba con más fuerza al haz CW.

En el primer caso, se fijó el estado de polarización del haz de bomba a un estado lineal incidente a 0 grados (TE) a la entrada del AOS. En el caso del haz CW, se fijó un estado de polarización circular a la entrada del polarizador, el cual se escogió así para tener la posibilidad de generar cualquier estado de polarización lineal con el mismo nivel de potencia incidente a su entrada al AOS. Una vez establecida la condición anterior, se ajustó el eje de transparencia del polarizador horizontalmente y se atenuó la potencia del haz de bomba 12dB con respecto a su máximo. Este nivel de potencia se tomó a partir de los resultados obtenidos previamente en la caracterización de la XGM, en el cual se vio que sólo en los primeros 12dB de atenuación con respecto al máximo del haz de bomba se provocó un cambio drástico en la evolución de la potencia del haz de sonda CW. Esta atenuación se fue disminuyendo en pasos de 0.2dB hasta llegar a la máxima potencia del haz de bomba. En el analizador de polarización se fue registrando la translación del estado de polarización del haz CW a la salida del segundo filtro provocado por cada variación en la potencia del haz de bomba a través de la XPolM.

Al final de la corrida de datos se registró el cambio total en grados partiendo del estado de polarización inicial del haz CW hasta su estado final después de haber sido afectado por la potencia de la haz de bomba por medio de la XPolM. Los datos obtenidos en el analizador de polarización se procesaron para poder expresar la translación total en el estado de polarización del haz CW en grados. Estos datos fueron tabulados y graficados utilizando el programa Excel.

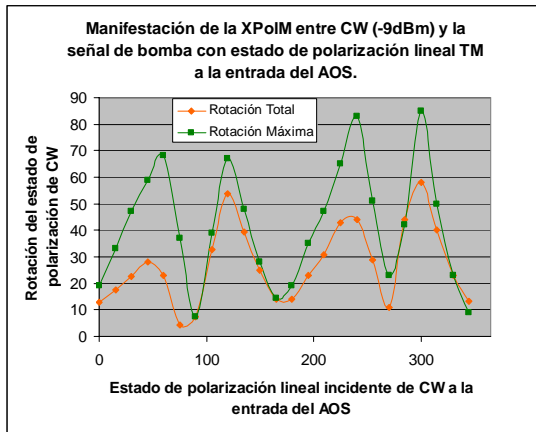
El haz de bomba siempre se mantuvo a 1560nm de longitud de onda para que concordara con el máximo de la curva de ganancia del AOS utilizado. Con ello se asegura que la señal se propague y amplifique mejor, y por lo tanto, provoque una XPolM óptima. Tanto la fuente láser del haz de bomba como en el EDFA se mantuvieron al máximo de su potencia. El mismo atenuador variable utilizado en la corrida de datos de la XGM, fue utilizado para variar la potencia del haz de bomba. La potencia de la señal de sonda fue la máxima proporcionable por la fuente AQ4320D (-9dBm en la faceta de entrada del AOS).

Después de correr las mediciones mencionadas anteriormente, se encontró que el máximo desplazamiento en la esfera de Poincaré del estado de polarización del haz CW se obtuvo cuando el haz de bomba tuvo un estado de polarización lineal vertical y el haz CW tuvo una longitud de onda de 1554nm y un estado de polarización lineal inclinado a 300° (Véase la figura 27 A). El mismo procedimiento se siguió para los tres casos restantes en los que el haz de bomba contó con un estado de polarización lineal a 45, 60 y 90 grados. En todos los casos, las longitudes de onda para el haz de bomba y sonda que provocaron una XPolM más robusta fueron: 1560nm y 1554nm, respectivamente.

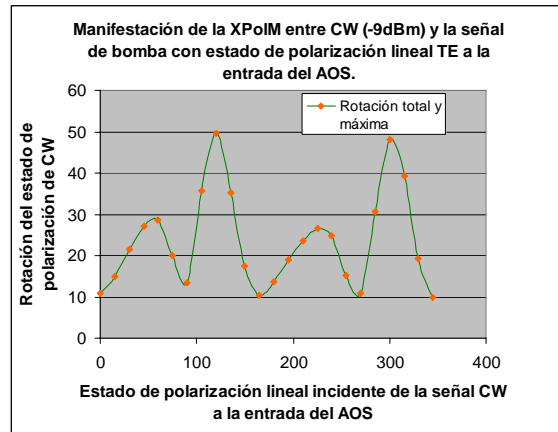
En las Figura 27 A, B, C y D se trazó la máxima translación en grados del estado de polarización de la señal CW en función del estado de polarización de entrada de la misma al AOS. Cada una de las figuras (A, B, C y D) representa un estado de polarización de entrada distinto para el haz de bomba.

En la Figura 27A y en la Figura 27D se pueden ver dos curvas en cada una. Esto se debió a que después de analizar los resultados obtenidos del analizador de polarización, se detectó que antes de que la potencia del haz de bomba llegara a su nivel máximo, ésta había producido un desplazamiento máximo en el estado de polarización del haz CW a través de la XPolM (curva en color verde).

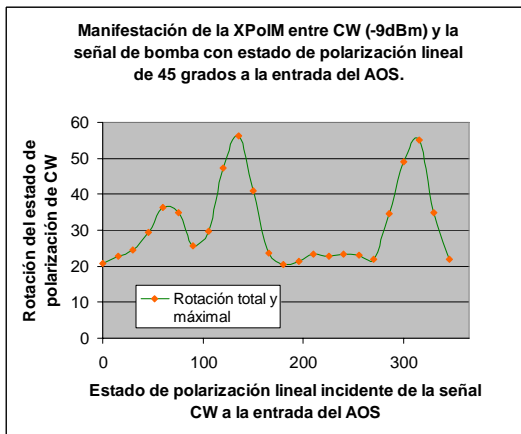
En las Figura 27B y 27C la translación total del estado de polarización de la señal CW coincidió con la translación máxima provocada por el aumento gradual en la potencia del haz de bomba. Cabe mencionar que conforme el estado de polarización del haz de bomba se fue aproximando hacia una orientación vertical (TM) se fue suscitando una translación máxima en el estado polarización del haz CW antes de que la potencia del haz de bomba llegara a su máximo.



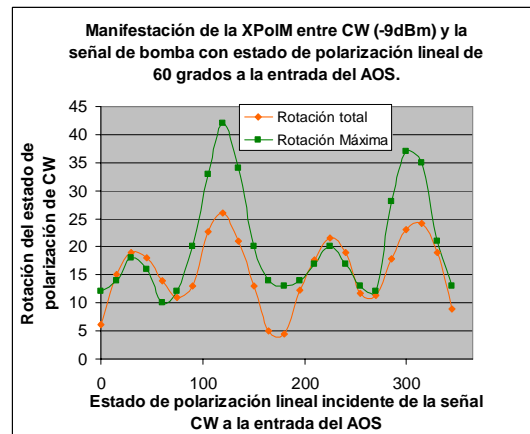
A



B



C



D

Figura 27. Representación de la translación del estado de polarización de la señal CW a la salida del AOS a través de la XPolM.

Para el caso particular detectado en la Figura 27A, en dónde se encontró la máxima translación cuando a la entrada del AOS el haz de bomba tenía un estado de polarización TM y el haz CW un estado de polarización lineal a 300 grados, se generó una curva para describir paso a paso la evolución de la translación del estado de polarización en CW conforme el haz de bomba se fue incrementando en pasos de 0.2dB como se puede ver en la Figura 28. En

ella se puede ver claramente que el máximo grado de translación de 84 grados en el haz CW se alcanzó cuando el haz de bomba llegó a una potencia de 1.4dBm, y que si se toma en cuenta la translación total generada por la potencia máxima de 3dBm en el haz de bomba sobre el estado de polarización del haz CW con respecto a su estado inicial y su estado final no llega a los 60 grados. El comportamiento peculiar de esta corrida de datos, en particular la discontinuidad presente justo después de alcanzar el máximo de translación en el estado de polarización del haz CW, como se puede ver en la Figura 28, así como el hecho de que el estado de polarización del haz de bomba que suscitó el efecto más pronunciado de la XPolM, haya sido lineal vertical (TM) generó muchas preguntas y suspicacias sobre la elaboración correcta del experimento.

En teoría se esperaba que cuando el haz de bomba presentará un estado de polarización lineal horizontal (TE) sería cuando se manifestaran con más fuerza la XGM y la XPolM debido a que la estructura física de los AOS favorece el guiado y amplificado de este estado de polarización.

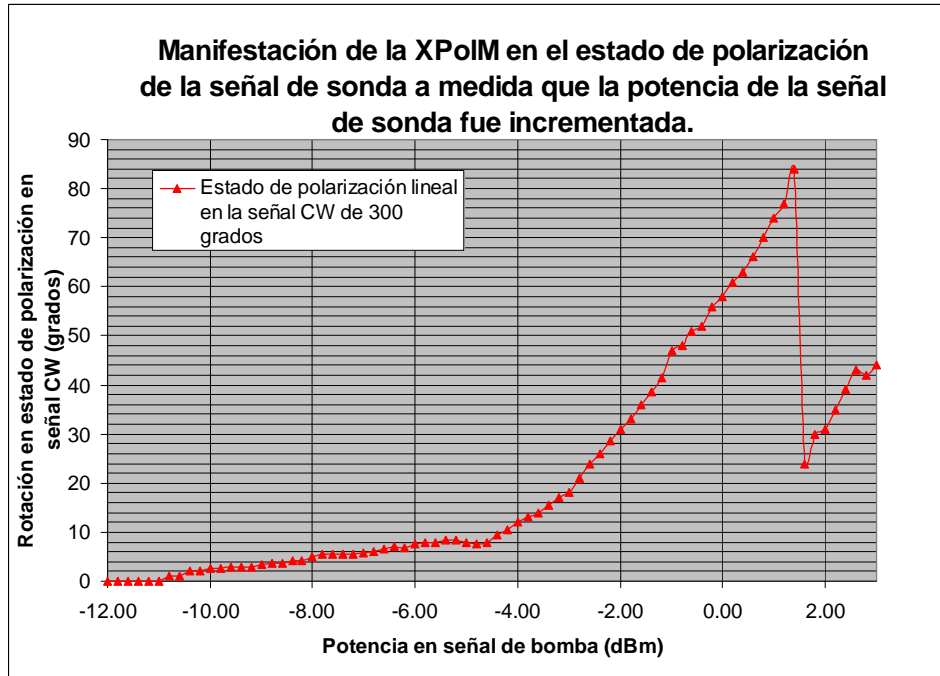


Figura 28. Representación de la evolución de la translación del estado de polarización de la señal CW provocado por la XPolM.

Por esta razón se realizó una serie de experimentos para analizar los resultados (véase el Apéndice D), en los cuales se llegó a la conclusión de que los resultados anómalos se debieron a un mayor desgaste en el eje TM en las capas anti-reflejantes de las facetas de entrada y salida del AOS. Sin embargo, esta particularidad del AOS utilizado no representaba ningún obstáculo para el desarrollo del convertidor, por lo que una vez atendido el problema se prosiguió con el desarrollo del convertidor.

Finalmente, se usaron los datos de la Figura 28 tomando 1.4dBm como potencia máxima de la haz de bomba y se generó la curva final que representa la máxima evolución del estado de polarización en el haz CW a través del fenómeno de la XPolM en la Figura 29.

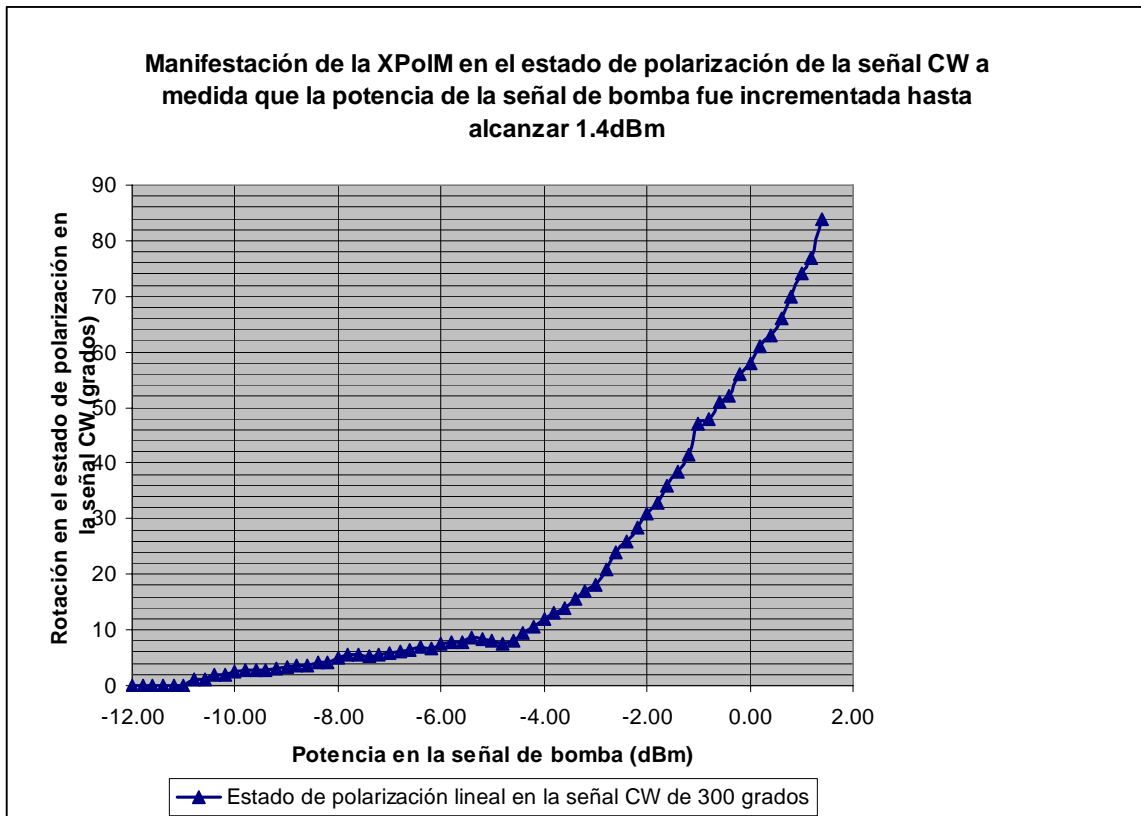


Figura 29. Representación de la evolución de la translación del estado de polarización de la señal CW provocado por la XPolM.

III.4 Generación de la función de transferencia para el haz CW en estado estático.

Teniendo las gráficas de la translación del estado de polarización del haz CW provocada por el fenómeno de la XPolM y la evolución de la potencia de este haz generada por la XGM, ahora se necesita incorporar la acción de un polarizador a la salida del AOS y para encontrar la función de transferencia de amplitud para el haz CW.

Es importante señalar que hay dos opciones para realizar la función de transferencia. La primera es utilizando un polarizador con eje de transparencia alineado paralela o perpendicularmente al estado de polarización lineal inicial escogido para el haz CW después de haber pasado por el AOS. Arbitrariamente se escogió el estado de polarización lineal inicial con orientación horizontal para el haz CW. Para el caso en el que el eje de transparencia del polarizador concordara con el estado de polarización del haz CW, como se mencionó en capítulos anteriores, se utiliza la función de coseno cuadrado del desplazamiento angular que sufre el estado de polarización del haz CW (ver Figura 29). Como se puede constatar en la Figura 30, conforme la haz de bomba fue aumentando su nivel de potencia, el fenómeno de la XPolM provocó que el estado de polarización del haz CW a la salida del AOS, el cual en un principio coincidió con el eje de transparencia TE del polarizador, fuera rotando en dirección perpendicular hasta provocar un bloqueo del 40% de la potencia de la señal CW.

En el segundo caso utilizado para generar la función de transferencia estática tiene un proceso idéntico, simplemente se cambia la orientación del polarizador colocando su eje de transparencia en posición vertical (TM).

Una vez que se han tomado en cuenta en conjunto los efectos de la XPolM y el polarizador sobre la amplitud del haz CW, sólo falta añadir el efecto producido por la XGM sobre este parámetro para obtener la función de transferencia en estado estático del convertidor con respecto al haz CW.

Cómo se señaló anteriormente, el último paso involucra la multiplicación punto por punto del eje vertical de la gráfica obtenida en la caracterización del efecto de la XGM y aquel obtenido como resultado de la combinación de la XPolM y el polarizador.

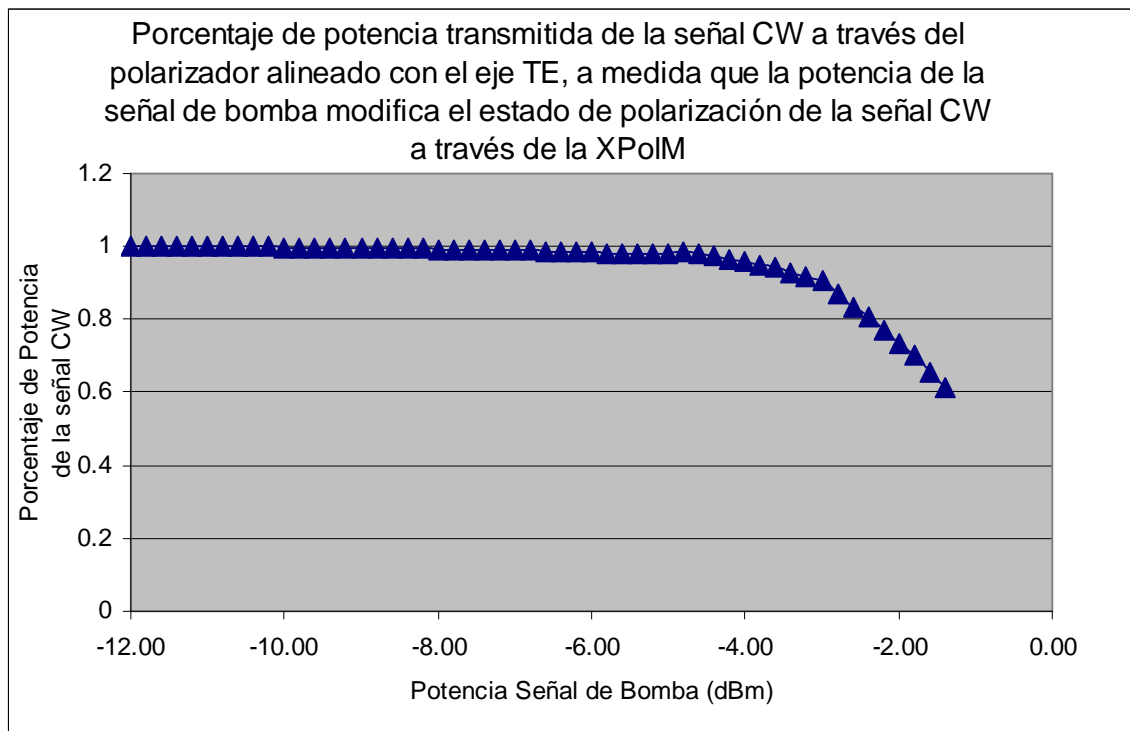


Figura 30. Efecto de un polarizador con eje de transparencia TE a la salida del AOS sobre la señal CW.

En la siguiente Figura 31 se muestra el resultado de esta multiplicación, la cual produce la función de transferencia en estado estático correspondiente a este primer caso dónde el eje de transparencia del polarizador coincide con una alineación lineal horizontal.

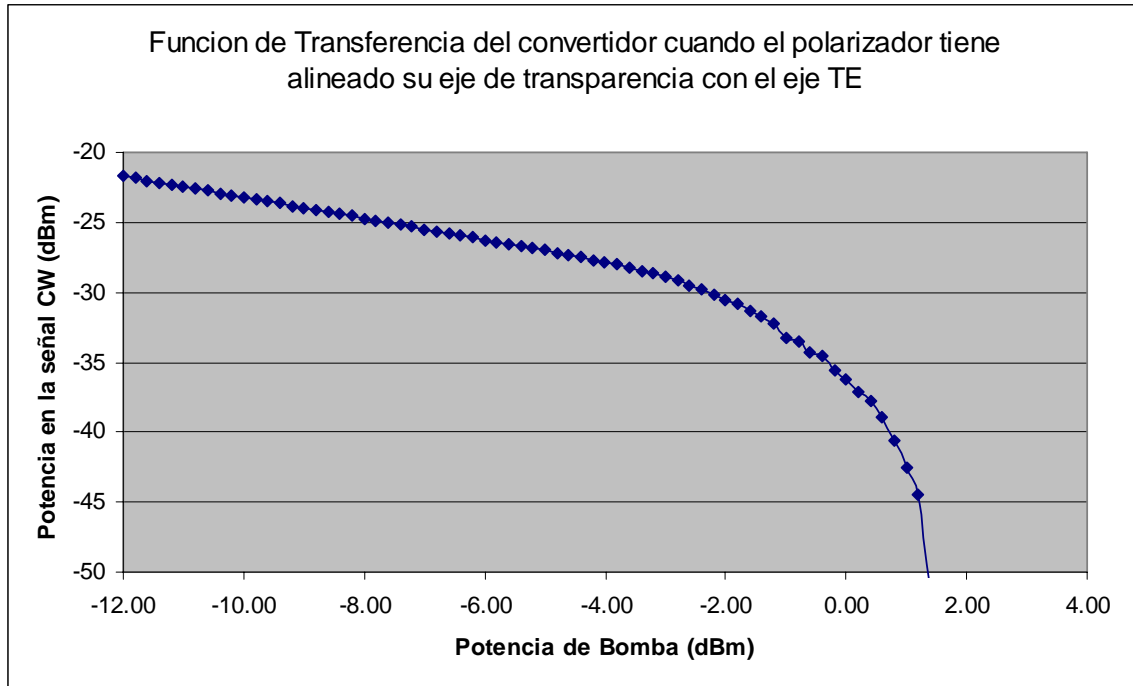


Figura 31. Relación entre la de potencia de salida del haz CW y la potencia de la bomba.

Con esta función de transferencia en estado estático se encontró un conjunto de potencias para la haz de bomba que permiten generar los 4 niveles de potencia de salida en el haz CW como se puede ver en la Figura 32.

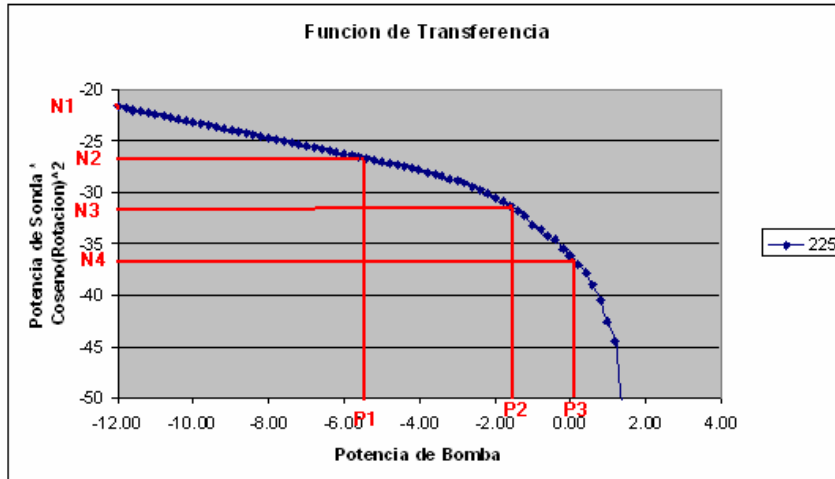


Figura 32. Relación entre los 4 niveles de potencia de salida del haz CW y los diferentes valores de potencia total que pueden producir las señales binarias de entrada.

La gráfica es una curva con una pendiente suave y se tienen los cuatro niveles de potencia equidistantes en la amplitud del haz CW a la salida del AOS y aunque éstos concuerdan con los valores de las potencias individuales y en conjunto de lo que serían las señales binarias de entrada que los provocaron, éste caso no es el óptimo, dado que el valor de cero o primer nivel en la señal de 4 niveles o CW, estaría cerca de los -37dBm, resultando en una tasa de extinción muy pobre (15dB).

El segundo caso utilizado para generar la función de transferencia estática, como se mencionó anteriormente, tiene un proceso idéntico, simplemente se cambia la orientación del polarizador colocando su eje de transparencia en posición vertical(TM). Como se puede constatar en la Figura 33, conforme la potencia de la haz de bomba aumenta, el fenómeno de la XPoIM provoca que el estado de polarización del haz CW (el cual en un principio era

lineal y perpendicular al eje de transparencia del polarizador) se translada hasta pasar de un bloqueo total a una transmisión completa.

Desde este momento se pudo predecir que este caso sería mucho más conveniente que el anterior, ya que en el primero solamente se logró un bloqueo máximo del 60% de la potencia del haz CW cuando en este caso se tiene un 0% lo cual asegura una mejor tasa de extinción para la señal de salida de 4 niveles.

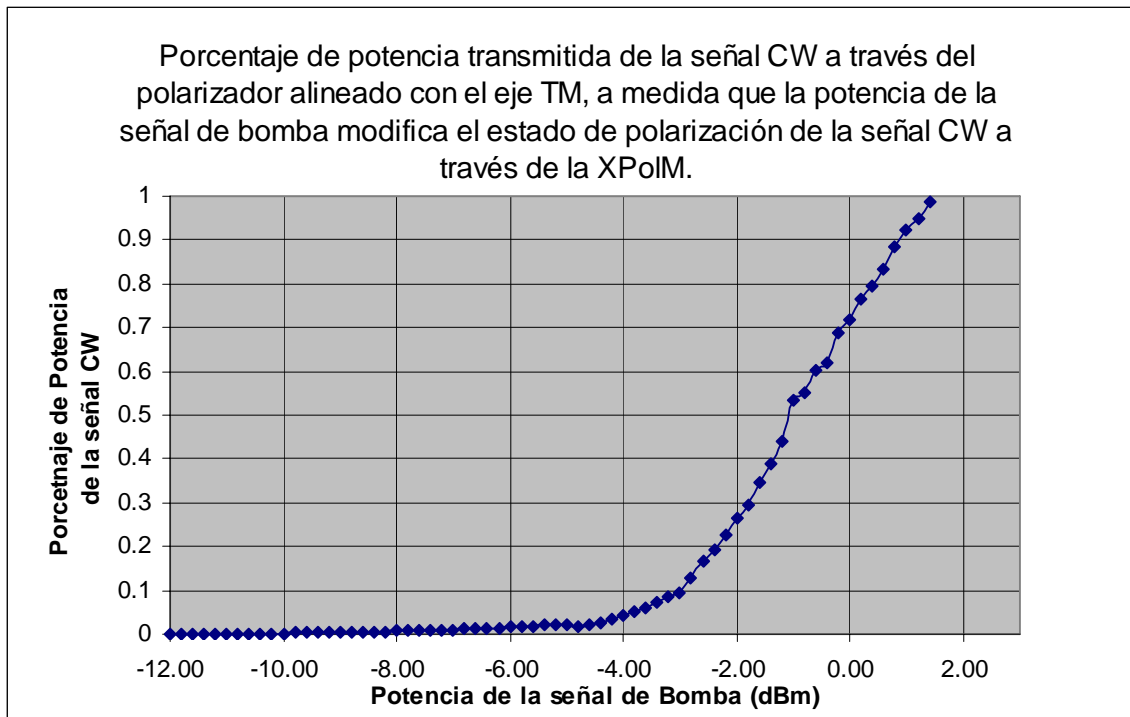


Figura 33. Efecto de un polarizador con eje de transparencia TM a la salida del AOS sobre la señal CW.

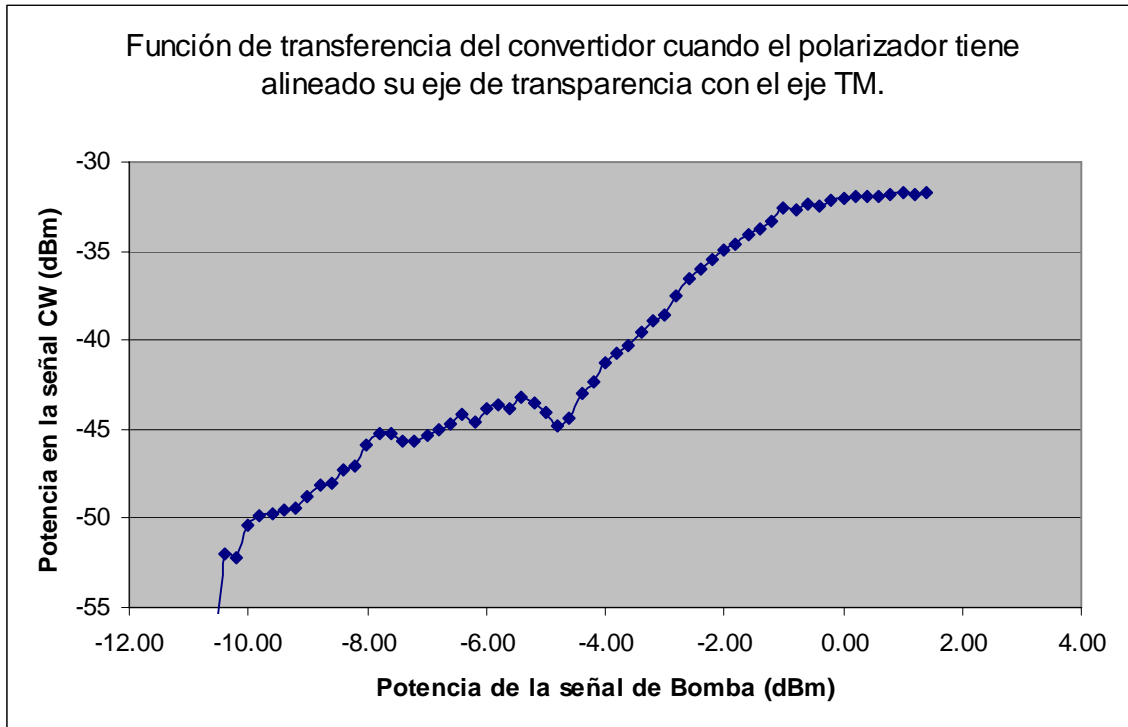


Figura 34. Relación entre la potencia del haz CW y la potencia de la haz de bomba.

En la Figura 35 se ilustran los cuatro niveles de potencia del haz CW que pueden ser generados a partir de los diferentes valores de potencia individual y total que pueden producir las señales binarias de entrada.

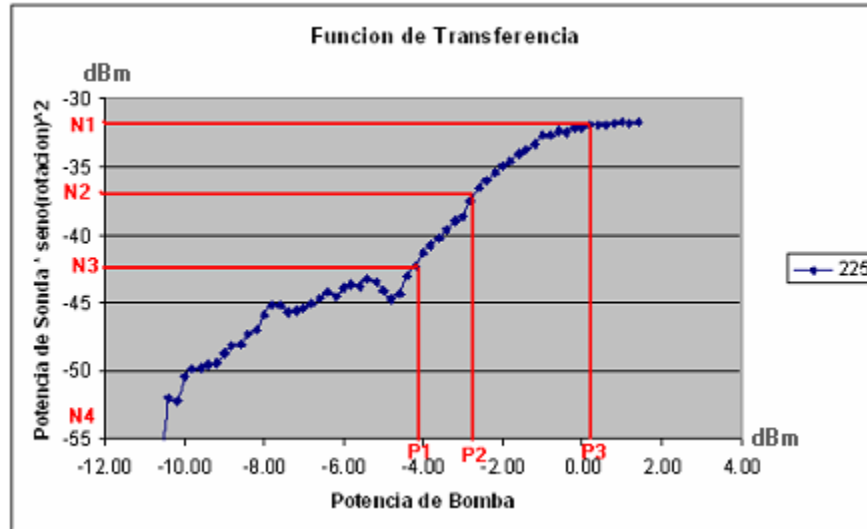


Figura 35. Relación entre los 4 niveles de potencia de salida del haz CW y los diferentes valores de potencia total que pueden producir las señales binarias de entrada.

En este caso, no sólo se cumple con la restricción de tener los cuatro niveles discretos de potencia equidistantes entre sí. También, la suma de las potencias individuales de las señales binarias de entrada para los cuatro casos posibles son las que facilitan la obtención de los 4 niveles. Con este esquema se ve una gran mejora en la tasa de extinción (53dB), ya que la potencia del primer nivel discreto para la señal de salida es del orden de -85dBm de potencia.

Para resumir los datos encontrados en el segundo caso, de la función de transferencia en estado estático para el haz CW se resumen en la Tabla II los parámetros que deben tener las señales ópticas a la entrada del AOS:

Tabla II. Parámetros resultantes de la función de transferencia en estado estático para el segundo caso analizado.

Señal	Señal binaria 1	Señal binaria 2	Señal CW
Potencia a la entrada del AOS.	-2.4dBm	-4.1 dBm	-9dBm
Estado de Polarización a la entrada del AOS.	TM	TM	300 grados
Longitud de Onda	1560nm	1560 nm	1554nm
Número de niveles de amplitud después del convertidor	No importa	No importa	4

IV Capítulo IV.

IV.1 Demostración de la conversión de 2 señales binarias a una señal de 4 niveles por medio de la XPolM en un amplificador óptico de semiconductor.

En esta última etapa de este trabajo de tesis se presenta el esquema final con el cuál se demostró el funcionamiento del convertidor. El trabajo experimental se enfocó particularmente en lograr que el convertidor funcionara a tasas de datos compatibles con los sistemas SDH-SONET llegando hasta una velocidad de 2.5Gbps.

El esquema experimental final se muestra en la Figura 36 El AOS utilizado es un dispositivo con una ganancia pico centrada en 1557.3nm y un ancho de banda de 22.6nm estimado a 3dB del mismo. El mismo es alimentado con una corriente de 498.8mA y estabilizado a una temperatura de 25 grados. El haz CW fue generado por un láser DFB cuya corriente de alimentación y temperatura de operación fueron de 81.2mA a 20 grados centígrados, lo cual generó una señal centrada en los 1552.4nm. Para las señales de datos, es decir para las dos señales binarias de entrada, se utilizaron fuentes láseres sintonizables Lightwave AQ4320 y fueron sintonizadas a 1560 y 1563nm. Los moduladores ópticos fueron marca Covega modelo 10mach.

El EDFA que se encuentra entre el polarizador en espacio libre y los filtros pasa-banda a la salida del convertidor fue necesario para darle a la señal de cuatro niveles la suficiente potencia para que el foto-detector que alimenta al osciloscopio no tuviera problemas en detectarla.

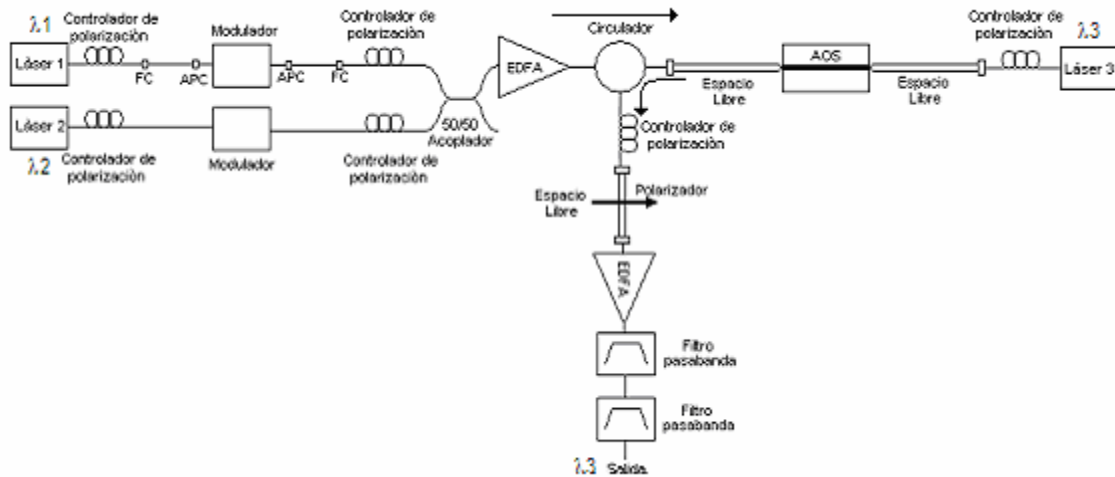


Figura 36. Esquema final del convertidor.

Los controladores de polarización colocados entre las fuentes láseres y los moduladores de amplitud se incluyeron porque estos últimos son sensibles al estado de polarización de las señales.

Las tasas de bits a la que se realizó la conversión son aquellas compatibles con los protocolos SDH/SONET: 622Mbps, 933.12Mbps, 1244.16Mbps, 1866.24Mbps, y 2488.32Mbps.

Los estados de polarización y los niveles de potencia de las señales fueron establecidos siguiendo los parámetros que se mostraron en la Tabla II. Sin embargo, se tuvieron que ajustar ya que la señal obtenida a la salida del arreglo de dispositivos que forman el convertidor no contaba con los 4 niveles, ni mucho menos, con las restricciones que éstos requieren. Sobre la marcha del experimento se procedió a afinar estos parámetros,

principalmente los estados de polarización de las señales 1 y 2, hasta que se logró generar la señal coincidente con las restricciones y características necesarias.

IV.2 Resultados experimentales.

En la Figura 37 se muestra la conversión exitosa de dos señales binarias (roja y azul) en una de cuatro niveles discretos de potencia (verde) a una tasa de datos de 622Mbps.

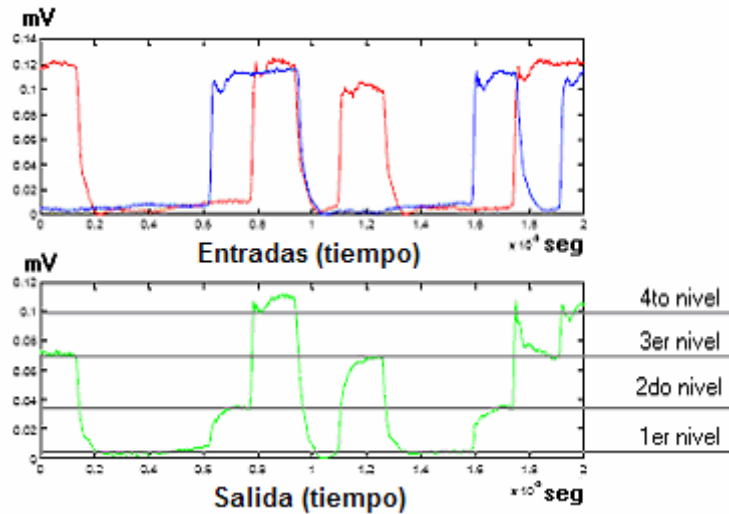


Figura 37. En la gráfica se muestra la conversión de dos señales binarias a una de cuatro niveles discretos.

Se puede constatar que la información de las dos señales binarias ha sido incluida satisfactoriamente en la señal de cuatro niveles. En efecto, cada una de las cuatro combinaciones lógicas posibles de las dos señales binarias de datos corresponde a un sólo nivel discreto en la señal de cuatro niveles. Es importante notar que la señal de cuatro niveles resultante cumple con los requisitos necesarios que se habían estipulado anteriormente. Tiene cuatro niveles de amplitudes distinguibles, equidistantes y cada uno corresponde a una combinación lógica de los valores posibles de los bits de las dos señales de datos. Asimismo, la tasa de extinción que se obtuvo en esta conversión tuvo un valor satisfactorio de 19dB.

En la Figura 38 se muestra otro ejemplo de la conversión de dos señales binarias niveles a una de cuatro discretos a la misma tasa de datos. En la figura superior se optó por mostrar únicamente la señal convertida o de cuatro niveles por cuestiones de claridad y para demostrar la equidistancia entre cada uno de los niveles de la señal. El eje horizontal de la gráfica representa el tiempo con cada división equivalente a 2ns y el eje vertical representa la amplitud de la señal en milivoltios con cada división equivalente a 50mV . Las líneas horizontales de color verde se utilizaron para demostrar los cuatro niveles de la señal convertida. En la gráfica inferior se incluyeron las tres señales presentes en este experimento: las dos señales binarias (azul), y la señal convertida o de cuatro niveles equidistantes (rojo). El eje horizontal de esta figura tiene las mismas características que aquel de la figura superior, mientras que el eje vertical representa también la amplitud de las señales pero en este caso cada división equivale a 100mV . Las líneas verticales de color amarillo se utilizaron para demostrar los diferentes estados lógicos de las tres señales. En la pequeña tabla que se encuentra por debajo de la figura inferior, se plasmaron los estados lógicos de las tres señales correspondientes entre cada línea amarilla vertical. Con ello se pudo verificar que para cada combinación de estados lógicos de las señales binarias existe un sólo un estado lógico en la señal convertida o de cuatro niveles.

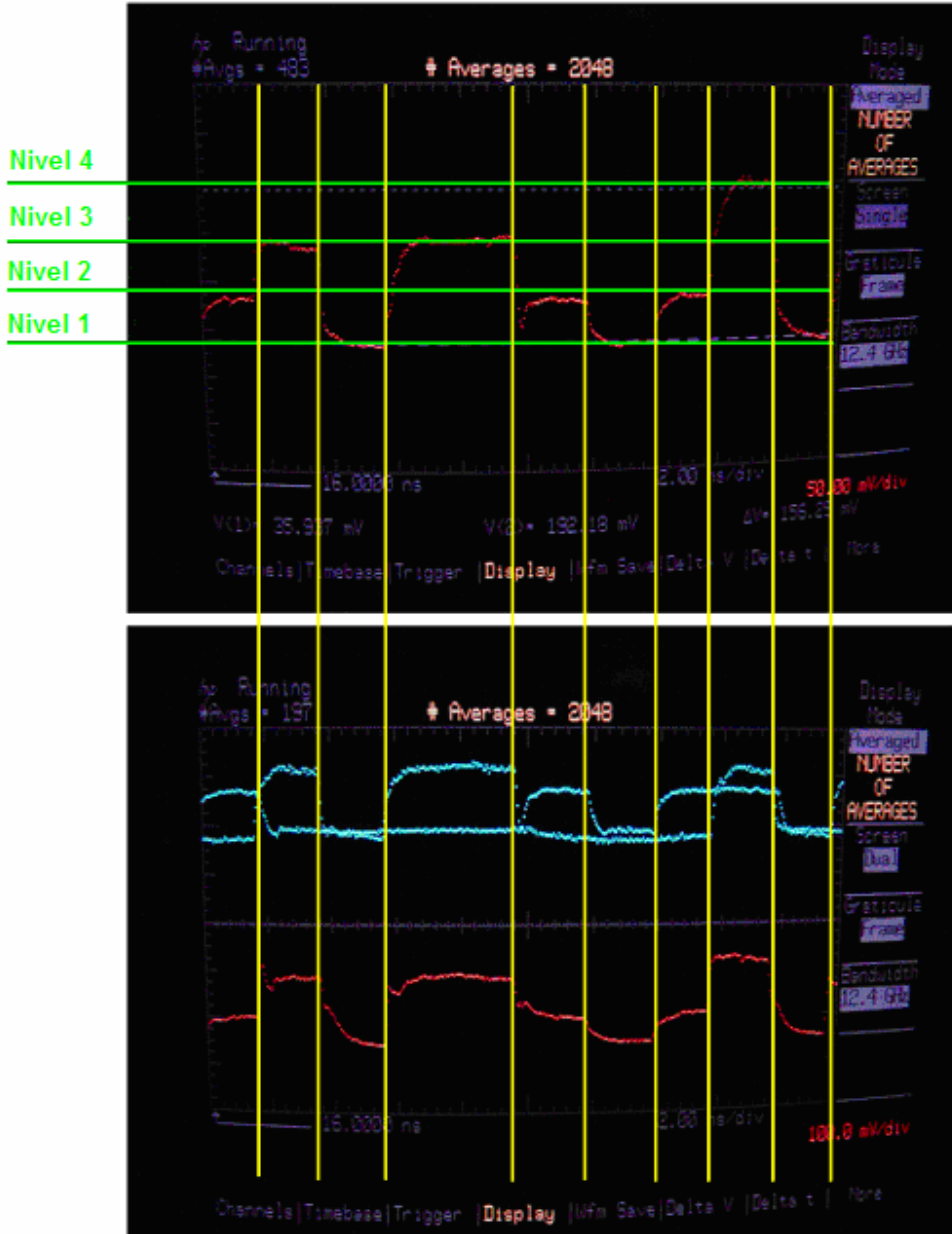


Tabla de valores lógicos

S1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0
S2	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0
S3	1	2	0	2	2	1	0	1	3	0

Figura 38. Conjunto de gráficas que ilustran los estados lógicos de la señal convertida de cuatro niveles y los respectivos estados lógicos de las señales binarias. Las líneas amarillas verticales marcan la transición entre valores lógicos.

Por otra parte, en la Figura 39 se muestra el diagrama de ojo obtenido para este mismo experimento.

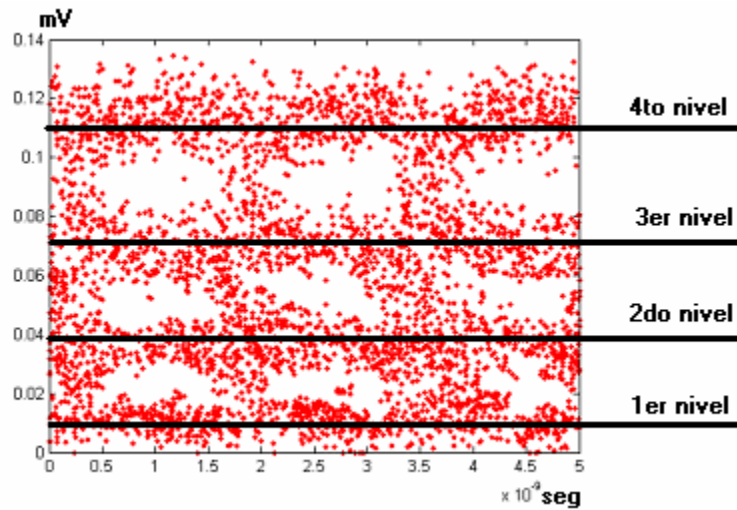


Figura 39. Diagrama de ojo de la señal de cuatro niveles discretos.

Cabe mencionar que la falta de nitidez en los 4 niveles del diagrama de ojo es debido a la inestabilidad de las fuentes láseres que se utilizaron y a la imposibilidad de poder capturar la imagen con un barrido que promediara los valores obtenidos en el osciloscopio como se hizo en los casos anteriores en los que se promediaba 2048 veces la señal para obtener una gráfica nítida y bien definida., sin embargo, en la figura se pueden distinguir claramente los cuatro niveles discretos de la señal. La falta de equidistancia mostrada en esta figura es exacerbada por la misma razón, ya que la inestabilidad en las fuentes láseres se acentúa aún más cuando éstas son amplificadas, sobre todo en los niveles de potencia más altos una pequeña diferencia en potencia, al amplificarse ésta se incrementa y en este caso se están utilizando dos etapas de amplificación por medio de EDFAs.

De la misma manera se logró la conversión a una tasa de datos de 2.5Gbps (véase la siguiente Figura 40).

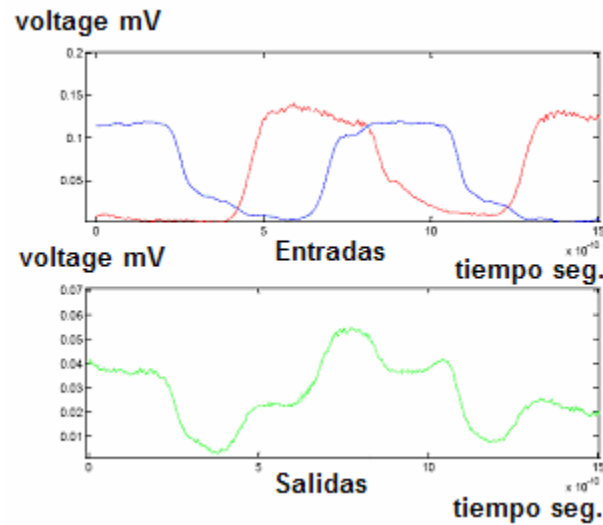


Figura 40. Conversión experimental de dos señales binarias a una de cuatro a una velocidad de 2.5Gbps.

Cabe mencionar que gracias a un pequeño desfaseamiento en el flanco de subida y bajada en las señales binarias, se pudo verificar que el convertidor puede funcionar a tasas de datos mayores. Como se puede ver en la parte superior de la Figura 40, los flancos de subida y de bajada de las señales binarias jamás empalman y suceden más o menos en medio camino de los instantes en los que puede cambiar el valor lógico de la otra señal. En la parte superior izquierda de la Figura 41, las dos líneas verdes verticales muestran un periodo de tiempo de $2.32 \cdot 10^{-10}$ s equivalente a una tasa de 4.5Gbps y las dos líneas rojas verticales muestran un periodo de $1.68 \cdot 10^{-10}$ s equivalente a una tasa de datos de 6Gbps. En la parte inferior derecha de la Figura 41 se ilustra con la ayuda de cuatro líneas horizontales, como la señal cuenta con cuatro niveles de amplitud bien distinguibles y cada uno corresponde a una única

combinación de valores lógicos en las señales binarias. El único parámetro que se deterioró notablemente al aumentar la tasa de datos a 2.5Gbps, fue la tasa de extinción, la cual se redujo a 12.5dB.

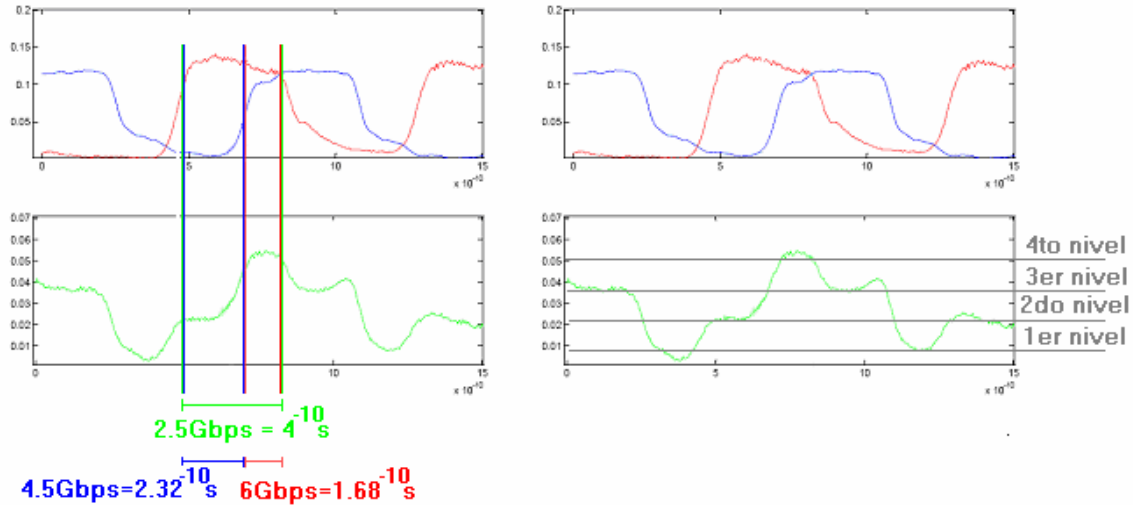


Figura 41. Conversión experimental de dos señales binarias a una de cuatro a una velocidad de 2.5Gbps.

La siguiente Tabla III muestra las tasas de extinción resultantes para cada tasa de datos en la que se logró una conversión exitosa. Como se puede observar en la tabla, a medida que la tasa de datos se fue incrementando, la tasa de extinción de la señal de salida de cuatro niveles discretos se fue deteriorando, lo cual indica que el fenómeno de la XPoIM pierde fuerza.

Tabla III. Tasas de datos y de extinción resultantes.

Tasa de datos de las señales binarias	Tasa de Extinción de la señal de 4 niveles discretos(dB)
622Mbps	19
933.12Mbps	18
1244.16Mbps	18
1866.24Mbps	16
2488.32Mbps	12.5

Después de haber logrado la conversión satisfactoria de las dos señales binarias a una de cuatro niveles discretos para distintas tasas de datos, se registraron los parámetros iniciales de las señales de datos y del haz CW en términos de su potencia, estado de orientación en el estado de polarización y se tabularon en la Tabla IV.

Tabla IV. En esta tabla se muestran los parámetros de potencia y del estado de polarización de las señales a la entrada del AOS.

Tasa de bits (Mbps)	Potencia Señal 1 (dBm)	Potencia Señal 2 (dBm)	Potencia CW (dBm)	Orientación en el estado de polarización (Señal 1) (grados con respecto al eje horizontal)	Orientación en el estado de polarización (Señal 2) (grados con respecto al eje horizontal)	Orientación en el estado de polarización (Señal CW) (grados con respecto al eje horizontal)
622	6	8	-8	12	15	87
1866.24	5	6	-8	160	170	81
2488.32	1	-1	-8	159	163	102

Como se puede apreciar en la tabla, y tomando en cuenta que las pérdidas por inserción en el eje TM son cerca de dos dB mayor a aquellas del eje TE, los estados de polarización de las señales binarias (S1 y S2) son prácticamente horizontales. Con respecto al estado de polarización de la señal CW, se tiene que tomar en cuenta una vez más las pérdidas por inserción de los ejes TM y TE, donde (TM>TE), para concluir que el estado de polarización de la señal CW a la entrada del amplificador se aproxima al estado óptimo teórico de 45 grados.

V Conclusiones.

Tomando en cuenta la situación actual de las telecomunicaciones, así como de sus necesidades, se logró visualizar la problemática actual que ellas enfrentan. Partiendo de ese punto, se planteó como objetivo de la tesis desarrollar un dispositivo que pueda ayudar en la tarea de optimización del ancho de banda en redes ópticas, lo cual es uno de los problemas más importantes en cualquier sistema de comunicaciones. El dispositivo propuesto fue un convertidor de dos señales binarias a una sola señal de cuatro niveles discretos de potencia basado principalmente en los fenómenos de la XPolM y de la XGM dentro de un AOS. En base a la metodología de investigación seguida en la realización del dispositivo se puede concluir lo siguiente:

- Basándose en los dispositivos ópticos disponibles en el laboratorio y los fenómenos no lineales propios de los AOS, se analizaron los principios de operación del convertidor, los cuales permitieron proponer un esquema de operación con el cual se lograría la conversión de dos señales binarias a una sola señal de cuatro niveles basada principalmente en el fenómeno de la XPolM en AOS.
- Se caracterizaron exhaustivamente los fenómenos no lineales de la XPolM y XGM para el AOS utilizado en este trabajo. Para ello se utilizaron dos señales ópticas en contra-propagación para evitar reflexiones indeseadas. A una se le denominó haz de bomba y al otro haz CW. Se modificaron tanto los estados de polarización, como las potencias de estas dos señales para caracterizar los dos fenómenos no lineales antes mencionados. Con los datos

generados se encontró una función de transferencia en estado estático del convertidor para el haz CW, misma que permitió plantear el esquema para la realización del convertidor, en estado estático, cuidando dos parámetros esenciales: 1) tasa de extinción, con respecto a los niveles más bajos de la señal de salida, y 2) la equidistancia entre los cuatro niveles de potencia en la señal de cuatro niveles. Aún cuando los parámetros de las señales involucradas en el experimento no concordaron, sobre todo en su estado de polarización, los dispositivos y el arreglo de éstos fue prácticamente el mismo que aquel utilizado en la obtención de la función de transferencia estática. La diferencia se debió a un comportamiento distinto del AOS ante señales dinámicas o moduladas debido a un desgastamiento disparejo entre los ejes TM y TE de sus facetas anti-reflejantes.

- La diferencia fundamental entre el comportamiento del convertidor ante señales estáticas y dinámicas es el tiempo en que éstas están presentes dentro de la cavidad del AOS. Ya que entre más tiempo estén presentes, más será el efecto que el desgaste en las capas anti-reflejantes de las facetas del amplificador tenga sobre la amplificación de las señales al mantener parte de la señal dentro por medio de las reflexiones internas no deseadas.
- Al haber analizado la Figura 37 y la Figura 40 se concluyó que el fenómeno que domina principalmente el comportamiento del convertidor es la XPolM, ya que es el que tiene una mayor velocidad de respuesta, y por lo mismo, el efecto de la XGM es el responsable del pequeño retraso en los tiempos de subida y de bajada de la señal convertida, ya que este fenómeno depende

principalmente en la recuperación de la densidad de portadores en el AOS. Y por ello, el nivel más alto de la señal convertida tiende a elevarse un poco más de lo deseado porque para obtener ese estado ambas señales binarias tienen un valor lógico bajo, por lo que tiene más tiempo para recobrar la ganancia el AOS a través de la recuperación de la densidad de portadores.

- El convertidor se evaluó con señales pseudo aleatorias de distintas velocidades de tasa de datos, compatibles con los protocolos de transferencia de datos SDH/SONET, empezando con una de 622Mbps hasta llegar a una máxima de 2.5Gbps con señales pseudo-aleatorias. En todos los casos se logró generar la señal de cuatro niveles equidistantes y con tasas de extinción aceptables. La mejor tasa de extinción de 19dB se obtuvo para una tasa de datos de 622Mbps y la peor, de 12.5dB, se obtuvo para una tasa de datos de 2.5Gbps como era de esperarse. Esta degradación en la tasa de extinción se debe a la pérdida en la capacidad de respuesta de la XPolM a medida que se aumenta la velocidad de la modulación y es limitada principalmente por el efecto de inyección de portadores, conocida como la pulsación de la densidad de portadores (Véase el Apéndice A).

VI Aportaciones.

- Las caracterizaciones exhaustivas del fenómeno de la XPolM y XGM para el AOS utilizado en este trabajo generaron una base de datos de gran utilidad en trabajos que se realicen en un futuro dentro del laboratorio de comunicaciones ópticas. En el proceso de caracterización del AOS se encontraron ciertas anomalías, las cuales se explican en el anexo I, relacionadas con el desgaste de sus facetas anti-reflejantes. El descubrimiento del desgaste de las facetas anti-reflejantes ayudarán a futuros usuarios del AOS a no malinterpretar resultados inesperados.
- Basándose en el análisis y caracterización del AOS y de los efectos de la XPolM y XGM se encontraron las condiciones óptimas para realizar el convertidor de dos señales de dos niveles de potencia a una sola de cuatro niveles conservando una equidistancia entre los niveles y buenas tasas de extinción.
- Se corroboró el funcionamiento del convertidor para diferentes tasas de datos compatibles con los protocolos SDH/SONET llegando exitosamente a una velocidad máxima de 2.5Gbps.
- El simple desarrollo de este proyecto de tesis representa una aportación enfocado a optimizar el uso del ancho de banda disponible en redes basadas en fibra óptica. El funcionamiento del convertidor abre una opción nueva para que las señales ópticas puedan llevar el doble de información, duplicando a su vez la capacidad de usuarios en las redes ópticas. Además el convertidor va un paso más allá siendo el primero en realizar todo el procesamiento de señales en el dominio óptico.
- Se contribuyó en la redacción de un artículo titulado: “All-optical 2-to-4 level encoder based on cross polarization modulation in a semiconductor optical amplifier

utilized to develop an all-optical 2 input digital multiplexer” que fue publicado en la revista “Optics Express 9000” en octubre de 2006 en su volumen 14, Número 20.

VII Trabajo futuro.

Tomando como base los resultados obtenidos, se recomienda realizar estudios más detallados sobre el desempeño del convertidor. Los estudios deben analizar el límite de velocidad hasta el cual el convertidor funciona correctamente, el deterioro de la tasa de extinción a medida que la tasa de datos aumenta, la tasa de errores de bit (BER por sus siglas en inglés), la transmisión y recepción exitosa de la señal de cuatro niveles en enlaces de larga distancia. Una vez realizados los estudios mencionados anteriormente sería pertinente evaluar la posibilidad de desarrollar el convertidor en un circuito integrado. Obteniendo resultados favorables en los estudios, se debe patentar el convertidor e incorporarlo al mercado ya sea por cuenta de Cicese o a través de alguna compañía interesada en la patente.

VIII Literatura citada.

[J. Riishoj, T.N Nielsen et-al, 1993] J. Riishøj, T.N. Nielsen, U. Gliese and K.E. Stubkjaer, "3 Gbit/s two-level to 1.5 Gsymbol/s four-level converter GaAs IC for two electrode semiconductor optical amplifier modulators," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 13, pp. 1173-1174, 1993.

[H. Soto, D. Erasme et-al, 1999] H. Soto, D. Erasme and G. Guekos, "Cross-polarization modulation in semiconductor optical amplifiers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 8, pp. 970-972, 1999.

[D.M. Patrick et al, 1994] D.M. Patrick, A.D. Ellis, D.A.O. Davies, M.C. Tatham and G. Sherlock, "Demultiplexing using polarization rotation in a semiconductor laser amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 4, pp. 341-342, 1994.

[H. Soto, J.D. Topomondzo, 2003] H. Soto, J.D. Topomondzo, D. Erasme and M. Castro, "All-optical NOR gates with two and three input logic signals based on cross-polarization modulation in a semiconductor optical amplifier," *Opt. Commun.*, vol.218, pp.243-247, 2003.

[B.S. Robinson et al, 2002] B.S. Robinson, S.A. Hamilton, S.J. Savage, and E.P. Ippen, "40 Gbit/s All-optical XOR using a fiber-based folded ultrafast nonlinear interferometer," in *Proc. OFC'2002*, Anaheim, CA, Mar. 2002, paper ThY2.

[Y. Liu, M.T. Hill et al, 2003] Y. Liu, M.T. Hill, E. Tangdiongga, H. de Waardt, N. Calabretta, G.D. Khoe and H.J.S. Dorren, "Wavelength conversion using nonlinear polarization rotation in a single semiconductor optical amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 1, pp. 90-92, 2003.

[H. Soto, J.C Domínguez et al, 2001] H. Soto, J.C. Dominguez, D. Erasme and G. Guekos, "Demonstration of an all-optical switch using cross-polarization modulation in semiconductor optical amplifiers," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 29, no. 3, pp. 205-208, 2001.

[H.J.S. Dorren et al, 2003] H.J.S. Dorren, D. Lenstra, Y. Liu, M.T. Hill and G.D. Khoe, "Nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers: Theory and application to all-optical flip-flop memories," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 39, no. 1, pp. 141-148, 2003.

[H. Soto, E. Alvarez et al, 2002] H. Soto, E. Álvarez, C. A. Díaz, J. Topomondzo, D. Erasme, L. Schares, L. Occhi, G. Guekos and M. Castro, “Design of an all-optical NOT XOR Gate Based on Cross-Polarization Modulation in a Semiconductor Optical Amplifier,” submitted to *Opt. Commun.*

[M.F.C. Stephens et al, 1997] M.F.C. Stephens, M. Asghari, R.V. Penty and I.H. White, “Demonstration of ultrafast all-optical wavelength conversion utilizing birefringence in semiconductor optical amplifiers,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 4, pp. 449-451, 1997.

[Jurg Eckner, 1998] Jürg Eckner, Semiconductor optical amplifiers: Optimization of polarization and monolithical integration in ridge waveguide bulk InGaAsP/InP, Series in Quantum Electronics vol. 8, Zurich: Hartung-Gorre Verlag Konstanz, 1998.

[Ponforum, 2005] Technical Standards and Advocacy Bodies Overview: <http://www.ponforum.org/technology/standards.asp>

[Optical Networking, 2002] Optical Networking, Installation Cost Key to Passive Optical Network Growth Opportunity: <http://www.instat.com/press.asp?ID=216&sku=IN020223OP>

[Internet World Stats, 2007] Internet World Stats: <http://internetworldstats.com/stats.htm>

[J. RiishBj et al, 1993] J. RiishBj, T.N. Nielsen, U. Gliese and K.E. Stubkjaer, “4 Gbps two-level to 2 Gsymbols four-level converter GAAS IC for semiconductor optical amplifier modulators”, IEEE GaAs IC Symposium, pp 299-301, 1993.

[Andrej Jajszczyk, 2005] Andrej Jajszczyk, “Optical Networks-the electro-optic reality”, Optical Switching and Networking 1, Elsevier B.V., pp 3-18, 2005.

[Richard C. Dorf, 2003] Richard C. Dorf, The handbook of optical communications network, CRC Press LLC, pp 16,135, 2003.

[Jian Huang et al, 1993] Jian Huang, Lee W. Casperson, “Gain and Saturation in Semiconductor Lasers”. *Opt. Quantum Electron.* 25: pp. 369-390, 1993.

[Uskov et al, 1994] Uskov, A.; Mork, J; Mark,J, “Wave Mixing in Semiconductor Laser Amplifiers Due to Carrier Heating and Spectral-Hole Burning”. *IEEE J Quantum electron.* 30(8): pp. 1769-1781, 1994.

[The International Engineering Consortium, 2005] The Internacional Engineering Consortium, “Asynchronous Transfer Mode (ATM), Passive Optical Networks (PONs), Webproforum tutorials, <http://www.iec.org>, pp1-21, 2005.

[Lightwave, 2004] Lightwave – “Optical solutions nabs GPON contract in Ohio”, Optical Solutions Inc., 2004.

[Kathleen Pender, 2000] Kathleen Pender “Zealous Investors Embrace Fiber Optics as holy Grail of the Internet”, San Francisco Chronicle, Wednesday, May 24, 2000, page B-1.

[M.C. Edith García Cárdenas et al, 2003] M.C. Edith García Cárdenas, Dr. Horacio Soto Ortiz, “Sistemas basados en la tecnología Multicanalización por división de longitud de onda (WDM)”, División de Física Aplicada, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Grupo de Funciones Optoelectrónicas, 2003.

[Hyuek Lee et al, 1999] Hyuek Jae Lee, Manjin Sohn, Kwangjoon Kim, Member, IEEE and Hae Geun Kim, “Wavelength Dependent Performance of a a Wavelength Converter Based on Cross-Gain Modulation and Birefringence of a Semiconductor Optical Amplifier”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, No 2. February 1999, pp 185-187.

[R.J. Manning et al, 2003] R.J. Manning, A. Antonopoulos, R. Le Roux and A.E. Kelly, “Experimental measurement of nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers”, Electronics Letters Online No: 20010143, Vol.27, No. 1, pp220-221.

[HP 8509B Manual] HP 8509B Lightwave Polarization Analyzer, “Polarization Measurements of Signals and Components”, Hewlett Packard, Product Note 8509-1.

A Apéndice A: Fenómenos y mecanismos no lineales presentes en los amplificadores ópticos de semiconductor.

Las cualidades de los AOSs responsables de la manifestación de la modulación cruzada de la ganancia XGM son atribuidas principalmente a los mecanismos no lineales conocidos como: creación del hoyo espectral (SHB por sus siglas en inglés), calentamiento de portadores (CH por sus siglas en inglés), y pulsación de la densidad de portadores (CDP por sus siglas en inglés) [Jian Huang et al, 1993] [Uskov et al, 1994]. Estos mecanismos provocan variaciones en la distribución de portadores libres en la banda de conducción del AOS y ésta a su vez modifica la manera que una señal es amplificada así como la interacción entre dos o más señales dentro del mismo.

Para entender estos mecanismos, primero se considerará que se aplica un impulso óptico dentro de un AOSs con las siguientes características: muy alta potencia, con muy corta duración en el dominio del tiempo y muy angosta en el dominio de la frecuencia. Al entrar el pulso óptico dentro de la región activa del AOS, se presenta un gran consumo de portadores y la manifestación de los mecanismos no lineales antes mencionados que modifican a la distribución de energía de los portadores y a la ganancia del amplificador.

En la parte superior de la Figura 42, se representa la distribución de energía de los portadores libres para la banda de conducción antes de que el pulso sea inyectado dentro del AOS. En esta Figura 42, “N” representa la densidad de portadores, y “E” la energía correspondiente de cada portador libre mientras que dE representa a un diferencial de

energía. En la realidad hay otra distribución con las mismas características para la densidad de portadores en la banda de valencia.

El uso del término “densidad de portadores para un cierto nivel de energía” puede resultar confuso ya que sólo se permite un sólo portador para cada nivel, o bien dos si se considera el “spin”. Por esta razón en la figura 1 el eje “x” está afectado por un diferencial de energía (dE) que permite determinar la densidad de portadores en una posición infinitesimal de energía.

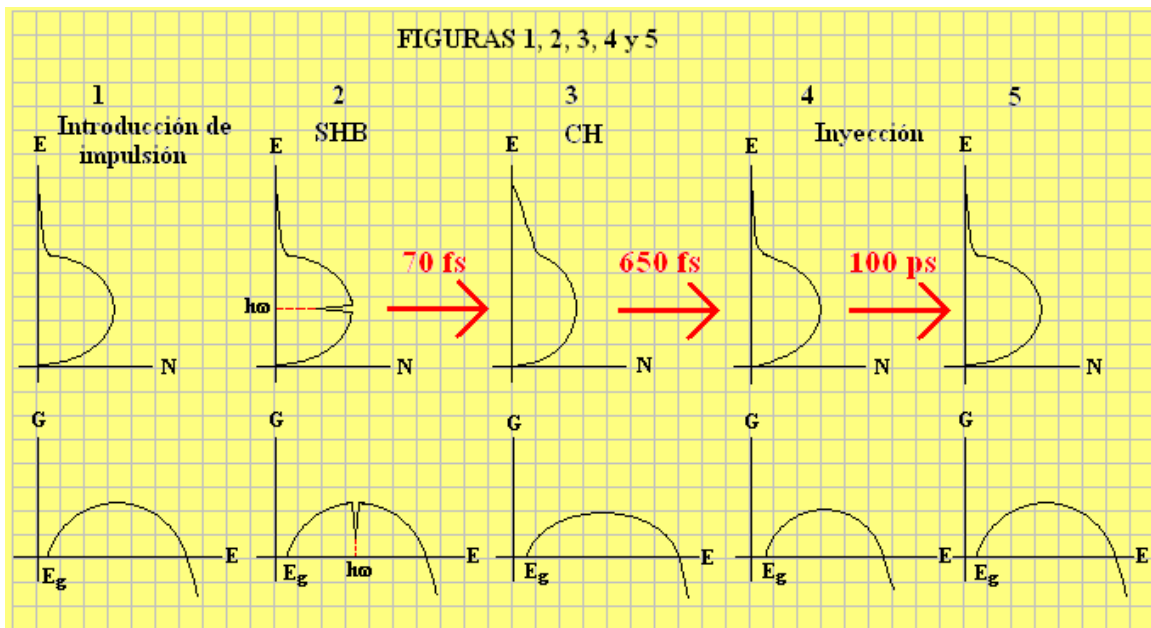


Figura 42. Evolución del SHB, CH y la inyección de portadores.

Ahora bien, si se supone que la energía de la impulsión $h\omega$ coincide con el máximo de la distribución de energía en la densidad de portadores, donde ω es la frecuencia que

tienen los fotones que se introducen de manera de la impulsión antes mencionada, entonces se puede ver en la parte superior de la figura 2, que justo en el nivel de energía igual a $h\omega$, se consume un número considerable de portadores libres, lo que deja un “hoyo” dentro de la distribución de energía de los portadores libres. Similarmente, en la curva de ganancia se puede ver la repercusión del “hoyo” (parte inferior de la figura 2). A este proceso se le conoce como “Spectral Hole Burning (SHB por sus siglas en inglés)”, o creación del hoyo espectral.

Una vez que el pulso abandona el amplificador, y ha causado la formación del hoyo espectral, los portadores de otro nivel de energía se encargarán de llenarlo. Los portadores sufren una colisión portador-portador, forzando a un portador a descender al nivel de energía equivalente a la ubicación del hoyo, y el otro portador ascenderá a un nivel superior de energía. La nueva distribución de portadores puede ser observada en la parte superior de la figura 3. Nótese que hay una ocupación mayor en los niveles de energía superiores y obviamente la ocupación en los niveles de energía inferiores disminuyó con respecto a la figura 2. El hoyo no es rellenado por nuevos portadores que arriben gracias a la inyección de corriente, dado que el tiempo de entrada de un electrón es de una magnitud relativamente alta del orden de los 100ps, el cual es mucho mayor al tiempo de vida de la colisión portador-portador que es más o menos 70fs. A este proceso se le denomina como: “carrier heating (CH)” o calentamiento de portadores. El término calentamiento se utiliza dada la similitud de los resultados de este fenómeno con los resultados obtenidos consecuentes a un simple calentamiento del material.

Posteriormente, los portadores que ascendieron a los niveles de energía superiores, colisionan con la red cristalina, y por medio de una colisión portador-fonón descienden a niveles de energía más estables. El resultado de este proceso se puede ver en la figura 4. Como se puede apreciar, la figura 4 se parece a la figura 1, sólo que tiene una “amplitud” más pequeña dado que hubo un consumo de portadores. Este proceso dura alrededor de 650 fs.

En la figura 5 se muestra la rehabilitación de la curva inicial gracias al arribo de nuevos portadores originados por la inyección de nuevos portadores y tiene una duración de aproximadamente 100 ps.

El análisis de la curva de ganancia respectiva para cada caso se encuentra debajo de la figura de distribución de densidad de portadores respectiva. En cada caso, la ganancia empieza justo en el nivel de energía equivalente a la energía del “gap”, E_g .

Como era de esperarse, la diferencia entre la curva de ganancia de la figura 1 y 2 reside solamente en la creación del hoyo debido al consumo de portadores que hubo a causa de la impulsión con energía $\hbar\omega$. En la figura 3, se puede ver el ensanchamiento de la curva de ganancia, debido a que ahora se cuenta con portadores en niveles con energía mayor. Al mismo tiempo la ganancia en los niveles de energías menores, disminuyó debido a los portadores que ascendieron por la colisión portador-portador. La ganancia correspondiente a la figura 4, se hace más angosta debido a la colisión portador-fonón que ayudó a los portadores a regresar a un estado más estable, pero al mismo tiempo es más pequeña que la curva de ganancia inicial de la figura 1. Esto se debe al consumo de portadores que

originalmente formaron el hoyo. La ganancia respectiva a la figura 5 es idéntica a aquella de la figura 1 dado que ya se inyectaron nuevos portadores.

Dentro de estos fenómenos, existen dos mecanismos relacionados con la respuesta física suscitada a raíz de la perturbación creada por la impulsión. El primer mecanismo denominado: Mecanismo del “Spectral Hole Burning o Creación del Hoyo Espectral”, describe la formación y relleno del hoyo espectral. El segundo, llamado Mecanismo del “Carrier Heating” o Calentamiento de Portadores, se refiere al calentamiento y enfriamiento de portadores descrito por las figuras 3 y 4.

Es menester comprender estos mecanismos para poder analizar sistemas más complejos donde la impulsión es una señal periódica como las utilizadas en la práctica. Si se inyectara una señal periódica, los mecanismos descritos anteriormente se repetirían una y otra vez, modificando las características de la ganancia del AOS. La máxima velocidad a la que el AOS respondería es de 70fs, límite impuesto por el mecanismo del “Spectral Hole Burning”. Es decir, con este mecanismo se puede modular la ganancia a una velocidad de hasta 20THz. Ahora el índice de la modulación no es muy grande, ya que es poco lo que cambia la función de densidad de portadores.

También, a causa del mecanismo de “carrier heating” se puede, de la misma manera, modular la ganancia a una velocidad equivalente a 1.5THz. Por último se encuentra la capacidad de modular la ganancia a 10GHz. Esta velocidad es delimitada por el efecto de

inyección de portadores a una tasa de 100ps, conocida como la pulsación de la densidad de portadores.

Todas las variaciones en la densidad de portadores libres y como consecuencia las de la curva de ganancia determinan los cambios que sufrirán una o más señales que se propaguen dentro del AOS tal como se puede ver en el fenómeno de la modulación cruzada de la ganancia XGM.

B Apéndice B. Alineación entre lentillas de Grin con cada faceta de emisión del AOS.

El primer fenómeno por caracterizar en el desarrollo del convertidor fue la XGM. Al momento de verificar que las señales fueran inyectadas en forma óptima se detectó lo que pareció ser una falla de alineación. Cabe recordar que para minimizar la presencia de señales parásitas en la misma salida donde se recolectó la señal CW, se optó por el esquema de contra-propagación de haces como se menciona en el Capítulo III y como se muestra en la Figura 43 .

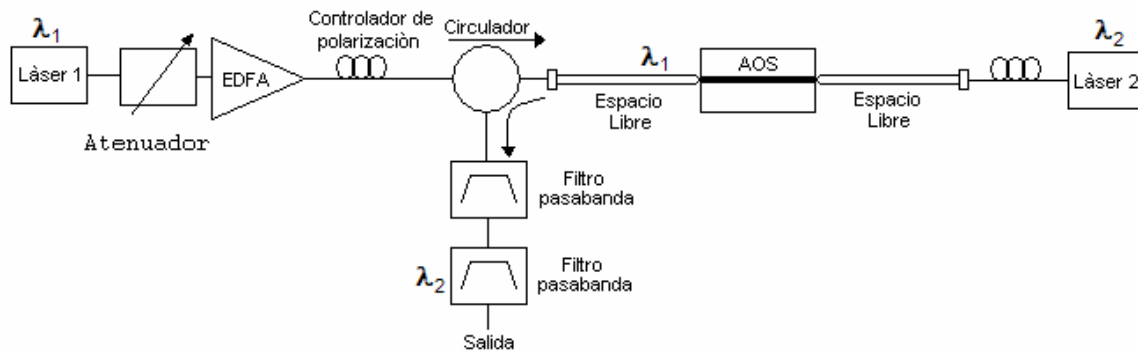


Figura 43. Esquema con el cual se caracterizó la XGM para el AOS disponible para realizar el convertidor.

Para explicar esta anomalía, a continuación se presenta el proceso de alineación: Primeramente, se coloca una lentilla de Grin enfrente a una faceta de emisión del AOS. Se inyecta un haz a la fibra conectada a la lentilla de Grin de manera que se contra-propague con la emisión espontánea amplificada del AOS. Cuando se logra que el haz generado por la emisión espontánea amplificada del AOS coincida a lo largo de la trayectoria entre la lentilla

de Grin y el AOS con el haz inyectado en contra-propagación a través de esta lentilla, se considera que están suficientemente alineados para proseguir al siguiente paso. Luego, se desconecta la fuente láser de la fibra que a su vez está conectada a la lentilla de Grin, y en su lugar se instala un medidor de potencia. Este medidor detectará la potencia recibida de la emisión espontánea amplificada del AOS. Las perillas de la montura 3D, que sostiene a la lentilla de Grin, se ajustan hasta encontrar la potencia máxima. El mismo procedimiento se sigue en la otra faceta de emisión del AOS, con lo que se considera que el sistema está alineado.

La supuesta falla en la alineación se encontró cuando se verificó la alineación del sistema al momento de contra-propagar el haz de bomba y el haz de sonda. Con la tarjeta detectora fotosensible se intentó corroborar que los tres haces presentes (haz de bomba, CW y la emisión espontánea amplificada) coincidieran a lo largo de la trayectoria por aire. Lo que se detectó, es que en la lentilla de Grin, que inyecta la haz de bomba, el haz CW incidente no coincidía. De manera similar, del otro lado, en la lentilla de Grin que inyecta la señal CW, el haz de bomba incidente no coincidía. (Véase la Figura 44 y Figura 45.).

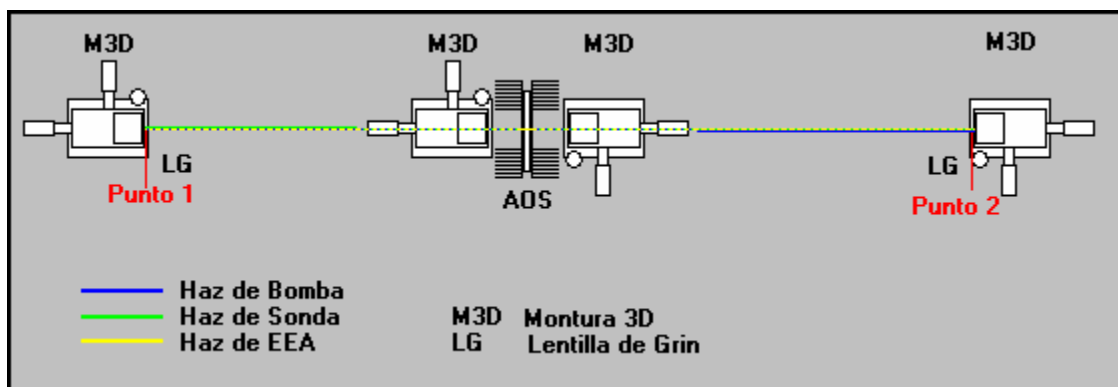


Figura 44. Trayectoria de los haces de sonda, bomba, y EEA del AOS vista desde arriba.

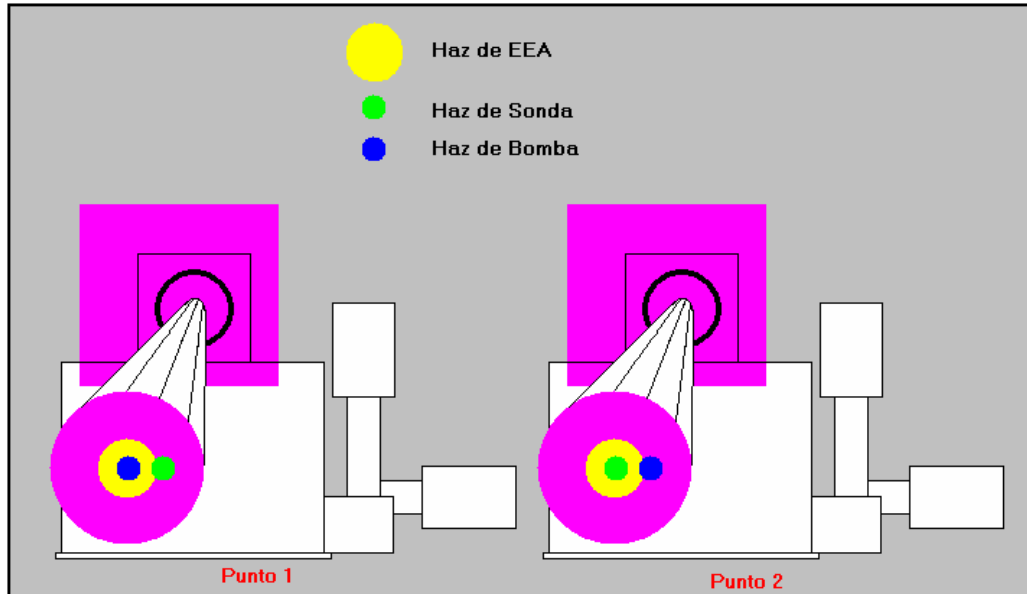


Figura 45. Vista transversal de las trayectorias de los haces de sonda, bomba y AOS a la entrada de las lentillas de Grin.

La primera hipótesis fue que la alineación no había sido bien elaborada. Se intentó alinear los tres haces utilizando la tarjeta fotosensible y las monturas 3D a simple vista, eliminando a su vez el paso que incluye el uso de un detector de potencia, pero después de varios intentos en los cuales se logró que los tres haces coincidieran a lo largo de la trayectoria, desde una lentilla de Grin pasando por el AOS y arribando a la otra lentilla de Grin y viceversa, se verificó que las pérdidas por captura en cada lentilla excedían los 20dB.

La segunda hipótesis era que la presencia de los haces, en particular el de mayor potencia (Bomba), modificaban tanto los ejes propios del AOS, que generaban esta desviación. De haber sido cierto, al modificar la potencia en los haces se detectaría una variación en la desviación, pero no ocurrió de tal manera, es decir, la desviación fue la misma para todos los niveles de potencia.

De esta manera, se creó una tercera hipótesis, la más congruente. Recordando que la guía de onda de los AOS está inclinada (con respecto al plano horizontal transversal del AOS) para evitar reflexiones, entonces se puede explicar la desviación de los haces de la siguiente manera: al inyectar un haz al AOS, éste entra perpendicularmente a los ejes x e y . La guía de onda del AOS tiene una inclinación en el eje x , por lo que el haz comienza a propagarse en esa misma dirección, y al salir del AOS por la otra faceta, el haz seguirá con la misma tendencia iniciada por la inclinación de la guía de onda del AOS. Véase la Figura 46.

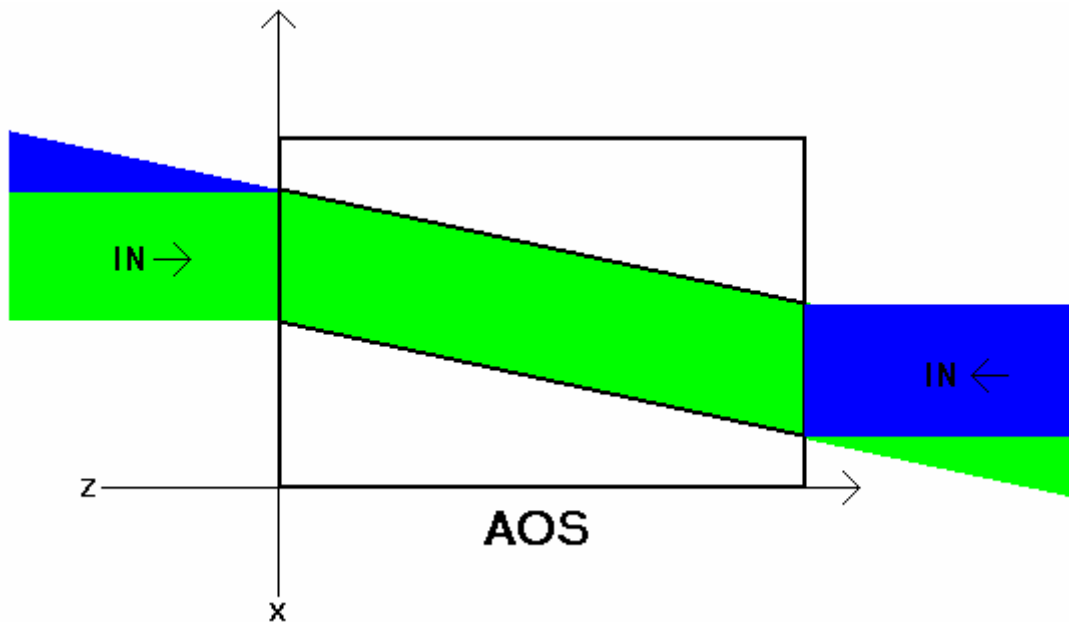


Figura 46. Trayectoria de los haces de bomba (verde) y sonda (azul) en contra-propagación dentro del AOS.

C Apéndice C. Caracterización de la auto-modulación de la fase (SPM por sus siglas en inglés).

La siguiente información se obtuvo para caracterizar la auto-modulación de la fase (SPM por sus siglas en inglés) de un haz dentro del AOS disponible en este trabajo de tesis. Se controló el estado de la polarización del haz de prueba para que fuera circular y de la misma manera que se hizo en la caracterización de la XPolM, se colocó un polarizador en el espacio libre entre la lentilla de Grin y la faceta de entrada del AOS para asegurar un estado de polarización lineal y un nivel de potencia constante e independiente de la orientación del eje de transparencia del polarizador. El eje de transparencia del polarizador se colocó inicialmente a 0 grados con respecto al eje horizontal y se designó una longitud de onda para el haz. Colocando un analizador del estado de polarización de la señal a la salida del AOS, se pudo calcular la evolución que sufrió el estado de polarización de la señal a medida que el nivel de potencia de la misma se fue incrementando en pasos de 0.2dBm. El valor inicial de potencia de la señal fue 12dB de atenuación con respecto a su máximo (3dBm) a la entrada del AOS. Teniendo el valor inicial y final del estado de polarización de la señal a la salida del AOS, se pudo calcular su rotación total. El eje de transparencia del polarizador se fue rotando en pasos de 10 grados, y para cada caso se repitió el procedimiento descrito anteriormente. Una vez que se logró una rotación total del eje de transparencia del polarizador, se repitió el mismo experimento para distintas longitudes de onda de la señal de prueba y se tabularon en la Tabla V.

Tabla V. Relación entre el estado de polarización de entrada del haz de prueba y la rotación de su estado de polarización a la salida del AOS.

Ángulo de incidencia	LONGITUD DE ONDA							
	1537nm	1539nm	1541nm	1543nm	1545nm	1547nm	1549nm	1551nm
350	18.77	23.88	21.94		19.41	24.11	26.79	42.58
340	13.29	20.44	20.09	10.69	15.1	15.47	17.92	31.7
330	7.88	16.78	20.42	11.26	11.93	5.59	9.05	20.12
320	4.063	14.43	22.72	12.96	11.46	3.29	5.22	10.39
310	7.15	14.94	26.84	17.31	13.39	14	8.2	12
300	13.23	19.13	31.03	19.5	15.22	21	17	19
290	19.02	27.36	37.15	23.36	23	35	26	27
280	27.17	36.95	43.21	32.26	29.66	36	31	33
270	36	44.69	48.25	46.18	40.53	42.63	37.1	43.22
260	44.06	51.66	51.63	61.63	52.52	54.97	46.9	51
250	49.81	54.56	52.95	75.33	64.93	66.52	56.22	62.83
240	53.69	53.66	52.37	84.91	72.2	69.44	57.52	65.59
230	53.73	50.72	50.51	81.32	73.94	62.88	54.92	63.4
220	50.62	47.54	46.76	70.47	66.92	60.3	51.5	63.43
210	43.88	42.12	41.56	56.92	53.29	43.11	33.4	70
200	34.91	37.3	33.5	32.96	15.13	4.9	39.35	54.43
190	29.12	32.19	29.3	7.89	1.38	34.85	44.84	48
180	22.75	27.8	24.97	1.69	16.66	36.24	42.39	40.14
170	17.53	24.18	22.53	9.57	18.5	30.27	35	31.34
160	12.46	19.33	20.25	11.52	14.9	22.54	18.5	22.23
150	7.33	17.06	22.6	11.17	12.36	13	9.94	20.41
140	4.26	14.81	24.99	12.64	12.23	8.77	8	14
130	7.72	14.92	28.05	16.12	13.79	12	10	13
120	14.8	20.2	32.54	18.67	14.79	10.89	18	19
110	22.05	27.38	38.79	21.92	22.08	28	28	27
100	29.67	36.6	44.56	31.77	33.86	34	34	40
90	38.67	45.6	49.35	44.06	44.7	40	44.74	40.3
80	48.02	52.15	53.07	59.15	52.67	60.85	45.44	50.47
70	54.32	56.53	53.95	73.36	63.1	70.52	54.71	61.35
60	57.87	56.78	53.4	82.36	71.16	71.35	60.97	66.19
50	56.81	53.74	51.67	79.04	73.46	63.68	54.5	63.45
40	51.55	48.52	48.47	70.35	67.26	61.73	52.12	63.53
30	44.6	43.37	42.41	58.4	52.82	49.11	36.48	61.5
20	35.83	36.36	36.49	36.77	17.42	2.15	38.58	64.44
10	29.56	32.36	29.08	12.09	1.04	29.54	44.9	49.28
0	23.65	28.56	25.15	1.36	14.87	34.31	34.32	50.72

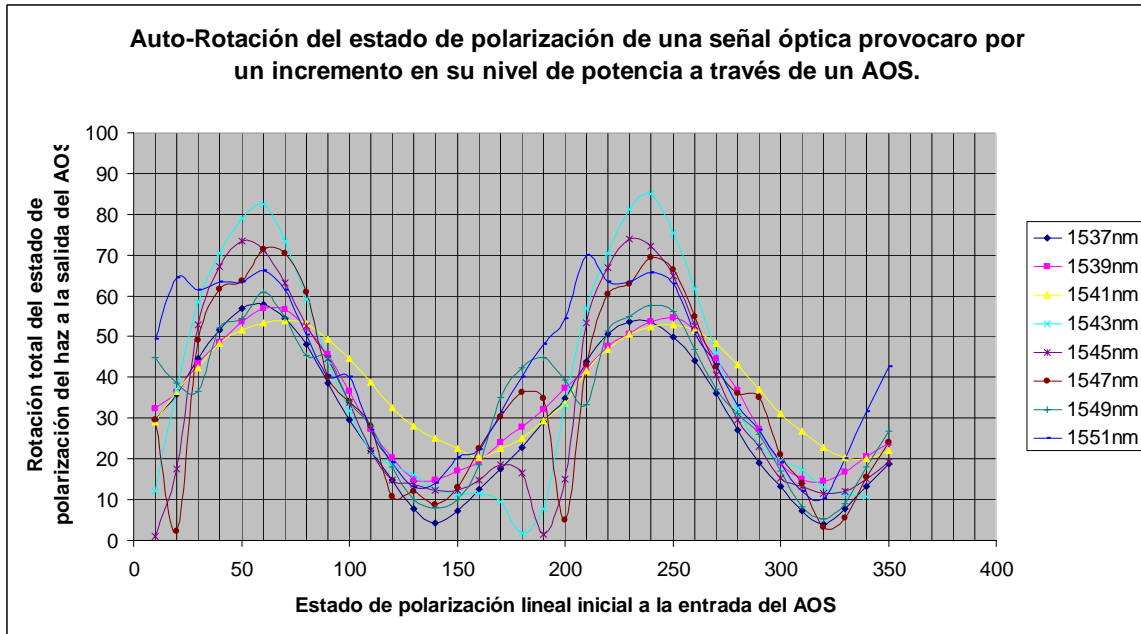


Figura 47. Auto modulación de la fase SPM (por sus siglas en inglés).

Los resultados son congruentes con la teoría de auto-modulación de la fase (SPM por sus siglas en inglés), ya que se espera una mayor rotación en el estado de polarización de un haz cuando éste incide en la faceta de entrada del AOS con una polarización lineal a 45° con respecto a la horizontal. Dado que los AOS no son dispositivos simétricos ni perfectos, se encontró la máxima rotación cuando el estado de polarización fue lineal a 66° (véase la Figura 47) con respecto a la horizontal.

D Apéndice D. Análisis de la discontinuidad que se presentó en los resultados donde se caracterizó la XPolM.

Como se mencionó en el Capítulo III, se encontró un comportamiento inesperado al determinar la máxima rotación inducida en el estado de polarización de la señal CW inducido por el haz de bomba a través del fenómeno de la XPolM.

Para entender la anomalía encontrada en los resultados obtenidos al caracterizar la XPolM, hay que aclarar que la estructura física de los AOS favorece la propagación y amplificación de haces con estado de polarización lineal horizontal o TE. Basándose en ese principio, se esperaba que cuando el haz de bomba tuviera un estado de polarización TE se encontraría el mayor efecto provocado por la XPolM sobre el estado de polarización de la señal CW. Sin embargo, se encontró que cuando el haz de bomba tenía un estado de polarización lineal vertical o TM se encontró el efecto más fuerte de la XPolM sobre el estado de polarización de la señal CW.

A diferencia de la curva que muestra la evolución del cambio en el estado de polarización de la señal CW a la salida del AOS en función del incremento en la potencia del haz de bomba con estado de polarización TM como se puede verificar en la Figura 48, para todos los otros tres estados de polarización (0° , 45° y 60°) en la haz de bomba utilizados en la caracterización de la XPolM no se encontró ninguna discontinuidad.

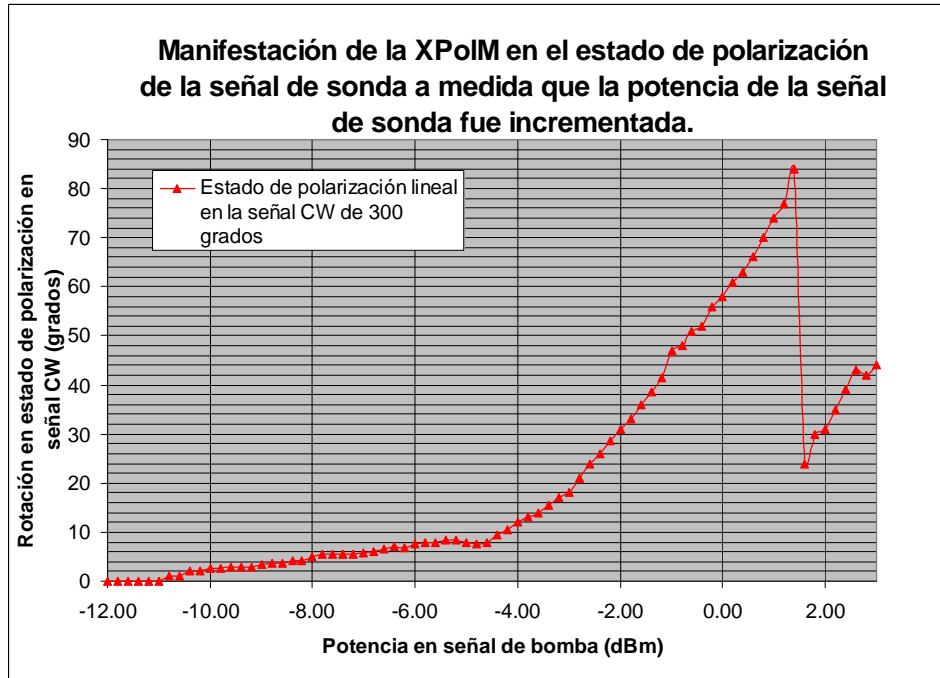


Figura 48. Relación entre la potencia del haz de bomba y la rotación del estado de polarización provocado en la señal de sonda.

En la Figura 48 se puede apreciar claramente la discontinuidad en la evolución de la rotación del estado de polarización de la señal CW que se presentó a los 1.4dBm de potencia en el haz de bomba.

Debido a que en ninguna de las otras curvas generadas en el proceso de caracterización de la XPolM, en las cuales se utilizaron estados de polarización lineales en TE, 45 y 60 grados para la haz de bomba, se presentó una discontinuidad, se dedujo que esta discontinuidad estaba fuertemente relacionada con el estado de polarización lineal vertical del haz de bomba.

La hipótesis propuesta indica que en el caso en que el haz de bomba contó con un estado de polarización TM y llegó a un nivel de potencia de 1.4dBm, hubo una mayor

cantidad de fotones de la haz de bomba y hubo una notable y menor concentración de portadores libres en el área activa del AOS a la que se tuvo en el resto de los casos para el mismo nivel de potencia (1.4dBm). En conclusión, esto indica que aunque la potencia de entrada del haz de bomba no había llegado a su máximo nivel, tuvo que haber algún otro fenómeno o señal que generara o aportara un número considerable de fotones adicionales y, como resultado, un mayor consumo de portadores libres en el área activa del AOS.

Otra evidencia del consumo de portadores excesivo generado cuando el haz de bomba llegó a 1.4dBm de potencia se puede ver en la parte superior de la Figura 49, en donde se ilustra el grado de polarización (DOP por sus siglas en inglés) de la señal CW. El DOP indica el porcentaje de fotones de una señal que cuentan con un estado de polarización coherente. Como se puede ver, al momento en que el haz de bomba llegó a los 1.4dBm de potencia y se presentó la discontinuidad en la evolución de la translación del estado de polarización en el haz CW, la misma tiene una caída en su DOP de un 87% a un 70%. Esta caída en el DOP de CW indica que alguna otra señal presente consumió los portadores libres y saturó la ganancia del AOS. Y la única otra señal presente simultáneamente dentro del AOS era la haz de bomba, entonces de cierta manera esta tuvo que ser amplificada.

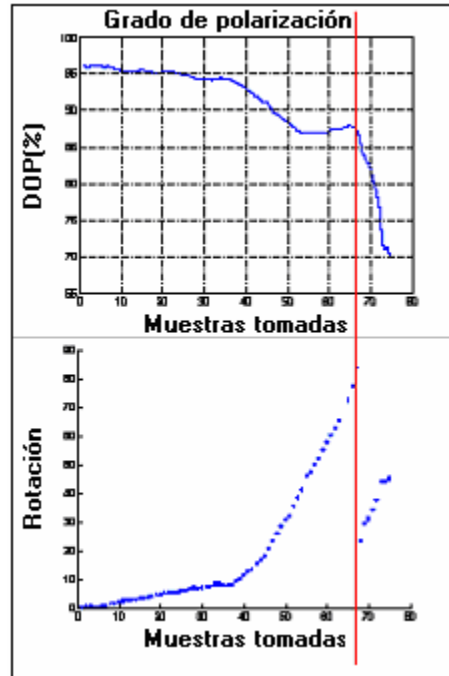


Figura 49. Comparación del grado de polarización de la señal de sonda y la XPolM.

La pérdida del grado de polarización podría ser explicado por el hecho de que la potencia de la haz de bomba es muy alta y consume la mayoría de los portadores libres en la banda de conducción, por lo que la señal de sonda tiene una caída abrupta, luego entonces, su grado de polarización se ve afectado de la misma manera.

Partiendo de este fenómeno, se analizó el estado de polarización de la emisión espontánea amplificada (EEA por sus siglas en inglés) del AOS. Otra vez, cuando era de esperarse que la EEA estuviera polarizada mayormente en TE, se obtuvieron las siguientes gráficas:

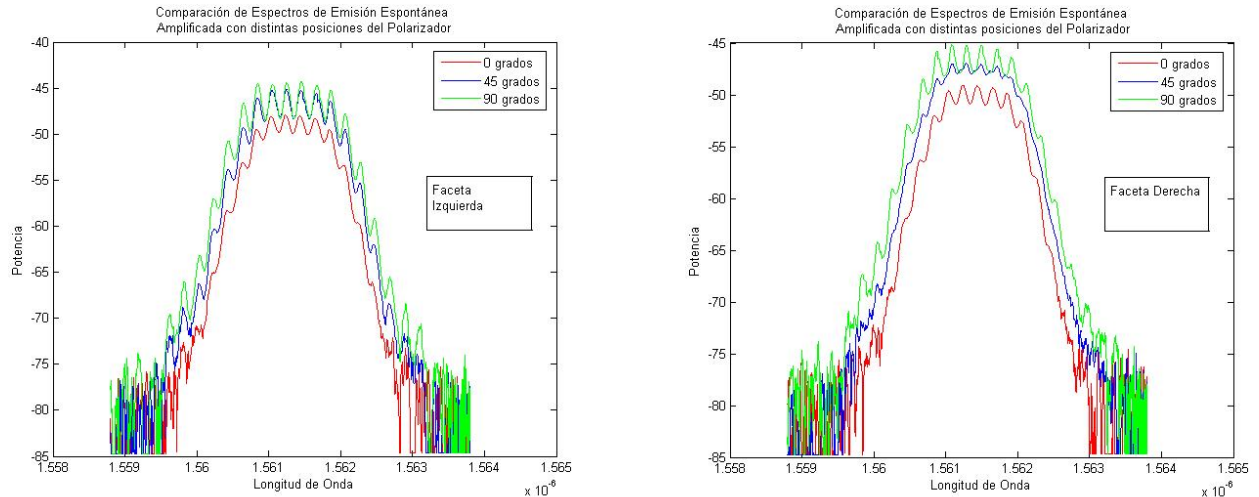


Figura 50. Espectros de emisión espontánea amplificada en los ejes TE, TM y a 45° grados de la EEA para cada una de las facetas del AOS.

En las dos figuras se puede ver que se tiene mayor potencia cuando el eje de transparencia del polarizador a la salida del AOS tenía alineación TM. Dado el caso de tener mayor EEA en el estado de polarización TM (hasta 5dB de diferencia con respecto al estado de polarización TE) y tener rizados tan pronunciados, especialmente en TM, indica que las facetas anti-reflejantes del AOS están desgastadas particularmente en el eje TM.

Tomando en cuenta las conclusiones e hipótesis mencionadas anteriormente, se procedió a explicar física y matemáticamente como pudo tener lugar esta anomalía.

Se sabe que la longitud de la cavidad del AOS es de 1.5mm=0.0015m y se sabe que el índice de refracción dentro del área activa del AOS es de aproximadamente $n=3.4$. Entonces, la velocidad a la que se propaga una señal óptica dentro del AOS es de:

$$V_o = (300,000,000(\text{m/s}))/3.4 = 8.82E7\text{m/s} \quad (1)$$

Y sabiendo que el tiempo que llevó al haz de bomba llegar a 1.4dBm de potencia fue de 11.8 segundos, el número de veces que el haz de bomba se reflejó dentro del AOS fue:

$$\mathbf{8.82E7 \text{ m/s} * 11.8 \text{ s} = 6.94E11 \text{ trayectorias completas dentro del AOS.} \quad (2)$$

Si se toma en cuenta que para el resto de las caracterizaciones la haz de bomba llegó a una potencia de 3dBm sin generar ninguna discontinuidad en la curva de evolución de la translación del estado de polarización del haz CW, se puede deducir que en el caso en el cual el haz de bomba contaba con estado de polarización TM llegó a 1.4dBm de potencia, tendrían que haber presentes por lo menos el mismo número de fotones que habían presentes en el resto de los casos. Esto significa que aunque el haz de bomba solamente representó el 65% de los fotones presentes dentro del AOS, el 45% restante tuvo que ser producido por las reflexiones internas provocadas por el desgaste en las capas anti-reflejantes del AOS. El 45% de potencia que fue generado por reflexiones internas equivale a una potencia de -2.11dBm o 6.15E-4 W. Los valores de reflexión comúnmente designados a las películas anti-reflejantes son de $r^2=5 \times 10^{-5}$, en el caso particular del AOS utilizado en este proyecto presenta una ganancia de aproximadamente 5dB para el eje TM con respecto al TE. Suponiendo que el valor de la película anti-reflejante en el eje TE no tiene un desgaste importante, el valor de reflexión para el eje TM sería de $r_{TM}^2=15.8 \times 10^{-5}$. La ganancia de simple paso del AOS utilizada para los siguientes cálculos es de 20dB. Finalmente, para saber el porcentaje del haz de bomba que se inyectó inicialmente que fue amplificada a través de las reflexiones internas del AOS se redujo a resolver la siguiente ecuación:

$$\mathbf{X * (número de reflexiones internas) * (ganancia de simple paso) * (factor de reflexión)}$$
$$\mathbf{= 45\% de la potencia total generada; \quad (3)}$$

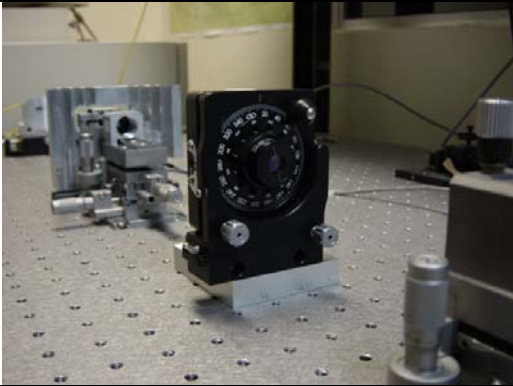
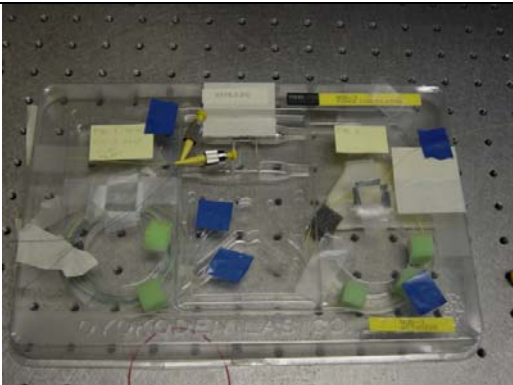

$$\mathbf{X *(6.94E11)*100*15.8E-5 = 6.15E-4 W; \quad (4)}$$

$$\mathbf{X=5.61E-14W = -102.5dBm \quad (5)}$$

Lo que significa que de la cantidad total de potencia de la haz de bomba inyectada, simplemente se requirió de -102.5dBm para que con las reflexiones internas, la ganancia y el tiempo que transcurrió dentro del amplificador, se aumentará a la haz de bomba un 45% de fotones extras que exacerbaron el efecto de la XPolM de manera considerable sobre la señal CW.

En el caso del desarrollo del convertidor en estado dinámico no se presentó este fenómeno porque dado el tiempo máximo de bit a la tasa más lenta (622Mbps), fue de $1.6E^{-9}$ segundos el cual se traduce a 94 trayectorias internas del haz de bomba dentro del AOS. La comparación del número de trayectorias en este caso (94) con el obtenido en la determinación de la función de transferencia en estado estático ($6.94E^{11}$) corrobora el hecho de que las películas anti-reflejantes no tienen mayor efecto en el caso del funcionamiento dinámico del convertidor.

E Apéndice E. Equipo utilizado en este trabajo de tesis.

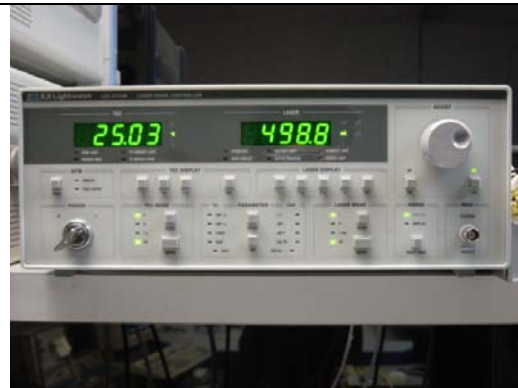
<p>Polarizador (Newport GM-1RA)</p> <p>Tasa de Extinción 35.2 dB (1525 nm)</p>																	
<p>Circulador (Thorlabs 6015-3)</p> <p>Pérdidas por inserción (0.5-0.9 dB) Terminal 1 a 2 0.5 dB Terminal 2 a 3 0.9 dB</p> <p>Aislamiento (14.9-44.4dB) Terminal 1 a 3 14.9 dB Terminal 2 a 1 44.4 dB</p>																	
<p>Acoplador 95% / 5% (Thorlabs 10202A-10-FC)</p> <p>Transferencia de Potencia (95%) (Pérdidas)</p> <table data-bbox="235 1354 568 1501"> <tbody> <tr> <td>Terminal 1 a 3</td> <td>4.9 dB</td> </tr> <tr> <td>Terminal 2 a 4</td> <td>2.9 dB</td> </tr> <tr> <td>Terminal 3 a 1</td> <td>4.5 dB</td> </tr> <tr> <td>Terminal 4 a 2</td> <td>3.7 dB</td> </tr> </tbody> </table> <p>Transferencia de Potencia (5%) (Pérdidas)</p> <table data-bbox="235 1617 568 1764"> <tbody> <tr> <td>Terminal 1 a 4</td> <td>18.4 dB</td> </tr> <tr> <td>Terminal 2 a 3</td> <td>17.1 dB</td> </tr> <tr> <td>Terminal 3 a 2</td> <td>17.4 dB</td> </tr> <tr> <td>Terminal 4 a 1</td> <td>19.3 dB</td> </tr> </tbody> </table>	Terminal 1 a 3	4.9 dB	Terminal 2 a 4	2.9 dB	Terminal 3 a 1	4.5 dB	Terminal 4 a 2	3.7 dB	Terminal 1 a 4	18.4 dB	Terminal 2 a 3	17.1 dB	Terminal 3 a 2	17.4 dB	Terminal 4 a 1	19.3 dB	
Terminal 1 a 3	4.9 dB																
Terminal 2 a 4	2.9 dB																
Terminal 3 a 1	4.5 dB																
Terminal 4 a 2	3.7 dB																
Terminal 1 a 4	18.4 dB																
Terminal 2 a 3	17.1 dB																
Terminal 3 a 2	17.4 dB																
Terminal 4 a 1	19.3 dB																

Filtro Pasabanda (Newport TF-1565-0.8-N-3.0-A-Z)

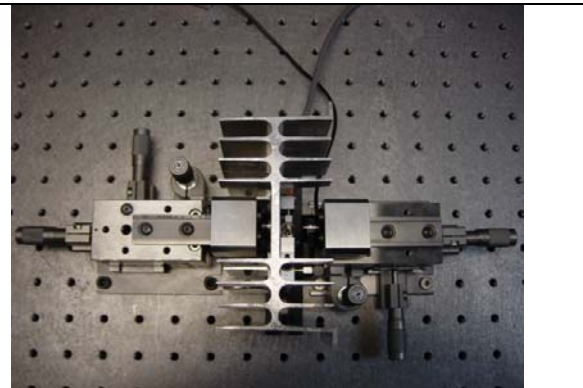
BW 1.5 nm
2.29 dB de atenuación



Fuentes de emisión láser. (ANDO AQ4320D)



Controlador de Temperatura y Corriente (LDC-3744B)



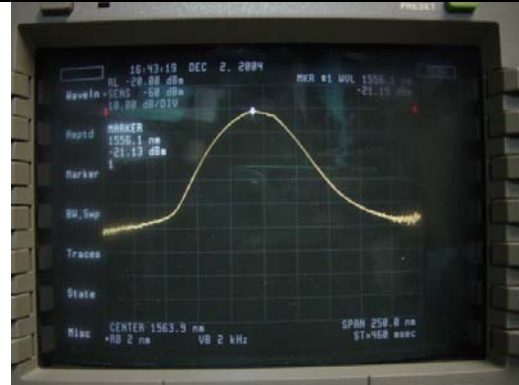
AOS en su montura

Caracterización de la Emisión Espontánea Amplificada del AOS.

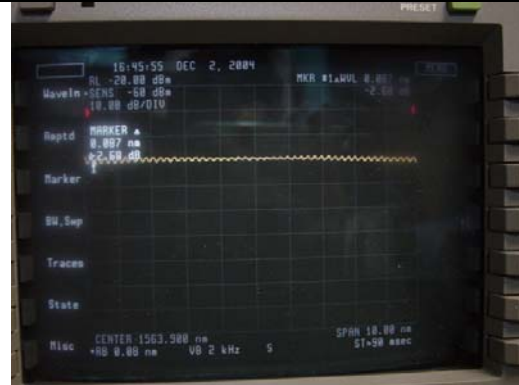
Temperatura=25°C
Corriente= 500mA

Faceta Izquierda

Ganancia Pico 1558.7nm
Ancho de Banda (3dB) 23.4nm
Ancho de Banda 159.7nm
Rizo 4.6dB



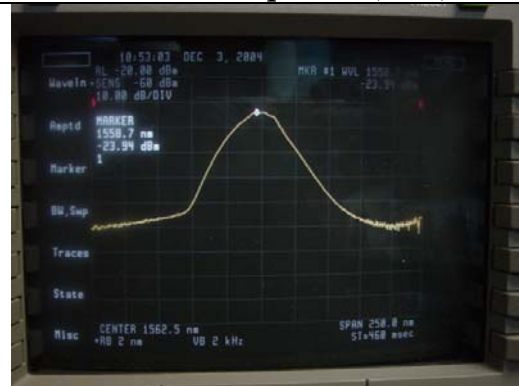
Faceta Izquierda



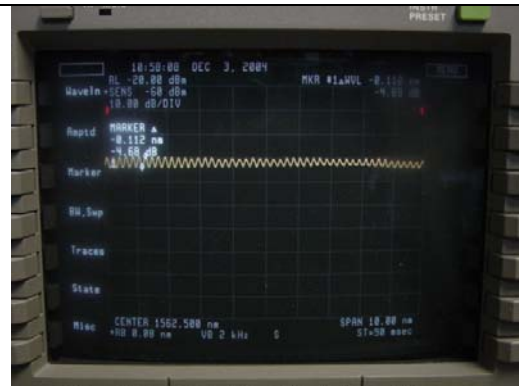
Faceta Izquierda (Rizo)

Faceta Derecha

Ganancia Pico 1556.1nm
Ancho de Banda(3dB) 22.2nm
Ancho de Banda 167.5nm
Rizo 2.68dB

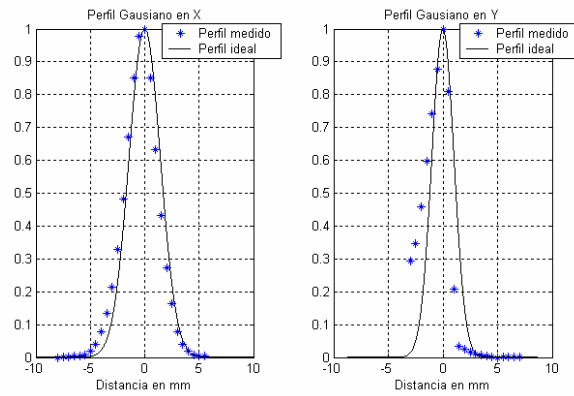
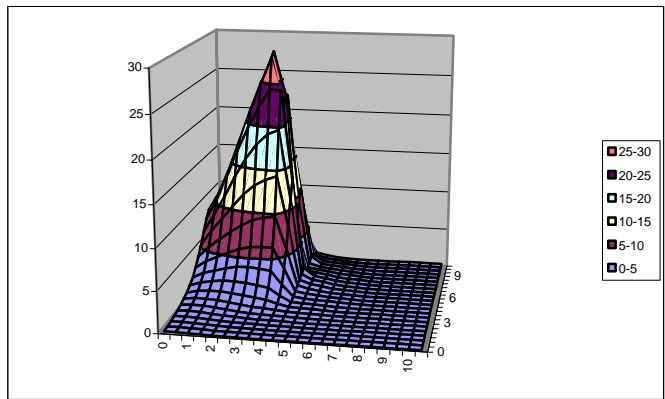


Faceta Derecha

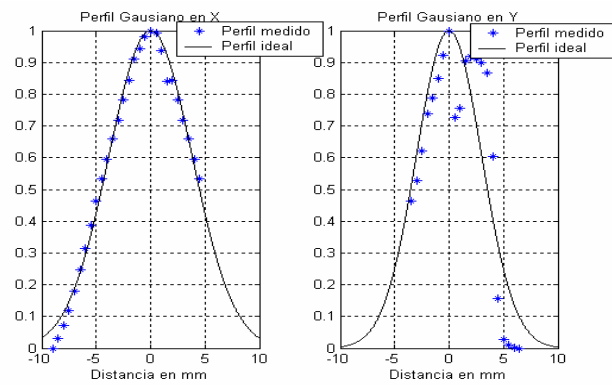
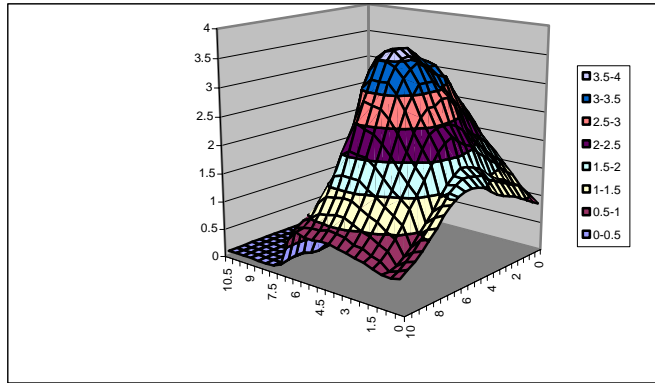


Faceta Derecha (Rizo)

Medición del Perfil de Intensidad de la Emisión Espontánea Amplificada del AOS.



Faceta Derecha (Distancia de la lente captadora = 3mm)



Faceta Izquierda (Distancia de la lente capturadora = 7.5mm)

