

Ensayos

Dispositivos semiconductores

amplificadores de luz y sus aplicaciones

Resumen

En este artículo se describen los principios básicos de operación de uno de los dispositivos amplificadores de luz más importantes en el campo de las comunicaciones ópticas: los amplificadores ópticos de semiconductor (AOS). Se comienza con una descripción detallada de la formación de bandas de energía en un semiconductor, definiendo a un semiconductor intrínseco y a un extrínseco. Posteriormente se describe una unión *p-n* y una *doble heterounión*, que es en efecto la estructura de un AOS, para después describir la manera en que dichos dispositivos permiten la amplificación de un campo óptico incidente. Como parte final se describen algunas de sus aplicaciones más importantes, entre las que se encuentra la conversión en longitud de onda basada en el proceso de mezcla de cuatro ondas.

Abstract

This article describes the basic operating principles of one of the most important light amplifying devices in the field of optic communications: semiconductor optic amplifiers (SOA). The study begins with a detailed description of the formation of energy bands in a semiconductor, defining an intrinsic and an extrinsic semiconductor. Then, there is a description of a *p-n* union and a double heterounion, which is in fact the structure of an SOA; this is followed by a description of the way in which these devices allow the amplification of an incident optic field. The last part describes some of its most important applications, among which we find the conversion into wave longitud based on the process of mixing four waves.

Abstrait

Dans cet article sont décrits les principes de base d'opération d'un des dispositifs amplificateurs électriques les plus importantes dans le domaine des communication optiques: les amplificateurs optiques de semi-conducteurs (AOS). L'article commence par une description détaillée de la formation des bandes d'énergie dans un semi-conducteur, définissant un semi-conducteur intrinsèque et un semi-conducteur extrinsèque. Puis on décrit une union *p-n* y et une *doble hétéro-union*, qui est en effet, la structure d'un AOS, pour ensuite décrire la manière dont les dits dispositifs permettent l'amplification dans un champ optique incident. Enfin, sont décrites quelques unes de leurs applications les plus importantes, entre lesquelles se trouvent la conversion dans la longitude d'onde basée sur le processus du mélange de quatre ondes.

* Ramón G. Maldonado Basilio

Introducción

La transmisión de datos de alta velocidad representa un papel muy importante en nuestros días, debido a los numerosos servicios existentes que demandan velocidades cada vez más rápidas. Para este efecto, uno de los medios de comunicación más ampliamente utilizado para la transmisión rápida de información es la fibra óptica, que con respecto a otros medios de comunicación, ya sean alámbricos o inalámbricos, tiene la ventaja de presentar un enorme ancho de banda y un bajo nivel de ruido [Borella et al, 1997]. De esta manera se desarrollan e implementan los primeros sistemas de comunicaciones ópticas, en donde se envía una portadora de un canal de información en cada fibra óptica. Sin embargo, para una transmisión a grandes distancias, es necesario el uso de repetidores y regeneradores de señal, lo que implica una transformación de la señal óptica en señal eléctrica para su regeneración y posteriormente la transformación de la señal eléctrica en señal óptica para su retransmisión [Borella et. al., 1997].

* Profesor Investigador de la Universidad Tecnológica de la Mixteca

Esta situación de convertir una señal del dominio óptico al dominio eléctrico y viceversa se vuelve más crítica con el desarrollo de los sistemas de comunicaciones ópticas multicanalizados en longitud de onda (WDM, Wavelength División Multiplexing), en donde no solo se envía una portadora en cada fibra, sino que se envía un gran número de portadoras con diferente longitud de onda, todas ellas sobre el mismo medio de comunicación [Keiser, 1999]. Es aquí donde se requiere de dispositivos que no solamente realicen las funciones de amplificación, sino también muchas otras funciones como la conmutación, enrutamiento, control, etc., con la condición de que todo el procesamiento o manipulación de las señales se realice totalmente en el dominio óptico.

Dentro de este escenario, uno de los dispositivos más prometedores para utilizarse en los sistemas WDM es el amplificador óptico de semiconductor (AOS, Amplifier Optical Semiconductor), que si bien es cierto su desempeño como amplificador es inferior al de los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier), ofrece las ventajas de ser bombeado eléctricamente y de prestarse naturalmente a la integración dentro de un circuito [Lee, 1997]. Cabe hacer notar que los AOS pueden denominarse también como amplificadores de luz, dando el nombre genérico de luz a la radiación electromagnética, independientemente de que sea visible o no. Además de las funciones antes mencionadas, se pueden realizar otras funciones optoelectrónicas necesarias en los sistemas WDM, tales como la conversión en longitud de onda [Joergensen et al, 1993], la implementación de compuertas lógicas [Nesset *et al*, 1993], la recuperación de sincronización [Patrick and Manning, 1994], la generación de señales ópticas a partir de un coeficiente de fase - amplitud negativo [Soto, 1996], etc.

Así pues, debido a la importancia de los AOS en las comunicaciones ópticas en general, en este artículo se presentan sus principios básicos de operación, iniciando con una descripción de la formación de bandas de energía en semiconductores, así como de los procesos de recombinación radiativa entre electrones y huecos que se presentan en la unión entre dos materiales semiconductores contaminados con diferentes impurezas (*unión p-n*) y en una doble heterounión. Por otro lado, se discute la diferencia de operación entre un AOS y un láser de semiconductor y finalmente de des-

cribe una de las aplicaciones más importantes de los AOS que es la conversión en longitud de onda basada en el proceso de mezcla de cuatro ondas.

Bandas de energía en semiconductores

Para entender el comportamiento de un AOS, es necesario revisar algunos conceptos fundamentales que permiten establecer el escenario y las condiciones de operación de estos dispositivos.

De esta manera, un modelo atómico simplificado describe al átomo como un núcleo alrededor del cual se encuentran girando los electrones en órbitas discretas, como se muestra en la figura 1a. La última órbita que bajo condiciones normales se encuentra llena o parcialmente llena de electrones se denomina *orbital de valencia* y la primera órbita más alejada del núcleo que bajo condiciones normales se encuentra libre de electrones se denomina *orbital de excitación*. Un átomo con uno o más electrones en el orbital de excitación se dice que se encuentra en un *estado excitado* [Ankrum, 1971].

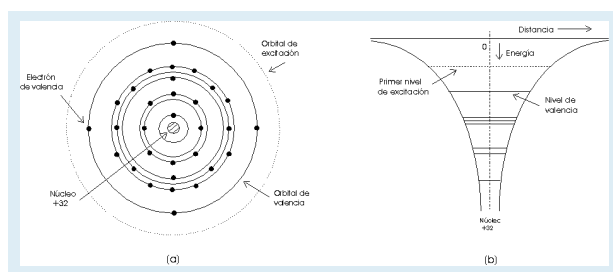


Figura 1. Modelo atómico simplificado: (a) Los electrones se encuentran girando alrededor del núcleo en órbitas discretas; (b) Diagrama de niveles discretos de energía para un átomo

Para un tipo particular de átomos, cada una de las órbitas tiene una cantidad finita de energía asociada, por lo que se dice que los electrones ocupan *niveles de energía*. Un electrón que normalmente ocupa un nivel de energía E_1 se puede desplazar hacia un nivel de energía superior E_2 si el átomo recibe una energía igual a $E_2 - E_1$ llamada *cuanto de energía*. Si el átomo recibe suficiente energía, un electrón puede ser desplazado de su orbital normal o de un orbital de excitación hacia un punto suficientemente lejos, de tal manera que se encuentre libre de la influencia del núcleo. En este caso se dice que el átomo se encuentra *ionizado*, convirtiéndose en un ion positivo.

Para este modelo atómico simplificado se establece el diagrama de *niveles discretos* de energía, como el mostrado en la figura 1b, en donde la longitud de las líneas horizontales representa el diámetro de cada órbita y el eje vertical representa la energía potencial asociada con cada órbita [Ankrum, 1971].

Por otro lado, al considerar una situación más real, por ejemplo un cierto volumen consistente de un conjunto de átomos cuyo espaciamiento es suficientemente grande, se tiene entonces que los niveles de energía de todo el sistema multiatómico son simplemente los mismos que los presentados para cada átomo individual. Sin embargo, al considerar un volumen con un conjunto de átomos cercanamente espaciados, por ejemplo los átomos de una estructura cristalina, los electrones de cada átomo se encontrarán suficientemente cerca de los electrones de los átomos adyacentes y sentirán la influencia de las fuerzas ejercidas por estos átomos. De esta manera, para todo el sistema multiatómico se tendrá una gran cantidad de niveles de energía muy próximos a los niveles que se presentan en un átomo individual [Ankrum, 1971].

En otras palabras, el efecto que produce el agrupamiento de los átomos, es el de reducir la energía requerida para que un electrón se mueva hacia un átomo adyacente. El resultado es la compartición de los niveles de energía más altos para todos los átomos. Esto significa que los electrones de valencia sirven como enlace entre los átomos adyacentes y no pertenecen únicamente a un átomo.

A medida que se considera un mayor número de átomos, se presenta un mayor desdoblamiento de los niveles de energía, de manera que el espaciamiento entre estos niveles se vuelve insignificante y se habla entonces de *bandas de energía* permitidas. Dichas bandas son tratadas como si existiera una distribución continua de energías permitidas para los electrones, como se muestra en la figura 2 [Ankrum, 1971].

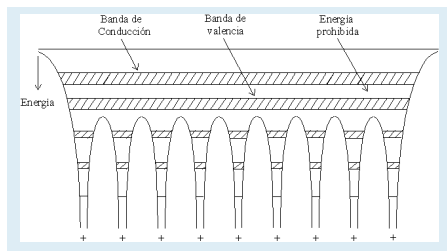


Figura 2. Diagrama de niveles de energía para un material formado por un conjunto de átomos cercanamente espaciados

La banda formada por el desdoblamiento de los niveles de excitación es nombrada *banda de conducción* y el desdoblamiento de los niveles de valencia forma la *banda de valencia*. En ausencia de excitación, normalmente la banda de conducción se encuentra vacía de electrones y la banda de valencia se encuentra llena.

Con base a esto se establece la existencia de una *banda prohibida* entre la banda de conducción y la de valencia, es decir, un intervalo de energías en la cual no hay niveles de energía permitidos para los electrones, denominada *energía del gap*. Así pues, un *semiconductor* se puede definir como un material sólido cristalino o amorfo con una energía prohibida moderada, cuya magnitud se encuentra entre las energías prohibidas correspondientes a los conductores y a los aislantes.

La formación de las bandas de energía en semiconductores se puede visualizar también desde el punto de vista cuántico, a través de la solución de la ecuación de Schrödinger para la energía del electrón dentro del potencial periódico inherente a la estructura cristalina, resultando en un continuo de niveles de energía. Los niveles de energía son nombrados *estados cuánticos* y de acuerdo al principio de exclusión de Pauli cada estado puede estar ocupado sólo por un electrón [Saleh and Teich, 1991]. Bajo ciertas aproximaciones se considera una estructura de bandas parabólicas (ver figura 3a), es decir, una dependencia parabólica entre la energía del electrón y el vector de onda k asociado a la *amplitud de probabilidad* de encontrar al electrón en una posición determinada dentro de la red cristalina [Feynman et al, 1964].

Distribución de Fermi

Siguiendo con la descripción de la formación de bandas de energía, la distribución de los niveles de energía que los electrones pueden ocupar en un semiconductor está determinada por la *distribución de Fermi*. Esta distribución considera sobre uno de sus ejes la energía de los electrones E y sobre el otro eje la densidad de electrones (número de electrones por unidad de volumen) cuya energía se encuentra dentro de un intervalo infinitesimal de energía dE . Como se muestra en la figura 3, la distribución de energías del electrón es igual al producto de la densidad de estados cuánticos o niveles de energía $S(E)$ por la probabilidad de que

tales estados se encuentren ocupados $f(E)$ dentro de un intervalo infinitesimal de energía dE [Ankrum, 1971].

Esta última probabilidad se denomina *factor de Fermi* y depende de la densidad de electrones y de la temperatura. Dentro del factor de Fermi se encuentra el *nivel de Fermi* definido como el nivel de energía que tiene una probabilidad de ocupación igual a 0.5.

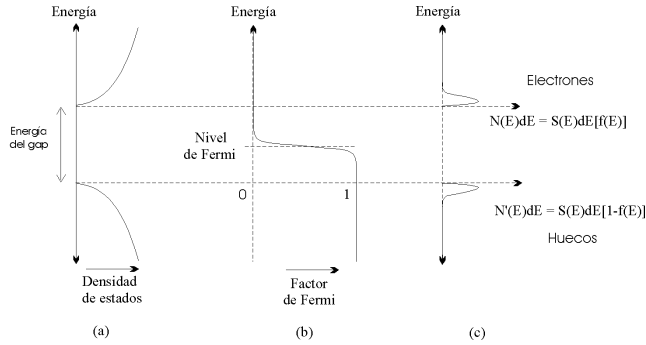


Figura 3. Curva de distribución de energías de los electrones en la banda de conducción y de los huecos en la banda de valencia: (a) Densidad de estados; (b) Factor de Fermi en un semiconductor intrínseco; (c) Distribución de energías

Unión P-N

Antes de definir a una unión *p-n*, es conveniente mencionar que un *semiconductor intrínseco* es un material formado por un solo tipo de átomos o de elementos químicos, con una cantidad insignificante de impurezas. Mientras que un *semiconductor extrínseco* es un material al cual se le han agregado átomos de otro elemento químico con una cantidad diferente de electrones de valencia. Así, un semiconductor *tipo n* tiene átomos de impureza con una cantidad mayor de electrones de valencia y estos átomos aportan electrones a la banda de conducción. En un semiconductor *tipo p* los átomos de impureza tienen una cantidad menor de electrones de valencia y aportan huecos a la banda de valencia [Sze, 1969].

Ahora bien, a la unión entre dos regiones de un material semiconductor contaminadas con diferentes impurezas, es decir, una región tipo *p* y otra región tipo *n*, se le denomina unión *p-n*. [Saleh and Teich, 1991]. A temperatura de 0°K , los electrones donadores de la región *n* y los huecos de la región *p* se encuentran unidos a sus átomos. Al incrementarse la temperatura se liberan algunos electrones y huecos de sus átomos de impureza y se crean portadores libres que forman una corriente de difusión, los electrones de la región *n* se

desplazan hacia la región *p* y viceversa. Este flujo de portadores crea iones positivos en la región *n* y negativos en la región *p*, formándose un campo eléctrico en la unión. Este campo eléctrico se opone a la difusión de más portadores y se genera en la unión una delgada *región de agotamiento* de portadores libres, como se muestra en la figura 4.

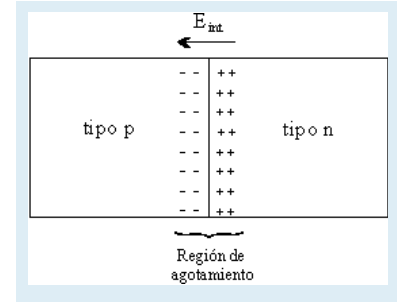


Figura 4. Región de agotamiento de portadores libres para una unión p-n en equilibrio térmico

El campo eléctrico formado en la unión establece un potencial interno V_{int} entre las dos regiones que provoca el desalineamiento de sus bandas de energía. Mientras mayor sea la concentración de impurezas y la temperatura, mayor será el potencial interno y el desalineamiento de las bandas. Sin embargo, ya que el nivel de Fermi es una variable termodinámica, en estas condiciones de equilibrio térmico tal nivel de Fermi se mantiene constante a través de la unión [Peyghambarian et. al., 1993] como se muestra en la figura 5.

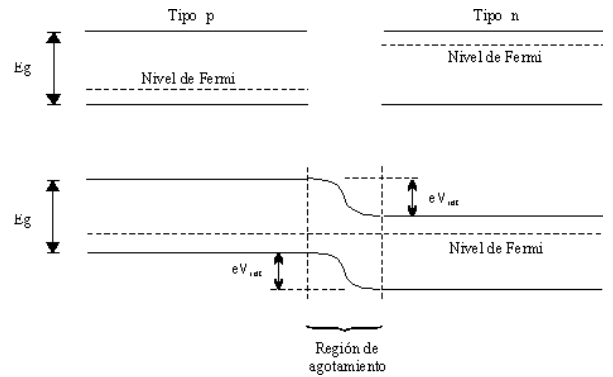


Figura 5. Diagrama simplificado de las bandas de energía para semiconductores en equilibrio térmico: (a) Semiconductores tipo p y tipo n antes de formar la unión; (b) Semiconductores tipo p y tipo n después de formar la unión p-n

Al polarizar directamente la unión *p-n* se reduce el potencial interno V_{int} y debido a que se pierde el equilibrio ya no se habla de un nivel de Fermi, sino de un

cuasi nivel de Fermi, separándose cada uno de los niveles en proporción al potencial externo aplicado [Peyghambarian, 1993]. Si el potencial externo aplicado es tal que el potencial interno no puede evitar que los portadores mayoritarios crucen la unión, estos portadores se inyectan a la unión y se establece un flujo de corriente. En otras palabras, en la unión (denominada región activa) se presenta un *cuasi* nivel de Fermi para la banda de conducción (que se encuentra por arriba de la parte inferior de esta banda) y otro para la banda de valencia (que se encuentra por abajo de la parte superior de esta banda), como se muestra en la figura 6.

Esto significa que en la región activa, la banda de conducción estará llena de electrones abajo de su cuasi nivel de Fermi y que la banda de valencia estará vacía de electrones arriba de su cuasi nivel de Fermi. De este modo se establece el proceso de *inversión de población*, es decir una situación inversa a la presentada en el equilibrio térmico, donde la banda de conducción se encontraba vacía de electrones y la banda de valencia llena.

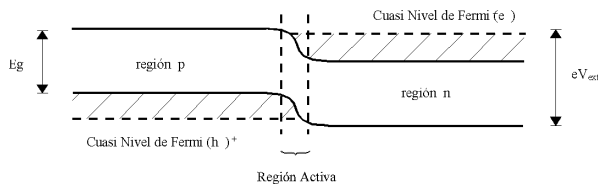


Figura 6. Diagrama simplificado de las bandas de energía para la unión p-n polarizada directamente

Por otro lado, al polarizar inversamente la unión p-n, el potencial interno se incrementa y evita el flujo de corriente.

Amplificación óptica dentro de un AOS

Básicamente un AOS está constituido por una doble heterounión, entendiéndose por heterounión a la unión entre materiales semiconductores diferentes, cada uno contaminado con diferentes impurezas, como se muestra en la figura 7. Con respecto a las uniones p-n, en las heterouniones se presentan algunas ventajas como son el confinamiento de portadores y el guiado de la señal óptica.

De manera explícita, al establecerse la inversión de población se presenta el confinamiento de portadores en la región activa del AOS debido a que los materiales

semiconductores que conforman las regiones tipo p y tipo n poseen una energía prohibida mayor que la energía prohibida de la región activa. Es decir, la región activa de esta doble heterounión se comporta como un "contenedor" de electrones y de huecos excitados, evitando que se difundan hacia otras regiones del semiconductor [Saleh and Teich, 1991], como se muestra en la figura 8. Por otro lado, debido a la diferencia en el índice de refracción con respecto a las regiones p y n, la región activa se comporta como una guía de onda óptica [Peyghambarian, 1993].

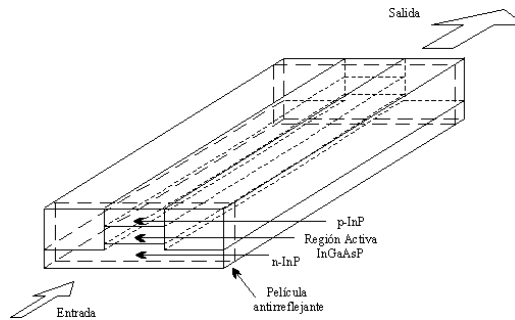


Figura 7. Diagrama general de la estructura de un AOS: las regiones p y n rodean a la región activa formando la doble heterounión y las películas antirreflejantes permiten al AOS comportarse como un amplificador de onda progresiva

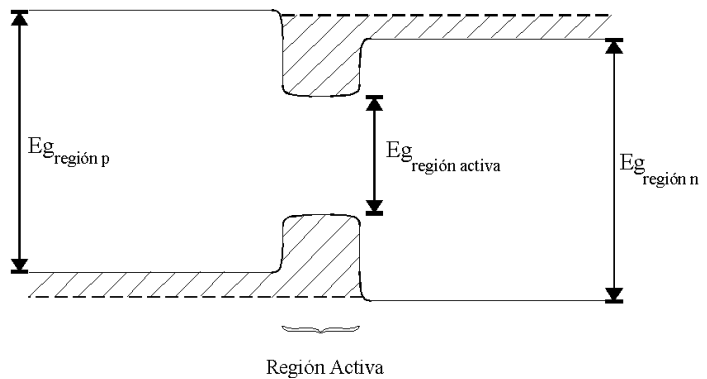


Figura 8. Diagrama simplificado de bandas de energía para una doble heterounión polarizada directamente (el confinamiento de portadores en la región activa se presenta debido a que la energía prohibida de las regiones p y n es mayor que la de la región activa)

En la región activa los electrones excitados se recombinan con los huecos, al caer de la banda de conducción a la banda de valencia, mediante los procesos de emisión espontánea y de emisión estimulada. En la *emisión espontánea* un electrón decae espontáneamente liberando su exceso de energía en forma de un

fotón, con energía, polarización y dirección de propagación aleatorias [Verdeyen, 1995].

En el otro caso, la *emisión estimulada* es la clave de la operación del AOS y ocurre cuando un fotón (con energía igual a la energía de transición de un electrón) interactúa con un electrón de la banda de conducción y provoca que se relaje hacia la banda de valencia, liberando su exceso de energía en forma de un fotón. Como resultado de la emisión estimulada se obtienen dos fotones: el fotón incidente y el fotón liberado. El fotón liberado posee las mismas características que el fotón incidente, es decir tiene la misma frecuencia, fase, polarización y dirección de propagación [Verdeyen, 1995]. De esta manera, a través de la emisión estimulada se incrementa el número de fotones, aumentando la amplitud del campo óptico incidente en la región activa del AOS.

Por otro lado, una característica importante de los AOS que los vuelve operacionalmente diferentes a los láseres de semiconductor (LASER, Light Amplification by Stimulated Emisión of Radiation), es la implantación de películas antirreflejantes en sus facetas de entrada y salida, permitiendo que el AOS se comporte como un amplificador de onda progresiva [Lee, 1997]. Con la implantación de dichas películas antirreflejantes, se logra reducir la reflectividad de aproximadamente 0.3 de un láser de semiconductor hasta aproximadamente 10^{-5} para un AOS [García, 1997]. Esta comparación se ilustra en las figuras 9a y 9b.

Por un lado, en la figura 9a se ilustran burdamente los elementos esenciales para la operación de un láser: un mecanismo de bombeo eléctrico, un medio amplificador y una etapa de retroalimentación óptica constituida por una cavidad resonante [Siegman, 1986]. En el otro caso, en la figura 9b, se muestran los mismos elementos esenciales para la operación de un láser pero sin la retroalimentación óptica. Esta retroalimentación se evita con la implantación de películas antirreflejantes a la entrada y salida del dispositivo, convirtiéndolo en un amplificador de onda progresiva.

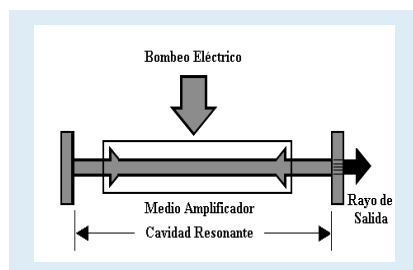


Figura 9a. Diagrama ilustrativo del campo óptico generado en una cavidad resonante y un medio amplificador (láser)

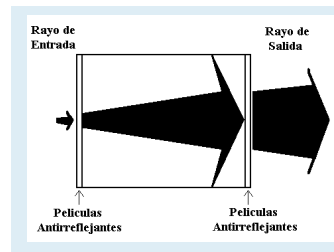


Figura 9b. Diagrama ilustrativo de la amplificación de un campo óptico a medida que se propaga en un AOS

Finalmente, además de su amplio ancho de banda de amplificación (desde 1525 nm hasta 1595 nm aproximadamente), otra característica de los AOS que los vuelve atractivos para aplicarlos en los sistemas de comunicaciones ópticas es su reducido tamaño. Así por ejemplo, los AOS de la primera generación presentaban una longitud de 250 mm, mientras que los AOS más recientes presentan una longitud mayor, de aproximadamente 1.5 mm [Nesset et al, 1998]. En ambos casos, su sección transversal es considerablemente inferior, de 3 mm de espesor por 250 nm de anchura aproximadamente.

Aplicaciones

Debido a la naturaleza y forma de operación de los AOS, se pueden implementar muchas aplicaciones con estos dispositivos, tanto en su modo lineal de operación como en su modo no lineal. Sin embargo, las aplicaciones más importantes surgen cuando los AOS operan en su modo no lineal.

En este punto, es pertinente aclarar que los mecanismos físicos responsables del comportamiento no lineal de los AOS y en general de los láseres de semiconductor no se han entendido y dominado completamente, sin embargo, tal comportamiento se atribuye principalmente a los mecanismos no lineales del hoyo espectral (SHB, Spectral Hole Burning), del calentamiento de portadores (CH, Carrier Heating) y de la pulsación de la densidad de portadores (CDP, Carrier Density Pulsation) [Huang and Caspersen, 1993]. Así pues, con base en estos mecanismos no lineales, una de las aplicaciones más importantes de los AOS es la conversión en longitud de onda. Este proceso consiste en cambiar o trasladar la longitud de onda de la portadora de un canal de información a otra longitud de onda diferente, permitiendo que un sistema WDM sea reconfigurable, ayudando a reducir la probabilidad de blo-

queo o pérdida de información entre canales con portadoras a la misma longitud de onda [Nesset, 1998].

La conversión en longitud de onda puede implementarse en un AOS a través de tres diferentes métodos: la modulación de ganancia cruzada (XGM), la modulación de fase cruzada (XPM) y el proceso de mezcla de cuatro ondas (FWM) [Nesset, 1998], sin embargo éste último es el más atractivo y eficiente.

De manera general, el proceso de FWM se presenta en un AOS al hacerle incidir sobre una de sus caras de entrada dos campos electromagnéticos, uno muy intenso llamado "bomba" y otro menos intenso llamado "sonda". La presencia simultánea de los dos rayos (interferencia) provoca un batimiento a la diferencia de frecuencias ópticas, llamada *frecuencia de desacuerdo*, de tal manera que a la entrada del AOS se tendrá una fracción de la intensidad del campo de bomba, más otra fracción de la intensidad del campo de sonda, más otro término de intensidad que varía cosenoidalmente a la frecuencia de desacuerdo. Este batimiento produce una modulación de la emisión estimulada, provocando la modulación de la densidad de portadores y de los mecanismos no lineales. Esto modulará la ganancia y el índice de refracción del medio, produciéndose una modulación en amplitud y en fase de la fracción de los campos de bomba y de sonda (constantes a la entrada del amplificador), generándose armónicos de modulación a ambos lados de estos rayos, como se muestra en la figura 10 [Uskov, 1994]. El armónico generado al lado de la bomba (del lado contrario a la sonda) es proporcional al conjugado complejo de la sonda y se denomina "señal conjugada".

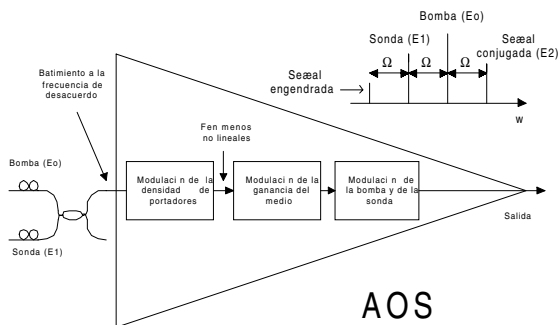


Figura 10. Diagrama esquemático que ilustra el proceso de FWM dentro de un AOS

De ésta forma, para la conversión en longitud de onda mediante el proceso de FWM, la señal de bomba

se obtiene de una fuente láser de onda continua y posee una potencia grande, mientras que la sonda es de menor potencia y contiene la información de la señal por convertir. Como resultado del proceso de FWM, la señal conjugada constituye la señal convertida en longitud de onda. La importancia que presenta este proceso es, en primer lugar, que la señal de información puede tener cualquier formato de modulación y en segundo lugar, que debido a que la señal convertida es la conjugada de la señal de información, se puede compensar la dispersión cromática de la fibra óptica. Adicionalmente, este fenómeno permite una alta tasa de bits de la señal de información sin comprometer la tasa de extinción [Nesset, 1998].

Conclusiones


El entendimiento de la formación de bandas de energía en semiconductores es esencial para comprender el comportamiento de los amplificadores ópticos de semiconductor. Se puede visualizar desde el punto de vista clásico mediante el modelo atómico simplificado y desde el punto de vista cuántico a través de la solución de la ecuación de Schrödinger para la energía del electrón dentro del potencial periódico inherente a la red cristalina. Bajo este contexto, la distribución de Fermi determina la distribución de las energías que los electrones pueden ocupar en un material semiconductor.

Los AOS constituyen uno de los dispositivos más prometedores para ser utilizados en los sistemas de comunicaciones ópticas del futuro. Pueden operar en su modo lineal, en donde se aplican como amplificadores ópticos convencionales, o bien pueden operar en su modo no lineal, en donde resultan aplicaciones muy interesantes basadas en los mecanismos no lineales de pulsación de la densidad de portadores (CDP), calentamiento de portadores (CH) y hoyo espectral.

Por otro lado, la región activa de un AOS y en general de una unión *p-n*, es el escenario donde se realiza la recombinación entre pares electrón - hueco. La emisión estimulada es la clave de operación del AOS y permite que se incremente la amplitud de un campo óptico incidente en dicha región.

El proceso de mezcla de cuatro ondas desarrollado dentro de un AOS representa una de las técnicas más interesantes para realizar la conversión en longitud de onda en el dominio óptico, utilizando para ello las no linealidades que se suscitan dentro del semiconductor.

Esta técnica presenta algunas ventajas con respecto a las demás existentes, por ejemplo: la independencia del formato de modulación de la señal por convertir, la posibilidad de compensar la dispersión cromática de las fibras ópticas y la operación a una alta tasa de bits de la señal de información.

Finalmente, el autor desea agradecer al Dr. Horacio Soto Ortiz, del Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada) por el apoyo recibido para la realización de este trabajo 

Bibliografía

ANKRUM, PAUL D.

1971 "Semiconductor Electronics". Prentice Hall. 10th Edition. New Jersey. 548p.

BORELLA, MICHAEL S., JASÓN P. JUE, DHIRITIMAN BANERJEE, BYRAV RAMAMUTH, BISIWANATH MUKHERJEE.

1997 "Optical Components for WDM Lightwave Networks". Proceedings of the IEEE. Vol. 85. Num. 8. 1272-1275 p.

FEYNMAN, RICHARD P., ROBERT B. LEIGHTON, MATTHEW SANDS.

1964 "Lectures on Physics, Quantum Mechanics". Addison Wesley. Massachusetts. 215p.

GARCÍA, EDITH.

1997 "Modelado y caracterización de un amplificador óptico de semiconductor". Tesis de Maestría en Ciencias. CICESE.

HUANG, JIAN; LEE W. CASPERSON.

1993 "Gain and Saturation in semiconductor lasers". Optical and Quantum Electronics. 25: 369-390p

JOERGENSEN, C., T. DURHUUS, C. BRAAGAARD, B. MIKKELSEN AND K. E. STUBKJAER.

1993 "4 Gb/s Optical wavelength conversion using semiconductor optical amplifiers". IEEE Photonics Technology Letters. 5: 657-660p.

KEISER, GERD E.

1999 "A review of WDM Technology and Applications". Optical Fiber Technology. 5(1):4p.

LEE, JUNGKEUN.

1997 "Roles of Semiconductor Laser Amplifier in WDM/TDM Fiber-Optic Communications". Kamiya & Tsuchiya Lab. Department of Electronic Engineering. 1-7 p.

NESSET, D., M.C. TATHAM, L.D. WESTBROOK AND D. COTTER.

1998 "Ultrafast all-optical AND gate for signals at the same wavelength using four wave mixing in a semiconductor laser amplifier". ECOC93. 133-136p.

PATRICK, D.M. AND R.J.MANNING.

1994 "20 Gbit/s all-optical clock recovery using semiconductor nonlinearity". Electronics Technology Letters. 30:151-152p.

PEYGHAMBARIAN, NASSER.

1993 "Introduction to Semiconductor Optics". Prentice Hall. United States of America. 224p.

SALEH, BAHAA E. A., MALVIN CARL TEICH.

1991 "Fundamentals of Photonics". John Wiley & Sons. United States of America. 966p.

SIEGMAN, ANTHONY E.

1986 "Lasers". University Science Books. U.S.A. 1283p.

SOTO, HORACIO; DIDIER ERASME.

1996 "Investigation of non degenerate four wave mixing in semiconductor optical amplifier through bias current modulation". Applied Physics Letters. 68(26).

SZE, S. M.

1969 "Physics of Semiconductor Devices". John Wiley & Sons. New York. 812p.

USKOV, A; J. MORK, J. MARK.

1994 "Wave Mixing in Semiconductor Laser Amplifiers due to carrier heating and spectral hole burning". IEEE Journal of Quantum Electronics. 30(8): 1769-1781p.

VEDEYEN, JOSEPH T.

1995 "Laser Electronics". Prentice Hall. Third Edition. New Jersey. 778p.