

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**DIODOS LÁSER SINTONIZABLES APLICADOS EN  
TELECOMUNICACIONES**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PRESENTADO POR:**

**SANDRO SÉRVULO MEGO ROMERO**

**PROMOCIÓN**

**1999 - 2**

**LIMA – PERÚ**

**2009**

**DIODOS LÁSER SINTONIZABLES APLICADOS  
EN TELECOMUNICACIONES**

A mis padres, y a mi hermana Yesxica  
por su afecto y comprensión.

## **SUMARIO**

En el presente informe se muestran las soluciones que pueden brindar los diodos laser sintonizables a algunas dificultades que presenta la red DWDM cuando trabaja con dispositivos con diodos laser de longitud de onda fija.

Asimismo se presentan algunas nuevas tecnologías de red en donde el diodo láser sintonizable es pieza fundamental en las nuevas funcionalidades brindadas.

Por otro lado se describe el funcionamiento de los diodos láser sintonizables más usados, y se muestran sus principios de operación, así como también sus características más importantes que deben ser tomados en cuenta cuando son aplicados en el campo de las telecomunicaciones.

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b>	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>DIODOS LÁSER SINTONIZABLES</b>	
1.1 Introducción	2
1.2 Métodos de sintonización	2
1.3 Tipos de sintonización	5
1.4 Diodos láser sintonizables de rango angosto	6
1.4.1 Diodos láser sintonizable DFB	7
1.4.2 Diodos láser sintonizable DBR	8
1.5 Diodos láser sintonizables de rango amplio	9
1.5.1 Diodos láser sintonizable SGDBR	12
1.5.2 Diodos láser sintonizable SSGDBR	16
1.6 Aspectos a considerar en su aplicación en telecomunicaciones	18
1.6.1 Transmisores y transponders sintonizables	20
1.6.2 Conversores de longitud de onda sintonizables	22
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>APLICACIONES EN REDES DWDM</b>	
2.1 Técnicas de multiplexación	24
2.1.1 TDM	24
2.1.2 WDM	25
2.2 DWDM	26
2.2.1 Ventajas de DWDM	27
2.3 Aplicaciones de diodos láser sintonizables en DWDM	28
2.3.1 Limitaciones en DWDM	28
2.3.2 Soluciones con el uso de diodos láser sintonizables	28
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>USO DE DIODOS LASER SINTONIZABLES EN OTRAS TECNOLOGIAS DE RED</b>	
3.1 Reconfigurable OADM (ROADM)	31
3.1.1 Aprovisionamiento de red con OADM de longitud de onda fija	31
3.1.2 Ventajas con el uso de ROADM	33
3.2 Photonic-packet switching	33

<b>CONCLUSIONES</b>	<b>35</b>
<b>ANEXO A</b>	
<b>FUNDAMENTO TEORICO DE DIODOS LASER</b>	
A.1 La generación de luz	37
A.1.1 Emisión espontánea	37
A.1.2 Emisión estimulada	37
A.2 Diodos emisores de luz (LED)	39
A.3 Diodos láser	43
A.3.1 Principios del láser	43
A.3.2 Láser Fabry-Perot	45
A.3.3 Estructuras de diodos láser	50
A.3.4 Diodo láser DFB	53
A.3.5 Diodo láser DBR	57
A.3.6 Diodo láser VCSEL	58
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>61</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>62</b>

## PROLOGO

En los últimos años de los 80's y comienzos de los 90's surgió el desarrollo de los diodos láser sintonizables. Al inicio sólo se lograban pequeños rangos de sintonización, menos de 8nm, en base a técnicas aplicadas a diodos láser de longitud de onda fija, como por ejemplo diodos láser DBR y DFB. Pero a mediados de los 90's, en la universidad de Santa Bárbara California, el equipo del Dr. Larry Coldren desarrolló un método para sintonizar un diodo láser basado en el funcionamiento del calibrador de Vernier y así crearon el diodo láser sintonizable SGDBR. Este diodo láser sintonizable presenta un amplio rango y gran velocidad de sintonización, con lo que se logró dar un impulso a sus aplicaciones en telecomunicaciones, ya que con este tipo de diodo láser sintonizable se puede cubrir tranquilamente la banda C usada por DWDM.

El presente informe tiene por objetivo presentar las ventajas del uso de los diodos láser sintonizables en redes como DWDM, donde el uso de transponders con diodos láser de longitud de onda fija causan limitaciones en los procesos de mantenimiento e implementación de la red.

El capítulo I presenta los diferentes métodos y tipos de sintonización y el funcionamiento de los principales diodos láser sintonizables. También, las consideraciones que se deben tomar en cuenta en el momento de su aplicación en telecomunicaciones.

El capítulo II muestra las ventajas del uso de los diodos láser sintonizables en las redes DWDM, salvando las dificultades en la implementación y mantenimiento de la red que ocasionan los transponders con diodos laser de longitud de onda fija.

Finalmente, el capítulo III describe algunas nuevas tecnologías de red que presentan importantes ventajas sobre las tradicionales y en las que el diodo láser sintonizable es una parte fundamental de su funcionamiento.

# CAPÍTULO I

## DIODOS LASER SINTONIZABLES

### 1.1 Introducción

El diodo láser dio un impulso enorme, entre otros, al campo de las telecomunicaciones, en donde nos permitió transportar eficientemente altos niveles de información sobre la fibra óptica a grandes distancias y a altas velocidades, y además, con bajos niveles de dispersión. Pero su característica de funcionamiento con longitud de onda fija presentaba limitaciones en las redes nuevas, es por eso que en los últimos años ha ganado importancia el nuevo tipo de diodos láser con funciones de sintonización de la longitud de onda, llamados diodos láser sintonizables. En base a ellos, en las redes actuales se brindan nuevas características que superan algunas limitaciones de las redes que usan solamente dispositivos con longitud de onda fija, como se verá más adelante.

Además se han creado nuevas tecnologías de red que aventajan a las tradicionales (que trabajan con longitud de onda fija) y que permiten ahorros de tiempo y costos. En todas estas nuevas tecnologías el diodo láser sintonizable ha jugado un papel muy importante y es una pieza clave para la creación y desarrollo de ellas.

Mientras la demanda de ancho de banda continúe en aumento sobre la red, debido a los servicios de multimedia e Internet, las tecnologías de red tenderán a ser más dinámicas y eficientes, por lo que tecnologías con diodos láser sintonizables serán las preferidas en un futuro cercano.

### 1.2 Métodos de sintonización

Los métodos más utilizados para conseguir la sintonización de los diodos láser son básicamente 4. El primero está referido a cambiar la longitud de la distancia que la luz debe recorrer entre sus reflexiones para generar el efecto *lasing*, el segundo es la aplicación de un campo eléctrico en la estructura del láser, el tercero es mediante la aplicación de calor (aumento de temperatura) y el cuarto es a través de la inyección de corriente (portadores libres), en lugares específicos de la estructura del diodo.

De ellos solamente el primer método cambia un parámetro distinto a los otros, la longitud  $L$ . En cambio los 3 últimos tienen en común que intentan cambiar el índice de refracción para indirectamente hacer el cambio de longitud de onda.



Como se describe en el anexo A, la longitud de onda de un láser está estrechamente relacionada con el índice de refracción del medio a través del cual ocurren las reflexiones con, por ejemplo, las siguientes fórmulas:

Láser Fabry-Perot:

$$L = \lambda X / 2n \quad (1.1)$$

Láser DFB y DBR:

$$\Lambda = \lambda_g / 2n \quad (1.2)$$

Donde:

L = Longitud de la cavidad del láser.

$\Lambda$  = Periodo de las ranuras en el grating del láser.

$\lambda, \lambda_g$  = Longitudes de onda de operación en cada láser.

n = Índice de refracción

X = Entero arbitrario y representa a los modos generados en la cavidad

Por esta razón, en los métodos descritos a continuación lo que se busca es poder cambiar la longitud de onda a través del cambio del índice de refracción.

#### a) Cambio de índice de refracción por inyección de corriente

La inyección de corriente es el método más frecuentemente usado para variar el índice de refracción de un semiconductor con el fin de sintonizar la longitud de onda.

La corriente se inyecta externamente y su efecto es la reducción del índice de refracción en proporción a la densidad de portadores inyectados (N) según la siguiente fórmula:

$$\Delta n = -\Gamma \Omega N \quad (1.3)$$

En donde:

$\Delta n$  = Variación del índice de refracción.

$\Gamma$  = El factor de confinamiento óptico del modo propagándose en ese medio y se define como la razón de la potencia confinada del modo en el medio vs. La potencia total del modo. Sin unidades.

$\Omega$  = Cambio del índice de refracción n por densidad de portadores N, ( $\text{cm}^3$ )

N = Densidad de portadores inyectados, ( $\text{cm}^{-3}$ )

Normalmente para frecuencias alrededor de 193THz (longitudes de onda alrededor de 1.55 $\mu\text{m}$ ) el valor de  $\Omega$  es aproximadamente  $3 \times 10^{-20} \text{cm}^3$ . [1].

Según se afirma en [1], si la corriente de energización del láser está por encima del umbral (modo operación), en la región activa la densidad de portadores es fijada, y el

resto de portadores sólo contribuirán al efecto lasing y no a incrementar la densidad de portadores. Por eso, esta inyección de corriente no se realiza en la capa activa sino en regiones aledañas como será visto más adelante. La velocidad de sintonización con este método es de unos pocos nanosegundos.

### b) Cambio de índice de refracción por campo eléctrico inducido

Este tipo de método sólo se aplica con éxito en estructuras tipo Quantum Well (descrita en el anexo A), gracias al particular efecto conocido como Quantum Confined Stark (QCSE).

Como se describe en el anexo A (sección A.3.3), en la estructura Quantum Well la banda de conducción y de valencia tienen niveles discretos de energía (sub-bandas), pero además la diferencia de energía entre las primeras sub-bandas de ambas bandas (banda de conducción y banda de valencia) es más grande que la correspondiente en otras estructuras de mayores dimensiones, como se ve en la Fig. 1.1.

Si un campo eléctrico perpendicular al Quantum Well es aplicado, los bordes de ambas bandas son inclinados y la diferencia de energía entre ellas es reducida. Con este efecto se está reduciendo la energía de bandgap (definida en el anexo A) de esta región Quantum Well y por lo tanto también se modifica su índice de refracción.[1]

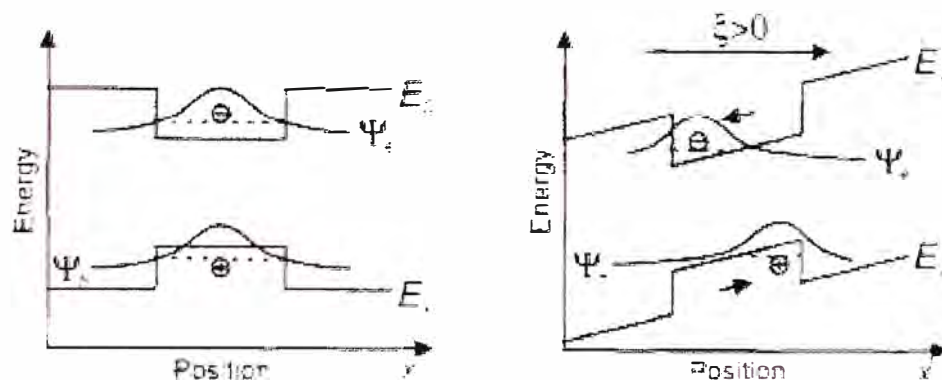


Fig. 1.1 Inclinación de las bandas por efecto QCSE

El cambio de índice de refracción con este método está en el orden de  $10^{-3}$  a  $10^{-2}$ , aplicando un campo eléctrico soportable por la estructura. Aunque son valores pequeños, la ventaja de este método es su velocidad de sintonización ya que para hacer este cambio de índice de refracción solo necesita de unas pocas decenas de pico segundos.

### c) Cambio de índice de refracción por temperatura

El índice de refracción en los semiconductores usados en los láseres exhibe una alta dependencia con la temperatura. Calentando el láser, sin embargo, tiene la desventaja que incrementa el umbral de corriente. Por eso la variación de temperatura está limitada

a pocas decenas de grados. Usualmente un calentamiento resistivo es usado colocando delgadas láminas resistivas en la parte superior de la región de sintonización. La longitud de onda varía linealmente con la temperatura. Por ejemplo para un láser Fabry-Perot con longitud de onda de 1550nm la variación será alrededor de 0.5nm/K y para láseres DFB y DBR será alrededor de 0.1nm/K como se muestra en la Fig. 1.2. La más grande desventaja de este método es su baja velocidad de respuesta que va de microsegundos a milisegundos.

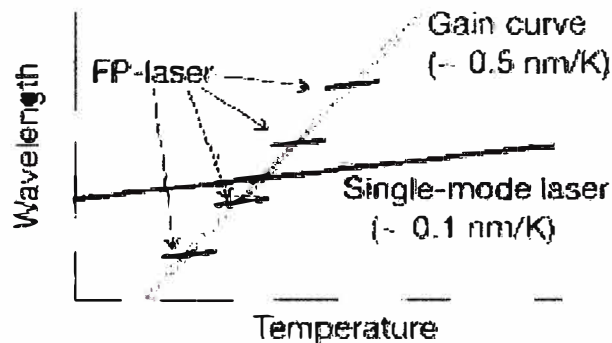


Fig. 1.2 Longitud de onda vs. Temperatura en 1550nm de un Láser InGaAsP/InP

Tabla 1.1 Tabla resumen de los 3 métodos más usados

Parámetro	Inyección de corriente	QCSE	Temperatura
$\Delta n$	-0,04	-0,01	0,01
$\Gamma$	0,5	0,2	0,1
$\Delta\lambda$	-8nm	-1nm	5nm
Calor generado	Grande	Despreciable	Muy grande
Tecnología	Moderada	Demandante	Simple

### 1.3 Tipos de sintonización

Ya se vieron los métodos más usados para sintonizar un diodo láser, ahora se verán los tipos de sintonización. Hay 3 tipos diferentes de sintonización: Continuo, discontinuo y casi-continuo.

#### a) Sintonización continua

Sintonización continua es el esquema ideal desde un punto de vista práctico. La longitud de onda puede ser sintonizada suavemente, en pasos arbitrariamente pequeños sin que la luz láser cambie sus otros parámetros (potencia, ancho de línea, SMSR, definidos en el anexo A). Mediante este método se varia la longitud de onda de un sólo modo longitudinal de la cavidad. En la mayoría de láseres sintonizables que cumplen con este

tipo de sintonización es requerido ajustar sincronizadamente al menos dos controles de parámetros (índices de refracción en distintas secciones) y con la condición que haya una relación de 1 a 1 entre estos 2 (o más) controles. Uno de los valores más altos es de aprox. 13nm o 1.6THz para un láser emitiendo en la región de 193THz o 1550nm.[2]

### b) Sintonización discontinua

Con este tipo se logran longitudes de onda fijas en determinados intervalos de sintonización y está asociada a los modos que se pueden generar dentro del ancho de banda de la ganancia óptica de la sección activa del láser. Si la sección activa es parte de una estructura MultiQuantum Well (MQW), su ancho de banda de ganancia puede ser más de 100nm (en la banda de 1550nm) y discontinuos rangos de sintonización de más de 100nm han sido alcanzados.

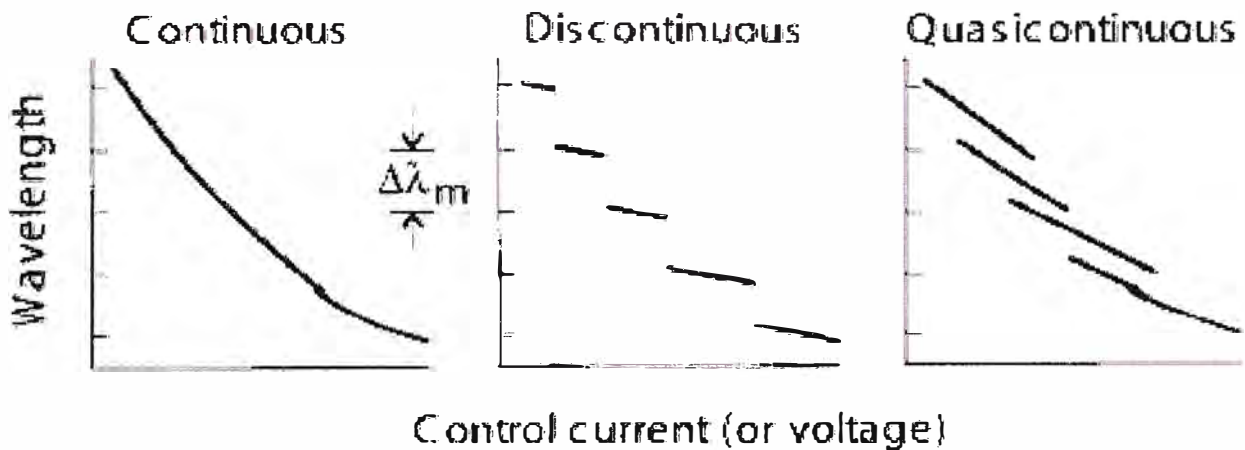


Fig. 1.3 Tipos de sintonización vs. Control de corriente/voltaje

### c) Sintonización casi-continua

Sintonización casi-continua es lograda juntando traslapadamente pequeños rangos de sintonización continua con el fin de cubrir un amplio rango de sintonización como se muestra en la Fig. 1.3. Con este tipo también se han logrado amplios rangos que han cubierto enteramente la banda C (192 a 196THz) del DWDM.

### 1.4 Diodos láser sintonizables de rango angosto

Los diodos láser sintonizables de rango angosto son aquellos diodos de longitud fija a los que se le aplican algunos de los métodos de sintonización ya descritos y en los que sólo se logran un rango de sintonización máximo de alrededor de 10nm. En estos diodos láser se usan por lo general el tipo de sintonización continua.

### 1.4.1 Diodo láser sintonizable DFB

El método más efectivo para sintonizar los diodos láser DFB (descrito en el anexo A) es a través del cambio de la temperatura en la región activa que altera el índice de refracción el cual sintoniza la longitud de onda de operación (esto es, porque el método de inyección de corriente es más complicado debido a que la rejilla está a lo largo de la cavidad y conseguir el aumento de la densidad de portadores para variar el índice de refracción es más difícil como se explica en la sección 1.2-a). Típicamente el rango de sintonización de este tipo de diodos es por debajo de 5nm. En la banda de 1550nm, la longitud de onda del diodo DFB cambia aproximadamente  $0.1\text{nm}/^\circ\text{C}$ , entonces un rango de entre 3 – 4 nm es posible con un variación de temperatura de entre 30 – 40  $^\circ\text{C}$ .

Por ejemplo el diodo DFB InGaAsP Nortel LCW508ET tiene un rango de 3nm variando la temperatura en el láser de 0 a  $40^\circ\text{C}$ , con este rango sólo puede ser sintonizado a 4 longitudes de onda definidos por la ITU-T en la banda C.

Para sintonizar un amplio rango de longitudes de onda, los fabricantes han desarrollado Arrays de 8 -12 DFB, en el que cada DFB individual sintoniza de 3-4nm (también a través de la temperatura).

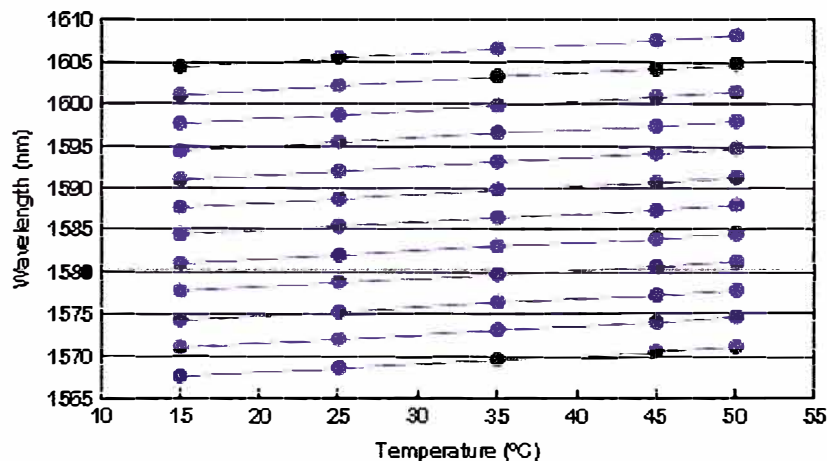


Fig. 1.4 Sintonización Casi-continua de un array 12-DFB en banda L

Estos arrays usan DFB con diferentes periodos de rejilla ( $\Lambda$ ) de modo que las longitudes de onda de Bragg de cada DFB difiera de la que está a su lado, en el array, en un valor aproximado al rango de sintonización individual. De esta forma el array brinda un tipo de sintonización casi-continua. Como se ve en la Fig. 1.4 un ejemplo de un array 12DFB que está cubriendo la banda L mediante la variación de temperatura en un rango de  $35^\circ\text{C}$ .

Un acoplador óptico o un espejo micro-electro-mecánico (MEM) es usado para seleccionar la longitud de onda de salida. Como puede verse en la Fig. 1.5 el array DFB esta en un chip integrado con un acoplador y un amplificador óptico semiconductor (SOA)

a la salida del chip. Además (aunque no se muestra en la figura) también deben incluir controladores de temperatura, coolers termoelectricos y sensores de luz como fotodiodos. La principal desventaja de este tipo de arrays es su baja velocidad de sintonización que en el mejor de los casos está alrededor de los milisegundos.

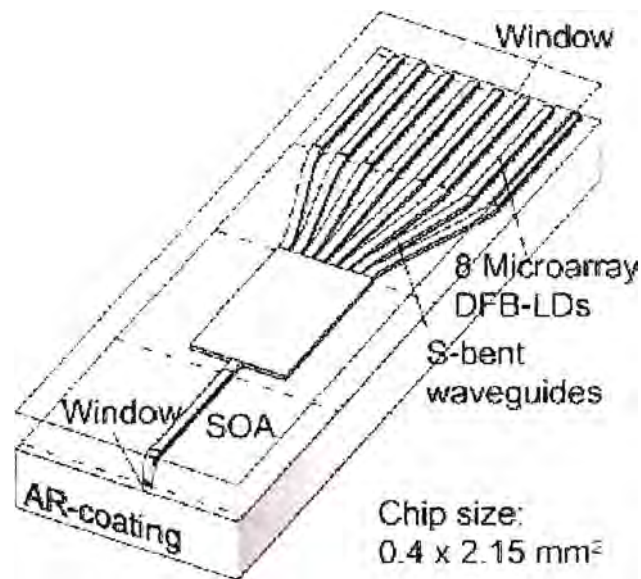


Fig. 1.5 Array 8-DFB láser sintonizable

#### 1.4.2 Diodo láser sintonizable DBR

Los diodos láser DFB y DBR fueron originalmente desarrollados para operar con longitud de onda fija (descritos en el anexo A), pero a diferencia del diodo láser DFB el diodo DBR se adapta mejor a la sintonización de la longitud de onda, esto debido a la separación de las regiones activa y pasiva (grating) dentro del láser. El método utilizado para este diodo láser es el de inyección de corriente.

El mejor diseño del diodo DBR para esta función es el de 3 secciones como se muestra en la Fig. 1.6. Una sección pasiva de control de fase separa la sección de grating de la sección activa. Las secciones pasivas son fabricadas de materiales con energías más altas de bandgap que la sección activa para prevenir que las secciones pasivas de control de fase y de grating realicen absorción de fotones. De esta manera la inyección de corriente cambia la densidad de portadores en estas secciones sin interferir con la generación de fotones en la región activa.

La corriente aplicada a la sección activa  $I_1$  es la que genera los fotones y define la potencia de salida del láser. Como se dijo anteriormente, encima de la corriente umbral la densidad de portadores en la sección activa se queda fija, por lo que variando la corriente en esta sección no tiene ningún efecto en la densidad de portadores y por ende en su índice de refracción.

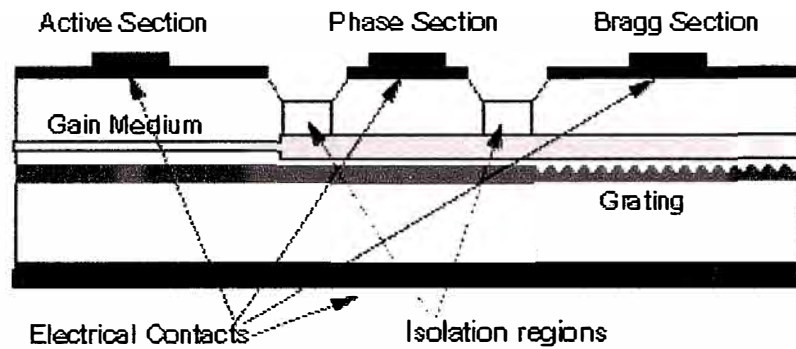


Fig. 1.6 DBR sintonizable de 3 secciones

La corriente aplicada en la sección de grating (rejilla)  $I_3$  se usa para variar el índice de refracción de la rejilla y por tanto variar su longitud de onda de Bragg (máxima reflexión). La corriente aplicada en la sección de control de fase  $I_2$  se utiliza para variar el índice de refracción de esta sección y directamente el índice de refracción promedio que “ven” los fotones originados en la región activa de manera que se puede variar la longitud de onda de los modos generados en la sección activa para alinearlos a la longitud de onda de Bragg que se establece, en forma variable, en la sección de grating.

En pocas palabras se dice que “la sección de control de fase alinea los modos de la cavidad a los picos de reflexión (en la sección de grating) y de esta manera hace la sintonización fina (con respecto a la longitud de onda de Bragg)”.

Usando simultáneamente los controles en la sección de fase y sección de grating es posible conseguir rangos de sintonización continua de 4nm y rangos de sintonización casi-continua de hasta 10nm. Pero típicamente su rango en sintonización casi-continua es de 8nm (1THz).

El rango de sintonización de los diodos láser DBR está limitado por la extensión al cual puede variarse la longitud de onda de Bragg (en la sección de grating) y esto estará determinado por el máximo cambio del índice de refracción que se pueda lograr en esta sección. La relación de las variaciones de longitud de onda e índice de refracción está derivada de la ecuación (A.6, en el anexo A) por:

$$\Delta\lambda/\lambda = \Delta n/n \quad (1.4)$$

Y cuando se usa el método de inyección de corriente la  $\Delta n$  es aprox. de 0.5%. [3]

### 1.5 Láseres sintonizables de rango amplio

Como se vio en la sección anterior los rangos de sintonización de los diodos láser DFB y DBR convencionales son pequeños con respecto a cubrir toda la banda C del DWDM que

es de 35nm. Por lo tanto unos nuevos diseños de diodos láser sintonizables han sido desarrollados para ampliar el rango de sintonización. El nuevo enfoque usado está dirigido a conseguir variaciones en la longitud de onda del láser a través variaciones de los índices de refracción en 2 secciones con rejillas de Bragg (cuyos periodos de rejilla son modulados) de tal forma que en ambas se obtengan máximos picos de reflexión, para este método se aplica el llamado efecto Vernier.

### **a) Usando el efecto Vernier**

Basado en el funcionamiento del calibrador de Vernier, se puede conseguir grandes rangos de sintonización de la longitud de onda a través de pequeñas variaciones del espectro de las regiones de rejilla (grating); claro está por intermedio del cambio del índice de refracción.

Este proceso se muestra en la Fig. 1.7, en donde se tienen los espectros de reflectividad de 2 espejos (R1 y R2) a ambos lados de una región activa. Estos espectros tiene la forma de peine, con periodos de picos de potencia ligeramente diferentes entre ellos.

Debido a los diferentes periodos de los picos en cada espectro, sólo un par de ellos coincidirán a la vez en la misma  $\lambda$ . Como se muestra en la Fig. 1.7 inicialmente hay una coincidencia en la primera longitud de onda, y cuando se desplaza ligeramente el espectro de uno de ellos, en este caso R1, en la pequeña cantidad  $\delta\lambda$ , ocurrirá otra coincidencia, ahora en la segunda longitud de onda, que como puede verse está separada una mayor distancia  $\Delta\lambda$  que la pequeña variación  $\delta\lambda$  realizada en el espectro de R1.

Ahora, en la configuración del láser mostrado, el láser sólo puede operar, en la longitud de onda donde coincidan 2 picos de la potencia de reflectividad de ambos espectros simultáneamente, debido a que la pérdida de ida y vuelta de luz reflejada es inversamente proporcional al producto de las reflectividades de los espejos. [1]

Como ya se dijo antes, la sección de control de fase es usada para ajustar los modos longitudinales generados en la sección activa, tal que alguno de ellos pueda estar alineado con longitud de onda de coincidencia de los picos de reflectividad en los espectros de los espejos, o sea con la longitud de onda de mínima perdida entre los espejos.

Con esta técnica se deben tener las siguientes consideraciones:

El ancho de los picos de reflexión (en el espectro) deberían ser suficientemente angostos con respecto al espaciamento (en frecuencia) de los modos generados en la cavidad para suprimir todos excepto sólo uno.



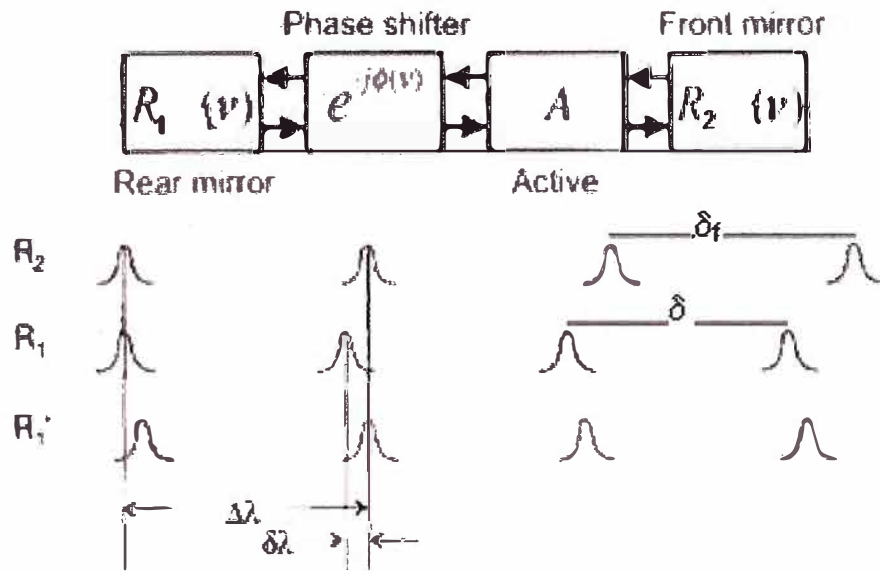


Fig. 1.7 Representación del efecto Vernier en un Diodo láser

Se debe tener cuidado que solo un par de picos coincidan a la vez dentro del ancho de banda de ganancia del láser. Esto puede ser hecho diseñando los espejos de tal manera que los picos de mayor potencia solo ocurran dentro de un limitado ancho de banda.

Además se debe intentar tener uniformidad en las potencias de los picos. En cada espejo, se debería tener una suficiente cantidad de picos con potencia de reflectividad lo más pareja posible.

Para tener sintonización continua se requerirá ajustes sincronizados de los 2 reflectores y la sección de control de fase, de modo que la misma coincidencia de picos es la que variará de longitud de onda y también el mismo modo longitudinal de la cavidad lo hará en forma sincronizada. Es claro que con este tipo de sintonización se obtendrá solo un rango pequeño.

Para cubrir un amplio rango de sintonización solo se puede hacer con el tipo de sintonización casi-continua. Para esto, los espejos delantero y posterior deben ser sintonizables sobre al menos  $\delta_f$  y  $\delta_r$  respectivamente, y a la vez la sección de control de fase debería ser capaz de sintonizar los modos longitudinales de la cavidad por un rango mayor al espaciamiento entre modos (para poder pasar a otro modo que se alinee al  $\lambda$  de la coincidencia de picos).

En los siguientes tipos de láser sintonizables, se intenta conseguir un diseño de reflectores que tengan un espectro de reflectividad con picos periódicos y adecuadas características para aplicar la técnica del efecto Vernier.

### 1.5.1 SGDBR

Este diodo láser (Sampled Grating DBR) tiene el diseño más simple para obtener el espectro de reflectividad con picos periódicos.

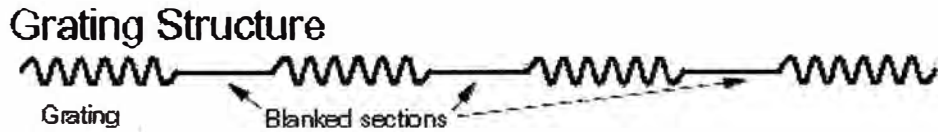


Fig. 1.8 Estructura del grating en diodos SGDBR

Los espejos que contiene este láser están hechos de una rejilla (grating) convencional uniforme con un periodo apropiado de dientes  $\Lambda$  pero con secciones de blanqueamiento también en forma periódica como se muestra en la Fig. 1.8. Este tipo de diseño de rejilla se denomina como modulación de amplitud.

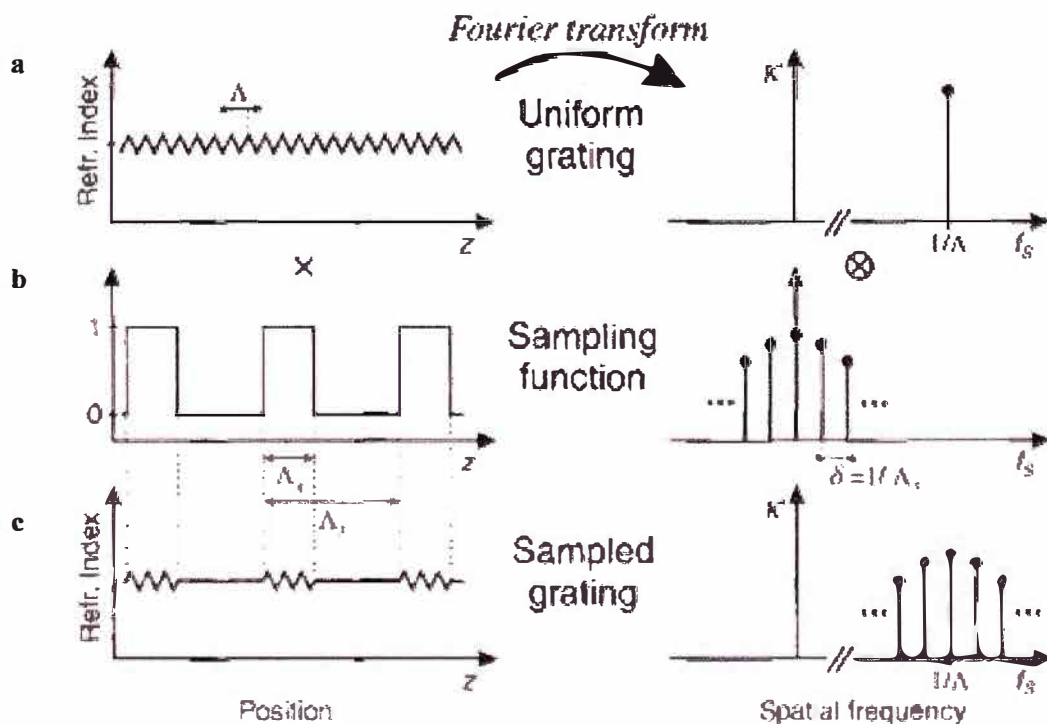


Fig. 1.9 Gráficos de las funciones y sus espectros

Algunas propiedades de esta nueva forma de rejilla se pueden conocer, considerando que, matemáticamente fue formada por la multiplicación de una forma de rejilla convencional con periodo entre sus dientes  $\Lambda$  y una función de muestreo (sampling) con periodo  $\Lambda_s$ , ancho de pulso  $\Lambda_g$  como se muestra en la Fig. 1.9.

En el dominio de la frecuencia la multiplicación de estas 2 funciones corresponde a una convolución de las transformadas de Fourier de cada función.

Vemos en la Fig.1.9-a que en el dominio de la frecuencia, la forma de la rejilla uniforme es un solo pulso centrado en la frecuencia  $1/\Lambda$ .

En la Fig.1.9-b se observa que el espaciamento de los pulsos esta dado por  $1/\Lambda_s$ . Y en la Fig.1.9-c se tiene que, en el dominio de la frecuencia, la nueva forma de rejilla presenta su centro en  $1/\Lambda$  y los pulsos espaciados por  $1/\Lambda_s$ .

De esta representación matemática podemos establecer, de la ecuación (A.6) en el anexo A, que si para una rejilla uniforme se tiene que:

$$\Lambda = \lambda_g/2n \rightarrow f_g = \frac{c}{2n} \left( \frac{1}{\Lambda} \right) \quad (1.5)$$

Donde  $f_g$  es la frecuencia de Bragg (en donde la reflexión es máxima),  $c$  la velocidad de la luz,  $n$  el índice de refracción y  $\Lambda$  el periodo de la rejilla

Entonces para el nuevo diseño de rejilla se tendrá que las frecuencias para las reflexiones pico estarán dadas, de la ecuación (1.5), por:

$$f_k = \frac{c}{2n} \left( \frac{1}{\Lambda} + \frac{k}{\Lambda_s} \right) \quad (1.6)$$

donde  $k$  es un numero entero y con  $k = 0$ , tendríamos la frecuencia de Bragg de una rejilla simple.

De la ecuación (1.6), el espaciamento entre las reflexiones pico estará dado por:

$$f_{k+1} - f_k = \Delta f = \frac{c}{2n\Lambda_s} \quad (1.7)$$

El duty cycle ( $\Lambda_g/\Lambda_s$ ) del diseño de la rejilla es importante, de él dependen características importantes del espectro de reflectividad, como las siguientes:

Para pequeños valores de duty cycle, el número de picos dentro del ancho de banda de 3dB es aproximadamente igual a la inversa del duty cycle o sea igual a  $\Lambda_s/\Lambda_g$ . [1]

El ancho de banda con 3dB es aproximadamente igual a  $(\Lambda_s/\Lambda_g) \times \Delta f$ .

Sin embargo reduciendo el valor de duty cycle  $\Lambda_g/\Lambda_s$  también ocasiona la reducción de la amplitud de los picos en el espectro. En la Fig. 1.10 se puede ver como varían los

espectros de una rejilla con diferentes duty cycles.[3]

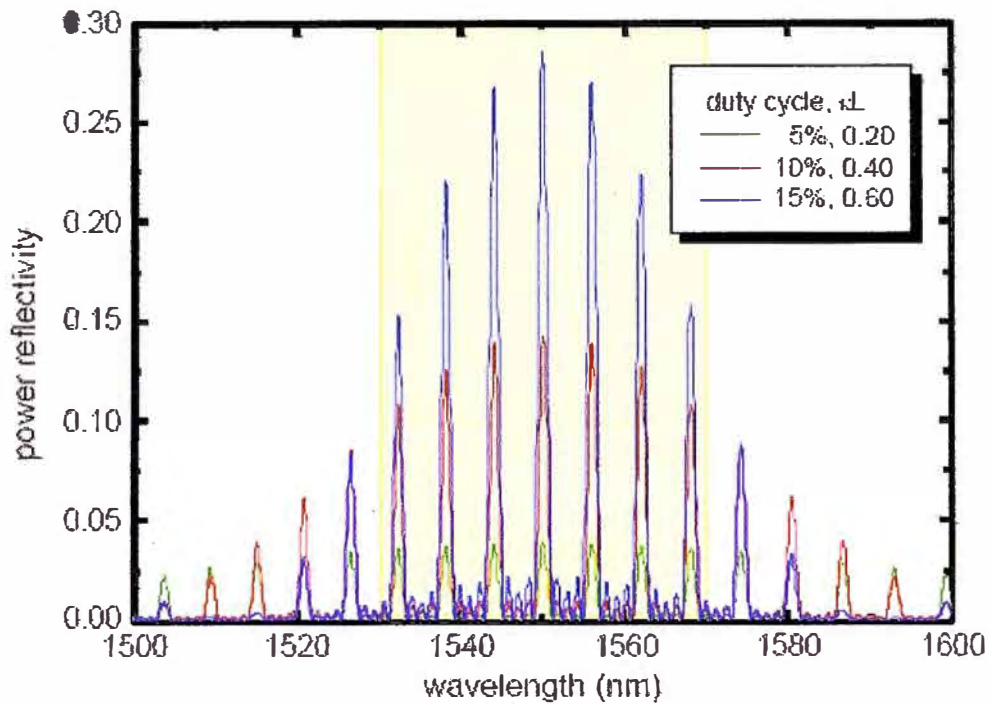


Fig. 1.10 Variación de la amplitud de picos para cada duty cycle

La amplitud de los picos en el espectro dependen directamente del producto  $L \times (\Lambda_g / \Lambda_s)$ , donde L es la longitud de la rejilla, por lo que una variación de la longitud de la rejilla también afecta la amplitud.[2]

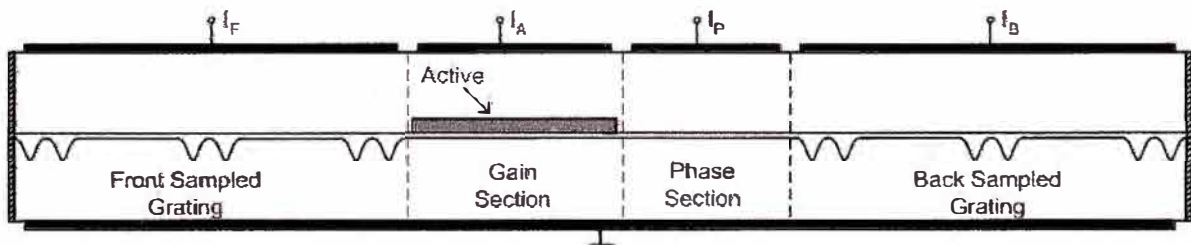


Fig. 1.11 Diagrama del diodo láser sintonizable SGDBR

Por eso un acuerdo entre rango de sintonización (número de picos), amplitud de los picos de reflexión y longitud del chip debe ser tomado para su diseño y aplicación. En la Fig. 1.11 se muestra un diodo láser SGDBR, con sus respectivas corrientes de control (para variar el índice de refracción en cada sección) y la corriente de ganancia para producir el láser en la sección activa. También se muestran las formas de sus rejillas llamadas sampled grating.

El funcionamiento de las corrientes de control es similar al diodo láser sintonizable DBR de tres secciones, descrito en la sección 1.4.2, la única diferencia está en la característica del espectro de reflectividad de los espejos que en este caso presenta múltiples picos de reflexión en lugar de uno solo, como en el diodo láser DBR.[1].

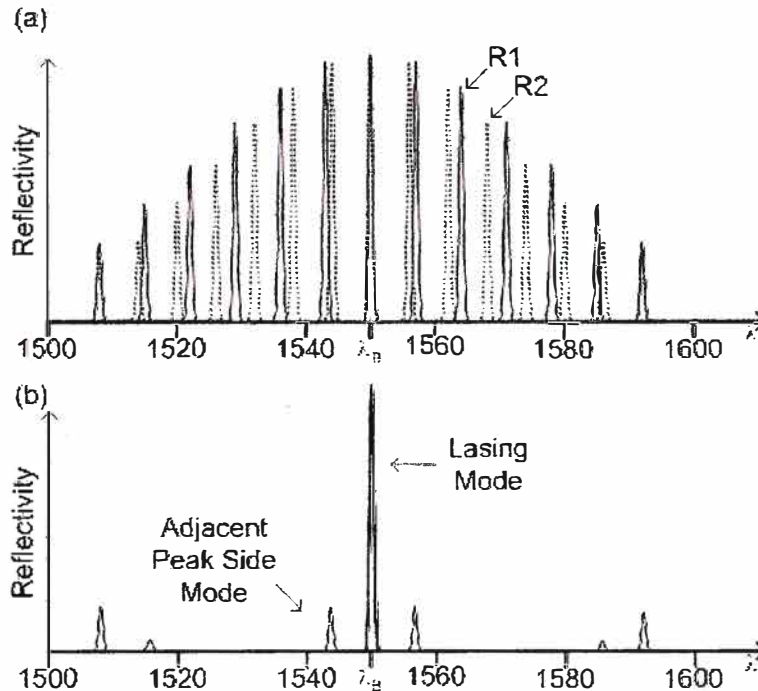


Fig. 1.12 Longitud de onda de máxima reflexión en la coincidencia de picos

Teniendo pues 2 espejos en los extremos que presentan múltiples picos de reflexión cada uno y con diferentes espaciamentos entre sus picos (con rejillas de diferentes  $\Lambda_s$ ), en este diodo láser se aplica la técnica del efecto Vernier descrita en la sección anterior, con el cual, tras inyectarse las corrientes de control que modifican los índices de refracción de las secciones de grating que a su vez varían las longitudes de onda en pequeñas variaciones  $\delta\lambda$  (ya que se desplaza el espectro de reflectividad), de manera que cuando coincidan 2 picos de reflexión en ambos espejos se obtendrá la longitud de onda de máxima reflexión, y a la vez, mediante el control de fase se varía el índice de refracción de la cavidad y se alinea alguno de los modos longitudinales a la longitud de onda de máxima reflexión, obteniéndose una nueva longitud de onda del láser. Como se puede ver en la Fig. 1.12.

Como se indicó también en la sección anterior, para cubrir amplios rangos de sintonización, este diodo láser utiliza el tipo de sintonización casi-continuo, con el que se puede cubrir tranquilamente la banda C del DWDM 35nm.

Generalmente el chip tiene integrado dentro un amplificador SOA (amplificador óptico semiconductor) y un modulador EA (de electro absorción) como se ve en la Fig. 1.13.

A esta forma de arreglo se suele denominar de integración monolítica, ya que dispone de todo lo necesario para la transmisión del láser en forma directa a la fibra óptica. Su velocidad de sintonización es de unos pocos nanosegundos y su rango de sintonización es de unos 60nm.

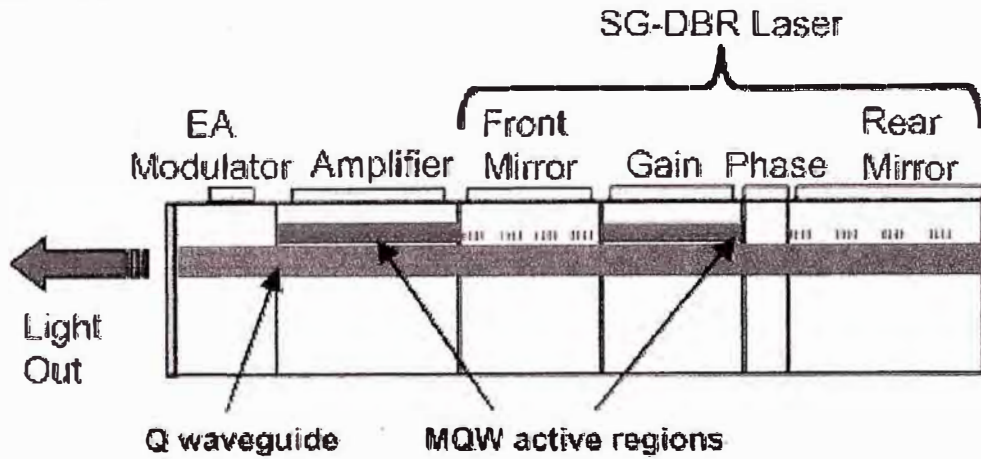


Fig. 1.13 Chip de integración monolítica con diodo láser SGDBR

### 1.5.2 Diodos láser sintonizable SSGDBR

Sus iniciales vienen de Súper-estructura grating DBR. Aunque el diodo láser SGDBR tiene muchas ventajas, pero también tiene desventajas como es la forma de su espectro que no presenta picos de amplitud uniforme sino que van descendiendo de nivel a partir de su centro.

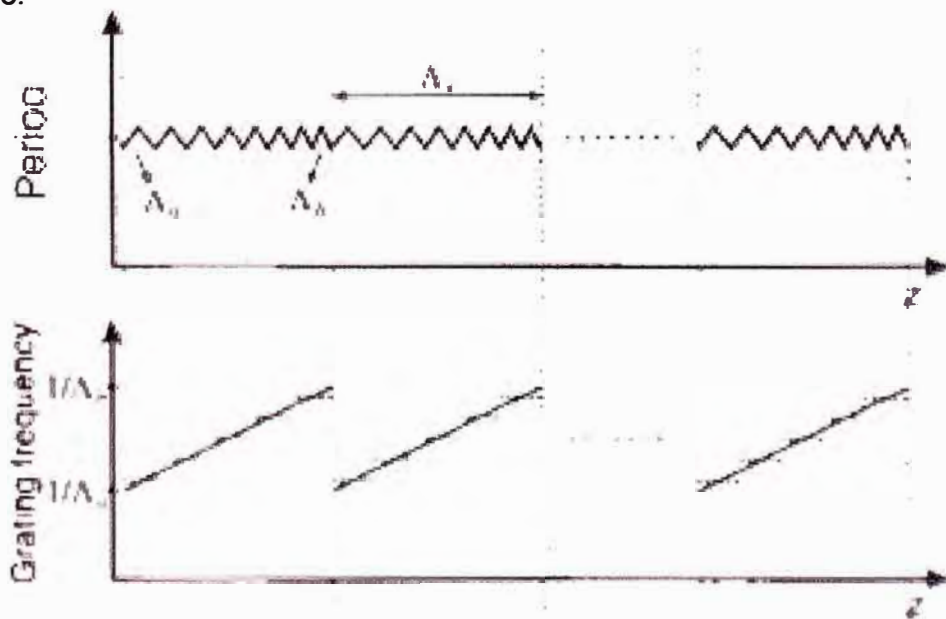


Fig. 1.14 Modulación de frecuencia del periodo  $\Lambda$  de la rejilla.

El diodo láser SSGDBR es parecido en casi todo al diodo láser SGDBR, solamente difiere en el diseño de los espejos.

En el diodo láser SGDBR se realizaba una modulación de amplitud de una rejilla uniforme, mediante una función sampling, con lo que se obtenía un espectro con picos periódicos pero de distintas amplitudes y con varios de ellos fuera del ancho de banda de 3dB. Ya que el objetivo en el espectro de reflectividad de un espejo es conseguir picos periódicos con amplitudes iguales dentro del rango de sintonización y sin ningún pico fuera de este rango, para conseguirlo, en lugar de modular la amplitud del periodo  $\Lambda$  de la rejilla, este periodo se modula variando su frecuencia o su fase. En la Fig. 1.14 se muestra la modulación de frecuencia.

Como puede verse en la Fig. 1.14, esta variación de frecuencia (o también puede ser de fase), ocurre cada intervalo  $\Lambda_s$  que ahora toma el nombre de superperiodo que es el periodo de la función de modulación.

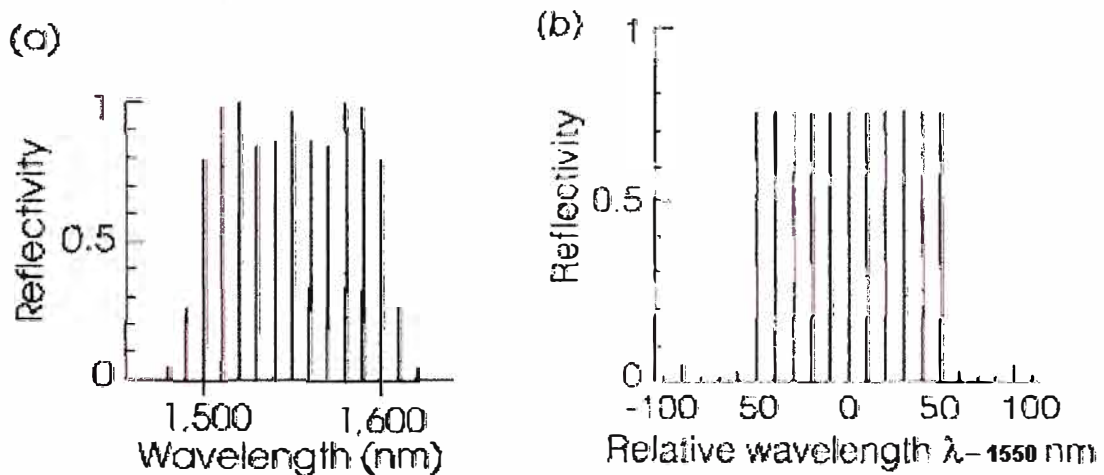


Fig. 1.15 Espectros logrados por (a) Modulación de frecuencia, (b) modulación de fase

A través de estos métodos se logra conseguir un espectro mucho más cercano al ideal, con picos de reflectividades más uniformes y casi ningún pico fuera del rango de sintonización deseado. Verdaderamente mejores resultado se han conseguido con modulación de fase que con modulación de frecuencia del periodo  $\Lambda$ , [2], aunque este último, incluso, da muchos mejores que los que se consiguen con modulación de amplitud. En la Fig. 1.15 se muestra el espectro de reflectividad conseguido a través de modulación de frecuencia y modulación de fase del periodo  $\Lambda$  de la rejilla.

Ambos tienen el rango de sintonización de 1500 a 1600nm, En la figura (b) se grafica con longitud de onda relativa al  $\lambda$  de 1550nm. Es importante notar que para conseguir el espectro (b), se tuvo hacer 50 cambios de fase al periodo  $\Lambda$ , dentro del superperiodo  $\Lambda_s$ . Y se puede observar que ambos tienen un espectro de reflectividad con buenas características sobre todo el logrado por cambios de fase.

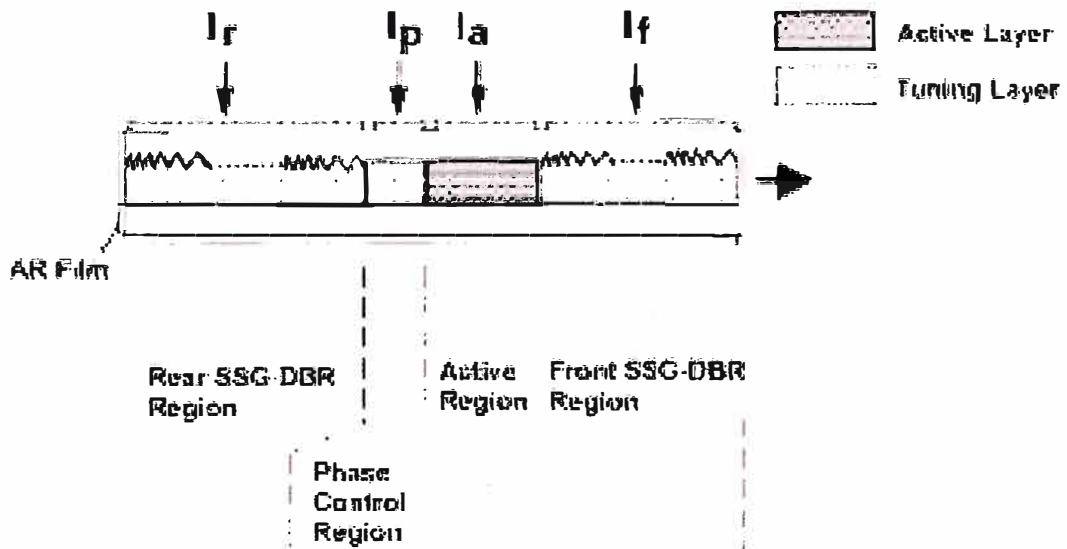


Fig. 1.16 Diagrama del diodo láser SSGDBR

La desventaja de este tipo de diodos láser sintonizables es su compleja fabricación. Su funcionamiento es similar al diodo láser SGDBR en cuanto al proceso de sintonización ya descrito en la sección anterior.

Luego de describir los principales diodos láser sintonizables usados en telecomunicaciones, a continuación se describirán las características a tomarse en cuenta para su aplicación en telecomunicaciones

### 1.6 Aspectos a considerar en su aplicación en telecomunicaciones

Hay varios aspectos que deben ser considerados sobre los diodos láser sintonizables en cualquier aplicación de telecomunicaciones. Los más relevantes incluyen la velocidad y latencia, continuidad, uniformidad y estabilidad de sintonización. Estos incluyen parámetros típicos de cualquier diodo láser, como la potencia, el ruido de intensidad relativa (RIN) y la razón de supresión de modo lateral (SMSR). (Parámetros definidos en el anexo A).

#### a) Latencia y velocidad de sintonización

La velocidad de sintonización se define como el tiempo que el láser demora para cambiar la longitud de onda de salida desde un valor inicial a otro valor final en forma estable.

El tiempo de sintonización consiste de 2 componentes: (i) La latencia, que es el tiempo en el que la orden de sintonización se traduce en un cambio de las señales de control de corriente, temperatura, etc. en el láser. (ii) La velocidad de conmutación que es el tiempo que toma el láser en hacer el cambio de longitud de onda a otra (dentro de un margen de estabilidad  $\delta\lambda$ ) una vez que ha recibido las señales de cambio de los controles de



sintonización. Esto se puede ver en la Fig. 1.17.

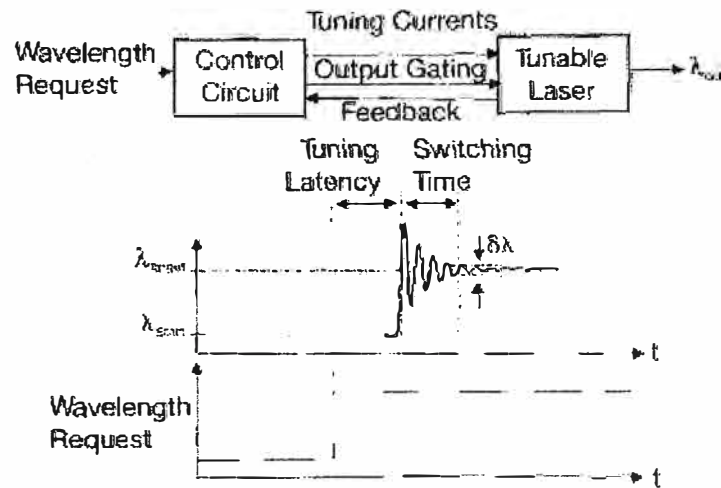


Fig. 1.17 Tiempos de sintonización en el láser

### b) Continuidad de sintonización

La continuidad del láser sintonizable permite que la longitud de onda de salida sea barrida suavemente desde una longitud de onda inicial a otra final sin ninguna aparente discontinuidad, a través de un control de inyección de corriente, por ejemplo.

En telecomunicaciones se usan por lo general determinadas longitudes de onda en cada banda de transmisión, definidos por la ITU-T, por lo que este requerimiento de continuidad no es tan trascendente, por lo que será suficiente con disponer de una sintonización casi-continua.

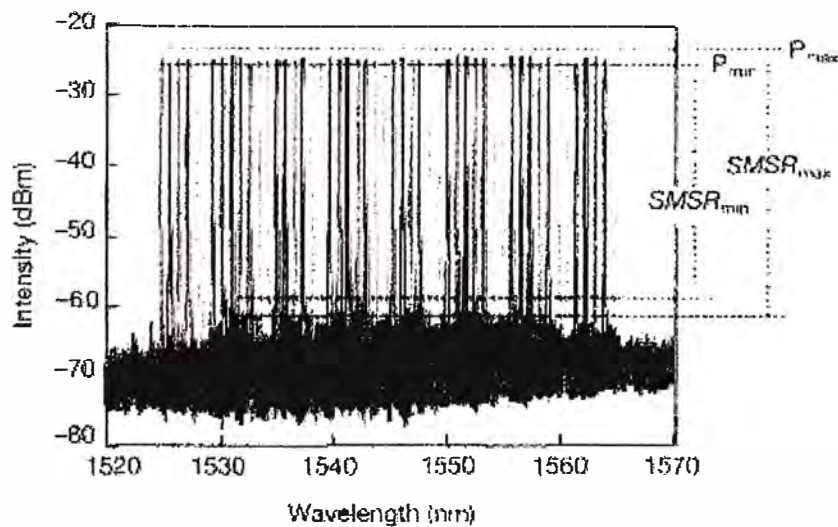


Fig. 1.18 Espectro óptico sobreimpuesto del láser SGDBR

### c) Uniformidad de sintonización

La uniformidad como una función de la longitud de onda en la salida del láser es un parámetro crítico, por lo que un láser sin un circuito feedback de control mostrará

variaciones en la potencia de salida, en el corrimiento de la longitud de onda y en parámetros ópticos como el SMSR. Un ejemplo de la variación de potencia es mostrado en la Fig. 1.18, en el que se muestra el espectro de salida (sobrepuesto) de un láser SGDBR que se sintoniza en 56 diferentes longitudes de onda de la banda C. La mínima y máxima potencia y los valores de SMSR son mostrados.

#### **d) Exactitud y estabilidad de sintonización**

La estabilidad se define como la invariabilidad en las características de sintonización. Por ejemplo bajo condiciones de sintonización rápida, mientras el láser es sintonizado entre longitudes de onda, la temperatura y otros factores pueden variar la longitud de onda actual. También el mapeo entre las longitudes de onda y los valores en los controles de corriente o temperatura correspondientes, puede variar según pasa el tiempo, a través del desgaste o factores ambientales.

La exactitud con el cual el láser debe ser sintonizado es establecida por la aplicación y por el diseño de la red. Por ejemplo para la red CWDM, la recomendación ITU-T G.695, especifica distancias de transmisión de 40 a 80Km y un conjunto de 18 longitudes de onda con un espaciamiento de 20nm entre 1271nm y 1611nm. Este gran espaciamiento se estableció para tener bajos costos de operación, ya que se pueden operar diodos láser con relativamente grandes ancho de línea y corrimientos de longitud de onda.

Por otro lado, para aplicaciones DWDM, la ITU-T establece espaciamientos de longitudes de onda con mínimo 0.8nm, por eso, en este caso, la longitud de onda del láser debe ser estable dentro de  $\pm 5\%$  del espaciamiento de las longitudes de onda.

### **1.6.1 Transmisores y transponders sintonizables**

Para su aplicación en telecomunicaciones el diodo láser sintonizable, en su forma integrada, se usa dentro de otro módulo llamado Transmisor sintonizable y para aplicaciones en tecnologías como DWDM el Transmisor sintonizable forma parte, a su vez, de la tarjeta de línea llamada Transponder. A continuación se detallarán cada uno de ellos.

#### **a) Transmisor láser sintonizable**

El transmisor láser sintonizable consta de 4 bloques funcionales básicos como se muestran en la Fig. 1.19.

El modulo de láser sintonizable incluye el diodo láser sintonizable, interconexiones eléctricas, monitoreo de potencia, sensor de temperatura, un modulador externo (al diodo láser), y cuando el caso requiera un SOA (amplificador óptico semiconductor).

El modulo de codificación de línea y protocolo, realiza la tarea de recibir los datos externos y descodificarlos de acuerdo al protocolo que usan los datos entrantes, ejemplo

SDH, Gigabit Ethernet etc. También puede realizar funciones como recuperación del reloj y corrección de errores tipo FEC.

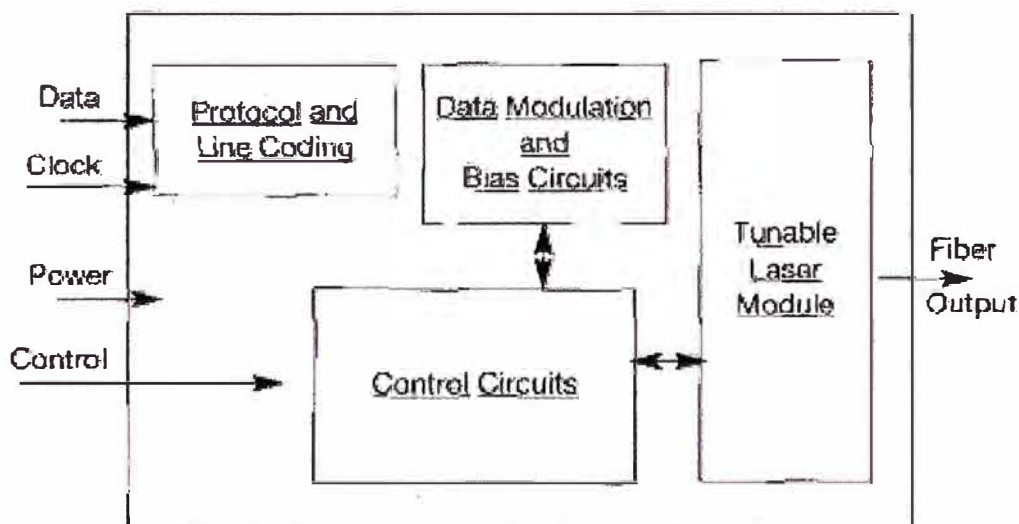


Fig. 1.19 Diagrama funcional del transmisor láser sintonizable

El módulo de modulación de datos y circuito de polarización convierte los datos binarios de entrada y reloj a un formato apropiado de modulación de datos y circuitos de control para que el láser pueda ser modulado a través del modulador externo incluido en el “módulo láser sintonizable”. Generalmente el tipo de modulación usado es NRZ en OOK. El circuito de control realiza la función de configurar las corrientes de sintonización del láser para la deseada longitud de onda, también provee feedback para regular la potencia y la longitud de onda.

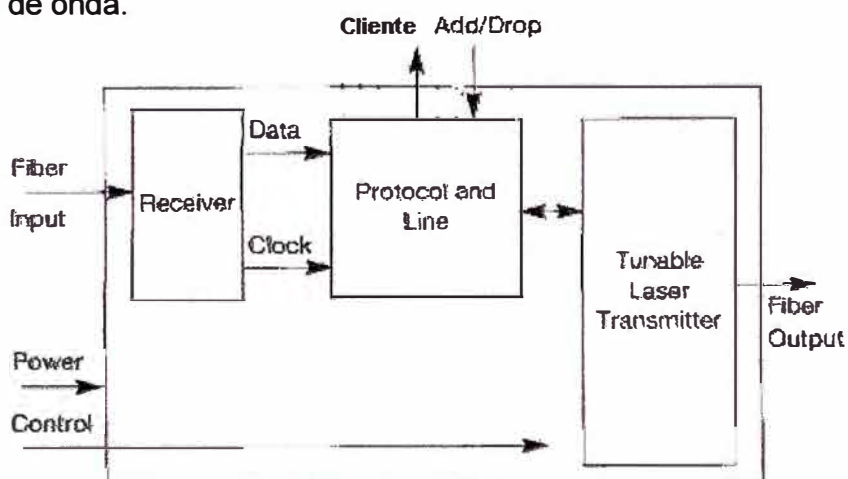


Fig. 1.20 Diagrama funcional del Transponder sintonizable

### b) Transponder sintonizable

Los transponder sintonizables ejecutan las tareas de recibir la señal de la fibra, convertirla a una representación digital, procesar un protocolo de regeneración y retransmitir la señal

a través de la fibra. Para el caso de DWDM, los transponder tienen 4 puertos, 2 hacia la red DWDM (entrada y salida hacia la fibra) y otras 2 para el lado del cliente (entrada y salida, que pueden ser fibra o cable coaxial). En la Fig. 1.20 se muestra un diagrama simplificado donde se puede ver el módulo del transmisor láser sintonizable que a su vez tiene incorporado al diodo láser sintonizable.

### 1.6.2 Conversores de longitud de onda sintonizable

Para otras aplicaciones el diodo láser sintonizable también forma parte del dispositivo llamado convertidor de longitud de onda sintonizable (TWC). Este dispositivo se usa en algunas arquitecturas de conmutación y en circuitos de enrutamiento así como en redes optical-packet-switched, como se verá más adelante.

Su función principal es convertir una señal de entrada con una longitud de onda a otra señal con una longitud de onda sintonizable a cualquier valor deseado dentro de la banda de interés. También es deseable que la TWC ejecute alguna tarea de regeneración básica de la señal de entrada. Básicamente hay 2 tipos de conversores de longitud de onda sintonizables, el tipo sintonizable optoelectrónico-óptico (OEO-WC) y el sintonizable todo óptico (AO-WC), en ambos casos se suele usar el diodo láser SGBDR [2].

Un convertidor de longitud de onda sintonizable OEO-WC básico se muestra en la Fig. 1.21 (a), consta de un receptor, amplificador óptico, el diodo láser sintonizable monolítico, un modulador y un regenerador. El receptor realiza la conversión óptico-eléctrica de la señal, que luego se regenera y se entrega al modulador para modular la longitud de onda sintonizada por el diodo láser sintonizable.

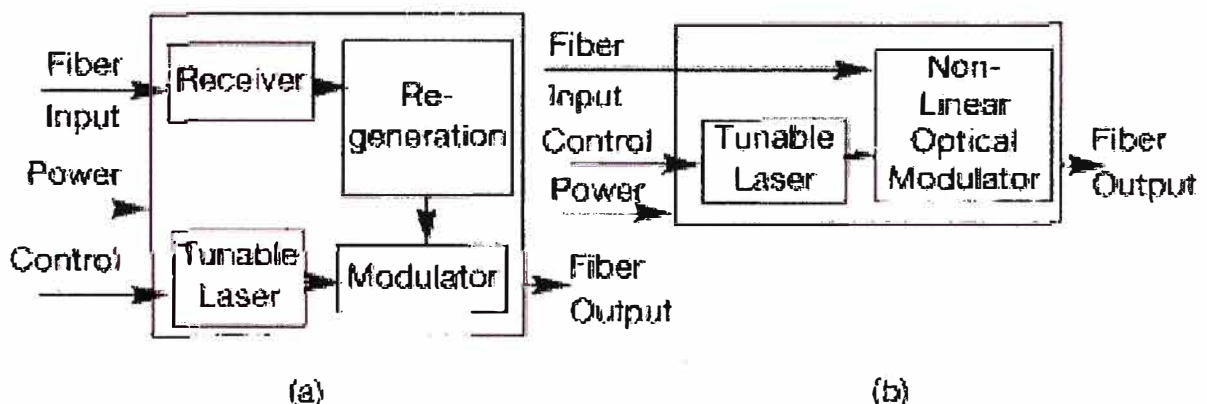


Fig. 1.21 Diagramas funcionales de los convertidores de longitud de onda  
a) OEO-WC y b) AO-WC

En el caso del convertidor de longitud de onda sintonizable AO-WC, como se muestra en la Fig. 1.21 (b), se emplea un modulador controlado ópticamente para trasladar los

datos desde una longitud de onda a otra longitud de onda sin pasar por circuitería electrónica, también se usa un diodo láser sintonizable para generar la longitud de onda de salida. Con esto se logra una importante ventaja en cuanto a la reducción de la potencia disipada y a la velocidad de conversión debido a que se minimizan las conversiones óptico-eléctricas durante el procesamiento de la señal.

En este capítulo se han descrito los principales requisitos que deben poseer los diodos láser sintonizables para su aplicación en telecomunicaciones y también los dispositivos más importantes en los que forma parte importante para su aplicación.

En el siguiente capítulo se mostrarán las ventajas que brinda el diodo láser sintonizable cuando se usa en una red de longitud de onda fija, como el caso de una tradicional DWDM, y también su uso en tecnologías de red emergentes.

## CAPÍTULO II

### APLICACIONES EN REDES DWDM

#### 2.1 Técnicas de multiplexación

##### 2.1.1 TDM

La multiplexación por división de tiempo (TDM), es una de las técnicas de multiplexación más usadas para expandir la capacidad de transmisión. Es usado por ejemplo en las tecnologías tradicionales como PDH y SDH en donde se multiplexan señales de bajo orden en señales de alto orden, y, en el caso de SDH se puede obtener señal de transmisión hasta un valor de STM-128 (40Gb/s). Su funcionamiento consiste en que cada señal de bajo orden es muestreada a intervalos regulares y colocadas, las muestras, unas tras otras dentro de la trama de longitud fija definida por la señal de alto orden resultante, como se muestra en la Fig. 2.1

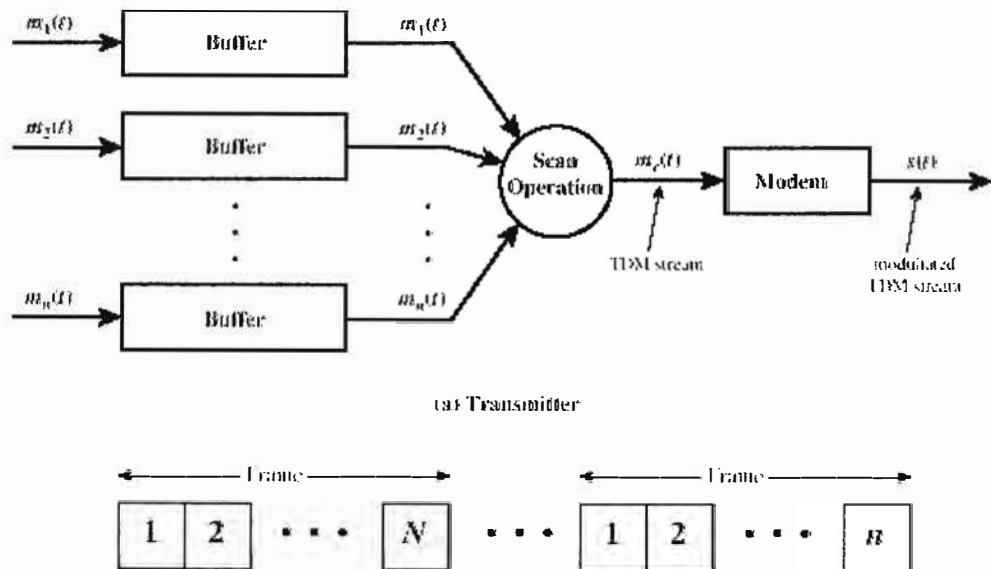


Fig. 2.1 Esquema funcional de TDM

Este tipo de multiplexación fue adecuado cuando la demanda de velocidades no era tan alta como lo es ahora sobre todo en el caso de servicios como Internet.

Sin embargo el método TDM presenta 2 grandes desventajas. Primero, cuando se requiere hacer un incremento del nivel de velocidades de un equipo, es necesario reemplazar el equipo completamente, de manera que el servicio se verá afectado durante

el proceso de cambio. La segunda desventaja, es que carece de flexibilidad. Por ejemplo cuando a un enlace de 155Mb/s se le quiere agregar un canal de 155Mb/s, necesariamente el enlace se deberá incrementar a 622Mb/s, resultando en que 2 canales de 155Mb/s quedaran vacíos, sin usar.

También, mediante este tipo de multiplexacion, las tecnologías de transmisión utilizan una sola longitud de onda sobre la fibra óptica, dejando de usar la enorme capacidad de la fibra, ya que la velocidad más grande alcanzada con TDM es de 40Gb/s y la capacidad de la fibra es del orden de Tera b/s.

Ante estas limitaciones surgió la tecnología WDM, que incrementa grandemente la capacidad de la red.

### 2.1.2 WDM

La multiplexación por división de longitud de onda (WDM) es una tecnología que multiplexa ópticamente varias longitudes de onda sobre una misma fibra óptica sin ninguna interferencia mutua, donde cada longitud de onda representa un canal óptico dentro de la fibra. Un sistema WDM posee métodos ópticos que permiten combinar dichos canales dentro la fibra y extraerlos en puntos apropiados a lo largo de la red.

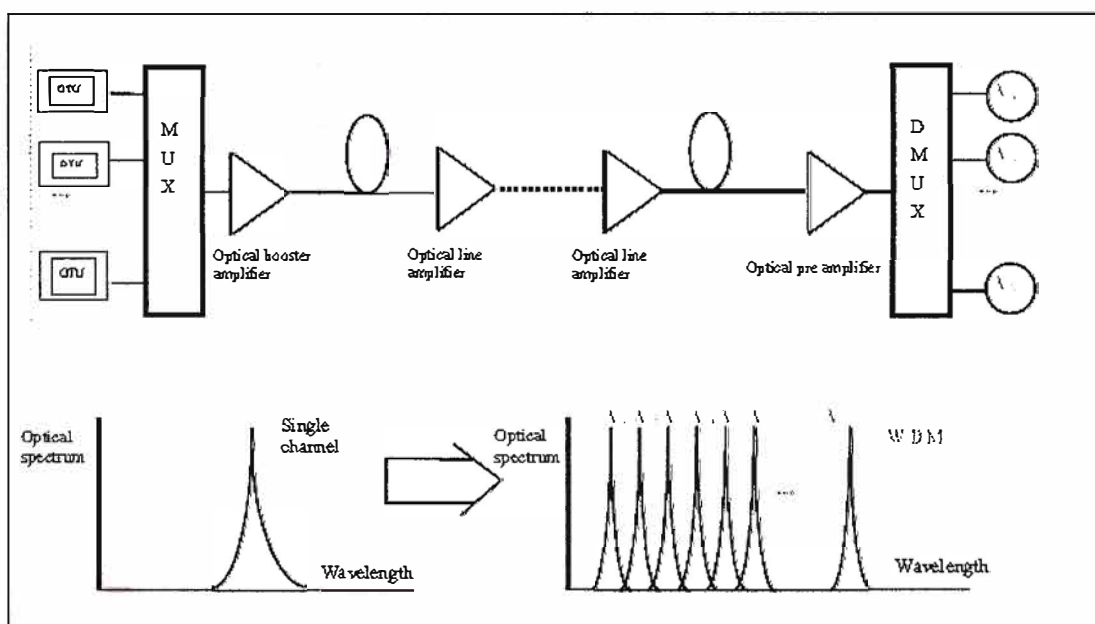


Fig. 2.2 Esquema funcional de WDM

A diferencia de la multiplexacion TDM, en WDM no existen jerarquías de velocidades de transmisión, simplemente se asigna una longitud de onda al trafico que ingresa por un puerto de entrada y se multiplexa ópticamente con el resto de longitudes de onda para que en forma simultánea viajen por una sola fibra óptica. En la Fig. 2.2. se muestra una representación de la multiplexación WDM.

La capacidad de tráfico que puede soportar esta tecnología esta dada por el producto del número máximo de longitudes de onda y la velocidad máxima por cada canal.

Asimismo, este tipo de multiplexacion es clasificada de acuerdo al número de longitudes de onda que puede multiplexar, siendo Dense-WDM (DWDM) la que puede portar mayor cantidad de longitudes de onda (hasta 160) y es la más importante de las de esta tecnología.

## 2.2 DWDM

La capacidad de la fibra óptica es enorme; sin embargo los sistemas tradicionales de comunicación óptica, con una única longitud de onda en la fibra, sólo explotan una pequeña parte del abundante ancho de banda de la fibra óptica, y para efectivamente usar ese ancho de banda disponible se desarrolló DWDM.

DWDM es el tipo de multiplexacion WDM con más de 20 longitudes de onda, opera en las bandas C y L. con un conjunto de longitudes de onda establecidas por la ITU-T.

A diferencia de las tecnologías SDH/SONET en donde mediante multiplexacion por división de tiempo, se toman las señales sincronías y asíncronas y se multiplexan a una velocidad de transmisión más alta, realizando convertidas óptica-eléctricas de las señales. En DWDM se toman varias señales ópticas, se mapean en longitudes de onda individuales y se multiplexa en forma óptica sobre una fibra para su transmisión. De esta forma se logran varias ventajas como se verá más adelante.

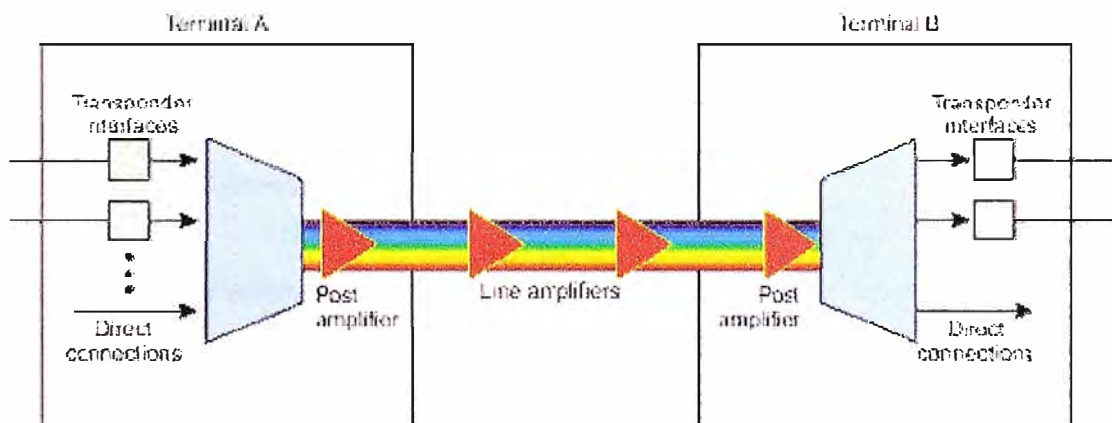


Fig. 2.3 Esquema funcional de DWDM

La capacidad máxima que puede ser transportada sobre una longitud de onda es de 40Gb/s, y la cantidad máxima de longitudes de onda que se pueden multiplexar es 160. En el Perú se usan equipos con máximo 40 longitudes de onda por fibra óptica.

### a) Esquema funcional DWDM

El sistema realiza las siguientes funciones principales:



**Generación de la señal.** La fuente, con un diodo láser de estado sólido, tradicionalmente DFB de longitud de onda fija, debe suministrar una luz en una longitud de onda estable dentro de un ancho de banda específico y estrecho, para transportar los datos digitales modulados. Esta función lo realizan los transponders.

**Combinación de señales.** Los modernos sistemas DWDM emplean multiplexadores para combinar las señales. Hay alguna pérdida inherente asociada a la multiplexación y demultiplexación. Esta pérdida depende del número de canales pero se puede mitigar con amplificadores ópticos que amplifican todas las longitudes de onda a la vez sin conversión eléctrica. Esta función lo realiza el multiplexor óptico.

**Transmisión de señales.** Los efectos de diafonía y la degradación o pérdida de la señal óptica deben tenerse en consideración en la transmisión por fibra óptica. Estos efectos pueden ser minimizados mediante el control de las variables tales como el espaciado entre canales, la tolerancia de la longitud de onda, y los niveles de potencia del láser. En un enlace de la transmisión, se puede necesitar una amplificación de la señal, generalmente cada 90 Km.

**Separación de las señales recibidas.** En el lado del receptor, las señales multiplexadas deben ser separadas. Aunque esta tarea parece ser simplemente el opuesto a la combinación de señales, en la actualidad es técnicamente más difícil. Esta función lo realiza el demultiplexor.

**Recepción de señales.** La señal demultiplexada es recibida por un fotodetector en el nodo destino. Esta función la realizan los transponders también.

### 2.2.1 Ventajas de DWDM

La tecnología DWDM presenta las siguientes ventajas:

#### a) Transparencia de velocidad de datos

Los sistemas DWDM ejecutan multiplexación y demultiplexación en términos de longitudes de onda diferentes y son, estos procesos, independientes de la velocidad de los datos que hayan modulado a la señal óptica continua ( $\lambda$ ). Por esta razón se puede transmitir, sobre las longitudes de onda, señales con diferentes características (velocidades, protocolos, etc), como por ejemplo PDH, SDH, ATM, Ethernet, etc.

#### b) Crecimiento del tráfico

Permite expandir la capacidad de la red sin la necesidad de instalar una nueva fibra, ya que físicamente solamente es necesario instalar receptores y transmisores ópticos (transponder ópticos) para agregar un nuevo servicio en la red sobre la longitud de onda disponible.

### **c) Gran capacidad de transmisión**

A diferencia de los sistemas con multiplexación TDM, con DWDM se hace un uso más efectivo del ancho de banda disponible en la fibra óptica. Así, con 160 longitudes de onda y con máximo 40 Gbp/s por longitud de onda, teóricamente se podría llegar a transmitir  $160 \times 40 = 6,4$  Tbp/s, sobre una sola fibra, esto es mucho más de lo que se lograría con TDM en SDH que es máximo sólo de 40Gb/s.

## **2.3 Aplicaciones de diodos láser sintonizables en DWDM**

Los diodos láser sintonizables, que forman parte de los transponders, son un gran aporte para superar ciertos inconvenientes en el equipamiento de la red DWDM, que a continuación se describen.

### **2.3.1 Limitaciones en DWDM**

A pesar de las muchas ventajas que brinda DWDM sobre otras tecnologías de transmisión, también tiene dificultades debido a que los transponders que utiliza operan en longitudes de onda fija lo cual crea inconvenientes en cuanto al suministro, provisión y determinación de la longitud de onda correcta a la hora de la implementación y el mantenimiento.

### **2.3.2 Soluciones con el uso de diodos láser sintonizables**

En DWDM se dan fundamentalmente las siguientes soluciones en los casos descritos a continuación.

#### **a) Aprovechamiento**

Cuando se usan transponders de longitud de onda fija, en el momento de la implementación de la red, se tienen limitaciones, ya que se deben comprar transponders con longitudes de onda diferentes, lo que condiciona a una previsión y planeamiento exacto de las longitudes de onda que se van a usar.

En cambio, con el uso de transponders con diodos láser sintonizables, la cadena de aprovisionamiento se ve drásticamente reducida. Sólo se necesita instalar la cantidad de transponder necesarios y sintonizarlos por software a las longitudes de onda disponibles. Esta es una tarea mucho más simple, especialmente en un campo que no ha estado exento de errores en la exactitud de sus previsiones.

Por lo tanto con el uso de transponders integrados por diodos láser sintonizables, los cambios de "último minuto" en lo previsto pueden ser fácilmente acomodados, sin provocar grandes perjuicios en el proceso de implementación.

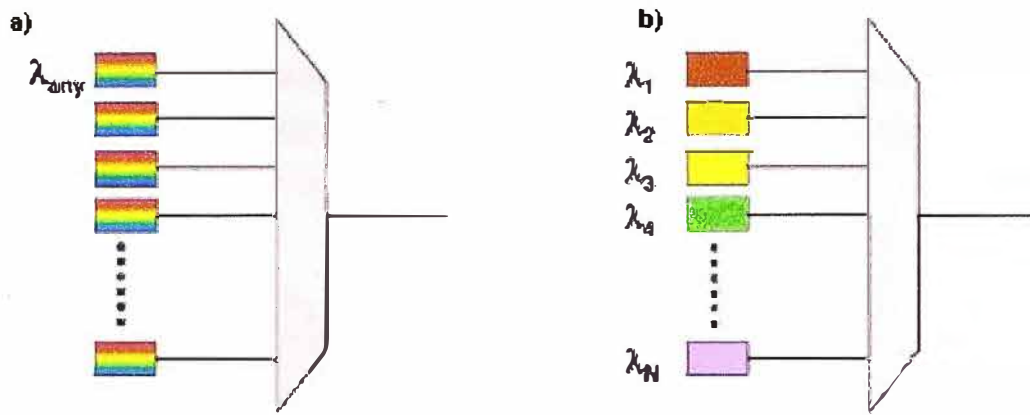


Fig. 2.4 Implementación con a) Longitud de onda sintonizable, b) Longitud de onda fija.

### b) Reducción de inventario

El segundo beneficio es que los niveles de inventario son reducidos. Esta reducción se da a nivel tanto de fabricación como de operación en los sistemas DWDM. Con transponders de longitud de onda fija, docenas de diferentes códigos para cada uno de ellos deben ser fabricadas e inventariadas, en cambio con transponders de longitud de onda sintonizable solo se necesita un código en el inventario y la fabricación de un solo tipo de tarjeta.

### c) Respaldo

Este es un punto en donde los transponder con diodos láser sintonizables favorecen grandemente, ya que en lugar de tener, por ejemplo 7 transponder de respaldo para 7 longitudes de onda fija diferentes en operación, de las cuales no se sabe cual podría fallar, con el uso de un solo transponders sintonizables se puede respaldar a cualquier transponder que este operando en la red DWDM, como se muestra en la Fig. 2.5.

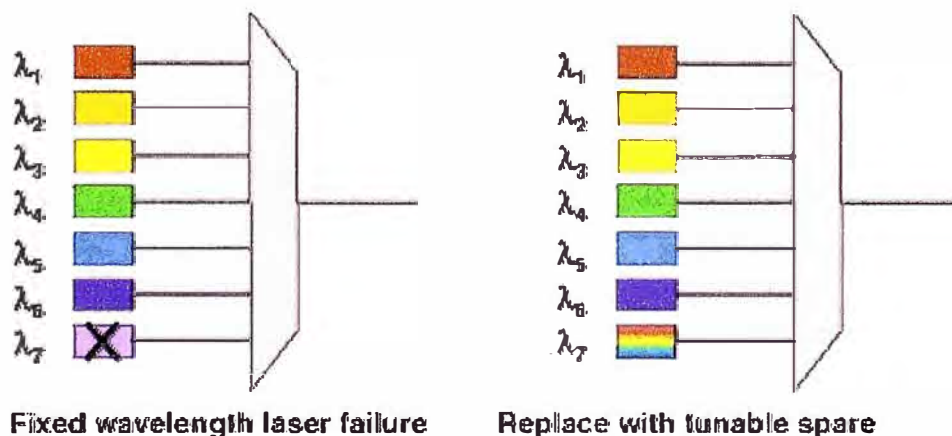


Fig. 2.5 Respaldo con transponder sintonizable

Todos estos beneficios descritos involucran reducción de costos de operación e implementación, además se gana funcionalidad con un transponder “universal” que es el

que está integrado por un diodo láser sintonizable. En la Fig. 2.6 se representan los beneficios que se pueden obtener en ahorro de costos mediante el uso de transponders con diodos láser sintonizables en la red DWDM, respecto a los obtenidos con el uso de transponders de longitud de onda fija.

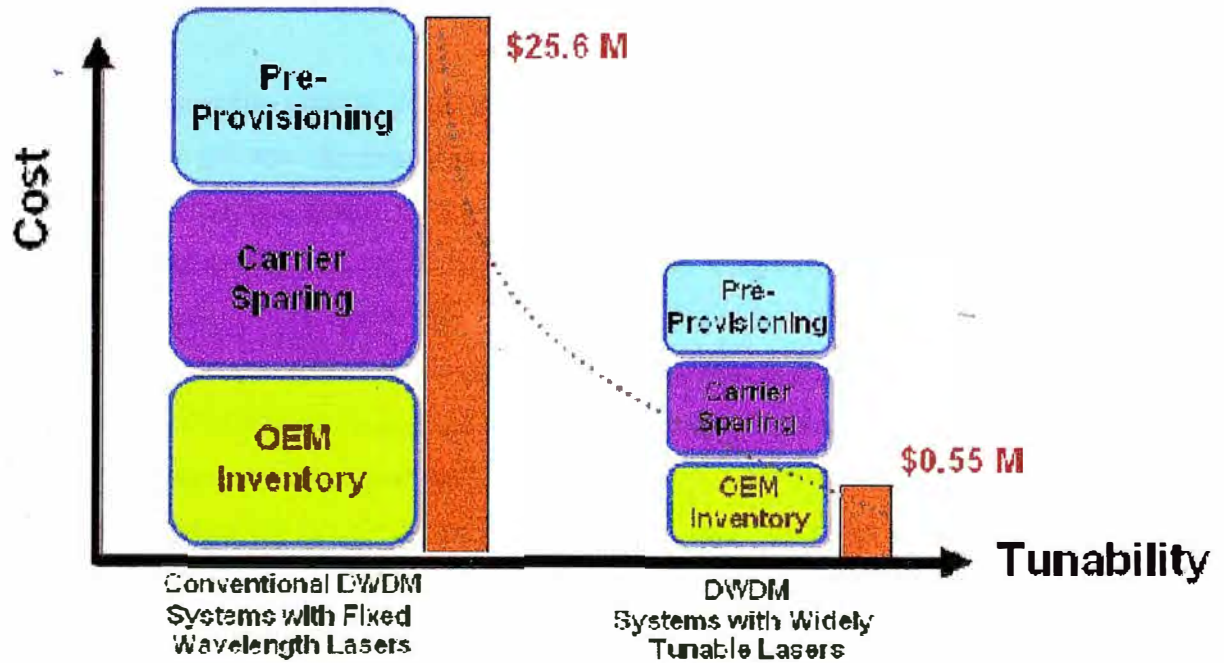


Fig. 2.6 Beneficios del diodo láser sintonizable en la red DWDM

## CAPÍTULO III

### USO DE DIODOS LASER SINTONIZABLES EN OTRAS TECNOLOGIAS DE RED

#### 3.1 Reconfigurable OADM (ROADM)

El desarrollo de los diodos láser sintonizables también permitió la creación de los llamados Reconfigurables OADMs (ROADM) que son OADMs (Optical Add/Drop Multiplexer) sintonizables capaces de cambiar las longitudes de onda que se agregan o que se entregan en un nodo. Los ROADM permite el aprovisionamiento dinámico de las longitudes de onda que pueden ser sintonizadas remotamente, lográndose con ello una mejor administración de la red. Debido a que las longitudes de onda que se agregan en un nodo, no se conocen de antemano, el uso de transponders sintonizables es necesario ya que nos permiten transmitir en la longitud de onda deseada. En la Fig. 3.1 se muestra un diagrama.

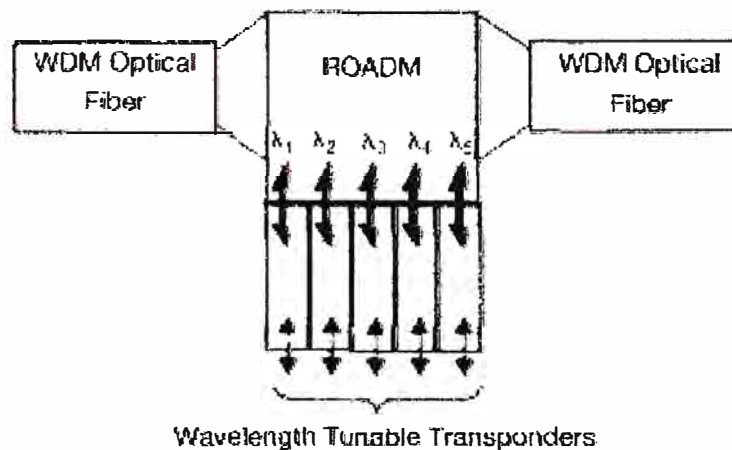


Fig. 3.1 Tecnología ROADM

#### 3.1.1 Aprovisionamiento de red con OADM de longitud de onda fija

Como se dijo OADM significa Optical Add/Drop Multiplexer, y presenta ventajas sobre los multiplexores electrónicos que se usaban tradicionalmente, en cuanto al consumo de potencia y costos de equipamiento, ya que trabajan sin hacer la transformación óptica-eléctrica-óptica, sino que realizan la multiplexacion en forma óptica solamente. Sin embargo aun tienen limitaciones en cuanto usan solamente longitudes de onda fijas, durante la multiplexacion y el add/drop.

Como ejemplo veamos la red de anillo de la Fig. 3.2 que conecta N nodos usando N-OADMs, donde cada nodo transmite y recibe en una longitud de onda fija diferente que es agregada y bajada ópticamente hacia/desde la red vía un OADM.

Para transmitir a un nodo destino, el nodo fuente transmite primero a un nodo cabecera que recibe todas las diferentes longitudes de onda fija de cada nodo. El nodo cabecera usa un conmutador electrónico para conectar cualquiera de las longitudes de onda recibidas a cualquier otra longitud de onda y por lo tanto conectar cualquier transmisor a cualquier receptor en la red.

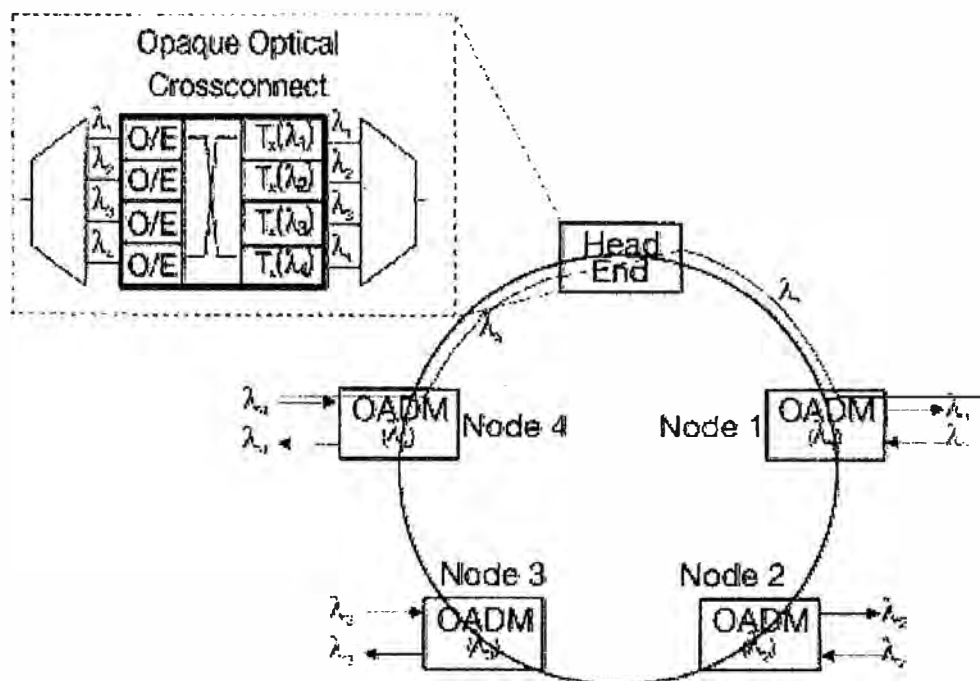


Fig. 3.2 Red anillo de longitud de onda fija con OADM

En esta red solamente se utiliza un nodo cabecera que realiza conversiones óptica-eléctrica-óptica para poder conectar la información enviada y recibida por los nodos entre sí.

La desventaja está en el hecho de que todo el diseño es estático y las longitudes de onda se establecen en el diseño inicial y permanecen en forma fija durante su operación. Los OADMs son establecidos para cada cliente y con longitudes de onda por cada nodo, y estas configuraciones se guardan en mapas de ruteo.

Pero cuando se debe hacer un incremento de nodos o agregar nuevas longitudes de onda a la red, se tiene que hacer un rediseño, con cuidado de no tocar las configuraciones fijadas, y de no modificar los mapas de ruteo, todo lo cual agrega costos al mantenimiento de la red.

### 3.1.2 Ventajas con el uso de ROADM

Con el uso de ROADM, se tiene la ventaja que no es necesario hacer un planeamiento de la asignación de longitudes de onda durante la instalación, ya que la asignación se hace en forma dinámica, bajo control automático y en forma remota. También, mediante el ROADM cualquier longitud de onda en la fibra puede ser agregada/bajada en cualquier nodo, haciendo una red más manejable y escalable a más grandes números de nodos sin la necesidad de usar un nodo cabecera (como en la red de longitud de onda fija).

Todo lo cual se traduce en reducción de costos respecto a agregar nuevas conexiones de longitud de onda y en la administración de la red.

### 3.2 Photonic- packet switching

En esta nueva tecnología también se hace uso de los diodos láser sintonizables. Esta tecnología surge por la necesidad de salvar las dificultades que presentan los tradicionales métodos de enrutamiento de paquetes a través del uso de routers electrónicos. Debido a que los routers que enrutan el tráfico de Internet continuamente manejan grandes cantidades de datos que ingresan a través de conexiones de fibra DWDM, por lo que un rack de routers puede llegar a consumir 10kW trabajando con una velocidad de 1Tbps, vemos estos routers electrónicos pueden estar llegando al límite de sus capacidades.

Estos routers también presentan el problema que realizan gran cantidad de conversiones óptica-eléctrica-óptica, ya que sus conexiones a la red son ópticas, pero su procesamiento de señales es enteramente electrónico.

Para superar estas inconvenientes de conmutaciones electrónicas y la gran disipación de potencia, es que surge la nueva tecnología Photonic packet switching.

En esta tecnología los paquetes individuales de datos son enrutados a través de la red sin que se le haga la conversión óptica-eléctrica-óptica, sino sólo en los extremos de la red cerca al usuario final.

Estos paquetes son enrutados y switchados a nivel de capa óptica solamente. Cada paquete tiene una longitud de onda y una cabecera donde guarda la información de enrutamiento,

Un ejemplo de parte del funcionamiento de esta tecnología es mostrada en la Fig. 3.3, en donde los paquetes entrantes arriban en cualquier longitud de onda y mediante un conversor de longitud de onda (que contiene al diodo láser sintonizable), las longitudes de onda son sintonizadas a las requeridas para su reenvío a la red a través de los puertos del ruteador de longitud de onda, como se muestra en la Fig. 3.3.

Esta tecnología tiene todo un conjunto de protocolos asociados al enrutamiento y

procesamiento de cabeceras de los paquetes para su transporte por la red.

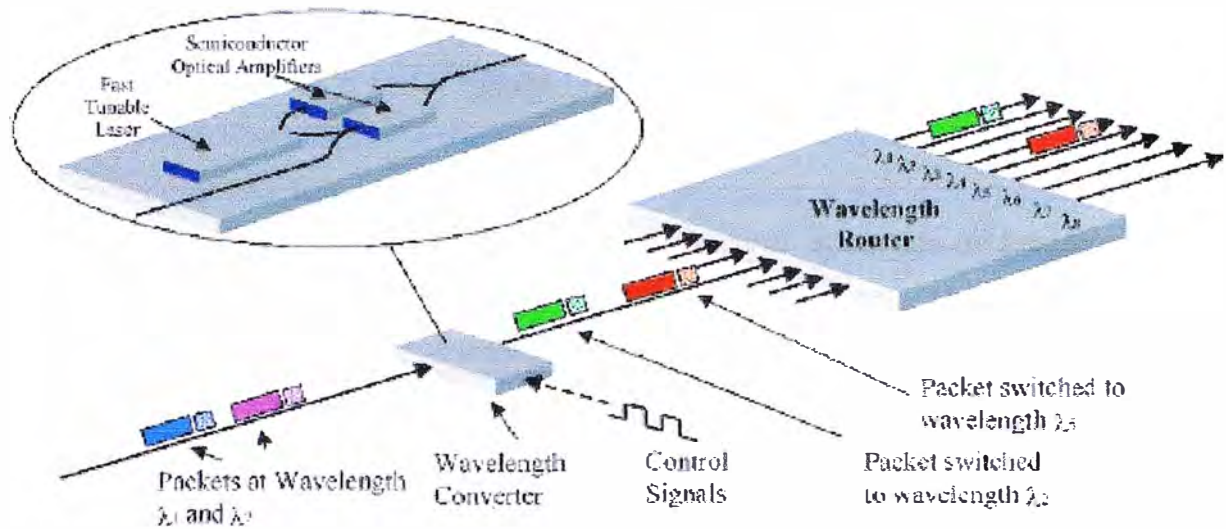


Fig. 3.3 Uso del diodo láser sintonizable en la tecnología Photonic-packet switching

Debido que no se realizan conversiones ópticas-eléctricas de las señales en los nodos (sólo en los extremos finales de la red) es que hay un gran beneficio en cuanto al consumo de potencia y la velocidad enrutamiento.

En este capítulo se presentaron 2 casos en donde tecnologías haciendo uso de diodos láser sintonizables representan grandes soluciones a las limitaciones que muestran por un lado el uso de longitud de onda fija y por el otro el exceso de conversiones óptico-eléctricas de las señales en las redes de telecomunicaciones.



## CONCLUSIONES

1. Los diodos láser sintonizables están evolucionando en el sentido de brindar mayor rango de sintonización y con la mayor velocidad.
2. En las redes DWDM, los transponders que son fabricados con diodos láser sintonizables presentan significativas ventajas en implementación y mantenimiento de la red que aquellos que tienen diodos láser de longitud de onda fija.
3. Las nuevas tecnologías de red hacen uso de los diodos láser sintonizables para brindar mayores funcionalidades y ventajas de operación que las redes tradicionales.
4. Las características Los diodos láser sintonizables las hacen preferibles a los diodos de longitud de onda fija al momento del desarrollo de nuevas propuestas de tecnologías de red.
5. Según aumente la demanda de los diodos láser sintonizables por parte de las nuevas tecnologías en desarrollo, las técnicas de fabricación de los diodos láser sintonizables mejoraran y sus precios también se reducirán a la par de los diodos láser de longitud de onda fija.

**ANEXO A**  
**FUNDAMENTO TEORICO DE DIODOS LÁSER**

## FUNDAMENTO TEÓRICO DE DIODOS LASER

### A.1 La generación de Luz

La emisión de luz en forma de fotones puede producirse espontáneamente o también estimuladamente debido a la acción de otro fotón sobre los electrones y teniendo el fotón un adecuado nivel de energía.

#### A.1.1 Emisión espontánea

Es realmente el caso normal. Cuando un electrón es elevado a un nivel de energía más alto, este estado es usualmente un estado inestable y el electrón espontáneamente retornará a un estado más estable muy rápidamente (en pocos pico segundos) emitiendo un fotón mientras lo hace. En un elemento semiconductor el nivel más alto de energía correspondería a la banda de conducción y el siguiente nivel más bajo de energía a la banda de valencia. Cuando la luz es emitida espontáneamente, su dirección y fase será aleatoria pero su longitud de onda será determinada por la cantidad de energía que el electrón emite cuando realiza este cambio de estado.

Es importante señalar que parte de la energía de un electrón en la banda de valencia o en la banda de conducción toma la forma de "momento de estructura" (referido a la estructura de las uniones de átomos). Para que un electrón salte de la banda de conducción a la banda de valencia (y emitir un fotón) el momento de estructura en ambas bandas deben ser las mismas (sólo algunos semiconductores y aleaciones cumplen esta condición). También para que en esta transición se emita un fotón, primero el electrón debe perder su momento de estructura y lo hará en forma de un fonón (cuanto de energía en forma de vibración mecánica de la estructura). Este requerimiento para la emisión consecutiva del fonón y luego del fotón, significa que la emisión del fotón es un evento poco probable.

#### A.1.2 Emisión estimulada

Es el proceso que ocurre durante la operación del láser. En algunas situaciones cuando un electrón entra a un estado de energía alta, es capaz de permanecer ahí por un tiempo "largo" (unos pocos microsegundos) antes que cambie de estado espontáneamente. Cuando un electrón está en este estado semi-estable de alta energía (excitado) puede

ser “estimulado” por la presencia de un fotón de luz para emitir energía en forma de otro fotón. Para que esto ocurra la energía del fotón incidente debe ser necesariamente igual a la diferencia de energía entre los niveles en los que el electrón excitado cambia de estado.

Es importante entender que cuando la emisión estimulada ocurre el fotón emitido tiene exactamente la misma longitud de onda, la misma fase y dirección que el fotón que lo estimuló. En la Fig. A.1 se aprecian los 3 tipos de procesos.

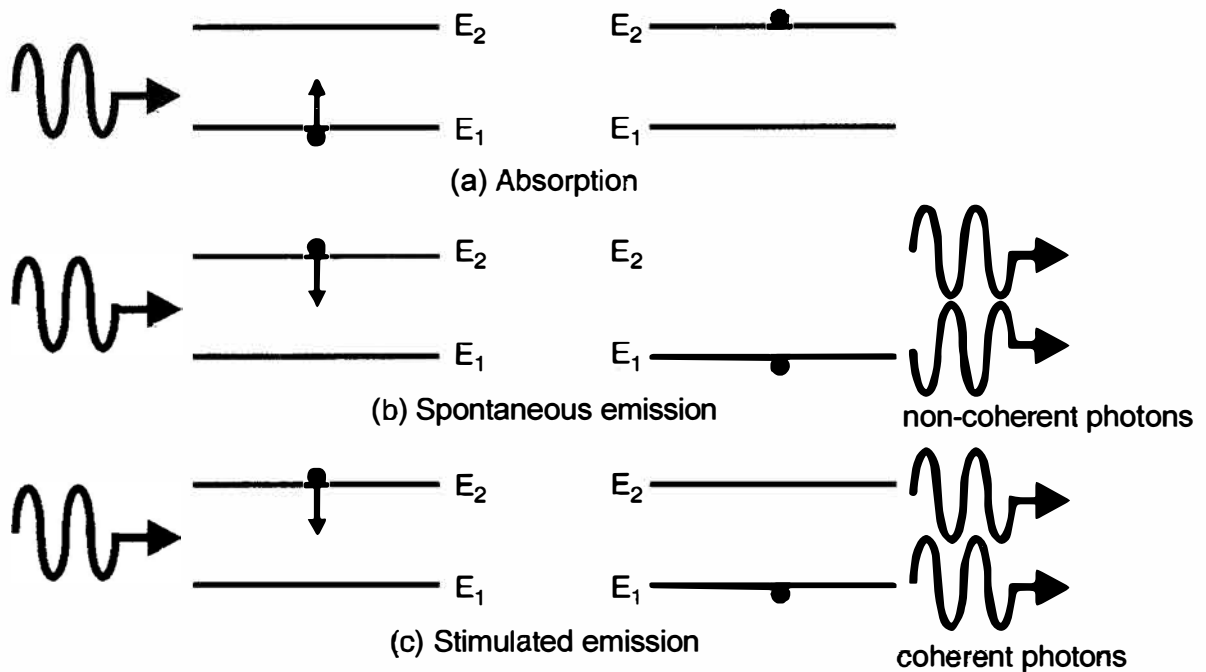


Fig. A.1 Procesos entre 2 diferente niveles de energía y un electrón.

En el caso (a), hay un proceso de absorción que ocurre cuando el electrón que está en el estado de energía más bajo absorbe la energía del fotón incidente para cambiar de estado a un nivel de energía mas alto, sin producir ninguna emisión de luz.

En el caso (b), ocurre la emisión espontánea, sin importar la presencia del fotón incidente, el electrón que esta en un nivel de energía más alto emite un fotón cuando cae a un nivel estable de energía mas bajo. Este fotón de luz emitido tiene parámetros aleatorios excepto la longitud de onda que es determinada por la energía emitida. Por lo tanto se dice que hubo una radiación no coherente.

En el caso (c), ocurre la emisión estimulada (por el fotón incidente), y el fotón liberado por el electrón, al pasar a un estado de energía más bajo, tiene los mismos parámetros que el foto incidente por lo tanto son fotones coherentes. Se dice que hubo una radiación coherente.

## A.2 Diodos emisores de luz (LED)

Casi todas las fuentes de luz usadas hoy en día en telecomunicaciones son hechas de semiconductores, los diodos LED son más simples que los láseres pero tiene varias cosas en común entre ellos.

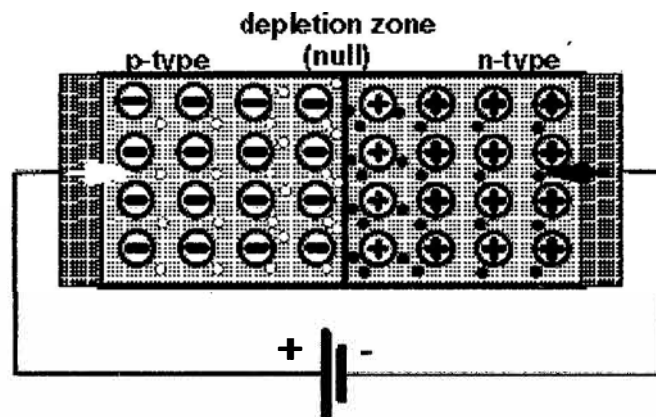


Fig. A.2 Potencial eléctrico aplicado a un diodo LED.

En su forma más simple este diodo está constituido por la unión de 2 semiconductores uno dopado con "impurezas" tipo n y otro con "impurezas" tipo p, en el semiconductor dopado tipo n hay exceso de electrones mientras que el de tipo p hay huecos o deficiencia de electrones.

Cuando se conecta un potencial eléctrico, como se muestra en la Fig. A.2, en el lado del material tipo n, los electrones libres son repelidos desde el polo negativo y empujados hacia la unión. Igualmente en el lado del material tipo p, los huecos son repelidos desde el contacto positivo y empujados hacia la unión. En la unión los electrones cruzarán hacia el lado tipo p y los huecos cruzarán hacia el lado tipo n.

Tan pronto como ellos cruzan, los electrones y huecos se recombinarán, cuando ello sucede los electrones libres deben perder un cuanto de energía para llenar los huecos, caerán del nivel más alto de energía (banda de conducción) al nivel más bajo (banda de valencia) y ocurrirá el proceso de emisión espontánea, con una longitud de onda que dependerá de la cantidad de energía que el electrón pierde para llegar hasta el hueco.

Algunos electrones y huecos tal vez no se recombinen y continúen a través del material hasta alcanzar al otro contacto, pero ellos serán un número muy pequeño.

La longitud de onda de la luz emitida por el LED es inversamente proporcional a la energía de separación entre las dos bandas (banda de conducción y banda de valencia)

que posee el material, llamada energía de **bandgap**.

La fórmula que relaciona la energía que emite el electrón y la longitud de onda de la luz emitida es:

$$\lambda = hc/\epsilon_{ft} = 1.24/\epsilon_{ft} \quad (\text{A.1})$$

Donde:

$\lambda$  = Longitud de onda en micras

$h$  = Constante de Planck =  $4.14 \times 10^{-15}$  eV

$c$  = Velocidad de la luz =  $3 \times 10^8$  m/s

$\epsilon_{ft}$  = Energía que emite el fotón en eV = Energía de bandgap

Esto significa que el material del que está hecho el LED determina la longitud de onda de luz emitida.

La siguiente tabla muestra las energías de bandgap y las longitudes de onda para los materiales más comunes utilizados en diodos LED y láser.

Tabla A.1 Energía de bandgap y longitudes de onda en varios materiales

Material	Formula	Rango de $\lambda$	Energía de Bandgap (eV)
Indio Fosforo	InP	0,92	1,35
Indio Arsenio	InAS	3,6	0,34
Galio Fosforo	GaP	0,55	2,24
Galio Arsenio	GaAs	0,87	1,42
Aluminio Arsenio	AlAs	0,59	2,09
Galio Indio Fosforo	GaInP	0,64-0,68	1,82-1,94
Indio Galio Arsenio	InGaAs	1,0-1,3	0,95-1,24
Indio Galio Arsenio Fosforo	InGaAsP	0,9-1,7	0,73-1,35

Es importante notar que dentro de las bandas de conducción y de valencia la mayoría de electrones y huecos están cerca al límite de ellas con la bandgap y en realidad hay una distribución dentro de cada banda como se muestra en la Fig. A.3.

Y las transiciones pueden tomar lugar desde, predominantemente, la banda de conducción en cualquier estado de energía hacia la banda de valencia a cualquier estado de energía también. La dirección viceversa también puede ocurrir, como por ejemplo por la acción del calor pero en forma escasa.

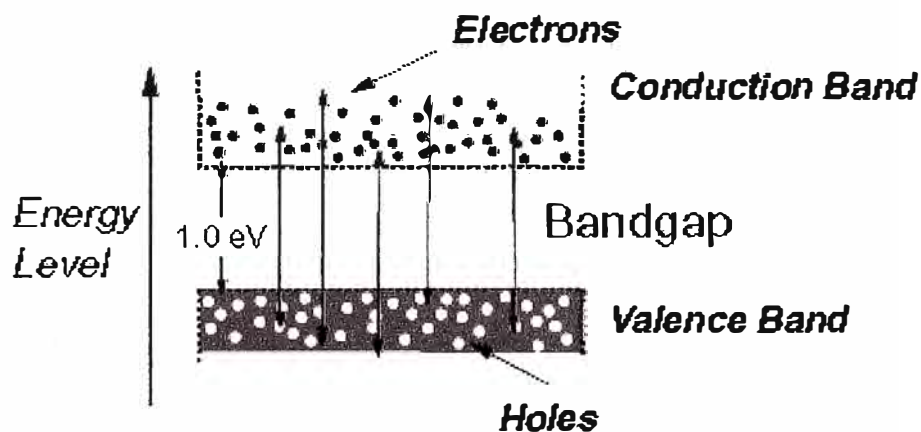


Fig. A.3 Electrones y huecos en sus respectivas bandas.

Debido al rango de estados posibles en ambas bandas hay un rango de diferentes transiciones de energía posibles, y esto resulta en un rango de diferentes longitudes de onda producidas en la emisión espontánea. Típicamente este rango es de aproximadamente 80nm. Luego se verá que los láseres también producen un rango de longitudes de onda posibles.

#### a) Estructura de doble heterounión

En la estructura simple de un diodo la unión p-n es necesariamente muy delgada y plana y necesita cubrir área relativamente grande para producir una cantidad significativa de luz, además la luz es espontáneamente emitida en todas direcciones y desde que el material semiconductor es transparente sobre la banda de longitudes de onda producidas, la luz se dispersará en todas direcciones, por lo tanto es muy difícil conseguir alguna cantidad importante de luz para ser colocado en una fibra cuando se usa una simple unión p-n.

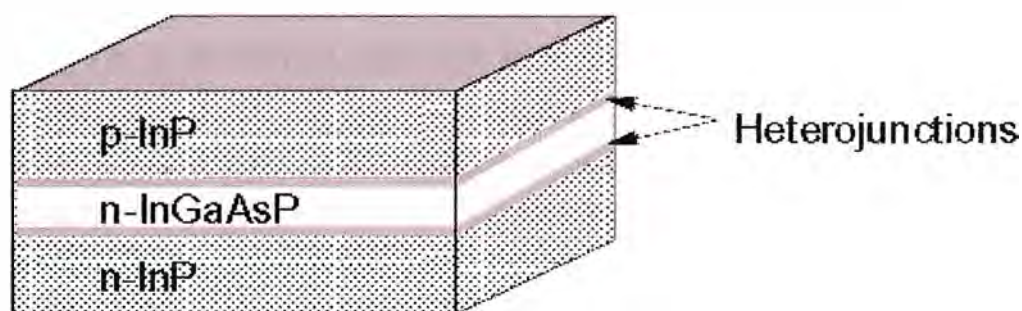


Fig. A.4 Doble heterounión

Mediante la forma de heterounión se puede conseguir producir luz en una área más localizada y con más intensidad.

Una heterounión es una unión entre 2 diferentes semiconductores con diferentes energías de bandgap (como se muestra en la Fig. A.4) con esto se logra crear un barrera de una sola vía. Portadores de carga (electrones o huecos) son atraídos hacia la barrera en la siguiente dirección: desde el material de mayor energía de bandgap hacia el otro de menor energía de bandgap.[4]

Un diagrama de energía de una doble heterounión es mostrada en la Fig. A.5, el diagrama muestra los niveles de energía para las tres secciones de una doble heterounión.

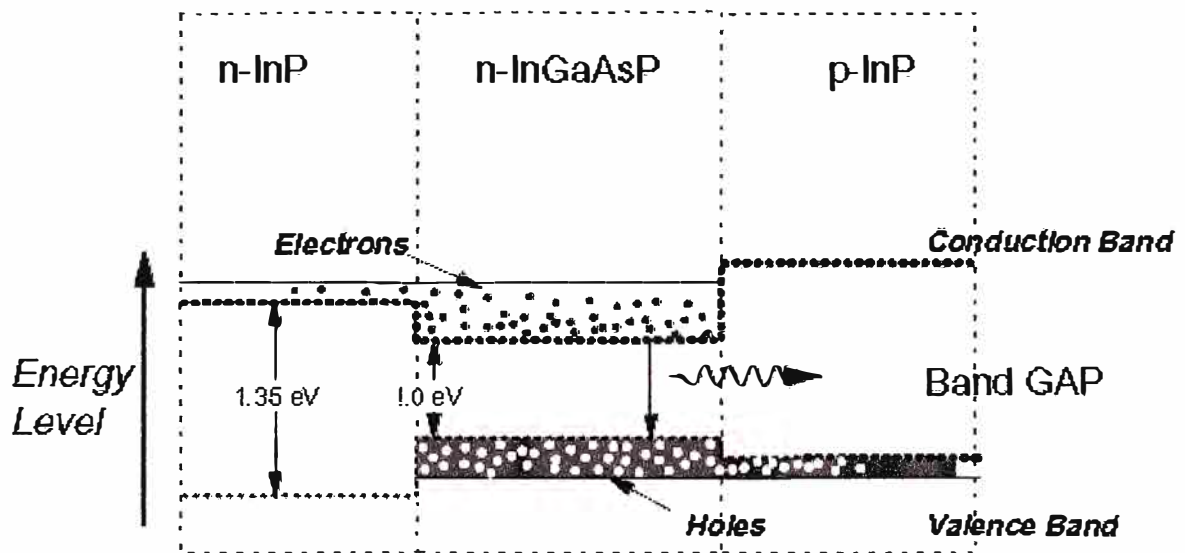


Fig. A.5 Bandas de energía en una doble heterounión

En la sección izquierda es n-InP y tiene una energía de bandgap de 1.35 eV, en la sección del medio el material es n-InGaAsP con una energía de bandgap de 1.0 eV, en la sección de la derecha el material es p-InP que tiene bandas de mayor energía que el material n-InP pero su energía de bandgap es la misma.

Entonces en esta disposición los electrones son atraídos a través de la unión de la izquierda desde el n-InP hacia el n-InGaAsP. Los huecos son atraídos a través de la unión de la derecha desde el p-InP hacia el n-InGaAsP. Por lo tanto las recombinaciones de electrones y huecos tomará lugar en el material n-InGaAsP y la espontánea emisión ocurrirá.

La heterounión nos permite tener una región activa pequeña en donde la luz es producida. Además el material de la región activa (en nuestro ejemplo n-InGaAsP) usualmente tiene un índice de refracción más alto que los otros componentes adyacentes



(en nuestro ejemplo p-InP y n-InP). Esto significa que un efecto de superficie de espejo es creado en la unión, lo que ayuda a confinar y dirigir la luz emitida. Por esta razón las capas que rodean a la región activa son llamadas capas de confinamiento.

### **A.3 Diodos láser**

El Láser es el acrónimo de “Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación”. Los lasers son por mucho el mejor tipo luz para las comunicaciones ópticas.

Algunas características del láser son:

La luz del láser ideal es de una única longitud de onda, (aunque en la práctica no es del todo cierto, como se verá más adelante en el concepto de “ancho de línea”). Esto es relativo a las características moleculares del material usado. Esta luz es formada en rayos paralelos y todos en una única fase. Esto es lo que se llama luz coherente.

Los láser pueden ser modulados muy precisamente, el récord es de un pulso óptico de 0.5 femto segundos de duración.[4]

Los láser pueden producir relativamente alta potencia, algunos tipos pueden producir kilowatts de potencia. Lasers para comunicaciones son de hasta cerca de 20mw de potencia, esto es mucho mas de lo que un LED puede generar.

Debido a que la luz del láser es producida en rayos paralelos un alto porcentaje (50% a 80%) puede ser transferido dentro de la fibra.

Por otro lado una de las desventajas del láser es que son bastante más caros que los LEDs. Uno de los motivos es que los lasers requieren, para su buen funcionamiento, control de temperatura y control de potencia y estos controladores son empaquetados junto con los lasers.

#### **A.3.1 Principios del láser**

El principio clave en la operación del láser es la emisión estimulada. Y, como se explicó anteriormente, cuando este tipo de emisión ocurre el nuevo fotón emitido tiene idéntica longitud de onda, fase y dirección que el fotón incidente. También se debe notar que el fotón incidente sigue su trayectoria acompañado del nuevo fotón emitido.

Si nosotros tomáramos cualquier material y lo confináramos en algún espacio cerrado, y luego lo bombardeáramos con energía de tal forma que el material lo absorba, lo que casi siempre ocurrirá es una emisión espontánea de luz, por ejemplo la mayoría de materiales se pondrán de color rojo y luego blanco a medida que se incrementa la energía que se le entrega.

Los materiales capaces de emisión estimulada (o lasing) se distinguen por el hecho que

ellos tienen un estado de energía alto que es metaestable (semiestable), así ellos pueden mantener su estado de energía alto por algún tiempo antes de decaer espontáneamente. En la Fig. A.6 se muestra el proceso de emisión estimulada.

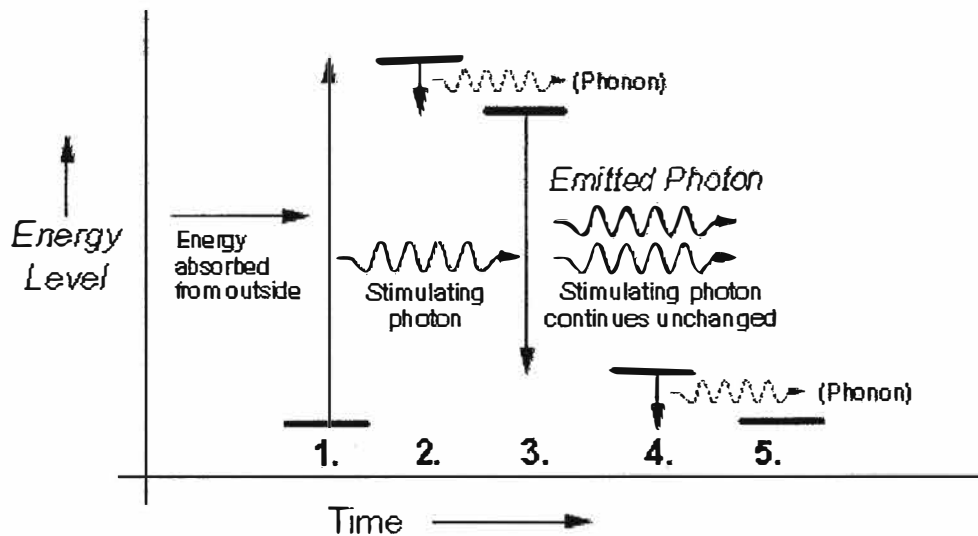


Fig. A.6 Estados de energía en el proceso de emisión estimulada

Después que el átomo absorbe energía, generalmente en forma seguida el átomo libera también energía, en forma de vibración de su estructura, llamada fonón, para alcanzar el estado metaestable (nivel 3, estado excitado) en el cual el lasing pueda ocurrir.

Del mismo modo cuando la emisión del fotón es completada aun puede necesitarse emitir una pequeña cantidad de energía para alcanzar el nivel final de estado estable, en este caso tendremos un láser de 4 niveles, que es más eficiente que los que no requieren esta última transición para alcanzar el estado estable (láser de 3 niveles).

También, para obtener emisión estimulada se requiere otra condición que es la llamada inversión de población, que es cuando se obtiene más cantidad de electrones en el estado de alta energía que los que están presentes en los estados de baja energía, ya que de lo contrario ocurrirán mayormente procesos de absorción y no habrá efecto lasing.

En la Fig. A.7 se muestra como se crea el efecto lasing:

El espacio en el cual la generación de fotones por estimulación toma lugar es llamado **región activa** y es confinada entre dos espejos paralelos, con uno de ellos parcialmente reflectante.

Cuando la energía es aplicada, los electrones desarrollan el estado de alta energía, nada interesante sucederá hasta que no haya suficientes electrones en ese estado. Formación de la inversión de población.

Cuando algunos átomos excitados empiezan a decaer al nivel más estable, ellos realizarán la emisión espontánea y los fotones emitidos tendrán direcciones aleatorias, algunos chocarán con los lados de laterales de la cavidad, otros golpearán los espejos en cualquier ángulo y sólo unos pocos viajarán en la dirección del eje de la cavidad y rebotarán entre los espejos.

Estos fotones mientras rebotan entre los espejos tendrán la oportunidad de estimular a electrones que se encuentren en el estado excitado y ocasionarán la emisión estimulada en estos electrones. Así, mientras los fotones viajan en la dirección del eje de la cavidad, rebotando, interactuarán con más y más electrones excitados y la emisión espontánea disminuirá y la emisión estimulada a lo largo del eje de la cavidad predominará y tendremos un láser, que se emitirá a lo largo del eje de la cavidad y a través del espejo parcialmente reflexivo.

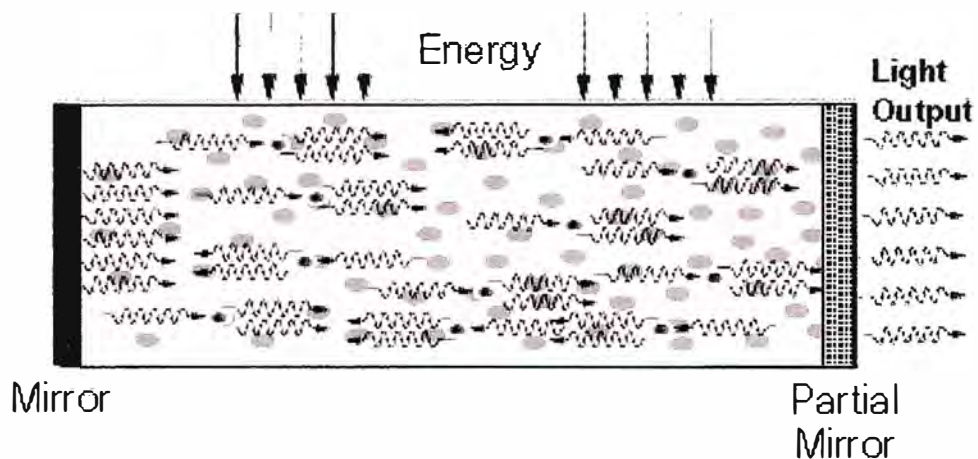


Fig. A.7 Proceso de lasing

### A.3.2 Láser Fabry-Perot

El diodo láser Fabry-Perot es básicamente como una estructura de un LED pero con un par de espejos en los extremos de la región activa para crear las condiciones del lasing. El láser Fabry-Perot está basado en el filtro de Fabry-Perot que consiste en una cavidad resonante, con 2 espejos a los extremos parcialmente reflectantes, en el que por uno de los espejos se incide luz y luego que la luz ingresa a la cavidad ésta rebotará entre los espejos y ocurrirá lo siguiente: Cuando la distancia entre los espejos es un entero múltiplo de media longitud de onda de la luz que se refleja, esta luz se reforzará a sí misma.

Entonces consideramos un láser Fabry-Perot (desde el filtro Fabry-Perot) cuando la luz no incide desde fuera sino que se genera dentro de la cavidad, por la emisión estimulada,

y cuando la longitud de la cavidad (distancia entre los espejos) es relativamente de pequeño tamaño (algunas centenas de micras).

En este tipo de lasers, las longitudes de onda producidas están relacionadas a la distancia entre los espejos por la siguiente formula:

$$L = \lambda X / 2n \quad (\text{A.2})$$

Donde:

$L$  = Longitud de la cavidad

$X$  = Entero arbitrario y representa a los modos generados en la cavidad

$\lambda$  = Longitud de onda correspondiente al entero  $X$

$n$  = Índice de refracción de la región activa

El número entero  $X$  nos da los modos en los que puede *lasear* el láser Fabry-Perot, pero estos modos estarán restringidos a un sólo rango debido a las características del material del que esta hecho (debido al índice de refracción y bandgap del material).

En la Fig. A.8 se muestra un a curva de ganancia típica y el espectro de emisión de un diodo láser Fabry-Perot

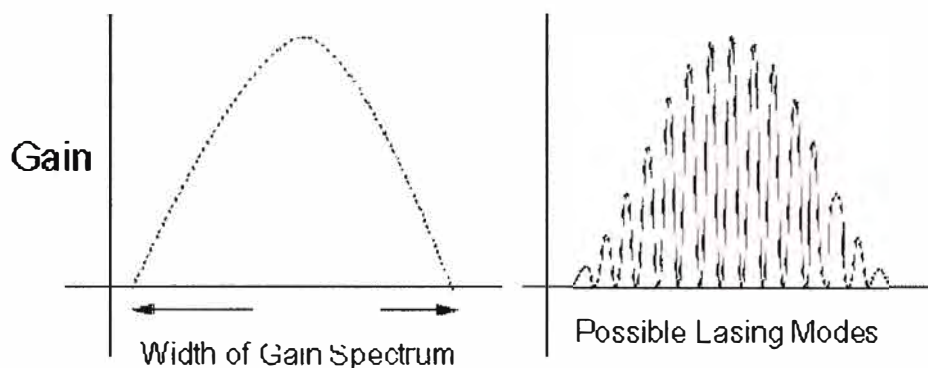


Fig. A.8 Ganancia y espectro de longitudes de onda del DL Fabry-Perot

Así un láser Fabry-Perot puede producir un rango de longitudes de onda y cada una de ellas debe estar dentro de la curva de ganancia de la región activa. Típicamente en InGaAsP/InP diodos láser Fabry-Perot en 1550nm la emisión ocurre con entre 4 a 10 modos longitudinales (longitudes de onda). [2]

El láser Fabry-Perot es el más simple de todos los diodos láser y durante su operación ocurren los siguientes fenómenos, algunos de los cuales son comunes a los demás

diodos, que son importantes indicar:

**Turn-on delay:** Es el tiempo de retardo entre el momento que la energía eléctrica es aplicada y cuando el láser empieza producir la luz. Esto es causado por la necesidad de construir la concentración de portadores en la cavidad hasta llegar a tener la inversión de población requerida para alcanzar el *lasing*.

**Energización por debajo del umbral de lasing:** Cuando se aplica la energía, justo debajo del umbral de lasing, hay emisiones de láser débiles en un rango de longitudes de onda sobre todo el espectro de ganancia. Esto es causado por emisiones espontáneas creando acciones de láser de corta vida, ya que el dispositivo no tiene suficiente energía para mantener lasing

**Energización justo por encima del umbral:** El proceso de lasing se vuelve más predominante y sólo unas pocas longitudes de onda con fuerte intensidad están presentes.

**En la región de operación:** cuando el tiempo de energía aplicada es el suficiente, el lasing dominará en la cavidad y el proceso de emisión espontánea será casi eliminado. En este punto sólo quedarán un pequeño número de longitudes de onda y la más fuerte (con mayor potencia) de ellas dominará el lasing.

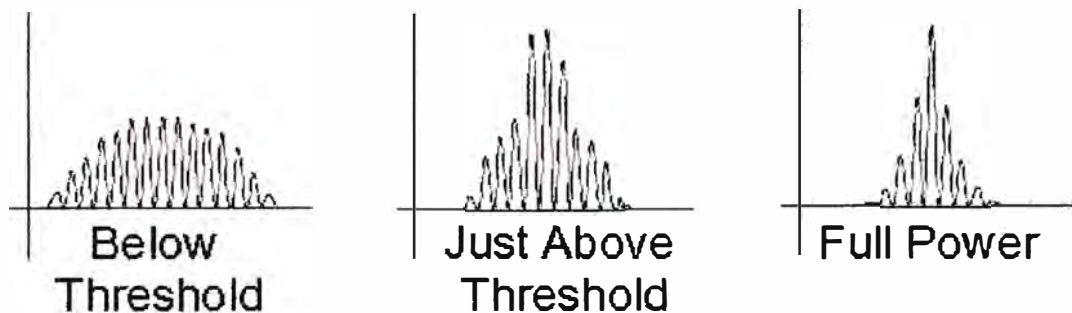


Fig. A.9 Cambios en el espectro durante la energización del diodo láser FP

**Hole Burning:** Después de un tiempo muy corto de operación el lasing tiende a gastar los electrones excitados disponibles en el centro (ruta de la longitud de onda dominante) de la cavidad. Esto ocurre porque no se puede distribuir la potencia, en toda la región activa, en una manera pareja. Así un hueco es “quemado” en la ruta tomada por el modo dominante. El modo dominante es así significativamente reducido en potencia.[4]

**Mode Hopping:** El evento Hole Burning activa el Mode Hopping. Cuando el modo dominante decrece, los demás modos son capaces de incrementar y convertirse dominantes. Así el láser produce luz en un modo por un tiempo muy corto y luego éste salta a otro modo, y luego a otro y así sucesivamente. El rango entero de modos resonantes dentro del espectro de ganancia puede ser cubierto. Esto ocurre muy

rápidamente (en pocas decenas de pico segundos por salto) así se obtiene el efecto del láser produciendo una banda de longitudes de onda. Es importante notar que cuando un modo simple domina los otros no son suprimidos enteramente sino ellos son fuertemente atenuados. Cuando la señal es enviada sobre un medio dispersivo, Mode Hopping puede convertirse en una fuente adicional de ruido. Esto es porque cada modo es una diferente longitud de onda y cada longitud de onda viajará en una diferente velocidad dentro de la fibra. Se puede ver esto en la Fig. A.10.

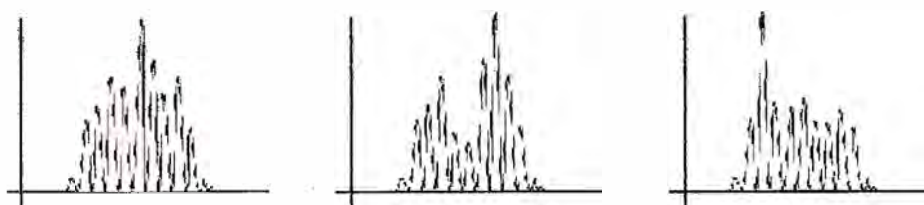


Fig. A.10 Comportamiento del evento Mode Hopping

**Chirp:** Inmediatamente después de que la potencia es aplicada a un láser hay un ~~abrupto~~ cambio en el flujo de densidad del portador (electrón y hueco) en la cavidad causada por la operación del láser mismo. Esta densidad de carga de portadores es un factor que afecta el índice de refracción. En resumen, la temperatura en la cavidad se incrementa rápidamente. Este incremento de temperatura es demasiado localizado para afectar la longitud de la cavidad inmediatamente pero ello contribuye a cambiar el índice de refracción del material en la región activa (dentro de la cavidad).

Estos cambios en el índice de refracción de la cavidad producen un rápido cambio rápido en el centro de la longitud de onda de la señal emitida. En el caso de los lasers semiconductores se produce un Chirp. La longitud de onda se desplaza a otra más larga de la que fue al inicio del pulso. Este no es un gran problema en transmisiones de longitud de onda única en distancias cortas, pero en aplicaciones de gran distancia y en sistemas WDM estos Chirps pueden ser problemas serios. Esto es debido a que amplían el ancho espectral de la señal e interactúa con otros aspectos del sistema de transmisión para producir distorsión. En verdad, el problema del Chirp es la principal razón por la que se usan moduladores externos (fuera de la cavidad) para tasas de transmisión mayores a 1 Gbps. [4]

**Ruido de intensidad relativa (RIN):** Se refiere a la fluctuación de intensidad aleatoria que ocurre en la salida de un láser. La causa principal aquí parece ser el carácter aleatorio de las emisiones espontáneas. Mientras que el láser opera, nuevas emisiones

espontáneas ocurren y alguna de ellas puede resonar dentro de la cavidad y ser amplificadas. Esto causa alguna fluctuación en la potencia de salida.

**Ruido de fase:** Los mismos fenómenos de emisiones espontáneas descritas previamente, también afectan, en forma aleatoria, la fase de la luz láser generada. Esta variación es una consecuencia natural de las maneras en que los lasers operan y no pueden ser suprimidas totalmente.

**Ruido intercavidad:** En general hay dos formas de este tipo de ruido. El primero es causado por reflexiones cercanas tales como el acoplamiento láser a fibra. Este puede ser minimizado utilizando revestimientos y lentes diseñados para minimizar reflexiones. El segundo es causado por reflexiones de componentes ópticos más distantes. En algunos sistemas (especialmente en sistemas de gran distancia) un aislador óptico es usado inmediatamente después del láser para eliminar los problemas causados por estas reflexiones de extremo lejano.

**Drift:** Después que el dispositivo ha estado trabajando un tiempo la temperatura del dispositivo tiende a cambiar (se calienta) esto afectará la longitud de la cavidad y la longitud de onda cambiará. También, hay efectos causados por la antigüedad de los dispositivos y los materiales de los que están hechos. Alguno de esos efectos puede causar un ligero cambio en la longitud de onda con el tiempo.

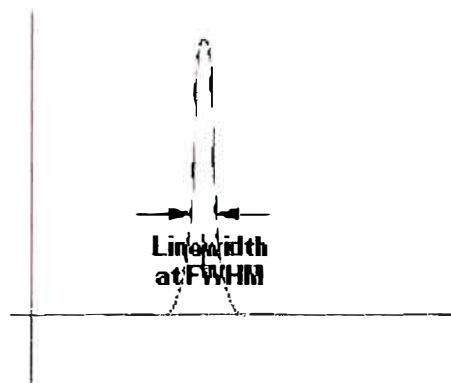


Fig. A.11 Ancho de línea de un modo longitudinal

#### **Ancho de línea (Linewidth):**

El ancho de línea es causado por el hecho que las emisiones espontáneas en el láser no se pueden suprimir totalmente y algunas pueden resonar dentro de la cavidad, causando pequeños desplazamientos de frecuencia durante la operación del láser. Incluso un láser

funcionado en una única longitud de onda tendrá un ancho de línea finito. Como se aprecia en la Fig. A.11.

Su valor se mide en Hertz, y está relacionado al ruido de fase, sus valores típicos son menores de 10Mhz.

#### **Razón de supresión de modo lateral SMSR:**

Es una calificación de la calidad del láser, está definido como la razón de potencia entre el modo dominante y el modo lateral más fuerte, como se ve en la Fig. A.12. Se expresa en decibels y en aplicaciones de telecomunicaciones es aceptable un valor de 30dB y preferible un valor de 40dB.

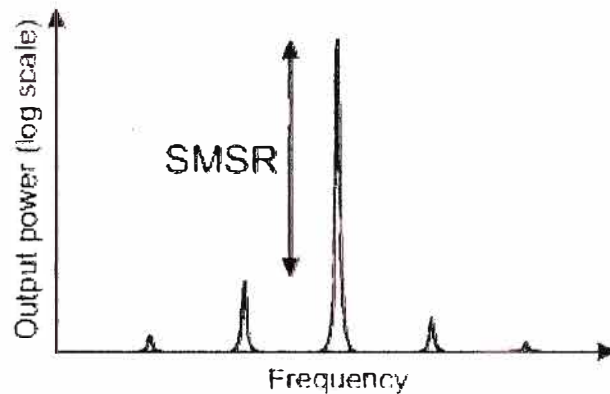


Fig. A.12 Representación del SMSR

### **A.3.3 Estructuras de diodos láser**

#### **a) Doble Heterounion**

Como se vio en la sección A.2-a, el uso de la estructura de doble Heterounión era beneficioso ya que ayudaba a confinar el proceso de recombinación de los electrones y huecos dentro de la capa activa, gracias a la diferencia de energía de bandgap entre la capa activa y sus capas adyacentes que tenían mayor valor. También, como resultado de presentar mayor índice de refracción, la capa activa se comportaba como una guía de onda para la luz.

Para el caso de un diodo láser esta estructura presenta 2 espejos en los extremos paralelos de la región activa que son hechos del mismo material semiconductor que esta región mediante cortes especiales.

Sin embargo esta estructura tiene sus debilidades y es que al usar su superficie completa para generar el lasing, requiere de relativamente altos valores de corriente umbral para ello. También carece de mecanismos de confinamiento para los fotones en la dirección lateral paralela al plano de unión de las capas.

Para mejorar estos inconvenientes se han ideado 2 tipos de modificaciones a esta estructura que se describen a continuación.



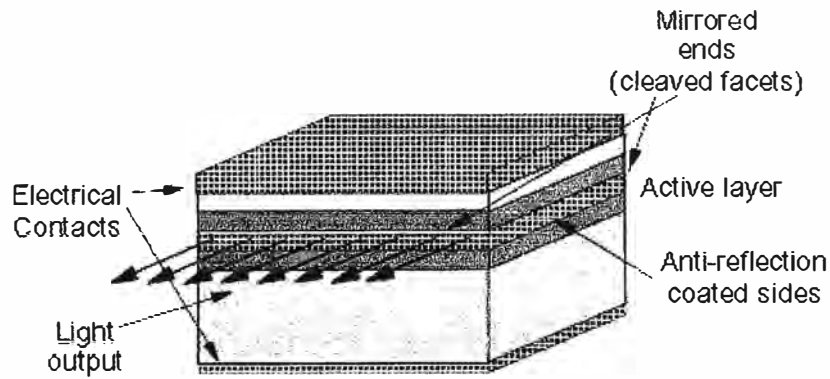


Fig. A.13 Estructura de doble heterounion de un diodo láser

### b) Guiado por Ganancia

A fin de reducir el nivel umbral de la corriente y disminuir los casos de generación de modos laterales, esta técnica reduce el área de contacto sobre la superficie del dispositivo por lo que el área de inyección de corriente es reducida de ancho a unas pocas micras. Cuando esto sucede la energía es enviada dentro de la capa activa en una franja larga y habrá fácilmente suficiente ganancia a lo largo de esta trayectoria para que el lasing ocurra y reduciendo así el umbral de energía. También los modos transversales y modos longitudinales fuera de la región de la energía enviada no tendrán suficiente ganancia para sostener el lasing, con esto se logra un espectro angosto de luz láser.

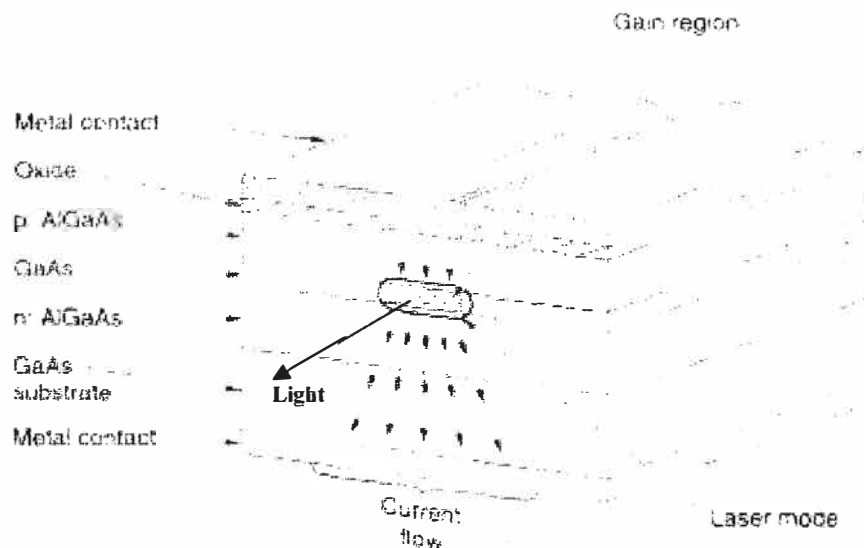


Fig. A.14 Estructura de Guiado por Ganancia

### c) Guiado por índice

La estructura de guiado por ganancia puede ser mejorada si se colocan franjas de semiconductor, con mayor energía de bandgap, a los lados de la región activa, de esta forma ya no tendremos una capa plana como región activa sino solo una angosta franja

en el medio de la estructura. Esto también es llamado una "Buried" Heteroestructura o simplemente BH, ya que la capa activa esta ahora limitada por todos lados por semiconductores de más bajo índice de refracción. Logrando con esto guiar la luz en mejor forma y también confinar más firmemente la ganancia óptica lateral.

En la Fig. A.14 se presenta una estructura de índice guiado y una curva característica Pot vs. I de un láser BH en 1550nm, con una región activa de 1.5micras de ancho y 400 micras de longitud. Se puede apreciar también el espectro del láser para distintas corrientes.

Se puede apreciar una corriente de umbral pequeña (10mA), una relación lineal, encima del umbral, de la corriente suministrada con la potencia de luz emitida. Potencias ópticas considerables son obtenidas, alrededor de 5mW en 40 mA [2].

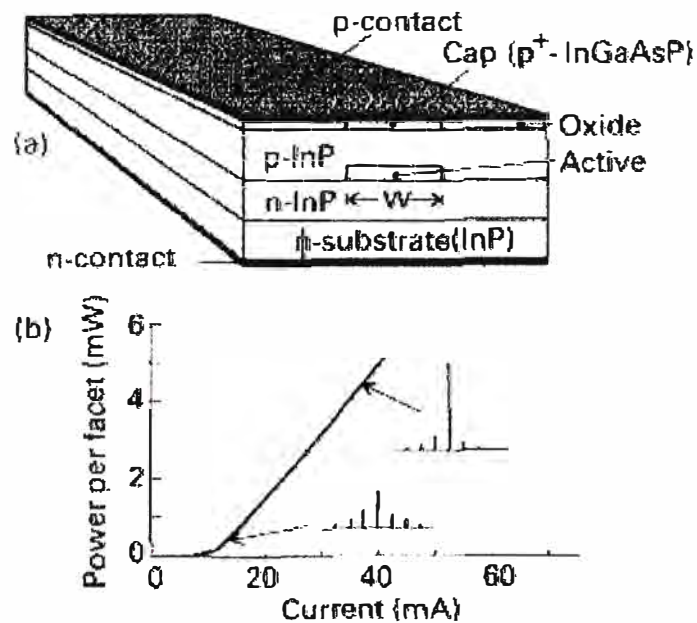


Fig. A.15 Estructura de Índice Guiado

Estas estructuras, doble heterounion, Guiado por ganancia y Guiado por índice son llamadas en forma genérica como "Doble Heteroestructuras".

#### d) Quantum Well

Una importante extensión de estas Doble Heteroestructuras, es hecha cuando el grosor de la cavidad (región activa) es reducido a unos pocos nanómetros (<15nm) de manera que efectos de cuantización ocurren en esta región que se comporta como pozo cuántico (Quantum well). Los niveles de energía en la banda de conducción y la banda de valencia

se muestran en niveles discretos y no continuos. El efecto neto en este tipo de lasers es que presentan menores valores de corriente umbral (se han logrado umbrales de corriente de 1mA) y muestran mayor ganancia óptica ya que la densidad de estados (asociados con la mayor inversión de población en el láser) es incrementada debido a que el esparcimiento de portadores inyectados (electrones o huecos) en la cavidad sobre un rango de energía amplio es reducido por la cuantización. Este tipo de estructuras previene la formación de modos laterales y asegura que el lasing sea de una única longitud de onda.

Su desventaja es que debido al pequeño tamaño de la cavidad la potencia óptica de salida es de bajo valor comparado con estructuras no Quantum well.

Generalmente los QW son usados de manera apilada espaciadamente unos sobre otros, como se muestra en la Fig. A.16, formando lo que se llama "Múltiple Quantum Well". De esta forma se logran mayores niveles de potencia de salida.

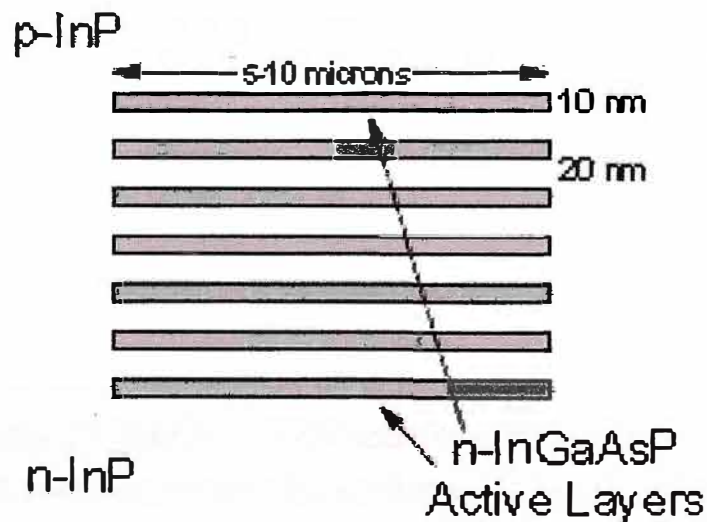


Fig. A.16 Estructura Múltiple Quantum Well

#### **A.3.4 Diodo láser DFB**

Para entender éste y otros tipos de láseres, es necesario graficar la función de la rejilla de Bragg o "Bragg grating" en estos láseres.

La rejilla de Bragg o Bragg grating, como se muestra en la Fig. A.17, consiste de un juego de pequeñas ranuras espaciadas uniformemente (periódicas) sobre la superficie de un material, en nuestro caso de un semiconductor.

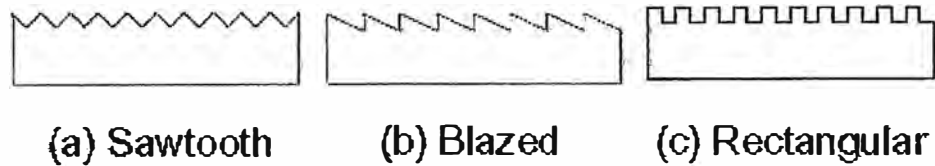


Fig A.17 Perfiles de rejillas de Bragg

Supongamos que una onda incide sobre una de las ranuras y otra sobre la ranura siguiente que esta espaciada  $\Lambda$  unidades, como se muestra en la Fig. A.18

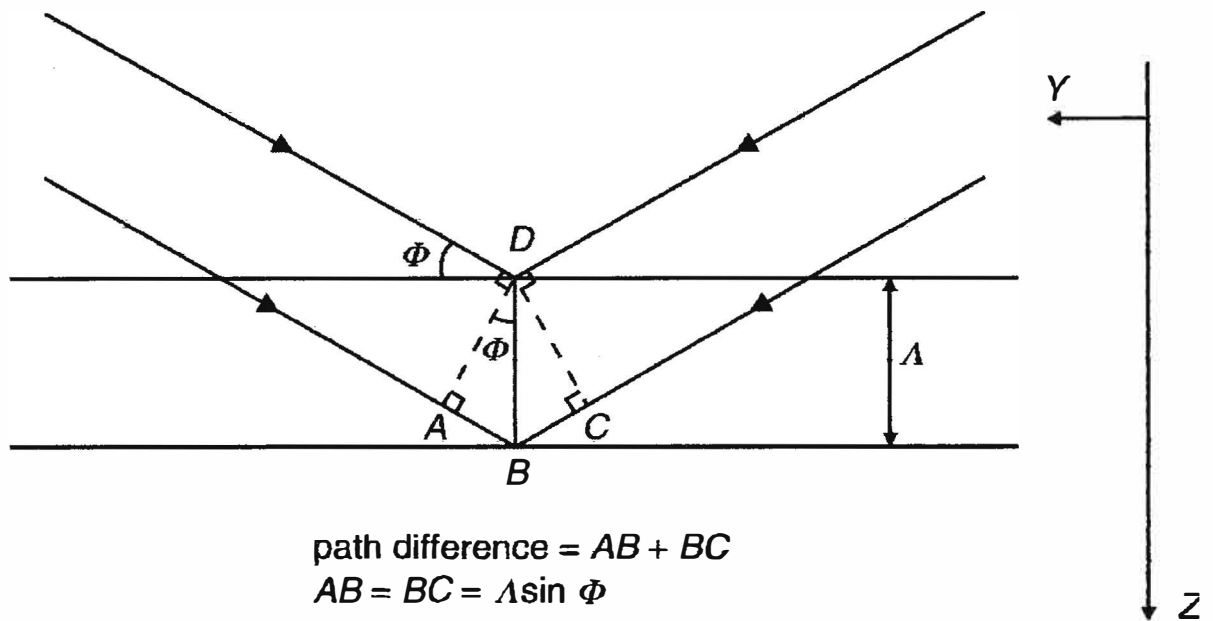


Fig A.18 Modelo simple para explicar la función de la rejilla de Bragg

La constante de propagación de la onda en el medio que sea representada por  $\beta_0$ . En cada intervalo periódico de valor  $\Lambda$ , la onda incidente experimentará el mismo cambio de índice de refracción entre los medios que conforman la ranura, de modo que la onda incidente se reflejará siempre en la misma dirección. Para una rejilla que consiste de  $N$  periódicas ranuras habrá  $N$  ondas reflejadas. Para que cualquiera de 2 ondas reflejadas estén en fase o se interfieran constructivamente, la diferencia de fase entre ellas debe ser múltiplo de  $2\pi$ . Entonces según la grafica:

$$\beta_0(AB+BC) = \beta_0(2\Lambda \sin \phi) = 2m\pi \quad (\text{A.3})$$

Donde  $m$  es un entero. Ahora si la onda incidente lo hace ahora en ángulo recto ( $\phi = \pi/2$ ) entonces tenemos que:

$$2\beta_0\Lambda = 2m\pi \quad (\text{A.4})$$

Esto es conocido como la condición de Bragg y  $\beta_0$  llega a ser la constante de propagación de Bragg. El número entero  $m$  define el orden de difracción de Bragg, El primer orden de difracción,  $m = 1$ , es el más usado en nuestro caso.

Reemplazando el valor de la constante de propagación de Bragg ( $\beta_0$ ) en función de la longitud de onda tenemos en (A.4), (por definición de constante de propagación  $\beta_0 = 2\pi n/\lambda_g$ ):

$$2\pi n/\lambda_g = \pi/\Lambda \quad (\text{A.5})$$

$$\Lambda = \lambda_g/2n \quad (\text{A.6})$$

Donde  $\lambda_g$  es llamado la longitud de onda de Bragg (en el vacío). De estas ecuaciones se puede ver que la longitud de onda de Bragg está relacionado también al periodo de la rejilla  $\Lambda$ , alterando este periodo, la longitud de onda de Bragg  $\lambda_g$  puede ser cambiada a un valor específico. También, para que las ondas reflejadas se interfieran constructivamente (en el orden de difracción 1) la condición es que la onda incidente debe ser igual a la longitud de onda de Bragg en el medio ( $\lambda_g/n$ ), o, lo que es lo mismo, igual a el doble del periodo de las ranuras en la rejilla ( $\Lambda$ ).

Ahora bien, en el láser DFB (Distribuido feedback láser) se hace uso de esta rejilla de Bragg, colocándola en el interior de la región activa de una estructura láser dada como se muestra en la Fig. A.19.

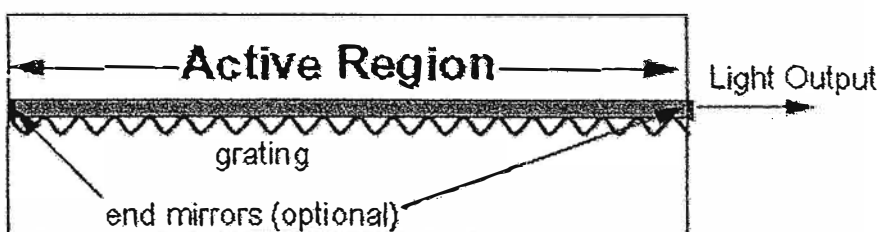


Fig A.19 Disposición de la rejilla en un láser DBF

La presencia de la rejilla en la cavidad causa pequeñas reflexiones, a lo largo de ella, de los fotones generados. Estas reflexiones tendrán interferencia constructiva si cumplen con la condición de Bragg (el periodo de la rejilla es un múltiplo de media longitud de onda del fotón). Este efecto es más fuerte cuando el periodo de la rejilla de Bragg es igual a la mitad de la longitud de onda de los fotones generados.

En principio los láseres DFB no necesitan espejos en los extremos de la cavidad. Pero para mejorar su eficiencia se coloca un espejo de alta reflectancia en uno de los extremos y en el otro una capa antireflexiva como se muestra en la Fig. A.20.

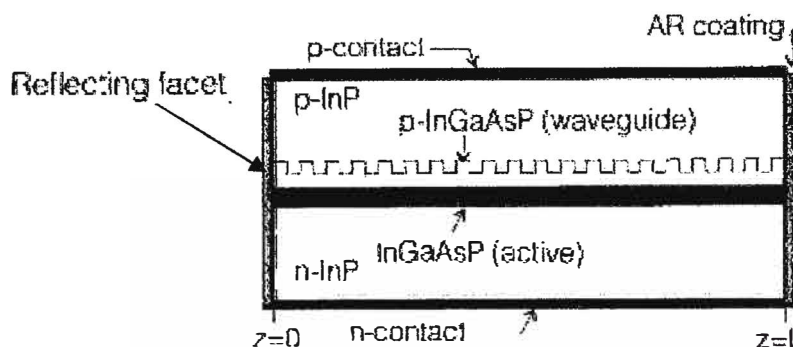


Fig A.20 Composición de los lados extremos del diodo DFB

Por efecto de la temperatura este tipo de láser sufre dos principales efectos:

Cambio del Índice de refracción de la cavidad

Cambio del nivel de energía de bandgap en la cavidad

En el caso del cambio de la energía de bandgap, es poco significativo el efecto ya que la longitud de onda resonante en el láser estará determinada por el periodo de la rejilla y por su índice de refracción. La bandgap en realidad cubre un rango de energías y con tal que la energía asociada a la longitud de onda resonante se encuentre dentro de ese rango, el láser funcionará.

Con el cambio el índice de refracción por medio de la temperatura la longitud de onda resonante cambiará a una de mayor longitud a una razón de  $0.1\text{nm/K}$ .

También es importante señalar que para que funcione de manera adecuada un láser DFB, la longitud de onda dominante correspondiente al rango de energía de la bandgap (longitud de onda pico,  $\lambda_p$ ) no debe estar alejada demasiado de la longitud de onda de Bragg, ya que esto incrementa la corriente de umbral y trae el riesgo que el láser pueda saltar a una longitud de onda cercana a la longitud de onda pico ( $\lambda_g$ ).

Láseres DFB tienen las siguientes ventajas:

Poseen un muy angosto ancho de línea (se ha reportado uno de  $3.6\text{KHz}$ ).

Tienen un bajo efecto de chirp.

Presentan muy bajo ruido de intensidad relativa (RIN).

También presentan las siguientes desventajas:

Son extremadamente sensibles a las reflexiones, para minimizar esto son paquetizados con aisladores integrados en el montaje.

Cuando son usados para en sistemas DWDM, necesitan mantener estable la temperatura, ya que la estabilidad de la longitud de onda resulta ser crítico en estos sistemas, por eso son integrados con dispositivos de control de temperatura.

Condiciones variables producen fluctuaciones en la potencia de salida, por eso se coloca un fotodiodo en cerca de la cara posterior del láser, este fotodiodo coge una porción de luz generada en el láser y provee la entrada para el control de de corriente mediante el lazo de feedback.

Por lo dicho, este tipo de láser tiene un costo relativamente alto, ya que para una operación estable se necesitan aislamiento óptico, control de temperatura y control de potencia.

### A.3.5 Diodo láser DBR

El láser DBR (Reflector Distribuido de Bragg), es muy similar al láser DFB, pero la principal diferencia es que los láseres DBR tiene la rejilla de Bragg fuera de la región activa, como se muestra en la Fig. A.21.

Esto se diseña así ya que el índice de refracción dentro de la cavidad del láser cambia durante su operación debido a cambios en la temperatura y en el flujo de electrones. Y estando fuera de la cavidad, la rejilla de Bragg sufrirá menos variación en su índice de refracción y por lo tanto en la longitud de onda operacional del láser. En otras palabras la longitud de onda que tendrá la onda reflejada por las rejillas de Bragg no dependerá de la corriente de polarización.

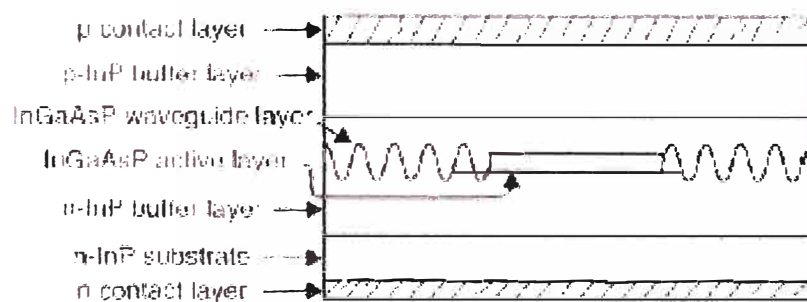


Fig A.21 Esquema del diodo láser DBR

~~El láser~~ usan espejos parcialmente reflectantes en los extremos de la cavidad y/o rejilla, en la cara posterior con 30% de reflectividad y en la cara delantera con 4% de reflectividad. La rejilla de Bragg también se puede colocar sólo a un lado de la cavidad como se muestra en la Fig. A.22.

En esta figura también se puede ver como parte del campo óptico ingresa a la región de la rejilla para obtener ondas reflejadas hacia la cavidad.

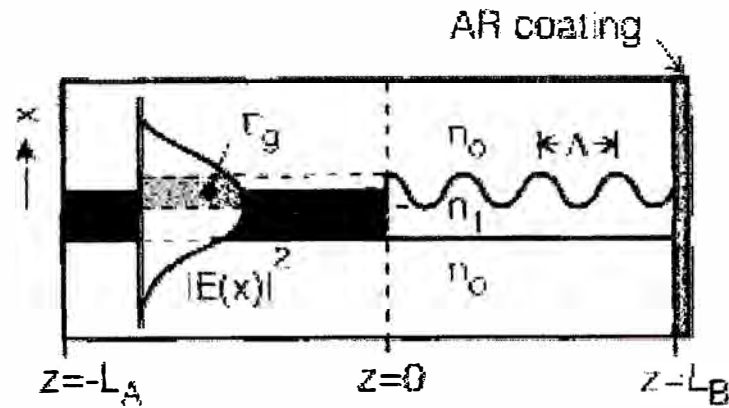


Fig A.22 Acción de la potencia generada en la cavidad sobre ~~la~~

En el diseño y fabricación de láseres DBR, es importante asegurar un buen acoplamiento de la perfil de distribución de potencia en la transición desde la región activa hacia la rejilla, ya que sino causaría pérdidas de acoplamiento y generaría reflexiones que interferirán con las ondas reflejadas desde la rejilla.

Los diodos láser DBR también producen una única longitud de onda al igual que los DFB, con pequeño ancho de línea; su principal inconveniente es que pueden sufrir significativas absorciones en la región inactiva cerca de la rejilla, lo que causa pérdida de eficiencia.

### A.3.6 Diodo láser VCSEL

Los anteriores diodos láser descritos emiten la luz láser a través del borde de una de las caras de la cavidad (en forma paralela al plano de la cavidad), por tanto son llamados "Edge láser", en cambio los diodos láser VCSEL (Vertical Cavity Emitting Lasers), como su nombre lo indica transmiten el láser desde y en la dirección perpendicular a la superficie de la cavidad.

Estos diodos son construidos apilando un gran número de delgadas capas de material semiconductor, uno encima del otro, como puede verse en la Fig. A.22. Las dimensiones de la región activa son del tipo Quantum Well y se hace uso de varias capas de ellas. Debido a la pequeña longitud de la cavidad, unas pocas micras, espejos de alta reflectividad (99.5%) son necesarios, a ambos lados de la región activa, para lograr que las ganancias excedan a las pérdidas en la cavidad.

Esto se logra creando Bragg reflectores, alternando capas delgadas de semiconductores con alta y bajo índice de refracción de grosor  $\lambda/4$  cada una (para cumplir con la condición de Bragg), típicamente son usados de 20 a 40 pares. Un ejemplo de la estructura de este diodo láser se muestra en la Fig. A.23.



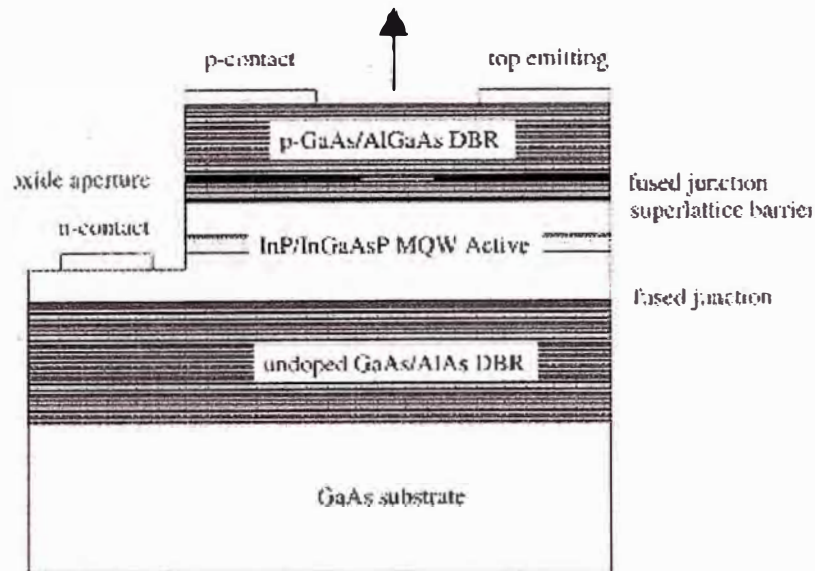


Fig A.23 Diodo láser VCSEL de 1.55um

La región de ganancia Quantum Well, puede ser estrechado con materiales de oxido para angostar el área de sección del flujo de corriente y reducir la corriente umbral como se muestra en la Fig. A.24

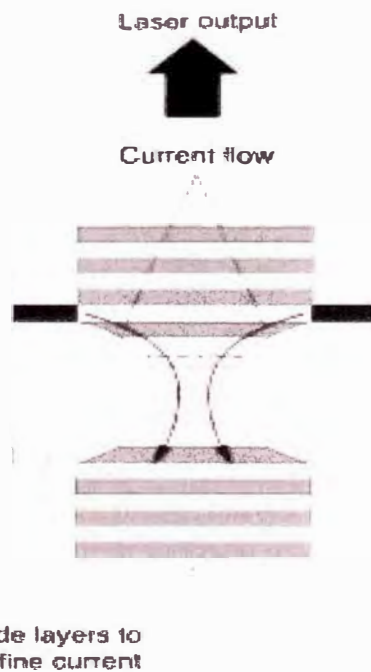


Fig A.24 Estrechamiento de la región de ganancia

Las características de estos diodos son:

Baja potencia de consumo y bajo umbral de corriente (5mA).

Alta velocidad de modulación con baja corriente. (reportado 30 Gb/s)

Angosto rayo de luz láser circular (1um de diámetro) que puede fácilmente acoplarse

directamente a la fibra.

Operación de único modo longitudinal. En virtud de su extremadamente pequeña longitud de cavidad su ancho de ganancia es más pequeño que el espaciamiento de los modos que pueda generar, por lo que sólo puede generar uno solo.

Bajo costo y pequeño empaquetamiento.

Pueden operar en las 3 bandas: 850nm, 1310nm y 1550nm.

Son muy estables y generalmente no necesitan control de potencia mediante feedback o fotodiodo monitor como los diodos láser DFB y DBR.

## BIBLIOGRAFIA

1. Achyut K. Dutta/Niloy K. Dutta/Masahiko Fujiwara, " WDM technologies: active optical components", Academic Press – USA, 2002.
2. J. Buss/Markus Amann/Daniel Blumenthal, "Tunable laser diodes and related optical sources", John Wiley& sons– USA, 2005.
3. Eoin M. Connolly "Investigation of Wavelength Tunable Laser Modules for use in Future Optically Switched Dense Wavelength Division Multiplexed Networks", Dublin City University- Irlanda, 2007.
4. IBM Corporation, "Understanding optical communications", IBM – USA, 1998.
5. Govind P. Agrawal, "Fiber-Optic communications systems 3<sup>ra</sup> edition", John Wiley& sons– USA, 2002.
6. H. Ghafouri-Shiraz, "Distributed feedback laser diodes and optical tunable filters", John Wiley& sons– England, 2003.
7. William T. Silfvast, "Laser fundamentals second edition", Cambridge university press – USA, 2004.
8. F. Graham Smith/Terry A. King/Dan Wilkins, "Optics and photonics: An introduction", John Wiley& sons– England, 2007.
9. T. Mason/J. Barton/L. Coldren, "Improved Sampled Grating DBR", Universidad de California – USA, 2000.

## GLOSARIO

DFB	Distributed Feedback Láser
DBR	Distributed Bragg Reflector
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EAM	Electro absorption modulator
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifiers
FEC	Forward error correction
ITU-T	International Telecommunications Union – Telecommunications
OADM	Optical Add/Drop Multiplexer
OOK	Modulation On-Off Key
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
ROADM	Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SGDBR	Sampled Grating Distributed Bragg Reflector
SOA	Semiconductor optical amplifier
SONET	Synchronous Optical Network
SSGDBR	Super Structure Grating Distributed Bragg Reflector
TDM	Time Division Multiplexing
VCSEL	Vertical Cavity surface Emitting Laser
WDM	Wavelength Division Multiplexing