

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 1991 VOLUMEN 1 Nº2



INGENIERIA
1991

FUNDAMENTOS DE DIODOS LASER PARA TRANSMISION COHERENTE POR FIBRA OPTICA

Ing. Luis Diego Martín Naranjo M.Sc. *

Resumen

Este documento describe como la realimentación óptica afecta las características de un LASER semiconductor simple con lo cual se pueden solventar problemas de ingeniería y permitir muchas aplicaciones del diodo LASER, al producir por ejemplo la operación de un modo simple estable con un ancho de línea más angosto (menos ruido y más coherencia), lo cual resulta muy útil en los modernos sistemas de telecomunicaciones ópticas.

Summary

This issue describes how the optical feedback affects the characteristics of single semiconductor lasers, and this can allow us to solve engineering problems in applications of laser diodes, for instance, producing a stable single mode operation with narrow linewidth (less noise) which is useful in modern lightwave telecommunications systems.

INTRODUCCION AL DIODO LASER

Un diodo LASER de doble heterounión (DH) está compuesto de una delgada capa de material semiconductor, tal como GaAs (Arsenuro de Galio), el cual es un material de brecha directa, atrapada entre capas de materiales semiconductores disimilares. La banda brecha (E_g) de la región de la capa activa es levemente menor que las de sus capas vecinas, confinando así los electrones y los huecos inyectados. Dado que el índice refractivo (n) es inversamente proporcional a la banda brecha tenemos que la capa activa tiene un índice de refracción levemente más alto que las capas vecinas, actuando así como una guía de onda óptica con una intensidad luminosa mayor en esta área activa.

La estructura es un cristal cortado por sus planos naturales actuando como una cavidad Fabry-Perot (1), en donde el proceso entero para la acción LASER toma lugar. La *Figura No.1* muestra los principios de estos procesos.

Un posterior confinamiento de la guía de onda puede ser logrado al estructurar una capa cubierta de diferente índice refractivo a cada lado de la región activa.

Un confinamiento adicional de corriente puede obtenerse al establecer los contactos eléctricos en una franja angosta.

El LASER DH puede tener un cierto número de modos transversales. El modo transversal fundamental es el único modo deseable debido a que ayuda a producir un haz LASER de sección transversal gaussiana (3). Modos transversales de alto orden producen un haz más amplio con muchos picos de intensidad. Estos picos no son deseables debido a problemas de acople con la fibra óptica.

Los diodos LASER típicos emiten luz sobre un ámbito espectral amplio debido al principio de emisión estimulada (15) que supera la emisión espontánea. Sólo aquellas frecuencias que corresponden a un número entero de medias longitudes de onda dentro de la cavidad son reforzadas y amplificadas por las resonancias de la cavidad. El espectro resultante consiste de una mezcla compleja de líneas espectrales rodeando un modo central. Entonces un LASER de frecuencia simple tiene sólo un modo longitudinal simple (o cuasi simple ya que puede tener dos frecuencias pequeñas laterales) y emite sólo el modo transversal fundamental, según se muestra en la figura No. 2 como patrones de radiación y modos longitudinales.

La diferencia de un Diodo Electroluminiscente (LED) con un Diodo LASER radica fundamentalmente en que el primero no tiene la cavidad óptica de resonancia Fabry-Perot fabricada a nivel microscópico, lo que implica que no haya selectividad en los modos longitudinales creando una envolvente continúa en los modos emitidos y

*. Profesor Escuela Ingeniería Eléctrica Universidad de Costa Rica

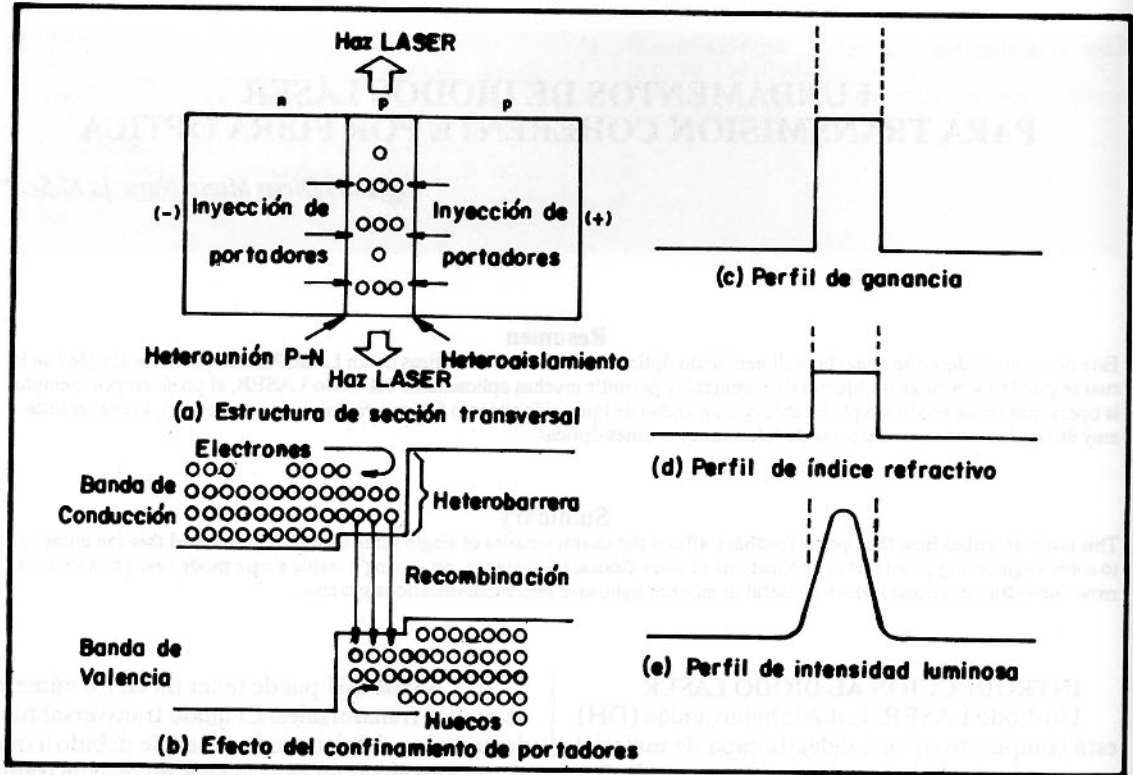


FIGURA No. 1. Principios de operación de un LASER DH.

una potencia radiada notablemente menor por haber más interferencia destructiva debido a sólo emisión espontánea.

LIMITACIONES DE LA FIBRA OPTICA (1)

La dispersión y atenuación son límites fundamentales en la operación de sistemas por fibra óptica. Los dos tipos de dispersión son la modal y la cromática.

El sistema ideal consiste de un LASER de frecuencia simple emitiendo luz sólo en el modo transversal fundamental. El LASER debe tener un ancho de haz muy angosto el cual puede ser acoplado eficientemente dentro de la fibra de modo simple y debe emitir sólo en un modo longitudinal. Esto permite que sólo una longitud de onda se transmita reduciendo la dispersión cromática de la fibra.

DIODOS LASER DE MODO TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL SIMPLE (1)

Los diodos LASER de modo transversal simple pueden ser fabricados para que confinen la región activa a una franja angosta tal que ningún modo transversal de alto orden pueda aparecer.

Un reto mayor es crear un modo longitudinal simple estable, el cuál permite que sólo una longitud de onda sea reforzada bajo rápida modulación o CW.

El comportamiento de modos en un LASER semiconductor puede ser caracterizado por el acople y la transferencia de energía entre modos longitudinales. En cualquier instante, una longitud de onda en el LASER puede tener más energía que otra (aunque la energía total en todos los modos permanece constante).

El acople de energía conduce a ruido de partición, esto es, el modo fundamental brinca de un lado a otro, haciendo incapaz a la longitud de onda simple de portar información.

Por eso para crear un LASER que opere en una frecuencia estable, las características de oscilación del LASER de modo simple deben ser alteradas.

Hay muchos tipos de arreglos que pueden ser usados para cambiar las características oscilantes y entre otros diseños está crear un nuevo tipo de LASER semiconductor que incorpore una cavidad externa para producir realimentación óptica.

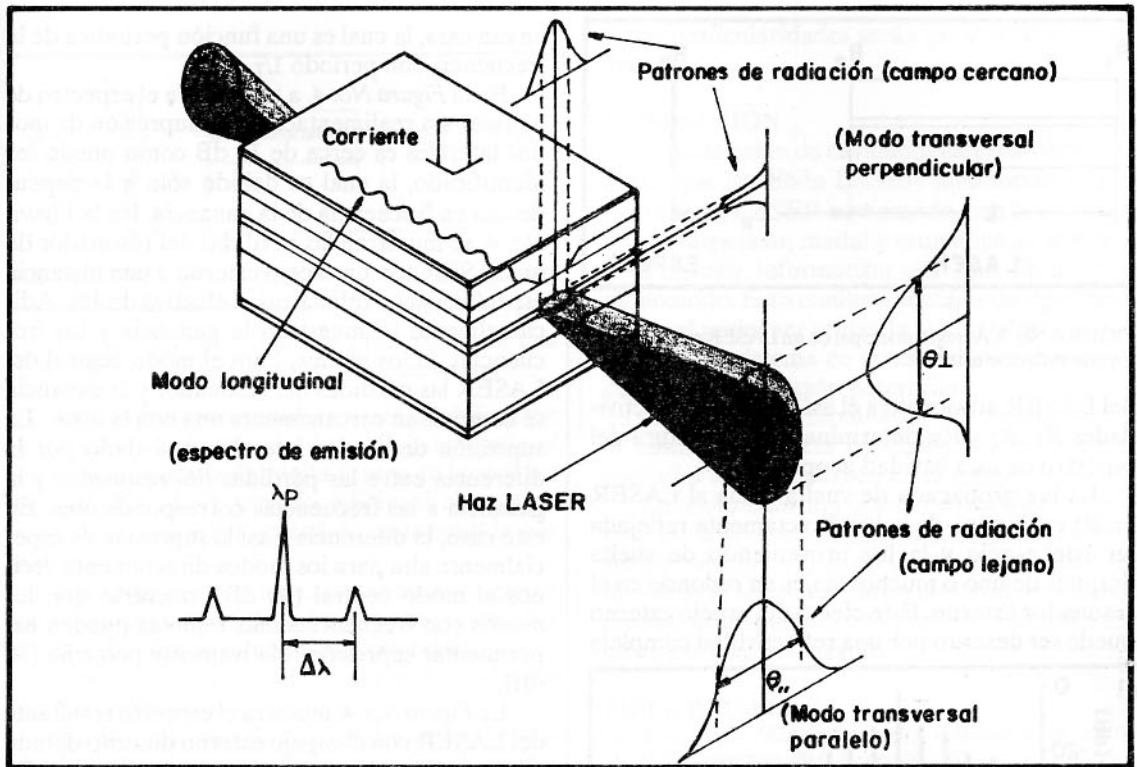


FIGURA No. 2. Características de un LASER.

REALIMENTACION OPTICA (1, 5, 6, 9, 11, 14)

Las propiedades del LASER semiconductor son influenciadas en gran manera por la realimentación óptica, esto es, por realimentación al diodo de una fracción de la potencia de salida causada por reflexión de la luz en los extremos de la fibra, en los conectores u otra superficie reflectora a lo largo de la línea de transmisión. Tal realimentación puede ser selectivamente aplicada para influenciar las propiedades del LASER como sea requerido. Es posible realizar lo que es llamado estado de Modo Simple Dinámico (MSD).

El arreglo principal de un LASER semiconductor con realimentación óptica se muestra en la Figura No. 3.

Un espejo externo con reflexión R_R se instala a una distancia L_R de la cara de salida de luz del LASER. R_1 y R_2 son los factores de reflexión de las caras del LASER. Los parámetros significativos en este arreglo son los tiempos de circulación internos y externos τ_{in} y τ_{ex} , siendo estos los tiempos tomados por la luz para circular una vez dentro del LASER, o pasar a lo largo del espacio L_r dos veces, respectivamente.

Una distinción entre los tipos de realimentación es si el viaje en redondo externo es mayor o menor comparado con el tiempo de coherencia de la luz. Para valores menores es llamada "Región de modos de la cavidad compuesta" y las reflexiones ocurren en superficies cercanas (no localizadas remotamente).

INFLUENCIA DE LAS REFLEXIONES EN LA REGION DE MODOS DE CAVIDAD COMPUESTA

Algunas propiedades de los diodos LASER como las características de potencia (4, 7, 8, 10), el espectro (13) y el comportamiento de modulación (3), están fuertemente influenciadas por el tipo de realimentación. A este respecto un parámetro significativo es el tiempo de viaje en redondo en el resonador externo en relación con el tiempo de viaje en redondo dentro del LASER. Si esta relación es grande, se conoce la situación como resonador "largo" y si es pequeña es un resonador "corto".

El tiempo de viaje en redondo τ_{in} en la cavidad LASER y el tiempo de viaje en redondo τ_{ex} en la cavidad formada por el espejo externo y la cara

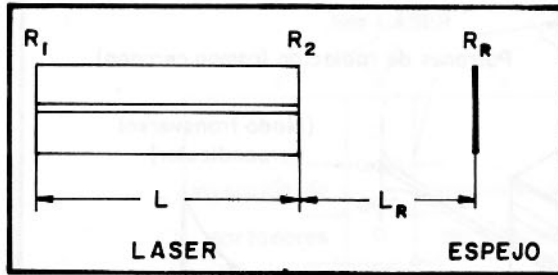


FIGURA No. 3. Arreglo principal de un LASER semiconductor con reflector externo.

del LASER adyacente a él así como las reflectividades R_1 , R_2 y R_R determinan las estructura del espectro de esta cavidad acoplada.

La luz propagada de vuelta hacia al LASER en R_2 es la suma de la luz directamente reflejada en este espejo y la luz proveniente de vuelta después de uno o muchos viajes en redondo en el resonador externo. Este efecto del espejo externo puede ser descrito por una reflectividad compleja

en esa cara, la cual es una función periódica de la frecuencia con período $1/\tau_{ex}$.

En la *Figura No. 4.* a se muestra el espectro de un laser sin realimentación. La supresión de modos laterales es cerca de 10 dB como puede ser identificado, la cual es debido sólo a la dependencia en frecuencia de la ganancia. En la *Figura No. 4.* se muestran las pérdidas del resonador de un LASER con un espejo externo a una distancia específica y con reflectividad efectiva de 4%. Adicionalmente se muestran la ganancia y las frecuencias de los modos. Para el modo central del LASER las pérdidas del resonador y la ganancia se compensan cercanamente una con la otra. La supresión de modos laterales está dado por la diferencia entre las pérdidas del resonador y la ganancia a las frecuencias correspondientes. En este caso, la diferencia y así la supresión es especialmente alta para los modos directamente vecinos al modo central (40 dB), mientras que los modos con frecuencias más remotas pueden experimentar supresión relativamente pequeña (30 dB).

La *Figura No. 4.* muestra el espectro resultante del LASER con el espejo externo descrito debido a las pérdidas del resonador mostradas en la *Figura No. 4.* El arreglo para el resonador corto descrito anteriormente provee supresión efectiva de los modos laterales. Por esta razón se usa para estabilizar lasers multimodo y así mantener la influencia de la dispersión a un nivel particularmente bajo.

LASER DE MODO DINAMICO SIMPLE USANDO UN ESPEJO EXTERNO

En este arreglo, reflectores externos pueden ser usados para influenciar el comportamiento de modulación, espectro y ancho de línea. Varios tipos de reflectores son usados ya sea espejos cóncavos o planos (2, 12). La única radiación que es reforzada es a la longitud de onda que resuena tanto en el LASER como en la cavidad externa. Esta última actúa en la supresión de las longitudes de onda no deseadas.

Para operación MSD, los resonadores externos con reflector corto son adecuados, esto es, el espaciado entre el reflector es menor que la longitud óptica del resonador del LASER.

La *Figura No. 5.* muestra tal arreglo incluyendo una fibra en reducción (taper-fiber) que ayuda a un mejor acople de energía y la *Figura No. 6* muestra el espectro del LASER en operación CW

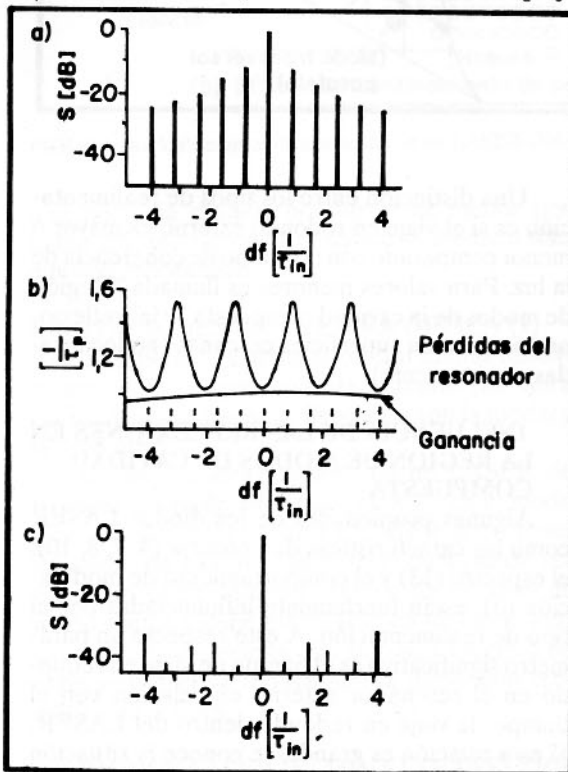


FIGURA No. 4. (a) Espectro de un LASER solitario; (b) Ganancia y pérdidas del resonador para un LASER con resonador externo corto; (c) Espectro de un LASER con resonador externo corto. () es medido desde la frecuencia de modo central.

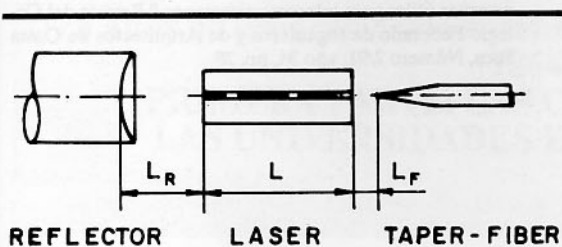


FIGURA No. 5. Arreglo principal para una LASER estabilizando por un reflector externo.

(Onda continua sin modular), a) sin estabilización y b) con un reflector. La luz reflejada desde el espejo es enfocada de vuelta dentro de la cavidad del LASER. Este espacio adicional sirve para estabilizar una sola longitud de onda emitida por el LASER.

El espejo se pone a una distancia equivalente de cerca de la mitad de la longitud del resonador del LASER desde el espejo posterior del LASER. Esta razón asegura que cada segundo modo sea particularmente bien suprimido.

En el transcurso de una investigación de posgrado, se logró una excelente supresión de modos (mejor a 100:1) con un resonador corto formado por un espejo esférico de 1.6 mm de radio frente a un LASER de GaAlAs para uso experimental, pero formando una doble cavidad externa usando el otro espejo para reducir el ruido espectral y

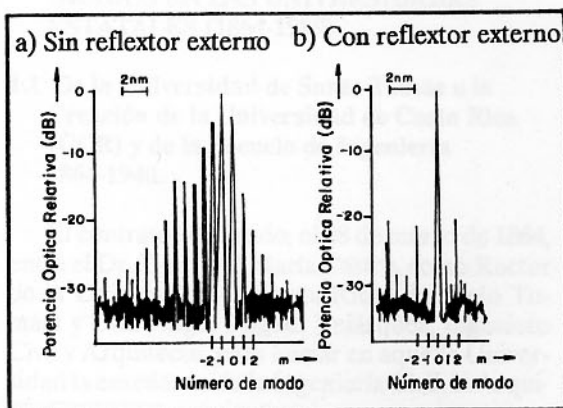


FIGURA No. 6. Espectro de un LASER con y sin reflector externo.

cuyas particularidades serán presentadas en otro artículo.

CONCLUSION

La utilización de cavidades externas sirve para hacer que un diodo LASER multimodo se convierta en un LASER monomodo, con la ventaja de que la dispersión modal y cromática se minimiza al transmitir información por una fibra óptica monomodo. Esto conlleva ventajas de tipo tecnológico al poder ser utilizada la portadora del LASER en un sistema de transmisión coherente, el cual utiliza detección heterodina y que requiere un oscilador en el modulador del transmisor con la misma frecuencia estabilizada que la de un oscilador local localizado en el receptor.

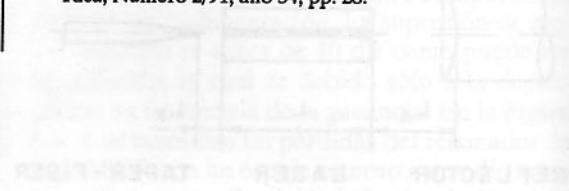
La realimentación óptica provoca las características de frecuencia simple y longitud de onda simple, siempre y cuando se cumplan ciertas condiciones de interferencia en las cavidades involucradas, principalmente la posición relativa entre las superficies en cuestión.

BIBLIOGRAFIA

- Bell, T. E., "Single-frequency semiconductor lasers," *IEEE Spectrum*, 20 (12), pp. 28, 1983.
- Elze, G., et al., "Experiments on modulation properties and optical feedback of laser diodes," *IEEE J. Lightwave Technol.*, LT-2, 1063, 1984.
- Fleming, M., "Spectral characteristics of external cavity controlled semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, 17, 44, 1981.
- Fujiwara, M., "Low-frequency intensity fluctuations in laser diodes with external optical feedback," *Appl. Phys. Lett.*, 38, 217, 1981.
- Goldberg, L., et al., "Spectral characteristics of semiconductor lasers with optical feedback," *IEEE J. Quantum Electron.*, 18, 555, 1982.
- Kikuchi, K., "Simple formula for spectrum-narrowing of semiconductor lasers with optical feedback," *Electron. Lett.*, 18, 10, 1982.
- Lang, R., et al., "External optical feedback effects on semiconductor injection lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, 16, 347, 1983.
- Ogasawara N., et al., "Mode switching in injection lasers induced by temperature variation and optical feedback," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 22, 1684, 1983.
- Olesen H., et al., "Solitary laser spectral linewidth," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 22, L664, 1983.
- Osmundsen J., et al., "Experimental investigation of stability properties for a semiconductor laser," *Electron. Lett.*, 19, 1068, 1983.
- Patzak E., et al., "Semiconductor laser linewidth in optical feedback configurations," *Electron. Lett.*, 19, 1026, 1983.
- Preston K., et al., "External cavity controlled single longitudinal mode laser," *Electron. Lett.*, 17, 931, 1981.

- 13. Van der Ziel J., et. al., "Single mode operation using short external optical cavity," IEEE J. Quantum Electron., 20, 223, 1984.
- 14. Wyatt R. and Devlin W., "InGaAsP external cavity laser with tuning range," Electron. Lett., 19, 110, 1983.

- 15. Marín Naranjo L. D., "Diodos LASER con cavidades externas útiles para telecomunicaciones," Revista del Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, Número 2/91, año 34, pp. 28.



El diodo láser emite luz en un modo de propagación único, lo que permite su uso en aplicaciones de telecomunicaciones. Este tipo de láser es muy eficiente y compacto, lo que lo hace ideal para dispositivos portátiles. La longitud de onda de emisión puede ser ajustada variando la corriente de alimentación y la temperatura del dispositivo.

Este tipo de láser es muy eficiente y compacto, lo que lo hace ideal para dispositivos portátiles. La longitud de onda de emisión puede ser ajustada variando la corriente de alimentación y la temperatura del dispositivo. Este tipo de láser es muy eficiente y compacto, lo que lo hace ideal para dispositivos portátiles. La longitud de onda de emisión puede ser ajustada variando la corriente de alimentación y la temperatura del dispositivo.



Figura 1. Características de un diodo láser. El gráfico muestra la potencia de salida en milivatios (mW) en función de la corriente en miliamperios (mA). Se observa un umbral de corriente por debajo del cual no hay emisión láser, y una región de operación lineal por encima de él.

BIBLIOGRAFIA

1. Bell, T. E. "Single-frequency semiconductor laser," IEEE Spectrum, 20 (11) p. 52 (1983).
2. Lin, G. et al. "High-power external-cavity laser and optical feedback," IEEE J. Quantum Electron., 17, 1109 (1981).
3. Pavesi, M. "External-cavity lasers in optical communication," IEEE J. Quantum Electron., 17, 44 (1981).
4. Pavesi, M. "Low-frequency external-cavity laser diodes with optical feedback," Appl. Phys. Lett., 36, 217 (1980).
5. Kishino, K. et al. "Spectral characteristics of external-cavity laser with optical feedback," IEEE J. Quantum Electron., 18, 222 (1982).
6. Kishino, K. "Simple structure for external-cavity laser with optical feedback," Electron. Lett., 18, 10 (1982).
7. Tang, R. et al. "Heterodyne optical feedback effect on semiconductor injection laser," IEEE J. Quantum Electron., 18, 10 (1982).
8. Ogasawara, N. et al. "Phase shifting in injection laser diodes by temperature variation and optical feedback," Jpn. J. Appl. Phys., 22, 1664 (1983).
9. Ogasawara, H. et al. "External-cavity semiconductor laser," Appl. Phys., 21, 1064 (1982).
10. Ogasawara, H. et al. "External-cavity semiconductor laser," Jpn. J. Appl. Phys., 21, 1064 (1982).
11. Ogasawara, H. et al. "External-cavity semiconductor laser," Jpn. J. Appl. Phys., 21, 1064 (1982).
12. Ogasawara, H. et al. "External-cavity semiconductor laser," Jpn. J. Appl. Phys., 21, 1064 (1982).