

FUNDAMENTOS Y ACTUALIDAD DE LOS DIODOS LASERES

Pedro J. Larrea Cox, Margarita Cobas Aranda y Andrés Combarro Romero
Centro de Desarrollo de Equipos e Instrumentos Científicos (CEDEIC), Cuba

RESUMEN

Se presentan las características técnicas generales de los diodos láseres, así como sus múltiples aplicaciones, haciéndose particular énfasis en las tendencias de estos dispositivos semiconductores, los cuales han ido introduciéndose aceleradamente en los últimos años y reemplazando a otros tipos de láseres en diferentes esferas cotidianas. Son destacadas, además, sus actuales limitaciones y las vías para atenuarlas lo más posible.

ABSTRACT

General technical specifications of diode lasers, as well as their multiple applications, are presented, emphasizing particularly into the tendencies of these semiconductor devices, which last years have been quickly introduced themselves, and have been replacing another kind of lasers in several daily spheres. Their modern limitations, and the ways for possible attenuation, are besides established.

1. LOS DIODOS LASERES

Aunque el principio de los diodos láseres fue demostrado desde 1962, sólo en esta última década su tecnología ha tenido uso común.

La mayoría de los diodos láseres son fabricados con mezclas de materiales semiconductores (ver Tabla I) de los grupos III-V de la tabla periódica (GaAs, InP, InAs, y compuestos complejos como AlGaAs e InGaAsP).

La longitud de onda (λ) de la luz emitida por los diodos láseres está determinada [1], en general, por la banda prohibida del material láser. Los compuestos binarios tienen bandas prohibidas fijas,

mientras las bandas prohibidas de los compuestos ternarios y cuaternarios pueden ser variadas, dentro de un intervalo, cambiando su composición.

Hasta hace muy poco tiempo su λ estaba restringida a la región del IR cercano y roja del espectro.

También hay λ más cortas, en el caso de los láseres sólidos bombeados por diodos (DPSSL) doblados en frecuencia (SHG), emitiendo verde, y de diodos láseres SHG, emitiendo azul.

Solo en 1999 [2] se logró un diodo láser emitiendo azul, con un tiempo de vida de $10^4 h$, el mínimo [3] demandado para sistemas comerciales.

Tabla I. Materiales semiconductores que provocan efecto láser.

Compuesto	Longitud de onda (λ) [nm]	Compuesto	Longitud de onda (λ) [nm]
InGaN	390 - 420	GaAs/GaAs (puro)	904
GaN	417	GaAs	905, 940
AlGaAs (2X)	428	In _{0.2} Ga _{0.8} As	980
ZnSSe	447 - 480	In _{0.2} Ga _{0.5} As/GaAs	980 - 1050
ZnSe	463, 510, 520	In _{1-x} Ga _x As _y P _{1-y}	1100 - 1650
ZnCdSe	490 - 525	InGaAsP/InP	1100 - 2100
AlGaInP/GaAs	610 - 690, 1300	In _{0.73} Ga _{0.27} As _{0.58} P _{0.42}	1310
Al _x Ga _{1-x} As	620 - 895	In _{0.58} Ga _{0.42} As _{0.9} P _{0.1}	1550
AlGaInP	630 - 680	InGaAsSb	1700 - 4400
Ga _{0.5} In _{0.5} P	670	AlGaAsSb/InGaAsSb	2000 - 3000
Ga _{0.5} In _{0.5} P/GaAs	670 - 686	PbCdS	2700 - 4200
InGaAsP/GaAs	680 - 880	PbEuSeTe	3300 - 5800
AlGaAs	730, 780, 830, 855, 880	PbSSe	4200 - 8000
AlGaAs/GaAs	750 - 880	PbSnTe	5500 - 30000
InGaAs/GaAs	880 - 1100	PbSnSe	8000 - 30000

CARACTERISTICAS P-I e I-V

- En la curva P-I (Figura 1) [4-6] se determina el punto de operación del láser (corriente de control) y la corriente umbral (comienzo del efecto láser).

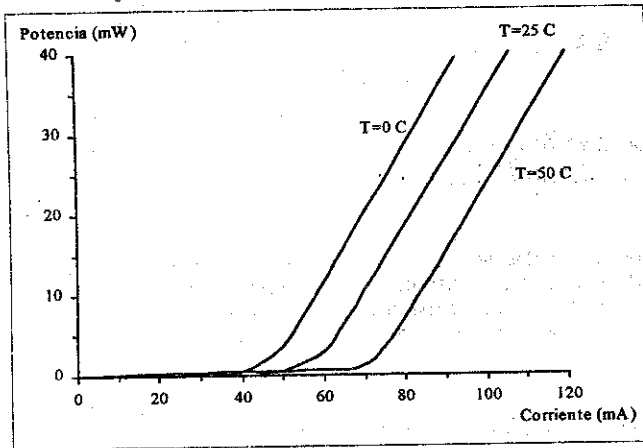


Figura 1. Curvas de potencia óptica vs. corriente de control (P-I) para un diodo láser típico.

Por debajo del umbral hay solo emisión espontánea, mientras en el umbral y por encima predomina la emisión estimulada.

- Los diodos láseres tienen curvas I-V (Figura 2) similares a otros diodos [4]. Se controlan más fácilmente por corriente, ya que una pequeña fluctuación en el voltaje provocaría gran fluctuación en la corriente.

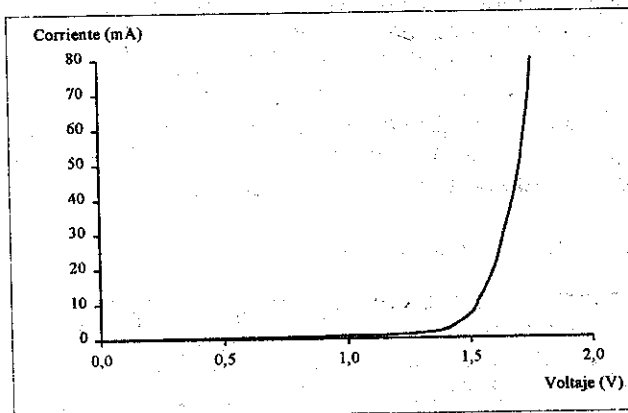


Figura 2. Curva de corriente vs. voltaje (I-V) para un diodo láser típico.

Estructura de modo transversal. La mayoría de los diodos de potencias baja y media ($< 200 \text{ mW}$) presenta el modo transversal de más bajo orden, con perfil de intensidad pseudo-Gaussiano (Figura 3), análogo al TEM_{00} de muchos láseres gaseosos [5].

Eficiencia diferencial. Relación entre la variación principal en la potencia óptica de salida y la variación en la DC de alimentación. Aunque no varía tanto como un cambio de umbral, decrece con la temperatura (Figura 4).

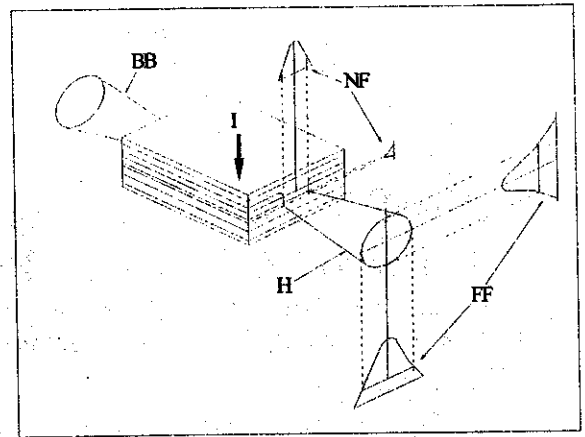


Figura 3. Distribución característica del modo transversal del haz de un diodo láser. I: corriente, BB: haz de la faceta posterior, H: haz láser, NF: patrones de campo cercano, FF: patrones de campo lejano.

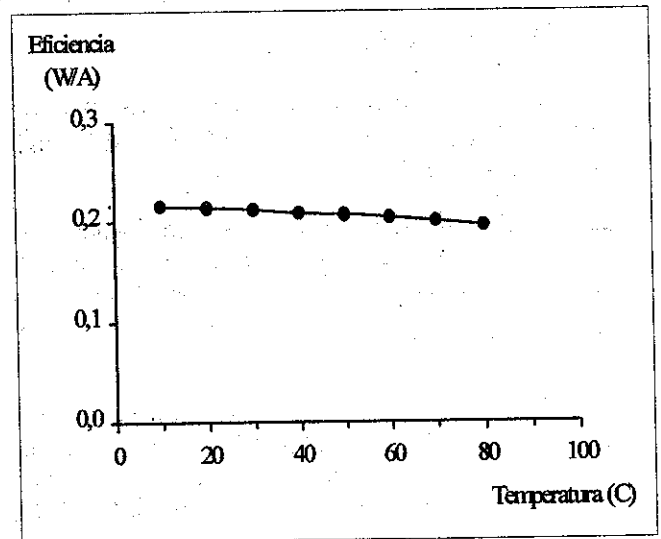


Figura 4. Eficiencia diferencial vs. temperatura de operación de un diodo láser típico.

Tiempo de vida útil. Son comunes tiempos que excedan las $50\,000 \text{ h}$. En general, se duplica por cada reducción de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ y viceversa, recomendándose [7] usar disipadores de calor.

Los diodos láseres de baja potencia ($P < 30 \text{ mW}$) generalmente superan las 10^5 h .

Control de la temperatura. La temperatura puede afectar a los siguientes parámetros [8,9]: λ , potencia de salida, amplitud de ruido del haz, estructura modal y tiempo de vida útil.

El sobrecalentamiento es la mayor causa de fallos, que pueden ser rápidos y catastróficos, o por degradación gradual del dispositivo.

Divergencia. Define cuanto se ensancha el tamaño de un haz al propagarse. En un diodo láser con modo transversal simple, la divergencia ocurre según la teoría de propagación del haz Gaussiano [4,7]. En aproximación, es inversamente proporcional al radio de la cintura del haz. Varía de un láser a otro, pero esa asimetría propia puede corregirse con una óptica anamórfica apropiada.

Astigmatismo. La mayoría de los diodos láseres son astigmáticos, debido al desplazamiento entre los puntos de emisión paralelos y perpendiculares a la juntura semiconductor, causado por una dependencia direccional con el índice de refracción de la cavidad láser.

Los diodos láseres visibles tienen valores típicos de 5 a 15 μm , lo que puede corregirse con un montaje óptico adecuado, usando lentes cilíndricas tenues, o ventanas ópticas delgadas en el camino del haz, a cierto ángulo, para adicionar poder a un eje o sustraerlo del otro.

Seguridad y protección. Los diodos láseres son *excesivamente* delicados. Pueden destruirse fácilmente por [4]: descargas electrostáticas (ESD's), transientes de corriente, o excesiva corriente o voltaje. Si son conectados correctamente, la posibilidad de daño accidental por ESD es muy reducida. Sin embargo, los "pinchos" bruscos de corriente, causados por los circuitos, pueden ser fatales.

2. VENTAJAS

Los diodos láseres han sido llamados "pequeños dispositivos maravillosos" [6]. Tienen todas las ventajas de los semiconductores son compactos, de costo efectivo y superiores en muchas formas a otros láseres.

Su tecnología progresa rápidamente. La potencia de salida se duplica cada año, el costo se reduce a la mitad y, como promedio, la λ se acorta 10 nm por año.

Otras ventajas sobre los láseres tradicionales [10]:

- Larga vida ($\sim 10^5 h$).
- Alta eficiencia de conversión de electricidad en luz. Eficiencia total del 20 % (80 % diferencial) y bajo voltaje de operación, hacen del diodo una indudable elección.
- Puede ser directamente controlado, aún por un circuito impreso. Generalmente, existe un fotodiodo en su misma cápsula, y la potencia de salida puede ser controlada, retroalimentada a través de un circuito electrónico, aportando gran estabilidad.
- La pequeña geometría y la naturaleza de la cavidad láser simplifican la modulación de la salida incluso hasta más de 1 GHz.

Ahora los diodos láseres son rivales de los láseres gaseosos, pues son mucho más pequeños, consumen menos potencia, son altamente confiables y capaces de operar cientos de miles de h sin problemas [5], acoplándose correctamente con otros dispositivos electrónicos.

3. APLICACIONES

- **Telecomunicaciones.** Transmisión de voz, datos, televisión por cable (CATV) y bombeo en amplificadores de fibra dopada con Er (EDFA's). Constituyen la mayor aplicación, con casi el 69 % del mercado mundial de diodos láseres.

Tabla II. Comportamiento del mercado mundial de diodos láseres [11].

Aplicaciones	1996		1997		1998		1999		2000	
	M u	M \$	M u	M \$	M u	M \$	M u	M \$	M u	M \$
Telecomunicaciones	1,0	960	1,5	1153	2,0	1378	2,0	2178	2,9	2977
Almacenamiento óptico de datos	170,0	542	213,2	41	264,4	490	302,5	702	335,0	1024
Entretenimiento y exhibiciones	11,4	66	12,5	91	11,8	73	10,6	59	9,7	60
Registro de imágenes	11,4	66	12,5	91	11,8	73	10,6	59	9,7	60
Procesamiento de materiales	2,0	6	8,0	28	9,9	35	7,2	17	16,0	35
Terapéutica médica	1,0	2	3,3	19	7,0	23	4,2	25	7,5	34
Bombeo de láseres sólidos	0,0	0	35,3	60	36,6	53	51,8	54	70,9	67
Otras	0,5	12	0,8	20	1,4	29	5,0	67	7,3	91
Totales	197,3	1654	287,1	1503	344,9	2154	393,9	3161	459	4348

M u: millones de unidades,

M \$: millones de dólares.

- **Almacenamiento óptico de datos.** Láseres multihaces aumentan las velocidades de escritura y lectura en: equipos de CD y DVD, monitoreo de discos, maneto-óptica, ROM's ópticos y almacenamiento holográfico. Es la segunda aplicación, con más de 300 millones anuales.
- **Entretenimiento y exhibiciones.** Exhibiciones lumínicas, pantallas informativas, punteros láseres, pantallas holográficas y proyección de videos láseres.
- **Registro de imágenes.** Impresoras, máquinas de fax, registradoras de imágenes, sistemas comerciales separadores de color, impresoras de elevado volumen, y dispositivos de salida para "scanners", radares y satélites.
- **Procesamiento de materiales.** Diodos de alta potencia, en arreglos o barras, para procesamiento de metales (soldadura, corte, fundido, taladrado), producción de semiconductores y microelectrónica (litografía, inspección, control, análisis y reparación de defectos, surcado de vías); marcaje de materiales incluyendo plásticos, metales, Si, etc.
- **Terapéutica médica.** Oftalmología (cirugía refractiva y fotocoagulación), cirugía general, terapia (fotodinámica, tratamiento de próstata), imágenes y cosmética (depilación).
- **Bombeo (DPSSL's).** La vía más eficiente para excitar láseres de Nd:YAG y Yb:YAG.
- **Láseres semiconductores sintonizables.** Varios módulos permiten sintonizar de 780 a 1060 nm, sin necesitar bombeo, con una manipulación más simple y menos costosa.
- **Diodos emitiendo rojo.** Lectores de códigos de barras y discos ópticos, punteros láseres, sistemas de almacenamiento óptico y herramientas de alineación.
- **Diodos con SHG.** Grandes densidades de potencia permiten el doblaje de frecuencia directo, desde el IR cercano hasta el azul.
- **Otras aplicaciones.** Aeroespacial, aviación militar y comercial, sistemas militares tales como: telémetros, satélites, pirotecnia láser, y computación, incluidas redes ópticas.
- **USA:** SDL, Opto Power, E-Tek Dynamics, McDonell Douglas y JDS Uniphase (alta potencia, $P > 10 W$).
- **Alemania:** Siemens AG (barras de diodos de alta potencia) y Jenoptik Laserdiode (línea de diodos usando barras).
- **Holanda:** Philips.
- **Corea:** Samsung y LG Group.
- **Taiwán:** Electron Co. (diodos visibles).

Ya se producen diodos láseres comerciales, emitiendo algunos mW en el entorno de $\lambda = 633 nm$ [12,13], que sustituyen al láser de He-Ne en aplicaciones tales como: lectores de códigos de barras, herramientas de construcción y alineación, y lectores de discos ópticos. A medida que aumente la potencia de salida, disminuyan los precios y aumente el surtido, se producirá la sustitución gradual de los láseres de He-Ne en otras aplicaciones.

Durante más de tres décadas los investigadores siguen buscando nuevas estructuras, a partir de semiconductores convenientemente dopados, que produzcan emisión láser.

Por su parte, los fabricantes necesitan disminuir el costo, mientras se mantengan la calidad del haz y la facilidad de empleo [14].

En el ocaso del siglo XX [15] surgió el diodo láser azul, el cual estará destinado inicialmente a aplicaciones de almacenamiento óptico de alta densidad. La demanda será dominada particularmente por el nuevo DVD y los CD-ROM's de computadoras de alta velocidad.

Los diodos láseres azules también prometen en varios campos [15]: pantallas a color, impresoras láseres, memorias holográficas, y otros. Para eso, se necesita estabilizar al menos $10^4 h$ de operación, y $10^6 h$ para telecomunicaciones.

Una vez superados los problemas productivos, podrán cubrir todo el espectro visible y bien adentro el IR, por lo que continuarán erosionando los mercados para láseres sólidos y gaseosos convencionales en casi todas las aplicaciones, desde médicas e industriales hasta investigación y desarrollo (R&D). Se espera un significativo progreso de las aplicaciones de los diodos láseres en todas las esferas.

4. ACTUALIDAD Y PERSPECTIVAS

Principales compañías productoras y suministradoras:

- **Japón:** Sony, Rohm, Sharp, Matsushita (baja potencia, $< 100 mW$), Toshiba (azul), y Nichia Chemical (violeta).

Convertidos en una realidad [16], el problema más serio es que la sensibilidad de los detectores ópticos comunes (*Si-pin*) disminuye abruptamente en la región de operación ($\approx 420 nm$). Otras consecuencias incluyen problemas convencionales de diseño, tales como la reducción del ruido debido a la reflexión de la luz hacia el interior del láser, y la reducción del precio.

Dadas sus ventajas, los diodos láseres permiten reducir las dimensiones de los equipos, haciéndolos más portátiles y baratos. Combinados con componentes electro-ópticas de avanzada, proporcionarán el mejor funcionamiento a los instrumentos, por lo que

constituirían una potente herramienta en el análisis de trazas, por citar un ejemplo.

Por tanto, el futuro resultará promisorio [5], por muchos años, para esta elegante tecnología.

REFERENCIAS

- [1] LERNER, E. J. (Feb. 1997): **Laser Focus World**, 33(2): 109.
- [2] STEELE, R. V., (Feb. 1999): **Laser Focus World**, 35(2):52.
- [3] KOBAYASHI, C., (Jan. 1995): **Photonics Spectra**, 90.
- [4] MELLES GRIOT (1995/96): "Optics, Opto-Mechanics, Lasers, Instruments".
- [5] SEASTAR OPTICS Inc. (1993): "Optical Devices & Laser Diode Instrumentation", Product Catalog.
- [6] HERTSENS, T., (Feb. 1989): ILX Lightwave. Application Notes, No. 5. Lasers & Optronics.
- [7] EDMUND SCIENTIFIC (1997): Optics & Optical Instruments Catalog.
- [8] POWER TECHNOLOGY INC. (1995): Laser Diode OEM Systems and Components.
- [9] HODGSON, D., K. NOONAN, et al.: ILX Lightwave. Application Notes, No. 11.
- [10] IMASAKA, T., and N. ISHIBASHI (1990): **Anal Chem.**, 62(6), 363A.
- [11] STEELE, R. V., (Feb. 2000): **Laser Focus World**, 36(2), 70.
- [12] TSUFURA, L. and BARANSKY, O., (Mar. 1995): **Laser Focus World**, 31(3), 83.
- [13] SCIFRES, D. R.: (Jan. 1994): **Photonics Spectra**, 84.
- [14] SATO, M., (Jan. 1997): **Photonics Spectra**, 88.
- [15] LASER & OPTRONICS (1996): **The International Applications Magazine**, 15.
- [16] MORTENSEN, P., (Mar. 1997): **Laser Focus World**, 33(3), 26.