



NUEVOS AVANCES EN EL DESARROLLO Y LA APLICACIÓN DE LOS SEMICONDUCTORES LÁSER-VCSELS. ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN

Eduardo A. Castro

CEQUINOR, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, C. C. 962, 1900 La Plata, Argentina.

e-mail: castro@dalton.quimica.unlp.edu.ar

RESUMEN

En este artículo de divulgación se ofrece una visión actualizada de dos nuevos aportes de la tecnología láser: el láser de cascada cuántica y los láseres emisores verticales desde superficies de cavidades. Estas dos técnicas son muy prometedoras y, además, pueden llegar a producir equipos de bajo costo. Se ofrecen los principios físicos de sus respectivos funcionamientos, también se analizan ciertas dificultades inherentes a la posibilidad de llegar a producir equipos a escala masiva.

Los semiconductores láser son usados ampliamente en diversas aplicaciones que van desde las telecomunicaciones a los reproductores de discos compactados (CD) y a la química atmosférica. Un nuevo concepto relativamente reciente en la tecnología de los semiconductores láser, el láser de cascada cuántica (QC), promete revolucionar la tecnología láser en la espectroscopía infrarroja media y lejana. Los láseres emisores verticales desde superficies de cavidades (VCSELS) también son muy prometedores porque el haz vertical que emiten permite que los arreglos de láser puedan ser empaquetados densamente en la superficie de una oblea, con lo que se logra que grandes conjuntos de láseres se puedan manufacturar a un bajo costo. Tres artículos recientes (Müller, A., M. Beck, J. Faist & M. Illegens, 1999; Krestnikov *et al.* 1999; Someya, T. *et al.* 1999) explican cómo

llegar a superar algunos de los obstáculos técnicos remanentes para alcanzar una aplicabilidad amplia de las QC y VCSEL láser.

Los semiconductores láser tradicionales son diodos y pueden operar a temperatura ambiente o aún mayores. Ellos también son capaces de operar en forma continua, opuesta a la operación por pulsos. El poder de “bombeo” lo suministra una corriente eléctrica inyectada en la región de juntura del diodo. Pero los QC y VCSEL láser han estado restringidos a condiciones de operación a bajas temperaturas hasta hace muy poco. Los tres trabajos citados previamente describen a QC y VCSEL láser que operan a temperatura ambiente, aunque ninguno de ellos haya demostrado ser capaz de trabajar en forma continua y sólo uno (Müller, A., M. Beck, J. Faist, U. Oesterle & M. Illegens, 1999) describe los dispositivos de bombeo por inyección de corriente eléctrica.

Las demostraciones iniciales de un nuevo tipo de semiconductor láser típicamente implica un bombeo óptico en vez de eléctrico. El bombeo óptico por pulsos cortos de excitación evita un calentamiento marcado y los desafíos ingenieriles inherentes a la aplicación de corrientes eléctricas de densidad elevada en la región activa. Tal dispositivo ingenieril es un asunto mayor en los VCSELS, en láseres azules basados en nitruros y en QC láser donde la caída de potencial a lo largo del dispositivo implica la generación de mucho calor. Krestnikov y col. (Krestnikov, I. L. *et al.*, 1999) y Someya y col. (Someya *et al.*, 1999) usaron una geometría para el dispositivo del tipo cavidad vertical para sus láseres azules de base nitruro, combinando así dos formas de dificultades de la ingeniería de los dispositivos cuando se realizan los intentos para extenderlos al bombeo eléctrico. La mayor parte de los nuevos semiconductores láser no comienzan como dispositivos que operan a temperatura ambiente, que es su régimen obvio de operación. La aproximación estándar ha sido comenzar con el bombeo óptico a temperaturas criogénicas y con un bajo rendimiento del ciclo de excitación por pulsos cortos. El enfriamiento criogénico también ha sido usado con láseres bombeados eléctricamente, porque la corriente umbral para la operación del láser aumenta exponencialmente con la temperatura. El bombeo óptico generalmente es mucho menos eficiente que el bombeo eléctrico, pero ello no es necesariamente un problema, porque los pulsos instantáneos intensos de poder se obtienen rápidamente, por ejemplo, a partir de

láseres de titanio-zafiro de modo cerrado o, a longitudes de onda más cortas, a partir de láseres del gas nitrógeno. En los trabajos de Krestnikov y col. y Someya y col. (Krestnikov, I. L. *et al.*, 1999; Someya *et al.*, 1999), el nivel de bombeo instantáneo es alrededor de 1 MW/cm^2 , y en contraposición a esto los mejores semiconductores láser poseen densidades umbrales de poder bien por debajo de los 100 W/cm^2 .

La mayoría de los semiconductores láser están basados en compuestos con separación de banda III-V. Las estructuras activas se desarrollan epitaxialmente sobre los substratos de monocristales de arseniuro de galio (GaAs) o fosfuro de indio (InP). Una excepción notable la constituye el semiconductor láser azul (Nakamura. S. & S. Fassel, 1997; Gil, B., 1998), que usualmente se desarrolla en substratos aislantes de monocristales de zafiro. Los QC láseres (Faist, J. *et al.*, 1994) retienen el uso de substratos de GaAs o InP, pero implican el crecimiento de estructuras epitaxiales marcadamente complejas y precisas. Los QC láser son inusuales en su uso de un solo tipo de transportadores de corriente (electrones), en vez del diodo p-n tradicional, en el cual la luz es generada a través de la recombinación electrón-agujero. La tecnología láser tradicional no permite fácilmente la emisión láser coherente en el infrarrojo, pero con el advenimiento de la QC láser es posible que llegue a cambiar esta situación de una manera radical.

El trabajo de Müller y col. sobre QC láser (Müller, A., M. Beck, J. Faist, U. Oesterle & M. Illegens, 1999) describe la operación a, o por debajo de, la temperatura ambiente (300 K) y su estructura epitaxial fue diseñada para lograr una buena performance a temperatura ambiente. Pero los resultados fueron obtenidos con operación por pulsos a un bajo ciclaje operativo, ya que la corriente total instantánea y el poder inyectado en el láser son típicamente de 2A y 16W, respectivamente. Aunque estos valores pueden parecer no muy grandes, la densidad de potencia, con un área activa de alrededor de $0,04 \text{ mm}^2$, es casi la mitad de un gigawatt por metro cuadrado.

El nivel de densidad de potencia eléctrica referido en la publicación de Müller y col. (Müller, A., M. Beck, J. Faist, U. Oesterle & M. Illegens, 1999) es mucho menor que los niveles de bombeo óptico involucrados en los trabajos de Krestnikov y col. y T. Someya y col. (Krestnikov. I. L.

et al., 1999; Someya T. *et al.*, 1999). La provisión de un esquema adecuado de administración térmica, aun para 16W, no es un asunto trivial y no se puede justificar fácilmente en los aspectos de costo, peso y complejidad. De manera que es bastante plausible que los QC láseres prácticos usarán un ciclo de operación de bajo rendimiento a un nivel promedio de poder impulsor de unos pocos miliwatts, elevándose a 0,6W en el ciclo de rendimiento máximo del 4%, u operarán en forma continua en estructuras más compactas de los dispositivos con la misma densidad de corriente umbral. Müller y col., estaban concentrados en la obtención de la sintonización (ajuste) eléctrico, y por ello emplearon una combinación de tres pozos cuánticos que genera un substancial efecto cuántico Stark confinado (Müller, A., M. Beck, J. Faist, U. Oesterle & M. Illegens, 1999). Mediante el uso de una configuración de dos contactos, ellos pudieron controlar la longitud de onda emisiva y el nivel del poder de salida del láser de forma independiente, a la vez que evitaron los cambios de temperatura causados por la operación continuada.

Las cuestiones ingenieriles del diseño, la construcción y la operación de los nuevos semiconductores láser discutidos hasta aquí no son el centro mismo de la revolución apuntada, pero es posible que los dispositivos descritos sean importantes para una gran variedad de aplicaciones. Ambos tipos de láseres permiten desarrollar una alta densidad de potencia. Así, por ejemplo, las QC permitirán una espectrometría de masas de alta resolución, superior a la de la espectroscopía IR, y el VCSELS azul se aplicará en el almacenamiento óptica de alta densidad. Un trabajo reciente referido a puntos cuánticos emisores embebidos en cavidades altamente resonantes (Ell, C. *et al.*, 1999) ofrece resultados que pueden conducir a combinaciones aún más sofisticadas de la generación de luz y de estructuras caviales. Este dispositivo, en el cual una nanocavidad selectivamente oxidada contiene un punto cuántico, puede permitir que los eventos de emisión fotónica se puedan controlar a nivel individual, aún en regímenes útiles de alta potencia. Tal control no sólo es de interés físico, sino que tiene la capacidad potencial de transformar radicalmente la naturaleza de las comunicaciones por fibra óptica.

REFERENCIAS

Ell, C. *et al.*, *IEEE-LEOS Newsl.* 13, August 1999, 8. Faist, J. *et al.* , *Science* 264 (1994) 553.

Gil, B., “Group III Nitride Semiconductor Compounds”, Clarendon, Oxford, 1998.

Krestnikov, I. L. *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 75_(1999) 1192.

Müller, A., M. Beck, J. Faist, U. Oesterle & M. Illegens, *Appl. Phys. Lett.* 75 (1999) 1509.

Nakamura, S. & G. Fassel, “The Blue Laser Diode”, Springer-Verlag, Berlin, 1997.

Someya, T. *et al.*, *Science* 285 (1999) 1905.

Recibido abril del 2002, aceptado mayo del 2002.