

Láser de Nueva Generación para Aplicación en Comunicaciones por Fibra Óptica

Laser Application in New Generation Optical Fiber Communications

E. Velázquez-Lozada ^a* G. M. Camacho-González ^b

^aSEPI - ESIME - Instituto Politécnico Nacional, Col. Lindavista CP 07738 México D.F.

^bESIME - Instituto Politécnico Nacional, Col. Lindavista CP 07738 México D.F.

Recibido: 4/2/2013; revisado: 11/6/2013; aceptado: 27/6/2013.

Velázquez-Lozada, E., Camacho-González, G. M.: Láser de Nueva Generación para Aplicación en Comunicaciones por Fibra Óptica. *Jou.Cie.Ing.* **5** (1): 73-79, 2013. ISSN 2145-2628.

Resumen

Un elemento muy importante en los Sistemas de Comunicaciones por Fibra Óptica (SCFO) es la fuente de luz, y la investigación en los nuevos tipos de estructuras emisoras de luz tiene un gran interés para la nueva dirección del desarrollo de las comunicaciones por fibra óptica. Son realmente pocos los descubrimientos científicos del siglo pasado que hayan tenido una repercusión tan profunda en nuestra vida científica y tecnológica como la asociada al láser. Este instrumento ha permitido en muchas ramas de la ciencia un avance sin precedente que sin él, no hubiera sido posible. Este es el caso de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica, que a principios de los años setentas del siglo pasado, con la invención de fibras ópticas con pérdidas muy pequeñas y teniendo fuentes de luz adecuadas, se desarrollaron exitosamente. Las actuales fuentes de luz son láseres basados en estructuras cuaternarias de InGaAsP pero debido a la evolución de la fibra óptica y a las desventajas que presentan estas fuentes de luz han provocado el desarrollo de una nueva generación de fuentes de luz. Los láseres basados en nanoestructuras (quantum dots, QDs) de semiconductores del grupo III - V son la nueva generación de fuentes de luz debido a los nuevos fenómenos físicos que presentan, a las ventajas y al mejoramiento en las características eléctricas y ópticas.

Palabras Claves: Fibra óptica, láseres, nanoestructuras, puntos cuánticos, fuentes de Luz, dispositivos.

Abstract

A very important element in the Optical Fiber Communications Systems (OFCS) is the light source and research on new types of light emitting structures is of great interest for the new direction of development of optical fiber communications. They are really few scientific discoveries of the last century had a profound impact on our lives as science and technology as that associated with the laser. This instrument allowed in many branches of science unprecedented progress without it, would not have been possible. This instrument allowed in many branches of science unprecedented progress without it, would not have been possible. This is the case of Fiber Optical Communications Systems, at the beginning of the seventies of the last century to the invention of optical fibers with very low losses and having suitable light sources, successfully developed. Current light sources are lasers based on InGaAsP quaternary structures but due to the evolution of the optical fiber and the drawbacks of these light sources have led to the development of a new generation of light sources. Lasers based on nanostructures (quantum dots, QDs) semiconductor group III - V are the new generation of light sources as the new physical phenomena, the benefits and improvement in the electrical and optical characteristics.

Keywords: Optical fiber, lasers, nanostructures, quantum dots, light sources, devices.

* evlozada5@yahoo.com.mx

1. Introducción

Las comunicaciones ópticas es uno de los segmentos de la optoelectrónica de más rápido crecimiento. Esto a pesar de que el dispositivo optoelectrónico ideal que pueda explotar completamente el potencial de las comunicaciones ópticas aún no existe. Por consiguiente, una muy pequeña capacidad de los sistemas ópticos es utilizado en el presente. Esto, por supuesto, sugiere que el futuro de las comunicaciones ópticas puede ser brillante. La principal ventaja de los sistemas de comunicaciones ópticas viene de las propiedades de la fibra óptica, la cual es el medio usado para llevar la información. En la Fig. 1 podemos ver un esquema típico de un sistema de comunicaciones por fibra óptica [1]. La información que es transmitida (datos, voz, video, etc.) es primero codificada sobre una señal óptica. Esto requiere un modulador y una fuente óptica. La señal es después acoplada a una fibra óptica, la cual es un importante componente que ha hecho posible las comunicaciones ópticas. Como la señal pasa a lo largo de la fibra, en algún lugar, esta puede necesitar ser conmutada a otros canales. Esto requiere de elementos de conmutación. Una vez que los datos han alcanzado el punto deseado, estos son detectados por un detector óptico. La señal generada es amplificada y recibida.

Desde el punto de vista de la optoelectrónica, un sistema de comunicaciones por fibra óptica, consta principalmente de tres componentes que los mencionamos a continuación:

1. El transmisor que está constituido por una fuente de luz (LED o láser)
2. El canal de comunicación que por supuesto es una fibra óptica, la cual guiará la luz eficientemente.
3. El receptor que está constituido por un fotodetector.

2. Materiales Usados en la Producción de Fuentes de Luz para Fibra Óptica

Los materiales semiconductores que son usados para la capa activa de una fuente de luz para fibra óptica deben tener una banda de energía prohibida directa. En un semiconductor con banda de energía prohibida directa, electrones y huecos pueden recombinarse directamente a través de la banda de energía prohibida sin necesidad de una tercera partícula para conservar el momento. Solo en materiales con una banda de energía prohibida directa se tiene la recombinación radiativa suficientemente alta para producir un adecuado nivel de emisión óptica. Aunque ninguno de los semiconductores sim-

ples son materiales con banda de energía prohibida directa, muchos compuestos lo son. Los más importantes son los llamados materiales de los grupos III y V. Estos materiales son compuestos de un elemento del grupo III (tal como Al, Ga, o In) y un elemento del grupo V (tal como P, As, o Sb). Varias combinaciones terciarias o cuaternarias de compuestos binarios de estos elementos son también llamados semiconductores directos y son situados como las fuentes de luz para fibra óptica.

Para la operación en el espectro de 800 - 900 nm, el principal material usado es la aleación $Ga_{1-x}Al_xAs$. La proporción x de arseniuro de aluminio por arseniuro de galio determina la banda de energía prohibida de la aleación y , correspondientemente, la longitud de onda del pico de la radiación emitida. Esto es ilustrado en la Fig. 2 [1].

Para longitudes de onda más largas, la aleación cuaternaria $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ es uno de los principales materiales. Variando la porción de las moles, x y y en el área activa, se pueden construir LEDs con una potencia de salida pico en algunas longitudes de onda entre 1.0 y 1.7 μm . Por simplificación, las notaciones de las aleaciones como las siguientes: GaAlAs, InGaAsP, son generalmente usadas sin las notaciones de los valores de x y y . Las aleaciones GaAlAs y InGaAsP son escogidas para hacer fuentes de luz porque es posible igualar los parámetros de red de la heteroestructura usando una conveniente combinación binaria, terciaria y cuaternaria de materiales. Una igualdad muy cercana entre los parámetros de red del cristal de las dos heterouniones contiguas requiere que se reduzcan los defectos interfaciales y minimizar las tensiones en los dispositivos como las variaciones en la temperatura. Estos factores afectan directamente la eficiencia radiativa y el tiempo de vida de la fuente de luz. Usando la relación fundamental de mecánica cuántica entre energía E y frecuencia ν [1,3] tenemos:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

h es la constante de Planck y ν es la frecuencia; la longitud de onda del pico de la emisión λ en micrómetros puede ser expresada como una función de la energía de la banda prohibida E_g en electrón-volt por la ecuación siguiente [1,3].

$$\lambda(\mu m) = \frac{1,240}{E_g (eV)} \quad (2)$$

Las relaciones entre la energía de la banda prohibida E_g y la constante de red a_0 , para varios compuestos de los grupos III - V se muestra en la Fig. 3. Una heterounión con igualdad en los parámetros de red es creado

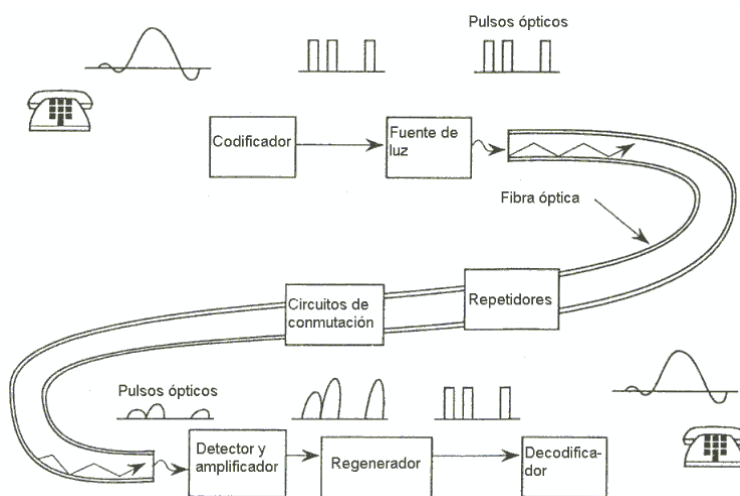


Figura 1. Esquema típico de un sistema de comunicaciones por fibra óptica.

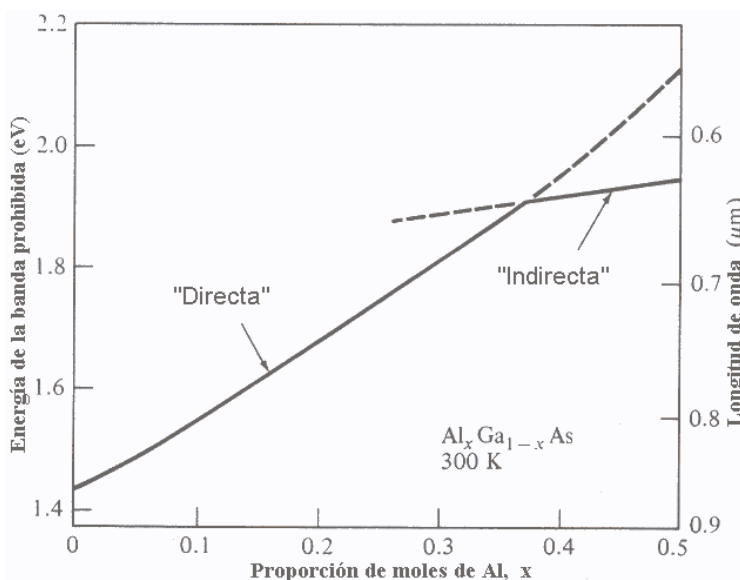


Figura 2. Energía de la banda prohibida y longitud de onda de salida como una función de la porción de moles de Al_x para $Al_xGa_{1-x}As$ a temperatura ambiente

escogiendo dos materiales que tengan la misma constante de red pero diferentes energías de banda prohibida (las diferentes bandas prohibidas son usadas para confinar los portadores de carga). En la aleación terciaria GaAlAs, la energía de la banda prohibida E_g y la constante de red a_0 son determinados por la línea en la Fig. 3, que conecta los materiales GaAs ($E_g = 1,43$ eV y $a_0 = 5,64$ Å) y AlAs ($E_g = 2,16$ eV y $a_0 = 5,66$ Å) [1].

La energía de la banda prohibida en electrón-volt para valores de x entre cero y 0.37 (la región de banda prohibida directa) puede ser encontrada con la ecuación

empírica [15] siguiente:

$$E_g = 1,424 + 1,266x + 0,266x^2 \quad (3)$$

Con el valor de E_g en electrón-volt, la longitud de onda del pico de la emisión en micrómetros es encontrada con la ecuación 3. La energía de la banda prohibida y el rango de la constante de red para la aleación cuaternaria InGaAsP es muy larga, como se puede ver por el área sombreada en la Fig. 3. Estos materiales son crecidos sobre un sustrato de InP, de modo que las configuraciones para la igualación de la constante de red son obtenidas seleccionando un punto a lo largo del área de

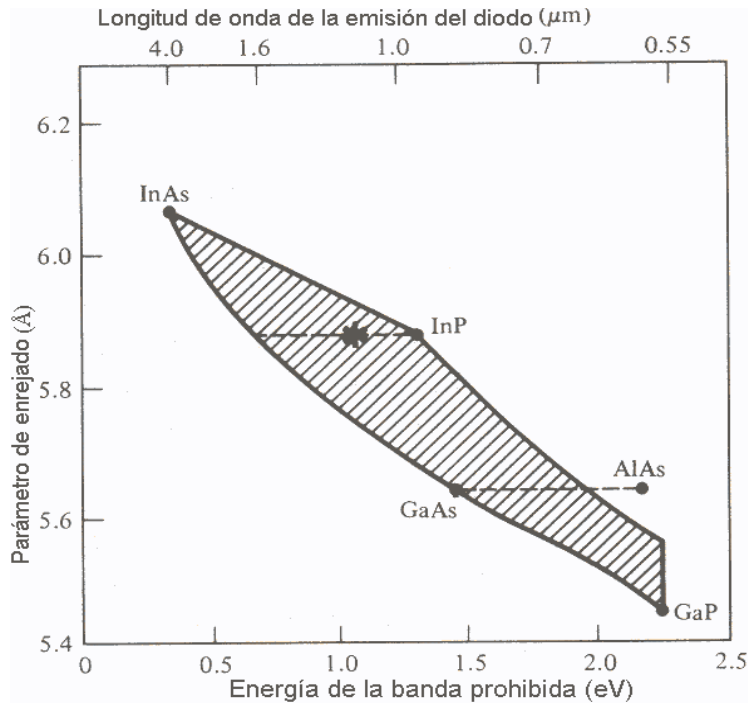


Figura 3. Relación entre el parámetro de red, energía de la banda prohibida y la longitud de onda de la emisión del diodo, a temperatura ambiente.

la línea sombreada en la Fig. 3 la cual pasa a través del punto InP. A lo largo de esta línea los parámetros x y y siguen la relación $y = 2,20x$ con $0 \leq x \leq 0,47$. Para compuestos $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ que son igual en su constante de enrejado a InP, la energía de la banda prohibida en eV varía de acuerdo a la siguiente relación [1]:

$$E_g = 1,35 - 0,72y + 0,12y^2 \quad (4)$$

3. El Enfoque Moderno para el Mejoramiento de la Eficiencia de las Fuentes de Luz para Fibra Óptica

En los últimos años numerosos estudios han sido dedicados a los puntos cuánticos auto-ensamblados (SAQD), [16] por ejemplo en las referencias [17,18,19] y referencias en estas. Estos SAQD proporcionan el último sistema cuántico con un confinamiento cuántico de portadores en 3D. Entonces, estas estructuras con QD vaticinan una prometedora dirección para una nueva generación de fuentes de luz como láseres [20]. Semiconductores con QD hoy en día tienen varias aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos avanzados [21]. Especialmente en láseres de semiconductor, las estructuras con QD comparadas con las de pozos cuánticos (QW) exhiben muchas ventajas. La consecuencia más sorprendente según las predicciones teóricas de las propiedades

intrínsecas de los láseres con QD, es el mejoramiento en las características del láser; tales como un fuerte incremento en la ganancia [22], el incremento de la eficiencia cuántica, grandes características en la estabilidad térmica y la reducción en la densidad de corriente de umbral [23]. El crecimiento de estas estructuras, el método de crecimiento, las matrices que se utilizan en el desarrollo de esta nueva generación de fuentes de luz casi no varía, pues en las siguientes líneas se expondrán estas características tomadas de artículos sobresalientes y como se podrá verificar, el método de crecimiento es el de Stranski-Krastanow [24], las matrices a utilizar son GaAs, InGaAs y AlGaAs.

En a referencia [25], deposición por haces moleculares (MBE) y deposición por vapor en fase metal orgánico (MOVPE) han sido usados para crecer microcristales de tamaño cuántico de InGaAs y de InP sobre sustratos de GaAs por crecimiento Stranski-Krastanow [24]. Estas estructuras auto-ensamblados tienen tamaño uniforme y alta eficiencia de emisión espontánea. Estos QD de $In_{0,5}Ga_{0,5}As$ sobre sustratos de GaAs emiten a $1.3 \mu m$ a temperatura ambiente. Los puntos tienen 20 nm de diámetro y 10 nm de altura. La longitud de onda de emisión puede ser controlada de $1.1 \mu m$ a $1.5 \mu m$ por las condiciones de crecimiento. En este estudio, nos enfocamos a la emisión de $1.3 \mu m$ porque esta longitud de onda es muy importante en aplicaciones para dispo-

sitivos ópticos, especialmente para fuentes de luz para fibra óptica. En este otro artículo [26] se reporta un estudio de diodos láser con QD de InAs insertados en un QW de InGaAs. Crecimiento por MBE fue utilizado para proveer QD de InAs auto-ensamblados en un QW de InGaAs (“dot-in-a-well”, DWELL). Los puntos tienen 15 nm de diámetro en la base y 7 nm de altura. Una característica importante de esta estructura es que tiene corrientes de umbral por debajo de 16 A/cm² a temperatura ambiente. Estos son solamente un par de ejemplos para poder demostrar que la dirección moderna que están tomando las fuentes de luz para fibra óptica según las sorprendentes mejoras que ofrecen en las características del láser respecto a las actuales estructuras láser, son los láseres con QD.

4. Sistemas de Baja Dimensión: Puntos Cuánticos para la Aplicación en Optoelectrónica

El confinamiento cuántico tridimensional de electrones, huecos y pares electrón-hueco en microcristales semiconductores, es conocido como punto cuántico; los puntos cuánticos semiconductores (QDs) son la formación atómica artificial de un sólido insertado dentro de la matriz de otro sólido [27,28,29,30,31].

En estos días se puede decir que el punto cuántico (QD) ha sido un importante tema de investigación por más de 10 años, este sistema ha atraído investigación sobre los fundamentos físicos y también sobre las aplicaciones en dispositivos, fuertemente para láseres [32]. Se espera que estas nuevas estructuras produzcan nuevos fenómenos físicos [33,34], y significantes mejoras en aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos [35,36]. Estos puntos cuánticos tienen un espectro de energía discreto que puede ser excitado por una simple inyección de portadores en una unión pn. Esto es usado efectivamente en diodos láser. Los láseres con QD se espera que exhiban propiedades superiores a los dispositivos basados en QW. Los semiconductores con puntos cuánticos en heteroestructuras son de gran interés por sus niveles de energía discretos, buenas propiedades ópticas y prometedoras aplicaciones en láseres con QD [37,38], estas nuevas propiedades que exhiben los puntos cuánticos son aplicadas efectivamente en diodos láser que presentan corrientes de umbral más bajas que cualquier otro láser de semiconductor: 26 A/cm² a temperatura ambiente [30].

El efecto de la temperatura T sobre las propiedades ópticas de los puntos cuánticos auto-ensamblados es de gran interés por sus usos en dispositivos que trabajan a temperatura ambiente. Parámetros importantes de los

QDs son la energía de transición y la probabilidad de transición, los cuales determinan la absorción y el espectro de ganancia del medio que contienen a los puntos. En las excitaciones ópticas y eléctricas hay varias bandas espectrales de emisión de los QDs usualmente referidos como estado base, primer estado excitado, segundo estado excitado y así sucesivamente. La emisión en el estado fundamental es la base de la acción láser a baja corriente de umbral [29,30] y es de lo más interesante. La integración de dispositivos basados en GaAs con láseres es deseable para muchas aplicaciones en comunicaciones por fibra óptica, cuando la emisión láser es necesaria en longitudes de onda de 1.3 μm y 1.55 μm . Hasta hace tiempo no era posible fabricar láseres basados en GaAs los cuales emiten a estas longitudes de onda porque los QW de InGaAs no podían ser crecidos con la necesaria energía de transición debido a las consideraciones críticas de espesor.

Los QDs proveen beneficios adicionales tal como una ultra baja densidad de corriente de umbral y una pequeña sensibilidad a la temperatura. En el trabajo [25] se reporta el crecimiento de QD de In_{0,5}Ga_{0,5}As sobre sustratos de GaAs que emiten a 1.3 μm a temperatura ambiente. MBE y MOVPE han sido utilizados para crecer microcristales de InGaAs de tamaño cuántico que son los puntos cuánticos sobre sustratos de GaAs por el método de Stranski-Krastanow [24], estas estructuras auto-ensambladas tienen un tamaño uniforme, los puntos tienen 20 nm de diámetros y 10 nm de altura, y están rodeados por In_{0,1}Ga_{0,9}As en la dirección lateral y por GaAs perpendicular a los puntos. La longitud de onda de emisión de estos puntos puede ser controlada de 1.1 μm a 1.5 μm con las condiciones de crecimiento. La microscopía electrónica de transmisión (TEM) de vista de plano y la vista de la sección transversal, muestra círculos negros uniformes de 20 nm de diámetro, eso lo podemos ver en la Fig. 4.

Las longitudes de onda de emisión pueden ser enfocadas a las de 1.3 μm y 1.5 μm ya que son importantes para aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos para comunicaciones por fibra óptica. La longitud de onda es controlada incrementando la composición de In de la capa desde 0 (GaAs) a 0.1 (In_{0,1}Ga_{0,9}As) incrementando la longitud de onda de 1.3 a 1.5 μm . La Fig. 5 muestra el espectro de fotoluminiscencia medido a una temperatura de 300 K, la fotoluminiscencia fue excitada por un láser de Kr⁺. El pico de la longitud de onda está cerca de 1.3 μm .

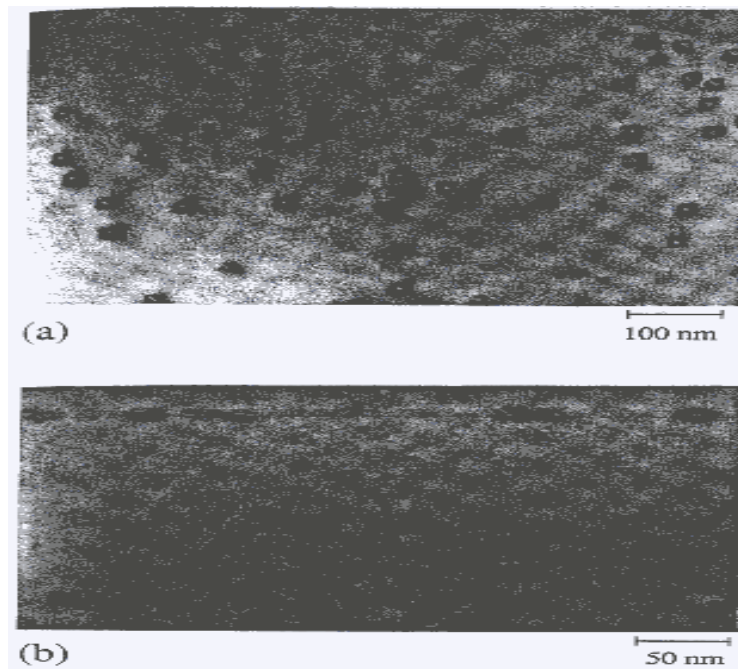


Figura 4. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de los puntos cuánticos: (a) imagen vista del plano, (b) imagen de vista de la sección transversal.

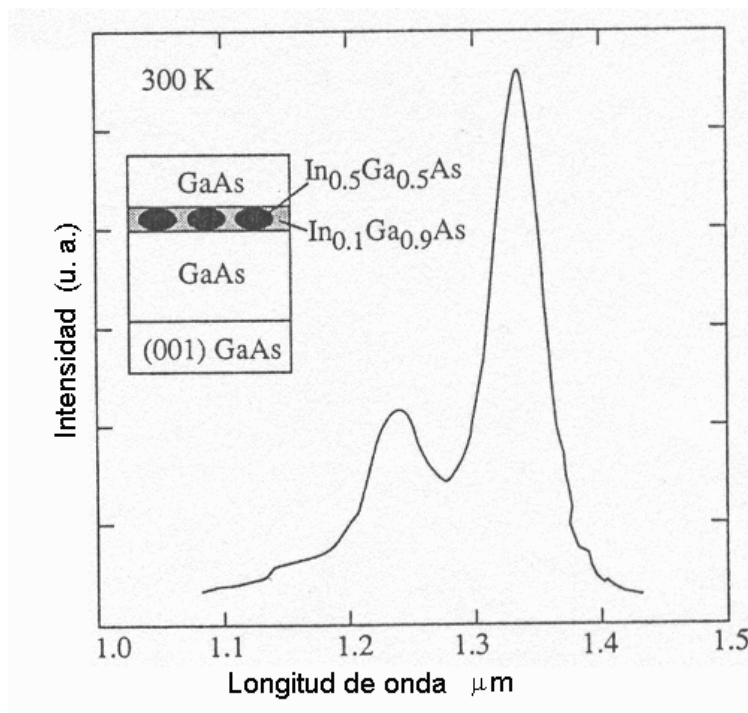


Figura 5. Espectro de fotoluminiscencia de los puntos cuánticos a 300 K.

Conclusiones

Por todo lo descrito anteriormente, se puede visualizar que desde su aparición, alrededor de los años de

1994, 1995; los Puntos Cuánticos (QDs) de semiconductor de los grupos II - VI y III - V, son la base para desarrollar nuevos dispositivos optoelectrónicos que tie-

nen muchas ventajas eléctricas, ópticas, térmicas, etc., que los dispositivos basados en Pozos Cuánticos. Todo esto es debido a los nuevos fenómenos que presentan en sus niveles electrónicos, emisión de luz y estabilidad térmica.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por el proyecto SIP20141285

Referencias

- [1] G. Keiser, Optical Fiber Communications, McGraw-Hill, Second Edition, 1991.
- [2] Jasprit Singh, Semiconductor Devices: An Introduction, McGraw-Hill, 2000.
- [3] Aboites Vicente, El Láser, FCE, 2002.
- [4] E. A. J. Marcatili, Objectives of early fibers: Evolution of fiber types, in S. E. Miller and A. G. Chynoweth, ed., Optical Fiber Telecommunications, Academic, New York, 1979.
- [5] B. C. Bagley, C. R. Kurkjian, J. W. Mitchell, G. E. Peterson, and A. R. Tynes, Materials, properties, and choices, in S. E. Miller and A. G. Chynoweth, ed., Optical Fiber Telecommunications, Academic, New York, 1979.
- [6] P. Kaiser and D. B. Keck, Fiber types and their status, in S. E. Miller and I. P. Kaminov, ed., Optical Fiber Telecommunications-II, Academic, New York, 1988.
- [7] R. Olshansky, Propagation in glass optical waveguides, Rev. Mod. Phys. 51, 341-367, Apr. 1979.
- [8] D. Gloge, The optical fibre as a transmission medium, Rep. Prog. Phys. 42, 1777-1824, Nov. 1979.
- [9] A. Iino and J. Tamuro, Radiation resistivity in silica optical fibers, J. Lightwave Tech. 6, 145-149, Feb. 1988.
- [10] J. R. Haber, E. Mies, J. R. Simpson, and S. Wong, Assessment of radiation-induced loss for ATT fiber-optic transmission systems in the terrestrial environment, J. Lightwave Tech. 6, 150-154, Feb. 1988.
- [11] V. Miya, Y. Terunuma, T. Osaka, and T. Miyashita, Ultra low loss single-mode fibers at 1.55 μ m, Electron Lett. 15, 106-108, 1979.
- [12] (a) S. R. Nagel, J. B. MacChesney, and K. L. Walker, An overview of the MCVF process and performance, IEEE J. Quantum Electron., QE-18, 459-476, Apr. 1982. (b) S. R. Nagel, Fiber materials and fabrication methods, in S. E. Miller and I. P. Kaminov, eds., Optical Fiber Telecommunications-II, Academic, New York, 1988.
- [13] H. Osanai, T. Shioda, T. Moriyama, S. Araki, M. Horiguchi, T. Izawa, and H. Takata, Effects of dopants on transmission loss of low OH content optical fibers, Electron. Lett. 12, 549-550, Oct. 1976.
- [14] S. R. Forrest, Optical detectors: Three contenders, IEEE Spectrum 23, 76-84, May 1986.
- [15] H. Kressel and J. K. Butler, Semiconductors Lasers and Heterojunction LEDs, Academic, New York, 1977.
- [16] B. Lambert, A. Le Corre, V. Drouot, H. L'Haridon and S. Loualiche, High photoluminescence efficiency of InAs/InP self-assembled quantum dots emitting at 1.5-1.6 μ m. Semiconductor Science and Technology. 13, 143-145, 1998.
- [17] Gerard J. M. Confined Electrons and Photons: New Physics and Applications (NATO ASI Ser.) ed C Weisbuch and E Brunstein (New York: Plenum) p. 367, 1995.
- [18] Petroff P. M. and Medeiros-Ribeiro G. MRS Bulletin p. 50, 1996.
- [19] Ledentsov N. N. Proc. 23rd Int. Conf. On the Physics of Semiconductors, ed M Scaffler and R. Zimmermann (Singapore: World Scientific) p. 19, 1997.
- [20] N. Kirstaedter, O. G. Schmidt, N. N. Ledentsov, and D. Bimberg, Appl. Phys. Lett. 69 (9), 1996.
- [21] Y. T. Dai, J. C. Fan, and Y. F. Chen, J. Appl. Phys. 82 (9), 1997.
- [22] M. Asada, Y. Miyamoto, and Y. Suematsu, IEEE J. Quantum Electron. 22, 1915, 1986.
- [23] N. Kirstaedter, O. G. Schmidt, N. N. Ledentsov, and D. Bimberg, M. V. Ustinov, S. S. Ruvimov, M. V. Maximov, Electron. Lett. 30, 1416, 1994.
- [24] D. J. Eaglesham and M. Cerullo, Phys. Rev. Lett. 64 (16), 1990.
- [25] K. Mukai, N. Ohtsuka, M. Sugawara and S. Yamazaki, Jpn. J. Appl. Phys. 33, 1994.
- [26] P. G. Eliseev, H. Li, A. Stintz, G. T. Liu, T. C. Newell, K. J. Malloy, and L. F. Lester, Appl. Phys. Lett. 77 (2), 2000.
- [27] Y. Arakawa and H. Sasaki, Appl. Phys. Lett. 40, 939, 1982.
- [28] A. E. Drakin and P. G. Eliseev, Sov. J. Quantum Electron. 14, 119, 1984.
- [29] H. Hirayama, K. Matsunaga, K. Asada, and Y. Suematsu, Electron. Lett. 30, 142, 1994.
- [30] G. T. Liu, A. Stintz, H. Li, K. J. Malloy, and L. F. Lester, Electron. Lett. 35, 1163, 1999.
- [31] L. F. Lester, A. Stintz, H. Li, T. C. Newell, E. A. Pease, B. A. Fuchs, and K. Malloy, IEEE Photonics, 4th ed. Harcourt Brace Jovanovich College Press. Forth Worth, 1991.
- [32] Y. Arakawa and H. Sakaki, Appl. Phys. Lett. 40, 939, 1982.
- [33] L. Brus: IEEE J. Quantum Electron. 22, 1909, 1986
- [34] D. S. Chemla and D. A. B. Miller: Opt Lett. 11, 522, 1986.
- [35] J. N. Randall, M. A. Reed and G. A. Frazier: J. Vac. Sci Technol. B7, 1398, 1989.
- [36] H. Sakaki: Jpn. J. Appl. Phys. 28, L314, 1989.
- [37] N. N. Ledentsov, V. A. Shchukin, M. Grundmann, N. Kirstaedter, J. Böhrer, O. Schmidt, D. Bimberg, V. M. Ustinov, A. Yu. Egorov, A. E. Zhukov, P. S. Kopev, S. V. Zaitsev, N. and J. Heydenreich, Phys. Rev. B54, 8743, 1996.
- [38] A. Polimeni, M. Henini, A. Patane, L. Eaves, P. C. Main, and G. Hill, Appl. Phys. Lett. 73, 1415, 1998.