

Aspectos sobresalientes del trabajo multidisciplinario en el diseño, construcción y caracterización de un láser semiconductor

Díaz de León Zapata Ramón^{1*}, Lara Velázquez Ismael¹, González Fernández José Vulfrano², Ortega Gallegos Jorge²

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Sal Luis Potosí, Av. Tecnológico s/n Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, C.P. 78437, México.

²Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Universidad Autónoma de S.L.P., Av. Karakorum 1470, Lomas 4ª Sección C.P. 78210, San Luis Potosí, S.L.P., México

*ramondz@hotmail.com

Resumen

Se resalta la contribución multidisciplinaria para el diseño, construcción y caracterización óptica y eléctrica de un láser semiconductor de pozo cuántico con emisión en el rango infrarrojo.

Los resultados de este trabajo conjunto muestran además que se tienen los conocimientos científicos y tecnológicos, así como la infraestructura para el diseño y construcción de tales dispositivos.

Palabras clave: Epitaxia, Óptica, Caracterización, Control.

1. Introducción

Malacara [1] discute el significado de la óptica y nos conlleva para efectos prácticos a establecer que la óptica es la rama de la física que se dedica al estudio de las propiedades de la luz pero no es sino hasta que se llega al entendimiento de la óptica cuántica u óptica electrónica a nivel de ciencia básica, que se predicen fenómenos teóricos sorprendentes como la posibilidad de emitir luz láser a través de dispositivos semiconductores con una eficiencia excepcional. La tarea entonces de los científicos dedicados al estudio de los materiales fue poder llevar a cabo experimentos que empataran las predicciones teóricas y demostrar que era viable su construcción. El camino para ello no sólo no fue sencillo, sino que tuvo que involucrar enormes esfuerzos intelectuales y hasta económicos pero sobre todo a muchas áreas del conocimiento puesto que se requiere, como lo establece en su tesis doctoral Lara [2] un sustrato u oblea de silicio ultra puro y desde el punto de vista

cristalográfico adecuadamente alineado además de conocimientos y procesos químicos y físicos sofisticados; posteriormente la deposición cuidadosa a nivel atómico o molecular de otras sustancias sobre el sustrato por medio de una compleja máquina cuya técnica de deposición es denominada Epitaxia por Haces Moleculares (MBE por sus siglas en inglés) y cuyo control requiere ser completamente automático para evitar el error humano, lo que implica un proceso de automatización eficiente y, por ende la contribución de expertos mecatrónicos en el área.

Una vez realizada la etapa de deposición de otros materiales que le darán las propiedades físicas adecuadas para lograr emisión láser del sustrato, se requiere un proceso químico que agregue los llamados contactos óhmicos para que pueda ser conectado a una fuente de voltaje que alimente al dispositivo. En este aspecto se tuvo el invaluable apoyo del Ingeniero químico auxiliar de laboratorio.

En el inter, se requiere saber si el sustrato fue construido sin errores y ello requiere de pruebas que involucren técnicas como la fotoluminiscencia, la que por sí misma resulta toda un área de la ciencia y la ingeniería aplicada como la instrumentación y la mecatrónica ya que hubo que automatizar algunos instrumentos de medición óptica como es el caso de los mono cromadores.

Una vez terminado el dispositivo debe también corroborarse que éste ha adquirido las condiciones satisfactorias para la emisión esperada y tal proceso de pruebas se le conoce como caracterización electro – óptica donde de nuevo se requieren especialistas en las áreas de la ingeniería eléctrica, electrónica y metrología.

El uso y aplicaciones de estos dispositivos es tarea de la ingeniería y no tardó en aprovechar los conocimientos hasta aquí vertidos para dar rienda suelta a la capacidad creativa de estos profesionales y enfocarla, entre otras muchas cosas, a las telecomunicaciones por fibra óptica, al tratamiento de enfermedades y cirugías, al entretenimiento y a un largo etcétera que sigue creciendo.

Se expondrá breve pero concisamente el proceso completo del diseño, construcción y caracterización de un dispositivo láser semiconductor de pozo cuántico en el infrarrojo lejano haciendo énfasis en las contribuciones y conocimientos aportados por una plantilla multidisciplinaria de investigadores y técnicos que hicieron posible llevar a la práctica una de las predicciones teóricas de la mecánica cuántica.

2. Etapa de Diseño

Especialistas en Ciencia Básica.

En este punto resulta fundamental resaltar las contribuciones al entendimiento con estructura científica de la manera en que un láser semiconductor opera, ya que sería prácticamente imposible que se diera por casualidad una emisión estimulada al azar. Más aún, la teoría que sustenta el estudio de la mecánica cuántica formulaba predicciones científicas respecto de las propiedades ópticas de los materiales semiconductores, pero antes de poder probar que ello fuera posible, se necesitó crear las condiciones tecnológicas apropiadas para llevarlo a experimentos reproducibles exitosos.

Gran parte de esa contribución es ahora accesible a través de la bibliografía correspondiente gracias a los científicos teóricos y experimentales, como el caso de Lara [3] que establece que para lograr una emisión láser por pozo cuántico se requiere que

$$R_{est} = B_{cv} P_{fot} g_{dc} f_{FD} (E_c - E_f) [1 - f_{RD} (E_v - E_f)] \quad (1)$$

En donde

$$f_{FD}(E, T) = 1 / ((e^{(E-E_F)} / K T) + 1) \quad (2)$$

Representa la estadística para la distribución de electrones,

B_{CV} es un factor de proporcionalidad para mantener la ecuación,

ρ representa la densidad de fotones.

La última parte de la ecuación es una función estadística dependiente de la distribución de estados del pozo cuántico y cuya solución numérica suele calcularse por medio de un sistema de cómputo.

La solución a la ecuación determina la longitud de onda de la emisión en una estructura heterogénea (láser semiconductor de InGaAs/GaAs) resulta tardada si se pretende resolver sin auxilio de algún paquete informático, además las grandes posibilidades de cometer algún error en el proceso, por lo que una manera más eficiente para encontrar dicha solución, radica en automatizar ese proceso a través de un programa de computadora, como es el caso del “nextnano” [4] y en el que se ha basado la investigación para determinar la longitud de onda de emisión del láser propuesto. La figura 1 muestra el resultado gráfico que arroja el programa.

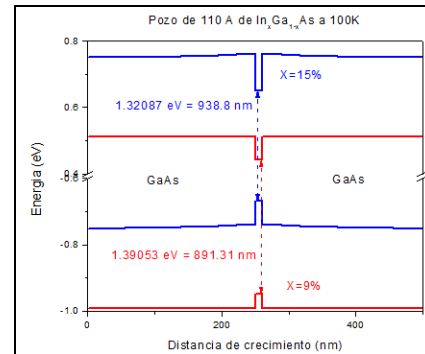


Figura 1. Dimensión del pozo cuántico para una emisión en 980 nm. arrojada por el programa “nextnano”.

Una vez resuelto el problema de las dimensiones y concentraciones de los elementos que constituirán al pozo cuántico, se debe calcular las dimensiones de la barrera óptica, así como estimar la concentración de dopaje en las capas conductoras como lo propone Lara [3] en su tesis doctoral. En la figura 2 se observa una estructura láser típica de pozo cuántico. Gracias a la solución de esta ecuación, podemos conocer la cantidad de material durante la etapa de diseño, y logramos depositar controladamente tal cantidad física de material durante la etapa de construcción a través del proceso de automatización al alimentar el programa de control del sistema MBE con dichos datos.



Figura 2. Ilustración de una heteroestructura láser de pozo cuántico.

3. Etapa de construcción

Epitaxia por Haces Moleculares (Molecular Beam Epitaxy, MBE). Especialistas Físicos, Químicos y Mecatrónicos.

La pregunta natural que surge en este punto suele ser: ¿De qué manera se puede construir una capa homogénea y de dimensiones exactas para que se logre empatar la teoría? La respuesta se expresa de manera resumida y simple, pero requirió de años de contribuciones teóricas y tecnológicas para culminar en el desarrollo de una sofisticada máquina capaz de llevar a cabo la técnica de deposición de materiales a nivel atómico o molecular conocida como crecimiento de cristales por epitaxia por haces moleculares [5]. Se trata de un método que aprovecha las características del ultra alto vacío, así como el contraste de las altas y bajas temperaturas para lograr la sublimación de los elementos y al mismo tiempo crear alrededor de ellos un escudo térmico para evitar que se mezclen descontroladamente.

Como ayuda visual para el lector, se proporciona un esquema de un sistema de epitaxia por haces moleculares en la figura 3.

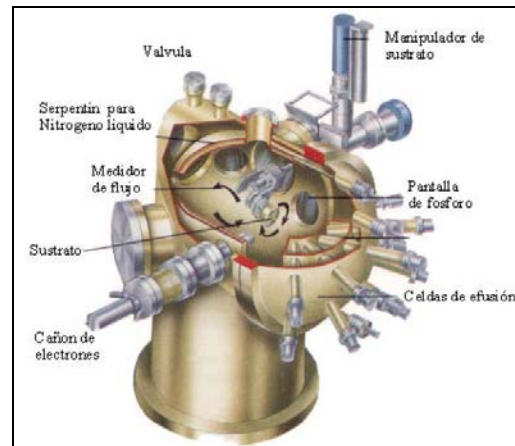


Figura 3. Esquemático de un sistema de Epitaxia por Haces Moleculares (MBE por sus siglas en Inglés).

La manera en que es posible depositar material en el sustrato es calentando este hasta una determinada temperatura para que las moléculas o átomos (según sea el caso) de los materiales en las celdas de efusión se vayan acumulando a una velocidad determinada por las temperaturas tanto del sustrato como de los materiales a depositar.

Gracias a algunas técnicas ópticas desarrolladas también como parte de las teorías de la fotónica básica, es posible saber la cantidad de capas moleculares que se han adherido al sustrato. Esta técnica denominada RHEED (Reflexión de la difracción de electrones de alta energía) [6] consiste en “bombardear” con rayos X (es decir, con electrones de alta energía) al sustrato. Como consecuencia de esta incidencia, parte de los electrones es desviado por la interacción atómica con la red cristalina que se está formando y es posible notar esas variaciones en una pantalla fluorescente como si fueran oscilaciones de variación de intensidad que son capturadas por una cámara ultrasensible (CCD) y procesada digitalmente por un software, con lo cual finalmente se puede determinar cuántas capas de material se ha ido depositando [7].

Conociendo la velocidad de deposición del material, así como las temperaturas y otras variables, lo que resta es abrir cada compuerta (shooter) de los materiales el tiempo exacto, por lo que dicha apertura debe ser controlada por una computadora, puesto que en ocasiones se puede requerir la apertura simultánea de más de dos elementos, lo que evidentemente sería imposible realizar a mano. Es en este punto donde se ha requerido la intervención de expertos para la automatización de la interfaz mecatrónica correspondiente.

4. Etapa de Caracterización

Caracterización óptica de la estructura láser.

Una vez que se ha terminado la heteroestructura y que se ha retirado del sistema de MBE, se procede a su caracterización óptica que entre otros análisis, el principal estudio que se realiza es la fotoluminiscencia que consiste en hacer incidir una luz láser sobre la muestra que se encuentra en condiciones especiales de muy baja temperatura (alrededor de 150°C bajo cero) dentro de un denominado “sistema de dedo frío” o criostato. La luz incidente provoca una emisión fotónica de la muestra en una longitud de onda igual al de la banda prohibida construida con el pozo cuántico si es que todo el proceso durante el crecimiento del cristal fue el correcto. Si llega a haber variaciones significativas en la longitud de onda esperada, se evidencia un error en el crecimiento y deberá repetirse el experimento poniendo especial atención en el momento en que se hubiera cometido el error.

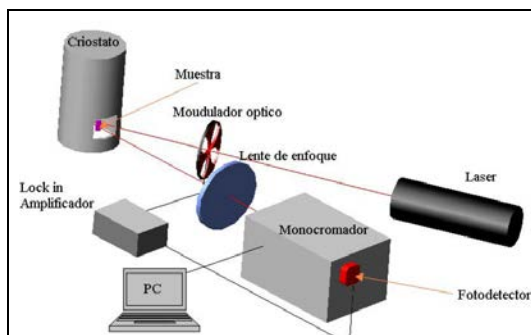


Fig. 4. Sistema de medición de Fotoluminiscencia.

El proceso de caracterización óptica por fotoluminiscencia (figura 4) requiere además que la detección de la emisión del pozo cuántico sea amplificada centenas, millares o a veces hasta centenares de millares de veces puesto que son solo pocos fotones los que se alcanza a excitar con el láser incidente, lo que hace necesario un proceso de medición especial que se lleva a cabo con instrumentos ultra sensibles. Tanto el foto detector, como el “lock in” que es un instrumento que se engancha en fase con los pulsos de un láser sobre la muestra para reducir al máximo el ruido óptico ambiente y amplificar la débil señal detectada. Este proceso debe hacerse muchas veces por segundo para hacer un promedio e ir graficando la respuesta, que puede llegar a tomar varias horas, razón por la cual es un proceso que también es preferible sea automático

y para el cual se ha creado la interfaz de software y hardware correspondiente [8].

Caracterización electro óptica de la estructura láser.

La química aquí juega un rol fundamental, ya que se requiere darle un tratamiento a la muestra para desprenderle capas de óxido y otras impurezas que se le acumulan rápidamente a la heteroestructura. Se debe además pasar por un proceso de fotolitografía para crear en el cristal franjas conductoras y aislantes con el fin de confinar el flujo de la corriente eléctrica a un camino más estrecho y mejorar la eficiencia de la emisión láser (figura 5). Una vez creadas las franjas, se debe cubrir a la heteroestructura con una delgada capa de materiales conductores usando una técnica denominada deposición por vapores en donde para el contacto positivo se usa oro puro y en el contacto negativo se usa una aleación de oro y germanio.

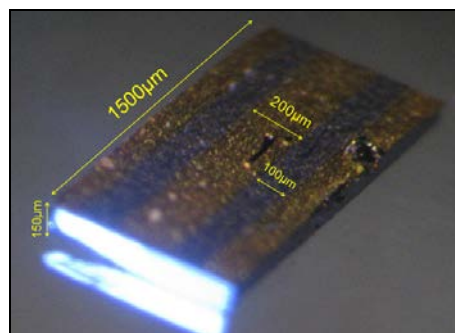


Fig. 5. Aspecto final y dimensiones de una sección del láser construido.

Es importante mencionar que la técnica para la fabricación de contactos óhmicos sigue siendo un área de investigación importante donde aparecen avances significativos, puesto que resulta de suma importancia reducir las pérdidas eléctricas en esta interfaz entre el cristal y los alambres que le suministrarán la corriente eléctrica para operar.

Ya que se tienen todas las condiciones para poder probar en laboratorio la operación del nuevo dispositivo, se procede a revisar el espectro de electroluminiscencia de la muestra, para lo cual se requiere una fuente de corriente especialmente diseñada para la prueba de dispositivos láser que ha sido construida por expertos en electrónica para que ofrezca las características de altos picos de corriente por cantidades seleccionables de tiempo.

El resto del proceso de electroluminiscencia es idéntico al de fotoluminiscencia, excepto por el hecho

de que la muestra emite ahora por la excitación de sus electrones a través de una corriente eléctrica y no por efecto de la incidencia de un láser externo. En este punto también se destaca el hecho de que la muestra puede ser sometida a bajas temperaturas para obligar a los electrones a permanecer en su orbital de mínima energía y asegurar un efecto de emisión estimulada más potente.

Si todo resulta como se espera, la electroluminiscencia debe coincidir con el diseño. En la figura 5 puede observarse una sección de dos láseres terminados al que a través de un procedimiento denominado “clivado” se dividiría en dos unidades láser independientes.

La figura 6 muestra un láser con las conexiones respectivas para su prueba de electroluminiscencia. La radiación emitida es invisible al ojo humano y sólo es posible observarla de manera indirecta a través de una tarjeta especial cubierta por una película de fósforo o a través de alguna cámara fotográfica o de video que sea sensible a la radiación infrarroja.

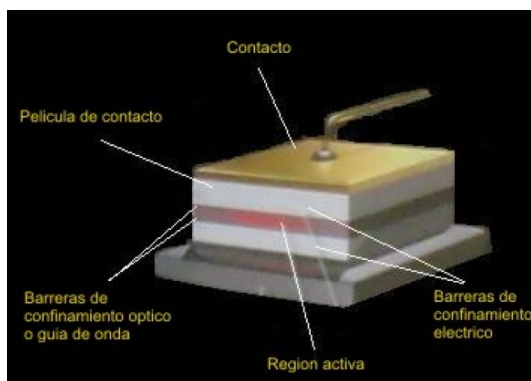


Figura 6. Aspecto final de un láser semiconductor listo para ser encapsulado en algún material transparente y unir sus contactos a los alambres finales.

5. Resultados

Si bien el contenido de todas las líneas previas del presente artículo muestran los resultados de las diversas etapas y contribuciones independientes de cada especialidad involucrada, se exponen a continuación las gráficas de algunas mediciones relevantes que corroboran los estudios y experimentos realizados.

La figura 7 muestra la comparativa entre las caracterizaciones de la fotoluminiscencia y la electroluminiscencia de la misma muestra tomados a

través del sistema mecatrónico de instrumentación para fotoluminiscencia [7]. De la gráfica se interpreta que el pozo cuántico construido coincide con la emisión láser esperada.

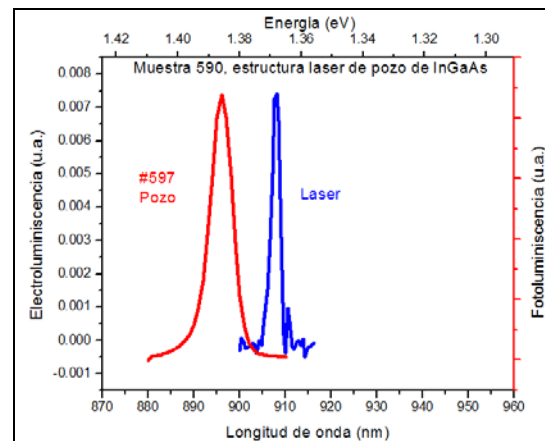


Figura 7. Comparativa entre la fotoluminiscencia y la electroluminiscencia de un láser de pozo cuántico.

La figura 8 muestra la curva de respuesta óhmica tomada a través de la variación de corriente sobre el láser en su etapa de caracterización electro óptica con un trazador de curvas para diodos y transistores. De la gráfica se interpreta que la resistencia generada por los contactos es menor a 2 ohms.

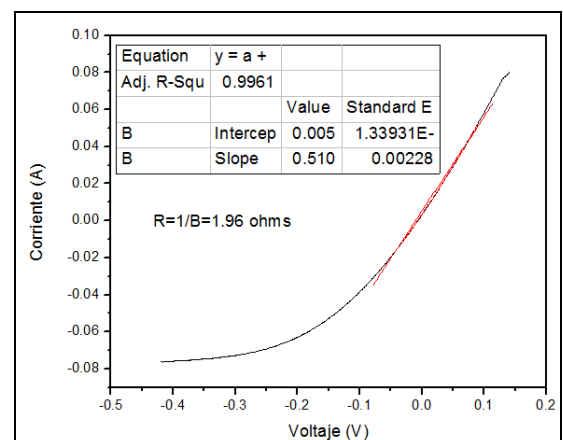


Figura 8. Estudio de los contactos óhmicos para la heteroestructura de la muestra 590.



Figura 9. Imagen del sistema de fotoluminiscencia donde se aprecia la interfaz de usuario en programación visual.

La figura 9 muestra un aspecto del arreglo necesario para implementar un sistema de caracterización para fotoluminiscencia y electroluminiscencia.

6. Conclusiones

Gracias al esfuerzo conjunto de varias áreas de la ciencia, la ingeniería y la tecnología, fue posible diseñar, construir y caracterizar en su totalidad un láser semiconductor con emisión en el infrarrojo con posibles aplicaciones a las comunicaciones por fibra óptica entre otras.

La colaboración multidisciplinaria jugó un rol fundamental, pero es igualmente relevante enfatizar que el trabajo interinstitucional ha sido parte importante del éxito en estas conclusiones.

Referencias

- [1] Malacara D, “*Óptica Clásica y Moderna*”, Fondo de Cultura Económica, México, Primera Edición, 2002.
- [2] Lara I. Tesis Doctoral “*Crecimiento y caracterización óptica de películas semiconductoras III-V y su aplicación a la fabricación de láseres semiconductores*” IICO-UASLP, 23-26, 2008.

- [3] Vogl P. et al “*Nextnano 3 software para la simulación de nanoestructuras en tres dimensiones*”. 2010.
- [4] Rinaldi F. “*Basics of Molecular Beam Epitaxy (MBE)*”, Anual Report, University of Ulm. 2008.
- [5] Braun W. “*Applied RHEED*” 27-29. Springer, Primera dedición, 1999.
- [6] Lastras M. Tesis de maestría: “*Algoritmos para Planificación Dinámica de Trabajo y Simulación de Crecimiento Epitaxial de Cristales Utilizando un Sistema GPU de Cómputo en Paralelo*”, IICO-UASLP 35-36, 2010
- [7] Díaz de León R, Sistema mecatrónico de instrumentación para fotoluminiscencia. 11° Congreso Nacional de Mecatrónica. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. 2012