

Nanocúmulos de silicio: hacia el láser de silicio

G. Santana y J.C. Alonso, Instituto de
Investigaciones en Materiales, UNAM.

Introducción

El silicio es el material por excelencia en la industria microelectrónica. Actualmente, los dispositivos de silicio constituyen más de 95 por ciento de los semiconductores vendidos en todo el mundo. El predominio del silicio en esta industria, respecto de otros semiconductores, se debe a factores como su gran abundancia y disponibilidad en la corteza terrestre, sus buenas propiedades electrónicas, mecánicas y térmicas, los altos niveles de purificación y de control de impurezas que se han alcanzado, las excelentes propiedades de aislamiento eléctrico con que se pueden preparar películas delgadas de compuestos de silicio — como el óxido de silicio y el nitruro de silicio—, la efectividad de estas películas para pasivar la superficie del silicio y para producir barreras para la difusión y/o implantación de impurezas, y la selectividad al ataque químico y/o por plasma del silicio con respecto a sus compuestos aislantes.

Estos factores, aunados al gran avance en la tecnología planar del silicio y sus compuestos aislantes (preparación de películas delgadas homogéneas sobre áreas grandes), han hecho posible la integración de un número cada vez mayor de transistores y otros dispositivos electrónicos, con dimensiones características cada vez menores, en obleas de silicio cada vez más grandes, consiguiendo un aumento significativo en la velocidad de operación de los microprocesadores de las unidades centrales de procesamiento (CPU) y una reducción importante en el costo por bit. Por ejemplo, en el microprocesador Pentium 4 de Intel, existen aproximadamente 5×10^7 transistores (MOSFETs), que tienen longitudes de canal o de compuerta de alrededor de 180 nm, mientras que el microprocesador Itanium (McKinley) tiene más de 2×10^8 transistores con longitudes de canal por debajo de los 100 nm. La evolución de los circuitos integrados basados en silicio ha conducido de manera natural y sorprendente a la tecnología llamada nanoelectrónica, en donde los tamaños de los dispositivos han alcanzado dimensiones nanométricas (< 100 nm).

Desafortunadamente, en estos niveles de miniaturización se presentan severas limitaciones en la velocidad de operación de los dispositivos nanoelectrónicos, debido a que las líneas de interconexión se vuelven muy largas y quedan muy próximas entre sí, dando lugar a resistencias (R) y capacitancias (C) parásitas relativamente grandes, que introducen tiempos de retraso RC mayores que los tiempos de encendido o apagado de los dispositivos, así como un calentamiento excesivo por efecto Joule de los microprocesadores.

El silicio es el material por excelencia en la microelectrónica y la nanoelectrónica, pero la miniaturización tiene un límite

Gracias a que en años recientes se ha dedicado un gran esfuerzo para tratar de reducir las resistencias y las capacitancias parásitas de las líneas de interconexión, mediante la introducción de dieléctricos intermetálicos de baja constante dieléctrica k y el uso de cobre en lugar de aluminio, ya se está alcanzando un límite en la reducción del tiempo de retraso RC. Por otro lado, los dispositivos semiconductores están a punto de alcan-

zar dimensiones con las que dejarán de funcionar debido a cambios en sus propiedades electrónicas por efectos de confinamiento cuántico.

Optoelectrónica del silicio

Desde hace varios años se ha propuesto, como una de las soluciones más viables para seguir aumentando la velocidad de propagación y procesamiento de señales y de datos en sistemas de cómputo y/o de comunicación, el uso de señales e interconexiones ópticas en lugar de electrónicas. Debido a esto ha surgido un enorme interés, en el ámbito internacional, en torno al desarrollo de una nueva tecnología denominada optoelectrónica o microfotónica del silicio, cuyo objetivo es la integración en obleas de silicio de dispositivos electrónicos y ópticos basados en el silicio. Cabe señalar que el logro de la integración optoelectrónica completa con base en el silicio y sus compuestos aislantes tendría una influencia significativa en la tecnología de cómputo, despliegues visuales, comunicaciones, y otras tecnologías relacionadas, además de que permitiría seguir reduciendo los costos de los equipos co-

respondientes. A la fecha ya se ha logrado un cierto grado de integración optoelectrónica sobre obleas de silicio, ya que se pueden fabricar detectores ópticos de alta calidad de silicio, y ya son comunes los arreglos de detectores ópticos fabricados con dispositivos de carga acoplada (CCDs, del inglés *charged-coupled devices*). También es posible, mediante el empleo de películas delgadas de óxidos, nitruros y oxinitruros de silicio, de estequiometría variable, la construcción de guías de onda para la transmisión de señales luminosas. La integración completa de la óptica y la electrónica requiere, sin embargo, la fabricación de diodos emisores de luz (LEDs, del inglés *light emitting diodes*) y/o láseres de silicio, sobre la misma oblea de silicio que contiene detectores y dispositivos electrónicos. Por desgracia, como es bien sabido, el silicio es un emisor de luz extremadamente ineficiente y por esta razón ha tenido una influencia y un desarrollo muy reducidos en el campo de la fotónica (dispositivos emisores de luz, como LEDs y láseres). En la tecnología actual, los dispositivos semiconductor emisores de luz se fabrican casi exclusivamente a

partir de semiconductores compuestos III-V y II-VI, de banda directa, como el arseniuro de galio, el fosfuro de indio, el zinc selenio, el nitruro de galio y otros, los cuales tienen eficiencias de emisión de luz mucho mayores que el silicio. A pesar de que en la actualidad existe una gran diversidad (en frecuencias y potencias) de láseres construidos con semiconductores compuestos, su integración directa sobre una oblea de silicio ha probado ser muy problemática. Cabe señalar que el láser, por ser una fuente de luz coherente y de alta densidad de energía, es preferible sobre otras fuentes de luz como los LEDs, ya que la luz incoherente de estos últimos



Figura 1.

no es suficiente para hacer interconexiones de alta velocidad y densidad, debido a las ineficiencias ópticas para enfocar la luz incoherente.

Relevancia del láser de silicio y factibilidad de su fabricación

Mucho se ha hablado sobre la convergencia de la computación y las comunicaciones en los últimos años, aunque poco sobre el mayor escollo a salvar: las comunicaciones actuales se transmiten por pulsos de luz mientras que los ordenadores se basan en el movimiento de los electrones sobre silicio o cobre.

Sin embargo, es posible que muy pronto se consiga combinar ambos, ofreciendo un vehículo óptico para las CPUs de silicio o incluso usar la luz para computar. Esta es la idea de la computación óptica o fotónica sobre silicio, que está pasando de los laboratorios académicos a los fabricantes de chips.

“La microelectrónica se enfrenta al problema de que el principal retardo en los circuitos no se debe a la velocidad de las puertas lógicas, sino al cableado” explica Lorenzo Pavesi, un profesor

de física experimental de la Universidad de Trento. Es lo que se llama “cuello de botella de interconexión”. Por si fuera poco, los diseñadores de PCs y de procesadores están preocupados por la potencia disipada en forma de calor, potencia que, de seguir creciendo al ritmo actual, podría hacer que un CPU ardiera. Pavesi asegura que “la fotónica jugará un importante papel en la resolución de estos cuellos de botella”.¹ La luz es inherentemente más eficiente que la electricidad. Es más rápida y se puede multiplexar (una fibra puede transportar varios canales a diferentes frecuencias) y, como cualquier poseedor de una laptop con un procesador Pentium IV puede asegurar, los electrones que se mueven por cables metálicos producen mucho más calor que la luz a través de fibras ópticas.

La integración de la optoelectrónica depende de que el silicio pueda mejorar su capacidad para emitir luz

El láser es la mejor fuente de luz para la transmisión de datos. Si una PC tiene un lector de CD o de DVD, hay un pequeño láser también. Para conseguirla promesa de la fotónica, sin embargo, los fabricantes de chips

necesitan poner un láser no en el interior del ordenador, sino en el interior de un chip de silicio: han de construir un láser de silicio. Hoy en día los láseres son relativamente fáciles de fabricar y son bastante comunes en comunicaciones, pero aún son demasiado grandes y caros como para caber en un chip. Para conseguir computación fotónica asequible en un chip, los fabricantes han de conseguir que el propio silicio emita luz láser que se pueda activar y desactivar para transmitir información digital. Desgraciadamente, el silicio no es un buen elemento para fabricar un láser. Se han intentado varias veces emitir luz. Entre las más importantes actualmente se encuentra incluido el uso de nanocristales de silicio para emitir luz visible como un LED (encabezados por el grupo de Pavesi en 2000).² Pavesi afirma que él y otros investigadores han demostrado que ambos métodos permiten no sólo generar luz, sino también amplificarla. “Lo que todavía queda por hacer es implementar estos sistemas con una cavidad óptica (una matriz de espejos que convierta en coherente la luz) en la que inyectar corriente eléctrica (estimulando el silicio con electricidad en vez de con

luz) para tener un láser de inyección” dice Pavesi. “Estoy convencido de que los nanocrisales de silicio finalmente serán capaces de emitir luz láser”.¹ Otros investigadores le apuestan, sin embargo, al erbio. STMicroelectronics, por ejemplo, afirma que tendrá un láser de silicio–erbio operativo en los próximos años.

El silicio en bulto es un emisor de luz muy ineficiente

46

La baja eficiencia como emisor de luz del silicio se debe fundamentalmente a que es un semiconductor de banda indirecta y a que su brecha de energía prohibida (gap óptico) es muy pequeña (1.1 eV) y cae en la región de infrarrojo. En la figura 2 se muestra un diagrama de la estructura de bandas (energía, E, en función del vector de onda o momento del cristal, k) de un cristal de silicio, en donde se aprecia que la posición en el espacio k del mínimo de la banda de conducción ($k_{c,mín}$) no coincide con el máximo de la banda de valencia ($k_{v,máx}$). La excitación de un electrón de la banda de valencia llena con electrones la banda de conducción vacía y origina diversos mecanismos de recombinación electrón–

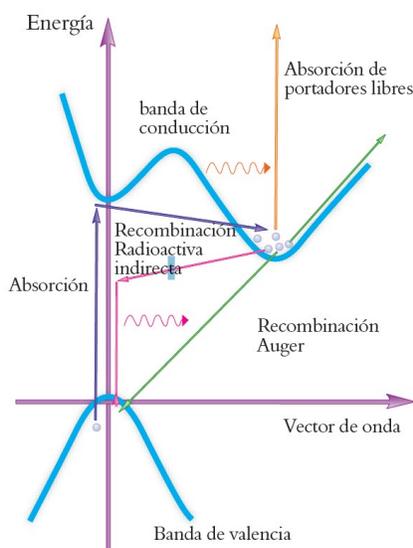


Figura 2. Estructura de bandas del silicio

huevo (e–h). El proceso de recombinación radiativa o emisión de luz de borde de banda ocurre cuando la energía de recombinación se libera en forma de un fotón. Como la cantidad de movimiento de un fotón es extremadamente pequeña y la energía y el momento del cristal se deben conservar, para que se lleve a cabo este tipo de recombinación es necesaria la emisión o absorción de una tercera partícula tal como un fonón (vibración de la red) de momento $k = k_{c,mín} - k_{v,máx}$. Como este proceso es de segundo orden, su probabilidad de ocurrencia es muy baja, lo cual significa que el tiempo de vida radiativo, t_R , es muy largo, del orden de milisegundos. Esta no es la única limitante, ya que existen

láseres de otros materiales caracterizados por centros con tiempos de vida largos. El problema con el silicio es que mientras que esperan que ocurra la recombinación radiativa, los electrones y huecos se mueven, y si se de atrapamiento, se pueden recombinar no radiativamente. Normalmente los procesos de recombinación no radiativa son de primer orden, por lo que su probabilidad de ocurrencia es mucho mayor y sus tiempos de vida son típicamente del orden de los nanosegundos. La habilidad de un material para emitir luz está normalmente cuantificada por la eficiencia cuántica interna, que no es más que la razón de la probabilidad de que un par e–h excitado se recombine radiativamente y la probabilidad de que se recombine no radiativamente. Para un silicio grado electrónico su eficiencia cuántica interna es de 10^{-6} .

El silicio es un semiconductor de banda indirecta con un gap óptico pequeño, por eso es un emisor de luz ineficiente

Esta es la razón por la que el silicio es un material con luminiscencia muy pobre.²

No obstante todo lo anterior, debido a la relevancia

del desarrollo de la optoelectrónica basada completamente en silicio, en todo el mundo se han realizado numerosos esfuerzos por soslayar de diferentes maneras el inconveniente del gap indirecto, para aumentar su eficiencia luminiscente y obtener dispositivos emisores de luz basados en el silicio. Las estrategias seguidas para lograr este fin son las siguientes: a partir de silicio volumétrico ultrapuro, a partir del silicio nanoestructurado, a partir del silicio dopado con erbio y a partir de cascadas cuánticas de silicio-germanio.

Dispositivos luminiscentes basados en el silicio volumétrico ultrapuro

En el silicio en bulto ultrapuro el número de impurezas que constituyen centros de recombinación no radiativos se reduce al máximo y es posible observar una emisión eficiente de luz. Las superficies también son centros de recombinación no radiativos, por lo que deben ser pasivadas con óxido de silicio o nitruros de silicio. Con esta idea se han seguido dos estrategias para obtener diodos emisores de luz basados

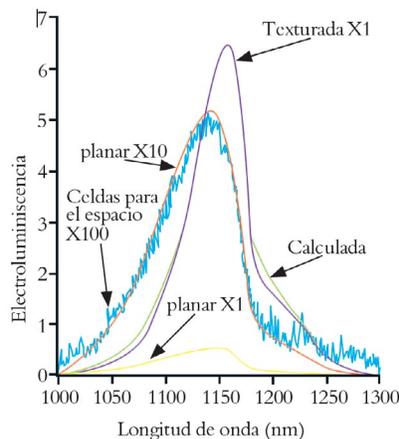


Figura 3. Espectros de emisión típicos de distintos dispositivos emisores de luz basados en el silicio en bulto ultrapuro.

en silicio. En la primera se han diseñado diodos en los que se reduce al máximo la recombinación no radiativa: se utilizan sustratos de alta calidad, se pasivan las superficies con óxidos térmicos de alta calidad y se limita el área de las regiones de dopaje a las áreas de contacto, entre otras medidas.³ De esta manera se obtuvieron diodos con eficiencias de potencia cercanas a uno por ciento. El espectro de electroluminiscencia de los diodos así obtenidos es típico de la recombinación banda-banda y ocurre en la región del infrarrojo cercano (figura 3).

La segunda estrategia para la obtención de dispositivos emisores de luz a partir del silicio en bulto se basa en la creación ex profe-

so (por medio del esfuerzo mecánico) de dislocaciones. Estas dislocaciones sirven de barrera a la difusión de los portadores, recluyéndolos en regiones libres de defectos y por lo tanto favoreciendo la recombinación radiativa. Las eficiencias cuánticas logradas de esta manera son de alrededor de uno por ciento y en la figura 4 se muestran espectros de emisión típicos.

Existen varias estrategias para obtener diodos emisores de luz basados en silicio volumétrico ultrapuro

Más recientemente, un nuevo intento por obtener luz láser a partir del silicio fue publicado en la revista *Nature*:⁴ un Laboratorio

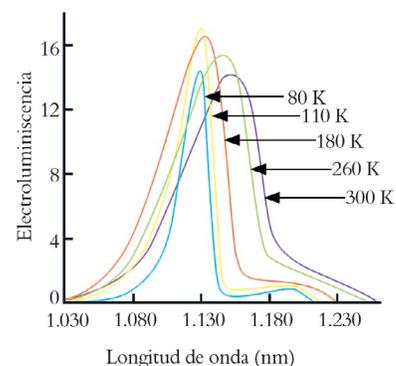


Figura 4. Espectros de emisión típicos en función de la temperatura de los dispositivos emisores de luz basados en el silicio en bulto que emplean dislocaciones para confinar a los portadores y propiciar la recombinación radiativa.

de Tecnología Fotónica de Intel reveló una manera de superar el obstáculo inicial del uso del silicio como medio para generar un haz de láser, un efecto en el que los electrones liberados por la energía de los fotones viajeros absorben la luz que atraviesa el silicio y cuyo efecto se potencia sobre todo para altas intensidades de luz.

Un grupo de investigadores del mayor fabricante del mundo de microchips resolvió el problema, llamado absorción de dos fotones, con una técnica propia del mundo de los semiconductores: crearon regiones tipo p+ y tipo n+ alrededor del trayecto del rayo (lo que se conoce como estructura PIN), dejando así para el trayecto del

láser una zona fuertemente empobrecida que “aspira” a los electrones y evita que ocurra absorción en la zona por donde pasa el haz láser. En la figura 5 se muestra un esquema del láser de silicio fabricado utilizando el efecto Raman. Un rayo continuo generado a partir de silicio, que es luz infrarroja, podría dejar atrás las limitaciones de costos y tamaño de los actuales sistemas usados en cirugía y comunicaciones, que necesitan materiales más caros y extraños.

No obstante, este descubrimiento aún no sustituye a los láseres semiconductores comunes utilizados en la vida diaria como los lectores de DVD y en equipos de telecomunicaciones. Cabe

señalar que bajo esta estrategia la luz miniscencia que se obtiene de los dispositivos de silicio en bulto representa energías de alrededor del tamaño de su gap óptico (1.1 eV), que es la región del infrarrojo cercano.

Obtención de dispositivos emisores de luz a partir de silicio nanoestructurado

La obtención de dispositivos emisores de luz a partir de silicio nanoestructurado es una de las estrategias que más éxito ha tenido en los últimos años. Todo comenzó en 1990 cuando Canham⁵ descubrió las propiedades luminiscentes del silicio poroso (SP), obtenido tras realizar un ataque electroquímico en un sustrato de silicio con ácido fluorhídrico (figura 6). Estas estructuras son capaces de luminiscer fuertemente entre el naranja y el rojo a temperatura ambiente.

La elevada eficiencia cuántica interna de fotoluminiscencia observada en el SP se explicó gracias a los efectos de confinamiento cuántico que provocan un aumento del gap y mayor probabilidad de recombinación, el confinamiento espacial de

48

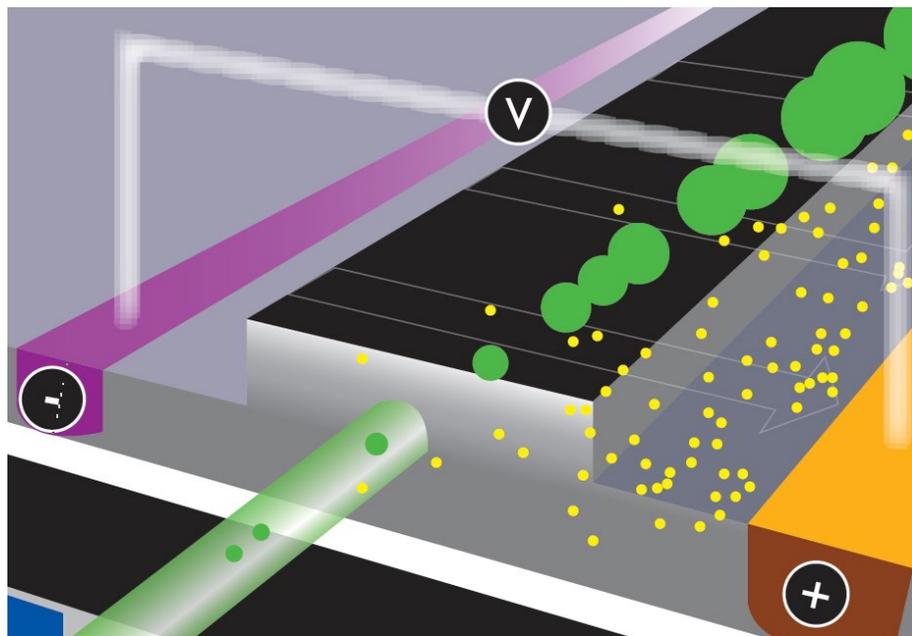


Figura 5. Esquema del láser Raman de silicio.

los portadores libres impide que alcancen los centros de recombinación no radiativa, la reducción del índice de refracción del material incrementa de esta manera la eficiencia de extracción de la luz a través del material. El trabajo de Canham además de generar una gran especulación en todo el mundo con respecto a que se estaba a punto de lograr la integración optoelectrónica basada en el silicio, despertó un gran interés en la aplicación del silicio poroso en la tecnología de despliegues visuales (pantallas, señaladores, etc.), que requiere dispositivos que emitan en el rojo, el verde y el azul. Este trabajo también produjo gran actividad de investigación básica (íntimamente ligada a la investigación tecnológica) hacia el logro de un entendimiento de las propiedades fundamentales de este material y de los mecanismos que dan origen a su luminiscencia.⁵

A pesar de lo anterior, las investigaciones tecnológicas subsecuentes indicaron que antes de poder concluir que el SP podía convertirse en la base para una tecnología optoelectrónica compatible con el silicio se deberían resolver varios problemas.

El problema de la estabilidad de la luminiscencia del silicio poroso (SP) se identi-

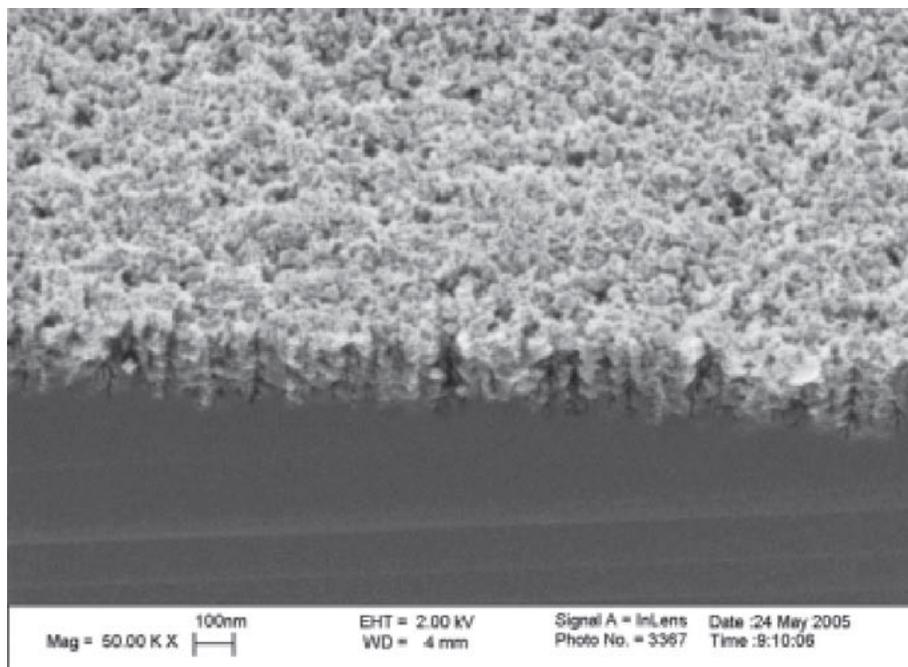


Figura 6. Estructura del silicio poroso.

ficó como uno de los más importantes por resolver, ya que se encontró que la intensidad de luz emitida por una muestra fresca (recién anodizada) de este material se degradaba después de cierto tiempo (disminuía su intensidad) e incluso se llegaba a extinguir, y lo mismo sucedía con los LEDs preparados con SP fresco.

El modelo más aceptado para explicar el origen de la luminiscencia de SP, basado en estudios de su estructura mediante microscopía electrónica y espectroscopia Raman fue el de confinamiento cuántico. Este modelo supone que el SP está formado por regiones de silicio cristalino de tamaño nanométrico separadas por poros llenos

Desde hace diez años existen emisores de luz basados en silicio nanoestructurado a temperatura ambiente

de aire como se muestra en la figura 6, y que debido a un efecto de confinamiento cuántico la brecha prohibida de los nanocristales de silicio se incrementa con respecto a la del silicio en bulto, además de que se convierte en una brecha directa.⁶ Bajo este modelo simple, suponiendo que los nanocristales de silicio son cubos de arista L y usando la aproximación de la masa efectiva, se obtiene que la brecha prohibida confinada está dada por $E_{\text{confinada}} = E_{\text{bulto}} + C/L^2$, donde C es una constante que depen-

de de la masa efectiva de los electrones en el nanocrystal. De acuerdo con esta fórmula y un cálculo aproximado de la constante C, al reducir el tamaño del nanocrystal a dimensiones del orden de 3 nm, se encuentra que $E_{\text{confinada}} \approx 2-2.5 \text{ eV}$, lo cual explica en buena medida la existencia de transiciones radiativas en el espectro visible (fotones con energías $\sim 1.7-3.0 \text{ eV}$).

Así, a lo largo de la década de los noventa se obtuvieron dispositivos emisores de luz a partir del silicio poroso con eficiencias cada vez mayores, evolución que se muestra en la figura 7.

Sin embargo, estudios preliminares no mostraron evidencia de amplificación óptica en guías de onda de silicio poroso, lo que frenó su aplicación en la construcción de láseres.

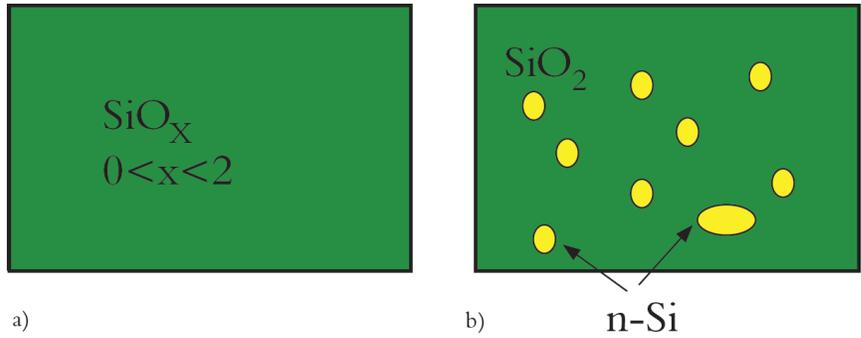


Figura 8. El óxido subestequiométrico de silicio a) puede servir de base para la obtención de nanoestructuras de silicio, cuando se somete a tratamientos térmicos que provocan la segregación del exceso de silicio b).

Paralelamente se generó una intensa actividad de investigación básica y tecnológica dirigida hacia la formación, mediante diversos procesos, de nanocúmulos o nanocristales de silicio (nc-Si), e incluso de otros elementos, embebidos en películas delgadas de diversas matrices aislantes (principalmente SiO_2 , Si_3N_4 , $\text{SiO}_x\text{:H}$, $\text{SiN}_x\text{:H}$), y al es-

tudio teórico y experimental de su estructura, composición, propiedades ópticas, electrónicas, etc.⁷⁻¹⁰ Inicialmente la manera más usual de crear estos nanocristales era a partir del óxido de silicio subestequiométrico con silicio en exceso (figura 8 a).

En el silicio nanoestructurado obtenido de esta manera es posible observar ganancia óptica. Cuando el óxido subestequiométrico se somete a un tratamiento térmico a altas temperaturas (1000-1300 °C) se produce la segregación del silicio en exceso, formándose las nanoestructuras de silicio dentro de la matriz del óxido (figura 8 b). Las propiedades luminiscentes del silicio nanoestructurado obtenido de esta manera son muy similares a las del silicio poroso: una ancha banda de emisión a temperatura ambiente, cuya posi-

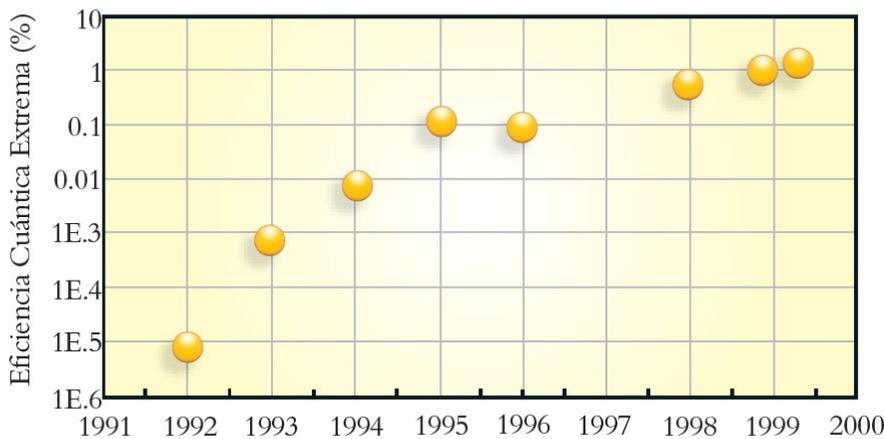


Figura 7. Eficiencia cuántica externa de LEDs basados en silicio poroso obtenidos a lo largo de la década de los noventa.

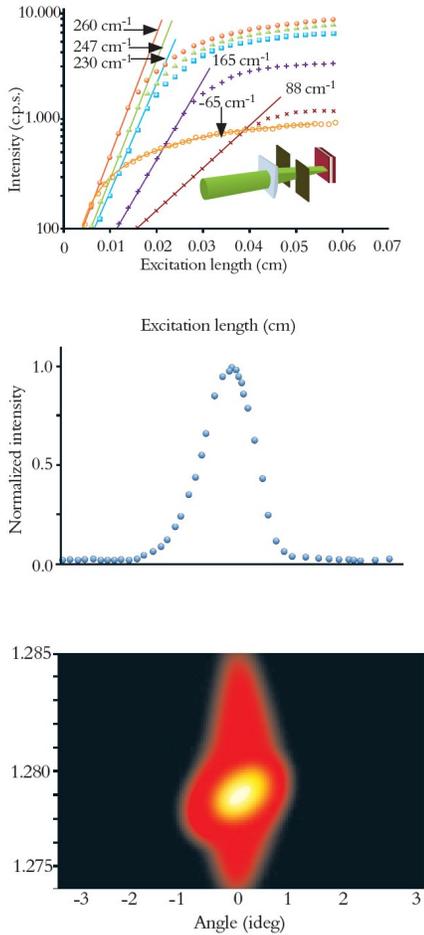


Figura 9. Ganancia óptica y emisión estimulada en nanopartículas cristalinas de silicio, Nature Materials, 4 (2005) 887-891.

ción espectral depende del tamaño de los nanocristales de silicio (figura 9).

Las investigaciones realizadas destacan las ventajas y desventajas comparativas del uso de óxido de silicio o nitruro de silicio como matriz para alojar nanocúmulos de silicio y fabricar dispositivos electroluminiscentes. Por ejemplo, como ventaja del SiO₂ se destaca

su alta calidad de aislamiento eléctrico (altos voltajes de ruptura) debido a su amplia brecha de energías prohibidas (bandgap ~ 8-9 eV). Sin embargo, esto origina una altura de barrera de potencial nc-Si/SiO₂ relativamente alta (2.1-3.4 eV), que da lugar a altos voltajes de operación de los LEDs fabricados con nc-Si embebido en películas de óxido de silicio.⁹ En este sentido, el nitruro de silicio por tener una brecha prohibida menor (bandgap~4-5 eV) da lugar a una barrera de potencial nc-Si/Si₃N₄ menor (1.5-2.0 eV), lo cual permitiría en principio reducir los voltajes de operación de los LEDs fabricados con nc-Si embebidos en películas de nitruro de silicio.¹⁰

Para llegar al láser de Si se emplea silicio dopado con erbio, que aumenta la capacidad de transmisión de las fibras ópticas

Estudios recientes señalan también ventajas del hecho de que los nc-Si embebidos en las matrices aislantes sean amorfos en lugar de cristalinos. Debido a que la energía de la brecha prohibida del silicio amorfo en bulto, a-Si (1.6 eV), es mayor que la del silicio cristalino en bulto, c-Si (1.1 eV), se ha predicho que el a-Si

es un mejor candidato para producir luminiscencia en el espectro visible, sin necesidad de un confinamiento tan estricto, de acuerdo con la brecha prohibida de los nc-Si correspondiente a cada caso, según el modelo de confinamiento cuántico:

$$\begin{aligned}
 E_{a-Si \text{ confinado}} &= E_{a-Si \text{ bulto}} + C/L^2 = \\
 &= 1.6 \text{ eV} + C/L^2 \text{ para el a-Si, y } E_{c-Si \text{ confinado}} = \\
 &= E_{c-Si \text{ bulto}} + C/L^2 = 1.1 \text{ eV} + C/L^2
 \end{aligned}$$

Cabe señalar que en la investigación orientada hacia la preparación de nanocúmulos o nanocristales de silicio embebidos en películas delgadas de óxido de silicio y nitruro de silicio destaca el uso de las técnicas de depósito de vapores químicos asistido por plasma (PECVD), debido a que éstas son cien por ciento compatibles con la microelectrónica del silicio. Otro aspecto que destaca es que el gas fuente de silicio más comúnmente utilizado para producir nanocúmulos de silicio embebidos en películas delgadas de dióxido de silicio y nitruro de silicio es el silano (SiH₄) y que, consecuentemente, en la gran mayoría de los casos subsiste el problema de la estabilidad en las propiedades luminiscentes, de absorción óptica y conducción electrónica, debido a la

incorporación de hidrógeno en las películas matriz ($\text{SiO}_x\text{:H}$, $\text{SiN}_x\text{:H}$) que alojan los nanocúmulos.⁷⁻¹⁰

Debido a que los enlaces del silicio con los elementos halógenos (Si-Cl y Si-F) son mucho más estables que los enlaces S-H, recientemente se ha producido un creciente interés en el uso de fuentes halogenadas de silicio como el SiH_2Cl_2 y el SiCl_4 para el depósito por PECVD de nanocúmulos de silicio embebidos en películas delgadas de nitruro de silicio.¹¹

Nanocristales de silicio acoplados con erbio

Otra de las vías por las que actualmente se intenta llegar al láser de silicio es a través del silicio dopado con erbio. Este material se conoce por su uso en los amplificadores ópticos de las guías de onda y a él se debe el incremento actual en la capacidad de transmisión de las fibras ópticas. En estos amplificadores, una fibra óptica de cuarzo se dopa con iones Er^{3+} , cuya transición interna en 1.54 nm se explota para lograr la amplificación. Hasta hoy, siguiendo esta misma línea, se han obtenido LEDs de silicio dopado con

Er que operan a temperatura ambiente. Un hallazgo importante en estas investigaciones fue el notable aumento de la luminiscencia del cuarzo dopado con Er cuando el cuarzo contiene n-Si embebidos.¹² Con este sistema se han diseñado dispositivos emisores de luz MOS con eficiencias cuánticas mayores de uno por ciento. Para los dispositivos de óxido de silicio subestequiométrico dopado con Er se han reportado eficiencias de alrededor de 10 por ciento, si bien todavía no resultan confiables.

El sistema de nanocristales de silicio (nc-Si) dopado con Er es muy prometedor para aplicarlo en láseres por diversas razones: primero, el material activo (Er^{3+} en SiO_2)

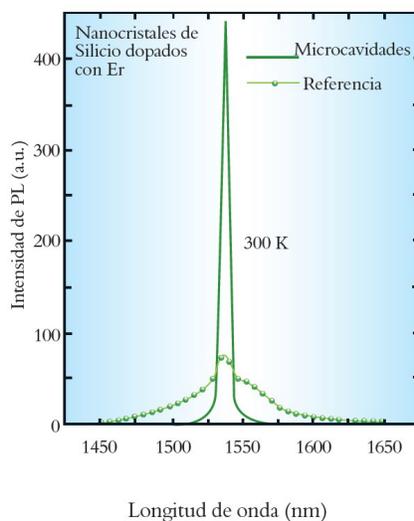


Figura 10. Emisión a temperatura ambiente de una microcavidad de silicio nanocristalino dopado con erbio.

ya ha demostrado *lasing properties*; segundo, la tecnología para producirlo es compatible con el procesamiento CMOS, y tercero, ya se han demostrado LEDs con una enorme eficiencia, y microcavidades con excelentes propiedades luminiscentes (figura 10), a pesar de todo esto uno de los grandes inconvenientes es que su emisión es en el infrarrojo, lo cual limitaría el número de sus aplicaciones.

Estructuras cuánticas en cascada de Si/Ge

Como alternativas, entre las vías seguidas para obtener el láser de silicio se encuentran las que utilizan las cascadas de silicio-germanio. Una forma de eludir la limitación fundamental del silicio para utilizarlo en láseres (su gap indirecto) es utilizar transiciones intrabanda en lugar de interbandas. Esto es lo que se persigue con los sistemas cuánticos de cascada de Si/Ge. El sistema Si/SiGe ofrece importantes ventajas sobre las heteroestructuras III-V cuando de aplicaciones en láseres de cascadas cuánticas se trata,¹³ pues ofrece la posibilidad de integración monolítica con la microelectrónica del silicio; además,

en ellos no está presente la interacción no polar electrón-fonón, proceso dominante en las pérdidas de los láseres III-V de cascada cuántica, y un tercer aspecto favorable es que la energía de los fonones ópticos en el silicio es mucho mayor que en el GaAs (64 meV, comparado con 36 meV), por lo que la ventana de frecuencias dentro de la cual la dispersión por fonones ópticos está suprimida es mayor. Finalmente, la conductividad térmica del silicio es mucho mayor que la del GaAs, lo que significa mejores perspectivas para la operación de los pozos cuánticos a temperaturas no criogénicas (figura 11).

Las investigaciones en este campo en México

En el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, aprovechando la experiencia de un grupo de investigadores en la preparación mediante técnicas PECVD y RPECVD de películas delgadas nanométricas (espesores < 100 nm) de silicio y sus diversos compuestos aislantes, y en el estudio de su estructura, composición, propiedades electrónicas y ópticas, se inició un proyecto de inves-

tigación que se inserta en esta línea tan importante, cuyo objetivo principal es obtener mediante las técnicas PECVD y RPECVD y el uso de halogenuros de silicio (SiH_2Cl_2 , SiCl_4 , SiF_4) películas delgadas de nitruro de silicio y óxido de silicio que contengan embebidos nanocúmulos de Si, que presenten una alta eficiencia luminiscente.

En la UNAM se realizan distintas investigaciones con el fin de obtener el láser de silicio y los logros no han sido pocos

La figura 12 muestra la luminiscencia a temperatura ambiente de nanocúmulos de silicio embebidos en películas delgadas de compuestos de silicio pre-

paradas por PECVD, usando mezclas de $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3/\text{Ar}$, a distintas presiones: a) 0.2 torr, b) 0.5 torr, c) 1.0 torr. La a minúscula después del nombre de cada muestra indica que es el espectro de la muestra después de haber sido recocida a 1000 °C en una atmósfera de nitrógeno. Los resultados obtenidos de la investigación realizada hasta ahora son muy alentadores y constituyen una contribución importante hacia la construcción del láser de silicio.¹³

En la figura 13 se muestra una imagen de alta resolución donde aparecen los cúmulos de silicio; en ella puede apreciarse la estructura cristalina de los cúmulos en materiales tal y como fueron crecidos gracias al uso de compuestos clora-

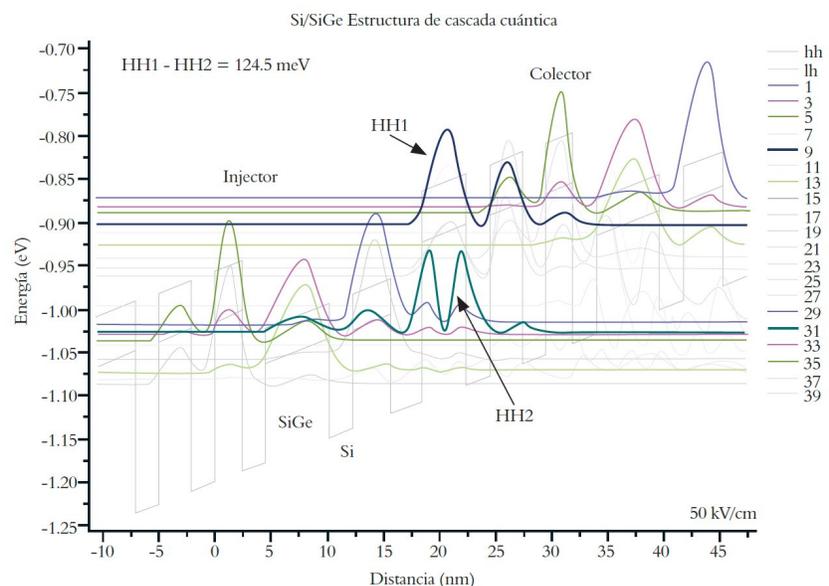


Figura 11. Estructura y emisión de un láser de Si/SiGe en cascada.

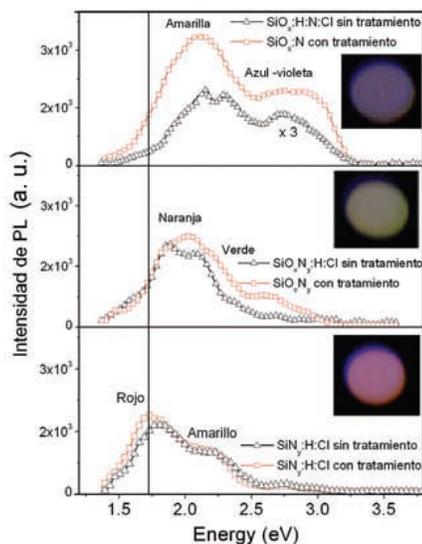


Figura 12. Espectros de fotoluminiscencia de nanocúmulos de silicio embebidos en diferentes compuestos de silicio.

dos de silicio, la distribución de tamaños de los cúmulos obtenidos se encuentran entre 1.5 y 4 nm, lo cual implica que la emisión puede variar en diferentes zonas del espectro visible en función del tamaño y la densidad de los nanocúmulos que prevalezcan y pueden de esta manera sintonizar diferentes colores según las condiciones de crecimiento.¹⁴

También en la línea de investigación hacia el láser de silicio, en nuestras instalaciones se llevan a cabo investigaciones dirigidas a la obtención de sistemas de pozos cuánticos del tipo $\text{SiN}_x/\text{nc-Si}/\text{SiN}_x$, con muy buenos resultados en cuanto a eficiencia de emisión.¹⁵ La figura 14 muestra, en una imagen de alta resolución,

un sistema de pozos cuánticos de silicio crecidos en las instalaciones de IIM, donde se puede apreciar la estructura de barreras de nitruro de silicio de 20 nanómetros de ancho con pozos cuánticos de silicio cristalino con espesores de 2 nanómetros. También se muestra una imagen del color de la fotoluminiscencia obtenida al ser excitado el sistema con un láser de He-Cd a 325 nm. Esta emisión de color rojizo se produce por confinamiento cuántico en la dirección z del crecimiento.

Como se demuestra en este trabajo, se han obtenido importantes logros tanto en el ámbito internacional como en el nacional en el tema de fotónica cuántica, pero aún falta un buen tramo por recorrer en la ruta hacia el láser de silicio.

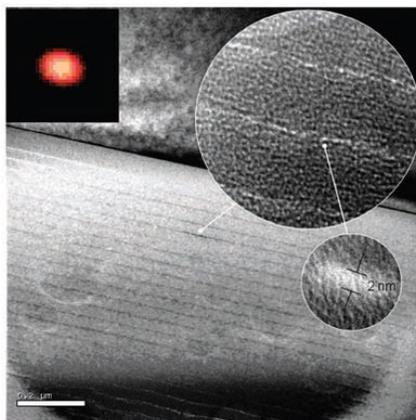


Figura 14. Imagen de alta resolución (HRTEM) donde se aprecia el sistema de pozos cuánticos de tipo $\text{SiN}_x/\text{nc-Si}/\text{SiN}_x$ y la emisión una vez que es excitado con un láser a 325 nm.

Bibliografía

- 1 L. Pavesi, *Materials Today*, enero, 2005, 18.
- 2 L. Pavesi, L. Dal Negro, C. Mazzoleni, G. Franzo, A. y F. Priolo, *Nature*, 408 (2000) 23.
- 3 M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, P.J. Reece, M. Gal, *Nature*, 412 (2001) 805-808.
- 4 H. Rong et al, *Nature*, OJO (2005) 433-292.
- 5 L.T. Canham, *Applied Physics Letter*, 57 (1990) 1046.
- 6 C. García, B. Garrido, P. Pellegrino, et al, *Physica E*, 16 (2003) 429-433.
- 7 L.Y. Chen, W.H. Chen, F.C.N Hong, *Appl. Phys. Lett.*, 86 (2005) 193506.
- 8 Y. Wang, D. Shen, Y. Liu, J. Zhang, Z. Zhang, Y. Liu, Y. Lu, X. Fan, *Physica E*, 27 (2005) 284.
- 9 K.S. Cho, N.M. Park, T.Y. Kim, K.H. Kim, G.Y. Sung, J.H. Shin, *Appl. Phys. Lett.*, 86 (2005) 071909.
- 10 A. Puzder, A.J. Williamson, J.C. Grossman, G. Galli, *Phys. Rev. Lett.*, 88 (2002) 097401-1.
- 11 S. Coffa, S. Libertino, G. Coppola, A. Cutolo, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 36, 10 (2000) 1206.
- 12 S.T. Huxtable, A.R. Abramson, C.L. Tien, A. Majumdar, *Appl. Phys. Lett.*, 80, 10 (2002), 1737.
- 13 G. Santana, B.M. Monroy, A. Ortiz, L. Huerta, J. Aguilar-Hernández, G. Contreras-Puente, J.C. Alonso, "Influence of the surrounding host in obtaining tunable and strong visible photoluminescence from silicon nanoparticles", *Appl. Phys. Lett.*, 80, 04 (2006) 1916.
- 14 A. Ponce, A. Benami, G. Santana, J.C. Alonso, J. Aguilar-Hernández, G. Contreras-Puente, A. Ortiz, J. Fandiño, D. Romeu, "Structural evolution of nanocrystalline silicon studied by high resolution transmission electron microscopy", *Physics of Status Solidi*, en prensa.
- 15 B.M. Monroy, G. Santana, J. Aguilar-Hernández, A. Benami, J. Fandiño, A. Ponce, G. Contreras-Puente, A. Ortiz, J.C. Alonso, "Photoluminescence properties of SiN_x/Si amorphous multilayer structures grown by plasma enhanced chemical vapor deposition", *Journal of Luminescence*, en prensa.