

# Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

## Fotónica del silicio

Karina Galache · Wednesday, March 6th, 2019

Categorías: Ciencias Exactas, Zona Abierta

### Introducción

La fotónica surge como una alternativa a la electrónica convencional para las comunicaciones digitales, con la cual se pueden transferir datos a distancias más grandes, a mayor velocidad y con un menor consumo de energía. Podemos referirnos a la fotónica del silicio como la capacidad de generar, manipular y detectar luz (fotones) por medio de dispositivos basados en silicio. El principal reto tecnológico es el desarrollo de fuentes emisoras de luz basadas completamente en silicio, ya que, aunque actualmente empresas como Intel comercializan con dispositivos fotónicos de silicio, para la generación de luz se continúan empleando otras tecnologías.

El silicio es uno de los materiales más abundantes en la corteza terrestre, donde se estima que cerca de una cuarta parte está compuesta por él. Si bien es difícil encontrarlo de forma pura en la naturaleza, en la actualidad es posible obtenerlo a nivel industrial con un alto grado de pureza y cristalinidad a relativamente bajos costos. A pesar del hecho de que el primer transistor fue fabricado a base de germanio, la abundancia y facilidad para manipular las propiedades eléctricas del silicio mediante procesos de oxidación y difusión de diferentes tipos de átomos terminaron por consolidarlo en la industria de la electrónica. Por tal motivo, el desarrollo de dispositivos emisores de luz basados en silicio representa enormes ventajas, ya que podrían ser directamente integrados con las tecnologías actuales.

### Emisión de luz en semiconductores

Para entrar en contexto, explicaremos brevemente cómo se produce la emisión de luz en materiales semiconductores. Podemos describir a un semiconductor como un sólido cristalino que presenta bandas de energías permitidas para los electrones, conocidas como banda de valencia (BV) y banda de conducción (BC), las cuales se encuentran separadas por una brecha que representa energías prohibidas para los electrones y es comúnmente conocida como “gap”. En la figura 1 se representa esquemáticamente este diagrama de bandas. Si aplicamos la energía suficiente al sistema, por ejemplo, mediante luz o calor, algunos electrones alcanzarán un estado excitado con la energía necesaria para ir de la BV a la BC, dejando un espacio libre en la BV. Para fines prácticos, este espacio es considerado como una partícula de carga positiva llamada “hueco”. Ahora bien, estos

electrones excitados buscarán la forma de retornar a un estado de menor energía (regresar al estado de equilibrio), o sea, a la BV, para ocupar uno de los huecos disponibles. Esto es un proceso conocido como “recombinación del par electrón-hueco”. Para lograrlo es necesario que antes los electrones liberen la energía adquirida previamente. Con lo anterior, podemos explicar de manera simple que la emisión de luz en los semiconductores se puede dar cuando existe una recombinación del par electrón-hueco, liberando energía en forma de fotón, donde el color de la luz emitida (longitud de onda) está directamente relacionado con la energía del gap en el material semiconductor.



Figura 1. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor.

### Límites del silicio

Entonces, ¿cuál es el problema para el desarrollo de dispositivos fotónicos basados en silicio? Bueno, esto está relacionado con su estructura de bandas, según la cual podemos clasificar a los semiconductores en dos grupos: gap “directo” e “indirecto”. En un diagrama de energía vs momentum (relación entre la masa y la velocidad), representado como vector  $k$ , si el mínimo de la BC se encuentra alineado en  $k$  con el máximo de la BV tenemos un semiconductor de gap directo, mientras que en un semiconductor de gap indirecto estos puntos se encuentran en diferentes posiciones en  $k$ . Algunos ejemplos de materiales de gap directo son los compuestos de la familia III-V, como son GaN, InAs y GaAs. Por otro lado, materiales como el silicio y el germanio presentan un gap indirecto. Para comprender mejor lo anterior en la figura 2 se presentan las estructuras de bandas del GaAs y el silicio para mostrar las diferencias entre materiales de gap directo e indirecto.



Figura 2. Estructura de bandas de GaAs y Si

Si existe una recombinación en un semiconductor de gap directo, la probabilidad de que se emita un fotón es alta, mientras que en los materiales de gap indirecto la probabilidad es muy baja. Por ejemplo, para el caso de GaAs la probabilidad de emitir un fotón al haber una recombinación es cercana al 50%, mientras que para el silicio la probabilidad es del orden de 0.0001%, esto significa que para lograr emitir un fotón en silicio necesitamos recombinar cerca de un millón de pares electrón-hueco. Esto es debido a que cuando un electrón busca recombinarse en un semiconductor de gap indirecto, además de liberar energía, necesita compensar esta diferencia de posición en  $k$ , lo cual ocurre mediante la transferencia de momentum del electrón a un fonón (cuanto de vibración en un sólido). Este proceso de tres cuerpos es bastante ineficiente y lento si se compara con una recombinación de gap directo, con lo que la probabilidad de que éstos se recombinen por diferentes procesos no radiativos, es decir sin emitir luz, es bastante alta.

### Confinamiento cuántico en silicio

Muchas de estas ideas cambiaron con el descubrimiento de emisión de luz visible en el silicio poroso por Canham en la década de los 90's [1]. Esto fue posible llevando al silicio a escalas

nanométricas, lo que permitió superar los límites de su estructura de bandas al entrar en el régimen del confinamiento cuántico (CQ). Los efectos asociados al CQ se pueden presentar cuando las dimensiones del material se encuentran en el orden de nanómetros en al menos una de sus dimensiones, donde el diámetro mínimo requerido es diferente para cada material. Para el caso del silicio se logran efectos de CQ cuando el tamaño del cristal está por debajo de los 4 nm. Ahora, ¿cómo ayuda el CQ en el desarrollo de dispositivos fotónicos basados en silicio? Recordemos que uno de los problemas en el silicio es tener que compensar la diferencia de momentum durante una recombinación. En mecánica cuántica, se afirma que no es posible determinar con precisión y de manera simultánea algunos pares de variables físicas de un objeto, en este caso la posición y el momentum de un electrón. Esta idea es conocida como “Principio de incertidumbre”, la cual fue postulada por Heisenberg en 1925. Teniendo en mente este principio, si logramos confinar un electrón a un volumen muy reducido, por ejemplo, un nanocristal de silicio, se puede estimar con mucha precisión su posición, sin embargo, esto implica que ahora no tendremos certeza de su momentum. Como se puede observar en la figura 3, esta incertidumbre provoca un ensanchamiento en las funciones de onda asociadas al momentum de electrones y huecos, lo que produce un traslape entre ellas. Esto significa que ahora es posible una recombinación sin la asistencia de un fonón, en un proceso conocido como recombinación cuasi-directa, lo que incrementa significativamente las probabilidades de emitir un fotón.



Figura 3. Funciones de onda de electrones y huecos para silicio de volumen y nanocristalino.

Por otro lado, se observó otro fenómeno en el silicio poroso, y es que, según la energía de gap del silicio (1.1 eV) se tendría la emisión de fotones con una longitud de onda cercana a 1000 nm, la cual corresponde al espectro infrarrojo. Como sabemos, nuestros ojos están preparados para detectar luz en un pequeño rango de longitudes de onda, entre 400 y 750 nm, al que denominamos “espectro visible”, por lo que no nos es posible observar de manera directa luz infrarroja. Sin embargo, en el silicio poroso se observó la emisión intensa de luz de tono rojo-naranja, la cual no debería corresponder al silicio. Ahora sabemos que esto también ocurre por los efectos del CQ, lo que significa que no solo podemos incrementar la eficiencia con la que el silicio emite luz, sino que, además, podemos variar el color de la luz emitida. Actualmente, se ha demostrado que es posible modular la longitud de emisión desde el ultravioleta hasta el infrarrojo, pasando por las diferentes longitudes del espectro visible[2]. Pero ¿de qué depende la longitud de onda de los fotones emitidos? Ésta dependerá del diámetro del nanocristal. Como se muestra en la figura 4, al reducir el diámetro del nanocristal se induce un incremento en el gap del material y un gap más amplio tiende a ir en dirección a los colores azul-violeta.



Figura 4. Cambio de la energía del gap para nanocristales de diferentes diámetros.

## Conclusión

Aunque las propiedades del silicio son estudiadas desde hace más de un siglo, la llegada de la nanotecnología ha creado nuevas oportunidades, así como nuevos desafíos para lograr entender y dar un uso a los diferentes fenómenos que se presentan en el silicio nanométrico. Como se puede observar, el futuro de la fotónica del silicio es bastante alentador y posiblemente en algunos años lo

---

encontremos con mayor frecuencia en las tecnologías cotidianas.

## Referencias

- [1] L.T. Canham, Appl. Phys. Lett. 57 (1990) 1046–1048.
- [2] K. Dohnalová, T. Gregorkiewicz, K. Křsová, J. Phys. Condens. Matter 26 (2014).

This entry was posted on Wednesday, March 6th, 2019 at 5:07 pm and is filed under [Ciencias Exactas](#), [Zona Abierta](#)

You can follow any responses to this entry through the [Comments \(RSS\)](#) feed. Both comments and pings are currently closed.