

Capítulo 10

Los puntos cuánticos y la energía renovable

Carlos Rudamas¹

carlos.rudamas@ues.edu.sv

José Ricardo Estrada García¹

eg19011@ues.edu.sv

Oscar Deodanes¹

jd15002@ues.edu.sv

Nelson Cisneros¹

mc19069@ues.edu.sv

Jorge Cuadra¹

jorge.cuadra@ues.edu.sv

Luis Miguel Alvarenga Jacobo¹

aj21003@ues.edu.sv

<https://doi.org/10.61728/AE20252045>



¹ Facultad de Ciencias Naturales y Matemática Universidad de El Salvador

Resumen

Los puntos cuánticos poseen excelentes propiedades ópticas y electrónicas que tienen una gran aplicación en la fabricación de dispositivos de energías renovables que pueden contribuir en el combate contra el cambio climático. El otorgamiento en 2023 del premio Nobel a algunos de los investigadores que han trabajado en su fabricación ha dado mayor realce y difusión al uso de estos en diferentes campos, como la optoelectrónica, medicina, agricultura, ciencia de materiales, etc. En este trabajo se pretende dar una breve introducción a algunos de los fundamentos físicos de este tipo de nanoestructuras. Se define lo que se entiende por puntos cuánticos, y se compara con las propiedades de otras estructuras cuánticas semiconductoras. Se mencionan algunos métodos de preparación y síntesis y se describen brevemente sus propiedades optoelectrónicas. También se muestran resultados del efecto de confinamiento cuántico observado en espectros de absorción y emisión de puntos cuánticos coloidales con tamaños entre 2 y 4 nm aproximadamente. Al final se describen algunas aplicaciones de los puntos cuánticos en tecnologías amigables con el medioambiente y se mencionan nuevos materiales basados en carbono como una alternativa que eliminaría la toxicidad de los semiconductores en los dispositivos y que contribuiría a disminuir la contaminación ambiental provocada por los desechos de estas tecnologías.

Introducción

El término Punto Cuántico (QD: Quantum Dot) se refiere generalmente a nanoestructuras, normalmente fabricadas a partir de materiales semiconductores, que confinan portadores de carga en todas las dimensiones espaciales. La expresión fue acuñada por primera vez en los años ochenta. La primera realización experimental fue obra de Ekimov y colaboradores (1981) en forma de nanocristales de CuCl en una matriz dieléctrica transparente. Mediante el diseño, la elección del material y las técnicas

de fabricación, es posible crear QD que puedan atrapar electrones, huecos o excitones (un complejo formado por un electrón de la banda de conducción unido electrostáticamente a un hueco de la banda de valencia).

Los QD se pueden obtener de diferentes formas: i) como fluctuaciones locales de espesor en pozos cuánticos (Zrenner, 1994); ii) como nanocristales semiconductores en soluciones acuosas (Rossetti, 1983); iii) QD coloidales sintetizados a partir de compuestos precursores disueltos en soluciones (Bawendi, 1990; Brus, 1991; Ponce y Rudamas, 2015; Alvarenga, 2015; Deodanes, 2020; Deodanes, 2021); iv) QD definidos electrostáticamente y formados por puertas eléctricas sobre un gas bidimensional de electrones (Kouwenhoven, 1991; Ciorga, 2000; Elzerman, 2004); v) QD modelados artificialmente mediante grabado y/o estructuración fotolitográfica del sustrato (Forchel, 1988) o vi) QD autoensamblados mediante deposición de vapor metal-orgánico o epitaxia de haces moleculares de materiales de diferente constante de red (Schaffer, 1983; Goldstein, 1985; Eaglesham, 1990; Leonard, 1993; Solomon, 1996; Rudamas, 2002a; Martínez, 2003; Rudamas 2002b).

Recientemente, en el año 2023, el premio Nobel de Química fue otorgado por el descubrimiento y desarrollo de los QD, lo que resalta la importancia que estas nanoestructuras tienen en múltiples aplicaciones científicas y tecnológicas (Nobel Prize, 2023).

Cuando el movimiento de los portadores de carga en un sólido se restringe en una capa de espesor del orden de la longitud de onda de De Broglie, los efectos cuánticos empiezan a ser apreciables en los estudios de estas estructuras. Recordando, la longitud de onda de De Broglie, λ , viene dada por la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{3m_e kT}} \quad (1)$$

Donde m_e representa la masa efectiva del portador de carga, T la temperatura y k la constante de Boltzmann. Considerando la masa efectiva de los portadores, los efectos cuánticos podrían observarse aproximadamente a espesores de capas del orden de 10 a 1000 veces la constante de red de los materiales semiconductores. Trabajando con estos tamaños,

se pueden preparar o sintetizar estructuras que permitan el estudio de efectos cuánticos que puedan ser usados para mejorar el rendimiento de dispositivos ya existentes en el mercado, como por ejemplo láseres de pozo cuántico, diodos emisores de luz (LEDs: Light Emitting Diodes), moduladores basados en el efecto Stark cuántico, celdas solares, etcétera.

Dependiendo del grado de confinamiento de los portadores de carga, las estructuras cuánticas se clasifican en estructuras bidimensionales (2D), unidimensionales (1D) y cero-dimensionales (0D). El pozo cuántico es el ejemplo más simple de las estructuras con confinamiento cuántico cuasi-2D. Este consiste en una capa fina de un material semiconductor incrustado entre dos capas de otro material con una anchura de banda prohibida (conocida comúnmente en inglés como band gap) más grande, formando así un desalineamiento de bandas. De esta forma, los portadores de carga se confinan en el material con menor anchura de banda prohibida. El correspondiente desalineamiento de las bandas se ilustra esquemáticamente en la Figura 1.

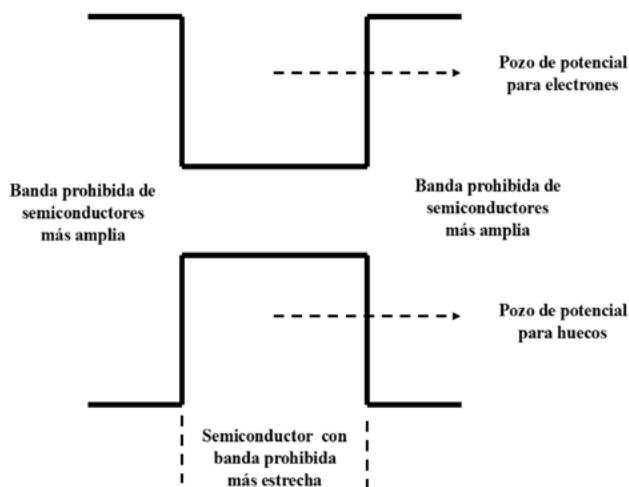


Figura 1. Desalineamiento de bandas en una estructura de pozo cuántico

La capa con menor anchura de banda prohibida se comporta como un pozo de potencial tanto para electrones como para los huecos, mientras

que las capas del material con anchura de banda prohibida mayor se comportan como barreras de potencial para los portadores de carga confinados en el pozo. Una forma de obtener estructuras cuánticas semiconductoras de más baja dimensión, como los llamados hilos cuánticos (estructuras 1D conocidas en inglés como quantum wires, QWires) y QDs (estructuras 0D), sería diseñarlas a partir de las estructuras cuasi-2D, utilizando para ello técnicas litográficas. La precisión de estas técnicas alcanza ≈ 10 nm. (Weisbuch, 1991). Sin embargo, el daño que se le produce con el procedimiento de lavado químico en superficie (conocido comúnmente en inglés como etching) afecta dramáticamente las propiedades ópticas y electrónicas de la estructura. Entre las consecuencias del daño debido al lavado químico están la disminución de portadores (conocida comúnmente en inglés como carrier depletion), especialmente para tamaños menores de 100 nm en QWs y QDs, la disminución de la eficiencia en la luminiscencia debido a gran cantidad de defectos que se producen, que aumentan la recombinación no radiativa. En este trabajo no se profundizará más en la litografía, pero Bimberg y colaboradores (1999) hacen una discusión detallada acerca de estos métodos litográficos. Otro método de fabricación de estructuras semiconductoras cuánticas cuasi-1D y 0D es la formación de estas, causada por fluctuaciones interfaciales que se producen en una heteroestructura, las cuales crean a su vez fluctuaciones de potencial que forman centros de localización de portadores de carga muy eficientes que pueden interpretarse como puntos cuánticos preparados de forma natural. Estas están caracterizadas por energías de localización pequeñas, gran inhomogeneidad en tamaños y una relativamente pequeña densidad de estados (Bimberg, 1999).

La autoorganización es otro de los métodos de crecimiento de estructuras cuánticas 1D y 0D. Cuando las constantes de red del sustrato y del material depositado sobre él difieren considerablemente (por ejemplo, entre GaAs e InAs, difieren un 7 %), solamente la primera monocapa del material cristaliza epitaxialmente y tensionada debido a la diferente constante de red del sustrato. Cuando se sobrepasa el conocido como espesor crítico, la situación de estrés conduce a un rompimiento del crecimiento de una estructura ordenada y a la creación espontánea de islas de forma regular y tamaños similares distribuidas aleatoriamente. La forma y el tamaño dependen, en general, principalmente de factores

como la situación de estrés presente en la heteroestructura, la temperatura y la razón de crecimiento. Esta transición de fase de una estructura epitaxial al ordenamiento aleatorio de islas es conocida como transición Stranski-Krastanow. Las estructuras formadas mediante esta transición de fase son conocidas como estructuras autoorganizadas o autoensambladas. Entre las ventajas de este método de crecimiento se pueden mencionar los tamaños tan pequeños que se pueden alcanzar (< 30 nm), la homogeneidad en forma y tamaños junto a una perfecta estructura cristalina de las estructuras crecidas. A esto cabe añadir lo relativamente fácil del proceso de crecimiento, sin la necesidad de recurrir a procesos litográficos complejos. Este método de formación de islas coherentes (es decir, islas libres de defectos), está siendo explotado en la actualidad para el crecimiento de nanoestructuras.

Los QD también se han sintetizado utilizando métodos coloidales. En estos métodos, generalmente se emplean solventes, precursores y surfactantes orgánicos. A menudo, esta síntesis se lleva a cabo en una atmósfera inerte, a una temperatura de reacción superior a la requerida para que el precursor se convierta en monómero, es decir, átomos activos y especies moleculares. Este proceso se denomina nucleación. Posteriormente, los monómeros se transforman en nanocristales que continúan creciendo, dependiendo, entre otros factores, de la cantidad de surfactantes superficiales (Murray, 2000; Farkhani 2014; Bawendi, 1990).

Estructura de bandas y densidad de estados en estructuras cuánticas

En el caso de un pozo de potencial con barreras finitas, el problema de encontrar las energías que pueden tener los portadores de carga es relativamente fácil de resolver. Esto requiere que se asuman ciertas condiciones de frontera para su resolución. La primera condición es obvia: la función de onda debe ser continua en las interfaces. La segunda condición necesaria para resolver la ecuación (de segundo orden) de Schrödinger no parece tan obvia, ya que no se puede suponer que la derivada de la función de onda sea continua debido a que las masas efectivas son diferentes a los dos lados de la interfaz y esta condición no conservaría el flujo de partículas a través de esta. Sin embargo, realizando algunas

consideraciones se puede resolver el problema gráficamente, de una manera muy sencilla. Las soluciones se muestran esquemáticamente en la Figura 2. Es evidente que las energías permitidas que los portadores de carga pueden tener dejan de formar una banda de energías, como las bandas de energía que se obtienen en el caso de estructuras 3D. Por el contrario, las energías permitidas son discretas, como se puede apreciar en la Figura 2.

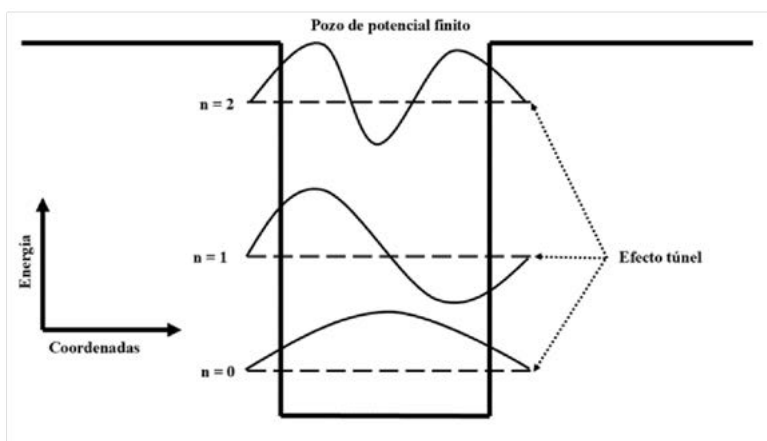
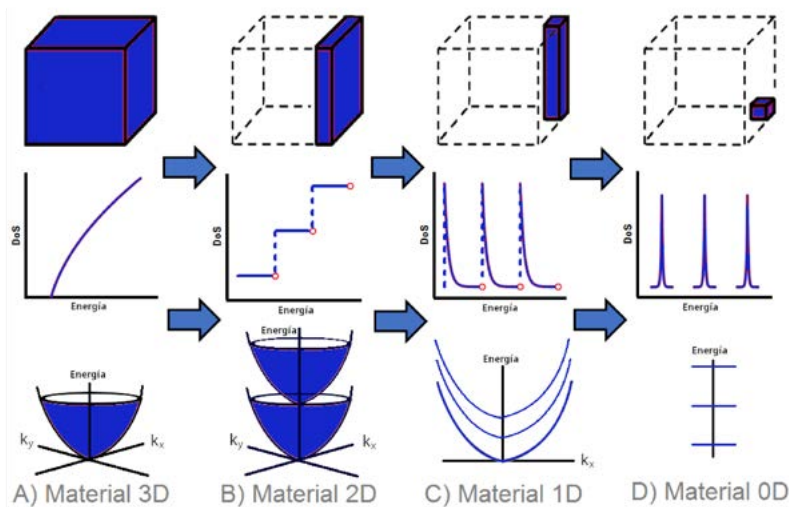


Figura 2. Diagrama de un pozo potencial con barreras finitas. Se muestran esquemáticamente los primeros dos estados energéticos junto a su correspondiente función de onda, las cuales penetran la barrera

Así como la energía en estructuras 2D, la densidad de estados (DOS: Density Of States) también sufre cambios (la DOS se podría definir como el número existente de estados por cada intervalo de energía). En el plano k_x k_y el movimiento es libre y es de esperar que la DOS no se vea afectada, pero el movimiento en la dirección de crecimiento está restringido debido al confinamiento espacial, lo que produce que k_z tome solo ciertos valores, es decir, está cuantizado. La DOS se puede describir como una función escalón, muy diferente a la DOS en el caso 3D. Los resultados para la densidad de estados en estructuras 3D y 2D se muestran esquemáticamente en la Figura 3. El cálculo de la DOS no se discute, ya que no es el objetivo de este trabajo.

Figura 3. Esquemas de los estados energéticos y la correspondiente DOS para estructuras semiconductoras 3D en A), 2D en B), 1D en C) y 0D en D)



Si ahora el confinamiento se reduce a una dimensión (hilos cuánticos), basta con considerar, en una aproximación muy simple al problema, que la longitud L_y en una estructura de pozo cuántico se vuelve muy pequeña. Entonces cabe esperar efectos de cuantización también en la dirección y . Solamente en la dirección x el movimiento de los electrones se mantiene libre. Los resultados para las energías y la DOS para hilos cuánticos también se pueden observar en la Figura 3, que evidencian un gran cambio si se compara con estructuras 3D y 2D.

En el caso de un confinamiento en las tres direcciones (QDs), una de las formas de tratar el problema es considerar que, debido a la reducción de la dimensión x , la interacción electrón-hueco no se puede despreciar y debe incluirse en la solución del problema. Por ejemplo, con un potencial de forma esférica. Los resultados para este caso también se muestran en la Figura 3. Es claro que los estados energéticos en QDs tampoco forman bandas. Estos estados se asemejan a los de un átomo, por lo que los QDs también se conocen como “átomos artificiales” (Yi, 2016). Este hecho tiene enormes consecuencias sobre la DOS, que también se observa en la Figura 3.

Es importante aclarar que el cálculo de las energías y la DOS es un poco diferente para electrones y huecos. El cálculo de los estados de energía de los huecos se vuelve un poco complicado debido a que no se puede obviar la interacción de las diferentes bandas de valencia.

Propiedades de absorción y emisión de los puntos cuánticos.

En nuestro grupo se han estudiado en los últimos años puntos cuánticos coloidales (CQD) debido a la amplia gama de aplicaciones que tienen en sistemas de bioimagen, láseres, LEDs y dispositivos fotovoltaicos (Alvarenga, 2018; Pleitez, 2021; Ponce, 2015; Deodanes 2020; Deodanes 2021). Algunas de las ventajas del uso de los CQD son su relativamente fácil proceso de síntesis y la sencilla sintonización de su emisión. Esta última está directamente relacionada con el tamaño de los QD y se explica por el efecto de confinamiento cuántico. En la Figura 4, se pueden observar espectros de absorción de QD de tamaños comprendidos entre 2.00 y 4.09 nm aproximadamente. El efecto de confinamiento cuántico se observa aquí como un desplazamiento al rojo de la absorción del borde de banda cuando aumenta el tamaño de los QD.

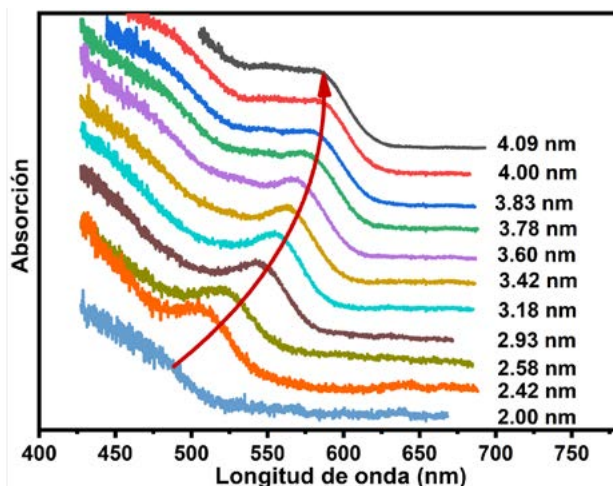


Figura 4. Espectros de absorción de QDs de CdSe con diferentes tamaños.
Nota. Elaboración propia con datos de Pleitez (2021).

La Figura 5 muestra los espectros de fotoluminiscencia (PL: photoluminescence) de las mismas muestras sintetizadas. Se observan claramente dos bandas de emisión, especialmente para los QD pequeños. La banda a energías más altas está asociada a la emisión del borde de banda, mientras que la banda ancha a energías más bajas tiene su origen en la recombinación de portadores de carga atrapados en defectos superficiales (Pleitez, 2021). También se observa un desplazamiento hacia el rojo de la emisión de borde de banda cuando aumenta el tamaño del QD. Adicionalmente, observamos una disminución de la emisión de la banda de defectos superficiales para tamaños de QD mayores. Esto podría entenderse teniendo en cuenta la disminución de la razón superficie-volumen con el aumento del tamaño de los QD. La relación superficie-volumen es inversamente proporcional al tamaño de los QD, lo que significa que en los QD más pequeños hay una mayor proporción de átomos superficiales, en relación con el número total de átomos en la estructura (Alvarenga, 2018).

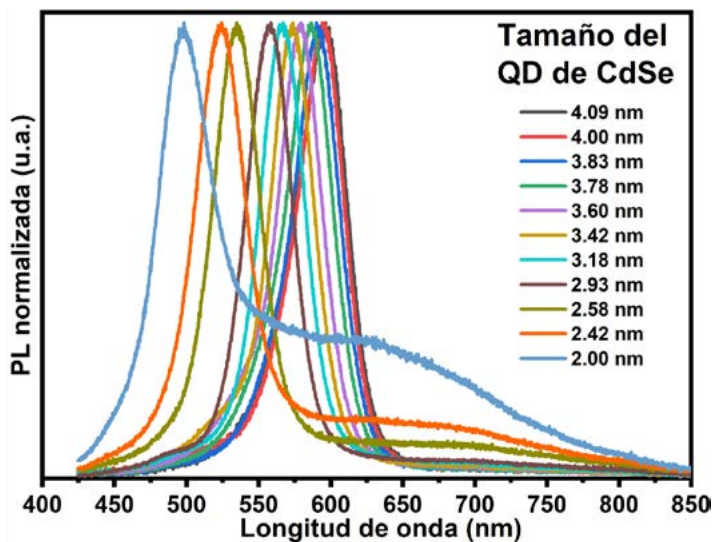


Figura 5. Espectros de PL normalizados al máximo del borde de banda para diferentes tamaños de QD de CdSe. Elaboración propia con datos de Pleitez (2021)

En estas nanoestructuras, las interacciones superficiales desempeñan uno de los papeles más importantes en lo que respecta al rendimiento de sus

propiedades optoelectrónicas. Durante el proceso de síntesis se utilizan ligandos de cadena larga como la trioctilfosfina (TOP). Estas cadenas largas son capaces de dar estabilidad coloidal y asegurar la formación de los QDs. Sin embargo, estas cadenas largas podrían ir en contra de un transporte eficiente de portadores (Pleitez, 2021; Alvarenga, 2018). En este trabajo no se profundizará en el tema y se refiere al lector a las referencias bibliográficas citadas en esta sección.

Algunas aplicaciones en energías renovables y medioambiente

Actualmente, hay un gran interés en fomentar tecnologías que disminuyan el impacto ambiental generado por la quema de combustibles fósiles. En particular, la energía fotovoltaica es una de las mejores alternativas al uso de recursos petrolíferos, esto debido a que la luz solar es el recurso renovable más asequible y abundante hasta la fecha (Sargent, 2012). La tecnología solar fotovoltaica es una de las mejores formas de utilizar la energía solar para generar electricidad con celdas solares. Sin embargo, la industria de energía solar ha llevado las eficiencias de las celdas solares convencionales (basadas en silicio y en película delgada) cerca de sus límites prácticos, dicha eficiencia máxima teórica es conocida como límite de Shockley-Queisser y es de alrededor del 33.7 % (Malgras, 2017).

La versatilidad y las propiedades físicas únicas de los QD tienen el potencial de revolucionar diversas tecnologías, especialmente en el ámbito de la energía solar (Bera, 2010). Una de sus características más notables es su capacidad para sintonizar el máximo de absorción, lo que les permite captar de manera eficiente diferentes regiones del espectro solar mediante un ajuste preciso de su tamaño. Además, en materiales convencionales, los portadores de carga generados por fotones de alta energía suelen perder rápidamente su exceso de energía en forma de calor debido a interacciones con la red cristalina. En contraste, los QD presentan propiedades que pueden mitigar estas pérdidas, incrementando significativamente la eficiencia energética de los dispositivos. Esto lo logran al recolectar estos portadores calientes (conocidos comúnmente en inglés como *hot carriers*) antes que se relajen, utilizando su alta energía para generar mayor voltaje o realizar procesos adicionales, lo

que incrementa la eficiencia del dispositivo. Otro mecanismo clave es la generación múltiple de excitones (MEG: Multiple Exciton Generation), que permite que un solo fotón de alta energía genere múltiples pares electrón-hueco. En las celdas solares convencionales, solo se produce un excitón por fotón absorbido, lo que limita la corriente generada. Sin embargo, los QD pueden dividir la energía de un fotón en varios excitones, maximizando la extracción de energía de cada fotón y aumentando significativamente la corriente eléctrica generada por la celda, proceso representado en la figura 6. Este fenómeno es particularmente efectivo para aprovechar la porción de alta energía del espectro solar que, en las tecnologías actuales, se desperdicia como calor (Semonin, 2012).

De acuerdo con cálculos realizados por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL: National Renewable Energy Laboratory), las celdas solares con QD podrían alcanzar una eficiencia superior al 66 %, lo que representa más del doble del límite teórico de Shockley-Queisser (Solar, 2013). No obstante, aún se deben realizar múltiples estudios para aprovechar todos estos fenómenos y con ello mejorar la eficiencia de las celdas solares actuales.

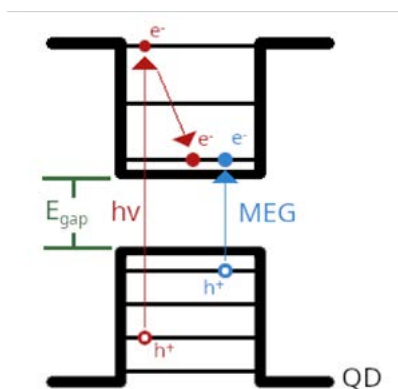


Figura 6. *Termalización de portadores calientes en un QD que se describe cualitativamente con un modelo de pozo cuántico. Elaboración propia con ideas tomadas de Nozik (2009)*

Adicionalmente, gracias a las excepcionales propiedades de emisión de los QD, estos se emplean como materiales luminiscentes en dispositivos

LEDs, los cuales son capaces de reducir significativamente el consumo energético debido a su baja frecuencia de umbral. (Deodanes, 2020; Deodanes, 2021). Estos últimos sistemas pueden ser desarrollados usando el enfoque de electroluminiscencia o conversión descendente. La electroluminiscencia ocurre cuando una corriente eléctrica atraviesa un material, generando principalmente recombinaciones radiativas, responsables de la emisión de luz. Por otro lado, el enfoque de conversión descendente, consiste en utilizar materiales luminiscentes para transformar la luz de alta energía (longitud de onda corta), como la ultravioleta, en luz de menor energía (longitud de onda larga), como la visible (Deodanes, 2020; Deodanes, 2021).

Las baterías de estado sólido son otras de las aplicaciones en la que los QD están siendo utilizados. Hoy en día, estas baterías tienen algunas limitantes, tales como su alta impedancia que afecta su eficiencia, las reacciones no deseadas entre superficies y problemas en la interfaz entre el electrolito sólido y los electrodos que pueden comprometer su rendimiento y su durabilidad. Es aquí donde los QD pueden utilizarse en los electrodos de la batería para mejorar su capacidad y densidad de energía, si se añaden al electrolito, aumenta su conductividad iónica y si se implementan en los separadores pueden optimizar el camino de transmisión iónica y su tasa de conducción (Xu, 2022).

Consideraciones finales

En este trabajo se han presentado brevemente algunas de las propiedades ópticas y electrónicas de los QD. Algo muy importante es que estas propiedades podrían permitir la mejora en el funcionamiento de algunos dispositivos optoelectrónicos, como las celdas solares, en las que el uso de los QD podría incrementar significativamente su eficiencia y, al mismo tiempo, disminuir la cantidad de material tóxico en los paneles solares, contribuyendo así a disminuir la contaminación ambiental cuando estos son desechados (Rudamas, 2024). Es importante mencionar que en nuestro grupo, como en muchos otros en el mundo, ya se está trabajando en la síntesis y caracterización de CQD con materiales basados en carbono, como una alternativa aún más amigable con el medioambiente (Cuadra, 2018; Cuadra, 2020; Rudamas, 2023; Rudamas, 2024).

Los QD también pueden jugar un papel muy importante en la construcción de baterías amigables con el medioambiente que podrían revolucionar el almacenamiento de energía. Además, se pueden usar en la fabricación de LEDS para luminarias de estado sólido que contribuirían a una disminución del consumo de energía. Si pensamos que la generación de energía por la quema de combustibles fósiles todavía predomina en el mundo, el uso de los QD en luminarias de estado sólido contribuiría a una menor contaminación ambiental.

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Investigaciones Científicas de la Universidad de El Salvador (SIC-UES) por el financiamiento parcial de este trabajo bajo los proyectos 05.31, 06.18, 09.19 y 09.20. Se agradece también a CSUCA-IDRC por financiar parcialmente este trabajo bajo el proyecto 50-ES. Se agradece al Lic. David Pleitez y al Dr. David Valenzuela por las fructíferas discusiones y poner a disposición algunos resultados de sus investigaciones.

Referencias

- Alvarenga, S., Ponce, H., Oliva, I. G. y Rudamas, C. (2018). *Changes on the Stokes shift in large CdSe colloidal quantum dots by a ligand exchange*. Proceedings of the 2nd International Conference of Theoretical and Applied Nanoscience and Nanotechnology (TANN'18). <https://doi.org/10.11159/tann18.140>
- Bawendi, M. G., Steigerwald, M. L. y Brus, L. E. (1990). The quantum mechanics of larger semiconductor clusters ("quantum dots"). *Annual Review of Physical Chemistry*, 41(1), 477-496. <https://doi.org/10.1146/annurev.pc.41.100190.002401>
- Bera, D., Qian, L., Tseng, T. K. y Holloway, P. H. (2010). *Quantum dots and their multimodal applications: a review*. *Materials*, 3(4), 2260-2345. <https://doi.org/10.3390/ma3042260>
- Bimberg, D., Grundmann, M. y Ledentsov, N. N. (1999). *Quantum dot heterostructures*. John Wiley & Sons. [https://doi.org/10.1016/s0026-2692\(99\)00093-2](https://doi.org/10.1016/s0026-2692(99)00093-2)

- Brus, L. (1991). Quantum crystallites and nonlinear optics. *Applied Physics A*, 53, 465-474. <https://doi.org/10.1007/bf00331535>
- Ciorga, M., Sachrajda, A. S., Hawrylak, P., Gould, C., Zawadzki, P., Jullian, S. y Wasilewski, Z. (2000). Addition spectrum of a lateral dot from Coulomb and spin-blockade spectroscopy. *Physical Review B*, 61(24), R16315. <https://doi.org/10.1103/physrevb.61.r16315>
- Cuadra, J., Ponce, H. y Rudamas, C. (2018). *Optical properties of graphene carbon quantum dots for solar cells applications*. In 2018 IEEE 38th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVIII). IEEE. <https://doi.org/10.1109/concapan.2018.8596611>
- Cuadra, J., Ponce, H. y Rudamas, C. (2020). Interlayer transition in graphene carbon quantum dots. *MRS Advances*, 5(63), 3345-3352. <https://doi.org/10.1557/adv.2020.410>
- Deodanes, O., Cuadra, J., Ponce, H., Molina, J. C., Pleitez, D., Violantes, C. y Rudamas, C. (2021). White light emitting diode prototypes based on cadmium sulfide and graphene carbon quantum dots. *Revista Comunicaciones Científicas Y Tecnológicas*, 6(1), 15. <https://revistas.ues.edu.sv/index.php/comunicaciones/article/view/2133>
- Deodanes, O., Molina, J. C., Violantes, C., Pleitez, D., Cuadra, J., Ponce, H. y Rudamas, C. (2020). *White Light Emitting CdS Quantum Dot Devices Coated with Layers of Graphene Carbon Quantum Dots*. *MRS Advances*, 5(63), 3337-3343. <https://doi.org/10.1557/adv.2020.436>
- Eaglesham, D. J. y Cerullo, M. (1990). Dislocation-free Stranski-Krastanow growth of Ge on Si (100). *Physical Review Letters*, 64(16), 1943. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.64.1943>
- Ekimov, A. (1981). Quantum size effect in three-dimensional microscopic semiconductor crystals. *JETP Letters*, 34, 345. <https://doi.org/10.1134/s0021364023130040>
- Elzerman, J. M., Hanson, R., Willems van Beveren, L. H., Witkamp, B., Vandersypen, L. M. K. y Kouwenhoven, L. P. (2004). Single-shot read-out of an individual electron spin in a quantum dot. *Nature*, 430(6998), 431-435. <https://doi.org/10.1038/nature02693>
- Forchel, A., Leier, H., Maile, B. E. y Germann, R. (1988). *Fabrication and optical spectroscopy of ultra-small III-V compound semiconductor structures*. In Festkörperprobleme 28: Plenary Lectures of the 52nd

- Annual Meeting of the German Physical Society (DPG) (pp. 99-119). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/bfb0107850>
- Goldstein, L., Glas, F., Marzin, J. Y., Charasse, M. N. y Le Roux, G. (1985). Growth by molecular beam epitaxy and characterization of InAs/GaAs strained-layer superlattices. *Applied Physics Letters*, 47(10), 1099-1101. <https://doi.org/10.1063/1.96342>
- Kouwenhoven, L. P., Johnson, A. T., Van der Vaart, N. C., Harmans, C. J. P. M. y Foxon, C. T. (1991). Quantized current in a quantum-dot turnstile using oscillating tunnel barriers. *Physical Review Letters*, 67(12), 1626. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.67.1626>
- Leonard, D., Krishnamurthy, M., Reaves, C., DenBaars, S. P. y Petroff, P. M. (1993). Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces. *Applied Physics Letters*, 63(23), 3203-3205. <https://doi.org/10.1063/1.110199>
- Malgras, V., Nattestad, A., Kim, J. H., Dou, S. X. y Yamauchi, Y. (2017). Understanding chemically processed solar cells based on quantum dots. *Science and Technology of advanced MaTeRialS*, 18(1), 334-350. <https://doi.org/10.1080/14686996.2017.1317219>
- Martinez-Pastor, J., Alén, B., Rudamas, C., Roussignol, P., García, J. M. y González, L. (2003). Vertical stacks of small InAs/GaAs self-assembled dots: resonant and non-resonant excitation. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 17, 46-49. [https://doi.org/10.1016/S1386-9477\(02\)00734-8](https://doi.org/10.1016/S1386-9477(02)00734-8)
- Murray, C. B., Kagan, C. R. y Bawendi, M. G. (2000). Synthesis and characterization of monodisperse nanocrystals and close-packed nanocrystal assemblies. *Annual Review of Materials Science*, 30(1), 545-610. <https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.30.1.545>
- Mussa Farkhani, S. y Valizadeh, A. (2014). Three synthesis methods of CdX (X = Se, S or Te) quantum dots. *IET Nanobiotechnology*, 8(2), 59-76. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2012.0028>
- Nobel Prize. (2023). *The Nobel Prize in Chemistry 2023*. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2023/summary/>
- Nozik, A. J., Beard, M. C., Luther, J. M., Law, M., Ellingson, R. J. y Johnson, J. C. (2010). Semiconductor quantum dots and quantum dot arrays and applications of multiple exciton generation to third-genera-

- tion photovoltaic solar cells. *Chemical reviews*, 110(11), 6873-6890. <https://doi.org/10.1021/cr900289f>
- Pleitez, D. A. R. (2021). *Estudio del origen y propiedades de las bandas de emisión y absorción en puntos cuánticos coloidales de seleniuro de cadmio* (Tesis de licenciatura). Universidad de El Salvador. <https://repositorio.ues.edu.sv/items/97f5cc15-0d16-4810-a67d-a76767d0adb2>
- Ponce, H. y Rudamas, C. (2015). Caracterización óptica de defectos superficiales en puntos cuánticos coloidales de Seleniuro de Cadmio (CdSe). *Matéria (Rio de Janeiro)*, 20, 676-681. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620150003.0070>
- Rossetti, R., Nakahara, S. y Brus, L. E. (1983). Quantum size effects in the redox potentials, resonance Raman spectra, and electronic spectra of CdS crystallites in aqueous solution. *The Journal of Chemical Physics*, 79(2), 1086-1088. <https://doi.org/10.1063/1.445834>
- Rudamas, C., Cuadra, J., Deodanes, O., Cisneros, N., Estrada, R. y Ponce, H. (2024). Caracterización óptica de puntos cuánticos de carbono y grafeno para la transición energética. En F. E. Navarrete Báez (Coord.), *Las energías renovables y la transición energética justa* (1.^a ed., pp. 21–33). Ave Editorial. https://www.researchgate.net/publication/387173977_Las_energias_renovables_y_la_transicion_energetica_justa
- Rudamas, C., Cuadra, J., Deodanes, O., Cisneros, N., Ponce, H. y Molina, J. C. (2023). Nanoestructuras para aplicaciones amigables con el medio ambiente. En F. E. Navarrete Báez (Coord.), *Latinoamérica ante el desafío de las energías renovables* (1.^a ed., pp. 77–91). Ave Editorial. https://www.researchgate.net/publication/387173977_Las_energias_renovables_y_la_transicion_energetica_justa
- Rudamas, C., Martínez-Pastor, J., García-Cristóbal, A., Roussignol, P., García, J. M. y González, L. (2002). Carrier Recombination in InAs/GaAs Self-Assembled Quantum Dots under Resonant Excitation Conditions. *physica status solidi (a)*, 190(2), 583-587. [https://doi.org/10.1002/1521-396X\(200204\)190:2%3C583::AID-PSSA583%3E3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1521-396X(200204)190:2%3C583::AID-PSSA583%3E3.0.CO;2-8)
- Rudamas, C., Martínez-Pastor, J., García-Cristóbal, A., Roussignol, P., García, J. M. y Gonzalez, L. (2002). Influence of the InAs covera-

- ge on the phonon-assisted recombination in InAs/GaAs quantum dots. *Surface Science*, 507, 624-629. [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(02\)01326-2](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(02)01326-2)
- Sargent, E. H. (2012). Colloidal quantum dot solar cells. *Nature photonics*, 6(3), 133-135. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.33>
- Schaffer, W. J., Lind, M. D., Kowalczyk, S. P. y Grant, R. W. (1983). Nucleation and strain relaxation at the InAs/GaAs (100) heterojunction. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1(3), 688-695. <https://doi.org/10.1116/1.582579>
- Semonin, O. E., Luther, J. M. y Beard, M. C. (2012). Quantum dots for next-generation photovoltaics. *Materials today*, 15(11), 508-515. [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(12\)70220-1](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(12)70220-1)
- Solar, I. I. (2013). Quantum Dots Promise to Significantly Boost Solar Cell Efficiencies. *Natl. Renew. Energy Lab*. <https://doi.org/10.2172/1090155>
- Solomon, G. S., Trezza, J. A., Marshall, A. F. y Harris Jr, J. S. (1996). Vertically aligned and electronically coupled growth-induced InAs islands in GaAs. *Physical Review Letters*, 76(6), 952. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.76.952>
- Weisbuch, C. y Vinter, B. (2014). *Quantum semiconductor structures: Fundamentals and applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-051557-1.50009-3>
- Xu, Q., Niu, Y., Li, J., Yang, Z., Gao, J., Ding, L. y Xu, C. (2022). Recent progress of quantum dots for energy storage applications. *Carbon Neutrality*, 1(1), 13. <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00002-y>
- Yi, L. (2016). Application of quantum dots as down conversion materials in white LED. *International Journal of Engineering Inventions*, 6, 7-12. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:212534231>
- Zrenner, A., Butov, L. V., Hagn, M., Abstreiter, G., Böhm, G. y Weimann, G. (1994). Quantum dots formed by interface fluctuations in AlAs/GaAs coupled quantum well structures. *Physical Review Letters*, 72(21), 3382. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.72.3382>