Revista CIENCIA EN REVOLUCIÓN

Vásquez–C. et al., Vol. 5, Nº 14, 1–6, abril, 2019.

Dissemination Article: From Nanotechnology to Quantum Dots, Photoluminescence Dependent on Particle Size

Luis Vásquez–Coraspe, Samuel Villanueva,* Magaly Henríquez
Gerencia de Proyectos de Investigación, Desarrollo e Innnovación,
Centro Nacional de Tecnología Química, Caracas, Venezuela.

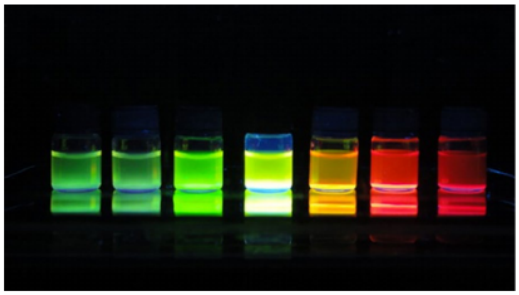
Summary

Nanotechnology consists in the synthesis and manipulation of structures in nanoscopic scale ($1-100$ nm), allowing in this way the elaboration of materials with unique properties. Such is the case of *Quantum Dots*, which are nanocrystals of semiconductor materials that makes it possible the absorption and emission of electromagnetic radiation with wavelengths controllable by the manipulation of the size of these nanoparticles. In this way, with the same material, different types of electromagnetic responses can be obtained, which have important applications that range from the development of more efficient solar cells to the detection of cancer cells.
Keywords: Nanotechnology; New Materials; Optoelectronics; Quantum Dots.

Artículo de divulgación: De la nanotecnología a los puntos cuánticos, fotoluminiscencia dependiente del tamaño de partícula

Resumen

La nanotecnología consiste en la síntesis y manipulación de estructuras en la escala nanoscópica ($1-100$ nm), permitiendo de este modo la elaboración de materiales con propiedades únicas. Tal es el caso de los *Puntos Cuánticos*, que son nanocristales de materiales semiconductores que posibilitan la absorción y la emisión de radiación electromagnética con longitudes de onda controlables mediante la manipulación del tamaño de estas nanopartículas. De este modo, con un mismo material, se pueden obtener diversos tipos de respuestas electromagnéticas lo cual encuentra importantes aplicaciones que abarcan desde la elaboración de celdas solares más eficientes a la detección de células cancerígenas.
Palabras claves: Nanotecnología; Nuevos Materiales; Optoelectrónica; Puntos Cuánticos.



Fotoluminiscencia de Puntos Cuánticos [1]

La nanotecnología representa un novedoso paradigma científico que brinda la posibilidad de diseñar

*Autor para correspondencia: S. Villanueva e–mail: publicacionesgpidi.cntq@gmail.com

materiales con propiedades únicas que encuentran aplicaciones en las más diversas áreas de la ingeniería y la tecnología. Se considera nanotecnología a la capacidad de diseñar, manipular y fabricar materiales y dispositivos a escalas que van de 1 a 100 nanómetros siendo un nanómetro la mil millonésima parte de un metro 1 nm = 10^{-9} m.

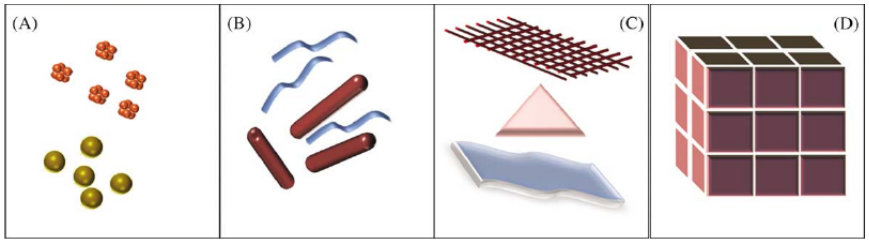


Figura 1: Representación esquemática de nanoestructuras según su dimensionalidad: A) Nanopartículas, fullerenos y clusters 0D. B) Nanotubos, nano–fibras y nano–barras 1D. C) Nano-películas 2D. D) Policristales y nanomateriales 3D [2].

Una manera de clasificar los nanomateriales es de acuerdo a la cantidad de dimensiones que poseen confinadas en la escala nanométrica (Figura 1).

Los nanomateriales 3D son aquellos cuya estructura interna es nanoestructurada, aunque el material no tenga ninguna de sus dimensiones confinadas en la escala nanoscópica, como por ejemplo los policristales. Por otra parte, los materiales con una sola dimensión restringida entre 1 y 100 nanómetros son clasificados como materiales 2D como el grafeno y siliceno por ejemplo. Luego, materiales con dos de sus dimensiones en la nanoescala son clasificados como 1D, como por ejemplo los nanowires (nanocables) y los nanotubos. Finalmente los materiales con sus 3 dimensiones restringidas a longitudes entre 1 y 100 nanómetros son consideradas estructuras 0D, naturalmente esto no implican que no posean ninguna dimensión, siguen siendo estructuras tridimensionales sólo que sus tres dimensiones se encuentran circunscritas a la nanoescala, como ejemplo de estas estructuras tenemos las nanopartículas, los fullerenos y los puntos cuánticos [3].

1. Los Materiales y la nano-escala

Los materiales en la nanoescala exhiben propiedades muy diferentes a las presentadas por sus contrapartes macroscópicas, a esas dimensiones por ejemplo se incrementa drásticamente la relación superficie/volumen, por lo tanto, al haber expuesta una mayor superficie, aumenta la probabilidad de contacto de centros reactivos lo cual favorece enormemente la reactividad de ciertos materiales, esta característica de los nanomateriales encuentra importantes aplicaciones en el área de catálisis.

Adicionalmente a esta escala nos encontramos en un umbral donde los fenómenos cuánticos deben ser tomados en consideración. Tal es el caso de los nanocristales de materiales semiconductores o puntos cuánticos, los cuales son nanoestructuras 0D con propiedades de fotoluminiscencia que se pueden manipular directamente controlando las dimensiones del material. Estas propiedades se desprenden directamente de fenómenos cuánticos [4].

2. De los Semiconductores a los Puntos Cuánticos

Los semiconductores por su arreglo periódico de átomos presentan una estructura de bandas, donde se tiene una banda de conducción, una banda de valencia y una banda prohibida en la cual no hay probabilidades de encontrar ningún electrón. Si un electrón de la banda de conducción absorbe la cantidad apropiada de energía, es promovido a la banda de conducción, dejando tras de sí un 'vacío" de carga negativa en la banda de valencia llamado "hueco" que actúa como si fuese una carga positiva. Al par constituido por el electrón que ha pasado a la banda de conducción y al hueco que queda en la banda de valencia se le denomina "excitón".

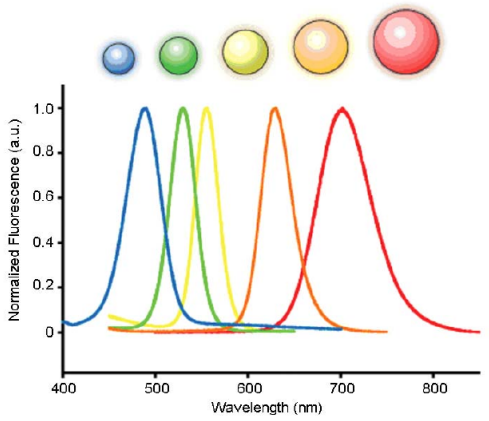


Figura 2: Dependencia de los efectos ópticos respecto al tamaño de los puntos cuánticos. [5].

Cuando se restringen todas las dimensiones de un cristal semiconductor a la nanoescala se limita de igual modo los estados posibles en los que se pueden encontrar los electrones del material, dando origen al fenómeno del confinamiento cuántico. Estos electrones pueden ser descritos por el modelo mecánico cuántico de "una partícula en una caja", generando a niveles discretos de energía en lugar de las bandas observadas en el material macroscópico, presentándose en el nanocristal una situación análoga a la que se tiene en los átomos individuales pero conservando la banda prohibida de los semiconductores. Estos niveles discretos de energía se hacen evidentes al resolver la ecuación de Schrödinger para el potencial cuadrado del modelo de una partícula en una caja. En la solución a dicha ecuación se obtienen niveles discretos de energía, donde se observa una dependencia inversamente proporcional entre la energía y la longitud física del material. De ese resultado, la absorción y la emisión de radiación ocurre a frecuencias que varían con la dimensión del punto cuántico, presentando un corrimiento al azul conforme este posee menores dimensiones y un corrimiento al rojo para nanocristales de mayor tamaño [6], tal como se observa en la Figura 2.

3. Aplicaciones de los Puntos Cuánticos

La capacidad de poder obtener diferentes propiedades fotoluminiscentes con un mismo material, solo manipulando las dimensiones que este posea abre la posibilidad para una gran cantidad de aplicaciones. Usualmente se requiere de compuestos químicos diferentes para obtener diversas coloraciones, sin embargo con los puntos cuánticos se puede obtener todas esas coloraciones manipulando durante la síntesis las dimensiones de un solo material.

Los puntos cuánticos se pueden emplear para la elaboración de celdas fotovoltaicas mucho más eficientes, que pueden operar con fotones de distintas longitudes de onda (celdas solares tandem) mediante el empleo de puntos cuánticos de diversas dimensiones. Adicionalmente, las celdas solares basadas en puntos cuánticos son menos susceptibles que las tradicionales a las pérdidas por calor ocasionadas por los modos vibracionales fonónicos, esto es debido al carácter discreto de los niveles de energía presentado por los nanocristales. Finalmente, las celdas fotovoltaicas de puntos cuánticos permiten la emisión

múltiple de excitones posibilitando el aprovechamiento de fotones que en celdas solares tradicionales no serían aprovechables por poseer energías superiores a la diferencia entre la banda de valencia y la de conducción. Otra ventaja es que mediante la utilización de puntos cuánticos se pueden desarrollar celdas termoeléctricas que aprovechen la emisión de los electrones térmicos, pudiendo funcionar solo con calor, sin requerir la radiación directa de la luz solar, permitiendo de este modo la producción de electricidad en días nublados e incluso durante las noches [7, 8].

Los puntos cuánticos actualmente son utilizados en la fabricación de monitores y de televisores de alta resolución debido a la calidad de color que se puede obtener combinando puntos cuánticos que emitan a las longitudes de onda del rojo, verde y azul [9, 10]. Del mismo modo se plantea su utilización para elaborar luminarias de alto rendimiento que permitan generar luz blanca de calidad e intensidad con un considerable ahorro energético [11].

Los puntos cuánticos también encuentran aplicaciones médicas y se pueden emplear para la detección de células cancerígenas. Para ello, estos nanocristales son funcionalizados con los grupos químicos apropiados que son combinados con las células afectadas, luego se aprovecha el carácter fotoluminiscente de estas nanopartículas para que actúen a manera de marcador biológico (Figura 3).

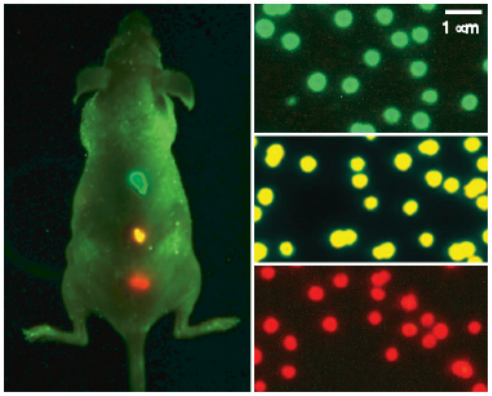


Figura 3: (Izquierda) Formación de imágenes en vivo de células cancerígenas con puntos cuánticos. (Derecha) Puntos cuánticos emitiendo en las longitudes de onda verdes amarillo y rojo. [12].

Adicionalmente estos materiales han sido empleados para elaborar supercristales, los cuales se pueden valer del efecto túnel entre puntos cuánticos adyacentes y del entrelazamiento cuántico de los electrones para fabricar memorias cuánticas y compuertas lógicas basadas en autómatas celulares, acercando la posibilidad de elaborar computadoras cuánticas que operen a altas temperaturas [13, 14, 15].

Estas nanopartículas se elaboran principalmente con materiales semiconductores de los grupos II y IV, siendo los puntos cuanticos de CdTe o SeTe los de mayor uso, sin embargo, considerando la toxicidad de estos compuestos se han comenzado a desarrollar puntos cuánticos de silicio, grafeno y carbono [16, 17, 18].

Al permitir estos nanocristales la elaboración de celdas solares de alta eficiencia, así como de monitores, lámparas y dispositivos optoelectrónicos que consumen menos energía, los puntos cuánticos se configuran como un prometedor material para el ahorro energético.

Referencias

[1] Hetao Chen, Yu Wang, Ton Wang, Dongxing Shi, Zengrong Sun, Chunhui Xia, and Baiqi Wang. Application prospective of nanoprobes with mri and fi dual-modality imaging on breast cancer stem cells in tumor. *Journal of Nanobiotechnology*, 14(52):1–10, 2016.

[2] Panikkanvalappil R. Sajanlal, Theruvakkattil S. Sreeprasad, Akshaya K. Samal, and Thalappil Pradeep. Anisotropic nanomaterials: structure, growth, assembly, and functions. *Nano Reviews*, 2:1–62, 2011.

[3] Jitendra N.Tiwari, Rajanish N.Tiwari, and Kwang S.Kim. Zero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices. *Progress in Materials Science*, 57(4):724–803, 2012.

[4] B. Zorman, M. V. Ramakrishna, and R. A. Friesner. Quantum confinement effects in cdse quantum dots. *The Journal of Physical Chemistry*, 99(19):7649–7653, 1995.

[5] Walkey C, Sykes E. A., and Chan W. C. Application of semiconductor and metal nanostructures in biology and medicine. *The American Society of Hematology*, pages 701–707, 2009.

[6] A. I. Onyia, H.I. Ikeri, and A. N. Nwobodo. Theoretical study of the quantum confinement effects on quantum dots using particle in a box model. *Journal of Ovonic Research*, 14(1):49–54, 2018.

[7] Georg Pucker, Enrico Serra, and Yoann Jestin. *Quantum Dots, A Variety of New Applications*, chapter Silicon Quantum Dots for Photovoltaics: A Review, pages 59–92. IntechOpen, Rijeka, Croacia, 2012.

[8] Kavita Surana, Gavin J. Conibeer, Fabrice Gourbilleau, Mauro Lombardo, Michel Bellet, Philippe Thony, Salvatore Lombardo, Daniel Bellet, P Rodríguez Mur, Rose-Marie CAPELLA, and Jean-René Lequepeys. Towards silicon quantum dot solar cells: Comparing morphological properties and conduction phenomena in si quantum dot single layers and multilayers. 2011.

[9] Yossef E. Panfil, Meirav Oded, and Uri Banin. Colloidal quantum nanostructures?: Emerging materials for display applications. *Angewandte Chemie*, 57(16):4274–4295, 2018.

[10] Zhenyue Luo, Daming Xu, and Shin-Tson Wu. Emerging quantum-dots-enhanced lcds. *Journal of Display Technology*, 10(7):526–539, 2014.

[11] Sung Ho Song, Min-Ho Jang, Jin Chung, Sung Hawn Jin, Bo Hyun Kim, Seung-Hyun Hur, Seunghyup Yoo, Yong-Hoon Cho, and Seokwoo Jeon. Highly efficient light-emitting diode of graphene quantum dots fabricated from graphite intercalation compounds. *Advanced Optical Materials*, 2(11):1016–1023, 2014.

[12] Xiaohu Gao, Yuanyuan Cui, Richard M Levenson, Leland W K Chung, and Shuming Nie. In vivo cancer targeting and imaging with semiconductor quantum dots. *Nature Biotechnology*, 22(8):969–976, 2004.

[13] Moein Kianpour, Reza Sabbaghi-Nadooshan, and Keivan Navi. A novel design of 8-bit adder / subtractor by quantum-dot cellular automata. *Journal of Computer and System Sciences*, 80(7):1404–1414, 2014.

[14] Bibhash Sen, Mrinal Goswami, Subhra Mazumdar, and Biplab K Sikdar. Towards modular design of reliable quantum-dot cellular automata logic circuit using multiplexers. *Computers & Electrical Engineering*, 45:42–54, 2015.

[15] Razieh Farazkish and Fatemeh Khodaparast. Design and characterization of a new fault-tolerant full-adder for quantum-dot cellular automata. *Microprocessors and Microsystems*, 39(6):426–433, 2015.

[16] L. Shcherbyna and T. Torchynska. Si quantum dot structures and their applications. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 51:65–70, 2013.

[17] Hanjun Sun, Li Wu, Weili Wei1, and Xiaogang Qu. Recent advances in graphene quantum dots for sensing. *Materialstoday*, 16(11):433–442, 2013.

[18] Sofia Paulo, Emilio Palomares, and Eugenia Martinez-Ferrero. Graphene and carbon quantum dot-based materials in photovoltaic devices: From synthesis to applications. *Nanomaterials*, 6(9):157–177, 2016.

