

Estudio teórico del efecto del tamaño de un punto cuántico cónico sobre la respuesta óptica lineal en el régimen Born-Markov

A. Portacio¹ and J. D. Arias H.²

¹ Departamento de Matemática y Física, Universidad de los Llanos, Km 12 Vía Puerto López, vereda Barcelona, Villavicencio-Colombia, aportacio@unillanos.edu.co,

² Departamento de Matemática y Física, Universidad de los Llanos, Km 12 Vía Puerto López, vereda Barcelona, Villavicencio-Colombia

Resumen En el presente trabajo se estudia el efecto del tamaño de un punto cuántico en forma de cono sobre la respuesta óptica lineal y el cambio de índice de refracción total para distintos valores del radio de la base (R) del cono. Se encontró que con el aumento de R la energía del fotón tiende al área de bajas energías, lo que permite concluir el aumento del confinamiento de la carga dentro del punto cuántico con la disminución del radio del cono.

Keywords: Respuesta óptica, Punto cuántico cónico, Teoría de sistemas cuánticos abiertos

1. Introducción

Los científicos empezaron a trabajar con puntos cuánticos QD en forma de cono o pirámide para lograr una mayor eficiencia en la creación de fotones [1]. Este tipo de punto cuántico se ha abordado teóricamente: se ha calculado analíticamente la función de onda para los electrones en puntos cuánticos cónicos y piramidales [2]; se estudiaron los estados electrónicos y las propiedades ópticas de CQD hecho de GaAs, la dependencia de los niveles de energía de los parámetros geométricos de CQD se obtiene analíticamente con la ayuda de la aproximación adiabática [4]; la susceptibilidad efectiva de nanohilos en forma de cono ubicados en la superficie del semiconductor se obtiene en el marco del enfoque de campo local [5].

En el presente trabajo se aplica la teoría de sistemas cuánticos abiertos mediante el procedimiento expuesto por A. Portacio en [6] para un punto cuántico en forma cilíndrica.

2. Metodología

2.1. Sistema cuántico nano-estructurado

Consideremos una QD cónica impenetrable (Figura 1), donde H representa la altura del cono y R es el radio de la base del cono. Aquí el ángulo de la parte

superior del cono se denota por θ . Hay que tener en cuenta que consideramos el caso de los pequeños ángulos en la parte superior del cono, es decir $R \ll H$, por lo tanto se tiene la siguiente aproximación:

$$\tan \theta = \frac{R}{H} \ll 1 \quad (1)$$

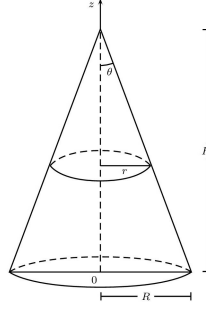


Figura 1. QD cónico. [3]

La condición (1) permite de aplicar aproximaciones geométricas adiabáticas para resolver el problema [3].

2.2. Método de cálculo de la respuesta óptica en nano-estructuras en el régimen Born-Markov

Se considera como el entorno del sistema al vacío cuántico del campo electromagnético que incide sobre la nano-estructura en consideración (un portador de carga en un QD con geometría cónica), esta consideración permite describir formalmente los procesos de emisión espontánea (γ) entre dos niveles del sistema cuántico: un estado excitado $|e\rangle$ y un estado base $|g\rangle$ [7]; por medio de una ecuación maestra [8]:

$$\frac{\partial \hat{\rho}}{\partial t} = \frac{1}{i\hbar} [\hat{H}_0 + \hat{V}(t), \hat{\rho}] + \frac{\gamma}{2} (2\hat{\sigma} \hat{\rho} \hat{\sigma}^\dagger - \hat{\sigma}^\dagger \hat{\sigma} \hat{\rho} - \hat{\rho} \hat{\sigma}^\dagger \hat{\sigma}) + \frac{\gamma\phi}{2} (\hat{\sigma}_z \hat{\rho} \hat{\sigma}_z - \hat{\rho}), \quad (2)$$

La solución de la ecuación maestra (2) permite conocer el operador densidad de la nano-estructura $\hat{\rho}(t)$ y así poder calcular el valor esperado la polarización eléctrica inducida $\langle P^{(n)}(t) \rangle$ en el sistema cuántico nano-estructurado por la interacción con un campo óptico de luz y así finalmente encontrar las expresiones de la respuesta óptica en nano-estructuras usando el formalismo de sistemas cuánticos abiertos.

3. Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados para el estudio del efecto del tamaño en la respuesta óptica lineal y el cambio de índice de refracción de un

QD de forma cónica de AsGa/AsGaAl. Para realizar los cálculos se usaron los siguientes parámetros: masa efectiva del electrón $m^* = 0,067m_o$ (m_o que es la masa del electrón libres), $T_1 = 1ps$, $T_2 = 0,2ps$, $n_r = 3,2$. Además, se usaron la altura constante igual a 50nm y se varió R (radio de la base del cono) por medio del ángulo θ que tomó valores de $7,5^\circ$ a $17,5^\circ$ en intervalos de $2,5^\circ$. Lo que nos da valores de R iguales a : R=6,58nm;R=8,82nm; R=11,08nm; R=13,40nm; R=15,76nm.

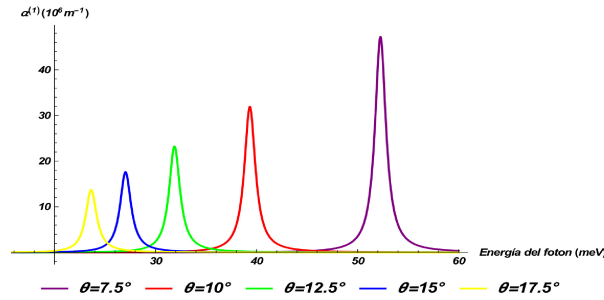


Figura 2. Respuesta óptica α_1 de un QD en forma cónica en función de la energía del fotón incidente, para cinco valores diferentes del radio de la base R con una altura H=50nm, (Autores).

En la Figura 2, que corresponde a la relación entre la respuesta óptica lineal y la energía, se puede ver que, al variar el ángulo θ varía la energía del fotón; pudiendo verse que al aumentar el ángulo la energía del fotón se desplaza a regiones de bajas energías (corrimiento al rojo).

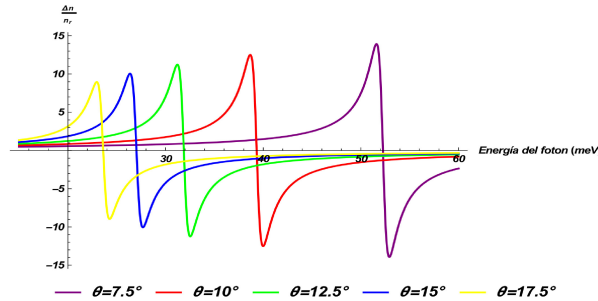


Figura 3. Cambio del índice de refracción de un QD en forma cónica en función de la energía del fotón incidente, para cinco valores diferentes del radio de la base R con una altura H=50nm, (Autores).

En la Figura 3 se puede observar el cambio del índice de refracción con respecto a la energía, igualmente conservando la altura H y variando el ángulo θ varía la energía del fotón de tal manera que con el aumento del ángulo el pico de resonancia se mueve hacia el lado izquierdo de la energía (corrimiento al rojo).

4. Conclusiones

Se encontró que el tamaño de la nano-estructura juegan un papel importante en las propiedades ópticas que presentan los semiconductores de baja dimensionalidad, abriendo así nuevas oportunidades para la exploración práctica del efecto cuántico de tamaño en los dispositivos. De esta manera, se espera que los resultados obtenidos en este trabajo puedan contribuir a la interpretación de los estudios experimentales y proporcionar un nuevo modelo para la aplicación práctica, como los interruptores ópticos, fotodetectores infrarrojos y modulador electro-óptico.

5. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad de los Llanos por su apoyo con el proyecto “Respuesta óptica de un punto cuántico cónico en el régimen Born-Markov”, código C07-F02-001-2019.

Referencias

1. Huh, J. H., Hermannstädter, C., Akahane, K., Sasakura, H., Jahan, N. A., Sasaki, M., Suemene, I.: Fabrication of metal embedded nano-cones for single quantum dot emission. *Japanese Journal of Applied Physics*, 50(6S), 06GG02, (2011). <https://doi.org/10.1143/JJAP.50.06GG02>
2. Lozovski, V., Piatnytsia, V.: The analytical study of electronic and optical properties of pyramid-like and cone-like quantum dots. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 8(11), 2335-2343, (2011). doi.org/10.1166/jctn.2011.1965
3. Hayrapetyan, D. B., Chalyan, A. V., Kazaryan, E. M., Sarkisyan, H. A.: Direct interband light absorption in conical quantum dot. *Journal of Nanomaterials*, 2015,(2015). <https://doi.org/10.1155/2015/915742>
4. Hayrapetyan, D. B., Kazaryan, E. M., Sarkisyan, H. A.: Magneto-absorption in conical quantum dot ensemble: Possible applications for QD LED. *Optics Communications*, 371, 138-143, (2016). <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.03.064>
5. Lozovski, V., Medvid, A., Piatnytsia, V.: Local Field Effects in the Luminescence of the Cone-Like Nanohills. *Optics and Photonics Journal*, Vol.2 No.3, (2012). DOI: 10.4236/opj.2012.23021
6. Portacio, A. A., Rodríguez, B. A., Villamil, P.: Theoretical study on optical response in nanostructures in the Born–Markov regime: The role of spontaneous emission and dephasing. *Annals of Physics*, 400, 279-288,(2019). <https://doi.org/10.1016/j.aop.2018.11.023>
7. Breuer, H. P., Petruccione, F.: The theory of open quantum systems. Oxford University Press on Demand, (2002).
8. Vera, C. A., Quesada, N., Vinck-Posada, H., Rodríguez, B. A.: Characterization of dynamical regimes and entanglement sudden death in a microcavity quantum dot system. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 21(39), 395603, (2009).