

# EFECTO DEL CAMPO MAGNÉTICO SOBRE EL ESPECTRO DE EMISIÓN PARA UN SISTEMA MICROCAVIDAD-PUNTO CUÁNTICO

## MAGNETIC FIELD EFFECTS FOR THE EMISSION SPECTRA IN A MICROCAVITY-QUANTUM DOT SYSTEM

L.E. CANO<sup>a,b†</sup>, P.S.S. GUIMARÃES<sup>b</sup>, A. PORTACIO<sup>a</sup>

a) Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de los Llanos, sede Barcelona, km.12 Vía Puerto López, Villavicencio, Meta, Colombia

b) Departamento de Física, Instituto de Ciências Exatas, ICEx, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte Minas Gerais, Brasil; lecanof@gmail.com<sup>†</sup>

† autor para la correspondencia

Recibido 12/11/2018; Aceptado 5/12/2018

Se modela numéricamente el comportamiento del espectro de fotoluminiscencia para un punto cuántico inmerso dentro de una microcavidad semiconductor y un campo magnético externo constante. La dinámica del operador densidad es calculada mediante la ecuación maestra escrita en la forma de Lindblad para los procesos decoherentes: emisión espontánea, pérdida a través de la cavidad y desfase. El sistema es alimentado mediante el mecanismo de bombeo incoherente de excitones. Se encuentra en el espectro de fotoluminiscencia que en campos magnéticos menores a  $\sim 2$  T el sistema se comporta en un régimen de acoplamiento fuerte y para campos superiores a 2 T las líneas de campo magnético comienzan a desacoplarse comportandose como tres sistemas independientes. En especial, la línea que más rápido se desacopla es la línea  $\sigma_-$ .

The behaviour of the photoluminescence spectra of a single quantum dot in a semiconductor microcavity is modeled numerically in the presence of an external and constant magnetic field. The dynamics of the density operator is calculated using the master equation in the Lindblad form for decoherence processes: spontaneous emission, losses through cavity mirrors, and dephasing. An incoherent pumping of excitons is used to feed the system. It is found in the photoluminescence spectra that for magnetic fields lower than  $\sim 2$  T the system is in the strong coupling regime and for magnetic fields greater than 2 T the system emits light like three independent systems. The line that uncouples faster is the  $\sigma_-$  line.

PACS: Quantum electrodynamics of cavities, quantum optics (Electrodinámica cuántica de cavidades, óptica cuántica), 42.50.Pq; Optical properties of nanostructures (Propiedades ópticas de nanoestructuras), 78.67.-n; Photoluminescence, properties and materials (Fotoluminiscencia, propiedades y materiales), 78.55.-m; Magnetic properties of quantum dots (Propiedades magnéticas de puntos cuánticos), 75.75.-c

### I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la física de semiconductores a nivel experimental permitió la creación de materiales que confinan carga eléctrica en una, dos o tres dimensiones, esto se ha logrado gracias al desarrollo de técnicas epitaxiales para el crecimiento de materiales [1–5] y técnicas litográficas avanzadas. Además, estas mismas técnicas permiten el control de la densidad de estados de luz en el interior de un semiconductor mediante variaciones espaciales de la función dieléctrica, creando el efecto de cavidad para la radiación electromagnética [6,7].

La creación de este tipo de sistemas físicos que combina confinamientos electrónicos y fotónicos, ha permitido la posibilidad de estudiar y probar la electrodinámica cuántica de cavidades en sistemas diferentes a los sistemas atómicos [8]. En el caso específico de confinamiento de carga eléctrica tridimensional, la estructura llamada punto cuántico (QD, del inglés: *Quantum Dot*), inmerso en una microcavidad semiconductor (MC), se evidencian fenómenos de acoplamiento entre dichos sistemas [9,10]. Por ejemplo, en el espectro de emisión de un sistema MC-QD, la emisión espontánea puede modificarse o incluso inhibirse si

el sistema se encuentra en alguno de los regímenes fuerte o débil de acoplamiento según la fabricación del sistema [11–14]. Un análisis de estos procesos de emisión permite el estudio de las propiedades no solo electrónicas al interior del punto, sino de determinar algunas las características de la luz que emite el sistema, como su estado cuántico y grado de acoplamiento radiación-materia, entre otras [15].

Un campo magnético constante aplicado sobre un QD afecta la frecuencia de emisión de los mismos, hecho que afecta la forma del espectro de emisión del sistema MC-QD [16], por lo tanto las variaciones de un campo magnético externo al sistema podrían ser utilizadas como parámetro control del espectro de emisión. Esto es importante en la implementación de protocolos de la óptica cuántica; protocolo de teletransporte cuántico [17], desarrollo de tecnologías de emisión o detección de un único fotón [18].

En la sección II se formula el modelo del sistema a estudiar, en la sección III se propone la dinámica del sistema, en la sección IV se presentan los resultados y en la sección V se muestran las conclusiones.

## II. MODELO

Se estudia el comportamiento del espectro de fotoluminiscencia (PL, del inglés: *photoluminescence*) de un QD inmerso en una MC en presencia de un campo magnético externo aplicado paralelamente a la dirección de confinamiento (ver fig.1). Se considera el QD como un sistema de dos niveles y la MC con un solo modo de oscilación. Este sistema se modela como una versión modificada del Hamiltoniano de Jaynes-Cummings [19] donde un campo magnético externo produce efectos Zeeman y diamagnético en el QD modificando el comportamiento de las líneas de emisión de todo el sistema [16].

La figura 1 muestra el bosquejo del sistema físico MC-QD en presencia de un campo magnético externo. A semejanza de una cavidad unidimensional real, el efecto de confinamiento es logrado usando espejos de Bragg y el QD se encuentra en el centro de la microcavidad. En este bosquejo no se muestran los procesos disipativos.

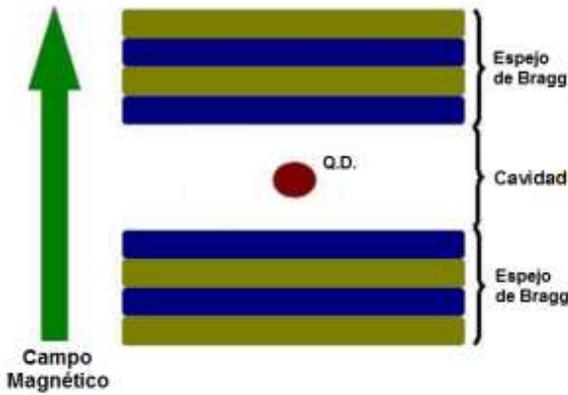


Figura 1. Bosquejo del sistema físico punto cuántico inmerso en una microcavidad unidimensional.

El Hamiltoniano en la aproximación de onda rotativa queda escrito como [20-22]:

$$H_{RWA} = \hbar\omega_c a^\dagger a + \hbar\omega_{Q.D.} \sigma^\dagger \sigma + \hbar g (\sigma a^\dagger + \sigma^\dagger a), \quad (1)$$

siendo  $\hbar\omega_c$  la energía de resonancia de la cavidad,  $\hbar\omega_{Q.D.}$  la energía de separación entre (dos) niveles del QD,  $\hbar g$  la energía de acople entre la MC y el QD,  $a$  representa el operador de aniquilación de fotones,  $\sigma$  el operador de aniquilación de excitaciones en la materia. Específicamente, la energía de separación entre niveles del QD se modela como:  $\hbar\omega_{QD} = \hbar\omega_{QD}(0) \pm \frac{1}{2}\alpha\mu_B B + \beta \times 10^{-3} B^2$ , donde  $\hbar\omega_{QD}(0)$  es la energía de separación entre estados del QD cuando el campo magnético es cero; los sumandos después del signo  $\pm$  representan el efecto Zeeman, donde la línea de emisión del QD se desdobra en dos (líneas denotadas por  $\sigma_+$  y  $\sigma_-$ ); y el efecto diamagnético, donde las líneas de emisión se mueven hacia el azul. Estos efectos existen cuando se tienen campos magnéticos positivos distintos de cero. Las constantes  $\alpha = 2.9$  y  $\beta = 0.6$  son usadas para ajustar los cálculos para un QD de InAs/GaAs [16] y  $\mu_B$  es el magnetón de Bohr.

## III. DINÁMICA

Para describir de manera más realista la dinámica de un sistema QD-MC es necesario considerar tanto la evolución que viene del operador Hamiltoniano como la interacción con su entorno. Para esto usaremos la formulación de Lindblad de la ecuación maestra escrita como [20,21]:

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar}[\rho, H_{RWA}] + L[\rho], \quad (2)$$

siendo  $\rho$  el operador densidad del sistema y  $L$  el operador de Lindblad que describe la dinámica del sistema, compuesto por la suma de los operadores que describen procesos de relajación en el sistema como son: pérdidas en la cavidad  $\kappa(2a\rho a^\dagger - a^\dagger a\rho - \rho a^\dagger a)$ , emisión espontánea  $\gamma(2\sigma\rho\sigma^\dagger - \sigma^\dagger\sigma\rho - \rho\sigma^\dagger\sigma)$ , desfase  $\frac{1}{2}\gamma_\phi(\sigma_z\rho\sigma_z - \rho)$ , además del proceso de bombeo incoherente de excitones en el QD  $\frac{1}{2}P(2\sigma^\dagger\rho\sigma - \rho\sigma\sigma^\dagger - \sigma\sigma^\dagger\rho)$ .

La solución de este sistema fue implementada en el lenguaje Python con la extensión QuTip [23], desarrollada para resolver la dinámica de sistemas cuánticos abiertos. Para el cálculo de espectro de fotoluminiscencia se utiliza la expresión  $S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{t \rightarrow \infty} \langle a^\dagger(t+\tau)a(t) \rangle e^{-i\omega\tau} d\tau$  [22], que es la transformada de Fourier de la función de correlación a dos tiempos  $\langle a^\dagger(t+\tau)a(t) \rangle = \text{Tr}(a^\dagger(t+\tau)a(t)\rho)$ , este cálculo se resuelve en Qutip usando el comando "spectra" [23].

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros necesarios utilizados para hacer los cálculos fueron la energía de la cavidad  $\hbar\omega_c = 1333.0$  meV [16], la separación inicial de los niveles de energía del QD  $\hbar\omega_{Q.D.}(0) = 1333.0$  meV [16], el parámetro de acoplamiento radiación-materia  $\hbar g = 25 \times 10^{-3}$  meV, la tasa de disipación de la cavidad  $\kappa = 1.0 \times 10^{-3}$ , la tasa de disipación de la excitación del QD  $\gamma = 1.0 \times 10^{-3}$ , el término de desfase  $\gamma_\phi = 1 \times 10^{-3}$  y la tasa de bombeo incoherente de excitaciones  $P = 1.0 \times 10^{-6}$ .

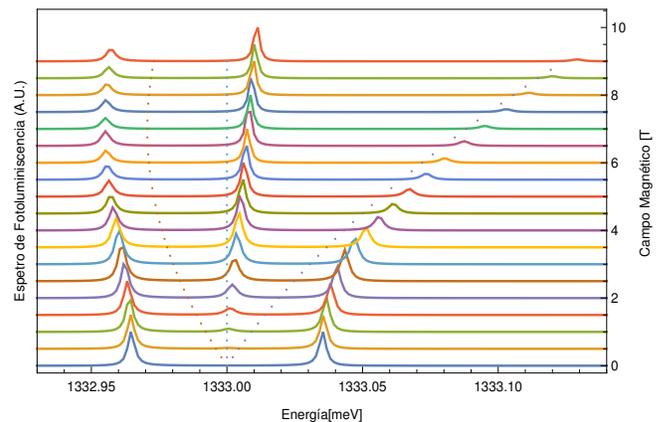


Figura 2. Espectro de fotoluminiscencia de un sistema QD-MC para diferentes valores de campo magnético constante. Las líneas punteadas de izquierda a derecha representan el comportamiento de las líneas del QD ( $\sigma_+$ ,  $\sigma_-$ ) y de la cavidad que debería seguir el sistema en presencia de campo magnético al estar desacoplado el punto cuántico de la cavidad.

La figura 2 muestra el espectro de fotoluminiscencia en función de la energía de emisión de un sistema QD-MC

en presencia de campo magnético externo constante y el comportamiento de los QD en presencia de un campo magnético externo aplicado paralelo a la dirección de confinamiento de la cavidad, para campos magnéticos de cero a 9 T, en incrementos de 0.5 T. En la Figura 2, se observa que para campos magnéticos menores a  $\sim 2$  T se obtiene el comportamiento típico del espectro de luminiscencia asociado a un sistema acoplado; en donde se encuentran dos picos en el espectro de luminiscencia. Esto se debe a que campos magnéticos de intensidades menores a  $\sim 2$  T mantienen el acoplamiento entre las líneas de emisión del QD y la MC, sin embargo cuando se incrementa el campo magnético el sistema deja de estar en resonancia, por lo tanto el acoplamiento desaparece y así el sistema se comporta como tres emisores independientes; cavidad, línea de emisión  $\sigma_+$  y línea de emisión  $\sigma_-$  para el QD. La razón física de este comportamiento se debe al efecto Zeeman inducido por la interacción del sistema con el campo magnético externo, este efecto es evidenciado porque se observa un rompimiento del degeneramiento del sistema, sin embargo también se observa una asimetría entre la línea central y las líneas laterales debido a los términos Zeeman y diamagnético definidos en el Hamiltoniano del QD.

## V. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió el comportamiento de un sistema MC-QD en presencia de un campo magnético externo. Se encontró que a partir de un valor de  $\sim 2$  T existe desacople entre las líneas de emisión del sistema. Se muestra que la línea  $\sigma_-$  del QD se desacopla más rápidamente con la cavidad.

## AGRADECIMIENTOS

A. Portacio reconoce el apoyo financiero de Universidad de los Llanos, bajo el proyecto *Cálculo de la respuesta óptica en nano-estructuras usando una ecuación maestra en la forma Lindblad*, código C01-F02-010-2017. L. E. Cano y P. S. S. Guimarães reconocen el apoyo financiero de CAPES y CNPq, Brasil.

## REFERENCIAS

- [1] B. Daudin, F. Widmann, G. Feuillet, Y. Samson, M. Arlery, J. L. Rouvière, Phys. Rev. B **56**, R7069(R) (1997).
- [2] K. Yamaguchi, K. Yujobo, T. Kaizu, Japanese J. Appl. Physics **39**, L1245 (2000).
- [3] A. D. Yoffe, Adv. Phys. **51**, 799 (1993).
- [4] R. D. Dupuis, P. D. Dapkus, N. Holonyak Jr., E. A. Rezek, R. Chin, Appl. Phys. Lett. **32**, 295 (2008).
- [5] P.N. Butcher, N. H. March, y M. P. Tosi, Physics of low-dimensional semiconductor structures. (Springer Science & Business Media, 2013), pp 1 - 56.
- [6] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, R. D. Meade, Photonic crystals: molding the flow of light, 2da Ed. (Princeton University Press, 2011), pp. 44-52.
- [7] K. J. Vahala, Optical microcavities, Nature **424**, 839 (2003).
- [8] J.M Gérard y B. Gayral, InAs quantum dots: artificial atoms for solid-state cavity-quantum electrodynamics, Physica E **9**, 131 (2001).
- [9] A. Ishikawa, Y. Arakawa, C. Weisbuch y M. Nishioka, Phys. Rev. Lett. **69**, 3314 (1992).
- [10] R. J. Warburton, Cont. Phys. **43**, 351 (2002).
- [11] J. P. Reithmaier, G. Sek, Löffler, A., Hofmann, C., Kuhn, S., Reitzenstein, S., y A. Forchel, Nature **432**, 197 (2004).
- [12] T. Yoshie, A. Scherer, J. Hendrickson, G. Khitrova, H.M. Gibbs, G. Rupper, C. Ell, O.B. Schekin, D.G. Deppe, Nature **432**, 200 (2004).
- [13] G.S. Solomon, M. Pelton, Y. Yamamoto, Phys. Stat. Sol. **244**, 2792 (2007).
- [14] K. Hennessy, A. Badolato, M. Winger, D. Gerace, M. Atatüre, S. Gulde, A. Imamoglu, Nature **445**, 896 (2007).
- [15] Z. Di, H. V. Jones, P. R. Dolan, S. M. Fairclough, M. B. Wincott, J. Fill, G. M. Hughes, J. M. Smith, New J. Phys. **14**, 103048 (2012).
- [16] H. Kim, T. C. Shen, D. Sridharan, G. S. Solomon, E. Waks, Appl. Phys. Lett. **98**, 091102 (2011).
- [17] J. L. O'Brien, A. Furusawa, J. Vuckovic, Nature Photonics **3**, 687 (2009).
- [18] P. Michler, A. Kiraz, C. Becher, W.V. Schoenfeld, P.M. Petroff, L. Zhang, E. Hu, A. Imamoglu, Science **290**, 2282 (2000).
- [19] E.T. Jaynes, F.W. Cummings, Proc. IEEE. **51**, 89 (1963).
- [20] H. P. Breuer y F. Petruccione, The theory of open quantum systems, 1ra Ed. (Oxford University Press, 2002), pp.109, 254.
- [21] H. J. Carmichael, Statistical Methods in Quantum Optics 1: Master Equations and Fokker-Planck Equations 1ra Ed. (Springer, 2003), pp.22, 281.
- [22] M.O. Scully y M.S. Zubairy, Quantum Optics, 1ra Ed. (Cambridge University press, 1999) pp.151,302.
- [23] J. R. Johansson, P. D. Nation, F. Nori, Comp. Phys. Comm. **183**, 1760 (2012).

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) license.

