



Procesos Ópticos en Micropilares Circulares

Optical Processes in Micropilares Circulares

Carlos A. Parra M.^a, Herbert Vinck-Posada^b, Boris A. Rodríguez^b

^aDepartamento de Física, Universidade Federal de Minas Gerais, C.P. 702, Belo Horizonte, Brasil.

^bGrupo de Física Atómica y Molecular, GFAM, Universidad de Antioquia, AA 1226, Medellín, Colombia.

Recibido 23 de Oct. de 2007; Aceptado 2 de Sep. de 2009; Publicado en línea 30 de Oct. 2009

Resumen

Actualmente el estudio de la propagación de ondas electromagnéticas en heteroestructuras semiconductoras tiene gran importancia debido a sus múltiples aplicaciones. Entre estas las microcavidades ópticas hacen parte de un conjunto de nuevos dispositivos de gran eficiencia debido a los altos factores de calidad y pequeños volúmenes modales que poseen. En este trabajo presentamos un método perturbativo que permite realizar una detallada caracterización de estos sistemas, en especial centraremos nuestra atención en las microcavidades tipo pilar (DBR Micropost) las cuales son consideradas como guías de ondas cuyo índice de paso es cuasiperiódico. Con base en esto se construye un cristal fotónico unidimensional cuya celda unitaria es el pilar y se hace uso del teorema de Bloch-Floquet para obtener la ecuación modal de nuestro sistema. Las características de los micropilares permiten la realización de estudios de procesos propios de la electrodinámica cuántica de cavidades CQED como son los regímenes de acoplamiento fuerte y débil entre la radiación (modo de la cavidad) y la materia (medio activo), el control de propiedades atómicas como la emisión espontánea mediante el efecto Purcell, cuya aplicación mas importante es la generación de fuentes de un solo fotón.

Palabras Clave: Microcavidades, Micropilar, Cristales Fotónicos.

Abstract

Actually the study of the propagation of electromagnetic waves in semiconducting heterostructures has great importance due to its multiple applications. Among these, the optical microcavities are part of a set of new devices of great efficiency due to the high quality factors and small modal volumes that can be reached. In this work we present a perturbative method that allows detailed characterization of these systems, specially we will focus our attention on the microcavities known as micropillar (DBR Micropost) which are considered as quasi-periodic refractive index waveguides. In agreement with previous consideration, an unidimensional photonic crystal is constructed whose unit cell is the pillar and the Bloch-Floquet theorem is used to obtain the modal equation of our system. The characteristics of the micropillars allows to study some processes from the cavity quantum electrodynamics theory (CQED) such as strong and weak coupling between the radiation field (cavity mode) and the matter (Active medium), the control of atomic properties as the spontaneous emission by mean Purcell effect, and the most important application is the single-photon sources.

Keywords: Microcavities, Micropillar, Photonic Crystals.

1. Introducción

En el estudio de ondas electromagnéticas en medios periódicos se han desarrollado diversos métodos que permiten realizar una completa descripción de estos sistemas. Estos métodos resuelven las ecuaciones de Maxwell mediante diferentes técnicas numéricas. El más tradicional es el FDTD (Finite Difference Time-Domain), el cual realiza una discretización de la estructura por medio de una rejilla cuadrada, lo que es la principal desventaja debido a que si se requiere una mayor precisión de los resultados, la discretización debe ser muy fina y en consecuencia largos tiempos de cálculo son necesarios. Otra herramienta computacional es Cavity Modelling Framework CAMFR el cual está basado en el método de expansión en automodos u ondas planas en las regiones de la estructura donde el índice de refracción es constante, y en las interfases de cambio de medio la conexión se realiza entre los modos cuyas energías son aproximadamente iguales; esto hace de CAMFR una herramienta bastante flexible. Otros métodos que han sido propuestos en esta área son: Transference Matrix Method (TMM) [1] y aproximaciones a la teoría de bandas aplicada a medios periódicos [2]. En este trabajo presentamos un método perturbativo a la ecuación de onda para realizar un estudio de la óptica de microcavidades tipo pilar con sección transversal circular. El orden del artículo es el siguiente: sección 2 presentación del método, sección 3 presentación de resultados y finalmente algunas conclusiones.

2. Método perturbativo

El método que va a ser presentado aquí se basa en tres ideas básicas: (a) Obtención de la base no perturbada (guía homogénea), (b) Expansión en automodos y cálculo de la estructura de bandas, (c) Introducción del acople con el continuo (modos *leaky*) y cálculo de factor de calidad Q .

El micropilar es una heteroestructura que consiste de un conjunto alternado de capas conocidos como reflectores de Bragg distribuidos (DBR), de materiales $AlGaAs_{1-x}$ y $GaAs_x$ cuyos índices son ≈ 3 y 3.5 respectivamente, una cavidad resonante de $GaAs_x$ se crece generalmente en el centro del DBR. El grosor típico de cada capa del DBR es $\lambda_0/4n$, donde λ_0 es la longitud de onda en vacío y n es el índice de refracción del medio; para la cavidad el grosor es λ_0/n . Los mecanismos de confinamiento de este sistema son la reflexión total interna (RTI) y la recirculación resonante producida por los DRB (ver figura 1-(a)).

Nuestra base no perturbada será el conjunto de modos de una guía circular infinita homogénea, en la cual es conocido que existen modos híbridos etiquetados por $HE_{l,m}$ y $EH_{l,m}$, donde l es el número angular principal, y m es el orden del modo; para $l = 0$ los modos son simétricos y conocidos como transverso-magnético $TM_{0,m}$, y transverso-eléctrico $TE_{0,m}$. El modo fundamental corresponde a $HE_{1,1}$.

El campo solución expandido en esta base es

$$\mathbf{H} = \sum_n \alpha_n \mathbf{H}_n$$

donde n es una etiqueta global para los modos de la guía infinita (l, β, ω) . Basados en la aproximación de guía infinita, construimos una red unidimensional infinita de pilares, cuya celda unitaria es un pilar y la constante de red es Λ , es decir, la longitud del pilar. Como resultado de esto tenemos un cristal fotónico unidimensional de periodo Λ . Las afirmaciones anteriores nos permiten hacer uso del teorema de *Bloch-Floquet* implicando que nuestra solución de campo es dada por

$$\vec{D}_{n,G}(\vec{r}) = \vec{D}_n(r, \phi) e^{i(k+G)z} \quad (1)$$

donde $k = \beta + mG$, con \vec{G} vector de la red recíproca y m un entero. De esta manera, la ecuación modal de pilar viene dada por

$$\alpha_n (\omega_n^2 - \omega^2) + \sum_{n'G'} \alpha_{n'} K_{n'G,nG'} = 0 \quad (2)$$

donde $K_{n'G,nG'}$ son las integrales de acople entre los modos guiados. La ecuación (2) es análoga a la ecuación de bandas del modelo de *Kronig-Penney* y de la misma manera es posible construir la estructura de bandas del pilar.

Los modos del continuo se introducen utilizando el formalismo de Fano, el cual establece que el acoplamiento de un sistema con su entorno se presenta de manera relevante entre los modos de ambos subsistemas que están en el límite resonante [3]. De esta manera se tiene que para un modo guiado por el pilar (ng), existe un conjunto modos del continuo (ns). El acople se genera entre el modo guiado y una densidad de modos de tipo Lorentziano centrada en la frecuencia del modo del pilar. La técnica comúnmente es conocida como la discretización de continuo.

Haciendo uso de la ecuación modal, y de las afirmaciones anteriores se obtiene que

$$\omega^2 = \omega_0^2 + \sum(\omega) \quad (3)$$

donde se define la densidad de estados como

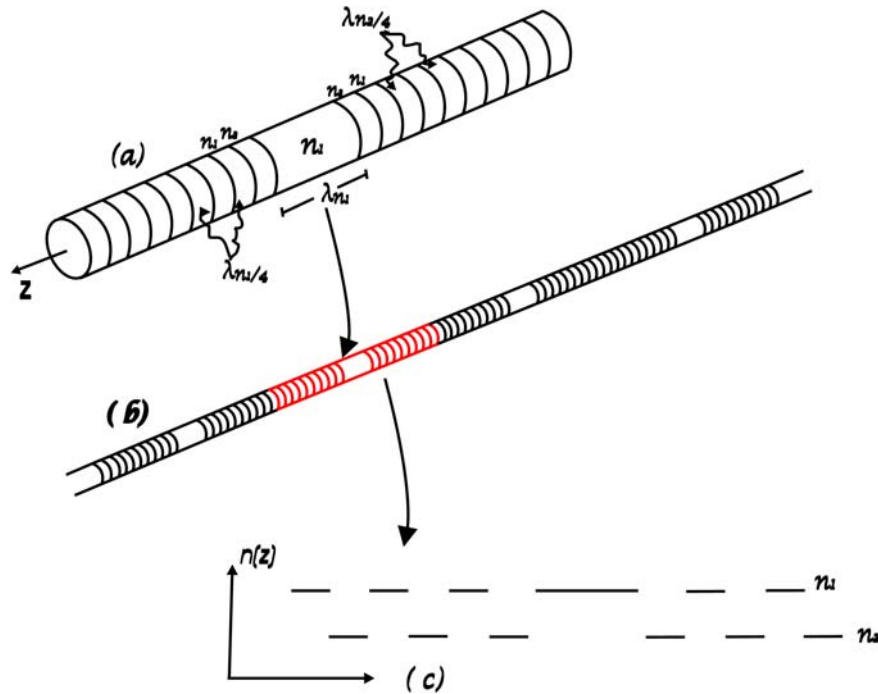


Figura 1. (a) Celda unitaria de la red unidimensional de pilar de constante de red igual a longitud del pilar. (b) Red unidimensional infinita de pilares. (c) Perfil del índice de refracción a lo largo del Pilar.

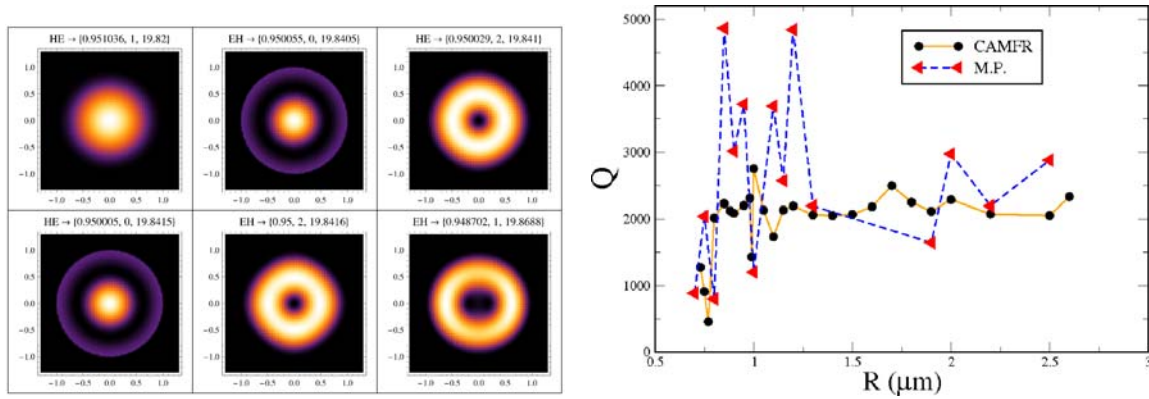


Figura 2. (izquierda) Distribución de intensidad del modo fundamental en la sección transversal de la guía y los primeros armónicos en orden energético. (derecha) Factor de calidad en función del radio de pilar R.

$$\sum(\omega) = \sum_{Gns} \frac{K_{Gns,o} K_{o,Gns}}{\omega^2 - \omega_{ns}^2} \quad (4)$$

y el acople entre el sistema y el entorno está dado por la integrales $K_{o,Gns}$. Finalmente el factor de calidad para un modo de frecuencia ω es dado por

$$Q = \frac{2\omega^2}{Im(\sum(\omega))} \quad (5)$$

3. Resultados y Conclusiones

En la figura 2-(izquierda) se muestran los primeros modos de los micropilares. En la parte superior de cada modo se presenta: la longitud de onda (λ) en micrones, el número angular (l) y la energía en unidades de radio ($h = c = 1$), respectivamente.

En la figura 2-(derecha), se presenta el comportamiento del factor de calidad del modo fundamental del pilar (formado con 15 períodos de espejos de Bragg) para $HE_{1,1}$ en función de radio. Para la región $R < 0.8$, el

factor Q cae rápidamente, en la región $0.8 < R < 1.5$ se presentan oscilaciones debidas al acoplamiento con modos de orden superior, y para $R > 1.5$ el factor alcanza la saturación cuyo límite asintótico es el factor de Q de la correspondiente cavidad tipo planar. [4] Hemos presentado un método alternativo para la caracterización de sistemas multicapas, el cual puede ser extendido al estudio de cristales fotónicos, y para medios que posean una cierta periodicidad. Se mostró el comportamiento oscilatorio de factor Q obtenido por Gerard et al. [5].

4. Agradecimientos

Los autores agradecen al profesor P.S.S. Guimaraes por sus fructíferas discusiones experimentales. Adicionalmente, al grupo de Física Atómica y Molecular, a la

Universidad de Antioquia y al Centro de Excelencia de Nuevos Materiales (C.E.N.M.) por el apoyo en la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] Pochi Yeh, *Optical Waves in Layered Media*, John Wiley and Sons, ICN., Publication, Santa Barbara, 2005.
- [2] Yablonovitch, E. and Gmitter, T. J., *Phys. Rev. Lett.*, **63**, 1950(1989).
- [3] Claude Cohen-Tannoudji, Jaques Dupont-Roc and Gilbert Grynberg, *Atom-Photon Interactions*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1992.
- [4] C.A. Parra. *Procesos Ópticos en Micropilares*, Trabajo de Grado, Instituto de Física, Universidad de Antioquia, 2007.
- [5] Ph. Lalanne, J. P. Hugonin and J. M. Gérard, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 46 (2007).