

Velocidad de grupo lenta en heteroestructuras fotónicas

R. Archuleta-García

Programa de Posgrado en Ciencias (Física) de la Universidad de Sonora
Calle Rosales y Boulevard Luis Encinas, Hermosillo, Sonora 83190, México

J. Manzanares-Martínez

Centro de Investigación en Física de la Universidad de Sonora
Apartado Postal 5-088, Hermosillo, Sonora 83190, México

(Recibido: 5 de febrero de 2008; Aceptado: 22 de abril de 2008)

En este trabajo presentamos un análisis de la velocidad de grupo en cristales fotónicos unidimensionales basado en un cálculo de la estructura de bandas en la zona de Brillouin extendida. Planteamos la imposibilidad de velocidad de grupo negativa en la segunda banda para un cristal fotónico dieléctrico unidimensional realizando un estudio sistemático de la variación de la velocidad de grupo en función del factor de llenado del cristal. Discutimos recientes reportes en donde existen malentendidos en la determinación de la velocidad de grupo.

Palabras clave: Cristales fotónicos; Estructura de bandas

In this work we presents an analysis of the group velocity in one dimensional photonic crystal based on the calculation of the Band Structure in the Extended Zone representation. The impossibility of negative group velocity in the second band is discussed by presenting a systematic variation of the filling fraction of the crystal. We discuss some recent reports where exist misunderstandings about the group velocity calculations in Photonic Crystals.

Keywords: Photonic crystals; Band structure

1. Introducción

Actualmente existe un gran interés en controlar pulsos de luz modificando su velocidad de propagación, a tal grado que se plantea la posibilidad de detener por completo la luz utilizando cristales fotónicos. [1] La investigación en cristales fotónicos ha llegado a un punto tal de maduración que ya se busca el control totalmente óptico de la información en un circuito, con la idea de desarrollar novedosas aplicaciones tecnológicas. [2] Los dispositivos ópticos basados en cristales fotónicos, tendrán grandes ventajas sobre los dispositivos electrónicos convencionales. Ellos ofrecerán una mayor velocidad de operación, mayor vida media y una tasa más alta de repetición de procesos. Por su naturaleza, los dispositivos fotónicos son extremadamente compactos, lo cual los hace especialmente aptos a la miniaturización en circuitos.

Recientemente, diversos estudios experimentales presentan sólidos resultados en donde se observa el fenómeno de superprisma, [3] el cual existe debido a la forma anómala de la velocidad de grupo en el borde de la banda de energía. Resulta de gran interés práctico que la velocidad de grupo sea sensible a las variaciones de la celda unitaria, es decir, los cambios en índices de refracción, tamaño de la celda y fracción de llenado. Esta característica puede ser empleada para sintonizar la estructura de bandas [4] y realizar dispositivos activos

que varíen su respuesta óptica en función de un parámetro externo. [5]

En el análisis de estos fenómenos y aplicaciones relacionadas, resulta de capital importancia la determinación de la velocidad de grupo en el cristal fotónico. Es notable que recientes resultados publicados en la literatura científica demuestran que este concepto y su cálculo aún están sujetos a debate. [6-10] En este trabajo presentamos una discusión sobre un reciente reporte [7] teórico, en donde se considera en forma errónea, que la velocidad de grupo en la segunda banda es negativa. Este controversial resultado rápidamente dio lugar a reportes en donde se refutaba esta situación. [8,9]

2. Estructura de bandas: zona reducida y zona extendida

En la Fig. 1 presentamos el sistema multicapa unidimensional compuesto por los medios $n_a=1$ y $n_b=2.3$, con espesores a y b respectivamente. La fracción de llenado se define como $f=b/d$ y se relaciona con la cantidad de material en la celda unitaria. En la Fig. 2a mostramos la estructura de bandas en el esquema de la zona reducida para una fracción de llenado $f=0.15$. Se observa que existen 4 bandas en el rango de 0 a 1.6. La Fig. 2b presenta la estructura de bandas en el esquema extendido. [11] Esta representación es más adecuada al

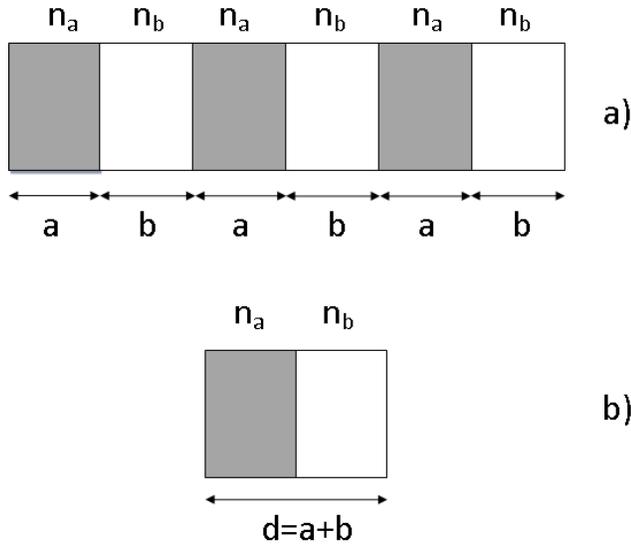


Figura 1. Cristal fotónico unidimensional compuesto por los medios n_a y n_b con espesores a y b respectivamente. El período de la celda unitaria es $d=a+b$.

cálculo de la velocidad de grupo v_g . La velocidad de grupo esta definida por la relación $v_g=d\omega/dk$. Es posible obtener la velocidad de grupo directamente de la relación de dispersión si planteamos la derivada en forma discreta.

$$v_g(\omega_i) = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} = \frac{\omega_{i+1} - \omega_i}{k_{i+1} - k_i} \quad (1)$$

En la Fig. 2c presentamos el resultado de nuestro cálculo de v_g . Observamos que en la segunda banda la pendiente es positiva (Fig 2b) y por ello la velocidad de grupo es positiva. Sin embargo, es erróneo considerar la derivada en la zona reducida (Fig 2a) para el cálculo de v_g , tal y como fue hecho en la Ref. [7].

3 Variación paulatina del factor de llenado

Para entender el valor positivo de la velocidad de grupo en la segunda banda, analizaremos la variación sistemática de la velocidad de grupo en función de f . En la Fig.3a mostramos la variación de la estructura de bandas en la zona extendida para los casos en donde $f=0, f=0.05, f=0.1, f=0.15$ y $f=1$ y. El primer caso es el de red vacía, es decir, un sistema en donde solamente existe el aire. A medida que aumenta la fracción de llenado tenemos más material n_b . En la Fig. 3b mostramos la correspondiente v_g . En el caso $f=0$, un pulso se propaga sin dispersión y a la velocidad de la luz c . Si f aumenta, v_g disminuye gradualmente en las primeras dos bandas. Este comportamiento esta directamente relacionado con la forma de la pendiente en la relación de dispersión.

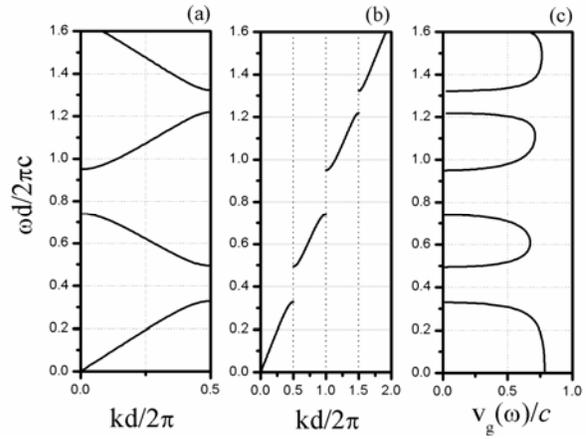


Figura 2. Estructura de bandas en la zona reducida (a), zona extendida (b) y velocidad de grupo (c) para el caso de factor de llenado $f = 0.15$.

4. Índice efectivo a bajas concentraciones

Para lograr un claro entendimiento de las implicaciones físicas que involucra el planteamiento de una velocidad de grupo negativa en la segunda banda, consideremos una fracción de llenado $f=0.01$. Es de esperarse que este medio altamente diluido tenga propiedades ópticas similares al aire. Ha sido reportado [11,12] que las propiedades ópticas de un medio pueden ser obtenidas a partir del índice de refracción efectivo de grupo

$$n_{eff.g}(\omega) = \frac{c}{v_g(\omega)} \quad (2)$$

En la Fig. 4a observamos que en la mayoría de las frecuencias $n_{eff.g} \approx 1$, excepto en las frecuencias prohibidas, en donde el índice tiende a valores grandes. Supongamos que la luz incide desde el aire a este medio altamente diluido, el coeficiente de reflexión es

$$r = \frac{1 - n_{eff.g}}{1 + n_{eff.g}} \quad (3)$$

En la Fig. 4b mostramos la reflexión como función de la frecuencia. La reflexión es prácticamente cero, excepto en las resonancias de red. El valor del índice efectivo a la mitad de la segunda banda es $n_{eff.g}=1.008$, Este valor es ligeramente mayor que el del aire, pero positivo, lo cual predice una reflexión casi nula en la mayoría de las frecuencias de la segunda banda, lo cual corresponde con la realidad del sistema. En cambio, si consideráramos que el valor de $n_{eff.g}$ es negativo en la segunda banda, como lo plantea la Ref. [7], el coeficiente de Fresnel da un resultado que no es físicamente aceptable.

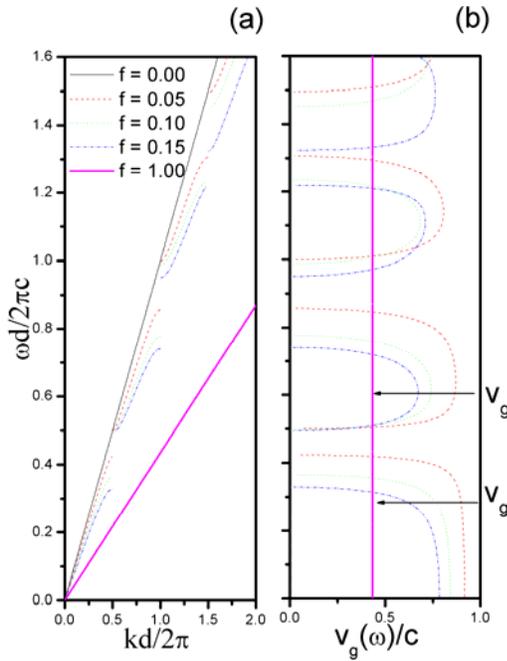


Figura 3. Estructura de bandas (a) y velocidad de grupo (b) para diferentes fracciones de llenado. Se grafica $f=0$, $f=0.05$, $f=0.1$, $f=0.15$ y $f=1$ con líneas sólida-delgada, a trazos, a puntos, a trazos y puntos y sólida gruesa, respectivamente. Se observa una disminución gradual de la v_g en las primeras dos bandas en función de f .

5. Conclusiones

Hemos presentado una forma correcta de calcular la velocidad de grupo a partir de la derivada numérica de la relación de dispersión en la zona extendida. Observamos que la velocidad de grupo es una función que varía gradualmente con la fracción de llenado. Partiendo de la red vacía, en donde la velocidad de grupo es c , observamos que v_g disminuye proporcionalmente como una función de f . Los valores de v_g permanecen positivos debido a que la pendiente de la relación de dispersión en la zona extendida siempre es positiva para este sistema. La representación en zona reducida es útil para presentar en forma compacta el mapa de energías permitidas del sistema, pero hay que ser cuidadoso para calcular la v_g a partir de esa representación. Hemos presentado un análisis de las propiedades ópticas de un sistema altamente diluido, en donde mediante la derivación de un índice de refracción efectivo, calculamos la reflexión. Como es de esperarse, la reflexión es prácticamente cero en la región de frecuencias de la segunda banda, a diferencia del resultado que se obtiene al considerar $v_g \neq 0$.

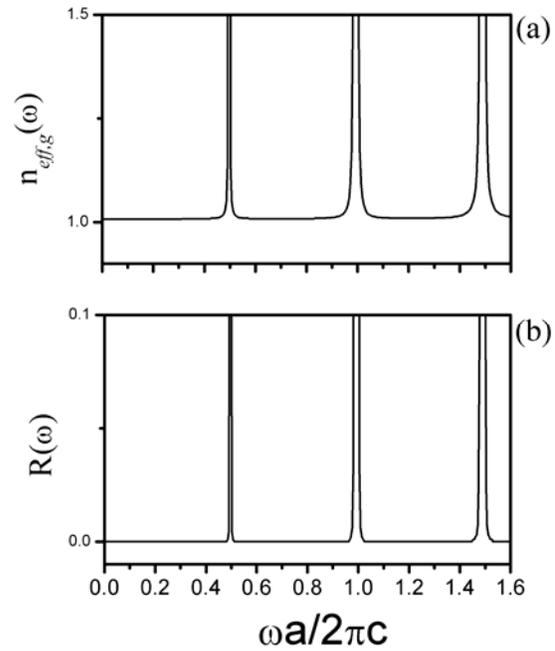


Figura 4. Índice de refracción de grupo (a) y reflectancia (b) como una función de la frecuencia.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Proyecto CONACYT-90211.

Referencias

- [1] M. F. Yanik, W. Suh, Z. Wang, and S. Fan, Phys. Rev. Lett. **93**, 233903 (2004).
- [2] Haché and M. Bourgeois, Appl. Phys. Lett. **77**, 4089 (2000).
- [3] Hideo Kosaka, Takayuki Kawashima, Akihisa Tomita, Masaya Notomi, Toshiaki Tamamura, Takashi Sato, and Shojiro Kawakami, Phys. Rev. B **58**, R10096 (1998).
- [4] J. Rev. B **72**, 035336 (2005).
- [5] J. Manzanares Manzanares-Martínez, F. Ramos-Mendieta, and P. Halevi, hys. -Martinez, F. Ramos-Mendieta, and P. Halevi, Appl. Phys. Lett. **87**, 101110 (2005).
- [6] J. N. Munday and M. Robertson, Appl. Phys. Lett. **81**, 2127 (2002).
- [7] S. P. Ojha, Sanjeev K W. Srivastava, Microwave and Optical Technology Letters. **42**, 82, (2004).
- [8] Alvaro Gómez, Angel Vegas, Miguel A. Solano, Microwave and Optical Technological Letters. **44**, 94 (2005).
- [9] L. Poirer, R. I. Thompson y A. Haché, Opt. Comm. **250**, 258 (2005).
- [10] S. P. Ojha, Sanjeev K. Srivastava, Microwave and Optical Technological Letters **46**, 94 (2005).
- [11] Guido Torrese, Jason Taylor, Trevor J. Hall, and Patrice Mégret, Phys. Rev. E **73**, 066616 (2006).
- [12] K. Sakoda, Opt. Express **4**, 167 (1999).