

Estudio de la reflectancia en cristales fotónicos unidimensionales con índice de refracción de envolvente gaussiana.

Xóchitl I. Saldaña y J. Arriaga

Instituto de Física – BUAP

Avenida San Claudio y 18 sur, Col. San Manuel, C. P. 72570, Puebla Pue., México

(Recibido: 30 de septiembre de 2005; Aceptado: 26 de octubre de 2005)

Presentamos la reflectancia de ondas electromagnéticas de polarizaciones TE y TM en función de la razón de la longitud total de la estructura a la longitud de onda de la radiación incidente y del ángulo de incidencia de un cristal fotónico unidimensional cuyos índices de refracción varían de acuerdo a una envolvente gaussiana usando el método de la matriz de transferencia. Observamos que es posible obtener una reflectancia igual a uno para las dos polarizaciones y todos los ángulos de incidencia dentro de un rango de longitudes de onda que puede ser sintonizado a diferentes valores del espectro electromagnético ajustando adecuadamente los parámetros que caracterizan la estructura.

Palabras clave: Reflectancia; Cristal fotónico unidimensional

We present calculations of the reflectance of TE and TM polarized electromagnetic waves versus. the total layer structure to wavelength ratio and the incident angle for a unidimensional photonic crystal with refractive indices following a gaussian envelope, in this case we use the transfer matrix method. We find that tuning of the total reflectance for TE and TM polarizations for all incident angles in a specific spectral range is possible if we make a proper choice of the parameters characterizing the structure.

Keywords: Reflectance; One-dimensional photonic crystal

1. Introducción

El análisis teórico y experimental de estructuras ópticas laminadas ha atraído la atención de los investigadores continuamente [1] dado su amplio uso tecnológico e interés científico. A partir de los trabajos de E. Yablonovitch [2] y S. John [3] se empieza a considerar el estudio de nuevos materiales conocidos como cristales fotónicos (CF). Un caso particular de estos son los cristales fotónicos unidimensionales (CF1D) que se pueden construir de manera similar a las estructuras laminadas y cuyas propiedades ópticas presentan características nuevas que recientemente han empezado a estudiarse. Este tipo de estructuras pueden construirse por ejemplo para formar espejos ópticos omnidireccionales, con los que se puede obtener una reflectancia máxima para la radiación electromagnética de polarizaciones TE y TM en diferentes rangos de longitud de onda y para todos los ángulos de incidencia.

Existen trabajos que presentan este tipo de estudios para estructuras constituidas por uno o más bloques de CF1D con índices de refracción alto y bajo colocados alternadamente [4], o siguiendo una secuencia cuasiperiódica como la de Fibonacci [5]. Aquí proponemos una estructura cuyo índice de refracción sigue una envolvente gaussiana que se encuentra en medio de dos capas de anchos iguales y diferentes en general a los de la envolvente gaussiana.

2. Modelo

Presentamos un caso particular de CF1D formado por un número impar de placas ($2N+1$) de anchos d_{par} y d_{impar} , los índices de refracción de las capas que tengan un número par, se mantendrán constantes e iguales y los de las capas que tengan un número impar se harán variar de acuerdo a una envolvente gaussiana dada por:

$$n(x) = (n_{\max} - n_{\min}) \exp(-x^2 / \sigma^2) + n_{\min}$$

En este caso, x corresponde a la posición de las capas impares, n_{\max} es el índice de refracción máximo de la estructura, n_{\min} es el índice de refracción mínimo, y $\sigma/\sqrt{2}$ es la desviación estándar de la envolvente. $L = db + N \cdot d_{par} + (N+1) \cdot d_{impar}$ es el ancho total del CF1D, y definimos $\sigma = L/4$.

3. Teoría

Para calcular la reflectancia, partimos de la ecuación de onda de Maxwell que resolvemos para cada capa del CF1D. Teniendo en cuenta que las componentes de los campos eléctrico y magnético de la radiación que son paralelas a las interfaces de la estructura se conservan, podemos construir la matriz de transferencia que se expresa como: $M = D_0^{-1} \left[\prod_{l=1}^{2N+1} A_l \right] D_s$, en donde:

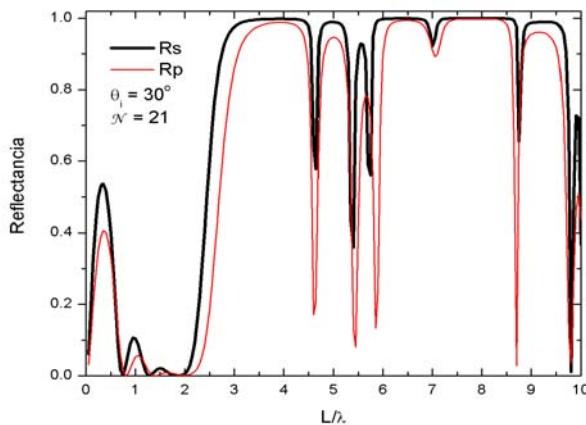


Figura 1. Reflectancia de un CF1D de índices de refracción dados por la envolvente gaussiana con los índices de refracción de las capas pares iguales a 1.0. Los parámetros son: $N=23, n_{max}=3.5$. La reflectancia es uno para las polarizaciones TE y TM solo para ciertos valores del cociente entre la longitud total de la estructura y la longitud de onda de la radiación incidente.

$$D_j = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ n_j \cos \theta_j & -n_j \cos \theta_j \end{pmatrix}$$

para polarización TE,

$$D_j = \begin{pmatrix} \cos \theta_j & \cos \theta_j \\ n_j & -n_j \end{pmatrix}$$

para polarización TM, $j = 0, s$ que corresponde a los medios incidente y sustrato y

$$A_l = \begin{pmatrix} \cos \phi_l & \frac{i}{\alpha_l} \operatorname{sen} \phi_l \\ i \alpha_l \operatorname{sen} \phi_l & \cos \phi_l \end{pmatrix}$$

con $\phi_l = \frac{2\pi}{\lambda} d_l n_l \cos \theta_l$ y $\alpha_l = n_l \cos \theta_l$ o $\alpha_l = n_l / \cos \theta_l$ para polarizaciones TE y TM respectivamente. Finalmente, la reflectancia está dada por $R = \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2$.

4. Resultados y Discusión

En las figuras 1 y 2 se presentan resultados de la reflectancia en función del cociente L/λ y del ángulo de incidencia θ_i para $N=10$ con lo que la estructura tendrá un total de 23 capas, $db=10$, $d_{par}=1$, $d_{impar}=1$. Los

índices de refracción máximo y mínimo son 3.5 y 1. respectivamente, en la primera figura, el ángulo de incidencia es de 30° y en la segunda figura el cociente L/λ se elige igual a 8.0 y se varía el ángulo de incidencia. Observamos de las dos primeras figuras, que es posible obtener una reflectancia de uno para ángulos de incidencia que van de cero a casi 40° para valores del cociente del

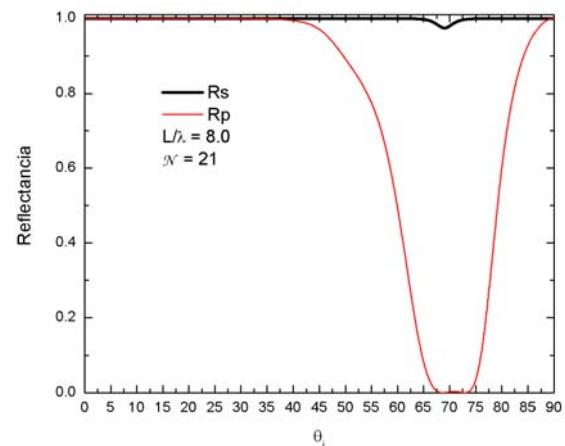


Figura 2. Reflectancia para los mismos parámetros que en la figura anterior. En este caso vemos que se obtiene una reflectancia de uno para las polarizaciones TE y TM para ángulos de incidencia que van de 0° a 90°.

ancho total de la estructura sobre la longitud de onda incidente que van desde 7.78 hasta 8.25. Se obtiene el mismo resultado si dejamos fijo el ancho db y cambiamos los anchos de las capas que siguen la envolvente a distintos valores pero manteniendo la relación $d_{par} = d_{impar}$. En las figuras 3 y 4 se presentan resultados similares, en este caso el número total de capas es 91, el índice de refracción máximo es 3.0, y el mínimo es 1.5. En este caso, si mantenemos la relación de los anchos de capas de la estructura de modo que se cumpla que: $d_{par} = d_{impar} = db/2$, obtenemos el mismo resultado para la reflectancia de ambas polarizaciones para todos los ángulos de incidencia y valores de L/λ que van de 10.6 a 14.0. Se observa que aquí la reflectancia es uno para las polarizaciones TE y TM y todos los ángulos de incidencia, aunque en el caso de la reflectancia Rp se observa un mínimo que corresponde al ángulo de Brewster para el cuál la radiación de polarización TM se transmite a través de la estructura ya que el gap de los modos prohibidos para modos TM que se propagan en la estructura, se hace cero. Los resultados muestran también que las estructuras son escalables por lo que estos espejos omidireccionales (EO) se pueden diseñar para cualquier valor de L y λ que cumpla con los valores encontrados. De las figuras observamos que eligiendo los parámetros del EO adecuadamente, podemos obtener una reflectancia de uno para las polarizaciones TE y TM y todos los ángulos de incidencia.

5. Conclusiones

Presentamos un nuevo EO cuya estructura se forma haciendo que los índices de refracción de las placas en posiciones impares sigan una envolvente gaussiana, mientras que las de posiciones pares mantienen un valor

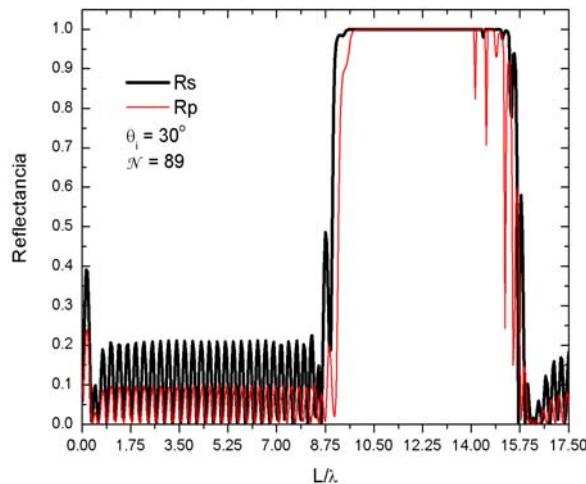


Figura 3. Reflectancia de un CF1D de índices de refracción dados por la envolvente gaussiana con los índices de refracción de las capas pares iguales a 1.5. Los parámetros son: $N=91$, $n_{max}=3.0$. La reflectancia es uno para las polarizaciones TE y TM solo para ciertos valores del cociente entre la longitud total de la estructura y la longitud de onda de la radiación incidente.

fijo del índice de refracción. Variando adecuadamente los parámetros de la estructura, es posible obtener una reflectancia de uno para las polarizaciones TE y TM y todos los ángulos de incidencia, pudiéndose también ajustar la región de longitudes de onda para la que se deseé este resultado. Los resultados presentados aquí sugieren la necesidad de optimizar los valores de los parámetros mediante un tratamiento teórico o numérico adecuado.

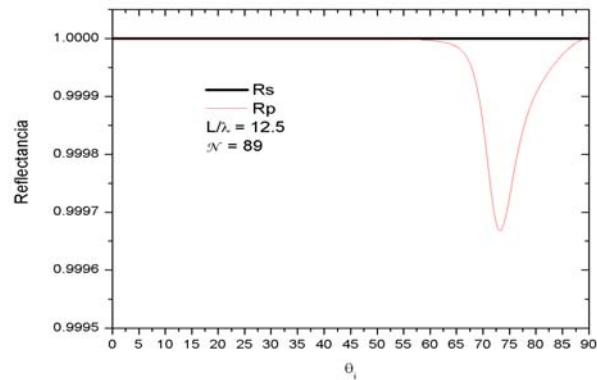


Figura 4. Reflectancia para los mismos parámetros que en la figura anterior. En este caso vemos que se obtiene una reflectancia de uno para las polarizaciones TE y TM para todos los ángulos de incidencia.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la VIEP-BUAP a través del proyecto 32/G/EXC/05.

Referencias

- [1] Yeh, P., *Optical Waves in Layered Media*, (Wiley, NY, 1998).
- [2] E. Yablonovitch, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2059 (1987) .S. John, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2486 (1987).Jian Zi, Jun Wan, and Chun Zhang, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 2084 (1988). D. Lusk, I. Abdulhalim, and F. Placido, *Optics Communications* **198**, 273 (2001).