

文章编号:1001-2486(2005)04-0045-03

一维金属-介质光子晶体的特性

高 强, 闫敦豹, 袁乃昌, 张国华

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要:利用特征矩阵法对一维金属-介质光子晶体的特性进行了计算,发现此种光子晶体具有可见光透明,微波、紫外高反的光谱特性,而且存在比一维介质光子晶体更宽、反射更强的全向带隙。

关键词:一维金属-介质光子晶体;PBG结构;特征矩阵;共振隧穿

中图分类号:O469 文献标识码:B

The Properties of One-dimensional Metallodielectric Photonic Crystals

GAO Qiang, YAN Dun-bao, YUAN Nai-chang, ZHANG Guo-hua

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:An eigen matrix method is introduced to obtain the properties of one-dimensional metallodielectric photonic crystals. The results show that this crystals have the spectra of being transparent in the visible range, highly reflecting the ultraviolet light and microwaves, and an even wider omni-directional band gap in which the reflection is higher than the dielectric photonic crystals.

Key words:one-dimensional metallodielectric photonic crystals;PBG structure; eigen matrix; resonant tunneling

光子晶体(Photonic Crystals)是一种折射率周期变化的人工微结构材料,其典型结构为一个折射率周期变化的三维物体。光子在这类材料中的行为类似于电子在凝聚态物质中的行为,可能存在着类似于半导体能带结构中的禁带,称之为光子带隙(Photonic Band-Gap,简称为PBG)。频率落在带隙内的电磁波将不能传播,它的这种特性具有极大的理论价值和潜在的应用前景。

相对而言,一维光子晶体在结构上最为简单,易于制备,而且存在与多维光子晶体类似的全向能隙结构。但传统的一维介质光子晶体的带隙不宽、带内反射不是很强,特别是禁带受角度、极化的影响很大。为了克服这些缺点,在介质中插入金属薄膜构成新的PBG结构——金属-介质光子晶体^[1-2]。

1 特征矩阵法

一维光子晶体最简单的模型是由两种不同相对介电常量(ϵ_a 、 ϵ_b)、厚度(a 、 b)的薄介质层交替构成的。如图1所示,空间周期为 $d = a + b$ 。由于介质交界面处的电磁场满足边界条件,每一介质层与光波的相互作用可由其特征矩阵完全决定。介质层两边的场矢量 E_I 、 H_I 、 E_{II} 、 H_{II} 的模可用特征矩阵联系起来:

$$\begin{pmatrix} E_I \\ H_I \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} E_{II} \\ H_{II} \end{pmatrix} \quad (1)$$

下面就单介质层的情况来导出特征矩阵 M 的表达式。图2所示, E_0 、 H_0 表示界面I的 n_a 一侧的场矢量, E_I 、 H_I 表示界面I的 n_b 一侧的场矢量, E_{II} 、 H_{II} 表示界面II的 n_c 一侧的场矢量。在界面I

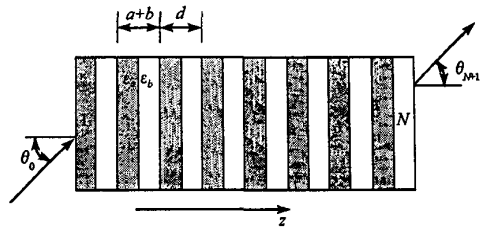


图1 一维光子晶体的模型

Fig.1 The model of one-dimensional photonic crystals

* 收稿日期:2005-03-12

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:高强(1979-),男,博士生。

上有人射光波 E_{i1} 、反射光波 E_{r1} 、透射光波 E_{t1} 以及由介质 n_b 入射到界面 I 上的光波 E'_{r2} 。

根据电磁场边界条件,由界面 I、II 处的电场 E 和磁场 H 的切向分量连续,可以求出垂直 (p) 和水平 (s) 极化时单介质层的特征矩阵^[5]:

$$M_j = \begin{vmatrix} \cos\delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ -i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{vmatrix} \quad (2)$$

$$\text{式中} \begin{cases} \delta_j = -\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_j} h_j \cos\theta_j \\ \eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \sqrt{\epsilon_j} \cos\theta_j \end{cases} \quad (\text{垂直极化}); \begin{cases} \delta_j = -\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_j} h_j \cos\theta_j \\ \eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{\sqrt{\epsilon_j}}{\cos\theta_j} \end{cases} \quad (\text{水平极化}).$$

对于一维周期性结构的情况(图 1),逐层应用(2)式的单介质层特征矩阵方程可得下式:

$$\begin{vmatrix} E_1 \\ H_1 \end{vmatrix} = M_1 M_2 \cdots M_N \begin{vmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{vmatrix} = M_a M_b \cdots M_b M_a \begin{vmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{vmatrix} = M \begin{vmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{vmatrix} \quad (3)$$

式中 $M = M_a M_b \cdots M_b M_a$ 就是一维周期性结构的特征矩阵。

得到 M 后,在第 I 个界面和第 $N+1$ 个界面上列出场分量方程,可求得

$$\text{反射系数 } r = \frac{(m_{11} - \eta_0^{-1} \eta_{N+1} m_{22}) + (\eta_{N+1} m_{12} - \eta_0^{-1} m_{21})}{(m_{11} + \eta_0^{-1} \eta_{N+1} m_{22}) + (\eta_{N+1} m_{12} + \eta_0^{-1} m_{21})}$$

$$\text{反射率 } R = r \cdot r^*$$

$$\text{透射系数 } t = \frac{2C_{0,N+1}}{(m_{11} + \eta_0^{-1} \eta_{N+1} m_{22}) + (\eta_{N+1} m_{12} + \eta_0^{-1} m_{21})}$$

$$\text{其中 } C_{0,N+1} = \begin{cases} \cos\theta_0 / \cos\theta_{N+1} & \text{对垂直极化} \\ 1 & \text{对水平极化} \end{cases}, \theta_0, \theta_{N+1} \text{ 对应图 1 中模型的人射角与透射角。}$$

透射率 $T = t \cdot t^*$, 应满足 $R + T = 1$ 。

2 计算结果

2.1 金属与金属—介质光子晶体的透射特性

考虑单个厚度为 40nm 的 Ag 层,图 3 虚线显示它对可见光的透射性能很差,几乎是不透明的。但如果把这个厚 Ag 层等分成 4 块,块间填充厚度为 110nm 的 MgF_2 介质时,情况发生了很大的变化,此结构对可见光的透射率达到 60%。这主要是由于在可见光波段金属—介质光子晶体有很强的共振隧穿效应,从而有较高的透射率。

2.2 介质光子晶体与金属—介质光子晶体的反射特性

考虑以 $ZnS(61.7nm)/MgF_2(105nm)$ 为基元交替组成的 3.5 周期介质光子晶体和以 $ZnS(61.7nm)/MgF_2(52.5nm)-Ag(19nm)-MgF_2(52.5nm)$ 为基元交替组成的 3.5 周期金属—介质光子晶体(ZnS 的介电常数为 5.5225、 MgF_2 的为 1.9044、Ag 光学量见文献[3]、[4])。图 4 显示金属—介质光子晶体比传统的介质光子晶体具有频带更宽、反射率更高的禁带。结果与文献[2]的几乎一致。

图 5 还显示金属—介质光子晶体的全向反射带隙宽度变大,更为重要的是它已经对入射角和极化不太敏感;而介质光子晶体却恰恰相反。出现这一结果主要因为可见光波段金属—介质光子晶体有很强的共振隧穿效应,可以大大降低金属层对电磁波的吸收,损耗很小,对于入射光的极化选择也不明显。

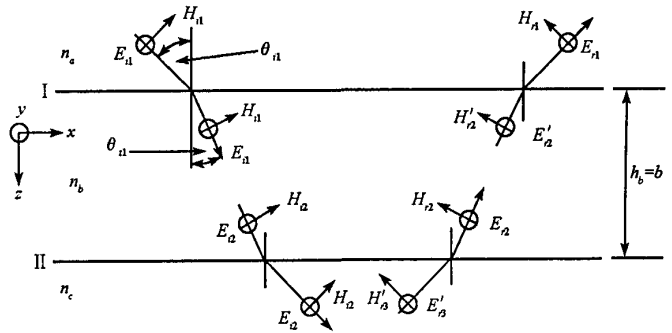


图 2 任一中间介质层中的光传播情况
Fig.2 The propagation of light in any medium

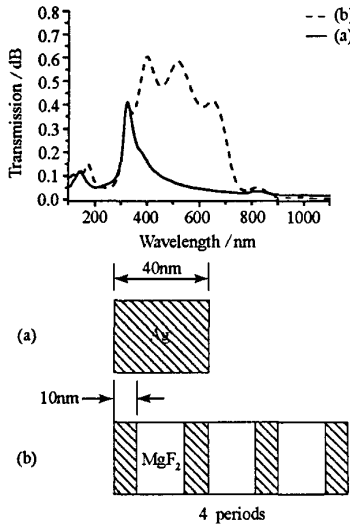


图3 金属 Ag 与 Ag/MgF₂ 光子晶体的透射率
Fig.3 The transmission of Ag and Ag/MgF₂

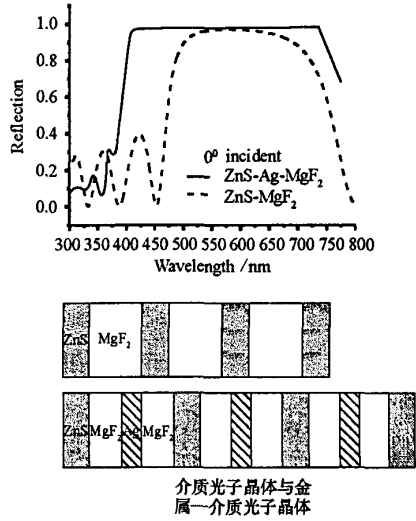


图4 介电光子晶体与金属-介电光子晶体的反射率(垂直入射)
Fig.4 The reflection of dielectric and metallodielectric photonic crystals in normal incidence

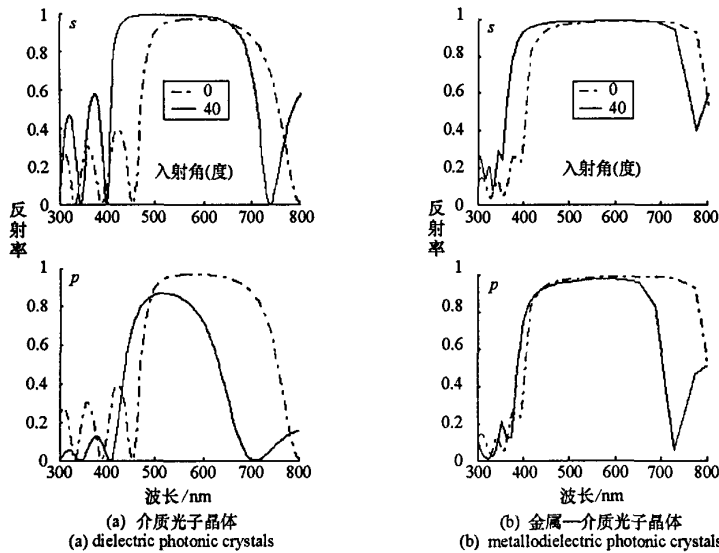


图5 不同极化和不同入射角下的反射率
Fig.5 The reflection in different polarizations and incident angles

3 结论

对一维金属-介质光子晶体的特性进行了详细的计算与分析,利用这些特性可以把它广泛应用于透明导体材料、热反射窗、全向高反射器的设计等。可以预见,金属-介质-一维多层膜光子晶体将开辟新的研究方向,具有更为广泛的应用前景。

参考文献:

[1] Bloemer M J, Pethel A S, Dowling J P, et al. Transparent Metallo-dielectric One-dimensional Photonic Band-gap Structures[J]. Journal Of Applied Physics, 1998, 83(5): 2377 - 2383.
 [2] Ye Yong-Hong, Bader G, Truong Vo-Van. Low-loss One-dimensional Metallodielectric Photonic Crystals Fabricated by Metallic Insertions in a Multilayer Dielectric Structure[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(3): 235 - 237.
 [3] Knittl Z. Optics of Thin Films[M]. Wiley, New York, 1976.
 [4] Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. Academic, New York, 1985.
 [5] 王辉,李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J]. 物理学报, 2001, 50(11): 2172 - 2178.

