

一维电介质-金属光子晶体的光学特性研究

罗亚衡, 王永生*, 王东栋, 邓立儿, 孙建

北京交通大学光电子技术研究所, 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 利用传输矩阵方法, 研究了一维电介质-金属光子晶体的光学特性, 该光子晶体通过在 Si/SiO₂ 组成的电介质型光子晶体中插入一定厚度 Al 层形成。计算结果表明, 金属层的引入可以有效提高反射效率, [Si(46 nm)/SiO₂(60 nm)/Al(10 nm)/SiO₂(60 nm)]⁵ 结构的单位周期传输衰减从 [Si(46 nm)/SiO₂(120 nm)]⁵ 的 7.2 dB 增大到了 20 dB; 可以得到更宽频率范围的全方向反射带隙, 例如 [Si(46 nm)/SiO₂(60 nm)/Al(30 nm)/SiO₂(60 nm)]⁵ 结构即可提供 550 nm 带宽的全方向反射; 同时讨论了金属吸收、金属层厚度及插入位置对其光学特性的影响。这种电介质-金属光子晶体有望作为性能优异的光学反射镜得到应用。

关键词 光子晶体; 光子禁带; 传输矩阵法

中图分类号: O734. +2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0593(2008)02-0256-04

引言

光子晶体, 又称为光子禁带材料^[1, 2], 是一种折射率按一定空间周期性变化的新型光学材料。由于多重 Bragg 散射的作用, 光在这类材料中传播时具有类似电子在半导体材料中的某些特性, 一些频率范围的光不能在其内部传播, 即出现了光子禁带。由于其新异的物理特性和重要的应用前景^[3-5], 光子晶体的相关研究近年来引起了广泛的关注^[6, 7]。

为了避免材料自身的吸收, 目前研究的光子晶体一般由两种或者两种以上的电介质材料构成, 在所关心的频率范围内这些材料均可近似视为折射率为常数的无损耗介质。这类光子晶体的光子禁带通常宽度有限, 约为带隙中心频率的 25%, 单位周期的传输衰减也仅有 3~4 dB^[8]。近来的研究工作表明, 在光子晶体中引入金属材料有望得到更好的光学特性。Ward^[9]等利用周期性 Al-电介质多层薄膜结构在一个较窄的频率范围内将反射率从体金属的 95% 提高到 98%; Ye Yong-hong^[8]和周鹏^[10]等通过在电介质型光子晶体中插入金属 Ag 层得到了比原来更宽的全方向反射带隙。

与金属 Ag 相比, 金属 Al 的介电系数更大, 如果在光子晶体介质层中插入 Al 层, 更大的介电系数比值对光子禁带

效应的增强应该更为有利, 问题在于光子晶体中金属 Al 的吸收比金属 Ag 更为严重^[11]。在本文中我们将从理论上研究在电介质光子晶体中插入 Al 层后的光学特性。为了便于比较, 计算中所用的电介质光子晶体结构与文献[10]基本相同, 所选择的材料同样为 Si 和 SiO₂。所有材料的折射率和消光系数都来源于文献^[12], 计算所用的方法为传输矩阵法。

1 传输矩阵方法

根据传输矩阵理论^[13], 对于一个 [A(a)/B(b)]^N 结构的一维光子晶体 (A, B 为组成光子晶体的两种材料, a, b 为各自的厚度, N 是周期数), 光在第 k 层介质中的传输特性可以用一个 2 × 2 的矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} \cos\delta_k & -i\eta_k^{-1}\sin\delta_k \\ -i\eta_k\sin\delta_k & \cos\delta_k \end{bmatrix}$$

其中 $\delta_k = (2\pi/\lambda) n_k d_k \cos\theta_k$, n_k 和 d_k 是第 k 层介质的折射率和几何厚度, θ_k 为入射角。 η_k 是介质的有效导纳, 对于 P 偏振光, $\eta_k = n_k / \cos\theta_k$; 对于 S 偏振光, $\eta_k = n_k \cos\theta_k$ 。

以 P 偏振光为例, 如果材料 A 和 B 的折射率分别为 n_1 和 n_2 , 则总的传输矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} \cos\delta_1 & -i\eta_1^{-1}\sin\delta_1 \\ -i\eta_1\sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\delta_2 & -i\eta_2^{-1}\sin\delta_2 \\ -i\eta_2\sin\delta_2 & \cos\delta_2 \end{bmatrix}^N = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$$

(式中 $\delta_1 = (2\pi/\lambda) n_1 a \cos\theta_1$; $\delta_2 = (2\pi/\lambda) n_2 b \cos\theta_2$; $\eta_1 = n_1 / \cos\theta_1$; $\eta_2 = n_2 / \cos\theta_2$; θ_1 和 θ_2 分别为光在两种材料中的入

收稿日期: 2006-11-01, 修订日期: 2007-02-16

基金项目: 国家“973”基金项目(2003CB314707)和北京交通大学博士生科技创新基金项目(4812)资助

作者简介: 罗亚衡, 女, 1983 年生, 北京交通大学光电子技术研究所硕士研究生 *通讯联系人 e-mail: yshwang@center.njtu.edu.cn

射角)。

可求得光子晶体总的反射系数 r 和透射系数 t 分别为^[14]

$$r = \frac{M_{11}\eta_0 + M_{12}\eta_0\eta_{N+1} - M_{21} - M_{22}\eta_{N+1}}{M_{11}\eta_0 + M_{12}\eta_0\eta_{N+1} + M_{21} + M_{22}\eta_{N+1}}$$

$$t = \frac{2\eta_0}{M_{11}\eta_0 + M_{12}\eta_0\eta_{N+1} + M_{21} + M_{22}\eta_{N+1}}$$

(η_0 和 η_{N+1} 为光子晶体两侧的有效导纳)。

则光子晶体的透射率 T , 反射率 R 和吸收 A 分别为

$$T = t \cdot t^*$$

$$R = r \cdot r^*$$

$$A = 1 - R - T$$

对于色散、吸收性材料, 需要将其折射率用相应的对频率有显式依赖关系的复数来表示。

2 计算结果和讨论

我们首先比较了正入射情况下, Al 层插入前后一维光子晶体的光学传输特性, 计算结果如图 1 所示。对于单纯的电介质光子晶体 [Si (46 nm)/SiO₂ (120 nm)]⁵ (简称为样品 A), 体系在 550~950 nm 的范围内出现了明显的光子禁带, 最小透射出现在 680 nm 处, 透射率约为 2.59×10^{-4} ; 禁带以外在 500 和 1 030 nm 附近出现了两个光子通带, 最大透射率达到了 0.94。对于插入 Al 层后的光子晶体 [Si (46 nm)/SiO₂ (60 nm)/Al (10 nm)/SiO₂ (60 nm)]⁵ (简称为样品 B), 在 550~950 nm 范围内透射率明显减小, 最小透射率出现在 594 nm, 约为 1.05×10^{-10} ; 在光子晶体的两个光子通带内, 与样品 1 相比, 样品 2 的透射率也出现了明显的下降, 尤其在 550 nm 的短波方向, 样品 2 的最大透射率仅为 4.344×10^{-4} 。

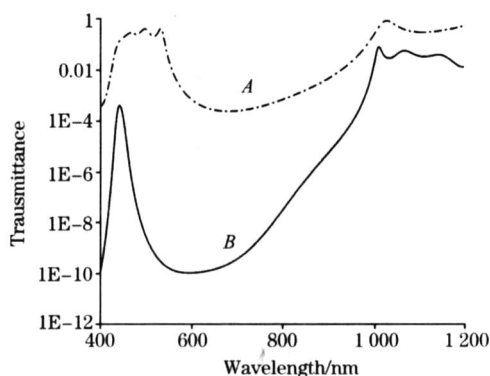


Fig 1 Transmittance spectra at normal incidence

A: [Si (46 nm)/SiO₂ (120 nm)]⁵;

B: [Si (46 nm)/SiO₂ (60 nm)/Al (10 nm)/SiO₂ (60 nm)]⁵

为了确定样品 2 中透射率减小的来源, 我们分别计算了插入不同厚度 Al 层后在正入射情况下, 样品 [Si (46 nm)/SiO₂ (60 nm)/Al (x nm)/SiO₂ (60 nm)]⁵ (Al 层的厚度分别为 $x = 10, 20, 30, 50$ nm) 的吸收, 结果如图 2 所示, 在 400~500 nm 和 1 000~1 200 nm 波长范围内出现了明显的吸收, 这说明了图 1 中样品 B 在两个光子通带中透射率的降低是由

于光子晶体自身的吸收造成的。其中 1 000~1 200 nm 波段的吸收来源于电介质-金属光子晶体中的共振隧穿效应^[15, 16]。随着金属层厚度的增加, 产生共振的强度逐渐减小, 吸收也逐渐减小, 当金属层厚度大于 50 nm 时, 在该处金属的吸收就基本可以忽略; 而 400~500 nm 波段的吸收峰主要来源于 Si 的吸收^[10], 基本不随金属层的厚度变化。同时在 500 到 1 000 nm 的波长范围内, 不论金属层厚度取多大, 光子晶体都没有出现明显的吸收, 这说明图 1 中样品 B 在相应波长范围内极低的透射率源于光子禁带效应, 而与吸收无关。和样品 A 相比, 光子在样品 B 中单位周期的传输衰减由 7.2 dB (衰减定义为 $\text{dB} = -10 \lg(I/I_0)$; 其中 I_0 为入射光强, I 为出射光强。)增加到了 20 dB。这意味着与电介质型光子晶体相比, 更少周期的金属-电介质光子晶体就可以提供同样的传输衰减。

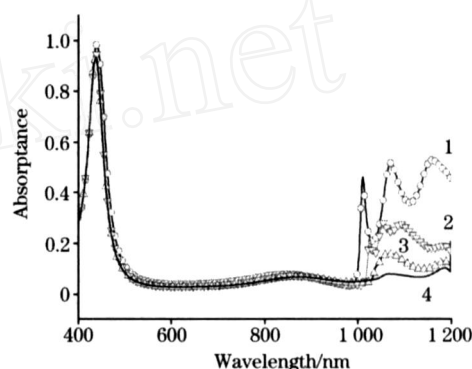


Fig 2 Absorbance spectra at normal incidence for [Si (46 nm)/SiO₂ (60 nm)/Al (x nm)/SiO₂ (160 nm)]⁵, where $x = 10, 20, 30$ and 50 nm, respectively

1: 10 nm; 2: 20 nm; 3: 30 nm; 4: 50 nm

图 3(b) 为插入 Al 层后一维金属-电介质光子晶体的全方向反射特性。选择的结构为 [Si (46 nm)/SiO₂ (60 nm)/Al (30 nm)/SiO₂ (60 nm)]⁵ (简称为样品 C)。从图中可以看出, 正入射时 S 光和 P 光是简并的, 反射率曲线完全一样, 在 500 nm 长波方向都出现了光子禁带, 其中 500~1 030 nm 波段间反射率超过 90%, 1 030 nm 以后的波段由于吸收作用反射率有所减弱, 但也在 84% 以上。随着角度的增加, S 光反射率曲线向短波方向移动, 禁带内的反射率逐渐上升, 当角度增加到 89° 时, 400~1 200 nm 频率范围都可看作光子禁带, 除 400~450 nm 处的反射率为 90%~98%, 其余波段的反射率均在 99% 以上; P 光的禁带宽度随入射角的增加而减小, 入射角为 89° 时, 反射率 90% 以上的高反带为 650~1 200 nm。总的说来, 两种偏振模式下的全方向高反带宽度为 550 nm。

图 3(a) 为不含金属插入层的样品 1 的反射率曲线。正入射情况下在 560~960 nm 出现反射率 96% 以上的光子禁带。当入射角增加时, 禁带内的反射率基本不发生变化, 但禁带宽度对角度变化敏感。尤其是 P 光, 禁带宽度随入射角的增大迅速变窄, 两种偏振状态下的反射率为 90% 以上的全方向光子禁带约从 660 至 790 nm, 不到样品 C 的 1/4。而在文献

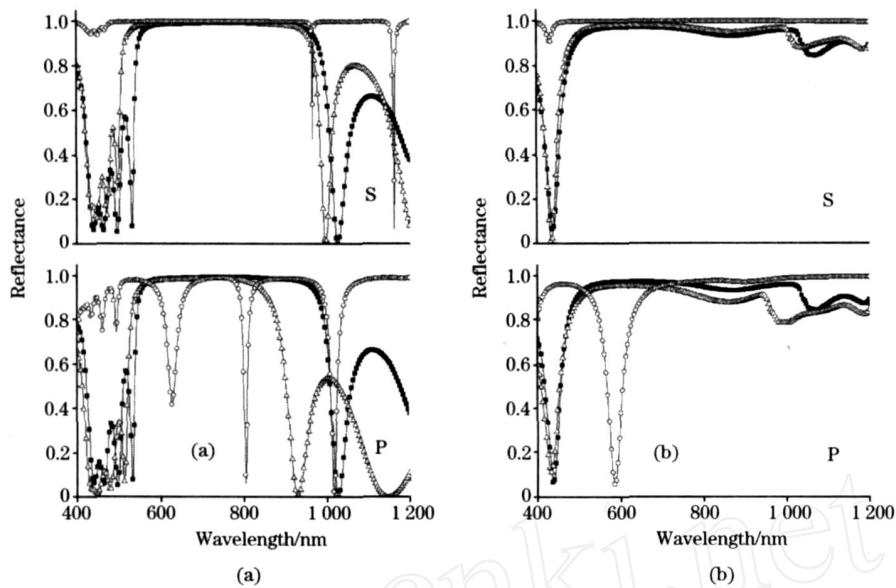


Fig 3 Reflectance spectra of S and P polarizations at the incidence of 0° , 45° and 89° ;
(a) : Sample A [Si(46 nm)/SiO₂(120 nm)]⁵; (b) : Sample C [Si(46 nm)/SiO₂(60 nm)/Al(30 nm)/SiO₂(60 nm)]⁵
■: 0° ; ●: 45° ; ○: 89°

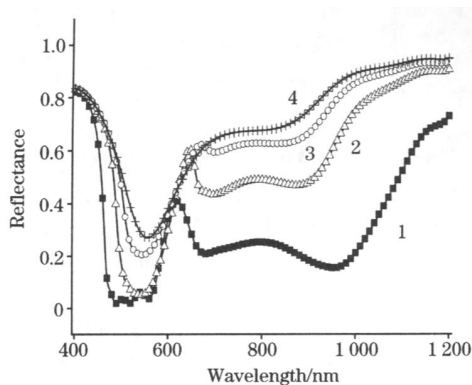


Fig 4 Reflectance spectra at normal incidence for [Si(23 nm)/Al(x)/Si(23 nm)/SiO₂(120 nm)]⁵, when "x" stands for 10, 20, 30 and 50 nm
1: 10 nm; 2: 20 nm; 3: 30 nm; 4: 50 nm

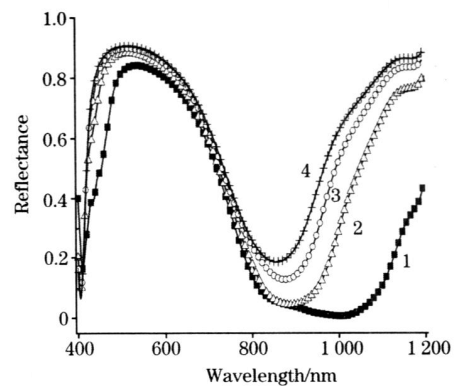


Fig 5 Reflectance spectra at normal incidence for [Si(46 nm)/Al(x)/SiO₂(120 nm)]⁵, when "x" stands for 10, 20, 30 and 50 nm
1: 10 nm; 2: 20 nm; 3: 30 nm; 4: 50 nm

[10]中,金属插层为与样品 C 相同厚度的 Ag 层,当入射角从 0° 变化到 60° 时,得到的 S 光和 P 光全方向高反带宽度约为 400 nm,比我们选用 Al 层的样品 C 小了 $1/4$ 。

另外计算表明,金属插层的位置对光子晶体的光学特性的影响很大。当 Al 层位于 Si 层中央(如图 4 所示)或位于 Si 和 SiO₂ 层中间(如图 5 所示)时,光子晶体的光学特性变得更差,甚至不能提供明显的光子带隙。我们认为,这是由于 Si 的介电系数远大于 SiO₂, Si/Al 界面的反射性能比 SiO₂/Al 界面差造成的。

3 结 论

从理论上研究了由 Si, SiO₂ 及 Al 组成的一维电介质-金

属光子晶体的光学特性,结果发现在 SiO₂ 层中插入金属 Al 层后,光子晶体单位周期的传输衰减由每周期 7.2 dB 提高到了每周期 20 dB,全方向带隙显著扩大,采用 5 周期结构获得了宽度达到 550 nm 的全角度带隙。这一特性可以用来制作尺寸更小,损耗更低,禁带更宽的全方向光子禁带器件。同时讨论了金属插入层位置和吸收对光子晶体光学特性的影响。

参 考 文 献

- [1] Yablonovitch E. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(20): 2059.
- [2] John S. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(23): 2486.
- [3] Scalora M, Dowling J P, Bowden C M, et al. Phys. Rev. Lett., 1994, 73: 1368.
- [4] Joannopoulos J D, Villeneuve P R, Fan S. Nature, 1997, 386: 143.
- [5] Scalora M, Dowling J P, Bloemer M J, et al. J. Appl. Phys., 1994, 76: 2023.
- [6] ZHOU Ren-long, PENG Jing-cui, LI Hong-jian, et al (周仁龙, 彭景翠, 李宏建, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2003, 23(4): 657.
- [7] XIA Hui, PENG Jing-cui, ZHANG Bo-yun, et al (夏辉, 彭景翠, 张波云, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2002, 22(5): 734.
- [8] Ye Yong-hong, Bader Georges, Truong Vo-Van. Appl. Phys. Lett., 2000, 77: 235.
- [9] Ward A J, Pendry J B, Stewart W J. J. Phys. Condens Matter, 1995, 7(10): 2217.
- [10] ZHOU Peng, YOU Hai-yang, WANG Song-you, et al (周鹏, 游海洋, 王松有, 等). Acta Phys. Sin. (物理学报), 2002, 51(10): 2276.
- [11] El-Kady I, Sigalas M M, Biswas R, et al. Phys. Rev. B, 2000, 62(23): 15299.
- [12] Palik E D. Handbook of Optical Constant of Solids. London: Academic Press Inc. Ltd., 1985.
- [13] BO Tao, CHEN Wei-zong, FENG Yu, et al (卜涛, 陈慰宗, 冯宇, 等). Acta Photonica Sinica (光子学报), 2002, 31(9): 1128.
- [14] WANG Hui, LI Yong-ping (王辉, 李永平). Acta Phys. Sin. (物理学报), 2001, 50(11): 2172.
- [15] Bloemer M, Scalora M. Appl. Phys. Lett., 1998, 72: 1676.
- [16] Scalora M, Bloemer M J, Pethel A S, et al. J. Appl. Phys., 1998, 83: 2377.

Optical Properties of One-Dimensional Metallodielectric Photonic Crystals

LUO Ya-heng, WANG Yong-sheng*, WANG Dong-dong, DENG Li-er, SUN Jian

Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Institute of Optoelectronic Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract The optical characteristics of one-dimensional metallodielectric photonic crystals (MDPC), constructed by inserting metal aluminum layers of certain thickness into the Si/SiO₂ system, were studied theoretically with the transfer matrix method. The results show that the reflection efficiency can be enhanced considerably after the introduction of metallic layers, e. g. the rejection level of each period increased from 7.2 dB ([Si(46 nm)/SiO₂(120 nm)]⁵) to 20 dB ([Si(46 nm)/SiO₂(60 nm)/Al(10 nm)/SiO₂(60 nm)]⁵). In addition, high omnidirectional reflection band with broader width can be obtained, e. g. bandwidth of 550 nm can be offered with [Si(46 nm)/SiO₂(60 nm)/Al(30 nm)/SiO₂(60 nm)]⁵. Rules of how the absorption, thickness and position of the metal layers affect the optical characteristics of the MDPC are also discussed. These MDPC structures may be used as compact-size, low-loss and broad-band optical reflectors.

Keywords Photonic crystals; Photonic bandgap; Transfer matrix

(Received Nov. 1, 2006; accepted Feb. 16, 2007)

* Corresponding author