

文章编号:1001-5078(2013)06-0658-05

· 光子晶体 ·

入射角和杂质吸收对一维光子晶体反射镜的影响

邢 晓, 王文军, 李淑红, 刘云龙, 张 栋, 史 强, 高学喜, 张丙元
(山东省光通信科学与技术重点实验室, 聊城大学物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059)

摘 要:利用复折射率的方法和膜系设计软件 TFCalc 分别研究了入射角和杂质吸收对一维光子晶体反射镜反射谱和透射谱的影响。结果表明:随着入射角的增大,一维光子晶体反射镜的禁带中心位置蓝移,禁带宽度减小。入射角小于 60° 时,带隙势阱深度几乎不变,大于 60° 后带隙势阱深度变化较大。当入射角无限接近 90° 时,P 偏振光的带隙几乎消失,S 偏振光的带隙几乎保留。杂质吸收对于一维光子晶体的反射谱和透射谱显著影响时的临界消光系数值分别是 0.001 和 0.0003。高折射率介质层的杂质吸收对光谱的影响较小。

关键词:一维光子晶体;入射角;偏振;消光系数;带隙宽度

中图分类号:O484.4 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2013.06.014

Effects of incident angle and impurity absorption on one-dimensional photonic crystal reflector

XING Xiao, WANG Wen-jun, LI Shu-hong, LIU Yun-long, ZHANG Dong
SHI Qiang, GAO Xue-xi, ZHANG Bing-yuan

(Shandong Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract: In order to investigate the influence of incident angle and impurity absorption on one-dimensional photonic crystal reflectors, the complex refractive index method and TFCalc software are adopted. The results show that the centre of the band gap moves to the short-wave direction horizontally, and the bandgap width gets narrower, as the incident angle increases. When the incident angle is below 60° , the depth of the band gap is almost unchanged, while the incident angle is over 60° , the depth of the band gap largely changed. As the incident angle gets close to 90° infinitely, the band gap for P polarization light nearly disappeared, however, the band gap for S polarization light almost reserved. When impurity absorption remarkably affects the transmissivity and reflectivity of the one-dimensional photonic crystal, the critical values of the extinction coefficient are 0.0003 and 0.001, respectively. The absorption of the high-refractive index films affects the spectra less.

Key words: one-dimensional photonic crystal; incident angle; polarization; extinction coefficient; band gap

1 引言

光子晶体的概念自 1987 年分别由 E. Yablono-vit 和 S. John 提出后^[1-2], 由于其在能带方面的性质, 被应用到许多光学设备中, 如发光二极管、光学滤波器、光学反射镜、光学传感器、光开关、光子晶体光纤和光存储器等^[3-7]。一维光子晶体是由高低折射率层交替制备而成, 相对于二维和三维光子晶体

来说, 制备工艺简单, 因此近年来对它的报道很

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61275147); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(No. BS2009DX014); 山东省科技攻关计划项目(No. 2010GGX10127); 聊城大学重点科研基金项目资助。

作者简介:邢 晓(1987-), 女, 硕士研究生, 主要从事真空镀膜和一维光子晶体方面的研究。E-mail: xingxiao2010@163.com

收稿日期:2012-12-06

多^[8-13]。报道中都把高低折射率的介质薄膜作为理想的无吸收的介质薄膜来研究。事实上常见的透明薄膜在接近短波吸收带时,消光系数会增大,即吸收增大。另外薄膜在镀膜过程中由于参数控制不当,也会产生较大的吸收。因此必须把介质薄膜视作弱吸收薄膜(消光系数 $K \ll 1$)的模型来考虑才切合实际^[14]。

近来,许多著名的科研小组报道了一维光子晶体可以在较宽的波长范围内、任意角度有高的反射,即宽带全角度反射镜^[15-17],而一维光子晶体窄带全角度反射镜的研究报道相对较少。一维光子晶体窄带反射镜较宽带反射镜更适合用于激光器中的光学谐振腔,因此对于一维光子晶体窄带反射镜的研究是有意义的。本文主要采用复折射率和 TFCalc 软件的方法分别对入射角的改变和杂质的消光系数(衰减指数)对一维光子晶体窄带反射镜的反射谱和透射谱的影响做了深入的研究。

2 一维光子晶体窄带反射镜的结构和理论模拟

利用膜系设计软件 TFCalc 设计一维光子晶体窄带反射镜的结构模型(3L3H)ⁿ,如图 1 所示。H 和 L 分别是光学厚度为四分之一波长的高低折射率介质层。其中重要参数的选择:选择白光作为光源,入射角度 θ 从 $0^\circ \sim 89^\circ$ 可选,入射介质为空气,基片为 3 mm 厚的 K9 玻璃,周期数 $n = 16$ 。H 和 L 的光学厚度相等 $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0 / 4$, λ_0 为中心波长,取 $\lambda_0 = 460 \text{ nm}$ 。光的路径为 Air/(3L3H)¹⁶/Glass。高折射率层和低折射率层分别是 TiO_2 和 Al_2O_3 。 TiO_2 和 Al_2O_3 的光学参数是根据我们制备的单层膜参数给定的, TiO_2 的折射率 $n_1 = 2.3$ (波长在 460 nm),厚度 $d_1 = 50 \text{ nm}$,消光系数为 K_H 。 Al_2O_3 的折射率 $n_2 = 1.67$ (波长在 460 nm),厚度 $d_2 = 69 \text{ nm}$,消光系数为 K_L 。

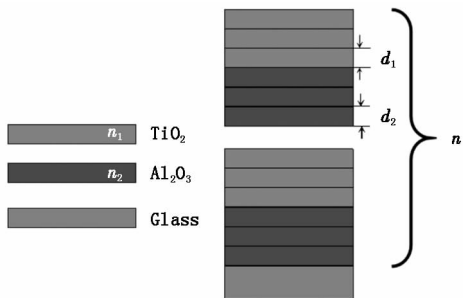


图 1 一维光子晶体(3L3H)ⁿ 的结构图
Fig. 1 the structure chart of one-dimensional photonic crystal(3L3H)ⁿ

2.1 入射角对一维光子晶体反射谱的影响

研究入射角对一维光子晶体反射谱的影响时,

假定介质薄膜无杂质吸收,即消光系数 K 为 0。分别以不同入射角 θ 入射,理论模拟出一维光子晶体的反射谱,如图 2 所示。从图 2 可以看出,入射角 θ 在 $0^\circ \sim 89^\circ$ 变化时,随着入射角度的增大,一维光子晶体的禁带宽度逐渐变窄,禁带的中心位置逐渐向短波波段移动,即发生蓝移。禁带中心的波长随角度的变化关系近似为线性关系,平均以 $1 \text{ nm}/(^\circ)$ 的速率移动。从图 2(a) 中可以看出:入射角 θ 从 $0^\circ \sim 60^\circ$ 变化时,禁带的势阱深度几乎不变,只是禁带位置发生移动。这与改变高低折射率层的光学厚度来控制高反射带的效果一致。从图 2(b) 可以看出,入射角 θ 超过 60° 后,禁带的势阱深度急剧减小。

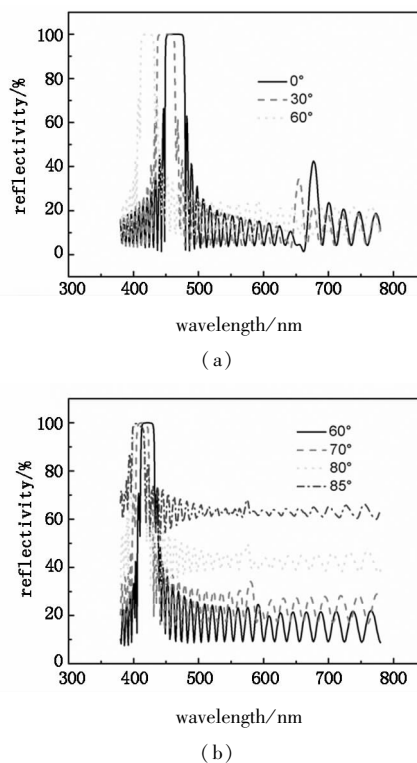


图 2 在不同入射角入射的一维光子晶体反射谱
Fig. 2 the reflection spectra of one-dimensional photonic crystal with different incident angle

当一维光子晶体用于倾斜入射时,通常都会产生强烈的偏振效应。我们进一步研究了不同偏振态下的反射谱随着入射角度的变化。图 3 是一维光子晶体在不同入射角下的 P 偏振光和 S 偏振光的反射谱。由图 3 可以看出,随着入射角的改变,P 偏振光和 S 偏振光的禁带的中心波长位置总是相同的,这是因为禁带的中心波长位置是由布拉格反射决定的^[18]。随着入射角增大,两种偏振态的禁带中心位置都有蓝移。但是 P 偏振态下的禁带宽度随着入射角增大而略有增大,而 S 偏振态下的禁带宽度随着入射角的增大而减小。当入射角度无限的接近

90°时,P偏振光的禁带几乎看不到,而S偏振光的禁带保留。因此通过P偏振光和S偏振光在通带时的反射率和透射率的不同,可以制备宽带的偏振分束镜。

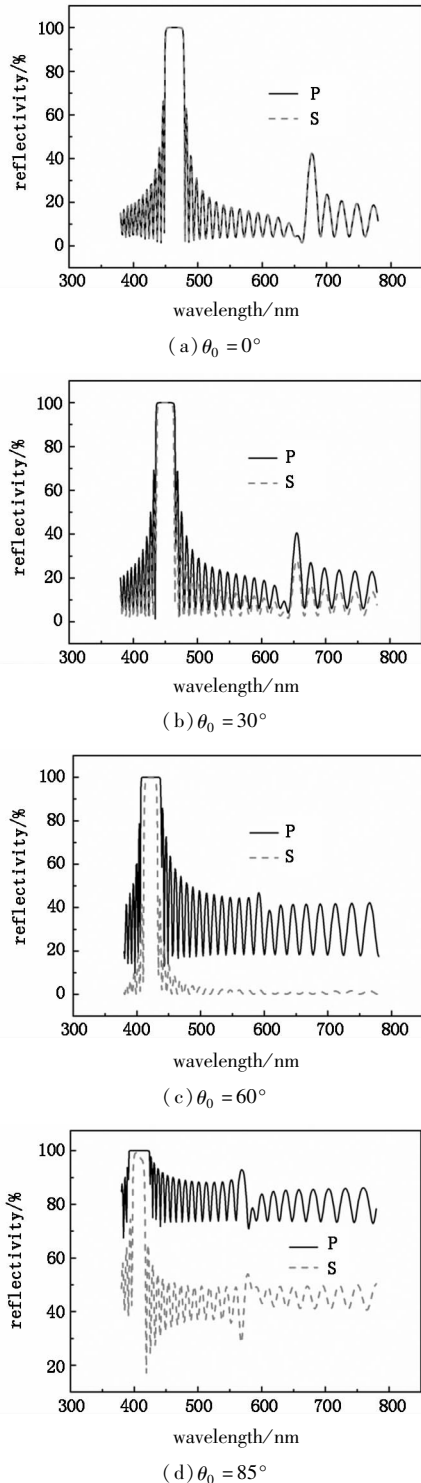


图3 一维光子晶体在不同入射角度下的P偏振光和S偏振光的反射谱
Fig.3 the P and S polarized light reflection spectra of one-dimensional photonic crystal with different incident angle

2.2 杂质吸收对一维光子晶体的光谱的影响

根据文献报道,考虑到透明薄膜在接近短波吸收带时消光系数增大及沉积镀膜时形成的缺陷引起的吸收损耗^[14],对于较薄的薄膜,在弱吸收的条件下,当消光系数 K 小于 10^{-2} 时对透射率、反射率的影响不大, K 大于 10^{-2} 之后影响较大。因此 K 等于 10^{-2} 是薄膜透射率是否显著变化的吸收临界值。通过分析杂质吸收对一维光子晶体透射率和反射率变化的影响,找到高低折射率层的杂质吸收临界值,对于制备一维光子晶体窄带反射镜有重要的指导意义。

设高低折射率层的消光系数都相等,即 $K = K_H = K_L$ 。图4(a)和图4(b)分别为一维光子晶体的反射率和透射率随着单层介质层消光系数增大时的变化曲线。

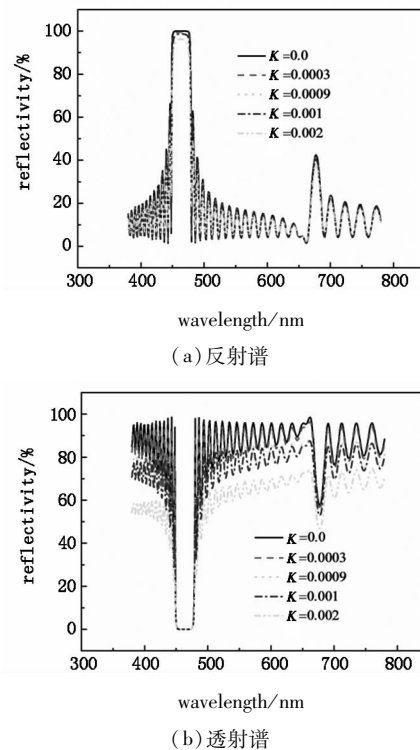


图4 不同的消光系数的一维光子晶体的反射谱和透射谱
Fig.4 the reflection spectra(a) and transmission spectra (b) of one-dimensional photonic crystal with different extinction coefficient K

由图4(a)可以看出,随着消光系数的增大,一维光子晶体禁带内的反射率逐渐降低。 K 小于0.001时禁带内的反射率的变化较小, K 大于0.001之后,禁带内的反射率变化较大。由图4(b)可以看出,随着消光系数的增大,一维光子晶体禁带的透射率不变,通带的透射率逐渐降低。 K 小于0.0003时对透射率的影响较小, K 大于0.0003之后

影响较大。单层介质层的杂质吸收临界值对于反射率和透射率分别为 0.001 和 0.0003。杂质吸收对反射谱和透射谱的影响区间是不一致的,对反射谱的影响是在禁带内,而对透射谱的影响是在通带。

图 5 是透射率和反射率随消光系数变化的响应曲线。从图 5 中可以看出,随着单层介质薄膜的消光系数增大到 $K = 0.002$ 时,禁带的反射率从 1 到 0.962,反射率变化相对较小;通带的透射率由 1 到 0.61,透射率的变化相对较大。相同的消光系数对于透射谱的影响更大,这与杂质吸收对较薄膜的影响是一致的^[14]。

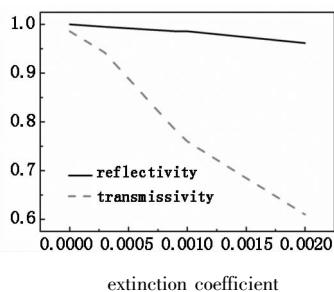


图 5 透射率(通带)和反射率(禁带)随着消光系数变化的响应曲线
Fig. 5 response curve of transmissivity (out of the bandgap) and reflectivity (in the bandgap) of one-dimensional photonic crystal versus extinction coefficient

不同材料的消光系数的大小是不相同的,对于 $K_H \neq K_L$ 的情况,我们选取高低折射率介质层的消光系数的和相等,即 $K_H + K_L = \text{constant}$,以下面的九种情况为例进行了研究,分别是 $K_L = 0.0, K_H = 0.004$; $K_L = 0.0005, K_H = 0.0035$; $K_L = 0.001, K_H = 0.003$; $K_L = 0.0015, K_H = 0.0025$; $K_L = 0.002, K_H = 0.002$; $K_L = 0.0025, K_H = 0.0015$; $K_L = 0.003, K_H = 0.001$; $K_L = 0.0035, K_H = 0.0005$; $K_L = 0.004, K_H = 0.0$ 。图 6 为不同情况下的一维光子晶体的反射率和透射率的响应曲线。通过分析发现:消光系数和不变的情况下,当氧化铝的消光系数为零、氧化钛消光系数达到最大值(即 $K_L = 0.0, K_H = 0.004$)时,禁带的反射率和通带透过率相对于无吸收时的变化最小;当氧化铝的消光系数达到最大值、氧化钛消光系数为零(即 $K_L = 0.004, K_H = 0.0$)时,禁带的反射率和通带透过率的变化最大。这说明氧化钛层的杂质吸收对光谱的影响较小,氧化铝的杂质吸收对光谱的影响较大。进一步推断出,在制备一维光子晶体时,应尽量精准制备参数,尤其是精准低折射率层的制备参数,降低其消光系数。

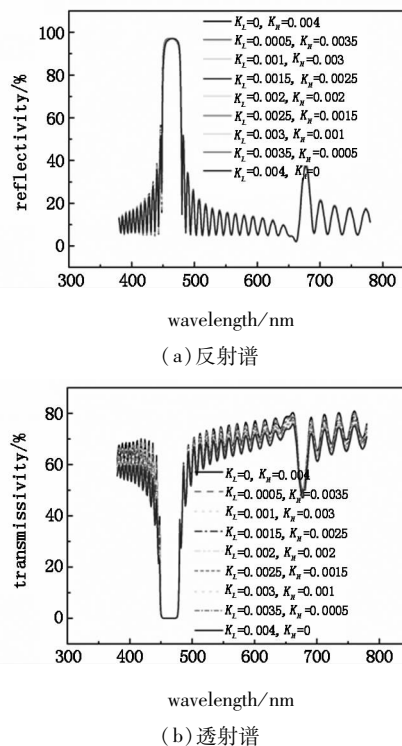


图 6 高低折射率层的消光系数和一致时的反射谱和透射谱
Fig. 6 the reflection spectra(a) and transmission spectra (b) of one-dimensional photonic crystal with the same extinction coefficient summation of high and low refractive index dielectric layers

3 结论

通过对不同的入射角和消光系数对 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 交替的一维光子晶体的理论模拟,我们认为:①入射角度小于 60° 时,反射带隙向短波方向近似的平移,因此通过改变入射角控制禁带的中心位置,扩展了同一个一维光子晶体的应用范围;②随着入射角的无限接近 90° 时,P 偏振光的禁带几乎消失,而 S 偏振光的禁带几乎保留;③当消光系数 K 大于 0.001 后,对反射率有明显影响,而 K 大于 0.0003 后,对透射率就有明显影响。当 $K = 0.002$ 时,带内反射率由 1 降到 0.962,而带外透射率由 1 降到 0.61。④在高低折射率层的消光系数总和相等的情况下,高折射率层的吸收光谱的影响较小。因此应更精准地控制低折射率薄膜的镀膜条件以降低吸收损耗。

参考文献:

[1] Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys. Rev. L, 1987, 58 (20): 2059 - 2062.
[2] Sajeev John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys. Rev. L, 1987, 58 (23): 2486 - 2489.

- [3] R Srivastava, K B Thapa, S Pati, et al. Omni-direction reflection in one-dimensional photonic crystal [J]. Progress In Electromagnetics Research B, 2008, 7: 133 - 143.
- [4] Guohong Ma, Sing Hai Tang, Jie Shen, et al. Defect-mode dependence of two-photon-absorption enhancement in a one-dimensional photonic bandgap structure [J]. Optics Letters, 2004, 29(15): 1769 - 1771.
- [5] Kevin M Chen, Andrew W Sparks, Hsin-Chiao Luan, et al. SiO₂/TiO₂ omnidirectional reflector and microcavity resonator via the solgel method [J]. Appl. Phys. Lett, 1999, 75(24): 3805 - 3807.
- [6] J Q Xi, Manas Ojha, Woojin Cho, et al. Schubert, omnidirectional reflector using nanoporous SiO₂ as a low-refractive-index material [J]. Optics Letters, 2005, 30(12): 1518 - 1520.
- [7] Wico C L Hopman, Pierre Pottier, Didit Yudistira, et al. Quasi-one-dimensional photonic crystal as a compact building-block for refractometric optical sensor [J]. IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics, 2005, 11(1): 11 - 16.
- [8] Li Rong, Ren Kun, Ren Xiaobin, et al. Angular and wavelength selectivity of band gaps of holographic photonic crystals for different polarizations [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(8): 2520 - 2525. (in Chinese)
李蓉, 任坤, 任晓斌, 等. 一维光子晶体带隙结构对不同偏振态的角度和波长响应[J]. 物理学报, 2004, 53(8): 2520 - 2525.
- [9] Liu Qineng. Properties of polarization of defect mode of one-dimensional photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(8): 1431 - 1434. (in Chinese)
刘启能. 一维光子晶体缺陷模偏振特性的研究[J]. 光子学报, 2007, 36(8): 1431 - 1434.
- [10] Wang Tongbiao, Liu Nianhua. Band structures and electric fields of one-dimensional photonic crystals composed of alternate layers of left-handed and right-handed materials [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(10): 5878 - 5882. (in Chinese)
王同标, 刘念华. 正负折射率材料组成的一维光子晶体的能带及电场[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5878 - 5882.
- [11] Shang Tingyi, Zheng Yi, Zhang Huiyun, et al. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals with negative-index materials [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(8): 1431 - 1434. (in Chinese)
尚廷义, 郑义, 张会云, 等. 含负折射率材料一维光子晶体的全方位带隙和缺陷模[J]. 光子学报, 2007, 36(4): 663 - 665.
- [12] Zhang Ling, Liang Liang, Zhang Linli, et al. Study of band-structure of 1-D photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(9): 1815 - 1818. (in Chinese)
张玲, 梁良, 张琳丽, 等. 一维光子晶体带隙结构研究[J]. 光子学报, 2008, 37(9): 1815 - 1818.
- [13] Liu Bing, Zhu Zimin. Effect of structural parameters of one-dimensional photonic crystal on forbidden band gap [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(4): 479 - 482. (in Chinese)
刘兵, 竺子民. 一维光子晶体结构参数对禁带带隙的影响研究[J]. 应用光学, 2007, 28(4): 479 - 482.
- [14] Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, et al. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 296 - 300. (in Chinese)
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 296 - 300.
- [15] M Deopura, C K Ullal, B Temelkuran, et al. Dielectric omnidirectional visible reflector [J]. Optics Letters, 2001, 26(15): 1197 - 1199.
- [16] Yoel Fink, Joshua N Winn, Shanhui Fan, et al. Jurgen Michel, John D Joannopoulos, Edwin L A Dielectric Omnidirectional Reflector [J]. Science, 1998, 282(27): 1679 - 1682.
- [17] Guohong Ma, Jie Shen, K Rajiv, et al. Optimization of two-photon absorption enhancement in one-dimensional photonic crystals with defect states [J]. Appl. Phys. B, 2005, 80: 359 - 363.
- [18] Liu Qineng. Effect of impurity absorption on one-dimensional photonic crystal defect mode [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(6): 777 - 780. (in Chinese)
刘启能. 杂质吸收对一维光子晶体缺陷模的影响[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 777 - 780.