

文章编号:1004-4213(2010)05-0839-3

Ta₂O₅/MgF₂ 异质结构三维光子晶体的偏振性*

王井伟, 韩培德[†], 夏伶俐, 张瑞珍

(太原理工大学 a. 新材料界面与工程教育部重点实验室; b. 材料科学与工程学院, 太原 030024)

摘要:为了在可见及近红外波段得到具有良好带隙结构的三维光子晶体, 利用传输矩阵法分析了 MgF₂、Ta₂O₅ 以及 Ta₂O₅/MgF₂ 异质结构三维光子晶体的带隙性质. 结果表明: Ta₂O₅/MgF₂ 异质结构三维光子晶体在 820~1 020 nm 的近红外波段 TM 模式下具有不受入射光方向影响的全方位光子带隙. 该结构有望用于制作近红外光波段的偏振器件.

关键词:光子晶体; 传输矩阵法; 异质结构; 偏振器件

中图分类号: O43

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20103905. 0839

0 引言

光子晶体是在光学尺度上具有周期性介电结构的人工设计和制造的晶体. 自从 Yablonovitch 和 John 分别提出光子晶体概念以来, 其实验与理论研究受到广泛关注并得到了飞速的发展. 光子晶体控制电磁波的传输方式与半导体控制电子的传输方式相似, 它已被用于偏振器件^[1]、高性能反射镜^[2]、光开关^[3]、滤波器^[4]、新型化学和生物传感器^[5]等.

可见及近红外波段光子晶体是近年来人们研究的热点, 由于可选材料较少、所得带隙较窄, 至今研究进展缓慢. 针对这些问题国内也研究广泛, 如三维光子晶体典型结构研究^[6]、缺陷^[7]与嵌套结构^[8]研究等. 通常增大介质材料间的介电常量反差是提高光子晶体光学性能的有效手段之一, 近几年的研究发现由不同材料构成的异质结构光子晶体也可有效改善其光学特性^[9].

本文选用可见及近红外波段吸收率都很低的 Ta₂O₅ 和 MgF₂ 两种材料, 系统的分析了其带隙特性, 以及由 Ta₂O₅/MgF₂ 组成的异质结构三维光子晶体的带隙结构. Ta₂O₅ 和 MgF₂ 在 400~1 200 nm 波段范围内折射率基本保持恒定, 且虚部接近零, 分别为 ($n=2.1$)、($n=1.38$).

1 计算模型与方法

首先构造了球体填充比为 0.74 的密排面心立方(111)面排列的结构, 如图 1. 计算软件使用 Glasgow 大学的 Translight 程序. 计算基于传输矩

阵(Transfer Matrix Method, TMM)的原理, 通过求解麦克斯韦方程来预测光子晶体带隙性质, 而且计算能够得到光子晶体的反射性质.

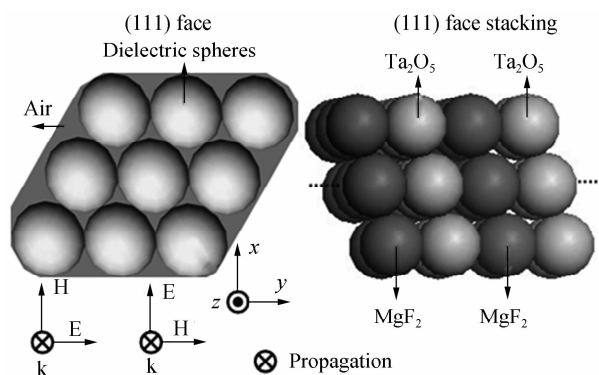


图 1 周期结构示意图

Fig. 1 Periodicity structure schematic diagram

2 结果与讨论

假设计算模型具有理想的周期性. 计算采用的介电常量可表示为 $\epsilon_0 = \epsilon_1 + j\epsilon_2 = (n + jk)^2$, ϵ_1 和 ϵ_2 分别表示介电常量实部和虚部, n 和 k 分别表示折射率实部和虚部. 由于 Ta₂O₅ 和 MgF₂ 在可见及近红外波段折射率的虚部近似为零, 所以与吸收相关的介电常量虚部也几乎为零. 这里只取介电常量的实部 ϵ_1 进行计算. 计算中取 Ta₂O₅ 和 MgF₂ 的介电常量分别为 4.41 和 1.9.

首先分别计算了晶格常量为 300 nm, MgF₂、Ta₂O₅ 组成的面心立方, 入射光垂直于(111)面入射的三维光子晶体结构的带隙特性. 图 2(a)、(b)分别为 TM 偏振模式下光垂直(111)面入射时不同层数的反射谱. 可以看出随着周期层数的增加 MgF₂、Ta₂O₅ 均出现了光子带隙, 且对应的反射强度均增加. MgF₂ 层数增加到 16 层时在 440~460 nm 范围内反射强度达到 100% 形成光子带隙; Ta₂O₅ 层数

* 国家自然科学基金(50874079)和山西省自然科学基金(200611053, 200921026)资助

[†] Tel: 0351-6018843

Email: hanpeide@126.com

收稿日期: 2009-08-13

修回日期: 2009-11-23

增加到 8 层时在 600~670 nm 范围内反射强度达到 100% 形成光子带隙. 结果表明相同的晶格参量条件下, 材料介电常量的增加使禁带位置反生红移、禁带宽度增大.

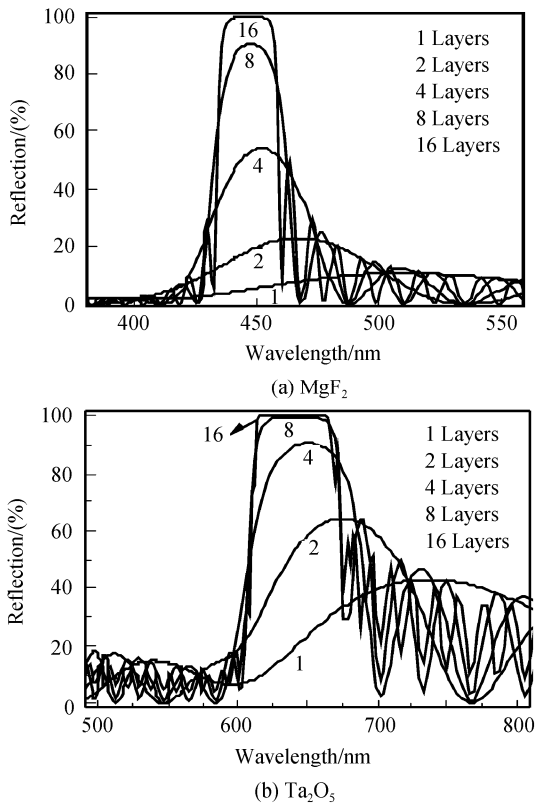


图 2 MgF₂ 和 Ta₂O₅ 三维光子晶体 TM 偏振反射谱
Fig. 2 TM-polarization of MgF₂ and Ta₂O₅ three-dimensional photonic crystals

由 MgF₂ 或 Ta₂O₅ 分别构成的三维光子晶体结构带隙均较窄, 所以本文又计算了晶格常量为 300 nm, 由 Ta₂O₅/MgF₂ 构成的异质结构三维光子晶体的光学性质 (结构见图 1), 光垂直入射 TM 偏振模式下, 不同周期层数对应的反射谱如图 3. 可以看到出现了两个带隙, 分别位于 460~510 nm 和 800~1 200 nm, 并且当周期层数达到 8 层时, 反射强度就几乎达到了 100%. 说明这种结构能有效改

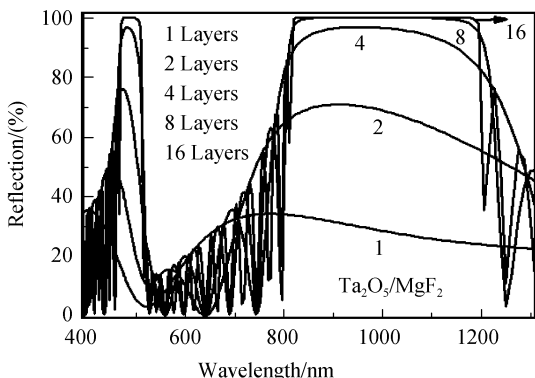


图 3 Ta₂O₅/MgF₂ 三维光子晶体 TM 偏振反射谱
Fig. 3 TM-polarization of Ta₂O₅/MgF₂ heterostructure three-dimensional photonic crystal

善带隙结构.

图 4 为周期层数为 16 层, 晶格常量为 300 nm, 光垂直入射于 Ta₂O₅/MgF₂ 异质结构面心立方 (111) 面三维光子晶体 TE、TM 两种偏振模式下的反射谱, 从图中可以看出两种偏振模式下光子禁带完全重合.

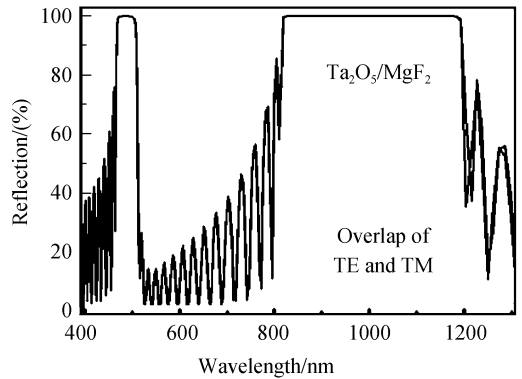


图 4 Ta₂O₅/MgF₂ 异质结构三维光子晶体 TE 和 TM 偏振模式反射谱
Fig. 4 TE and TM-polarization of Ta₂O₅/MgF₂ heterostructure three-dimensional photonic crystal

为了进一步分析其带隙特性, 本文又计算了周期层数为 16 层, 晶格常量为 300 nm 的 Ta₂O₅/MgF₂ 异质结构, (111) 面电磁波以不同角度入射时的反射谱, 图 5(a)、(b) 分别为 TE、TM 模式下的反射谱. 由图中可以看出入射角的变化对带隙位置和宽度产生了一定的影响. 在 TE 反射图谱中随着掠射角的增加, 带隙变窄并移向波长较短的方向, 没有得到全方位的光子带隙, 但入射角低于 45° 时, 带隙在 820~920 nm 范围内没有变化, 如图 5(a) 中阴影部分所示; 而在 TM 反射图谱中, 随着掠射角的增

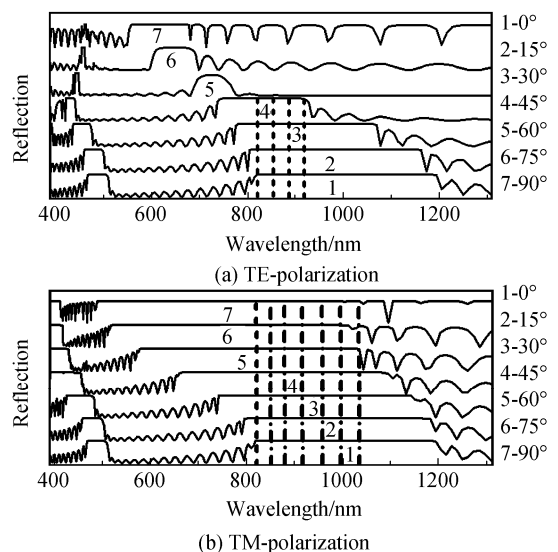


图 5 Ta₂O₅/MgF₂ 异质结构三维光子晶体 TE 模式和 TM 模式下不同入射方向的反射谱
Fig. 5 TE-polarization and TM-polarization of Ta₂O₅/MgF₂ heterostructure three-dimensional photonic crystal with different incident angles

加,带隙宽度略有增加,且带隙位置变化不大,在 820~1 020 nm 范围内形成了不受入射光角度影响的全方位光子带隙,如图 5(b)中阴影部分所示.这说明该结构有望用于制作 TM 光子偏振器件.

3 结论

利用传输矩阵方法,研究了 MgF₂、Ta₂O₅ 以及 Ta₂O₅/MgF₂ 异质结构三维光子晶体的光学特性.研究表明,相同的晶格参量条件下,材料介电常量的增加使禁带位置发生红移、禁带宽度增大;Ta₂O₅/MgF₂ 异质结构构成的三维光子晶体具有带隙宽,反射强度大的特性,且 TM 模式下在 820~1 020 nm 范围内具有一不受入射光角度影响的全方位光子带隙,此结构有望用于制作近红外光波段的偏振器件.

参考文献

- [1] SONG D Y, YOO H Y, KIM J P. Synthesis of stilbene-based azo dyes and application for dichroic materials in poly(vinyl alcohol) polarizing films[J]. *Dyes and Pigments*, 2007, **75**(3): 727-731.
- [2] AKAHANE Y, ASANO T, SONG B S, *et al.* Investigation of high-Q channel drop filters using donortype defects in two-dimensional photonic crystal slabs[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, **83**(8):1512-1514.
- [3] BOSCOLO S, MIDRIO M, KRAUSS T F. Y junctions in

- photonic crystal channel waveguides: high transmission and impedance matching[J]. *Opt Lett*, 2002, **27**(12):1001-1003.
- [4] YAO Pei-jun, CHEN Xi-yao, CHEN Bo, *et al.* Optical reflector and high Q filter based on two-dimensional photonic-crystal waveguide[J]. *Opt Commun*, 2004, **236**(1-3):101 - 107.
- [5] CASSAGNEAU T, CARUSO F. Inverse opals for optical affinity biosensing [J]. *Adv Mater*, 2002, **14** (22): 1629 - 1633.
- [6] LIU Huan, YAO Jian-quan, LI En-bang, *et al.* Theoretical analysis of optimum parameters for complete forbidden bands of three-dimensional photonic crystals with typical lattice structures[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(1):230-237.
- 刘欢,姚建铨,李恩邦,等. 三维光子晶体典型结构完全禁带的最佳参量理论分析[J]. *物理学报*, 2006, **55**(1):230-237.
- [7] ZHANG Yi, WANG Qi. Defects in three-dimensional photonic crystal[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **23** (5):671-676.
- 章祎,王奇. 三维光子晶体中的缺陷研究[J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(5):671-676.
- [8] HAN Yu, XIE Kai. Theoretical investigation on photonic bandgap of 2D/3D nesting and pseudo 3D nesting complex-period photonic crystals[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37** (7):1391-1395.
- 韩喻,谢凯. 二维三维混杂及准三维嵌套复式光子晶体带隙研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(7):1391-1395.
- [9] YAN Qing-feng, ZHAO X S, ZHOU Zuo-cheng. Fabrication of colloidal crystal heterostructures using a horizontal deposition method[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2006, **288** (1): 205-208.

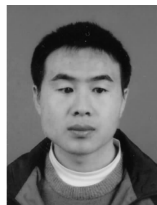
Polarized Properties of Ta₂O₅/MgF₂ Heterostructure Three-dimensional Photonic Crystal

WANG Jing-wei, HAN Pei-de, XIA Ling-qin, ZHANG Rui-zhen

(a. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials; b. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to obtain an excellent photonic band gaps of visible and near infrared region, the formation of band gaps of MgF₂、Ta₂O₅ and Ta₂O₅/MgF₂ heterostructure three-dimensional photonic crystal is exhibited and confirmed by calculation of the transfer matrix method. It is shown that the three-dimensional photonic crystal with the heterostructure of Ta₂O₅/MgF₂ has omnidirectional band gaps without influence of incident angles around 820~1 020 nm of near infrared region with TM polarization. The structure should enable new applications for polarizing devices.

Key words: Photonic crystals; Transfer matrix method; Heterostructure; Polarizing devices



WANG Jing-wei was born in 1984. Now he is a M. S. degree candidate, and his research interests focus on photonic crystals.



HAN Pei-de was born in 1964, and he work as a professor with Ph. D. degree. His research interest focuses on photonic.