InP薄膜网格结构二维光子晶体*

党随虎† 韩培德 李春霞 贾 伟 迟 美 刘旭光 许并社

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

摘要：使用转移矩阵方法设计了InP薄膜正方网格结构二维光子晶体的带隙结构.计算结果表明：由单胞参数为250nm，填充比为0.45组成的正方网格结构，在可见光和近红外波段有两个不完全带隙存在，透射率接近于零.

关键词：InP薄膜；转移矩阵法；光子晶体
PACC：4270Q；5235H
中图分类号：TN252　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0253-4177(2007)S0-0179-03

1 引言

光子晶体的概念是1987年由Yablonovitch[1]和John[2]分别提出的.十几年来，人们已在光子晶体及器件的实验制备与理论研究等方面取得了很大进展.但用于可见光和近红外波段光子晶体的材料却相对较少，目前寻找该波段并易于制备的光子晶体材料和结构成为人们研究的热点[3,4].

InP是一种高折射率的半导体材料，以往对InP的研究多集中在发光特性方面，而对InP作为二维光子晶体材料的研究却鲜有报道.本文以InP薄膜正方网格结构为研究对象，采用转移矩阵方法构建了InP薄膜正方网格，作为可见光和近红外波段的二维光子晶体.

2 计算方法和模型

理论计算使用英国Glasgow大学编制的Translight[5,6]法，其基本原理是采用转移矩阵方法计算InP薄膜正方网格结构的带隙结构，即由麦克斯韦方程进行傅里叶变换，转回实空间，求得x，y方向电磁场的分量，从而得到转移矩阵，求出透射矩阵，并计算不同厚度层光子晶体的带隙结构.

二维光子晶体通常是指一系列空气柱(或介质柱)在空间x-z平面周期排列，在y方向上均匀分布.当电磁波垂直于介质柱入射时，在另一面出现光子带隙，光子带隙的位置、宽度与入射电磁波的偏振有关.对于二维光子晶体，比较典型的结构有三角形与正方形两种结构.图1所示是计算所用的InP薄膜正方网格二维光子晶体结构模型.InP薄膜正方网格二维光子晶体可以看成是由无限长全同的空气介质方柱体沿y方向平行排列，垂直于各柱体区截面，各个截面中心为一个二维点，这些点的集合组成一个平面点阵(x-z平面内).空气电介质方柱体在空间以正方形排列，构成背景的介质为各向同性的电介质，由InP薄膜构成.

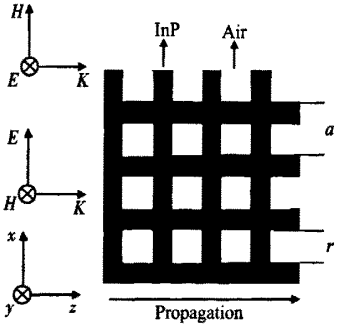

图1 InP薄膜网格二维光子晶体的结构示意图及沿z方向入射时电磁场的方向

Fig.1 Orientation of electromagnetic field vector components for in plane propagation and InP-film network structure

3 InP薄膜网格结构的光子特性

采用转移矩阵法计算了InP薄膜正方网格的光子带隙随单胞周期层数和掠射角的变化情况.假定介质是均匀的，晶格常数r=112.5nm，a=250nm，

* 国家重点基础研究发展规划(批准号：2004CB217808)，国家自然科学基金重大研究计划(批准号：90306014)，国家自然科学基金(批准号：20671068)和山西省自然科学基金(批准号：2006011053)资助项目

† 通信作者.Email：dangsuihu@126.com

2006-12-11收到，2006-12-18定稿

填充率 $r/a=0.45$，介电常数取自文献[7]. 图 2(a)和(b)是平面波在 InP 薄膜正方网格结构中沿 Γ-X 入射(z 方向)时不同周期层 TE，TM 偏振模式的光子能带透射曲线. 可以看出，两种偏振模式在可见光和近红外波段均有一个光子带隙存在，随着周期层数的增加，两种偏振模式透射率逐渐减小. 周期层为 8 层时，TE，TM 两种偏振模式在 530～700nm 和 800～940nm 两个波长范围内有重叠的光子带隙存在.

图 3 给出了电磁波在 InP 薄膜正方网格二维光

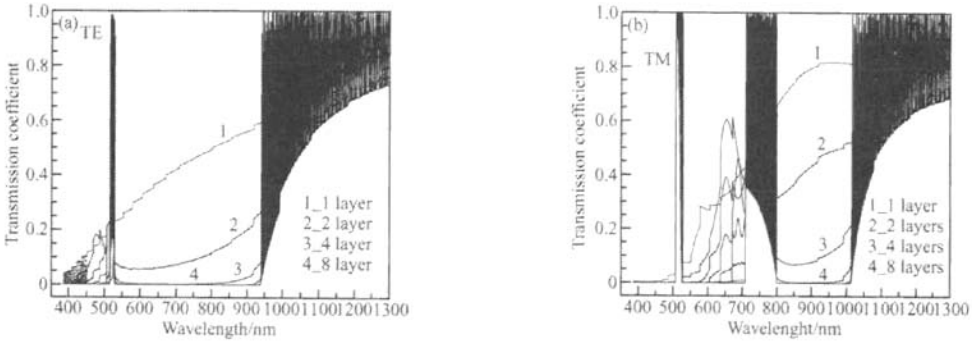

图 2 InP 薄膜网格二维光子晶体沿 z 方向不同层数的计算透射谱 (a) TE 模式；(b) TM 模式

Fig. 2 Theoretical transmission versus photon energy for TE (a) and for TM (b) of InP based network

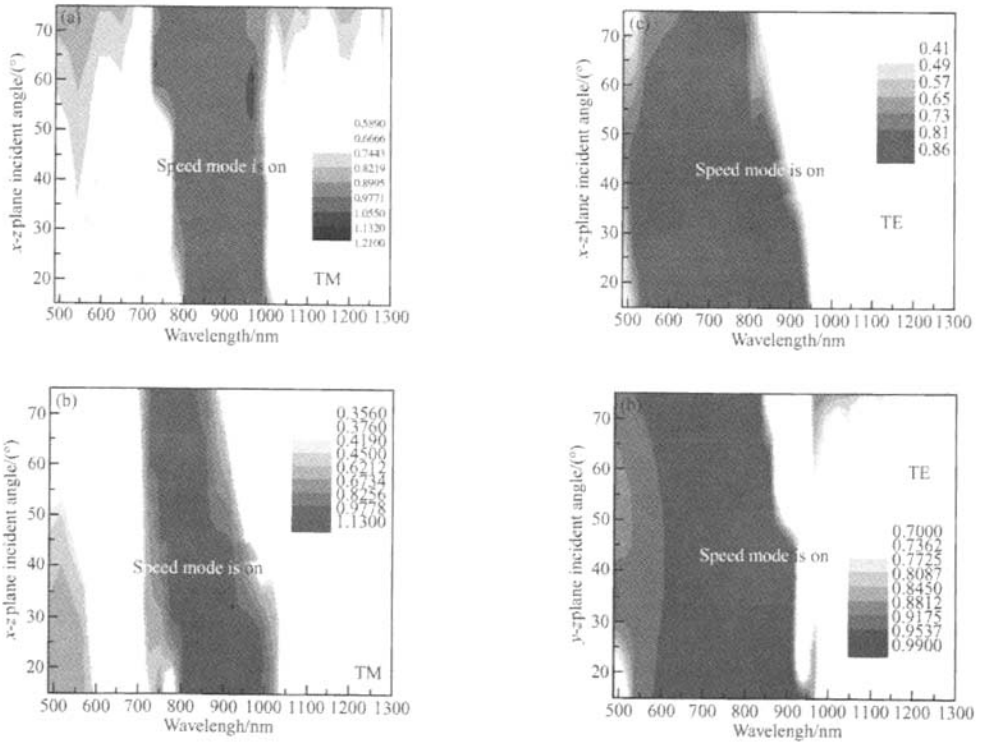

图 3 电磁波沿 z 方向入射后，在 x-z(和 y-z)平面内由 z 方向向 x 轴(和 y 轴)偏转时，不同掠射角对应不同波长的透射谱 对 TM 模式(a) x-z 平面内偏转，(b) y-z 平面内偏转；对 TE 模式(c) x-z 平面内偏转，(d) y-z 平面内偏转

Fig. 3 Calculated in and out of plane angular response for InP based network, in which the zero angle of incidence corresponds to an incidence along the z direction Results for TM are shown in (a) for an angular scan within the periodic x-z plane and (b) the y-z plane. Results for TE are shown in (c) for an angular scans within the periodic x-z plane and (d) the y-z plane.

子晶体内沿着 Γ-X 方向(z 轴)入射后，在 x-z(和 y-z)平面内由 Γ-X 方向向 x 轴(和 y 轴)偏转时，不同掠射角所对应不同波长的 TM，TE 两种偏振模式的透射率曲线.图中曲线周期层共 8 层，InP 薄膜正方网格二维光子晶体晶格常数为 250nm，填充比为 0.45.从图中可看出，随掠射角增加带隙位置和宽度的变化情况.随掠射角的增加 TE，TM 两种模式带隙都有向较高光子能量波段移动的趋势.对于 TE 模式，如图(c)所示，在 x-z 平面内随掠射角的增加带隙有变窄的趋势.在 y-z 平面内随掠射角增加带隙宽度不变，当掠射角超过 70°时，有较窄带隙产生，如图(d)所示.对于 TM 模式，如图(a)，在 x-z 平面内随掠射角的增加带隙稍有变宽.当掠射角大于 60°时，有较窄带隙产生.在 y-z 平面内随掠射角增加带隙变窄，当掠射角达到 50°时，低能量波段有一较窄带隙逐渐消失，如图(b)所示.

4　结论

使用转移矩阵方法从理论上计算了 InP 薄膜正方网格的光子带隙结构及分布.结果表明，InP 薄膜正方网格二维光子晶体，在可见光和近红外波段 TE，TM 两种偏振模式均有带隙存在，且 TE，TM 两种模式带隙在 530～700nm 和 800～940nm 两个波段完全重迭.带隙宽度和位置随掠射角变化较小，透射率接近于零.属于不完全带隙光子晶体.

参考文献

[1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059

[2] John S. Strong localization of photonic in certain disordered dielectric superlattices. Phys Rev Lett, 1987, 58: 2486

[3] Han Peide, Xu Bingshe, Liang Jian, et al. Band gaps of two-dimensional photonic crystal structure using fullerene films. Physica E, 2004, 25(1): 29

[4] Xu Bingshe, Han Peide, Wang Liping, et al. Optical properties in 2D photonic crystal structure using fullerene and azafullerene thin films. Optics Communications, 2005, 250: 120

[5] Pendry J B, MacKinnon A. Calculation of photon dispersion relation. Phys Rev Lett, 1992, 69: 2772

[6] Bell P M, Pendry J B, Moreno L M, et al. A program for calculation photonic band structures and transmission coefficients of complex structure. Comput Phys Commun, 1995, 85: 306

[7] Djurišic A B, Li E B. Optical dielectric function of semiconductors. Thin Solid Films, 2000, 364: 239

Band Gaps of Two-Dimensional Photonic Crystal Structure Using InP Films*

Dang Suihu†, Han Peide, Li Chunxia, Jia Wei, Chi Mei, Liu Xuguang, and Xu Bingshe

(Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials of Taiyuan University of Technology, Ministry of Education, College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The concept and method of analysis of photonic crystals and band gaps are introduced into InP -film network structure, which is treated theoretically as photonic crystals. We investigate different aspects of the absolute photonic band gap (PBG) formation for 2D photonic crystal (PC) consisting of air bars drilled into InP films. The formation of PBG is exhibited and confirmed by a calculation of the transfer matrix method (TMM). We find that for InP based networks for a lattice constant of 0.45a (a = 250nm) two PBGs exist, which ranges are from 530 to 700nm and from 800 to 940nm at visible and near-infrared frequency.

Key words: InP films; TMM method; photonic crystals

PACC: 4270Q; 5235H

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0179-03

* Projectsupported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2004CB217808), the Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 90306014), the National Natural Science Foundation of China (No. 20671068), and the National Nature Science Foundation of Shanxi Province (No. 2006011053)

† Corresponding author. Email: dangsuihu@126.com

Received 11 December 2006, revised manuscript received 18 December 2006