

文章编号:1004-4213(2010)10-1795-5

二维高效光子晶体偏振分束器*

孙露露¹, 沈义峰^{1, 2†}, 王娟¹, 周杰¹, 张园¹, 唐刚¹

(1 中国矿业大学 理学院 物理系, 江苏 徐州 221116)

(2 复旦大学 应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433)

摘 要:为解决透射型偏振分束器透射效率低、高入射角度依赖的缺点,利用二维光子晶体平板设计了一种高效偏振分束器.采用的光子晶体是由空气中周期性排列的蜂窝格子 GaAs 介质柱构成.该偏振器对一种偏振光(TE 偏振)正常折射,而对另一种偏振(TM 偏振)负折射,从而实现两种偏振模式在空间上分离.为提高其透射效率,在光子晶体平板表面引入了消反层,并对相关参量进行优化.二维有限时域差分模拟结果显示,在较宽的角度范围内(约 20°),约化圆频率处在 $\omega=0.20\sim 0.23\times 2\pi c/a$ 范围内,分束器对 TE 和 TM 偏振光的透射强度都能达到 95% 以上.

关键词:光子晶体;蜂窝格子;偏振分束器;消反层

中图分类号:O734

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103910.1795

0 引言

偏振分束器(Polarization Beam Splitter, PBS)能够把电磁波相互正交两种偏振模式在空间上分离,在传统光学光路、光通信、光存储、集成光路中都有广泛的应用.传统的多层膜结构的偏振分束器主要依赖布儒斯特角来实现偏振分束,因而对角度依赖非常敏感,且透射光束的消光比不是很高,难以完全满足现代集成光路系统的需要,亟待设计更多高效的偏振分束器.近年来,光子晶体由于具有操控光子运动的能力而受到人们的广泛关注^[1].基于光子晶体设计的偏振分束器已有较多报道,其原理主要是利用两种偏振光在光子晶体中的特性差异来实现光束分离.主要包括三种类型:1)利用两种偏振的不同带隙来实现透射-反射式分束器^[2];2)利用缺陷波导中波导模式的不同耦合特性来实现偏振分束器^[3-5];3)利用两种偏振在光子晶体中的正、负折射差异来实现透射式分束器^[6-8].其中最后一种利用了光子晶体中的负折射的概念^[9-11],在原理上更接近于传统光学中的晶体分束器,但却具有尺寸小、便于控制的优点.利用正负折射效应设计的光子晶体偏振分束器虽然具有透射分束的优点,但由于两种偏振在界面处的反射较大,因而往往透射效率较低,且对入射角度比较敏感.因而提高该种偏振分束器的透射效率和宽角度依赖范围是迫切需要解决的问题.最近 Lee 等人提出了设计消反层结构(anti-

reflection coating)以减小光束在二维光子晶体和均匀介质界面间反射的方法^[12].这为提高偏振分束器的透射效率提供了一个思路,然而他们仅仅讨论了在某一特定入射角度下(0° 或 45°)光束的透射强度,而没有讨论在不同入射角度范围内该方法是否依然有效.

本文利用二维蜂窝格子光子晶体,在光子晶体表面引入消反层,设计了一种偏振分束器.结果显示,当入射角改变较大时,仍能通过表面消反层参量的优化,实现减少反射、增强透射的目的.本文提出的偏振分束器是由空气中周期性排列的二维蜂窝格子 GaAs ($\epsilon=12.96$) 介质柱阵列构成的,光束在其中传播,一种偏振发生负折射,另一种偏振光正常折射,从而实现两种偏振的空间分束.为了改善偏振分束器的透射效率,在蜂窝格子光子晶体表面引入消反层(Anti-Reflection Layer, ARL).有限时域差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)的模拟结果显示,在较宽的角度范围内(20°),在 $\omega=0.20\sim 0.23\times 2\pi c/a$ 内, PBS 对 TE 和 TM 偏振光的透射强度都能达到 95% 以上.

1 分束器结构及光子晶体能带图

本文研究的光子晶体结构由二维蜂窝格子 GaAs 介质柱构成,如图 1.介质柱半径 $R=0.24a$, a 是晶格常量,折射率 $n=3.6$ (灰色圆代表 GaAs 介质柱,白色背景区域代表空气).计算中使用的蜂窝格子的原胞包括两个介质柱,如图 1 中平行四边形所示.利用这个光子晶体结构设计了偏振分束器,对 TE 偏振(电场分量垂直于介质柱)正常折射,对 TM

* 中国矿业大学校基金(OK061065)资助

† Tel:0516-83591580

Email:shen_syf@163.com

收稿日期:2010-03-16

修回日期:2010-05-13

偏振(电场分量平行于介质柱)负折射. 图 1 表示偏振分束器在 xy 平面内的横截图. 在 x 方向是有限厚度, 有 16 排柱子, 模拟中 y 方向选取选取 53 排柱子. 把这 16 排柱子的光子晶体称作未优化的偏振分束器, 其界面法线沿着 ΓM 方向, 入射面处在 xy 平面内, θ 是入射角. 其中 ARL 代表表面消反层, R 为光子晶体柱子半径, R_{arl} 为消反层中的柱子半径, d_{arl} 为表面一排柱子中心与相邻一排柱子中心的距离.

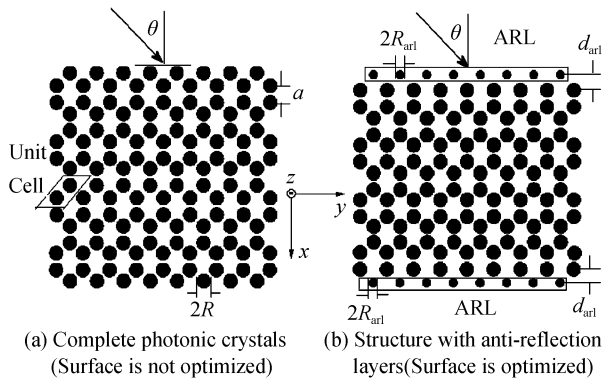


图 1 偏振分束器结构
Fig. 1 The structure of polarization beam splitter

二维蜂窝格子光子晶体的两种正交模式的能带结构如图 2, 这是对选定原胞运用平面波展开法计算得到的. 在蜂窝结构光子晶体中, 对于两种偏振没有共同的完全带隙. 接下来, 仅讨论 TM 模式的第二个光子能带和 TE 模式的第一个光子能带(图 2 中的 TM2 和 TE1). 由 TM 模式的能带结构可以看出, 有效负折射率出现在 TM 模式的第二个带中, 频率范围在 $\omega = 0.20 \sim 0.23 \times 2\pi c/a$, 尤其当 $\omega = 0.2192 \times 2\pi c/a$ 时, 有效负折射率 $n_{\text{eff}} = -1$. 而对于 TE 模式频率在 $\omega = 0.20 \sim 0.23 \times 2\pi c/a$ 时处在第一个能带中, 有效折射率为正. 本文正是针对两种偏振的这种差异设计了该偏振分束器.

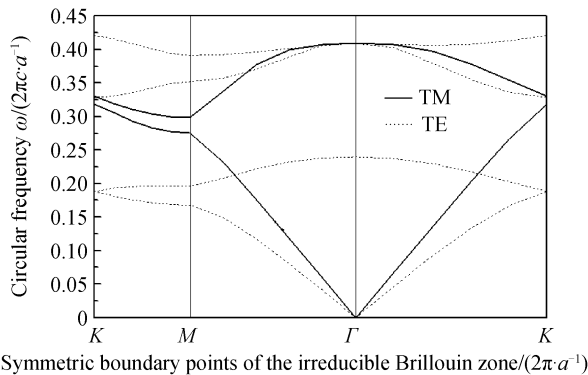


图 2 蜂窝格子光子晶体的能带图
Fig. 2 Band map of the honeycomb lattice PC

2 偏振分束器的工作原理

利用等频图 (Equal-Frequency Contours, EFCs) 分析方法可确定折射光的传播方向. 图 3(a)

是运用平面波展开法得到了蜂窝结构光子晶体在 $\omega = 0.2192 \times 2\pi c/a$ 的等频图. 在光子晶体中, 可用 $\mathbf{v}_g = \nabla_q \omega(\mathbf{q})$ 来定义群速度矢量, 其中 \mathbf{q} 表示布洛赫波矢. 从定义中可以看出群速度矢量方向垂直于 $\omega(\mathbf{k})$ 增加的方向. 可以证明在光子晶体中能流方向和群速度方向是一致的^[13]. 因此, 折射光和群速度方向一致. 在均匀介质中, 等频图是同心圆, 且圆半径随着频率的增加而增加. 蜂窝格子光子晶体的等频图和均匀介质中情况不同. 蜂窝格子光子晶体, 在频率范围 $\omega = 0.20 \sim 0.23 \times 2\pi c/a$ 内, TM 模式的等频图近似是以 Γ 点为中心的圆, 圆半径随着频率的增加而减小, 群速度方向指向圆心. 也就是说, TM 模式光线的折射光在 $\omega = 0.20 \sim 0.23 \times 2\pi c/a$ 范围内发生负折射. 然而对于 TE 偏振, 蜂窝结构光子晶体的等频图也是以 Γ 点为中心的圆, 对于频率范围 $\omega = 0.20 \sim 0.23 \times 2\pi c/a$, 等频图中圆的半径随频率的增加而增加, 导致向外的群速度. 因此, TE 模式光束的折射光在该频率范围是正常折射. 图 3(b) 是折射光线示意图. 偏振分束器的表面沿着 ΓM 方向. 箭头表示入射光线和折射光线的群速度方向.

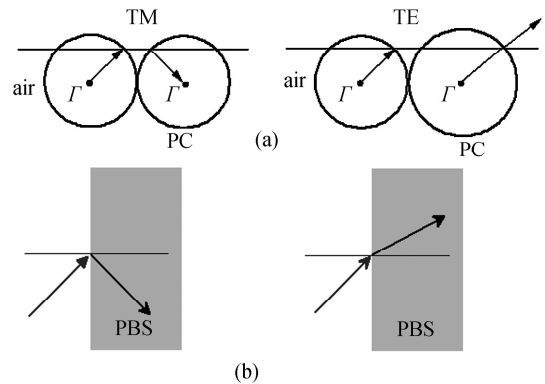


图 3 (a) 光子晶体和空气的等频图, (b) 光线折射示意图
Fig. 3 (a) The equal-frequency contour of PC and air, (b) Sketch of light beam refraction

图 4(a) 和 (b) 分别为 TM 和 TE 偏振模式由 FDTD 法模拟得到的场分布图(对 TM 偏振为 E_z 分量, 对 TE 偏振为 H_z 分量, 模拟中, 沿 y 轴方向选取 53 排柱子以保证不受侧向边界影响), 频率为 $\omega = 0.2192 \times 2\pi c/a$ 的高斯光束以 20° 角从左上角由空气入射到光子晶体, 模拟过程中对边界采用了完美匹配层 (Perfect Matched Layer, PML) 条件. 从图 4(a) 可以看出, 折射光束明显弯向左方, 即与入射光束同处法线一侧. 这是光子晶体中典型的负折射现象. 而 TE 偏振光在同一频率和角度下是正常折射, 如图 4(b). 然而在图 4(a) 中, 入射光的透射强度相对较低, 其归一化强度仅为 0.45 (归一化强度是透射光束强度和入射光束强度之比), 这说明在空气和偏振分束器界面处反射较高(见图 4(a) 的右上角).

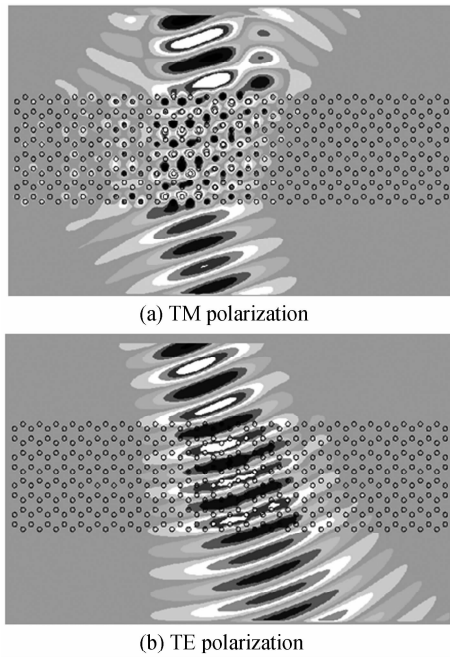


图4 FDTD方法模拟的频率为 $\omega=0.2192 \times 2\pi c/a$ 的高斯光束 20° 角入射TM偏振和TE偏振的场分布.该偏振分束器是由无消反层的完整光子晶体构成

Fig. 4 The field distribution of TM polarization and TE polarization for a Gaussian beam with a frequency $\omega=0.2192 \times 2\pi c/a$ at an incidence angle of 20° simulated by the FDTD method. The PBS is composed of a complete PC without anti-reflection layers

而图中左半部出现的较弱光束分别是透射光束在光子晶体上、下表面多次反射造成的结果.对于TE偏振光透射强度可以达到0.95(见图4(b)).可见未优化的光子晶体偏振分束器对TM偏振透射效率很低.

3 引入减反层的高效偏振分束器

消反层设计的方法与Lee文中方法相同:即将上下表面的一排柱子的半径 R_{ari} 和距晶体内部紧邻一层柱子的距离 d_{ari} 作为两个独立的优化参量进行优化,从而最大限度地消除反射光束,实现最佳的透射效率.从物理图象上来理解就是在空气和光子晶体之间加入一阻抗匹配层,从而使反射消弱,透射增加.图1(b)是引入消反层的偏振分束器,运用消反层代替偏振分束器的上下一排的表层柱子,当 $R_{\text{ari}}=R, d_{\text{ari}}=\sqrt{3}a/2$ 时,消反层就成为完整光子晶体的一部分.为了找到最优的 R_{ari} 和 d_{ari} ,本文仍使用频率为 $\omega=0.2192 \times 2\pi c/a$,角度为 $\theta=20^\circ$ 的高斯光束从空气入射到带有消反层的偏振分束器上.

图5(a)表示当 d_{ari} 保持 $\sqrt{3}a/2$ 不变时, TM偏振模式的透射光束的归一化强度随着 R_{ari} 的变化曲线.由图可以看出,当 $R_{\text{ari}}=0.2a$ 时,透射光束的归

一化强度达到0.9863.图5(b)表示 $R_{\text{ari}}=0.2a$,透射光束的归一化强度随着 $\Delta d_{\text{ari}}=d_{\text{ari}}-\sqrt{3}a/2$ 的变化曲线,当 $\Delta d_{\text{ari}}=0.05a$ 即 $d_{\text{ari}}=\Delta d_{\text{ari}}+\sqrt{3}a/2=0.05a+\sqrt{3}a/2 \approx 1.8a$ 时,透射光束的归一化强度几乎达到1.因此 $R_{\text{ari}}=0.2a$ 和 $d_{\text{ari}} \approx 1.8a$ 是最佳优化值.

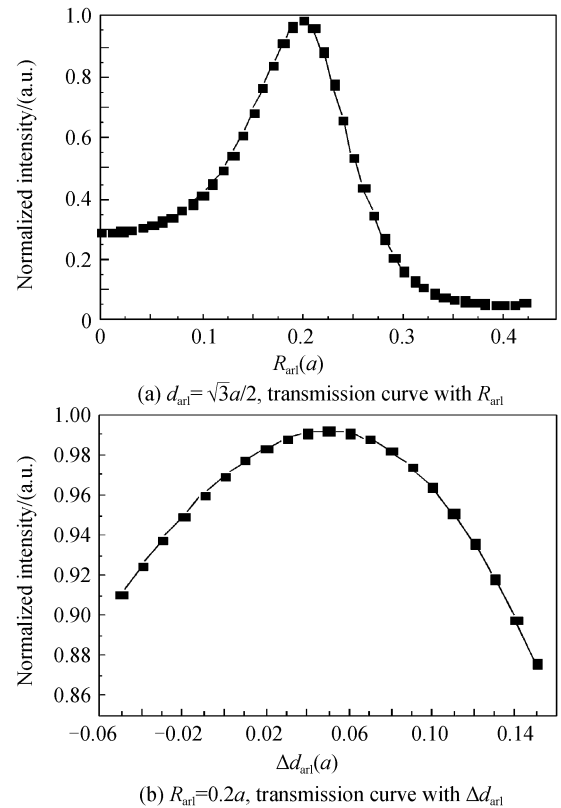


图5 归一化透射强度关于 R_{ari} 和 d_{ari} 的关系曲线(入射角为 20°)

Fig. 5 The curves of normalized transmitted intensity with parameters R_{ari} and d_{ari} (at an incident angle of 20°)

图6(a)和(b)是由FDTD模拟得到的带有消反层的偏振分束器在最优值下的稳态场分布图,频率为 $\omega=0.2192 \times 2\pi c/a$ 入射光束以 20° 角入射.从图6(a)可以看出,透射光束(TM偏振光)的强度与图4(a)相比有很大改进,透射率接近100%.也就是说,引入消反层之后,光束的归一化透射强度能够从0.45增加到1.对于TE偏振光,光束的归一化透射强度也得到改进,也几乎达到1.

FDTD模拟结果表明,引入消反层之后, TM和TE偏振光的归一化透射强度都大大增加.由于入射光束和光子晶体中的布洛赫波具有不同的对称性,光子晶体中光束的透射行为和左手材料(Left-Handed Material, LHM)中的不同.对于左手材料来说,入射光束可以无反射的透过空气和左手材料表面,但对于光子晶体则完全不同.表面模式非常重要,它可以帮助更多的能量透过光子晶体平板从而

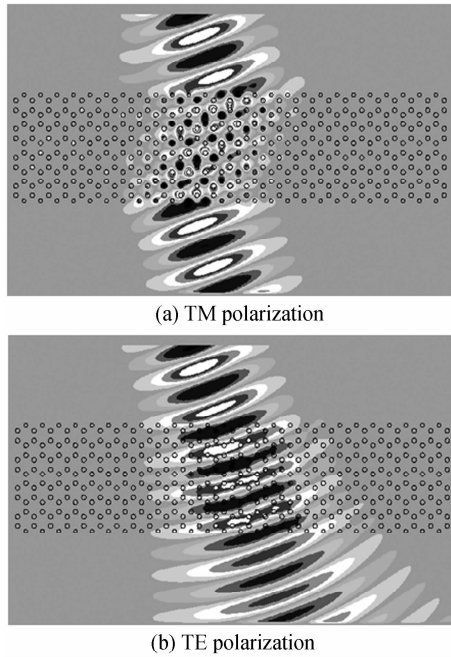


图6 FDTD方法模拟的频率为 $\omega=0.2192 \times 2\pi c/a$ 的高斯光束 20° 角入射的TM偏振和TE偏振光强分布.该PBS是由采用消反层的光子晶体构成

Fig. 6 The field distribution of TM polarization and TE polarization for a Gaussian beam with a frequency $\omega=0.2192 \times 2\pi c/a$ at an incidence angle of 20° simulated by the FDTD method. The PBS is composed of the PC with anti-reflection layers

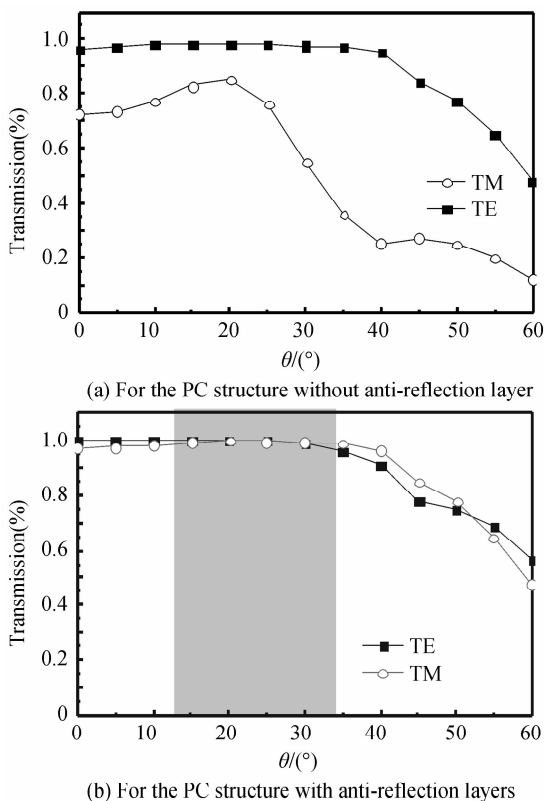


图7 两种偏振随入射角度变化的透射率曲线

Fig. 7 The transmittance curves of the two polarizations with the incident angle

获得更高的透射强度,因此表面的优化对于提高该偏振分束器的透射效率至关重要.图7(a)显示未引

入消反层的光子晶体结构两种模式随角度变化的透射率曲线,图7(b)显示已引入消反层的光子晶体结构两种模式随角度变化的透射率曲线.由图7(b)可以看出,在 $15^\circ \sim 35^\circ$ 范围内(图中阴影区),对于TM和TE偏振光,其透射强度都很高.带有黑色线表示TM偏振光,带有圆形的红线表示TE偏振光.在 20° 角度范围内,带有减反层的偏振分束器其TM和TE偏振光的透射强度均达到0.95以上.尽管以上模拟中样品的厚度仅有约 $9.4a$,在小角度下不足以完全分开两偏振束,但可以通过增加样品厚度来实现 20° 角度范围内的完全分束.我们模拟发现当厚度增加一倍时,即使在入射角为 15° 时也可实现两不同偏振束的完全分离,并且进一步的模拟发现厚度的增加对分束器的透射效率影响非常小(注意此处没有考虑样品的实际吸收).可见设计消反层的方法对于一定的入射角度范围仍然是十分有效的.这一点对于降低偏振分束器的角度敏感性是至关重要的.

当然也可以利用带隙去实现偏振分束器.从图2可以看出,对于TM偏振光,在 $\omega=0.24 \sim 0.328 \times 2\pi c/a$ 内是带隙,因此入射的TM偏振光将全部被反射.但是对于TE偏振光将被透射.FDTD模拟结果表明,TM光的反射和TE光的透射强度均能达到0.98以上.

4 结论

综上所述,本文利用蜂窝格子光子晶体,基于其对TM偏振光负折射,对TE偏振光正常折射,制造了偏振分束器.同时对其表面引入ARL来改进偏振分束器的透射强度.FDTD模拟结果表明,本文设计的引入减反层的偏振分束器具有很多优点.首先,在频率范围 $\omega=0.20 \sim 0.23 \times 2\pi c/a$ 内,TM和TE偏振光的透射强度均能达到95%以上.其次,在 20° 范围内对角度无依赖.更重要的是本文证明了当光束的入射角度改变时,引入消反层仍能在大角度范围内改善光束的透射.

参考文献

- [1] JOANNOPOULOUS J D, JOHNSON S G, WINN J N, *et al.* Photonic crystals: molding the flow of light[M]. 2nd ed. New Jersey: Princeton University Press, 2008: 3-5.
- [2] SCHONBRUN E, WU Q, PARK W, *et al.* Polarization beam splitter based on a photonic crystal heterostructure[J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(21): 3104-3106.
- [3] MORITA Y, TSUJI Y, HIRAYAMA K. Proposal for a compact Resonant-Coupling-Type polarization splitter based on photonic crystal waveguide with absolute photonic band gap[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, **20**(2): 93-95.
- [4] LIU Tao, ZAKHARIAN A R, FALLAHI M, *et al.* Design of a compact photonic-crystal-based polarizing beam splitter

- [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(7): 1435-1437.
- [5] ZHENG Wan-hua, XING Ming-xin, REN Gang, *et al.* Integration of a photonic crystal polarization beam splitter and waveguide bend[J]. *Opt Express*, 2006, **17**(10): 5617-5633.
- [6] LU Zhi-hua, TANG Yun-fei, SHEN Yi-feng, *et al.* Polarization beam splitting in two-dimensional photonic crystals based on negative refraction[J]. *Phys Lett A*, 2005, **346**(1-3): 243-247.
- [7] AO Xian-yu, HE Sai-ling. Polarization beam splitters based on a two-dimensional photonic crystal of negative refraction[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(16): 2152-2154.
- [8] ZHANG Yuan, JIANG Yu-rong, XUE Wei, *et al.* A broad-angle polarization beam splitter based on a simple dielectric periodic structure[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(22): 14363-14368.
- [9] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability [J]. *Sov Phys Usp*, 1968, **10**(4): 509-514.
- [10] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**(18): 3966-3969.
- [11] SMITH D R, KROLL N. Negative refractive index in left-handed materials[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**(14): 2933-2936.
- [12] LEE S G, CHOI J S, KIM J, *et al.* Reflection minimization at two-dimensional photonic crystal interfaces [J]. *Opt Express*, 2008, **16**(6): 4270-4277.
- [13] SAKODA K. Optical properties of photonic crystals[M]. New York: Springer, 2001: 80-85.

Efficient Polarization Beam Splitter Based on Two-dimensional Photonic Crystal

SUN Lu-lu¹, SHEN Yi-feng^{1, 2}, WANG Juan¹, ZHOU Jie¹, ZHANG Yuan¹, TANG Gang¹

(1 Department of Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

(2 State Key Laboratory of Applied Surface Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: To overcome disadvantages of low transmission efficiency and high dependence on the incident angle for the transmitting type polarization beam splitter (PBS), a highly efficient PBS based on a two-dimensional photonic crystal slab is proposed, which consists of a honeycomb lattice of GaAs cylinders in air. The PBS has a normal refraction for TE polarization and a negative refraction for the other polarization (TM polarization) so that it can separate these two polarization beams totally in space. Anti-reflection layers (ARLs) at the surfaces of the photonic crystal slab are introduced and relevant parameters are optimized to improve the transmission efficiency. Two-dimensional finite difference time domain (FDTD) simulation results show that, in a wide angle range (about 20°), in a normalized circular frequency range of $\omega=0.20\sim 0.23\times 2\pi c/a$, the transmission intensity can reach over 98% for both TE and TM polarization.

Key words: Photonic crystals; Honeycomb lattice; Polarization Beam Splitter(PBS); Anti-Reflection Layer (ARL)



SUN Lu-lu was born in 1985. She is a graduate student at China University of Mining and Technology. Her main research interests focus on photonic crystal and negative refraction phenomenon.



SHEN Yi-feng was born in 1974. He received the Ph. D. degree from Fudan University in 2005. Now he is an associate professor and his main research interests focus on photonic crystal and liquid surface waves.