

二维空气孔型光子晶体负折射平板透镜的减反层*

张 波^{1)†} 王 智²⁾

1) 北京交通大学电子信息工程学院国家电工电子教学基地, 北京 100044)

2) 北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所, 北京 100044)

(2006 年 6 月 11 日收到, 2006 年 7 月 21 日收到修改稿)

提出并优化了由单排渐变介质波导构成的二维空气孔型光子晶体负折射平板透镜表面的减反层, 改善了成像质量. 二维时域有限差分模拟计算结果表明, 采用减反层后, 在入射角小于 23° 的范围内, 在使得有效折射率 $n_{\text{eff}} = -1$ 的工作频率处, 光子晶体表面对从空气一侧入射的平面波的反射率可降低到 1% 以下.

关键词: 光子晶体, 负折射, 平板透镜, 减反层

PACC: 4270Q, 4280X

1. 引 言

光子晶体中的反常色散特性是当前世界的热门研究课题. 由于光子晶体的多重衍射效应, 在其中传播的电磁波可出现不同寻常的物理特性, 如超折射、自准直和负折射等现象^[1-4]. Notomi^[5]指出在等频率面为球形的频谱范围内, 光线在光子晶体-空气界面处的折射行为服从 Snell 折射定律, 光子晶体可以等效为有效折射率为 n_{eff} 的均匀介质材料. 在等频率面随着频率的增加而收缩的频率范围内, 有效折射率 $n_{\text{eff}} < 0$, 表现出负折射的行为: 入射线与折射线在光子晶体表面法线的同一侧. 当有效折射率 $n_{\text{eff}} = -1$ 时, 光子晶体平板具有成像功能^[6], 这种无光轴、结构紧凑的平板透镜可在集成光芯片中作为曲面透镜的替代成像元件. 但这类基于光子晶体反常色散特性的全新光学成像器件在实际应用中遇到的主要问题之一是表面反射损耗过大^[7], 由反射损耗所引入的杂散光将严重干扰系统的正常工作, 故需进行减反处理. 一般来说, 均匀介质-光子晶体界面处的反射损耗主要来源于从介质一侧入射的平面波和光子晶体中的布洛赫波在模场、相速度和群速度等方面的失配^[8]. 采用由半径逐渐改变的空气孔阵列所构成的绝热过渡层, 在介质和光子晶体之间形成一结构缓变区域, 可以有效的降低界面反射^[9]. 但

这种方案的不足之处在于需要较厚的绝热过渡层才能得到理想的减反效果. 另一种结构紧凑的方案是在光子晶体表面引入一排特定几何外形的空气孔, 通过提高由介质一侧入射的平面波与光子晶体中的布洛赫波的耦合效率来降低界面反射^[10]. 对于通常工作频率处在第二能带的基于负折射的空气孔型光子晶体平板透镜, 光子晶体的外侧为空气, 对垂直入射平面波的反射率可高达 20% 左右^[11]. 为了提高入射平面波与布洛赫波的耦合效率, 我们在光子晶体表面用单排等间距渐变介质波导作为过渡连接区. 当工作频率处在第二能带时, 模场分布主要集中在高折射率的介质区, 渐变介质波导阵列起着微透镜阵列的作用, 将平面波聚焦成横向调制周期与晶格常数 a 相同, 场分布集中在高折射率介质区的调制波, 用以修正平面波与布洛赫波的模场失配. 我们采用二维时域有限差分 (FDTD) 方法数值模拟计算了界面反射率, 经过对渐变介质波导的几何形状进行优化, 在较宽的频谱范围内使得界面反射率降到了 1% 以下. 我们对采用此减反层的负折射光子晶体平板透镜的成像进行了 FDTD 数值模拟计算, 结果表明不仅透镜的传输效率得到了明显提高, 分辨率也略有改善.

2. 减反层结构和仿真结果

光子晶体由周期性排列的三角格子空气圆孔构

* 国家自然科学基金(批准号 60402006)资助的课题.

† E-mail: zhangb@center.njtu.edu.cn

成,晶格长度为 a ,气孔半径 $R = 0.4a$,背景介质材料的折射率为 $n = 3.6$,端面在最外一排空气孔轴线的连线上.表面的单排渐变介质波导起着减反层的作用,用以提高入射平面波与布洛赫波的耦合效率.渐变波导的介质折射率 $n = 3.6$,如图 1 所示.我们使用 FDTD 模拟计算了高斯光束由空气一侧垂直入射到光子晶体表面上的反射谱,仅仅考虑 TE 极化(E 平行于空气孔).仿真区的尺寸为 $20a \times 19a$.考虑到渐变波导在 X 轴方向很窄,其基部的宽度 W_b 仅为 $0.2a$,为了较为精确的反映渐变波导的横向几何形状,取 FDTD 在 X 方向的网格尺寸为 $0.01a$,而在 Z 方向为 $0.05a$.在光子晶体的上方放置一面光源,激励一沿负 Z 轴方向传播的脉冲高斯光束.高斯光束的宽度为 $10a$,中心频率为 $\omega = 0.30005(2\pi c/a)$.在光源上方放置一观测屏,测出反射脉冲的功率谱.用入射功率谱约化后得到反射谱.经过对渐变波导的几何外形进行优化,我们在比较宽的频谱范围内,使反射率降到了 1% 以下.图 2 为经过优化后的渐变波导的轮廓图,其中渐变波导的长度 $L = 1.3a$,基部宽度 $W_b = 0.2a$.顶部宽度 $W_t = 0.04a$.图 3 为采用经过优化后的渐变波导减反层的光子晶体表面对垂直入射平面波的反射率.在频谱范围 $0.264(2\pi c/a) - 0.324(2\pi c/a)$ 内,反射率低于 1%,占 ΓM 方向第二能带宽度的 56%.在频率接近能带边时,反射率快速增大.

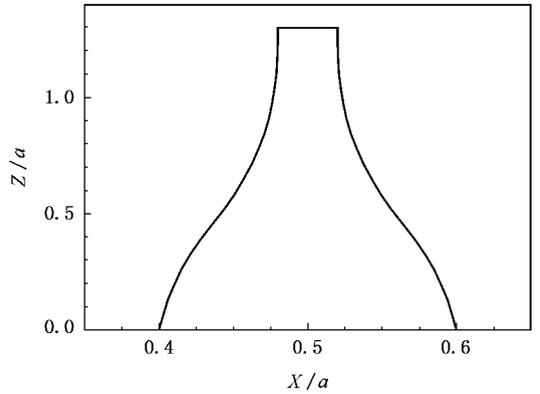


图 2 经过优化后得到的渐变波导轮廓图

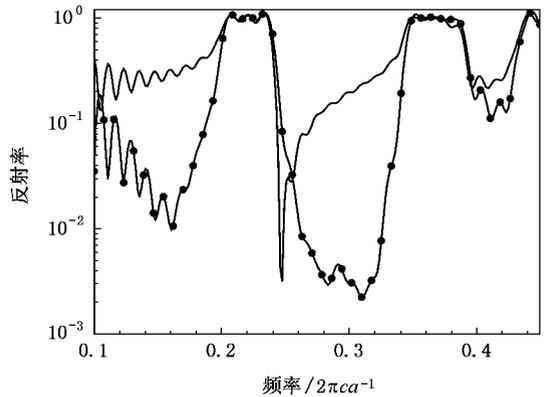


图 3 采用减反层的光子晶体表面对垂直入射高斯光束的反射率(实心圆),以及无减反层时的反射率(实线)

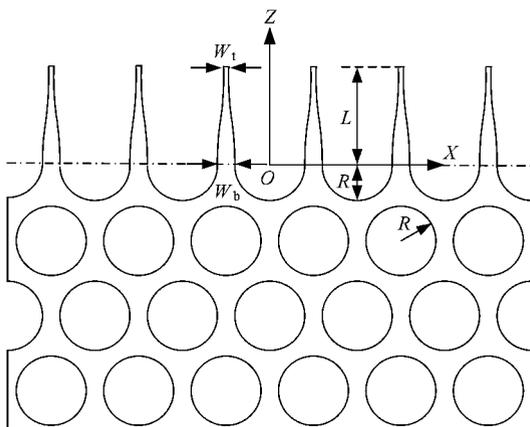


图 1 光子晶体及减反层结构示意图(点划线为光子晶体的端面,在最外一排空气孔轴线的连线上)

图 4 给出了平面波向下垂直入射到加减反层的光子晶体上,电场强度的振幅 $|E_y|$ 在频率 $\omega = 0.3005(2\pi c/a)$ 时的空间分布图.由图 4(a)可见,光波在进入减反层向下传播的过程中,电场分布逐渐

向渐变波导集中,在渐变波导基部处(横截面 A)的电场分布和光子晶体内相应处(横截面 B)的电场分布相近,如图 4(b)所示.因此,渐变介质波导阵列起着微透镜阵列的作用:将平面波聚焦成横向调制周期为 a 的调制波,使其平滑过渡到光子晶体内的布洛赫波,有效地修正了它们之间的模场失配,从而大大降低了表面反射.

3. 平板透镜成像的仿真结果

对于图 1 所示的空气孔型光子晶体,当工作频率处在第二能带内, $\omega = 0.3005(2\pi c/a)$ 时,光子晶体的等效折射率为 $n_{\text{eff}} = -1$,入射角与反射角相等且处在法线的同一侧,此时,光子晶体平板具有透镜的聚集成像功能^[5],如图 5 所示.平板透镜由 6 排空气孔型光子晶体构成.其中,虚线为等效折射面的位置.物距 u 为线光源 S 到光子晶体平板上端面的距

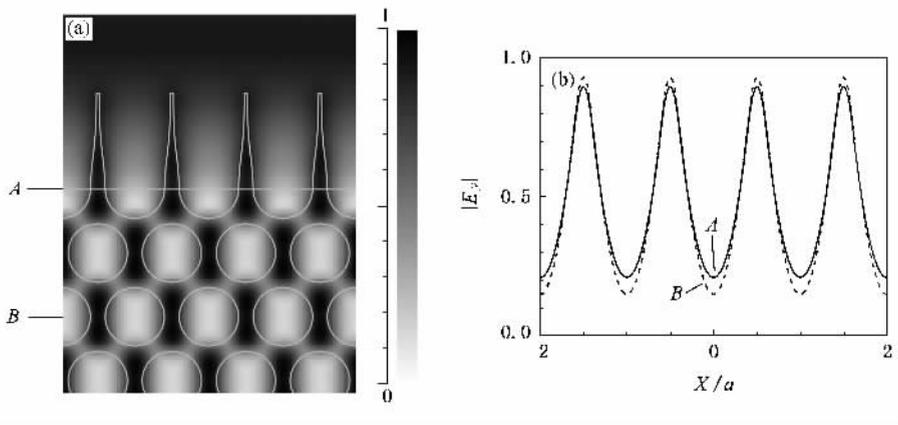


图 4 平面波向下垂直入射到加减反层后的光子晶体上的电场分布图 (a) 电场的振幅 $|E_y|$ 分布图 (b) $|E_y|$ 在截面 A 和 B 处的分布曲线

离, 像距 v 为像与平板下端面的距离. d 为平板的厚度, 而等效厚度 d_{eff} 为两等效折射面之间的距离. 由图 5 可见, 物和像之间的距离 L_w 为等效厚度 d_{eff} 的两倍^[6], 即有成像公式: $L_w = u + v + d = 2d_{\text{eff}}$. 我们使用 FDTD 数值模拟计算了物和像之间的距离 L_w 随物距 u 的变化关系. S 为频率 ω 的单色线光源. 考虑到光子晶体的高度色散特性, 我们在激励源电场的时变函数 $E_{sy} \sim \sin\left(\frac{\pi t}{2t_r}\right) \sin(\omega t) \chi(t \leq t_r)$, $E_{sy} \sim \sin(\omega t) \chi(t > t_r)$ 中取 $t_r = 12 \frac{2\pi}{\omega}$, 其中 ω 为工作频率, $\sin\left(\frac{\pi t}{2t_r}\right)$ 为缓变包洛函数, 以减少在开启光源时引入的其他频谱分量, 从而抑制功率的时间演化曲线上的寄生纹波, 同时, 避免激励出可引起像不稳定的表面模^[12]. 模拟计算结果如图 6 所示. 其中, 像距 v 由光子晶体平板下方沿负 Z 方向传输的光功率密度 $P_z(x=0, z)$ 的极值位置定出. 由图 6 可见, 加减反层后, 在曲线的中部, L_w 随物距 u 的变化很小, 起伏小于无减反层时的情形, 与成像公式符合得很好. 经拟合后, 得到 $d_{\text{eff}} = 5.89a$, 略大于光子晶体平板的厚度 $d = 3\sqrt{3}a$. 而在曲线的两端, 物或像接近光子晶体表面, 近场效应显著, L_w 与成像公式所给出的结果偏离增大. 图 7 给出了 Z 方向光功率密度在像面上的分布. 加减反层后, 不仅主瓣的光功率得到了显著提高, 同时, 其宽度约为 0.47λ , 比无减反层时的宽度有所减小, 分辨率略有提高. 但旁瓣的功率有较明显增强. 总体说来, 成像质量有所提高.

在频率 $\omega = 0.3005(2\pi c/a)$ 时反射率随入射角

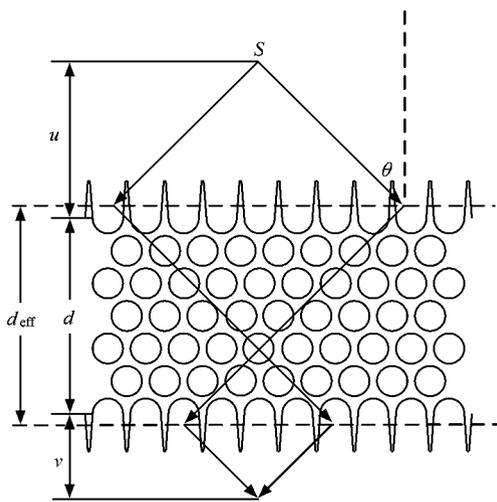


图 5 光子晶体平板透镜头光路示意图

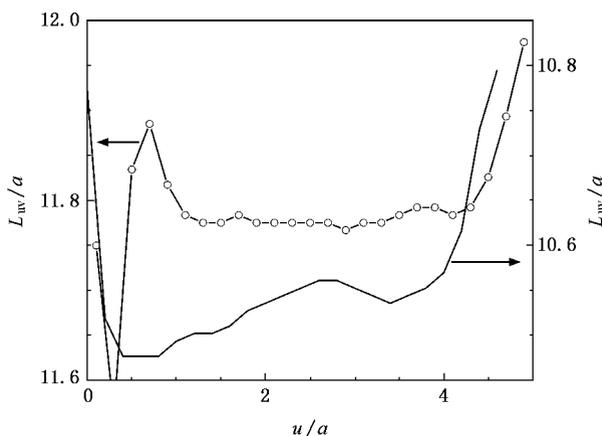


图 6 物和像之间的距离 L_w 在无减反层(实线)时和加减反层(空心圆)后随物距 u 的变化关系

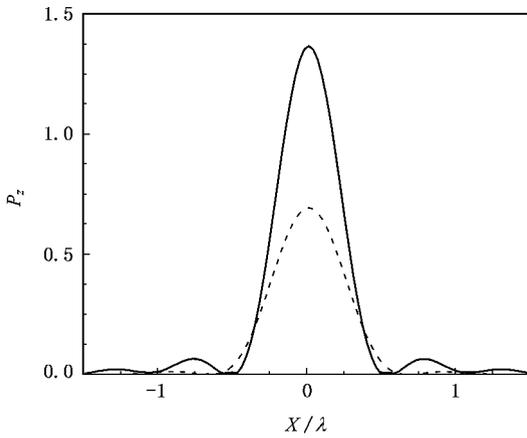


图7 采用减反层(实线)和无减反层(虚线)时,像面上 Z 方向光功率密度分布(其中物距 $u = 2.5a$)

的变化关系由图8给出.在FDTD数值模拟计算中,考虑到大角度入射时,高斯光束的有效宽度较小和平面波的差异显著,所以,我们改用平面波入射,在 X 方向使用周期边界条件,通过调节仿真区在 X 方向的宽度 $L_x = Ma$ (M 为整数)以及入射角 θ 以保证 $L_x \sin(\theta)\lambda = N$ (N 为整数).这样,平面波在 X 方向两个对应边界点上具有相同的相位.由图8可见,采用减反层后,在入射角小于 23° 的范围内,光子晶体表面的反射率低于1%.入射角超过 40° 时,反射率增大到10%以上.由于透镜的分辨率依赖于大角度入射光的透射率^[13],所以,在我们所考虑的情况中,分辨率未有显著提高.但在通常的集成光芯片和光波导应用中,数值孔径相对较小,而入射角 23° 所对

应的数值孔径达0.39.所以,我们提出的减反方案可以满足一般要求.而且,由于减反层的厚度很薄,与晶格常数 a 相当,特别适合于微型化的场合.

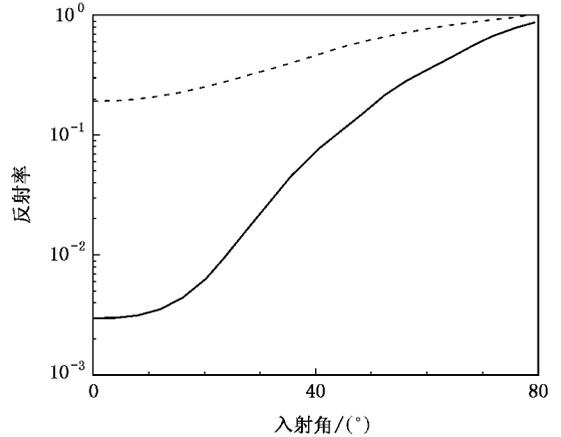


图8 采用减反层后(实线)和无减反层(虚线)时,光子晶体表面的反射率随入射角 θ 的变化关系

4. 结 论

本文提出并优化了由单排渐变介质波导构成的二维空气孔光子晶体负折射平板透镜表面的减反层.改善了成像质量.在入射角小于 23° 的范围内,采用减反层后,光子晶体表面的反射率降到了1%以下.结果表明,在光子晶体表面添加一层厚度与晶格常数 a 相当、结构经过优化的减反层,就可以有效的抑制其表面反射,适用于微型化场合.

- [1] Feng S, Feng Z F, Ren K, Ren C, Li Z Y, Cheng B Y, Zhang D Z 2006 *Chinese Phys.* **15** 552
- [2] Liu J T, Zhou Y S, Wang F H, Gu B Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3336 (in Chinese) [刘江涛、周云松、王福合、顾本源 2004 物理学报 **53** 3336]
- [3] Li Y Y, Gu P F, Li M Y, Zhang J L, Liu X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2596 (in Chinese) [厉以宇、顾培夫、李明宇、张锦龙、刘旭 2006 物理学报 **55** 2596]
- [4] Shen X P, Han K, Shen Y F, Li H P, Xiao Z W, Zheng J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2760 (in Chinese) [沈晓鹏、韩奎、沈义峰、李海鹏、肖正伟、郑健 2006 物理学报 **55** 2760]
- [5] Notomi M 2000 *Phys. Rev. B* **62** 10696

- [6] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [7] Witzens J, Hochberg M, Baehr-Jones T, Scherer A 2004 *Phys. Rev. E* **69** 046609
- [8] Kuchinsky S, Golyatin V, Kutikov A 2003 *Proc. SPIE* **5000** 59
- [9] Moneni B, Adibi A 2005 *Proc. SPIE* **5733** 289
- [10] Baba T, Matsumoto T, Echizen M 2004 *Opt. Express* **12** 4608
- [11] Ruan Z C, Qiu M, Xiao S S, He S L, Thylén L 2005 *Phys. Rev. B* **71** 045111
- [12] Zhou L, Chan C T 2005 *Opt. Lett.* **30** 1812
- [13] Lu Z L, Chen C H, Schuetz C A, Shi S Y, Murakowski J A, Schneider G J, Prather D W 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 091907

Antireflection coating for two-dimensional air hole-type photonic crystal negative refraction slab lens^{*}

Zhang Bo^{1)†} Wang Zhi²⁾

1) *National Teaching Base of Electrical and Electronics, School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

2) *Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*

(Received 11 June 2006 ; revised manuscript received 21 July 2006)

Abstract

We propose and optimize the antireflection coating composed of a row of tapered dielectric waveguides for two-dimensional air hole-type photonic crystal negative refraction slab lens. The image quality of the lens with the antireflection coating is improved. The simulation result using finite difference time domain method shows, at the working frequency leading to the effective index $n_{\text{eff}} = -1$, the reflection rate of the surface of photonic crystal with anti-reflection coating is reduced to below 1% in the range of incident angle less than 23 degrees.

Keywords : photonic crystal, negative refraction, slab lens, antireflection coating

PACC : 4270Q, 4280X

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60402006).

[†] E-mail : zhangb@center.njtu.edu.cn