

文章编号:1001-5078(2007)09-0889-02

# 光子晶体平板透镜表面减反结构

张波<sup>1</sup>, 王智<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 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)

**摘要:**报道了用来抑制光子晶体平板透镜表面反射的优化表面结构。当入射角小于 $48^\circ$ , 透镜的表面反射率可降到0.3%以下。

**关键词:**光子晶体; 负折射; 平板透镜; 减反

**中图分类号:** O734<sup>+</sup>.2 **文献标识码:** A

## Surface Antireflection Structure for Photonic Crystal Slab Lens

ZHANG Bo<sup>1</sup>, WANG Zhi<sup>2</sup>

(1. 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)

**Abstract:** An optimized surface structure for suppressing the reflection from photonic crystal slab lens is reported. The reflection is reduced to below 0.3% for the incident angle less than 48 degrees.

**Key words:** photonic crystal; negative refraction; slab lens; antireflection

### 1 引言

基于空气-光子晶体界面上负折射效应的光子晶体平板透镜是当今的热门研究课题<sup>[1-2]</sup>。这种无光轴的透镜很有可能在下一代集成光路中替代传统曲面透镜, 成为基本成像单元。然而, 这类透镜表面的高反射率问题是其得到广泛应用的主要障碍。就通常基于全角度负折射的空气孔型光子晶体平板透镜而言, 光子晶体的外侧为空气, 其对垂直入射光的反射率可高达20%左右<sup>[3-4]</sup>。为此, 人们提出了许多降低光子晶体表面反射的方案。其中, 最简单的是选择适当厚度的平板透镜, 使得来源于透镜两个表面的反射光发生相消干涉, 从而消除平板透镜表面的反射<sup>[5]</sup>。但是, 这种基于光干涉特性的方案的减反效果强烈依赖于入射角, 因而限制了其数值孔径的提高。Momeni等<sup>[6]</sup>提出采用半径逐渐改变的空气孔阵列绝热过渡层, 在介质和光子晶体之间形成一结构渐变区域, 可以在很大的入射角范围内消除界面反射。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, 因此, 限制了其应用范围。最近, Sterke等<sup>[7]</sup>报道了利用介质圆柱共振特性得到了超低表面反射正方格子介质柱光子晶体, 当入射角低于 $80^\circ$ 时, 反射率可被降低到

0.1%的量级。但是, 这种超低反射特性仅仅在特定的结构中出现, 并不能直接应用到全角度负折射光子晶体平板透镜。

表面修饰减反结构是结构紧凑的用以消除光子晶体界面反射的方案。通过在光子晶体表面引入一排特定几何外形的空气孔, 可以将反射压低到可以接受的水平<sup>[8]</sup>。然而, 在已见报道中, 使得表面保持低反射的入射角范围都比较窄。在本文中, 我们对表面结构进行了优化, 增大了低反射的入射角范围, 并进一步降低了反射率。我们采用了非常简单的表面减反结构: 在平板透镜的两个端面上各刻一排周期为 $a$ , 宽度为 $0.1a$ 矩形凹槽, 经过对矩形槽的深度以及光子晶体的切面位置进行优化, 当入射角小于 $48^\circ$ , 平板透镜的反射率可被降低到0.3%以下。

### 2 优化结构和数值模拟结果

光子晶体由周期性排列的三角格子空气圆孔构成, 晶格长度为 $a$ , 气孔半径 $R = 0.4a$ , 背景介质材料的折射率为 $n = 3.6$ , 仅仅考虑TE极化(E平行于

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 60402006)资助的课题。

**作者简介:**张波(1960-), 男, 副教授, 主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: zhangb@bjtu.edu.cn

**收稿日期:**2007-02-25; **修订日期:**2007-04-01

空气孔)。平板透镜由六排空气孔构成,如图1所示。其中, $\delta$ 为光子晶体平板表面到最近的气孔轴线之间的距离。为抑制平板透镜的反射,我们在平板的两个表面分别刻一排周期为 $a$ ,宽度为 $0.1a$ ,深度为 $D$ 矩形凹槽,凹槽位于两个相邻气孔的中线上。为了确保全角度负折射,我们取光源的频率 $\omega = 0.3006(2\pi c/a)$ ,此时光子晶体的等效折射率为 $n_{\text{eff}} = -1$ 。我们采用二维时域有限差分(FDTD)方法模拟计算了平板透镜的反射率随入射角变化的关系。FDTD网格尺寸在 $X$ 轴方向和 $Z$ 轴方向分别取为 $0.02a$ 和 $0.05a$ 。在 $X$ 轴方向采用完全匹配层作为吸收边界条件,而在 $Z$ 轴方向采用周期性边界条件。在平板透镜的左侧放置一平面光源,激励一个向平板透镜传播的平面波, $\mathbf{K}$ 为波矢量,平面波的传播方向与 $X$ 轴正方向的夹角为 $\theta$ 。反射率由关系式 $R(\theta) = |P_x/P_0|$ 给出。其中, $P_x$ 和 $P_0$ 分别为反射光和入射光沿 $X$ 方向的功率。它们由位于光源和平板之间的测量屏给出:沿 $X$ 轴负方向的功率为 $P_x$ ,正方向的功率为 $P_0$ 。

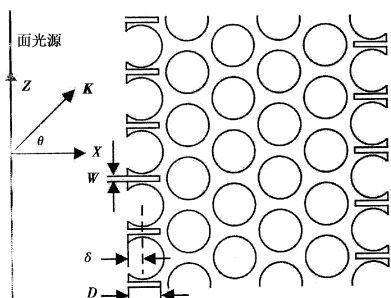


图1 光子晶体平板透镜及其表面结构示意图

通过对目标函数 $R(\theta, \delta, D)$ 进行优化,我们得到了优化后的表面结构参数 $\delta = 0.22a$ 和 $D = 0.62a$ 。图2给出了具有优化表面结构的光子晶体平板透镜的反射率。由图2可见,在入射角 $0^\circ < \theta < 48^\circ$ 的范围内,光子晶体平板透镜的反射率降低到了0.3%以下。

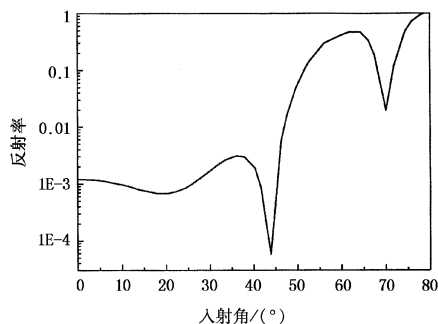


图2 具有优化表面结构( $\delta = 0.22a$ 和 $D = 0.62a$ )的平板透镜的反射率随入射角变化关系曲线

我们对具有表面优化结构的光子晶体平板透镜的远场成像特性进行了FDTD数值模拟计算。其中,线光源置于平板透镜的左侧,距离透镜左表面

$u = a$ ,像面的位置由透镜右侧的平均电场能量密度的极大值位置给出。图3给出了像面上平均电场能量密度分布图。由主瓣峰值高度一半处的宽度得到的透镜分辨率 $0.412\lambda$ ( $\lambda$ 为波长)略好于无表面优化结构的相似平板透镜的分辨率。分辨率的改善来源于透镜对大角度入射光线透射率的提高。我们定义透镜的成像效率为像平面上主瓣内的光功率与光源向 $X$ 轴正方向辐射的功率之比,当物距为 $u = a$ 时,上述平板透镜对线光源的成像效率 $\eta = 0.72625$ 。

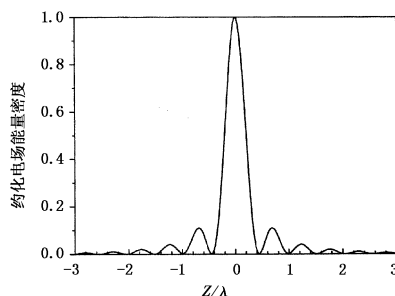


图3 像面上约化电场能量密度分布图

#### 4 结论

给出了用于消除透镜表面反射的优化表面结构,当入射角 $\theta < 48^\circ$ ,光子晶体平板透镜的表面反射率降低到了0.3%。我们给出的优化表面结构具有结构简单、紧凑的特点,而且不降低成像质量。这特别适合于微型化的场合。

#### 参考文献:

- [1] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 85(18): 3966-3969.
- [2] Notomi M. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap[J]. Phys. Rev. B, 2000, 62(16): 10696-10705.
- [3] Ruan Z C, Qiu M, Xiao S S, et al. Coupling between plane waves and Bloch waves in photonic crystals with negative refraction[J]. Phys. Rev. B, 2005, 71(4): 045111.
- [4] Xiao S S, Qiu M, Ruan Z C, et al. Influence of the surface termination to the point imaging by a photonic crystal slab with negative refraction[J]. Appl. Phys. Lett., 2004, 85(19): 4269-4271.
- [5] Luo C Y, Johnson S G, Joannopoulos J D, et al. All-angle negative refraction without negative effective index[J]. Phys. Rev. B, 2002, 65(20): 201104.
- [6] B Momeni, A Adibi. Adiabatic matching stage for coupling of light to extended Bloch modes of photonic crystals[J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 87(17): 171104-171106.
- [7] C M Sterke, T P White. Low interface reflection of rod-type photonic crystals: a bottom up approach[C]// Proc. of SPIE, 2006, 6128, 61281B.
- [8] Baba T, Matsumoto T, Echizen M. Finite difference time domain study of high efficiency photonic crystal superprisms[J]. Opt. Express, 2004, 12(19): 4608-4613.