

文章编号:1004-4213(2011)03-0358-5

构成环形谐振腔的光子晶体微镜设计

李鹏,冯丽爽,陈淑英,王恺

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘 要:研究了光子晶体作为陀螺谐振腔空间微镜的应用,基于平面波展开法计算了光子晶体能带结构和带隙分布图,利用时域有限差分方法对三角晶格介质柱结构微反射镜的传输特性进行了研究,讨论介质柱半径和晶格周期对反射率的影响,并给出优化结果和参量.对输入输出镜进行了初步探索设计,初步给出优化结构.基于介质柱光子晶体微镜的环形谐振腔不仅能实现单片集成还能实现光在空气中传输来大幅度减小克尔和法拉第效应,以及背向散射等影响,这对于研究高准确度谐振陀螺提供了新思路.

关键词:光子晶体;微反射镜;输入输出镜;光子带隙;模式

中图分类号: TN256

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114003.0358

0 引言

近年来,光子晶体^[1-2]因其具有控制光子的流动的能力而备受关注.简而言之,光子晶体即为按一定空间周期性排列的电介质阵列;基于电磁波的布喇格散射,光子晶体中光的色散曲线明显地不同于均匀电介质中的光的色散曲线,其中存在类似于半导体禁带的“光子禁带”(photonic bandgap)^[3];这也是光子晶体最基本的特征,频率位于光子带隙范围内的光不能在光子晶体中传播,它只能被反射或衍射,利用光子晶体的这种性质可以制作高品质的反射镜^[4-7].光子晶体的另一个主要特征是具有光子局域性质.当光子晶体中引入缺陷或杂质时,原有的对称性被打破,由于缺陷、杂质周围都是光子晶体形成的禁区,电磁波在空间分布上只能局限在缺陷内传波,因此可以形成波导^[8],控制光的传输行为,以此来制作环形谐振腔的输入输出镜.这种基于光子晶体的微镜结构具有低的衍射损耗和吸收损耗、制作容差大,具有很高的品质因子,易于器件小型化和实现全光集成等优点,因而具有广泛的应用前景,更重要的是利用 2D 光子晶体微镜构成的陀螺谐振腔便于与其它功能器件实现单片集成.

本文以空气中的介质柱排列的光子晶体为研究对象,使用 Rsoft 的 Bandsolve 和 Fullwave 模块,将平面波展开法(Plane Wave Expansion, 2D PWE)以

及时域有限差分方法(Finite Difference Time Domain, FDTD)方法^[9-10]作为光子晶体的研究工具,对二维光子晶体 TM 模进行详细研究,从而确定出环形谐振腔微镜的优化结构及参量.

1 二维光子晶体中的 TE 和 TM 模

二维晶格方向无限长的称为理想二维光子晶体,在 Z 向有限高度的称为二维光子晶体平板,理想二维光子晶体由于具有二维光子晶体的所有特性,且数学处理简单.

当 k_z 为零时,理想二维光子晶体本征模可分为横电模(TE),不为零的电磁场的分量为(B_z, E_x, E_y)和横磁模(TM)不为零的电磁分量为(E_z, B_x, B_y).对这两种模式,矢量麦克斯韦方程组可以化为标量方程,数学处理相对简单,但是还能够揭示二维光子晶体的主要性质.

使用平面波展开法计算得到空气中介质柱光子晶体能带如图 1.

不难发现,空气中的介质柱更易产生 TM 模带隙,而介质中的空气洞结构更易产生 TE 模带隙.

TM 模和 TE 模出现这种低频率禁带差异的物理原因,主要在于单个圆柱散射体对两种模式入射波散射特性不同,这可由在低频段不同介质场的平均能量密度分布来定性分析.

基金项目:国家自然科学基金(No. 50875015)资助

第一作者:李鹏(1986-),男,硕士,主要研究方向为光子晶体传感器件. Email: chchristmas@126.com

导 师:冯丽爽(1967-),女,教授,主要研究方向为光传感及微光机电. Email: fenglishuang@buaa.edu.cn

收稿日期:2010-07-19;修回日期:2010-08-13

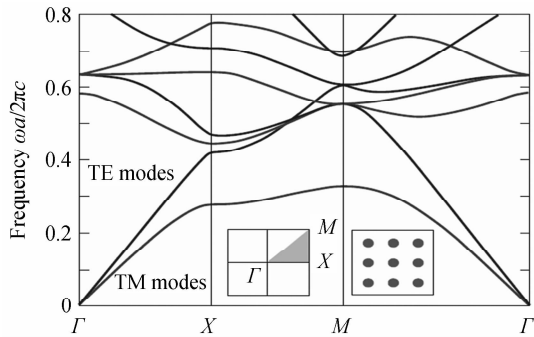


图 1 空气中介质柱能带图
Fig. 1 Band map of the square lattices of dielectric rods in air

对 TM 模,电场只有 E_z 不为零,且在介质交界处连续,因而散射体是高介电常量材料时,散射体中场平均能量密度大于连通背景介质中平均能量密度. 如此,从波的粒子性角度看,散射体对从背景介质入射来的 TM 偏振平面波是一个势垒,入射波背向散射强;反之,若散射体介电常量较背景介质低,散射体对入射波更像一个势阱,不易出现强的背向散射,对布喇格散射型光子晶体,强的背向散射是出现禁带的必要条件. 所以,对 TM 模选取相对高介电常量的介质做散射体,易出现禁带. 对 TE 模,磁场只有 H_z 不为零,且在介质交界处连续,而横向电场与 H_z 的关系为

$$E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} \frac{i}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r}, E_y = -\frac{\partial H_z}{\partial x} \frac{i}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r}$$

因而对低频场,相对介电常量小的地方平均能量密度大. 如此,相对介电常量小的散射体对入射的 TE 偏振平面波相当于一个势垒,可产生强的背向散射,反之,则不行. 所以,对 TE 模选取相对低介电常量的介质做散射体,易出现禁带.

2 微反射镜的优化设计

为了得到相对带宽更宽的禁带,同时增大两种介质的介电常量差,值得注意的是,这个禁带是完全禁带,处于该频率的光无论何种偏振,只要平行于平面入射到晶体上,均被完全反射.

本文取空气中的介质柱三角晶格排列,散射体取 Si 介质,如图 2.

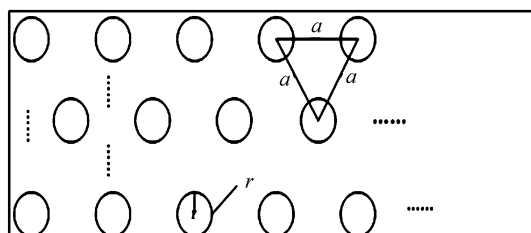


图 2 三角晶格排列微反射镜
Fig. 2 Micro-mirrors constituted of the triangular lattices

Si 的折射率在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长取 $n=3.481$,当折射率确定后,禁带结构主要介质柱占空比 r/a 的大小来控制,考虑到 $2r < a$ 的边界限制, r/a 应小于 0.5 的上限,不考虑散射采取平面波展开法计算带隙特性,对 $r/a \in [0.1, 0.5]$ 进行计算,结果如图 3.

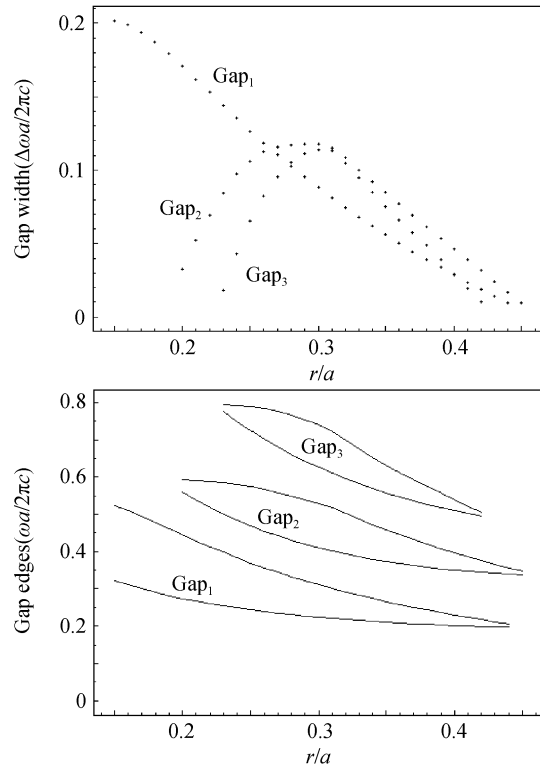


图 3 三角晶格光子晶体 TM 模带隙随 r/a 的变化
Fig. 3 The variation of the band gap with r/a for TM modes for triangular lattice

如前分析,空气中的介质柱更易产生 TM 模带隙,图中 c 是真空中光速, ω 是光波的角频率, $\omega a / 2\pi c (a/\lambda)$ 是归一化频率. 对于在 $r/a=0.25$ 以前,带隙虽然很大,但由 $r=r/a * a/\lambda * \lambda$ 可知,其半径会很小,约 $r=100 \text{ nm}$. 考虑到加工的误差和难易,我们应取尽可能大的介质柱半径和晶格周期,也即要求 r/a 和 a/λ 比较大,基于此我们考虑第二带隙,其在 $r/a=0.31$ 附近有最大的带隙宽度 $\text{gap width}=0.11$,经计算半径约 $r=220 \text{ nm}$,实际加工水平可以

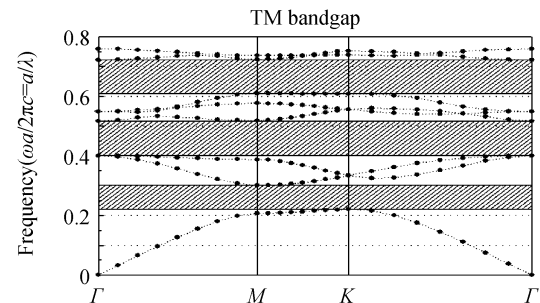


图 4 三角晶格在 $r/a=0.31$ 的 TM 模能带图
Fig. 4 The band diagram of TM modes with $r/a=0.31$ for the triangular lattice

满足要求. 虽然, 第三带隙有更大的 r/a 和 a/λ , 且在 $r/a=0.31$ 处, 带隙宽度也能达到 $\text{gap width}=0.1$, 这样更容易加工, 测试, 同时大幅度降低成本, 但后续计算验证此带隙不是如此理想.

利用 2D FDTD 方法对三角排列微镜反射光传输特性进行计算, 在计算过程中采用的吸收边界条件是完美匹配层边界条件 (Perfect Matched Layer, PML), 着重于第二个带隙, 先固定 r/a 的值 0.31, 0.35, 0.4, 0.45 而归一化频率 a/λ 从 0.2 到 0.7 逐渐变化, 探测器、入射波长参量恒定, 采用高斯光束 $\text{launch width}=6 \mu\text{m}$, $\text{wavelength}=1.55 \mu\text{m}$ 经过大量仿真计算并 MATLAB 辅助得到数据图 5.

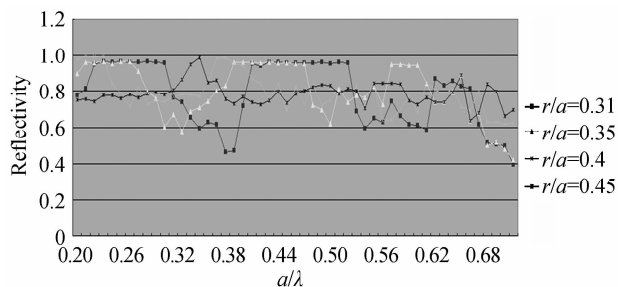


图 5 光子晶体微镜反射率

Fig. 5 The reflectivity of photonic crystal micro-mirrors

可见, 随着 r/a 增大, 带隙宽度逐渐变窄, 对于 $r/a=0.31$ 带隙特性如图 4, TM 模在 $a/\lambda \in [0.4, 0.517]$ 和 $[0.61, 0.722]$ 存在禁带, 图 5 FDTD 仿真在 $a/\lambda \in [0.4, 0.51]$ 具有高反射率, 基本吻合于第二带隙, 而在第三带隙只有 $a/\lambda \in [0.61, 0.65]$ 具有较高反射, 和其带隙吻合得不是很好. 对于高频, 可能其算法不太精确, 也体现软件的不足. 综合之, 取第二带隙, 带隙中心比较高, 带隙宽度大, 容错较高, 符合实际加工能力和器件要求. 最终光子晶体微反射镜优化参量为, 三角排列: $a/\lambda = 0.46$, $r/a = 0.31$, $a = 710 \text{ nm}$, $r = 220 \text{ nm}$, 半径容差 $\Delta r = 50 \text{ nm}$.

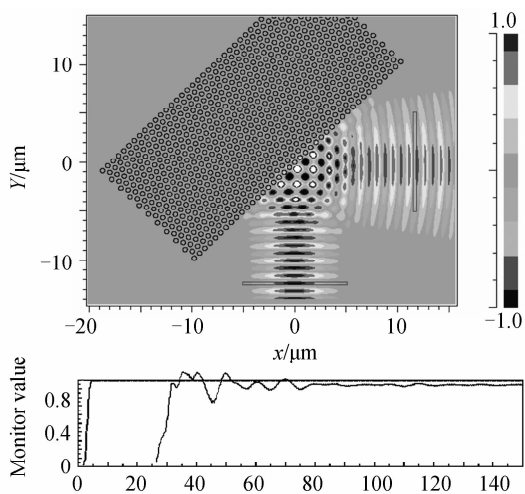


图 6 优化微反射镜 FDTD 仿真

Fig. 6 FDTD simulation of the optimal micro-mirrors

图 6 为优化微反射镜的 FDTD 仿真. 由图 6 可知, 如果忽略光源的发散, 优化后微镜反射率可达 0.99 上, 图中明显的光发散主要源于光源直径比较小, 本研究取 $6 \mu\text{m}$, 导致较大的发散角, 实际光斑尺寸远大于此, 以期能得到更好的结果.

3 输入输出镜的设计

输入输出镜的设计更复杂于光子晶体反射镜, 它需要很好的准直和避免交叉耦合效应, 有可能为空间谐振腔的研究提供新思路, 而其又是谐振腔的关键部分.

3.1 输入输出镜的分光效率

初步方案如图 7, 在光子晶体中去掉一排介质柱来形成波导, 这样就有部分光耦合出去, 而大部分光被反射, 通过改变介质柱半径, 位置及数量来优化反射和透射率.

由于光能量在光子晶体微镜表面传输时, 表面两排介质柱起到主要的作用, 所以我们只需要通过对表面两排介质柱进行优化, 就可以基本实现半透半反的性能. 匹配腔的结构我们采用正方形格结构, 对下面三种情况进行讨论.

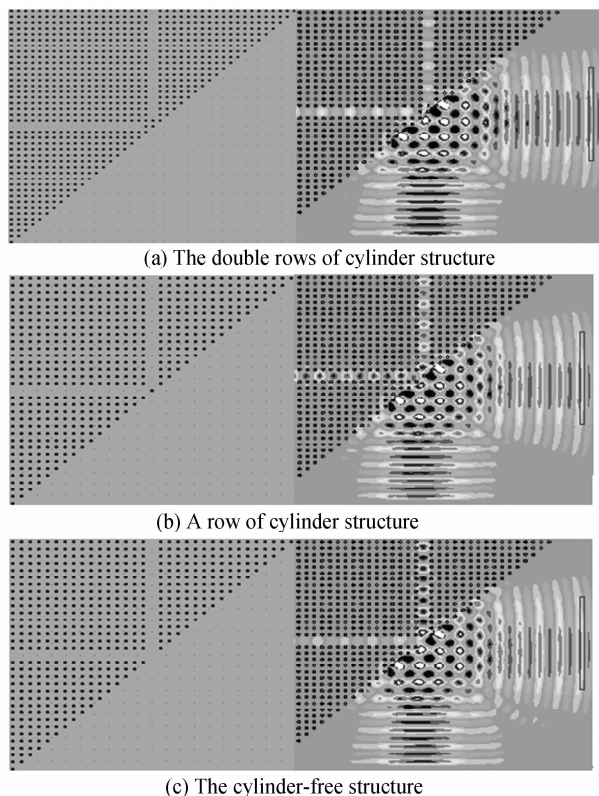


图 7 输入输出镜结构

Fig. 7 Input and output micro-mirrors structure

由图可以得到, 随着介质柱的减少, 耦合出去的光能量逐渐增大, 对不同方向的耦合差异也逐渐明显起来, 对于最后一种结构, 相互垂直方向的耦合分别为 13% 和 1.5%, 反射 74.6%, 仍然存在交叉

耦合。

对于此问题,我们通过加入第二排介质柱,结构如图所示,合理优化其半径和位置,可得到相互垂直耦合效率分别为 8% 和 0.07%,大大降低交叉耦合, FDTD 优化结果如图 8。

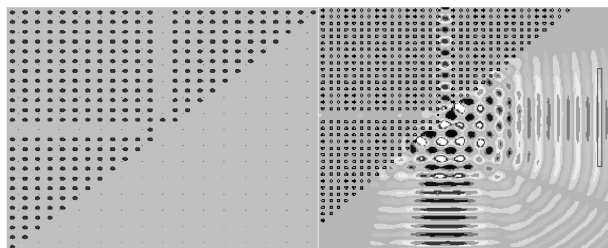


图 8 优化输入输出镜

Fig. 8 Optimal Input and output micro-mirror

由图 8 可以看到光子晶体微镜端面出射光存在很大的发散,不利于和传统光波导或者光纤耦合,极大限制器件的应用和发展。

对微镜做进一步研究,可以通过光子晶体耦合谐振腔^[11-12]提高光束准直传输,具体操作是在光入射或者出射端面形成多个谐振腔,当光入射或出射时,耦合谐振腔的光会再次相干,像光栅一样对光起到重新分布的作用,最终起到对光会聚作用,这种对光传输性能的提高可应用于光子晶体波导与传统波导或传统光纤的耦合(见图 9)。

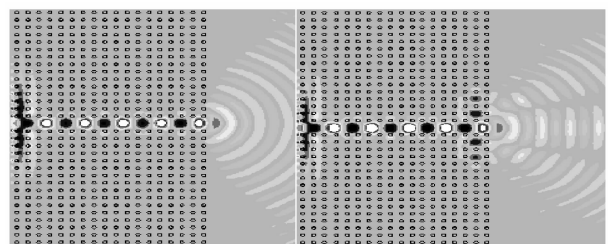


图 9 准直端面的电场分布

Fig. 9 The electric-field amplitude distribution at the pc termination

3 结论

利用 2D PWE 以及 2D FDTD 方法结合,对构成环形谐振腔的光子晶体介质柱微镜进行了详细的理论研究和结构优化,最终得到微反射镜的最佳晶格参量及输入输出镜的优化结构,这为下一步器件

制作及性能测试提供了良好的理论依据,最重要的是介质柱结构的引入避免了光束在介质中传输,大大降低克尔和法拉第效应以及散射噪音等的影响,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2059-2061.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super-lattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2486-2489.
- [3] JIN Chong-jun, QIN Bai, YANG Miao, *et al.* Two dimensional photonic band structure: Triangle non-bravais lattice[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(4): 409-413.
- [4] YE Hong-gang, CHEN Guang-de. Omnidirectional reflector of combined one-dimensional photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1245-1249.
耶红刚,陈光德.组合一维光子晶体全能反射器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1245-1249.
- [5] TANG Liang, YUAN Chang-sheng, CHEN Yan-feng, *et al.* A new type of omnidirectional reflection; the one-dimensional photonic band gap structure with gradual periods[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 573-576.
汤亮,袁长胜,陈延峰,等.连续渐变周期的一维光子带隙结构全能反射器[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 573-576.
- [6] TANG Hai-xia, WANG Qi-ming. Design of photonic crystal end mirrors in resonant cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 91-94.
唐海峡,王启明.构成谐振腔的光子晶体端面反射镜的设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1): 91-94.
- [7] YU He-jun, YU Jin-zhong, YU Yu-de, *et al.* Design, fabrication, and characterization of an ultra-compact low-loss photonic crystal corner mirror[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, **43**(10): 876-883.
- [8] IRAKLIS N, PIERRE P, RICHARD M D L R. Optimization of transmission properties of two-dimensional Photonic Crystal channel waveguide bends through local lattice deformation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **96**(1): 12-18.
- [9] JOHN D J. Photonic crystal molding the flow of light[M]. 2nd ed. Princeton and Oxford: Princeton University Press, 2008.
- [10] DENNIS M S. Electromagnetic simulation using the FDTD method[M]. New York: IEEE Press, 2000.
- [11] ZHU Zhi-hong, YE Wei-min, JI Jia-rong. Enhanced transmission and directional emission via coupled-resonator optical waveguides[J]. *Applied Physics B*, 2007, **86**: 327-331.
- [12] MARTINEZ A, CUESTA F, MARTI J. Ultra-short 2D photonic crystal directional couplers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, **15**: 694-696.

Design of Photonic Crystal Micro-mirrors in Ring Resonant Cavity

LI Peng, FENG Li-shuang, CHEN Shu-ying, WANG Kai

(College of Instrument Science and Photoelectrical Engineering, Beihang University, Beijing, 100191, China)

Abstract: The application of photonic crystal as micro-mirrors was emphatically investigated to calculate the photonic crystal band structure and band gap map, based on plane wave expansion method. The finite-difference time-domain was applied for analyzing the transmission characteristics of micro-mirrors constituted of the triangular lattice of dielectric cylinder structure to discuss the dielectric cylinder radius and lattice period effects on the reflectivity, and optimal results and parameters were given. Photonic crystal ring resonant cavity constituted of dielectric cylinder can achieve monolithic integration, and realize the transmission of light in the air to substantially reduce the Kerr and Faraday effect, and the back scattering effects, etc. This study provides a new idea for high-precision resonant Gyro.

Key words: Photonic crystal; Micro-mirrors; Input and output mirrors; Photonic band gap; Modes