

文章编号: 0253-2239(2008)01-0169-05

填充率渐变型波状结构二维光子晶体

厉以宇 顾培夫 王保清 郑臻荣 刘 旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 填充率渐变引起的能带结构和等频面结构的变化是填充率渐变型波状结构二维(2D)光子晶体(PC)产生光路转弯现象的根本原因,由于 TM 模和 TE 模在能带结构上存在差异,光路转弯现象就具有明显的偏振选择特性,能够实现归一化频率 a/λ 为 0.29~0.33 的偏振分束。利用时域有限差分(FDTD)法模拟了 TM 模的 U 型转弯波导,发现出射光位置对入射波长和入射角的变化很敏感,位移变化量分别达到 $0.38 \mu\text{m}/10 \text{ nm}$ 和 $0.29 \mu\text{m}/(^{\circ})$ 。利用 TM 模的 U 型转弯波导构建了新型的平行平面谐振腔,并指出由填充率渐变型波状结构二维光子晶体和一维多层薄膜构成的混合结构在光分束和抑制光束发散方面的作用及其在平行平面谐振腔中的潜在应用。

关键词 光电子学; 光子晶体; 等频面; 填充率

中图分类号 O439 文献标识码 A

Filling-Factor Graded Wavelike Two-Dimensional Photonic Crystals

Li Yiyu Gu Peifu Wang Baoqing Zheng Zhenrong Liu Xu

(State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract The light-path bending phenomenon in filling-factor graded wavelike two-dimensional (2D) photonic crystals (PC) is due to the gradual modifications of the band structure and iso-frequency surface. Because of the band structure difference between TM and TE mode, the light-path bending phenomenon is polarization dependent, which is suitable for the polarization splitter in the normalized frequency a/λ region from 0.29~0.33. In the U-shaped bending waveguide of TM mode, the position of the emergent light is very sensitive to the incident wavelength and incident angle. The simulations with finite-difference time-domain (FDTD) method show that the sensitivities are $0.38 \mu\text{m}/10 \text{ nm}$ and $0.29 \mu\text{m}/(^{\circ})$, respectively. The plane-parallel resonant cavity is built up in theory with the U-shaped bending waveguide for TM mode. The beam splitting and convergence effect are also discussed for the structure composed of filling-factor graded wave-like 2D-PC and one-dimensional multilayer thin films. This kind structure has the potential application in the plane-parallel resonant cavity.

Key words optoelectronics; photonic crystals; iso-frequency surface; filling factor

1 引 言

光子晶体(PC)作为一种新兴的光子器件因具有传统光学器件无法比拟的光学特性以及在器件小型化、集成化方面的优势,受到越来越多的重视^[1,2]。通常,光子晶体的栅格周期、材料折射率以及单位元胞内每种材料的填充率都为常量,能带结构保持不变,具有稳定的光学特性,只在少数情况

下,如利用缺陷构筑光子晶体微腔^[3]和波导^[4,5]以及在提高光波耦合效率^[6,7]等方面才会涉及这些参量的局部变动。渐变型光子晶体则是在整体上对上述结构参量施以连续和缓慢的变化,产生了一些独特的性质。Zengerle 等^[8]研究了折射率渐变型二维(2D)光子体对宽角谱高斯光束的会聚作用; Centeno 等^[9,10]分析了栅格周期渐变型二维光子晶

收稿日期: 2007-04-18; 收到修改稿日期: 2007-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(60608014)资助的课题。

作者简介: 厉以宇(1980—),男,浙江温州人,博士研究生,主要从事光学薄膜和多维光子晶体等方面的研究。

E-mail: liyiyuu@263.net

导师简介: 顾培夫(1944—),男,浙江人,教授,博士生导师,主要从事光学与光电子薄膜、光电显示技术等方面的研究。

E-mail: gupeifu@zju.edu.cn

体对光束传播路径的控制作用,提出了实现光束超位移和超转弯的方法。

波状结构多层薄膜是一种特殊的二维光子晶体,它具有普通二维光子晶体所没有的层状特征,文献[11]曾对其做过相关报道,但没有涉及渐变型结构。本文将对填充率渐变型波状结构二维光子晶体进行研究,由能带结构入手,分析偏振态对传播特性的影响,并将其与一维多层薄膜相结合,就波导和谐振腔方面的应用展开讨论。

2 理论分析

与栅格周期渐变型二维光子晶体相比,填充率渐变型因为不会改变布里渊区的大小,所以给能带分析和等频面分析带来便利。与折射率渐变型二维光子晶体相比,填充率渐变型又在器件的制备上更为可行,这是本文选择填充率渐变型结构作为研究对象的原因。填充率渐变型波状结构二维光子晶体的构造如图 1 所示,浅灰色和深灰色区域分别代表 SiO_2 (折射率 $n_1=1.5$) 和 Si ($n_h=3.5$) 膜层,顶层材料为 SiO_2 , L_x 和 L_z 分别是波状结构在 x 方向和 z 方向的栅格周期,取 $L_x=L_z=a=0.44 \mu\text{m}$, a 为栅格常量,倾角 $\theta=45^\circ$ 。 T_n 为 Si 膜层的厚度,沿 z 方向递增, n 为 z 方向上的栅格周期数, T_n 变化规律如下:

$$T_n = T_1 + (n-1) \cdot \Delta T,$$

其中 $T_1=0.14 \mu\text{m}$, $\Delta T=0.01 \mu\text{m}$ 为 Si 膜层厚度增量。这里定义 Si 材料的填充率为 $f=T_n/L_z$, 填充率的渐变量 $\Delta f=\Delta T/L_z=2.27\%$ 。

填充率渐变型波状结构二维光子晶体并不属于

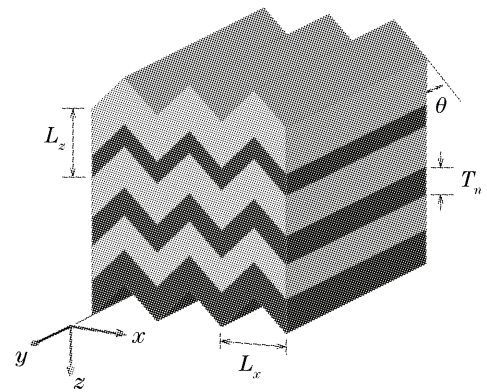


图 1 填充率渐变型波状结构二维光子晶体示意图

Fig. 1 Structure of filling-factor graded wavelike 2D-PC

严格意义上的二维周期结构,整体上不能直接用布洛赫波理论来讨论,但在渐变较为缓慢的情况下可以将其视为多种理想二维光子晶体的组合,对这些理想的二维光子晶体进行研究,可以得到填充率渐变型波状结构二维光子晶体的整体光学特性。理想波状结构二维光子晶体的能带结构如图 2 所示,高折射率材料填充率的提高使能带整体向低频方向压缩,文中将频率选定在 $\Omega=a/\lambda=0.3$, 即波长 $\lambda=1467 \text{ nm}$, 图 2 中的水平点划线代表该频率在能带中的位置。图 3 给出了该频率的等频面结构, f 分别取 0.32、0.41 和 0.50, 虚线是依据波矢切向分量连续原则针对 12° 入射角所绘,它与三组等频线各自相交,交点处的法线方向代表群速度的方向,由实心箭头表示。TM 模的等频面结构由矩形向椭圆演变,面积迅速缩小,群速度由准直传播转变成负折射,折射角随 f 的提高不断增大,最后几乎与水平方向平行;TE 模的等频面呈四边内凹的枕形结构,群速度方向没有出现明显变化,并且属于正常折射。

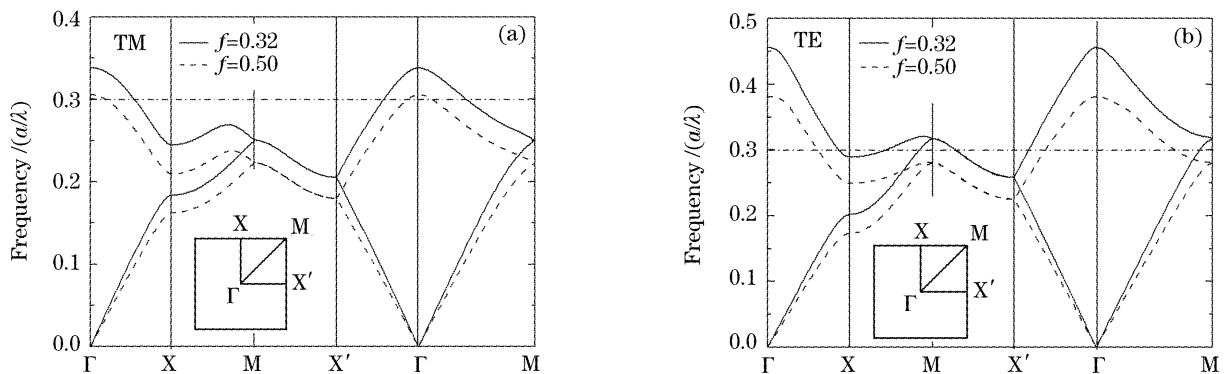


图 2 Si 材料填充率 f 分别为 0.32 和 0.50 的理想波状结构二维光子晶体的能带结构。(a) TM 模, (b) TE 模

Fig. 2 Band structures of perfect wavelike 2D-PC with filling factor f of 0.32 and 0.50 for Si . (a) TM mode, (b) TE mode

利用时域有限差分(FDTD)法对填充率渐变型波状结构二维光子晶体的光学特性进行模拟,如图 4 所示,灰度值代表光强大小, n 设为 19, 即波状结

构总厚度为 $19a$, 其余参量设置不变, 水平方向的点划线代表波状结构与空气的交界面, 高斯光束的波长 λ 为 1467 nm , 入射角为 12° , 束腰为 2.4λ 。TM

模在波状结构内呈现负折射, 折射角随光束的深入逐渐增大, 光路弯曲, 当传播到 $z=6 \mu\text{m}$ 位置时光束方向与 x 轴平行, 随后向上返回并由原先的入射界面出射, 形成一个 180° 转弯的 U 型波导, 出射光与入射光的水平相对位移约为 $7 \mu\text{m}$; TE 模在波状结构内部几乎沿直线传播并由下端界面出射, 与图 3 的等频面分析结果相符。图 5 给出了入射角和入射光波长对图 4(a) 中出射光位置的影响, 当波长

固定在 1467 nm , 入射角在 4° 到 12° 范围内时, 出射光位置与入射角近似成线性变化关系, 变化量约为 $0.29 \mu\text{m}/(^\circ)$; 当入射角固定在 12° , 入射光波长大于 1447 nm 时出射位置开始出现明显变化, 1447 nm 到 1517 nm 的位移变化量约为 $0.38 \mu\text{m}/10 \text{ nm}$ 。这里的位移变化量比文献[8]中的结果要小很多, 原因除了渐变方式不同外, 最主要还是文献[8]采用了更小的结构渐变量。

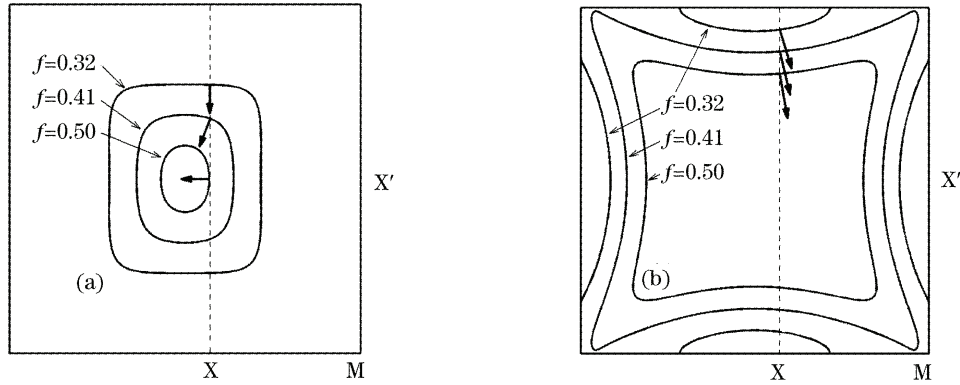


图 3 f 分别为 0.32、0.41 和 0.50 的波状结构二维光子晶体等频面结构, 频率为 $\Omega=a/\lambda=0.3$ 。(a) TM 模, (b) TE 模

Fig. 3 Iso-frequency surfaces of wavelike 2D-PC with f of 0.32, 0.41 and 0.50 when the frequency is $\Omega=a/\lambda=0.3$. (a) TM mode, (b) TE mode

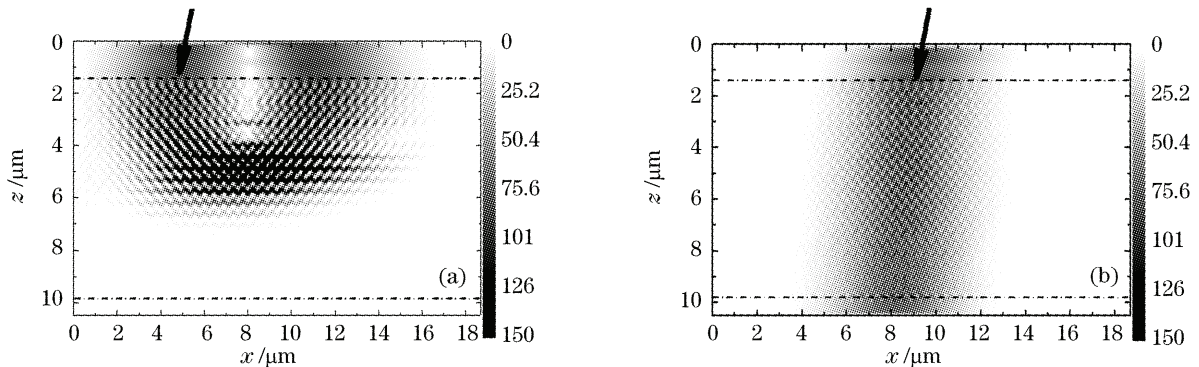


图 4 高斯光束在填充率渐变型波状结构二维光子晶体内的传播情况。(a) TM 模, (b) TE 模

Fig. 4 Propagation of Gaussian beam in filling factor graded wavelike 2D-PC. (a) TM mode, (b) TE mode

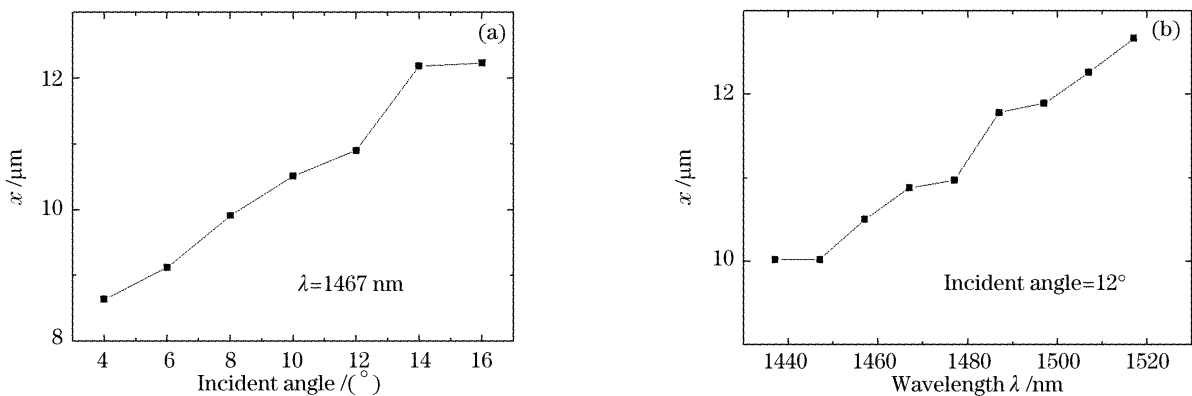


图 5 TM 模 U 型波导中出射光位置的变化。(a) 改变入射角度, (b) 改变入射波长

Fig. 5 Variation of the position of emergent light in U-shaped bending waveguide of TM mode. (a) Incident angle is variable, (b) wavelength is variable

3 应用探讨

填充率渐变型波状结构二维光子晶体具有偏振分束效应。根据图 4 的模拟结果,非偏振的自然光入射到波状结构后分解成 TM 模和 TE 模两种偏振态并按不同路径进行传播,分别由波状结构的上下界面出射,出射的偏振光可以达到相当高的偏振度。利用图 2 的能带结构和图 3 的等频面结构进行分析可知,在当前结构参量下,填充率渐变型波状结构二维光子晶体偏振分束作用的归一化频率 a/λ 适用范围在 0.29~0.33 之间,入射角范围视具体频率而定,例如对于 1467 nm,入射角约在 $2^\circ\sim 40^\circ$ 之间。

将填充率渐变型波状结构二维光子晶体与一维多层薄膜相结合可以实现特殊的 TM 模波导结构,如图 6 所示,水平方向的点划线代表了器件的上下界面,垂直方向的点划线代表了波状结构区域与一维薄膜区域的连接面,图 6(a)中的插图给出了连接区域的结构,连接面两侧相连膜层的厚度相同。波长为 1467 nm,入射角为 10° 的 TM 模高斯光束倾斜入射到填充率渐变型波状结构二维光子晶体区域,

当传播方向几乎与 x 轴平行时光束穿过连接面进入一维薄膜区域并沿直线传播,形成一个 90° 转弯的 L 型波导,因为图 6(a)中一维薄膜区域的右侧紧靠完美匹配层(PML),完美匹配层在时域有限差分方法中用于电磁场的边界吸收,所以看不到反射光。图 6(b)将图 6(a)中 $x > 16 \mu\text{m}$ 的一维薄膜区域用空气层替代,光束在此处以 50° 角出射,受出射端面的反射作用,波状结构和一维多层薄膜内部的光强分布出现一定变化。图 6(c)和图 6(d)逐渐增加波状区域沿 x 方向的栅格周期数,同时保持光源的初始位置不变,相当于将光源的入射位置逐渐远离连接面,这时光束在结构内部发生分裂,一部分能量沿 U 型路径传播,不会穿越连接面,并且光强随光源入射位置与连接面距离的扩大而逐渐增强,其余能量仍然按照 L 型路径传播,光强相应减弱。另外,在图 6(d)中通过 U 型路径出射的高斯光束的空间光强分布得到了压缩,峰值强度提高到入射光的 1.6 倍,如图 6(e)所示。

图 7 利用两块上下对称放置的填充率渐变型波

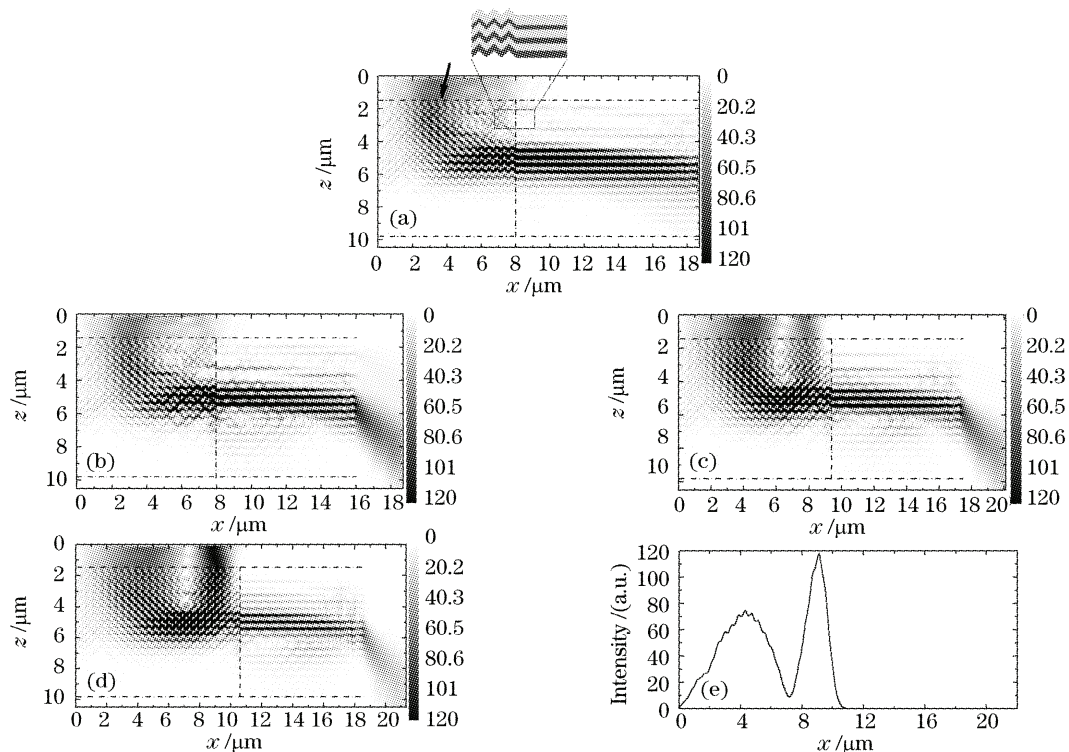


图 6 填充率渐变型波状结构二维光子晶体和一维多层薄膜构建的 TM 模波导结构。(a) 一维多层薄膜右侧无空气层, (b)~(d) 一维多层薄膜右侧含空气层, (b) 填充率渐变型波状结构二维光子晶体和一维多层薄膜的连接面位于 $x = 8 \mu\text{m}$, (c) 连接面位于 $x = 9.3 \mu\text{m}$, (d) 连接面位于 $x = 10.6 \mu\text{m}$, (e) 图 6(d) 中 $z = 1.3 \mu\text{m}$ 处的光强分布

Fig. 6 TM mode waveguide structure composed of filling-factor graded wavelike 2D-PC and one-dimensional multilayer thin films. (a) Without air at the right side of one-dimensional multilayer thin films, (b)~(d) with air at the right side of one-dimensional multilayer thin films, (b) the interface of filling-factor graded wavelike 2D-PC and one-dimensional multilayer thin films is at $x = 8 \mu\text{m}$, (c) the interface is at $x = 9.3 \mu\text{m}$, (d) the interface is at $x = 10.6 \mu\text{m}$, (e) the light intensity at $z = 1.3 \mu\text{m}$ of Fig. 6(d)

状结构二维光子晶体构建了一个平行平面谐振腔，每块厚度为 $9a$ ，其余结构参量不变，波长 1467 nm 的高斯光源位于计算区域中心，为计算简便，图 7 引入了两束相同的 TM 模高斯光束分别向上下两块波状结构同时入射，由白色箭头表示，入射角为 30° 。入射光在波状结构内经过 U 型路径传播后，在负折射作用下又以 30° 角回射到光源的初始位置，随后以相同的角度入射对面的填充率渐变型波状结构二维光子晶体，周而复始形成一个交叉循环

光路。图 7(b) 是相应的电场分布，灰度值代表电场幅值。图 7 的谐振腔存在两个问题，一是无法将能量由谐振腔内引出，二是高斯光束在腔内振荡时会不断发散，解决的方法是用图 6 的混合结构替代图 7 中的两块或是其中任意一块填充率渐变型波状结构二维光子晶体，因为图 6 的混合结构兼有光分束和空间光强压缩作用，所以既能实现平行平面谐振腔的光能输出，又能抑制腔内光束的发散。

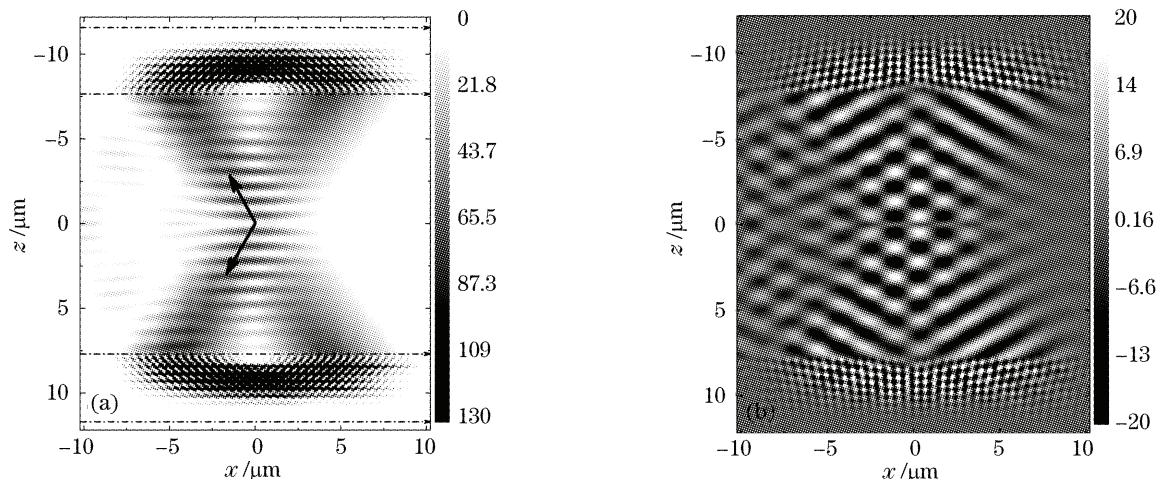


图 7 填充率渐变型波状结构二维光子晶体的 TM 模平行平面谐振腔。(a) 光强分布，(b) 电场分布

Fig. 7 TM mode plane-parallel resonant cavity composed of filling factor graded 2D-PC. (a) Light-intensity distribution, (b) electric field-distribution

4 结 论

填充率渐变引起的能带结构和等频面结构的变化是填充率渐变型波状结构二维光子晶体产生光路转弯现象的根本原因，由于 TM 模和 TE 模在能带结构上的差异使这种光路转弯现象具有明显的偏振选择性。在 U 型转弯波导中出射光位置对入射波长和入射角的变化很敏感，位移变化量可以达到 $0.38\text{ }\mu\text{m}/10\text{ nm}$ 和 $0.29\text{ }\mu\text{m}/(^{\circ})$ ，如能减小填充率的渐变量，位移变化量可以得到进一步提高。利用 U 型转弯波导构建的平行平面谐振腔存在能量无法输出和谐振腔内光束发散两个问题，而由填充率渐变型波状结构二维光子晶体和一维多层薄膜构成的混合结构因为具有光分束和抑制光束发散两方面的作用，有望解决这两个问题。

参 考 文 献

- 1 Wang Hong, Ouyang Zhengbiao, Han Yanling *et al.*. Optical properties and mode tuning of defect modes in one-dimensional photonic crystal micro-cavity containing dispersive medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 940~945
王 宏, 欧阳征标, 韩艳玲等. 含色散介质的一维光子晶体微腔的光学特性和模式调节[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 940~945
- 2 Fang Hong, Lou Shuqing, Guo Tieying *et al.*. Novel-high

- birefringence photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 202~206
方 宏, 姜淑琴, 郭铁英等. 一种新结构高双折射光子晶体光纤[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 202~206
- 3 Jelena Vuckovic, Marko Loncar, Hideo Mabuchi *et al.*. Design of photonic crystal microcavities for cavity QED[J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **65**(1): 016608-1~016608-11
- 4 Bing Wang, Guo Ping Wang. Confining light in two-dimensional slab photonic crystal waveguides with metal plates[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(19): 193128-1~193128-3
- 5 A. Talneau, G. Aubin, A. Uddhammar *et al.*. Highly dispersive photonic crystal-based coupled-cavity structures[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(20): 201106-1~201106-3
- 6 Toshihiko Baba, Daisuke Ohsaki. Interfaces of photonic crystals for high efficiency light transmission[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**(10): 5920~5924
- 7 E. H. Khoo, A. Q. Liu, J. H. Wu. Nonuniform photonic crystal taper for high-efficiency mode coupling[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(20): 7748~7759
- 8 Remigius Zengerle, Phuong Chi Hoang. Wide-angle beam refocusing using negative refraction in non-uniform photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Exp.*, 2005, **13**(15): 5719~5730
- 9 Emmanuel Centeno, David Cassagne. Graded photonic crystals [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(17): 2278~2280
- 10 Emmanuel Centeno, David Cassagne, Jean-Paul Albert. Mirage and superbending effect in two-dimensional graded photonic crystals[J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**(23): 235119-1~235119-5
- 11 Li Yiyu, Gu Peifu, Li Mingyu *et al.*. Near-field subwavelength imaging in wave-like two-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1409~1413
厉以宇, 顾培夫, 李明宇等. 波状结构二维光子晶体近场亚波长成像的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1409~1413