

二维正方晶格光子晶体三光波导方向耦合器

苏 康 王梓名 刘建军

湖南大学物理与微电子科学学院, 湖南 长沙 410082

摘要 光子晶体是以介电常数呈周期性排布且在光波长量级构建的人工微结构,利用其具有光子禁带这一特性可实现对光子的控制。引入线缺陷可形成光子晶体波导。以 $1.55\ \mu\text{m}$ 的 TE 偏振光作为光源,用时域有限差分法计算并分析了二维正方晶格光子晶体三光波导方向耦合器在不同波导间距下的耦合长度及耦合效率分别与介质柱折射率和介质柱半径的变化关系。研究结果为 $1.55\ \mu\text{m}$ 耦合器的结构设计及制备提供一定的理论指导。

关键词 光学器件; 光子晶体; 耦合器; 时域有限差分法; 耦合长度; 耦合效率

中图分类号 O488

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0323002

Three Waveguides Directional Coupler Based on Two Dimensional Square Lattice Photonic Crystal

Su Kang Wang Ziming Liu Jianjun

School of Physics and Electronics, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

Abstract Photonic crystal is an artificial microstructure constructed in optical wavelength scale, whose dielectric constant arrangement is a periodic configuration. Because it possesses photonic bandgap, it can be used to control photons. Photonic crystal waveguide can be formed by introducing line defect. Given $1.55\ \mu\text{m}$ TE polarized light as source and under different waveguide separations, the relationship between coupling length, coupling efficiency and refractive index of dielectric cylinders, radius of dielectric cylinders are calculated and analyzed by finite-difference time-domain method, respectively. These research results will provide a theoretical guidance for the structure design and fabricating of the $1.55\ \mu\text{m}$ coupler.

Key words optical devices; photonic crystal; coupler; finite-difference time-domain method; coupling length; coupling efficiency

OCIS codes 230.1360; 230.5298; 230.7370

1 引 言

光子晶体^[1-2]因具有控制光传播的特性而备受瞩目^[3]。光子晶体是介电常数呈周期性排布且在光波长量级构建的人工微结构。由于布拉格散射,光子晶体可形成能带结构,且可能存在光子禁带^[4],从而使频率处于光子禁带中的电磁波无法传播。当在完整的光子晶体结构中引入线缺陷后,处于光子禁带中的光则被限制在线缺陷中传播,形成光子晶体波导^[5-6]。当一个光子晶体结构中具有两个或多个线缺陷波导时,这些波导在一定条件下可实现耦合。同时,光子晶体波导耦合遵循普通介质波导耦合的一般规律,也有定向耦合的功能^[7]。

光子晶体耦合器可实现光从一个波导耦合到另一个波导。当达到完全耦合时,光所传播的长度即为耦

收稿日期: 2015-08-10; 收到修改稿日期: 2015-9-23

基金项目: 国家自然科学基金(61405058)

作者简介: 苏 康(1993—),男,本科,主要从事基于光子晶体的微纳光子学器件方面的研究。

E-mail: 15608458487@163.com

导师简介: 刘建军(1979—),男,博士,助理教授,主要从事基于光子晶体及光子准晶的微纳光子学方面的研究。

E-mail: jianjun.liu@hnu.edu.cn(通信联系人)

合长度。不同频率的光对应不同的耦合长度,根据这一原理即可实现不同频率光波的分束,因此光子晶体耦合器被广泛应用于光开关^[8-9]、光分束器^[10]、波分复用器^[11]等。此外,光子晶体由于本身具有的优于传统光学材料的性质,还被广泛应用于滤光片^[12]、光纤偏振器^[13]和定向耦合器^[14]等,并在光通信、集成光路以及光子计算机等领域作用斐然。

光子晶体光波导耦合器在某确定频率光波下的耦合长度与耦合器结构参数及材料参数有关,这些参数包括光子晶体维度、晶格类型、构建情况、晶格常数、介质柱形状、介质柱尺寸以及介质柱折射率等。已有研究表明,在一定范围内减小耦合区介质柱半径可以减小耦合长度^[15]。一般来说,波导间距为一排介质柱比多排介质柱更有利于减小耦合长度^[16]。另外也可通过减小波导宽度或增大波导外侧介质柱半径来减小耦合长度,但相比而言,波导间的介质柱半径变化对耦合长度的影响最为显著^[17]。基于此,为了获得更好的耦合特性,一方面,采用新型光子晶体基质材料,如各向异性材料^[18]和硫系玻璃^[19],在新型光子晶体的基础上研究新型光子晶体耦合特性。另一方面,对于传统光子晶体耦合器,以往研究主要以获得更小耦合长度为目的,仅分析在特定参数下的耦合特性,并未考虑参数变化下的耦合特性,这使得研究某参数变化下的耦合特性更具科学意义,可从变化关系曲线中得到最优参数以便制备加工耦合器件。

本文基于二维正方晶格介质柱型光子晶体,并在确定其他参数的情况下,设计了不同波导间距的耦合器,研究了耦合器在不同介质柱折射率和半径下 $1.55 \mu\text{mTE}$ 偏振光波对应耦合长度的变化规律。值得注意的是,对于二维光子晶体介质柱型微结构器件,在三维方向上,介质柱的长度应远远大于入射光波长及晶格常数^[20]。可根据所得介质材料、几何结构及耦合特性参数,在相应介质材料衬底上制备加工。

2 耦合器的结构与算法

考虑两个光波导中的导模沿同一方向的传播情况,当两个平行光波导相互靠近时,一个光波导的光波在另一个光波导中引起极化强度的扰动,两个光波导中的模式即发生耦合行为而产生能量交换^[21]。因此,设计了波导间距分别为一排介质柱(I结构)和两排介质柱(II结构)的光子晶体耦合器,如图1所示。

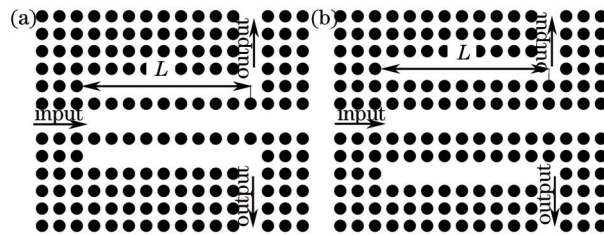


图1 二维正方晶格光子晶体三光波导方向耦合器

Fig.1 Three waveguides directional coupler based on two dimensional square lattice photonic crystal

在一个波导中传播的光可视为由两个耦合器基本传播模式的叠加,它们有不同的传播常数(β_{even} 和 β_{odd})。当两个模式的相移差达到 π 的奇数倍时,光的能量便由一个波导完全转移到另一个波导中,此时光传播的长度即是耦合长度^[22],即

$$L = \frac{\pi}{|\beta_{\text{even}} - \beta_{\text{odd}}|} \quad (1)$$

式中 β_{even} 和 β_{odd} 与耦合器的结构参数有关。

利用时域有限差分法^[23](FDTD)对光波传输进行分析计算。FDTD是直接由麦克斯韦方程组对电磁场进行计算机模拟的数值分析方法。二维FDTD是将二维空间 x - y 平面和时间进行离散化,建立合适的网格体系。二维正方晶格光子晶体耦合器处于 x - y 平面内,光波沿着 x 方向传播。设空间步长 $\Delta x = \Delta y = 0.5$, 时间步长 $\Delta t = 0.025$, 空间步长及时间步长满足关系:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2}}} \quad (2)$$

另外,利用平面波展开法计算分析光子能带结构^[24]。平面波展开法的物理概念清晰、理论推导简单、信

息量丰富且可用于改进研究新型光子晶体及其微结构器件的光子能带结构与带隙。

3 1.55 μm 光的光子晶体耦合器特性分析

设晶格常数 a , 介质柱半径 r , 介质柱折射率 n , 并以 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ TE 偏振光作为光源。采用平面波展开法经多次计算可得到不同参数下光子晶体能带结构, 分析发现: 当二维正方晶格光子晶体的结构参数及材料参数为 $a=0.6 \mu\text{m}$ 、 $r=0.1 \mu\text{m}$ 、 $n=3$ 时, 其能带结构中的光子带隙正好覆盖归一化频率 $f=0.387$ ($f=a/\lambda$ 对应波长 $1.55 \mu\text{m}$), 如图 2 所示。

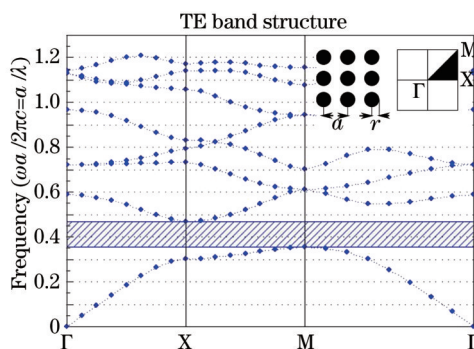


图 2 完整光子晶体结构的光子能带结构

Fig.2 Photonic band structure of the complete photonic crystal

由图 2 可知, $1.55 \mu\text{m}$ TE 偏振光所对应的归一化频率 $f=0.387$ 处于光子带隙中。

3.1 介质柱折射率变化下的耦合长度及耦合效率

为研究 $1.55 \mu\text{m}$ 光波二维正方晶格介质柱型光子晶体耦合器的耦合长度和耦合器结构参数的变化关系, 在此运用了控制变量法, 即确定其他结构参数, 只改变介质柱折射率, 计算分析耦合长度与介质柱折射率的变化关系。确定 $a=0.6 \mu\text{m}$ 、 $r=0.1 \mu\text{m}$, 改变 n 且 $\Delta n=0.01$ 。通过计算发现: 当 $n \in [2.80, 3.50]$ 时, 可使 $1.55 \mu\text{m}$ TE 偏振光所对应的归一化频率 0.387 处于光子带隙中。 $1.55 \mu\text{m}$ TE 偏振光在一排介质柱 ($n_1=3.1$) 间距结构耦合器和两排介质柱 ($n_2=2.9$) 间距结构耦合器的传输场分布, 见图 3。

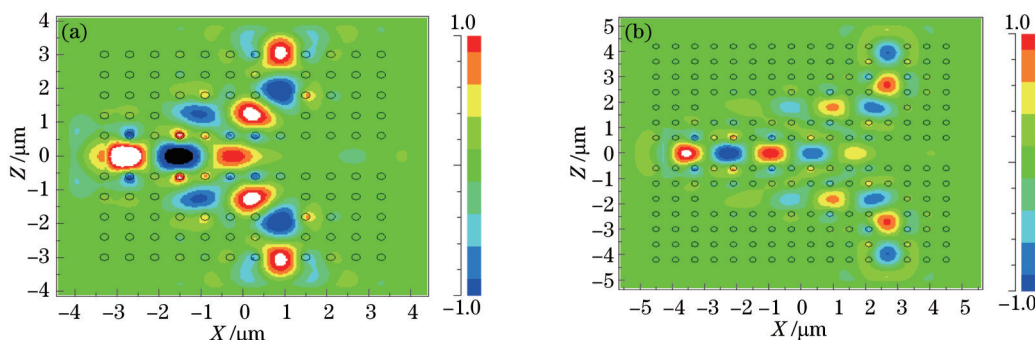


图 3 不同耦合器中光传输场分布。(a) 波导间距为一排介质柱 $n_1=3.1$; (b) 波导间距为两排介质柱 $n_2=2.9$

Fig.3 Field distribution of light transmission in the different couplers. (a) Waveguide separation has a row of dielectric cylinders $n_1=3.1$; (b) waveguide separation has two rows of dielectric cylinders $n_2=2.9$

由图 3 可知, 两种耦合器对应的耦合长度分别为 $L_1 = 3.22 \mu\text{m}$ 和 $L_2 = 6.25 \mu\text{m}$ 。经过多次数值计算, 得出了耦合长度随介质柱折射率变化的 $L-n$ 图, 如图 4 所示。不同介质柱折射率对应耦合器的耦合效率(两个分支光波导中光功率之和与此时入射总功率的百分比), 如图 5 所示。

由图 4 可知, 耦合长度 L 随着介质柱折射率 n 的增加近似呈指数增长。改变介质柱的折射率可改变耦合区域内介质柱的有效介电常数, 即对奇模和偶模的传播常数产生不同的影响, 使其相位差发生变化, 从而使耦合长度 L 改变。I 结构耦合器的耦合长度明显要小于 II 结构耦合器, 此结果也验证了文献[16]中的结论: 波导间距为一排介质柱比多排介质柱更有利于减小耦合长度。由图 5 可知, 对于 $1.55 \mu\text{m}$ TE 偏振光, 两种类型耦合器的耦合效率均达到了 93.3% 以上, II 结构耦合器耦合效率均在 99.2% 以上且变化较小, I 结构耦合器耦

合效率明显低于II结构耦合器。

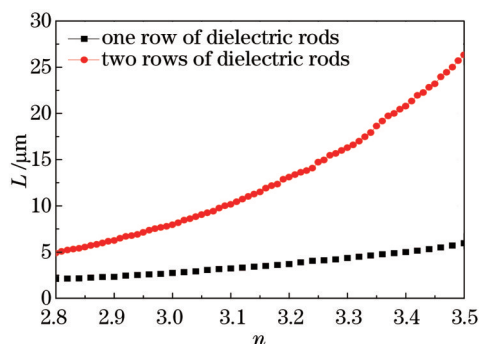


图4 不同波导间距下耦合长度与介质柱折射率的关系

Fig.4 Relationship between coupling length and refractive index of dielectric cylinders for different waveguide separations

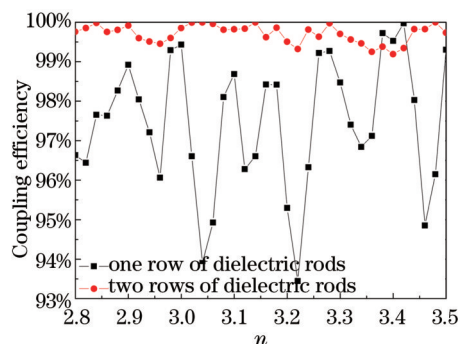


图5 不同波导间距下耦合效率与介质柱折射率的关系

Fig.5 Relationship between coupling efficiency and refractive index of dielectric cylinders for different waveguide separations

3.2 介质柱半径变化下的耦合长度及耦合效率

同样地,确定 $a=0.6 \mu\text{m}$, $n=3$, 改变 r 且 $\Delta r=0.002 \mu\text{m}$ 。通过计算发现:当 $r \in [0.090 \mu\text{m}, 0.150 \mu\text{m}]$ 时, $1.55 \mu\text{m}$ TE 偏振光所对应的归一化频率 0.387 处于光子带隙中。 $1.55 \mu\text{m}$ TE 偏振光在一排介质柱 ($r_1=0.092 \mu\text{m}$) 间距结构耦合器和两排介质柱 ($r_2=0.114 \mu\text{m}$) 间距结构耦合器中的传输场分布,见图6。

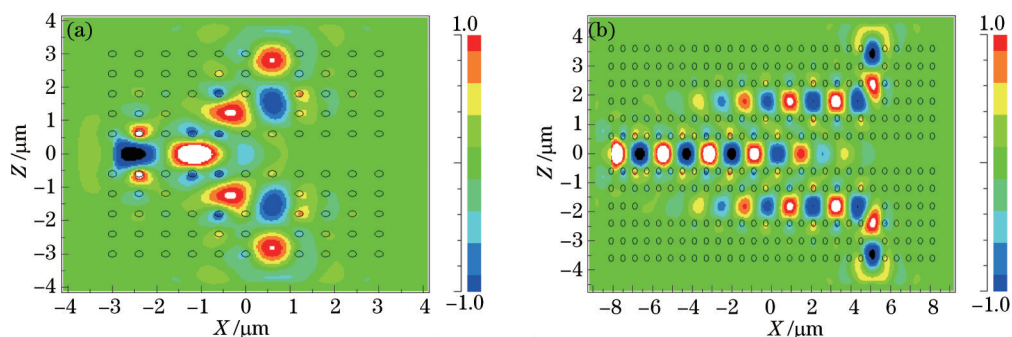


图6 不同耦合器中光传输场分布。(a) 波导间距为一排介质柱 $r_1=0.092 \mu\text{m}$; (b) 波导间距为两排介质柱 $r_2=0.114 \mu\text{m}$

Fig.6 Field distribution of light transmission in the different couplers. (a) Waveguide separation has a row of dielectric cylinders $r_1=0.092 \mu\text{m}$; (b) waveguide separation has two rows of dielectric cylinders $r_2=0.114 \mu\text{m}$

由图6可知,两种耦合器对应的耦合长度分别为 $L_1=2.36 \mu\text{m}$ 和 $L_2=12.04 \mu\text{m}$ 。经过多次数值计算,得出了耦合长度、耦合效率分别随介质柱半径的变化关系图,如图7、8所示。

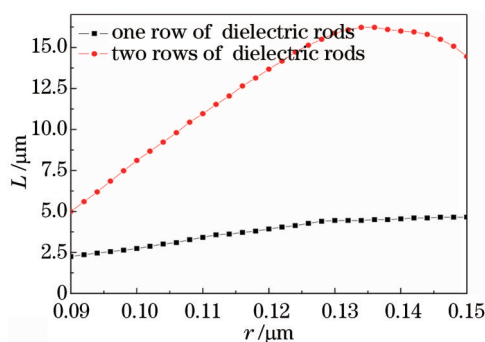


图7 不同波导间距下耦合长度与介质柱半径的关系

Fig.7 Relationship between coupling length and radius of dielectric cylinders for different waveguide separations

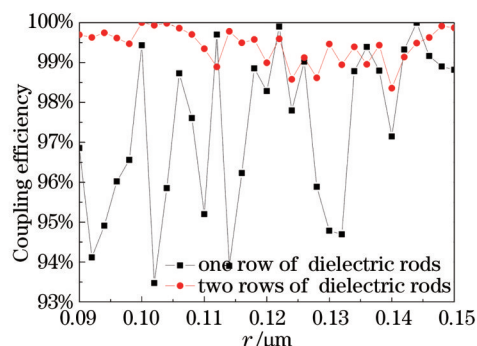


图8 不同波导间距下耦合效率与介质柱半径的关系

Fig.8 Relationship between coupling efficiency and radius of dielectric cylinders for different waveguide separations

由图7知,对于 $1.55 \mu\text{m}$ TE 偏振光,所设计耦合器的耦合长度随介质柱半径的增加均有一个增长、平缓的过程,且II结构耦合器的耦合长度在介质柱半径大于 $0.134 \mu\text{m}$ 时,有一个下降过程。当介质柱半径较小

时,介质柱半径的变化会影响耦合区域内介质柱的有效介电常数,从而使耦合长度随介质柱半径的增加而线性增长。当介质柱半径增大时,波导间距的填充比增大,波导宽度减小,此时各种参数相互作用,介质柱半径逐渐失起主导影响作用,因此会出现耦合长度随介质柱半径先增长后平缓的情况。对于波导间距为两排介质柱的耦合器,还会出现耦合长度随介质柱半径增大而减小的过程。总体而言,I结构耦合器的耦合长度明显小于II结构耦合器的耦合长度。由图8可知,对于1.55 μm TE偏振光,两种类型耦合器的耦合效率均达到了93.4%以上,波导间距为II结构耦合器耦合效率均在98.3%以上且变化较小,而I结构耦合器耦合效率明显低于II结构耦合器耦合效率。

综合两组数据(图4与图7,图5与图8)可知,对于1.55 μm TE偏振光,所设计的耦合器,其耦合长度、耦合效率均具有一定的规律性。I结构耦合器耦合长度明显小于II结构耦合器耦合长度,即若考虑光学器件的微型化与集成化,则I结构耦合器具有明显优势。两耦合器的耦合效率均达到了93.3%以上,且I结构耦合器耦合效率低于II结构耦合器耦合效率,即若注重光学器件的耦合效率,则II结构耦合器具有明显优势。因此,在耦合器各结构参数的选择上,要兼顾耦合长度和耦合效率,以求找到最合适的耦合器结构。

4 结 论

以1.55 μm TE偏振光为研究对象,采用FDTD法和控制变量法研究了二维正方晶格光子晶体三光波导方向耦合器在不同波导间距下的耦合长度、耦合效率分别与介质柱折射率、介质柱半径的变化关系。研究结果表明:耦合长度随介质柱折射率的增加近似呈指数关系增加,随介质柱半径的增加呈线性增长、平缓和小变化;相对于波导间距为两排介质柱的耦合器而言,波导间距为一排介质柱的耦合器的耦合长度较小且耦合效率较低。该研究结果将为1.55 μm 光及其他波段光波导耦合器的设计及制备提供一定的理论指导。

参考文献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 3 Mekis A, Chen J C, Kurland I I, *et al.*. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 77(18): 3787-3790.
- 4 Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, *et al.*. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*[M]. Princeton: Princeton University Press, 2008: 1-24.
- 5 Sugisaka J, Yamamoto N, Okano M, *et al.*. Development of curved two-dimensional photonic crystal waveguides[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(23): 5788-5792.
- 6 Wang Xianwang, Zhang Wei, Han Jintao, *et al.*. Investigation of structure design and transmission characteristic of GeSbSe photonic crystal waveguides[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0105001.
王贤旺, 张 巍, 韩金涛, 等. GeSbSe光子晶体波导结构设计及传输特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0105001.
- 7 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Yuan Xiaodong, *et al.*. Photonic crystal waveguide directional coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1237-1240.
朱志宏, 叶卫民, 袁晓东, 等. 光子晶体波导定向耦合器[J]. *光学学报*, 2003, 23(10): 1237-1240.
- 8 Zhou Haifeng, Jiang Xiaoqing, Yang Jianyi, *et al.*. Analysis on multimode interference coupler-based 1×3 optical switch with mono-compound modulation region[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(9): 1691-1694.
周海峰, 江晓清, 杨建义, 等. 具有单一复合调制区的多模干涉效应耦合器1×3光开关的分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(9): 1691-1694.
- 9 Yu Tianbao, Wang Minghua, Jiang Xiaoqing, *et al.*. Ultracompact and wideband power splitter based on triple photonic crystal waveguides directional coupler[J]. *Journal of Optics A-Pure & Applied Optics*, 2007, 9(1): 37-42.
- 10 Mur G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time domain electromagnetic field equations[J]. *IEEE Trans, Electromagnetic Compatibility*, 1981, 23(4): 377-382.
- 11 Rostami A, Nazari E, Alipour Banaei H, *et al.*. A novel proposal for DWDM demultiplexer design using modified-T photonic crystal structure[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2010, 8(1): 14-22.
- 12 He Zhiyu, Jiao Hongfei, Cheng Xinbin, *et al.*. Design of reflective multichannel filter based on characteristics of photonic band gap[J].

- Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0231002.
贺芝宇, 焦宏飞, 程鑫彬, 等. 基于光子晶体带隙特性的反射式多通道滤光片设计[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0231002.
- 13 Ning Xiangping, Zhao Chunliu, Lang Tingting, *et al.*. Photonic crystal fiber polarizer based on coupling[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(6): 060601.
宁向平, 赵春柳, 郎婷婷, 等. 基于谐振耦合原理的光子晶体光纤偏振器件[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 060601.
- 14 Sun Bing, Chen Mingyang, Qian Chunlin, *et al.*. Design of a broadband directional coupler based on an asymmetric three-core photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706010.
孙 兵, 陈明阳, 钱春霖, 等. 基于非对称三芯光子晶体光纤的宽带定向耦合器研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706010.
- 15 Martinez A, Cuesta F, Marti J. Ultrashort 2-D photonic crystal directional couplers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(5): 694-696.
- 16 Boscolo S, Midrio M, Someda C G. Coupling and decoupling of electromagnetic waves in parallel 2-D photonic crystal waveguides[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(1): 47-53.
- 17 Jin Xiaojun. The Study on Characteristics of Multi-Wavelength Photonic Crystal Wavelength Division Based on Multimode Interference Theory[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2011: 30-56.
金晓君. 基于多模干涉的多波长光子晶体波分复用器特性研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2011, 30-56.
- 18 Song Guicai, Quan Wei. Optical Waveguide Principle and Devices[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
宋贵才, 全 薇. 光波导原理与器件[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- 19 Liu Chengyang. Efficient omnidirectional couplers achieved by anisotropic photonic crystal waveguides[J]. Physics Letters A, 2009, 373(34): 3061-3066.
- 20 Liu J J, Fan Z G, Hu H L, *et al.*. Wavelength dependence of focusing properties of two-dimensional photonic quasicrystal flat lens[J]. Optics Letters, 2012, 37(10): 1730-1732.
- 21 Lian Z G, Pan W, Furniss D, *et al.*. Embossing of chalcogenide glasses: monomode rib optical waveguides in evaporated thin films[J]. Optics Letters, 2009, 34(8): 1234-1236.
- 22 Pustai D M, Sharkawy A, Shi S, *et al.*. Characterization and analysis of photonic crystal coupled waveguides[J]. J Micro/Nanolith, 2003, 2(4): 292-299.
- 23 Taflove A, Hagness S C. Computational Electrodynamics: the Finite Difference Time Domain Method[M]. Boston: Artech House, 1998.
- 24 Liu Jianjun, Fan Zhigang, Xiao Haosu, *et al.*. Photonic band gap in Ge-based two-dimensional triangular lattice photonic crystals[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2012, 31(1): 35-41.
刘建军, 范志刚, 肖昊苏, 等. Ge基二维三角晶格光子晶体的光子带隙[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(1): 35-41.

栏目编辑: 张 雁