

圆弓形散射元构建的二维硅基太赫兹波导的制备和表征

万 勇^{1,2} 云茂金¹ 潘淑娣¹ 夏临华^{1,2}

(¹青岛大学物理科学学院, 山东 青岛 266071
²青岛大学重点实验室培育基地多功能材料所, 山东 青岛 266071)

摘要 设计了一种新型的散射元——圆弓形散射元。以此散射元为基础,在硅片上制作出多种介质柱和空气孔型光子晶体波导。测量表明:圆弓形介质柱结构,较空气孔结构更有利于带隙的形成,而且随着参数 e 的改变,会引起光子禁带大小和位置的变化。对于同一介质柱结构,随着入射光与长轴夹角的增大,其反射谱中禁带的位置产生明显蓝移,反映出这一结构的各向异性特征。

关键词 光学设计;圆弓形;散射元;太赫兹;波导

中图分类号 TN202 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1222004

Fabrication and Characterization of THz Waveguides with Silicon Wafer by Using Cylinder Segments as Scatterers

Wan Yong^{1,2} Yun Maojin¹ Pan Shudi¹ Xia Linhua^{1,2}

(¹College of Physics, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China
²Institute of Multifunctional Materials, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract A novel kind of scatterers — cylinder segments has been designed. Based on this design, a series of photonic crystal waveguides, including structures of dielectric pillars in air and structures of air holes in dielectric, are fabricated on silicon wafer. The measurement results demonstrate that the structures of dielectric pillars in air can form band gaps more easily than the structures of air holes in dielectric, and the former can also tune the widths and positions of the band gaps by changing the parameter e . For the same structure of dielectric pillars in air, the band gap position in the optical transmission spectra moves toward the shorter-wavelength edge when the angle of incidence along the long axis becomes larger, indicating that the structure has the property of anisotropy.

Key words optical design; cylinder segment; scatterer; terahertz; waveguide

OCIS codes 220.4610; 230.7400

1 引 言

太赫兹波(THz波)具有频谱范围宽、抗背景干扰能力强、能量处在有机分子转动和振动跃迁范围内、可实现三维成像和具有较强的探测和识别性能等特点,人们预言它在研究宇宙背景辐射、生物、医疗、无线通讯和军事等领域都有广阔的应用前景^[1,2]。20世纪90年代以后,THz发射源成为众多学科的研究热点^[3~8]。但是目前关于传输和控制THz波的波导研究相对较少,且多数集中在金属材料,少数属于聚合物和陶瓷材料^[9,10]。因此,研究以

波导为基础的THz器件是THz波传输的重要基础,也是THz波能否得到广泛应用的关键因素之一。

光子晶体作为一种新型材料,不仅具有周期性结构和低损耗的特点,而且具有禁带特性和局域特性^[11~13],可提供不同于以往的电磁波传播和控制方法。从本质上说,光子晶体结构的主要部分是周期排列和散射元。散射元^[14]是指组成光子晶体元胞的几何和物理结构。在材料、周期性排列和填充率变化不大的情况下,散射元的大小、形状和对称性等,不仅很大程度决定了光子晶体带隙特点,而且决

收稿日期:2011-06-21;收到修改稿日期:2011-07-17

基金项目:国家自然科学基金(10744003)及山东省自然科学基金(Y2008A09)资助课题。

作者简介:万 勇(1965—),男,博士,副教授,主要从事光子晶体和电磁场理论等方面的研究。

E-mail: wanyong@qdu.edu.cn

定了传输效率和慢光等非带隙特性的不同。

常用的圆柱形散射元只有半径一个自由度,对于光子带隙的调节比较单一。本文设计了一种新型的散射元——圆弓形散射元,可以多自由度调控光子带隙的大小和位置。以此散射元为基础,在硅片上(THz波容易穿过无掺杂的硅片)实际制作了各种参数的介质柱和空气孔结构波导,并通过实际测量,对结构的带隙和反射特征分析,研究圆弓形散射元构建的二维硅基太赫兹光子晶体波导的传输特征。

2 散射元的设计和波导制作

2.1 散射元的设计

图1(a)是圆弓形散射元的示意图。取两个半

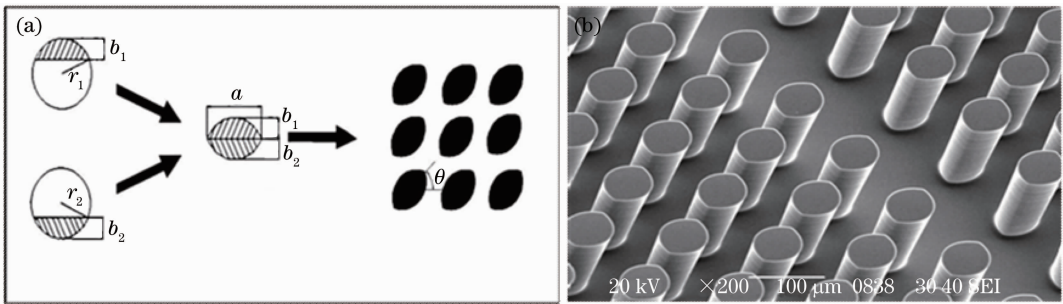


图1 (a)圆弓形散射元的示意图;(b)圆弓形介质柱的侧面图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of cylinder segments as scatterers; (b) side view of dielectric cylinder-segment pillars in air

$n_0=1.0$ 。对于空气孔形波导,孔的介电常数为 $n=1.0$,周围介质的介电常数 $n_0=3.50$ 。
 设计了多种介质柱形对称波导和空气孔形对称波导。具体参数如下:假定太赫兹波导的工作频率 $f=1$ THz,两圆弓体中心之间的距离 $r=120 \mu\text{m}$,长轴半径 $a=0.375r=45 \mu\text{m}$,短轴半径 b 则取不同的值, $b_0=a=45 \mu\text{m}$, $b_1=0.9a=40.5 \mu\text{m}$, $b_2=0.8a=36 \mu\text{m}$, $b_3=0.7a=31.5 \mu\text{m}$ 等等。设 $e=1-b/a$,则有: $e_0=0$, $e_1=0.1$, $e_2=0.2$, $e_3=0.3$ 等。由于光子晶体平板是硅片构成的,对于介质柱形波导,取介质柱的介电常数 $n=3.50$,空气介电常数为

模拟计算表明^[15]:以圆弓形为散射元,介质柱形式,容易形成TE模式和TM模式的光子带隙;而空气孔形式,则不容易形成TE模式和TM模式的光子带隙。以TE模式为例,图2(a)和(b)分别是介质柱和空气孔的TE模式禁带曲线,横坐标是参数 e 的取值,纵坐标是禁带宽度,分绝对宽度和相对宽度两种。每个图上有两条线,实线是禁带绝对宽

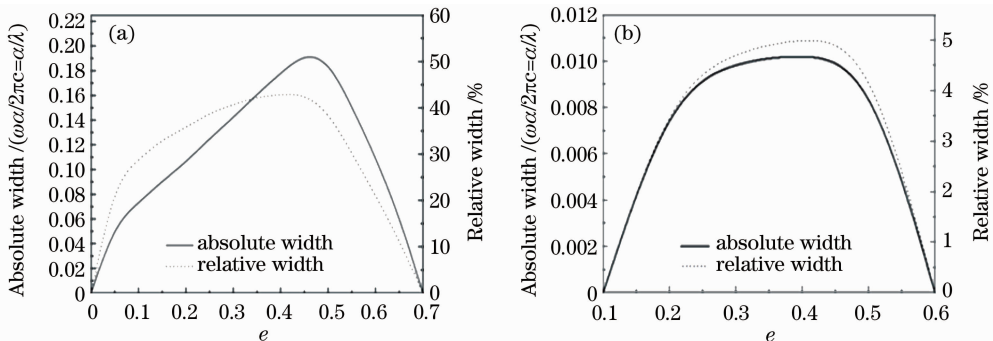


图2 (a)介质柱的TE模式禁带曲线;(b)空气孔的TE模式禁带曲线

Fig. 2 (a) Curves of the TE mode forbidden band for structures of dielectric pillars in air; (b) curves of the TE mode forbidden band for structures of air holes in dielectric

度曲线,即禁带上下频率之差;虚线是禁带绝对宽度相对于禁带中心频率的百分比,又称相对禁带宽度。从图上可以看出:对于相对于中心频率的百分比高于5%的光子禁带,介质柱 e 的取值范围为0.03~0.67,而空气孔的 e 的取值范围却在0.36~0.47。另外,曲线中禁带宽度的峰值也不相同,前者的最大值是43.20%,后者的最大值只有5.12%。

2.2 波导加工

设计所用的硅片是美国硅谷电子公司(SVM)生产的直径10 cm的高阻抗硅片(没有进行p型或者n型掺杂的纯净硅,阻抗大于1000 Ω/cm)。每一个设计单元都是1.2 cm \times 1.2 cm,即100行 \times 100列,为了有效利用硅片,每个硅片被设计成有重复的32个单元,考虑到可能会有边缘效应,所以每个单元都在中心和边缘各一次。图3(a)是俯视的掩模示意图;(b)是加工后的硅片单元照片。

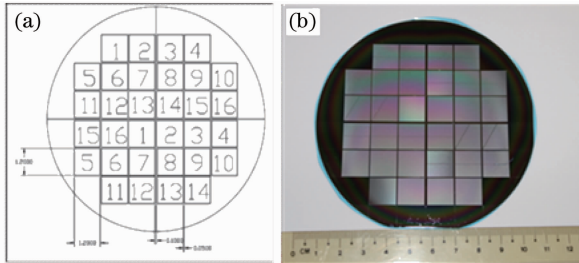


图3 (a)掩模示意图;(b)加工后的硅片单元

Fig. 3 (a) Schematic structure for mask; (b) units on silicon wafer after processing

把设计的掩模制作到硅片上,要经历很复杂的涂胶、曝光、显影和刻蚀等工艺过程。详细步骤如下:

1) 硅片表面处理:使用常规的化学表面清洗剂——丙酮、甲醇和去离子水依次清洗硅片,去除可能的污迹,然后将硅片放在150 $^{\circ}\text{C}$ ~200 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱里烘烤15 min以上。考虑到后面步骤,实验中在硅片表面沉淀了一层 SiO_2 ,厚度是1.66 μm ,历时约30 min。实验条件是:气压 1.33×10^7 Pa,温度280 $^{\circ}\text{C}$,氩气体积流量184 cm^3/s ,氮气体积流量400 cm^3/s , SiH_4 体积流量30 cm^3/s 。

2) 涂加化学增附剂(HMDS):为确保光刻胶在后面的刻蚀工艺不会脱落,在其表面还要涂上一层化学增附剂,温度150 $^{\circ}\text{C}$,需要15 min。

3) 涂胶:光刻胶是用旋涂方法涂上去的。通过高速旋转,使AZP4330光刻胶均匀甩到整个硅片表面。光刻胶的厚度由转速来控制,本实验是3000 r/s。为蒸发掉硅片上光刻胶的有机成分,使

胶体固化,实验中采用前烘,温度是90 $^{\circ}\text{C}$,时间是3 min。

4) 曝光:涂过光刻胶的硅片,可以放在曝光机上曝光,由于要将掩模对准曝光,所以曝光前要选择掩模尽量接近硅片,曝光时间为12 s。

5) 后烘:由于光照到光刻胶和硅片的界面上,会产生反射。而反射光和人射光叠加会产生驻波,后烘可消除这种效应。但是本实验中的硅片里采用了抗反射涂层,所以没有采用该步骤。

6) 显影:将硅片浸泡在AZ显影液里45 s后取出。由于显影后,会在硅片表面残留一层很薄的胶质薄膜,它有可能影响曝光图形的深宽比,需要去除残胶。方法是把硅片放在等离子体刻蚀机中,进行30 s的刻蚀。

7) 坚模:又称硬烘烤,就是通过加温烘烤使胶膜更牢固的附着在硅片表面,以增加胶层的抗刻蚀能力。本实验坚模温度95 $^{\circ}\text{C}$,时间5 min。

8) 图形转移:对光刻胶曝光的目的是将掩模的设计图案,转移到硅片表面。光刻胶本身也是起到一种掩模作用,即保护硅片,只有通过显影暴露的部分才进一步加工。对 SiO_2 的刻蚀需要几个小时,实验条件如下:气压 4.0×10^6 Pa,功率150 W, CHF_3 25 cm^3/s ,Ar 25 cm^3/s 。

9) 去胶:图形转移完成后,需要清洗掉光刻胶,去胶的办法有干法和湿法。干法用氧气等离子体去胶,湿法用各种酸碱溶液或者有机溶液将胶体层腐蚀掉。本实验中采用丙酮浸泡,时间是6 h左右。

10) 将硅片刻蚀100 μm :这一过程需要耗时一天,而且每刻蚀半小时就要让机器停10 min。刻蚀过程分两步:第一步为表面层刻蚀,工作条件为射频(RF)功率50 W,感应耦合等离子体(ICP)功率450 W,工作室气压 4.0×10^6 Pa, C_4F_8 体积流量3 cm^3/s , SF_6 体积流量75 cm^3/s ;第二步为深层刻蚀:工作条件为射频功率20 W,感应耦合等离子体的功率450 W,工作室气压 5.33×10^6 Pa, C_4F_8 体积流量50 cm^3/s , SF_6 体积流量2 cm^3/s 。

图4是 $e=0.3$ 时介质柱形和空气孔波导的SEM图片,分别对应无缺陷介质柱波导、有线缺陷介质柱波导、无缺陷空气孔波导和有线缺陷空气孔波导。

3 测试和分析

为了比较介质柱和空气孔两种结构的区别,对不同参数 e 的两种结构进行了测试。测试用的太赫兹源是利用非线性频率变换产生的,工作频率范围

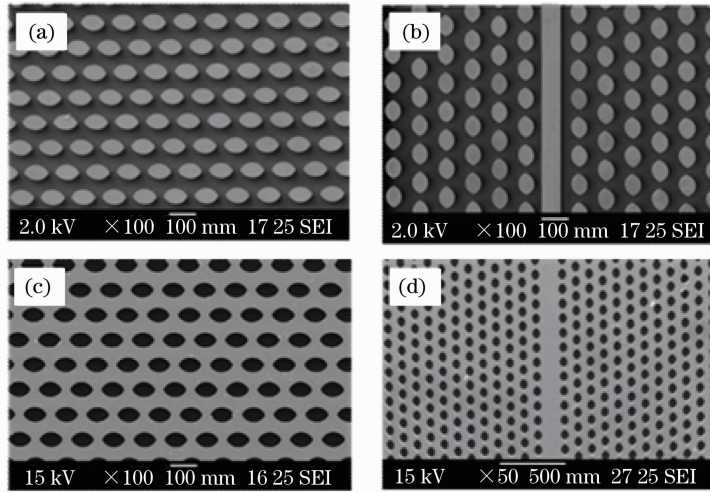


图 4 $\epsilon=0.3$ 时介质柱形和空气孔波导的 SEM 图片。(a)无缺陷介质柱波导;(b)有线缺陷介质柱波导;
(c)无缺陷空气孔波导;(d)有线缺陷空气孔波导

Fig. 4 SEM of 4 kinds of waveguides of $\epsilon=0.3$. (a) Dielectric pillars in air without defect; (b) dielectric pillars in air with defect; (c) air-hole waveguide in dielectric wafer without defect; (d) air-hole waveguide in dielectric wafer with linear defect

在 0.1~3.0 THz 之间,光谱测试仪是 VERTEX 80v。图 5(a),(b)分别是参数 $\epsilon_2=0.2$ 和 $\epsilon_3=0.3$ 时,介质柱结构相对于无结构硅片的反射谱。横轴是频率,单位为 THz,纵轴是相对于无结构硅片的反射倍数(以其测得的值为背景)。图 5(c),(d)分别是参数 $\epsilon_2=0.2$ 和 $\epsilon_3=0.3$ 时,空气孔结构相对于无结构硅片的反射谱。可以看出:介质柱结构,明显

有 1 个或多个反射峰出现,说明结构有禁带存在。而空气孔结构,禁带特性不是很明显,说明圆弓形介质柱结构,较空气孔结构更有利于带隙的形成,这与理论计算是吻合的^[15]。更重要的是,参数 ϵ 的改变,会引起光子禁带大小和位置的变化。对于介质柱结构,随着参数 ϵ 变大,禁带位置发生了蓝移(硅的填充率减低了),而对于空气孔结构的结论则正好相反。

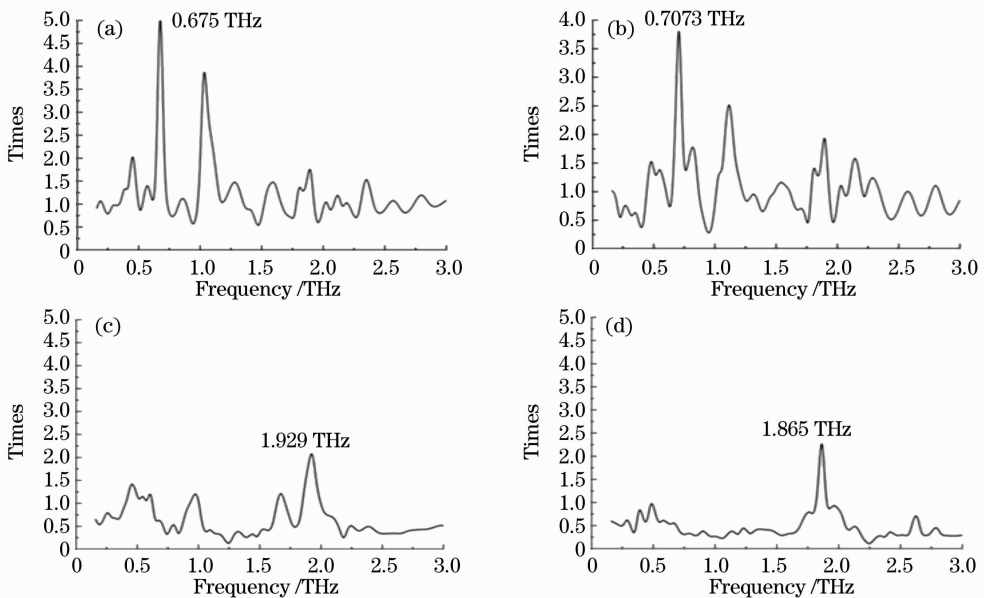


图 5 (a),(b)参数 $\epsilon_1=0.2, \epsilon_2=0.3$ 时介质柱结构的反射谱;(c),(d)参数 $\epsilon_1=0.2, \epsilon_2=0.3$ 时空气孔结构的反射谱
Fig. 5 (a), (b) Reflection spectra for structures of dielectric pillars in air with $\epsilon_1=0.2, \epsilon_2=0.3$, respectively;
(c), (d) reflection spectra for structures of air holes in dielectric wafer with $\epsilon_1=0.2, \epsilon_2=0.3$, respectively

针对同一介质柱结构($\epsilon=0.2$),先让入射光沿平行于长轴方向入射(二者夹角为 0°),然后转动样品,使长轴和入射光分别成 30° 、 60° 和 90° 夹角。比较其反射谱的不同,可以发现其禁带变化规律。图6(a),(b),(c)和(d)分别是参数 $\epsilon=0.2$ 时,入射光和长轴成 0° 、 30° 、 60° 和 90° 角时,介质柱结构相对

于无结构硅片的反射谱,横轴是频率,纵轴是相对于无结构硅片的反射倍数。可以看出:随着夹角变大,禁带宽度没有明显变化,但是禁带位置明显发生了蓝移,说明了散射元的各向异性——其禁带位置随着入射光方向的变化而变化。

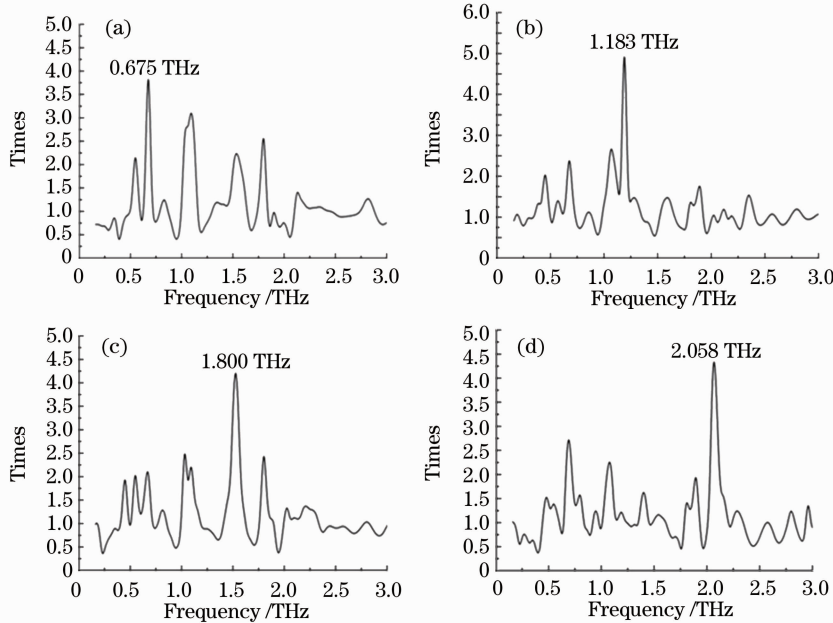


图6 $\epsilon=0.2$ 介质柱结构,入射角分别为(a) 0° 、(b) 30° 、(c) 60° 和(d) 90° 角时的反射谱

Fig. 6 Reflection spectra for $\epsilon=0.2$ dielectric-pillar structures with incidence angles of (a) 0° 、(b) 30° 、(c) 60° and (d) 90° , respectively

4 结 论

设计了一种新型的散射元——圆弓形散射元,可以多自由度调控光子带隙的大小和位置。采用微加工方法,制作了硅基太赫兹频域的多种光子晶体波导。测试表明:圆弓形介质柱结构,较空气孔结构更有利于带隙的形成,而且参数 ϵ 的改变,会引起光子禁带大小和位置的改变。对于同一介质柱结构,随着入射光夹角的变化,禁带位置明显发生了变化,说明了散射元的各向异性,可以利用这一特性来调节光子晶体的带隙。

参 考 文 献

- 1 N. Horiuchi. Terahertz technology: endless applications [J]. *Nature Photon.*, 2010, **4**(3): 140
- 2 A. Tredicucci, A. Carlo. Terahertz technology: an ultrafast amplifier[J]. *Nature Photon.*, 2009, **3**(12): 681~682
- 3 Sun Bo, Yao Jianquan. Generation of terahertz wave based on optical method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1349~1359
孙 博,姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1349~1359
- 4 M. A. Belkin, F. Capasso, A. Belyamin *et al.*. Terahertz

- quantum-cascade-laser source based on intracavity difference-frequency generation[J]. *Nature Photon.*, 2007, **1**(5): 288~292
- 5 A. Borak. Toward bridging the terahertz gap with silicon-based lasers[J]. *Science*, 2005, **308**: 638~639
- 6 L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter *et al.*. Emission of coherent thz radiation from superconductors[J]. *Science*, 2007, **318**: 1291~1293
- 7 M. Lee, M. C. Wanke. Searching for a solid-state terahertz technology[J]. *Science*, 2007, **316**: 64~65
- 8 Li Tiejuan, Lou Caiyun, Wang Li *et al.*. Terahertz wave generation with low-temperature-grown GaAs photoconductive antennas[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 978~982
李铁元, 娄采云, 王 黎等. 低温生长砷化镓光电导天线产生太赫兹波[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 978~982
- 9 B. Adam, Y. Zhao, D. Grischkowsky *et al.*. THz parallel plate photonic waveguide [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(5): 051101
- 10 Wan Yong, Xia Linhua, Zhao Xiusong *et al.*. Effect of planar defects on optical properties in three-dimensional colloid crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1991~1995
万 勇, 夏临华, 赵修松等. 面缺陷对三维胶体晶体光学性质的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1991~1995
- 11 H. Liu, J. Yao, D. Xu *et al.*. Propagation characteristics of two-dimensional photonic crystals in the terahertz range [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **87**(1): 57~63
- 12 Z. Li, L. Lin. Photonic band structures solved by a plane-wave

- based transfer-matrix method[J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(4): 046607
- 13 X. Wang, R. Wang, B. Gu *et al.*. Decay distribution of spontaneous emission from an assembly of atoms in photonic crystals with pseudogaps[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(9): 093902
- 14 Hu Jie, Chen Heming. Study on band gap structures of photonic crystal fiber as terahertz waveguide [J]. *Optical Electronic Technology*, 2007, **27**(4): 246~249
- 胡 婕, 陈鹤鸣. 光子晶体太赫兹波导带隙的研究[J]. *光电子技术*, 2007, **27**(4): 246~249
- 15 Wen Xisen. Theory and Technology of Photonic/Phononic Crystal[M]. Beijing: Science Press, 2006
- 温熙森. 光子/声子晶体理论与技术[M]. 北京: 科学技术出版社, 2006
- 16 Y. Wan, Z. Cai, Q. Li *et al.*. Simulation and fabrication of THz waveguides with silicon wafer by using eye-shaped pillars as building blocks[J]. *Appl. Phys. A*, 2011, **102**(2): 373~377

栏目编辑: 韩 峰