

基于硅纳米线波导的两级光子晶体缩束器

崔乃迪^{1,2} 梁静秋¹ 梁中翥¹ 王维彪¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 鉴于在微观领域光波的缩束对实现光电集成的重要意义, 提出了基于硅纳米线波导的两级光子晶体缩束器。其中一级压缩基于 W5 型和 W1 型光子晶体波导间的高效耦合。二级压缩则由宽为 $0.1 \mu\text{m}$, 长为 $3.06 \mu\text{m}$ 的纳米线波导和 W1 型光子晶体波导构成, 通过二者的高效耦合实现光束压缩。当 W1 型光子晶体波导和纳米线波导间介质柱的半径为 $0.04 \mu\text{m}$ 时, 对于 1550 nm 波长的电磁波, 缩束器的通光效率可达 93.4% , 压缩比为 16.08 , 出射光束半峰全宽仅为 $0.148 \mu\text{m}$ 。

关键词 光子晶体; 硅纳米线波导; 缩束器

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0123004

Two-Stage Photonic Crystal Beam Compressor Based on Silicon Nanowire Waveguide

Cui Naidi^{1,2} Liang Jingqiu¹ Liang Zhongzhu¹ Wang Weibiao¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Considering the significant value of the compression of the light beam for all optic networks and future integrated photonic/optical circuit, a beam compressor with two-stage compressions based on the efficient coupling between photonic crystal waveguides and nanowire waveguide is proposed. The first stage compression relies on the coupling between W1 and W5 photonic crystal waveguides. A nanowire waveguide with a width of $0.1 \mu\text{m}$ and a length of $3.06 \mu\text{m}$ is introduced to realize the second stage compression. The parameter of the rod located between the W1 photonic crystal waveguide and nanowire waveguide is optimized. When the radius of the rod is $0.04 \mu\text{m}$, transmission efficiency and full-width at half-maximum (FWHM) of the output beam of the beam compressor are 93.4% and $0.148 \mu\text{m}$, respectively. The compression ratio reaches to 16.08 .

Key words photonic crystal; silicon nanowire waveguide; beam compressor

OCIS codes 230.5298; 160.5293; 160.5298

1 引言

光子晶体是由具有不同介电常数的物质在空间周期性排列形成的人工微结构。近年来, 基于光子晶体材料的光电功能器件受到了广泛关注, 利用光子晶体的光子禁带和光子局域特性, 光子晶体波导

(PCWG)^[1~5]、滤波器^[6~8]、光开关^[9,10]和耦合器^[11~14]等光子晶体光电器件均有报道, 为未来大规模光电集成以及全光网络的实现打下了良好的基础。

然而想要将现有的光子晶体器件集成在同一基片上却面临着器件间通光宽度不同以及耦合效率低

收稿日期: 2011-05-20; 收到修改稿日期: 2011-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(60877031)资助课题。

作者简介: 崔乃迪(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光子晶体微器件设计及制备等方面的研究。

E-mail: cuinaidi@163.com

导师简介: 梁静秋(1962—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光机电系统与光通信等方面的研究。

E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn(通信联系人)

下等诸多困难,故能在连接功能器件的同时,实现对光束高效的微压缩及微聚焦的缩束器对多光子晶体功能器件的集成有着极为重要的意义。缩束器的主要技术参数是光斑大小、压缩率和传输效率。压缩率是指入射光束和出射光束半峰全宽的比值,其数值根据设计要求越大越好。而传输效率则是出射端和入射端光强的比值,传输效率的高低直接影响着系统的效率。渐变波导可以实现器件连接并对光束进行控制^[15,16],然而,渐变波导宽度的变化会导致严重的反射损失及模式失配,从而影响传输效率^[17]。所以,渐变波导的渐变角通常比较小而长度较长,难以缩小体积并应用于光电集成及全光网络中。为了减小由宽度变化带来的损耗,有研究提出引入抛物面透镜^[18]或伽利略望远镜光学系统^[17]来增大渐变角,以便能在较小的长度下完成光束宽度的控制。然而,光学器件的引入会使得渐变波导的结构复杂化,降低器件的集成度。另外,在光通信波段光子晶体器件尺度即亚微米尺度下,几何光学器件的衍射效应非常明显,限制了上述两种方法的应用。所以,迫切需要一种能实现亚微米尺度下对光束进行调节,并具有高传输效率的缩束器,以实现光信息在器件间的低损耗耦合传播。

本文提出了一种基于硅纳米线波导(NWG)^[19~21]的两级光子晶体缩束器。其中一级压缩由W5型光子晶体波导和W1型光子晶体波导的空间耦合实现。二级压缩则基于光子晶体波导和硅

纳米线波导的耦合。纳米线波导作为一种新兴的波导类型,其孔径只有数百纳米甚至更小,与光子晶体波导的孔径在同一数量级。因此,如何将电磁波从光子晶体波导中高效地耦合进入纳米线波导成为被广泛关注的研究方向^[22,23]。

2 一级压缩

在SOI(silicon on insulator)上以正方晶格硅柱阵列光子晶体结构为基础设计两级缩束器的结构。其晶格周期 $a=510\text{ nm}$,填充率 $f=0.4$ 。这里定义填充率 $f=D/a$,其中 D 为硅柱直径。利用平面波展开法,计算得其具有归一化频率 $0.24\sim 0.42$ 的TM禁带。缩束器结构主要由一级压缩和二级压缩两部分构成,如图1(a)所示。光子晶体波导通过在完整光子晶体中引入线缺陷实现,其中由于引入线缺陷数量的不同,可分为W1型、W3型以及W5型等光子晶体波导(本文所提到的W1和W5型光子晶体波导即通过在完整光子晶体中引入1条和5条线缺陷得到)。由于光子禁带的存在,频率与线缺陷对应的光束只能在缺陷中传播,从而限制了在其中传播光束的宽度,通过对通光宽度不同的W5型和W1型光子晶体波导进行高效耦合,使光束从通光宽度较宽的W5型光子晶体波导耦合到通光宽度较窄的W1型光子晶体波导,从而实现光束的压缩。

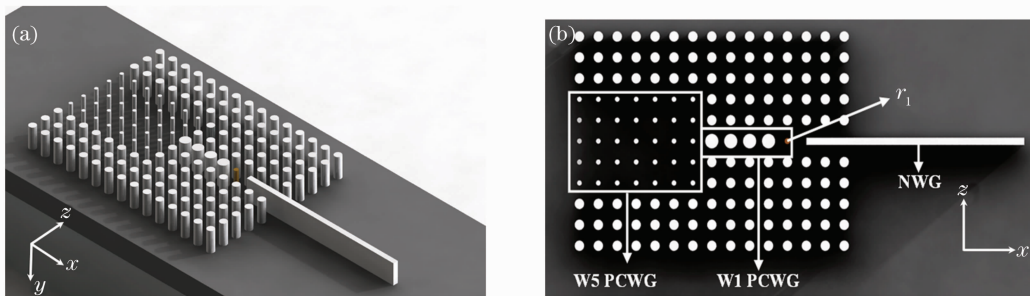


图1 两级光子晶体缩束器结构示意图。(a)两级光子晶体缩束器三维结构示意图;(b)两级光子晶体缩束器结构参数
Fig.1 Schematic of the two-stage photonic crystal beam compressor. (a) 3D schematic of the two-stage photonic crystal beam compressor; (b) structure parameters of the two-stage photonic crystal beam compressor

为了限制二维介质柱结构光子晶体波导的垂直方向的泄露损耗,如图1(b)所示,这里引入半径与周围介质柱半径不同的线缺陷来建构光子晶体波导,这样的SOI结构平板光子晶体,其通光介质为硅,上下表面分别为空气和 SiO_2 ,在垂直基片方向上符合全内反射条件,可以限制光在垂直于基片方

向的泄露损耗^[24,25]。对于缺失硅柱形式的线缺陷,由于通光介质为空气,不满足垂直于基片方向的全反射条件,无法保证光在其中无泄露传播。本文设计的W5型光子晶体线缺陷的半径 $r_a=56\text{ nm}$,W1型光子晶体线缺陷的半径 $r_b=165\text{ nm}$,特征波长为 1550 nm 。

图 2(a)给出了 W1 型光子晶体波导与 W5 型光子晶体波导的色散曲线。空白区域为光子禁带,在光子禁带中的电磁波被禁止传播。圆点部分为电磁波的导带。另外,空气的色散曲线也在图中标出,在空气色散曲线上部光子导带的有效折射率小于空气的有效折射率,不满足全内反射条件,会造成垂直于基片平面的损耗。图中实线和虚线分别代表 W1 型光子晶体波导与 W5 型光子晶体波导的色散曲线。W1 型光子晶体波导有 TM_0 和 TM_1 两种模式,二者在图中 A 点,即归一化频率为 0.348 时并未相交,而是产生微型光子禁带,这种现象称为反相交现象^[26]。二者在相交区域的放大图如图 2(b)所示,可

见由于反相交现象, TM_0 模和 TM_1 模之间产生了一条归一化频率宽度仅为 0.0002 的微型光子禁带。经过 A 点之后, TM_0 模和 TM_1 模的奇偶性发生变化。其中 TM_0 模由奇模转变为偶模,而 TM_1 模由偶模转变为奇模,其模式分布如图 2(c)所示。W5 型波导有 5 个模式,如图 2(d)所示,其中 TM_3 模式与反相交后 W1 型光子晶体的 TM_0 模式在归一化频率 0.329 时相交于图 2(a)中的 B 点,其对应波长为 1550 nm。根据模式耦合理论,可知在耦合点 B, W1 型与 W5 型波导归一化频率相同,可避免由于模式失配导致的损耗,实现二者的高效耦合。

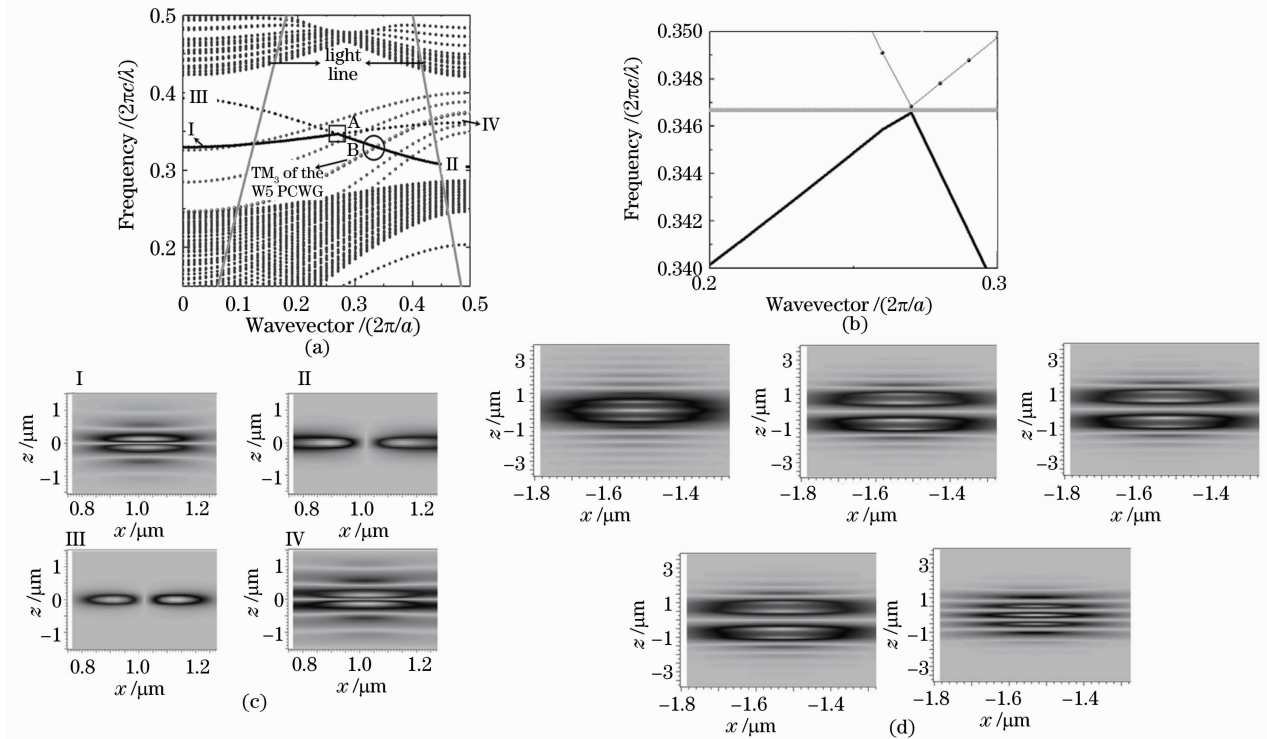


图 2 一级压缩的模式特性。(a)一级压缩的色散曲线;(b)微型禁带;(c) W1 型光子晶体波导的模式分布;
(d) W5 型光子晶体波导的模式分布

Fig. 2 Mode characteristics of the first stage compression. (a) Dispersion curves of the first stage compression; (b) mini-gap; (c) field patterns of the mode of W1 photonic crystal waveguide; (d) field patterns of the mode of W5 photonic crystal waveguide

3 二级压缩

同一级压缩类似,提出利用 W1 型光子晶体波导与纳米线波导之间的耦合来实现对光束的二级压缩。不同的是纳米线波导是通过其与空气介质的高折射率差而产生的全内反射来实现其对光束在其中传播的限制。通过 W1 型光子晶体波导和纳米线波导间的高效耦合,电磁波从通光宽度较宽的光子晶体波导耦合到纳米线波导,同时实现对光束的二次

压缩。在二者的耦合过程中,纳米线波导的宽度以及它与 W1 型光子晶体波导间的介质柱结构参数都会对缩束器的通光效率和压缩率产生影响。

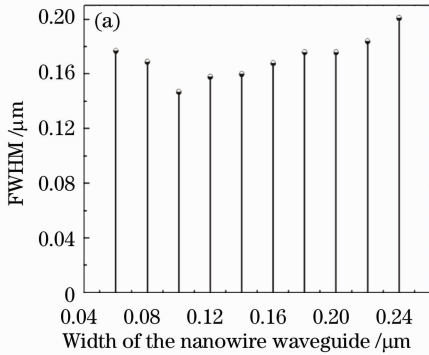
根据波导传输模式理论^[27],给出纳米线波导基模传输的最大宽度为

$$w < \frac{\lambda}{2\sqrt{n^2 - n_0^2}} = 0.2385 \mu\text{m}, \quad (1)$$

其中 w 为纳米线波导的宽度, n 和 n_0 分别为硅和空气的折射率, λ 为入射电磁波波长。即当纳米线波

导宽度小于 $0.2385 \mu\text{m}$ 时,才可能实现 1550 nm 波长的电磁波在硅的基纳米线波导中基模传输。

图 3(a)为纳米线波导的宽度对出射光束半峰全宽(FWHM)的影响,出射光束的 FWHM 并不随纳米线波导宽度线性变化。当纳米线波导宽度为 $0.1 \mu\text{m}$ 时,输出光束的 FWHM 有最小值,仅为 $0.148 \mu\text{m}$ 。本文引入直径为 $0.1 \mu\text{m}$,长度为 $3.06 \mu\text{m}$ 的纳米线波导与 W1 型光子晶体波导耦合以实现缩束器的二级压缩,并作为缩束器的输出波导。图 3(b)所示为



缩束器二级压缩部分的色散曲线,可见纳米线波导的色散曲线与 W1 型光子晶体波导的 TM_0 模相交,交点即耦合点处的归一化频率仍为 0.329 (对应响应波长为 1550 nm)。二级压缩的耦合点与图 2(a)中一级压缩的耦合点具有相同的归一化频率,这说明在通过两级压缩后,波长为 1550 nm 的 TM 波可以高效地耦合到纳米线波导中,从而在保证传输效率的前提下对光束的高效压缩。

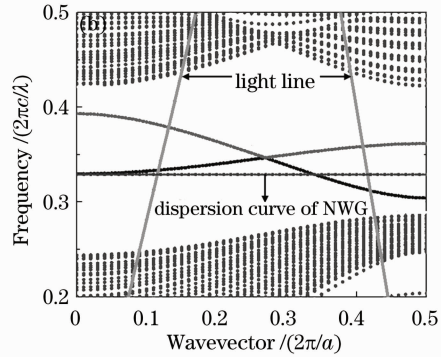


图 3 缩束器的二级压缩部分。(a) 输出光束半峰全宽随纳米线波导宽度的变化;(b) 二级压缩部分的色散曲线
Fig. 3 Second stage compression of the beam compressor. (a) FWHM as a function of the width of the nanowire waveguide; (b) dispersion curves of the second stage compression

在设计过程中发现 W1 型波导与纳米线波导间硅柱的半径,即图 1(b)中所示的 r_1 对缩束器的效率有着较大的影响。图 4(a)给出了耦合效率随 r_1 的变化曲线,可见传输效率在 r_1 为 $0.04, 0.17, 0.27 \mu\text{m}$ 位置出现了 3 个峰值,且当 r_1 为 $0.04 \mu\text{m}$ 时传输效率有最高值 93.4% 。图 4(b)为所设计的二级光子晶体缩束器在 $r_1 = 0.04 \mu\text{m}$ 时的场分布图,黑色和白色代表场分布的极大和极小值。可见经过两级压缩后,场集中在纳米线波导中,且反射损失极小。光束的宽度经过两次压缩,最后通过纳米

线波导输出。

图 5 为所设计缩束器入射波、一级压缩、二级压缩以及输出光束的近场能量分布情况。可见输出光束的场分布相对于入射光束及一级压缩光束宽度更小,光束能量更为集中。对于入射波导即 W5 型光子晶体波导,其入射波的 FWHM 为 $2.38 \mu\text{m}$,而经过一级压缩后的光束 FWHM 为 $0.32 \mu\text{m}$,经过两级压缩后的出射光束 FWHM 仅为 $0.148 \mu\text{m}$ 。

这里定义压缩比为出射光束和入射光束 FWHM 的比值:

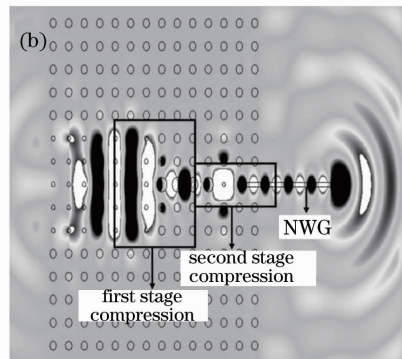
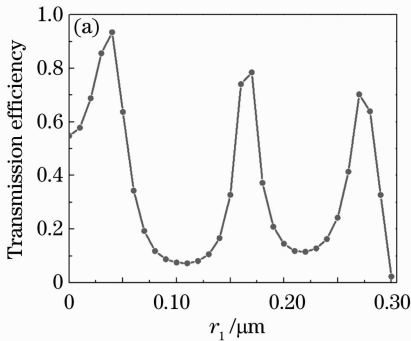


图 4 缩束器的传输效率及场分布。(a)缩束器传输效率随 r_1 的变化曲线;(b)两级光子晶体缩束器的场分布
Fig. 4 Transmission efficiency and field pattern of the two-stage beam compressor. (a) Transmission efficiency as a function of the value of r_1 ; (b) field pattern of the two-stage photonic crystal beam compressor

$$\gamma = \frac{W_o}{W_i}, \quad (2)$$

式中 W_o 和 W_i 分别为出射光束和入射光束的 FWHM。由(2)式可计算得一级压缩的压缩比为 7.4375, 总压缩比为 16.08。由于光的可逆性, 当光波从纳米线波导端入射时, 缩束器也可以作为光束扩束器使用。

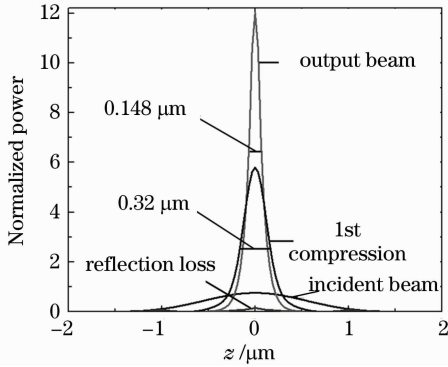


图 5 z 方向上入射光、反射损失、一级压缩以及输出光束的近场能量分布曲线

Fig. 5 Power distribution of the incident beam, reflection loss, output beam of the first stage compression and the output beam in z direction

4 结 论

提出了两级光子晶体缩束器。一级压缩基于 $W5$ 和 $W1$ 型光子晶体波导间的耦合。其中 $W5$ 型和 $W1$ 型光子晶体波导的线缺陷介质柱半径分别为 56, 156 nm。引入宽度为 0.1 μm 、长度为 3.06 μm 的纳米线波导, 并将其与 $W1$ 型光子晶体波导高效耦合以实现光束的二级压缩。通过模式分析发现, 纳米线波导与 $W5$ 型以及 $W1$ 型光子晶体波导模式相交于同一点, 交点归一化频率为 0.329, 对应波长为 1550 nm。利用这一耦合点, 可以实现光波在三者之间的高效耦合。为了得到更高的传输效率, 对 $W1$ 型光子晶体波导和纳米线波导间的介质柱半径(r_1)进行了优化, 当 $r_1 = 0.04 \mu\text{m}$ 时, 两级缩束器可以达到 93.4% 的传输效率以及 16.08 的压缩比, 出射光束的半峰全宽仅为 0.148 μm 。两级光子晶体缩束器可以在连接器件的同时对光束宽度进行调节, 对未来大规模光电集成及全光网络具有重要的意义。

参 考 文 献

1 J. Sugisaka, N. Yamamoto, M. Okano. Development of curved two-dimensional photonic crystal waveguides [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(23): 5788~5792

2 X. Zhang, H. Tian, Y. Ji. Group index and dispersion properties of photonic crystal waveguides with circular and square air-holes[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(9): 1768~1772

3 T. Tada, V. V. Poborchii, T. Kanayama. Channel waveguides fabricated in 2D photonic crystals of Si nanopillars [J]. *Microelectron. Eng.*, 2002, **63**(1-3): 259~265

4 M. T. Todaro, T. Stomeo, V. Vitale *et al.*. Nanofabrication of high refractive index contrast two-dimensional photonic crystal waveguides[J]. *Microelectron. Eng.*, 2003, **67-68**(1): 670~675

5 Zhang Man, Pan Wei, Yan Lianshan *et al.*. Research of slow light in the two-dimensional triangular rods photonic crystal line defected waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 857~861

张曼, 潘伟, 闫连山等. 二维三角晶格介质柱光子晶体线缺陷波导慢光研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 857~861

6 Z. Zhang, M. Qiu. Compact in-plane channel drop filter design using a single cavity with two degenerate modes in 2D photonic crystal slabs[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(7): 2596~2604

7 K. Fasihi, S. Mohammadnejad. Highly efficient channel-drop filter with a coupled cavity-based wavelength-selective reflection feedback[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(11): 8983~8997

8 Li Zhiqun, Kang Lili, Su Fengyan *et al.*. Design on photonic crystal gain flatness filters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 710~712

李志全, 康莉莉, 苏凤燕等. 光子晶体增益平坦滤波器的设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 710~712

9 Tan Chunhua, Huang Xuguang. An all-optical switch based on the tunable bandgap of a two-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2714~2718

谭春华, 黄旭光. 基于带隙可调的二维光子晶体全光开关[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2714~2718

10 Su Jian, Chen Heming. Terahertz wave modulator based on liquid-crystal-filled photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2710~2713

苏坚, 陈鹤鸣. 基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2710~2713

11 Gao Yongfeng, Zhou Ming, Zhou Jun *et al.*. Design of power splitter by directional coupling between photonic crystal waveguides[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505003

高永锋, 周明, 周骏等. 光子晶体波导定向耦合功分器的设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0505003

12 C. Liu. Efficient omnidirectional couplers achieved by anisotropic photonic crystal waveguides [J]. *Phys. Lett. A*, 2009, **373**(34): 3061~3066

13 A. Sharkawy, S. Shi, D. Prather. Multichannel wavelength division multiplexing with photonic crystals[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(14): 2247~2252

14 A. Faraon, E. Waks, D. Englund *et al.*. Efficient photonic crystal cavity-waveguide couplers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(7): 073102

15 I. Dupont, P. Benech, D. Khalil *et al.*. Study of linear tapered waveguides made by ion exchange in glass[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1992, **25**(6): 913~918

16 E. Verhagen, A. Polman, L. Kuipers. Nanofocusing in laterally tapered plasmonic waveguides[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(1): 45~57

17 C. Chang, M. Wu, W. Hsieh. Design of low-loss tapered waveguides using the telescope structure compensation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10): 1378~1380

18 A. M. Rashed, K. A. Williams, P. J. Heard *et al.*. Tapered waveguide with parabolic lens; theory and experiment[J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(3): 792~797

19 L. K. Vugt, B. Piccione, R. Agarwal. Incorporating polaritonic effects in semiconductor nanowire waveguide dispersion [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(6): 061115

- 20 T. Voss, G. T. Svacha, E. Mazur *et al.*. The influence of local heating by nonlinear pulsed laser excitation on the transmission characteristics of a ZnO nanowire waveguide [J]. *Nanotechnology*, 2009, **20**(9): 095702
- 21 H.-Y. Li, S. Rühle, R. Khedoe *et al.*. Polarization, microscopic origin, and mode structure of luminescence and lasing from single ZnO nanowires [J]. *Nano Lett.*, 2009, **9**(10): 3515~3520
- 22 Bai Ningfeng, Liu Xu, Xiao Jinbiao *et al.*. Efficient coupling from dielectric rib waveguide to two-dimensional photonic crystal waveguide[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(10): 4933~4937
柏宁丰, 刘旭, 肖金标等. 光子晶体平面波导与脊波导高效耦合技术的研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(10): 4933~4937
- 23 H. Park, C. J. Barrelet, Y. Wu *et al.*. A wavelength-selective photonic-crystal waveguide coupled to a nanowire light source[J]. *Nature Photon.*, 2008, **2**: 622~626
- 24 N. Kawai, K. Inoue, N. Carlsson *et al.*. Confined band gap in an air-bridge type of two-dimensional AlGaAs photonic crystal [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(11): 2289~2292
- 25 Min Qiu. Band gap effects in asymmetric photonic crystal slabs [J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **66**(3): 033103
- 26 S. Olivier, H. Benisty, C. Weisbuch *et al.*. Coupled-mode theory and propagation losses in photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(13): 1490~1496
- 27 李玉权, 崔敏. 光波导理论与技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002. 82~88

栏目编辑: 韩峰