

二维光子晶体波导研究进展

章亮 张巍 聂秋华 戴世勋 陈昱

(宁波大学信息科学与工程学院 红外材料与器件实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要 二维光子晶体波导具有特殊的光子能带结构、可控色散、极小的几何尺寸和极强的非线性特性,近年来在非线形光学、光学逻辑门、全光缓存、光功率分束器、光子晶体激光器以及高灵敏度传感器等领域引起了广泛的关注。介绍了二维光子晶体波导的制备方法,总结了其传输损耗、多模耦合的自成像效应和慢光效应等方面的研究进展,并特别提到基于硫系玻璃这一特殊基质的二维光子晶体波导,最后展望了二维光子晶体波导的发展前景。

关键词 集成光学;光子晶体波导;光子带隙;刻蚀;硫系玻璃

中图分类号 O734; TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.030008

Research Progress of Two-Dimensional Photonic Crystal Waveguides

Zhang Liang Zhang Wei Nie Qiuhua Dai Shixun Chen Yu

(Laboratory of Infrared Materials and Devices, College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract Two-dimensional photonic crystal waveguides have special photonic band structure, controllable optical dispersion, small physical dimension and high nonlinearity, which draw wide attention in areas of nonlinear optics, optical logic gates, all-optical buffer, optical-power splitter, photonic-crystal lasers and high-sensitivity sensor. The fabrication technique of two-dimensional photonic crystal waveguides is introduced, the propagation loss, self-imaging effect of multi-mode coupling and slow light effect are summarized. In particular, two-dimensional photonic crystal waveguides based on chalcogenide glasses are mentioned. At last, the development prospect of two-dimensional photonic crystal waveguides is discussed.

Key words integrated optics; photonic crystal waveguides; photonic bandgap; etching; chalcogenide glass

OCIS codes 130.5296; 160.5293; 160.2750; 190.4400; 220.4241

1 引言

光子晶体(PC)的概念是1987年由Yablonovich和John分别提出的^[1,2],它是一种介电常数在空间呈周期性排布的新型微结构材料。光子晶体由于具有光子带隙结构而被人称为光半导体,可用于制作光子晶体微波天线(PCMA)、光子晶体光纤(PCF)、光子晶体微谐振腔(PCMR)和光子晶体波导(PCW)等^[3~5],在全光信息处理方面具有广阔的应用前景。二维光子晶体波导(2D-PCW,一般为三角晶格圆形空气孔型)是光子晶体在实际应用中的一个重要方向。2D-PCW具有较小的弯曲损耗和较高的非线性等特性,在滤波、传感、光存储、全光逻辑门和激光器等方面有着广泛的应用前景^[6~15],可以满足全光信号处理系统日益朝着器件高度集成化、尺寸小型化等方向发展的要求。本文对2D-PCW的制备方法及其传输损耗、多模耦合的自

收稿日期: 2012-11-26; **收到修改稿日期**: 2012-12-31; **网络出版日期**: 2013-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(60978058, 61008041, 61107047)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队项目(200921007)、中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(SKLST201010)和宁波大学王宽诚幸福基金资助课题。

作者简介: 章亮(1988—),男,硕士研究生,主要从事硫系光子晶体波导的制备和特性等方面的研究。

E-mail: zhangliangnbu@163.com

导师简介: 聂秋华(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事红外玻璃材料和光纤等方面的研究。

E-mail: nieqiuhua@nbu.edu.cn(通信联系人)

成像效应、慢光效应等研究进展进行总结,并介绍基于硫系玻璃这一特殊基质的 2D-PCW,最后对 2D-PCW 的研究前景进行展望。

2 二维光子晶体波导

在二维光子晶体中引入线缺陷即可得到 2D-PCW。选择禁带波长为工作波长,这样光波将不能进入到周围的光子晶体空间中,而只能沿着缺陷传播,起到导波的效果。不同于平面介质波导利用的全反射原理,2D-PCW 利用了不同方向的缺陷模共振匹配原理,因而 2D-PCW 不受转角限制,有着极小的弯曲损耗而有利于大规模光电集成^[16]。2D-PCW 具有较小的模场横截面积和慢光效应,能够增强其非线性特性,研究者们已经观测到了基于 Si 和 GaAs 等材料的 PCW 中的自相位调制、双光子吸收和四波混频等因慢光效应而加强的非线性效应^[13~15]。

理论上 2D-PCW 要求空气孔或介质柱的长度远大于光子晶体晶格常数,但实际中由于工艺的限制很难做到。目前研究最多的是二者尺寸相当,一般都为几百纳米的平板 2D-PCW(下文中的 2D-PCW,如无特殊说明,皆指平板型)。2D-PCW 的结构一般可分为 3 层,上层是包层,中间是导波层,下层是衬底。2D-PCW 按照各层结构的不同可大致分为悬浮薄膜型(SM,也叫空气桥型)、氧化物衬底型(OLC)和深刻蚀型(DE)波导[图 1(a)~(c)]^[17],按照二维光子晶体中引入线缺陷条数的多少称为 WN(N 为线缺陷条数)型波导[图 1(d)]^[18]。另外还有在空气孔型光子晶体线缺陷中刻蚀一条空气槽得到的开槽型波导[图 1(e)]^[19]以及将空气孔沿着波导方向平移若干距离而形成的晶格平移型波导(LSPCW)[图 1(f)]^[20]等。光波在平板 2D-PCW 中传播时,在垂直于波导的方向上满足全反射原理,在波导平面内垂直于线缺陷方向上满足光子禁带效应,后者正是平板 2D-PCW 在弯曲损耗和非线性等方面优于传统平面介质波导的主要原因。

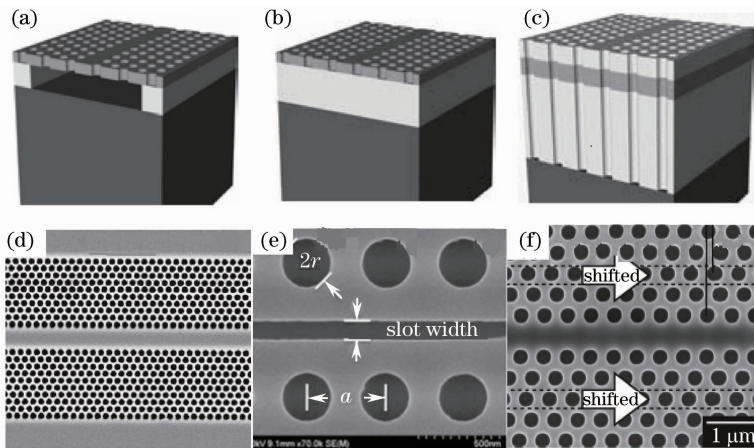


图 1 二维光子晶体波导结构。(a)悬浮薄膜型;(b)氧化物衬底型;(c)深刻蚀型;(d)W3 型;(e)开槽型和(f)晶格平移型

Fig.1 Structure of 2D-PCW (a) Suspend-membrane; (b) oxidized-lower-cladding; (c) deeply-etched; (d) three line defects; (e) slotted and (f) lattice-shifted structures

3 二维光子晶体制备方法

1996 年,Krauss 等^[21]利用电子束曝光和反应离子束干刻法首次制备出具有光子带隙结构的平板二维光子晶体,此后与 2D-PCW 相关的实验研究逐渐开展起来。制备 2D-PCW 的材料主要是绝缘体上硅(SOI)等 Si 基半导体和 GaAs 等 III-V 主族化合物^[22~25],此外利用有机材料和硫系材料也可以制备 2D-PCW^[26,27]。目前,制备 2D-PCW 的主要方法有两种,1) 传统的光刻或电子束曝光与干刻法的结合,其中需要用到掩模版、光刻胶等物品^[22,23,25,28];2) 可在基底上直接刻蚀出所需图案的聚焦离子束(FIB)刻蚀法^[29,30]。

第一种方法又可分为深紫外(DUV)曝光结合干刻法和电子束曝光(EBL)结合干刻法^[23,28]。DUV 结合干刻法制备 2D-PCW 分为三个步骤:1) 制备所需图案的掩模版;2) 透过掩模版对涂在基底上的光刻胶进行深紫外曝光并进行显影处理,在光刻胶上得到掩模图形;3) 利用反应离子束刻蚀(RIE)或电子回旋共振

(ECR)等离子体刻蚀或感应耦合等离子体(ICP)刻蚀等干刻法在基底上刻蚀出所需图案结构。这种制备方法具有产量高、便于大规模生产等优点,但工艺繁琐,精度低,成本较高。EBL结合干刻法可分为两步:1)利用EBL直接在光刻胶上刻蚀出掩模图形;2)利用RIE等干刻法在基底上刻蚀所需图案。相对于前者,EBL结合干刻法虽然速度较慢,生产率低,但省去了掩模版制备和显影等操作,步骤简洁从而有利于降低图形复制过程中的偏差,精度较高,且成本较低,是目前实验研究通常采取的方法^[22,24]。另外,可在光刻胶和基底之间沉积一硬掩模层如Si层、SiO₂层和SiN层等^[31~33],这样可以延长干法刻蚀的时间,增大图案结构的深度,提高孔或柱的侧壁垂直度。

第二种方法(FIB)较为简易,即用高度会聚的离子束(一般为钙二价离子)轰击样品表面,从而留下凹凸图形。与第一种方法相比,FIB刻蚀法不需制备昂贵的掩模版,不需曝光,工艺流程简单,刻蚀精度高,且不受材料限制。不过此法比较适宜于小尺寸2D-PCW的制备,尺寸较大时极耗时间,不太可取^[16]。

除了以上两种主要的制备方法外,激光全息^[34]和自组装^[35]等制备方法也被采用。

4 二维光子晶体波导特性

4.1 传输损耗

导波模在平板2D-PCW各层之间遵循全内反射原理,而在波导平面内满足光子禁带效应而被限制在线缺陷内,所以理论上平板2D-PCW的传输损耗比传统平板介质波导的更低,但实际中,任何因工艺造成的不完美的地方都可以成为散射源,从而引入了比传统平板介质波导更高的额外损耗^[36,37]。平板2D-PCW的传输损耗[图2(a),图中 c 为真空中光速, a 为晶格常数]^[38]主要与以下几种因素有关^[17,38]。

1) 材料吸收:若光波光子能量处于材料带隙之下,则此项因素引起的损耗可忽略。

2) 面外辐射:主要与非局域模有关。对于垂直方向限制较弱(一般层折射率差值较小,多为DE型结构)的波导,导模处于衬底线之上,模式没有局限在导模层中,则存在较强的面外辐射损耗。而对于垂直方向限制较强(一般层折射率差值较大,多为SM和OLC型结构)的波导,则面外辐射损耗较小。

3) 横向辐射:主要与孔柱排数有关,一般排数越多,光子禁带效应越显著,横向辐射损耗越小。

4) 层结构非对称引起的模式耦合:这种模式耦合会使得导模向辐射转化,从而导致损耗增大。

5) 结构无序引起的散射:散射会带来辐射模和后向传输模,增大损耗。一般为制备工艺引起的孔柱的尺寸无序和位置无序。

具体而言,波导的传输损耗与波导的结构(垂直方向各层结构的厚度和折射率、孔洞的排数和深度、晶格结构、WN型、开槽型以及LSPCW等)以及刻蚀工艺导致的缺陷(表面粗糙度、孔柱截面尺寸和位置的无序度以及孔的圆锥形结构等)紧密相关[图2(b)]^[17],其中因制备引起的圆锥形孔结构与面外及横向辐射、模式耦合和散射都有关联,对深孔波导的传输损耗有着极其显著的影响^[17~19,36~45]。

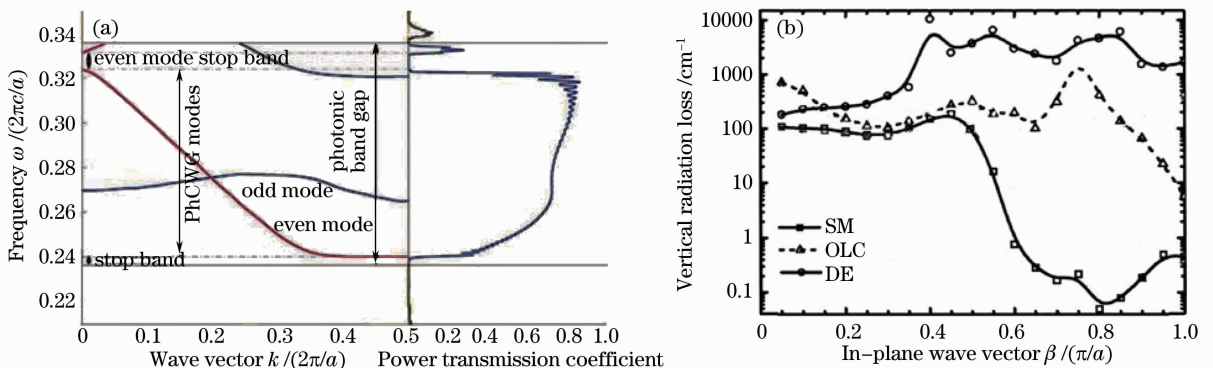


图2 (a) 典型的2D-PCW能带图及其对应的透射率曲线;(b) 典型的悬浮薄膜型、氧化物衬底型和深刻蚀型三种2D-PCW结构对应的面外辐射损耗曲线

Fig. 2 (a) Typical band diagram and transmission spectrum of 2D-PCW; (b) curves of vertical radiation losses for typical 2D-PCW of three different structures: suspend-membrane, oxidized-lower-cladding, deeply-etched

2002年,Baba等^[35,36]制备了损耗为110 dB/cm的Si基悬浮薄膜型2D-PCW,之后日本、英国和瑞典等国家的研究者们对Si基、GaAs和InGaAsP等材料的2D-PCW进行了广泛的研究并在通信波长附近测试了它们的损耗,具体数据如表1所示,其中波导晶格结构除特殊说明都为空气柱型三角结构。

表1 已报道的2D-PCW的传输损耗

Table 1 Propagation losses from reported 2D-PCW

Material	Loss /(dB/cm)	Structure	Year
Air/Si/air/SiO ₂	110	SM/W1	2002 ^[36]
	4.1±0.9	SM/W1	2006 ^[37]
Air/Si/SiO ₂	7±4	OLC/W1/slotted	2012 ^[19]
SiO ₂ /Si/SiO ₂	12±3	OLC/W1	2008 ^[39]
Air/GaAs/Air	15±5	SM/W1	2004 ^[40]
	7.6±5	SM/W1	2005 ^[41]
InAlAs/InGaAlAs/InAlAs	16	DE/W7	2002 ^[42]
	18	DE/W3	2004 ^[18]
InP/InGaAsP/InP	1600	DE/W1/honeycomb lattice	2009 ^[43]
	335±5	DE/W1	2012 ^[44]

从表1可看出,2D-PCW的传输损耗大致规律是,结构为悬浮薄膜型和氧化物衬底型的普遍较深刻蚀型的低,这是因为深刻蚀型波导的各层之间折射率差值较小(InP和InGaAsP折射率分别为3.15和3.33)以及较深的孔容易产生圆锥形结构,从而引入了较大的面外损耗和模式耦合损耗等;W1型波导的损耗比W3型和W7型的高,这与W1型波导较窄,衍射较强有关^[16]。总体来看,2D-PCW的传输损耗普遍比刻蚀较好的平面介质波导的(可达0.3 dB/cm)要高1~2个数量级^[46],因而2D-PCW拥有的极低理论传输损耗的优势还没有发挥出来。

除了上述直波导损耗外,弯曲波导的转角损耗也非常重要。理论上,PCW在转角很大时的损耗也非常小。实际样品测试中,2D-PCW的弯曲损耗除了与上述材料、结构等因素有关外,还与转角有关,一般转角越大,损耗越大^[29,40,45,47]。目前研究的转角主要有60°、90°和120°三种情况。Si基2D-PCW的60°转角损耗达到1.5 dB,90°转角和120°转角损耗分别可达3.5 dB和4.2 dB^[29,45];GaAs材料的2D-PCW的60°转角损耗为1 dB^[40];InP/InGaAsP材料的60°转角损耗为0.2 dB^[47]。另外,为了降低转角损耗,可以在转角处引入点缺陷,通过改变点缺陷的半径和折射率可以降低转角损耗^[48]。

4.2 多模耦合的自成像效应

在多模波导中,如果有两个或两个以上的导波模式同时被激发,模式之间就会产生干涉效应,光波在波导中会形成一定的场分布,出现输入场的单重像(正像和镜像)和多重像沿着光波的传输方向周期地交替排布的现象,这便是多模耦合的自成像效应^[49]。图3为自成像效应示意图^[49]。多模耦合的自成像效应中主要的参数是耦合长度 L_c (或成像周期),以两个模式为例,其表达式为^[50]

$$L_c = \frac{2\pi}{k_1 - k_2}, \quad (1)$$

式中 k_1 和 k_2 分别为耦合区中两种模式的传播常数。可以看到模式间的传播常数差值越大,耦合长度越小。

相比传统的平面波导,由于光子晶体具有更大的色散,2D-PCW中的自成像所需距离更短,因此基于自成像效应制备的2D-PCW器件将具有更小的尺寸,更有利于光子集成。在2D-PCW中,W1波导一般为单模波导,W N ($N>1$)一般为多模波导。一般实际设计的多模2D-PCW是将W1波导和W N 波导结合起来,光波从W1波导入射到W N 波导(称为多模干涉区或耦合区)时,就会发生自成像效应。利用这个原理,合

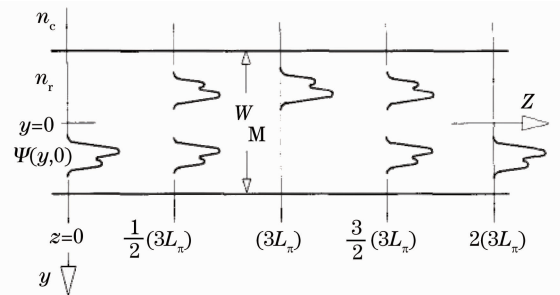


图3 多模耦合的自成像效应示意图
Fig. 3 Schematic of the image field distribution in the multimode region

理设计波导长度以引出单重像或多重像,就可以制作光功率分束器、光滤波器和波分复用器等 2D-PCW 多模耦合器件^[6,7,50~53],如图 4 所示。

常见的多模耦合 2D-PCW 的耦合区为光子晶体紧密排列的多条线缺陷^[6,7,51],这样的结构易于设计和制作,却不易调节多模耦合强度、耦合长度以及多模器件的滤波、分束比率等参数。在二维光子晶体中引入多排非紧邻线缺陷,即构成了多个平行并列波导,通过调节耦合区中波导的宽度或它们之间的空气孔或介质柱的半径、折射率、排数等参数,可以有效控制多模耦合特性以及多模 2D-PCW 器件的相关特性^[50,52,53]。在一定范围内减小耦合区波导间介质柱半径可以减小耦合长度^[50]。一般来说,波导间单排介质柱比多排介质柱更有利于耦合长度的减小^[52]。另外也可以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,但比较而言,波导间的介质柱半径变化对模式耦合长度的影响最为显著^[53]。

4.3 慢光效应

慢光效应就是光的能量传播速度即光群速度的降低。慢光效应能够增强光与物质的相互作用^[8],提高介质的非线性效应^[13~15],可应用于光学延迟、光存储和全光缓存等领域^[11,54,55]。2D-PCW 为实现慢光和慢光器件的集成提供了极具前景的途径^[56,57]。Krauss^[12]对 2D-PCW 慢光效应产生的物理机制做了理论分析,认为导模与周期性晶格之间的共振散射导致了慢光干涉模的产生,即慢光效应。光群速度的一般表达式为

$$\nu_g = \frac{c}{n_g} = \frac{c}{n + \omega(dn/d\omega)}, \quad (2)$$

式中 n_g 为群折射率, n 为材料折射率, $dn/d\omega$ 为色散。可通过调节 2D-PCW 的结构(线缺陷附近孔或棒的尺寸、位置等)增大波导的色散,获得慢光。波导的理论色散曲线[图 5(a)]^[22]可以通过平面波展开法计算获得,通过色散曲线以及公式

$$\nu_g = \frac{\partial \omega}{\partial \beta} = \frac{2\pi c}{a} \frac{\partial u}{\partial \beta}, \quad (3)$$

$$\beta_2 = \frac{d^2 k}{d\omega^2} = -\frac{a}{2\pi c} \frac{1}{\nu_g^2} \frac{d\nu_g}{du}, \quad (4)$$

可以得到波导的群速和群速色散[图 5(b)]^[22],其中归一化频率 $u = a/\lambda$, a 为晶格常数, β 为传播常数, β_2 为群速色散。从图 5(b)可知,随着群速的减小,群速色散急速增大;在布里渊区边界处,色散最大,群速最小。慢光 PCW 主要通过改变光子晶体的结构来调控色散,工作波长不受材料限制,理论上可实现任意波长的慢光。另外,慢光 2D-PCW 不需要低温条件,在室温下即可实现慢光^[57,58]。

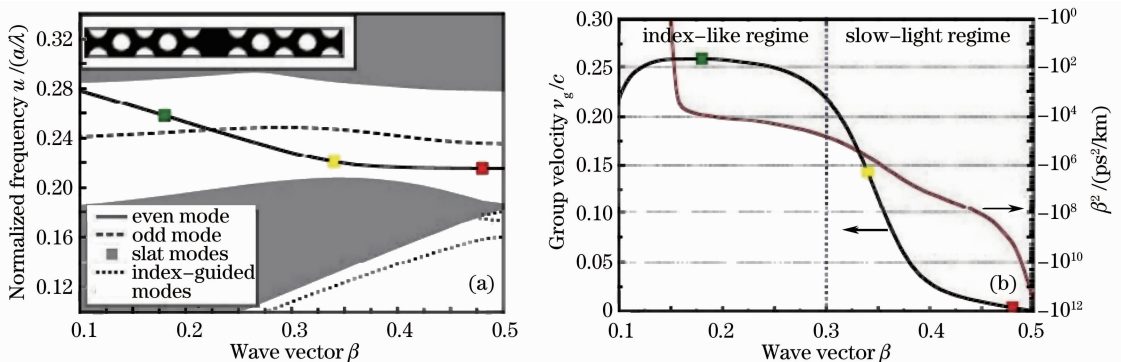


图 5 (a) 典型的 2D-PCW 色散关系图; (b) 群速和群速色散随传播常数变化曲线图

Fig. 5 (a) Typical dispersion diagram of 2D-PCW; (b) typical curve showing group velocity and group-velocity dispersion parameter as functions of the wave vector

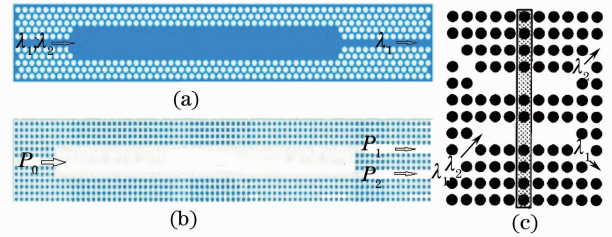


图 4 2D-PCW 多模耦合器件。(a) 滤波器; (b) 光功率分束器; (c) 波分复用器

Fig. 4 Devices based on multimode interference effect of 2D-PCW. (a) Filter; (b) optical-power splitter; (c) wavelength division multiplexer

为了获得较低的光群速,日本、美国等国家的研究者们对慢光 2D-PCW 进行了大量研究。2001 年,日本的 Notomi 等^[59]制备了群折射率高达 90 的 Si 基 2D-PCW。2005 年,美国的 Vlasov 等^[60]制备了群折射率大于 300 的 Si 基 2D-PCW。随着光群速的降低,群速度色散显著增强[图 5(b)],脉冲带宽急剧变窄,限制了慢光 2D-PCW 的实际应用。研究者们通过设计和优化各种 2D-PCW 的结构来在获得慢光的同时保证足够的带宽,主要有两种途径:1) 零色散优化,通过调整波导附近处孔或柱的形状、尺寸、折射率和位置等获得宽带慢光^[20,22,61~66];2) 是色散补偿,利用啁啾结构获得宽带慢光^[67,68]。由于啁啾结构复杂,制备较困难,目前主要采用第一种途径设计慢光结构。近几年来,研究者们主要对 Si 基空气孔型三角晶格慢光 2D-PCW 在通信波长附近进行了大量实验和理论模拟研究,具体参数如表 2 所示,其中 R 、 S 、 n 、 L 分别代表靠近波导一排或数排的空气孔的半径、形状、折射率(注入液体)以及沿波导方向的位置; λ 为波导入射波长,除特别说明外 λ 均在 1550 nm 附近。

表 2 已报道的宽带慢光 2D-PCW 具体参数

Table 2 Parameters of reported 2D-PCW

Experiment /simulation	Structure	n_g	Bandwidth /nm	Year
Experiment	R changed	34	11	2006 ^[22]
		32, 5	14	
	L shifted	44	11	2008 ^[65]
		49	9.5	
	L shifted	25~60	12~3	2009 ^[20]
	L shifted	26, 5	18	2011 ^[62]
Experiment ($\lambda = 1406$ nm)	n changed	80	3	2012 ^[63]
	S changed	20	8	2007 ^[64]
		23	40.7	
	Simulation	S changed	35	23.7
45			5.1	
	n changed	41.8	15.0	2011 ^[66]
	Chirped	450	0.032	2005 ^[67]
	Chirped	28	13.24	2012 ^[68]

从表 2 中可以看到,群折射率与带宽的关系,总的趋势是群折射率越大(即群速越小),带宽越小。不同的波导结构,群折射率和带宽也不一样,以平移空气孔的位置和改变空气孔的形状所得到的宽带慢光特性最为优越。实验测试的数据中,群折射率在 20~40 范围内时,带宽一般在 10~20 nm 之间,理论模拟的数据之间相差较大。另外从模拟的数据来看,啁啾结构的慢光特性较一般结构的慢光特性并无较大的优势,这也许是目前研究者们倾向于优化常规波导结构的原因。

5 硫系玻璃基质二维光子晶体波导

目前,大多数的 2D-PCW 都是用 Si 基或 III-V 化合物等制备而成。近几年来,研究人员对硫系玻璃基质 2D-PCW 产生了很大的兴趣。硫系玻璃是一种常见的透中远红外光的光学材料,是除氧元素之外的第 VI 主族元素(S, Se, Te)同电负性较弱的 As, Sb, Ge 等形成的非晶体化合物,例如 As_2S_3 、Ge-Sb-Se 和 Ge-As-Se 等^[69~71]。硫系玻璃具有光敏效应、较低的声子能量、较高的折射率和三阶非线性极化率等特性,并且双光子吸收系数小、无自由载流子效应、红外透射率高^[46,72],使得硫系玻璃基质 2D-PCW 比 Si 基等 2D-PCW 在自相位调制、四波混频和三次谐波等光学非线性效应方面更具优势^[26,73,74]。目前,在硫系玻璃基质 2D-PCW 研究方面较具规模的有澳大利亚悉尼大学光学系统超高带宽器件研究中心(CUDOS)^[74~77]和日本横滨国立大学电子与计算机工程学院^[26,73]等。

2005 年,Freeman 等^[78]利用 FIB 方法制备出 $Ge_{33}As_{12}Se_{55}$ 二维光子晶体。2006 年,Grillet 等^[75]报道了在此基础之上制备成的薄膜悬浮型 $Ge_{33}As_{12}Se_{55}$ 2D-PCW[图 6(a)]。之后,CUDOS 研究小组对 $Ge_{33}As_{12}Se_{55}$ 2D-PCW 与锥形光纤的耦合特性^[75,76]及其光敏^[77]和三次谐波特性^[74]进行了研究并获得了很好的结果。研究发现,TE 基模的耦合效率高达 98%^[75],利用激光照射耦合区域可获得约 5 nm 的谐振耦合波长偏

移量^[77],设计色散管理结构的波导可获得高于同种结构的 Si 基 2D-PCW 约 30 倍的三次谐波转换效率^[74]。另外,2011 年英国 Spurny 等^[79]制备并测试了不同晶格常数的 $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ 2D-PCW 的传输损耗,在通信波长附近获得最低损耗为 21 dB/cm,可与一般的 Si 基 2D-PCW 的传输损耗相比拟。

2009 年,Suzuki 等^[26]报道了用电子束曝光和 ICP 刻蚀方法制备的薄膜悬浮型掺 Ag 的 As_2Se_3 2D-PCW [图 6(b)]。2010 年,他们又设计制备了 Ag- As_2Se_3 慢光 2D-LSPCW^[73],并研究了该波导的自相位调制和四波混频等非线性效应,性能均优于硅线波导^[26,73,80]。研究发现,相位改变 1.5π 所需的入射光功率仅为 0.42 W,波导的有效非线性参量达 $6.3 \times 10^4 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,比报道的 As_2Se_3 脊型波导的有效非线性参量高 4000 多倍^[69]。

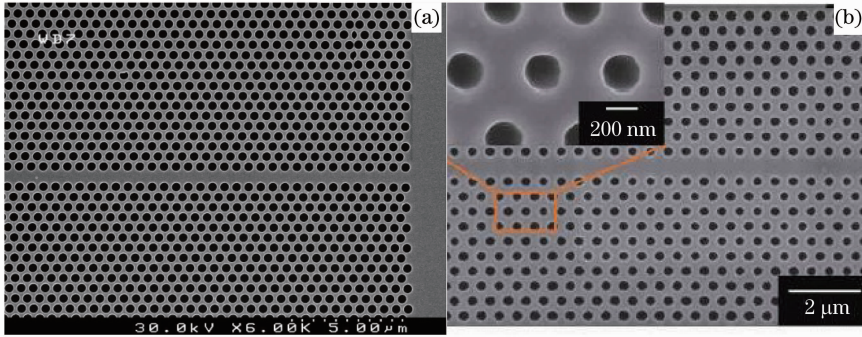


图 6 不同成分的硫系玻璃基质 2D-PCW 结构:(a) $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$; (b) Ag- As_2Se_3

Fig. 6 Structures of 2D-PCW made of: chalcogenide glass with different component (a) $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ and (b) Ag- As_2Se_3

由于硫系玻璃比硅基材料熔点更低、更柔软,很难获得笔直的空气孔侧壁,导致粗糙度较大,增大了波导的传输损耗^[26,79]。此外硫系玻璃本身不易制备,而 2D-PCW 的结构又较复杂,因此目前对硫系玻璃基质 2D-PCW 的研究还局限于 $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ 和 As_2Se_3 等几种材料。但硫系玻璃基质 2D-PCW 由于具有优良的非线性特性,在将来的全光信号处理系统中必将占有一席之地。

6 结束语

虽然 2D-PCW 的研究已有近 20 年的历史,但是 2D-PCW 的基础研究及应用总体还处于起步阶段,存在许多不足以及亟需解决的问题,表现在:1)2D-PCW 实际损耗与理论损耗相差太大,这将限制 2D-PCW 的实际应用;2)目前 2D-PCW 的研究主要集中在 Si 基材料,其次是 GaAs、InP 等,对于其他 III-V 化合物和高非线性的硫系玻璃材料等则研究较少;3)制备技术有待提高,结构稍微复杂的 2D-PCW 较难制备,不能够充分利用 PCW 的结构优势,另外大规模制备依然不易,成本太高;4)2D-PCW 与传统光纤等光通信器件的耦合与集成技术也是 2D-PCW 今后是否能在光通信领域商业应用的关键问题。随着理论和实验研究的日益深入以及制备技术的日益改良,相信在光学集成电路日益朝着器件高度集成化、尺寸小型化方向发展的今天,2D-PCW 以其优良的传输特性、结构特性、慢光特性和超高的非线性特性等,必将在光电子器件和全光通信等领域占有重要的地位。

参 考 文 献

- 1 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 2 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 3 Kuai Sulan, Zhang Yuzhi, Hu Xingfang. Band structures, applications and preparations of photonic crystals[J]. *J. Inorganic Materials*, 2001, **16**(2): 193~199
快素兰,章俞之,胡行方. 光子晶体的能带结构、潜在应用和制备方法[J]. *无机材料学报*, 2001, **16**(2): 193~199
- 4 P. Russell. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 5 R. D. Meade, A. Devenyi, J. Joannopoulos *et al.*. Novel applications of photonic band gap materials: low-loss bends and high Q cavities[J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(9): 4753~4755
- 6 Y. Zhang, Z. Li, B. Li. Multimode interference effect and self-imaging principle in two-dimensional silicon photonic crystal waveguides for terahertz waves[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2679~2689

- 7 D. Modotto, M. Conforti, A. Locatelli *et al.*. Imaging properties of multimode photonic crystal waveguides and waveguide arrays[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(1): 402~409
- 8 Y. Zhao, Y. Zhang, Q. Wang. High sensitivity gas sensing method based on slow light in photonic crystal waveguide[J]. *Sensors and Actuators B*, 2012, **173**: 28~31
- 9 C. Husko, T. Vo, B. Corcoran *et al.*. Ultracompact all-optical XOR logic gate in a slow-light silicon photonic crystal waveguide[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(21): 20681~20690
- 10 J. K. Yang, H. Noh, M. J. Rooks *et al.*. Lasing in localized modes of a slow light photonic crystal waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(24): 241107
- 11 T. Baba, T. Kawaaski, H. Sasaki *et al.*. Large delay-bandwidth product and tuning of slow light pulse in photonic crystal coupled waveguide[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(12): 9245~9253
- 12 T. F. Krauss. Slow light in photonic crystal waveguides[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, **40**(9): 2666~2670
- 13 M. Shinkawa, N. Ishikura, Y. Hama *et al.*. Nonlinear enhancement in photonic crystal slow light waveguides fabricated using CMOS-compatible process[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(22): 22208~22218
- 14 C. Monat, B. Corcoran, M. Ebnali-Heidari *et al.*. Slow light enhancement of nonlinear effects in silicon engineered photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(4): 2944~2953
- 15 A. Baron, A. Ryasnyanskiy, N. Dubreuil *et al.*. Light localization induced enhancement of third order nonlinearities in a GaAs photonic crystal waveguide[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(2): 552~557
- 16 Cui Naidi, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu *et al.*. Photonic crystals and 2-D photonic crystal waveguides[J]. *OME Information*, 2009, **26**(10): 19~27
崔乃迪, 梁静秋, 梁中翥 等. 光子晶体及二维光子晶体波导[J]. 光机电信息, 2009, **26**(10): 19~27
- 17 W. Kuang, C. Kim, A. Stapleton *et al.*. Calculated out-of-plane transmission loss for photonic-crystal slab waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(19): 1781~1783
- 18 M. Kotlyar, T. Karle, M. Settle *et al.*. Low-loss photonic crystal defect waveguides in InP[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(18): 3588~3590
- 19 A. Di Falco, M. Massari, M. Scullion *et al.*. Propagation losses of slotted photonic crystal waveguides[J]. *IEEE Photon. J.*, 2012, **4**(5): 1536~1541
- 20 Y. Hamachi, S. Kubo, T. Baba. Slow light with low dispersion and nonlinear enhancement in a lattice-shifted photonic crystal waveguide[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 1072~1074
- 21 T. F. Krauss, R. M. D. L. Rue, S. Brand. Two-dimensional photonic-bandgap structures operating at near-infrared wavelengths[J]. *Nature*, 1996, **383**(6602): 699~702
- 22 L. H. Frandsen, A. V. Lavrinenko, J. Fage-Pedersen *et al.*. Photonic crystal waveguides with semi-slow light and tailored dispersion properties[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9444~9450
- 23 A. M. Malvezzi, F. Cattaneo, G. Vecchi *et al.*. Second-harmonic generation in reflection and diffraction by a GaAs photonic-crystal waveguide[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9): 2122~2128
- 24 W. Jia, J. Deng, H. Wu *et al.*. Design and fabrication of high-efficiency photonic crystal power beam splitters[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(20): 4077~4079
- 25 M. Shih, W. Kim, W. Kuang *et al.*. Two-dimensional photonic crystal Mach-Zehnder interferometers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(4): 460~462
- 26 K. Suzuki, Y. Hamachi, T. Baba. Fabrication and characterization of chalcogenide glass photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(25): 22393~22400
- 27 C. Liguda, G. Bottger, A. Kuligk *et al.*. Polymer photonic crystal slab waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(17): 2434~2436
- 28 Xie Lingyun, Zhang Yejin, Peng Xiaozhou *et al.*. Study on SOI-based photonic crystal waveguides[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(6): 392~395
解灵运, 张冶金, 彭小舟 等. 基于 SOI 的光子晶体波导的研究[J]. 半导体光电, 2003, **24**(6): 392~395
- 29 Zhou Changzhu, Liu Yazhao, Li Zhiyuan. Waveguide bend of 90° in two-dimensional triangular lattice silicon photonic crystal slabs[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(8): 084203
- 30 Han Shouzheng, Tian Jie, Feng Shuai *et al.*. Fabrication of straight waveguide in two-dimensional photonic crystal slab and its light propagation characteristics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(12): 5659~5662
韩守振, 田洁, 冯帅 等. 二维平板光子晶体直波导的制备和光传输特性的测量[J]. 物理学报, 2005, **54**(12): 5659~5662
- 31 M. Mulot, A. Säynätjoki, S. Arpiainen *et al.*. Slow light propagation in photonic crystal waveguides with ring-shaped holes[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2007, **9**(9): S415~S418
- 32 A. Xing, M. Darvanco, D. J. Blumenthal *et al.*. InP photonic crystal membrane structures: fabrication accuracy and optical performance[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(4): 522~524
- 33 P. Borel, L. Frandsen, M. Thorhauge *et al.*. Efficient propagation of TM polarized light in photonic crystal components exhibiting band gaps for TE polarized light[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(15): 1757~1762

- 34 J. Li, Y. Liu, X. Xie *et al.*. Fabrication of photonic crystals with functional defects by one-step holographic lithography [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12899~12904
- 35 T. Tada, V. V. Poborchii, T. Kanayama. Channel waveguides fabricated in 2D photonic crystals of Si nanopillars[J]. *Microelectronic Engineering*, 2002, **63**(1): 259~265
- 36 T. Baba, A. Motegi, T. Iwai *et al.*. Light propagation characteristics of straight single-line-defect waveguides in photonic crystal slabs fabricated into a silicon-on-insulator substrate[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **38**(7): 743~752
- 37 L. O'faolain, X. Yuan, D. McIntyre *et al.*. Low-loss propagation in photonic crystal waveguides[J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(25): 1454~1455
- 38 R. Kappeler, P. Kaspar, H. Jackel. Loss-relevant structural imperfections in substrate-type photonic crystal waveguides [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(21): 3156~3166
- 39 T. White, L. O'Faolain, J. Li *et al.*. Silica-embedded silicon photonic crystal waveguides [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(21): 17076~17081
- 40 K. Inoue, Y. Sugimoto, N. Ikeda *et al.*. Ultra-small GaAs-photonic-crystal-slab-waveguide-based near-infrared components; fabrication, guided-mode identification, and estimation of low-loss and broad-band-width in straight-waveguides, 60° bends and Y-splitters[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(9A): 6112~6114
- 41 N. Ikeda, Y. Sugimoto, Y. Tanaka *et al.*. Low propagation losses in single-line-defect photonic crystal waveguides on GaAs membranes[J]. *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, 2005, **23**(7): 1315~1320
- 42 J. Zimmermann, M. Kamp, R. Schwertberger *et al.*. Efficient light transmission through InP-based photonic crystal waveguides[J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(4): 178~180
- 43 P. Ma, P. Kaspar, Y. Fedoryshyn *et al.*. InP. ased planar photonic crystal waveguide in honeycomb lattice geometry for TM-polarized light[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1558~1560
- 44 P. Kaspar, R. Kappeler, H. Jäckel *et al.*. Toward low-loss photonic crystal waveguides in InP/InGaAsP heterostructures [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(17): 3717~3719
- 45 J. H. Chen, Y. T. Huang, Y. L. Yang *et al.*. Design, Fabrication, and characterization of Si-based ARROW-B photonic crystal sharp-bend waveguides and power splitters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2012, **30**(14): 2345~2351
- 46 X. Gai, T. Han, A. Prasad *et al.*. Progress in optical waveguides fabricated from chalcogenide glasses[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26635~26646
- 47 M. Shih, W. J. Kim, W. Kuang *et al.*. Experimental characterization of the reflectance of 60° waveguide bends in photonic crystal waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(19): 191104
- 48 S. Bakhshi, M. K. Moravvej-Farshi, M. Ebnali-Heidari. Proposal for enhancing the transmission efficiency of photonic crystal 60° waveguide bends by means of optofluidic infiltration[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(21): 4048~4053
- 49 L. B. Soldano, E. C. M. Pennings. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging; principles and applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4): 615~627
- 50 A. Martinez, F. Cuesta, J. Marti. Ultrashort 2-D photonic crystal directional couplers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(5): 694~696
- 51 Xu Xuming, Li Wei, Fang Liguang *et al.*. Self-imaging based multimode interference photonic crystal waveguide 1×2 splitter[J]. *Study on Optical Communications*, 2008, 34(6): 34~36
徐旭明, 李 未, 方利广 等. 基于自成像多模干涉的光子晶体波导 1×2 分束器[J]. *光通信研究*, 2008, **34**(6): 34~36
- 52 S. Boscolo, M. Midrio, C. G. Someda. Coupling and decoupling of electromagnetic waves in parallel 2D photonic crystal waveguides[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **38**(1): 47~53
- 53 Jin Xiaojun. The Study on Characteristics of Multi-Wavelength Photonic Crystal Wavelength Division Multiplexers 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
- 54 M. Povinelli, S. Johnson, J. Joannopoulos. Slow-light, band-edge waveguides for tunable time delays[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18): 7145~7159
- 55 C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi *et al.*. Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses[J]. *Nature*, 2001, **409**(6819): 490~493
- 56 H. Gersen, T. Karle, R. Engelen *et al.*. Real-space observation of ultraslow light in photonic crystal waveguides[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(7): 073903
- 57 T. Baba. Slow light in photonic crystals[J]. *Nature Photon.*, 2008, **2**(8): 465~473
- 58 L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. *Nature*, 1999, **397**(6720): 594~598
- 59 M. Notomi, K. Yamada, A. Shinya *et al.*. Extremely large group-velocity dispersion of line-defect waveguides in photonic crystal slabs[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **87**(25): 253902
- 60 Y. A. Vlasov, M. O'Boyle, H. F. Hamann *et al.*. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides [J]. *Nature*, 2005, **438**(7064): 65~69
- 61 J. Li, T. P. White, L. O'Faolain *et al.*. Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides[J]. *Opt.*

- Express*, 2008, **16**(9): 6227~6232
- 62 S. Rahimi, A. Hosseini, X. Xu *et al.*. Group-index independent coupling to band engineered SOI photonic crystal waveguide with large slow-down factor[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(22): 21832~21841
- 63 A. Casas-Bedoya, C. Husko, C. Monat *et al.*. Slow light dispersion engineering of photonic crystal waveguides using selective microfluidic infiltration[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(20): 4215~4217
- 64 A. Säynätjoki, M. Mulot, J. Ahopelto *et al.*. Dispersion engineering of photonic crystal waveguides with ring-shaped holes [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8323~8328
- 65 B. Meng, L. Wang, W. Huang *et al.*. Wideband and low dispersion slow-light waveguide based on a photonic crystal with crescent-shaped air holes[J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(23): 5735~5742
- 66 L. Dai, T. Li, C. Jiang. Wideband ultralow high-order-dispersion photonic crystal slow-light waveguide[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2011, **28**(7): 1622~1626
- 67 D. Mori, T. Baba. Wideband and low dispersion slow light by chirped photonic crystal coupled waveguide[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(23): 9398~9408
- 68 Zhang Wei, Wang Zhiyong, Wang Wenchao *et al.*. Investigation on wideband slow light based on photonic-crystal coupled waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 162~166
- 张伟, 王智勇, 王文超 等. 基于光子晶体耦合波导的宽带慢光研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0213001
- 69 T. Han, S. Madden, S. Debbarma *et al.*. Improved method for hot embossing As_2S_3 waveguides employing a thermally stable chalcogenide coating[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(25): 25447~25453
- 70 Z. G. Lian, W. Pan, D. Furniss *et al.*. Embossing of chalcogenide glasses; monomode rib optical waveguides in evaporated thin films[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1234~1236
- 71 Zhang Wei, Chen Yu, Fu Jing *et al.*. Study on fabrication and optical properties of Ge-Sb-Se thin film[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(5): 056801
- 张巍, 陈昱, 付晶 等. Ge-Sb-Se 硫系薄膜制备及光学特性研究[J]. *物理学报*, 2012, **61**(5): 056801
- 72 A. Seddon, W. Pan, D. Furniss *et al.*. Fine embossing of chalcogenide glasses-a new fabrication route for photonic integrated circuits[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2006, **352**(23): 2515~2520
- 73 K. Suzuki, T. Baba. Nonlinear light propagation in chalcogenide photonic crystal slow light waveguides[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26675~26685
- 74 C. Monat, M. Spurny, C. Grillet *et al.*. Third-harmonic generation in slow-light chalcogenide glass photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(15): 2818~2820
- 75 C. Grillet, C. L. C. Smith, D. Freeman *et al.*. Efficient coupling to chalcogenide glass photonic crystal waveguides via silica optical fiber nanowires[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3): 1070~1078
- 76 C. Smith, C. Grillet, S. Tomljenovic-Hanic *et al.*. Characterisation of chalcogenide 2D photonic crystal waveguides and nanocavities using silica fibre nanowires[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2007, **394**(2): 289~292
- 77 M. W. Lee, C. Grillet, C. L. C. Smith *et al.*. Photosensitive post-tuning of chalcogenide photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(3): 1277~1285
- 78 D. Freeman, S. Madden, B. Luther-Davies. Fabrication of planar photonic crystals in a chalcogenide glass using a focused ion beam[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 3079~3086
- 79 M. Spurny, L. O'Faolain, D. A. P. Bulla *et al.*. Fabrication of low loss dispersion engineered chalcogenide photonic crystals[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(3): 1991~1996
- 80 E. Dulkeith, Y. A. Vlasov, X. Chen *et al.*. Self-phase-modulation in submicron silicon-on-insulator photonic wires[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5524~5534