

光子晶体应用研究进展

闫刚印¹, 王继刚^{1,2}

(1. 西藏民族学院 西藏光信息处理与可视化技术重点实验室, 陕西 咸阳 712082)

(2. 东南大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 211189)



闫刚印

摘要: 光子晶体是一种具有光子带隙的新型材料, 其概念提出比较早, 距今已经过了 30 年。由于光子晶体具有很多新颖的特性, 使其成为微纳光子学和量子光学的重要研究领域。随着微加工技术的进步和理论的深入研究, 光子晶体在信息光学以及多功能传感器等其他多个学科中也得到广泛应用。本文从理论上详细综述了光子晶体的各种奇异特性, 并从各种特性出发, 详细介绍近年来光子晶体在光子晶体光纤、反射镜、滤波器、波导、低阈值激光器、多功能传感器、腔量子电动力学、偏振器、量子信息处理等领域的应用研究, 并与传统的器件进行性能比较得出光子晶体器件具有无可比拟的优势。最后提出, 随着 3D 打印制造技术的成熟, 光子晶体材料必然会推动信息技术的新一轮革命。

关键词: 光子晶体; 光子带隙; 非线性效应

中图分类号: TB321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2014)09-0630-06

Research Progress of Application of Photonic Crystals

YAN Gangyin¹, WANG Jigang^{1,2}

(1. Tibet Optical Information Processing and Visualization Technology Key Laboratory,
Tibet University for Nationalities, Xianyang 712082, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Photonic crystal is a new kind of materials with photonic band gap. Although the concept has been projected about 30 years, photonic crystals have potential applications in micro-nano photonics and quantum optics. Photonic crystals have also been widely used in information optics, multifunctional sensor and other fields. In this paper, the main characteristics of photonic crystals are introduced in detail. In addition, research progress and application of photonic crystals in the photonic crystal fiber, mirrors, filters, waveguide, low threshold, multifunctional sensor, cavity quantum electrodynamics, polarizer, quantum information processing and other fields are reviewed in detail. They are compared with the traditional devices and confirmed higher performance. Finally, we believe that photonic crystals will promote a new revolution of information technology with the improvement of 3D print manufacturing technology.

Key words: photonic crystal; photonic band gap; nonlinear effect

1 前言

1987 年, Yabnolovitch 在讨论如何抑制自发辐射时提出了光子晶体这一新概念^[1]。几乎同时, John 在讨论光子局域时也独立提出了这一概念^[2]。如果将不同介电常数的介电材料按照一定的规则周期性排列, 电磁波在

其中传播时由于布拉格散射, 电磁波会受到调制而形成能带结构, 这种能带结构叫做光子能带。光子能带之间可能出现带隙, 即光子带隙。具有光子带隙的周期性介电结构就是光子晶体, 或叫做光子带隙材料, 也有人把它叫做电磁晶体。

对于光子晶体来说, 许多固体物理中的概念, 如倒格子、布里渊区、色散关系、Bloch 函数、Van Hove 奇点等都可以运用。不过有一点我们需要明白, 光子晶体毕竟是人工设计的晶体, 其与常规的晶体(从某种意义上也可以称之为电子晶体)有许多相同的地方, 但同时也有本质的不同^[3], 如: 光波在光子晶体中传播时要服从 Maxwell 方程, 而电子在固体中传播时要服从薛定谔

收稿日期: 2014-07-07

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0119);
西藏民族学院校内项目(13mY14)

第一作者及通讯作者: 闫刚印, 男, 1982 年生, 讲师, 博士,
Email: yangangyin1982@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.09.14

方程;光波具有电场分量和磁场分量,是一种矢量波,而电子波是一种标量波,只与电子密度有关;电子作为自旋为 $1/2$ 的费米子,它们之间存在很强的相互作用,而光子作为自旋为 1 的玻色子,几乎不存在相互作用。光子晶体许多新颖效应及其应用是光子晶体领域最富活力、研究内涵十分丰富的学科。

2 光子晶体特性

光子晶体实际上就是一种介质在另一种介质中周期排列组成的人工晶体,该排列周期为波长量级^[4]。波长与其晶格常数相比拟的电磁波在该方向传播时会受到布拉格散射,其光子能带之间就可能带有带隙出现,导致落在光子带隙中的电磁波不能传播,这是光子晶体具有的光子带隙效应^[3]。光子晶体具有抑制和增强自发辐射即控制自发辐射的现象,被称为 Purcell 效应^[5]。通过调节光子晶体缺陷的结构、大小来控制缺陷使缺陷态能级处在光子带隙之中,从而可以实现光子局域效应^[6]。光子晶体还具有 Veselago 于 1968 年首次提出的负折射效应^[7],即入射光线和折射光线会出现在法线的同侧,2003 年麻省理工学院的 Cubukcu 和 Parimi 分别阐述了电磁波在二维光子晶体中的负折射效应^[8-9]。负折射介质最引人注目的是它能够放大逝波,从而实现“超透镜效应”,可极大地提高透镜成像的分辨率。

光子晶体具有与传统物质不同的色散关系,具有很多奇异的非线性效应,这些非线性效应吸引了大量科学工作者的兴趣,成为近年来一个研究热点^[10]。1993 年,John S 研究了光子晶体中的带隙孤子^[11],1994 年 Scalora M 等人研究了光子晶体中的光限制效应^[12],1998 年 Berger V 研究了光子晶体中光学谐波的产生^[13],2000 年 Hache A 等人研究了光子晶体中克尔非线性^[14]。南京大学祝世宁教授将诺贝尔奖获得者 Bloembergen 提出的准相位匹配理论应用于微结构晶体中光的散射与衍射研究,利用准相位匹配的光参量过程来放大光的散射信号,采用图案极化方法制备出具有六方对称的二维非线性光子晶体,利用光的散射信号和入射光束的非线性相互作用,使通常很弱的散射信号通过光的参量过程得到显著增强^[15]。

3 光子晶体的应用

由于光子晶体具有控制自发辐射效应、光子禁带效应、光子局域效应、负折射效应和非线性效应。因此,光子晶体在光纤、反射镜、滤波器、波导等方面有广阔的应用前景。

3.1 光子晶体光纤

目前,人们对光子晶体的应用做了很多相关研究,

在这些研究当中,光子晶体光纤是研究最多也是发展最快的领域^[16-18]。光子晶体光纤概念最初由 Russell 等人于 1991 年提出(其研究工作未发表),其最初的设想包括两个关键点——不掺杂单一石英材料和利用光子带隙效应导光。1996 年, Russell 和 Knight 等人首次制备了固态纤芯的光子晶体光纤^[19]。研究表明,这种光子晶体纤芯周围的包层不具有光子带隙,其应用原理仍与全反射原理相似。尽管未能实现利用光子带隙效应导光的设想,但证明了它可以使传输光损失明显降低。1997 年他们又制备出了第 1 根具有无截止单模特性的光子晶体光纤^[20]。1998 年, Knight 终于成功制备出了第 1 根真正意义上的光子带隙效应光子晶体光纤^[21]。1999 年 Cregan 制备出第 1 根基于光子带隙效应的空气纤芯光子晶体光纤^[22]。随后,空气纤芯光子晶体光纤引起了大量科学工作者的关注。图 1 是 Jonathan D. Shephard 研究小组制作的空气纤芯光子晶体光纤^[23],即通过光子晶体光纤可以实现空气纤芯导光,大大降低在光传输过程中的能耗;其次,传统光纤在弯曲处往往会不能满足全反射角度条件而导致光线溢出,损失能量,而光子晶体光纤通过合理的设置,可以实现大角度的弯折。

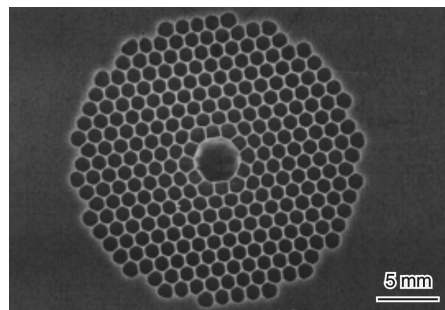


图1 空气纤芯光子晶体光纤 SEM 像

Fig. 1 SEM image of hollow core photonic crystal fibers

光子晶体光纤除了具有降低能耗的优点外,还具有其它优于传统光纤的特性,诸如无截止单模、不同的色度色散、极好的非线性效应、双折射效应、较高的入射功率、易于实现多芯传输等等,相信这些优良特性会使其在未来的光通信领域有更为广阔的应用前景。

3.2 高性能反射镜

传统的金属反射镜在红外波段和可见光波段有较大的吸收。光子晶体存在光子禁带,对于完全带隙的光子晶体来说,可以反射从任何方向来的一定频率的入射光,如果入射光的频率落入光子晶体的带隙中,其理论反射率几乎可以达到 100%。Fink 等人^[24]提出一维光子晶体反射镜能够对入射到表面的某一频段波全反射,当入射角度发生变化时,仍然可以反射,这与多层介质反射镜有所不同。这种光子晶体反射镜在实际应用中,有

很好的效果,例如将光子晶体反射镜耦合到微波天线的基底做反射面,只要微波天线发射的电磁波频率完全落在光子晶体的禁带范围内,则电磁波将完全不能透过基底,能量全部被反射,据此便可以大大提高天线的工作效率和性能。

3.3 光子晶体滤波器

由于光子晶体存在光子带隙,如果光子的频率刚好落在光子晶体禁带内,该频率的光波将不能在该光子晶体中进行传播。因此光子晶体本身就是一个自然的带阻滤波器,如果在光子晶体中人为地引入一些缺陷,便可以达到窄带滤波的目的,因而光子晶体具有很好的滤波性能^[25]。其相对于传统滤波器有显著优点:其滤波性能异常优越,阻带区对透光的抑制甚至可以达到 30 dB 以上,并且光子晶体滤波器的带阻边沿的陡峭度可以接近 90°,其次,由于光子晶体材料通常由对光波无损耗的介质做成,其对所通过波段的光波的损耗很小。目前,光子晶体滤波器的研究主要集中在以下几个方面:Si 材料光子晶体可调谐多径道滤波器、二维光子晶体信道分出滤波器、光子晶体调谐滤波器等。

3.4 光子晶体波导

传统的介电波导可以支持直线传播的光,但在拐角处会损失能量,光子晶体波导可以改变这种情况。光子晶体波导不仅对直线路径而且对转角都有很高的效率,同时光子晶体波导还可以产生慢光效应^[26-27]。通过各种精密的制备手段在三维光子晶体中引入各种样式的缺陷,可以随意地低能耗地控制光线传输。在光子晶体波导中,光线具有如此高效的传播能力使得人们不得不对其另眼相看,因此对光子晶体波导的研究也成为光子晶体应用研究的一个主要领域。图 2 是一些科学工作者采用 TPP 技术在 Silicon-air 反相蛋白石结构中制备出的复杂光子晶体的 SEM 像^[28]。其显著特点是处于禁带频率范围的光波可以沿着图中所示曲线缺陷传播,能量几乎没有损失,这些特点都是传统波导所不具备的。

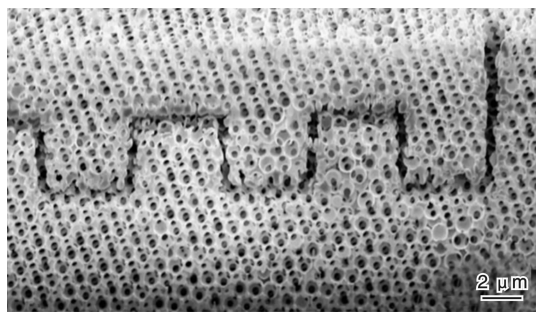


图 2 带有波导缺陷的光子晶体 SEM 像

Fig. 2 SEM image of photonic crystal with waveguide faults

3.5 非线性光子晶体

将非线性介电材料在空间范围内进行周期性排列得

到的光子晶体我们称之为非线性光子晶体。这一概念是由 Berger 在其他科学工作者的研究基础上于 1998 年首次提出的^[29]。由于非线性光子晶体具有强而快的非线性光学响应,并且创造了产生和观察非线性局域光子模的理想条件,进而产生独特的非线性效应,如二次谐波产生、准相位匹配等,并在许多领域具有广泛的应用前景^[30-31]。因此,近年来,一些科学工作者在非线性光子晶体器件领域进行了一系列的研究。Trull T 研究小组已经在实验上观测到了在非线性光子晶体中产生二次谐波的现象^[32]。除此之外,在非线性光子晶体器件方面,如限幅器、光子开关以及光波分割与合成等方面也开展了一些工作^[33]。在目前阶段,尽管这方面的研究工作还处于初步阶段,但由于非线性介质的光学特性,使非线性光子晶体的研究前景十分广阔。

3.6 低阈值激光器

随着元器件尺寸的减小,传统的半导体激光器由于体积相对庞大,已经逐渐不能满足需要。由于光子晶体具有抑制自发辐射的功能,如果激光器半导体物质的辐射频率处于光子晶体光子带隙中时,就会抑制激光器的自发辐射。将带有波导缺陷的光子晶体引入激光器,如果缺陷形成的波导与激光器激光的出射方向成一定的角度,自发辐射的能量就会几乎全部用于激光的发射,从而很大程度地降低激光器的阈值。1999 年,Painter 等在二维光子晶体结构中引入一点缺陷形成一光能量阱,利用光线驱动激光器工作,从而实现了光驱动光子晶体激光器^[34]。2000 年,Zhou 研究小组制备了以电流驱动的光子晶体激光器^[35],其驱动电流阈值仅为 300 μA ,产生了波长为 931 nm 的激光。与传统的半导体激光器相比,光子晶体激光器具有低阈值、体积小、损耗小、模式易控制等优点。

3.7 多功能传感器^[36-39]

除了在光子器件方面的大量应用,光子晶体还被设计为传感器件,用以探测温度变化、金属含量、pH 值、离子强度、血糖浓度等。其主要工作原理在于所探测的值发生改变时,光子晶体空隙的折射系数也会随之发生改变,进而使折射系数比值发生变化,其光子带隙位置随之发生一定的位移,通过与实验值作对比,进而得知该处化学物质的种类、浓度或其它方面的信息。多功能光子晶体传感器相对于传统传感器一般结构紧凑,便于传感器的微型化和便携化,因此,在未来的一段时间内光子晶体传感器将成为传感器技术领域的研究热点,进而有可能在物联网领域大显身手。

3.8 光子晶体微腔

在光子晶体结构中引入点缺陷或线缺陷,可以得到高品质因子微谐振腔。由于光子晶体微谐振腔在低阈

值、高效激光器领域有很重要的应用,科学工作者一直致力于这方面的研究。微谐振腔在光集成领域有很重要的应用,而传统的金属谐振腔制作工艺尺寸小的微谐振腔存在很大的局限性,在光波的频段,这种传统金属谐振腔能量损耗特别大,品质因子 Q 值也很低。而光子晶体微谐振腔,只要其周期性排列完好,根据激光器发射光频率的要求,通过一定的制备工艺引入合适的点缺陷或线缺陷可以得到高 Q 值的微谐振腔。目前有学者在平板型光子晶体结构中设计出的微腔结构^[40],其 Q 值的理论计算值大于 10^7 。在实验上已经取得 Q 值为 45 000 的微腔^[41]。

最早人们在二维平板型光子晶体制备过程中,通过引入缺陷制备微谐振腔,其 Q 值虽然可以达到很高,但是二维光子晶体由于不具备完全光子带隙,只是在光的 TE (Transverse Electric) 偏振波实现完全封闭,而对 TM

(Transverse Magnetic) 偏振波只能通过全反射方式来实现完全封闭,因而制备三维完全光子带隙晶体微腔成为近年来的一个研究热点。2011 年,东京大学的 Arakawa 研究小组采用微加工制备工艺在三维 GaAs 光子晶体结构中构造一个点缺陷结构 ($1.15 \mu\text{m} \times 1.15 \mu\text{m}$) 作为一个微谐振腔^[42],在微腔中植入三层 InAs 量子点层作为激活层,如图 3 所示,图 3a 是三维光子晶体结构示意图,图 3b 是 GaAs 试样中三层 InAs 量子点剖面的原子力显微镜 (AFM) 照片,图 3c 与图 3d 分别是试样的 SEM 侧视与顶视图。用激发激光照射该三维光子晶体微谐振腔,波长为 $1.2 \mu\text{m}$ 的光被封闭于三维光子晶体微腔中,实现了激光的振荡。该三维光子晶体微谐振腔的 Q 值达到了 38 500,在三维光子晶体结构中为目前最高值。因为三维光子晶体微谐振腔理论上可封闭所有模式的光,因此,其对光的封闭性能要远远高于二维光子晶体。

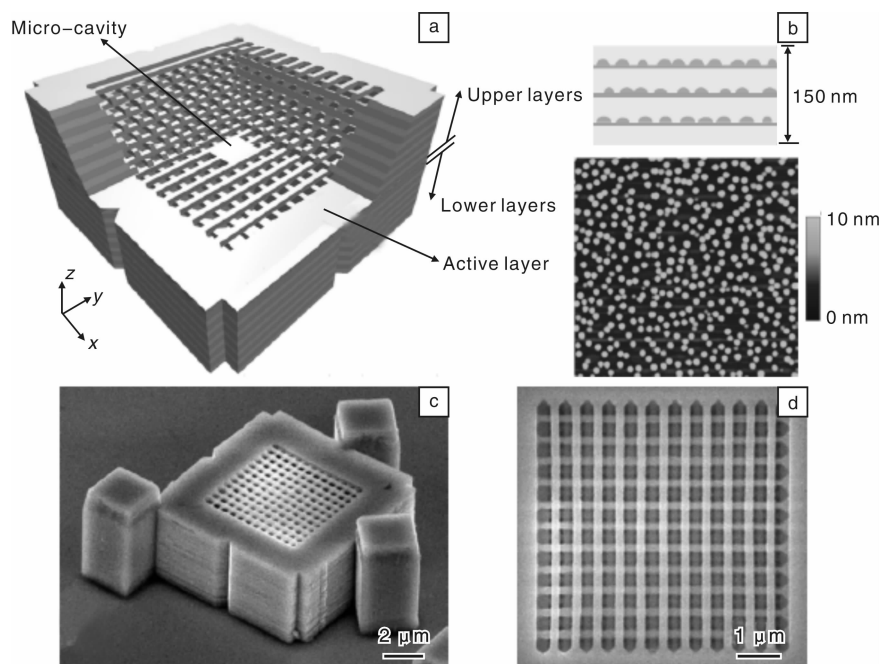


图3 GaAs 三维光子晶体微腔: (a) 三维光子晶体结构示意图, (b) GaAs 试样中三层 InAs 量子点剖面的 AFM 照片, (c) 和 (d) 分别是试样的侧视和顶视的 SEM 像

Fig. 3 3-D GaAs photonic crystal micro-cavity: (a) schematic diagram of 3-D photonic crystal structural, (b) sectional AFM image of three layers InAs quantum points, and (c, d) SEM images of lateral and top view of sample, respectively

3.9 腔量子电动力学领域的应用

腔量子电动力学是研究光与原子相互作用的一门学科。光子与原子在狭小的微腔中表现出与在自由空间完全不同的基本行为,能从根本上揭示原子与光子作用的动力学过程,并揭示出一系列的量子本性。腔量子电动力学能够深入地解释光与物质作用的基本问题,是光学微腔的理论基础,同时光学微腔又能为腔量子电动力学提供最好的实验验证。

光子晶体微腔具有传统光学微腔所不及的光限制能力,高的 Q 值,使得光子晶体微腔在腔量子电动力学领域有很重要的应用。光子晶体结构中一个点缺陷可以定义为一个光子晶体微腔,注入微腔中特定频率的光子不能逃离腔体。光子晶体微腔与植入腔体的量子系统有很强的耦合。研究量子系统与光子晶体微腔的耦合作用,能够更深入地了解一些腔体量子电动问题^[43],如单原子激光器光谱、量子点嵌入光子晶体微腔、低阈值激光

器、强非线性光学问题等。

3.10 光子晶体偏振器

当二维光子晶体中 TE/TM 模式光子能带结构不同, 并且其光子带隙的位置互相错开时, 光子晶体可以用作偏振器^[44]。传统的偏振器由于其自身的局限性——一方面, 只能对很小的频率范围或某一入射角度范围有效; 另一方面, 其体积也相对比较大, 不容易实现光学集成。然而采用二维光子晶体来制作的偏振器可以在很大的频率范围内工作, 并且其体积很小, 很容易在 Si 片上集成或直接在 Si 基上制成, 因而光子晶体偏振器也引起了科学家们的广泛关注。

3.11 量子信息处理方面的应用

纠缠光子对 (Entangled Photon Pairs) 在量子信息处理领域有极其重要的地位, 如何产生纠缠光子引起了大量科学工作者的关注。在非线性晶体 (β -Barium-Borate, BBO) 中通过自发参量下转换 (Parametric Down Conversion) 产生光子对, 是一种最为成熟的产生纠缠光子的方法。基于上述方法, 在理论和实验上, 实现了两光子纠缠和多光子纠缠。尽管该方法从实验上已经被证实是一种成熟有效的方法, 但是如何提高产生效率并比较方便地实现光学芯片集成仍然是一个很大的挑战。

近来, 科学工作者提出了通过光子晶体高效率产生纠缠光子对的方法^[45]。该方案与利用周期性极化材料中通过四相匹配产生纠缠光子的方案有本质上的不同。将二阶非线性极化率材料 (如 GaAs 或 GaP) 加入光子晶体周期性结构中, 这些半导体材料一方面很容易实现光集成, 更重要的是它们的二阶非线性极化率比传统 BBO 晶体要高两个数量级^[46]。因此, 非线性光子晶体能够高效率地产生光子对并很有希望成为重要的纠缠光子源 (Sources of Photon Pairs)。理论上预言, 非线性光子晶体的纠缠光子对产生率要比传统非线性块体材料增强几百到几千倍^[45,47]。因此, 非线性光子晶体能够在量子信息领域发挥重要作用。

4 结 语

尽管光子晶体的研究还处于起步阶段, 光子晶体的制备还受制于半导体制备工艺的限制, 人为引入特定缺陷手段方法还比较单一, 但相信随着现代制造工艺特别是 3D 打印制造技术的发展, 光子晶体制备技术会越来越精湛, 光子晶体设计会得到很大的发展。光子晶体在传感器的应用, 使其有可能应用于无线传感网络, 进而推动物联网的发展, 掀起信息技术的革命。今后的研究应着重以下两点: ①提高光子晶体传感器的重复使用率, 器件灵敏度以及对环境参数的响应能力。②拓展光子晶体的应用领域, 使光子晶体应用研究跟上理论研究

的步伐, 使光子晶体材料大规模走向实际应用。以上问题都是光子晶体在应用领域大规模应用所必须解决的技术难题。

参考文献 References

- [1] Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987 (58): 2 059 - 2 062.
- [2] John S. Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 1987 (58): 2 486 - 2 489.
- [3] Xu Shaohui (徐少辉), Ding Xunmin (丁训民), Zi Jian (资剑), et al. 电子体系与光子体系 [J]. *Physics (物理)*, 2002 (9): 558 - 567.
- [4] Zhang Youjun (张友俊), Ji Bo (姬波), Wang Xiangqian (王向前), et al. 光子晶体及其应用 [J]. *Infrared and Laser Engineering (红外与激光工程)*, 2004 (33): 320 - 322.
- [5] Purcell E M. Spontaneous Emission Probabilities at Radio Frequencies [J]. *Physical Review*, 1946 (69): 681 - 681.
- [6] Leclair A. Eigenstates of the Atom Field Interaction and the Binding of Light in Photonic Crystals [J]. *Annals of Physic*, 1999 (271): 268 - 293.
- [7] Veselago V G. Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics USPEKHI*, 1968 (10): 509 - 514.
- [8] Cubukcu E, Aydin K, Ozbay E, et al. Electromagnetic Waves: Negative Refraction by Photonic Crystals [J]. *Nature*, 2003 (423): 604 - 605.
- [9] Parimi P V, Lu W T, Vodo P, et al. Negative Refraction and Left-Handed Electromagnetism in Microwave Photonic Crystals [J]. *Physical Review Letters*, 2004 (92): 127 401 - 1 - 4.
- [10] Christodoulides D N, Lederer F, Silberberg Y. Discretizing Light Behavior in Linear and Nonlinear Waveguide Lattices [J]. *Nature*, 2003 (424): 817 - 823.
- [11] John S, Akozbe N. Nonlinear Optical Solitary Waves in a Photonic Band Gap [J]. *Physical Review Letters*, 1993 (71): 1 168 - 1 171.
- [12] Scalora M, Dowling J P, Bowden C M, et al. Optical Limiting and Switching of Ultrashort Pulses in Nonlinear Photonic Band Gap Materials [J]. *Physical Review Letters*, 1994 (73): 1 368 - 1 371.
- [13] Berger V. Nonlinear Photonic Crystal [J]. *Physical Review Letters*, 1998 (81): 4 136 - 4 139.
- [14] Hache A, Bourgeois M. Ultrafast All-Optical Switching in a Silicon-Based Photonic Crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2000 (77): 4 089 - 4 091.
- [15] Xu P, Ji S H, Zhu S N, et al. Conical Second Harmonic Generation in a Two-Dimensional $\chi^{(2)}$ Photonic Crystal: A Hexagonally Poled LiTaO₃ Crystal [J]. *Physical Review Letters*, 2004 (93): 133 904 - 133 907.
- [16] Mafi A, Moloney J V. Beam Quality of Photonic-Crystal Fibers

- [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005(23): 2 267 – 2 271.
- [17] Samiul Habib M, Selim Habib M, Hasan M I, *et al.* A Single Mode Ultra Flat High Negative Residual Dispersion Compensating Photonic Crystal Fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014(20): 328 – 332.
- [18] Vinod P, Randhir B, Pawan K. Optimized Butt Coupling Between Single Mode Fiber and Hollow-Core Photonic Crystal Fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013(19): 490 – 494.
- [19] Knight J C, Birks T A, Russell P S J. *et al.* All-Silica Single-Mode Optical Fiber with Photonic Crystal Cladding [J]. *Optics Letters*, 1996(21): 1 547 – 1 549.
- [20] Birks T A, Knight J C, Russell P S J. Endlessly Single-Mode Photonic Crystal Fiber [J]. *Optics Letters*, 1997(22): 961 – 963.
- [21] Knight J C, Broeng J, Birks T A, *et al.* Photonic Bandgap Guidance in Optical Fibers[J]. *Science*, 1998(282): 1 476 – 1 478.
- [22] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, *et al.* Single-Mode Photonic Band Gap Guidance of Light in Air [J]. *Science*, 1999(285): 1 537 – 1 539.
- [23] Shephard J D, Roberts P J, Jones, J D C, *et al.* Measuring Beam Quality of Hollow Core photonic Crystal Fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005(24): 3 761 – 3 769.
- [24] Fink Y, Winn J N, Fan S. A Dielectric Omnidirectional Reflector[J]. *Science*, 1998(282): 1 679 – 1 682.
- [25] Ma Z T, Ogusu K. Channel Drop Filters Using Photonic Crystal Fabry-Perot Resonators [J]. *Optics Communications*, 2011(284): 1 192 – 1 196.
- [26] Song W W, Integlia R A, Jiang W. Slow Light Loss Due to Roughness in Photonic Crystal Waveguides: An Analytic Approach[J]. *Physical Review B*, 2010(82): 235 306.
- [27] Zhu N, Ren Q Q, Wang Y G, *et al.* Slow Light in Photonic Crystals Waveguide Constructed with Symmetrically Perturbed Structure[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014(125): 2 616 – 2 619.
- [28] Pruzinsky S A. Two-Photon Polymerization of Defects in Photonic Crystals[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2006.
- [29] Berger V. Nonlinear Photonic Crystal [J]. *Physical Review Letters*, 1998(81): 4 136 – 4 139.
- [30] Janrao N, Janyani V. Nonlinear Performance in Silicon Nitride Slow Light Photonic Crystal Waveguides with Elliptical Holes [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014(125): 3 081 – 3 084.
- [31] Li L, Liu G Q. Photonic Crystal Ring Resonator Channel Drop Filter [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013(124): 2 966 – 2 968.
- [32] Trull J, Martorell J, Vilaseca R. Angular Dependence of Phase-Matched Second-Harmonic Generation in a Photonic Crystal[J]. *JOSA B*, 1998(15): 2 581 – 2 585.
- [33] Kosaka H, Kawashima T, Tomita A, *et al.* Photonic Crystals for Micro Lightwave Circuits Using Wavelength-Dependent Angular Beam Steering [J]. *Applied Physics Letters*, 1999(74): 1 370 – 1 372.
- [34] Painter O, Lee P K, Scherer A, *et al.* Two Dimensional Photonic Band Defect Mode Laser [J]. *Science*, 1999(284): 1 819 – 1 821.
- [35] Zhou W D, Sabarinathan J, Kochman B, *et al.* Electrically Injected Single-Defect Photonic Bandgap Surface-Emitting Laser at Room Temperature [J]. *Electronics Letters*, 2000(36): 1 541 – 1 542.
- [36] Sharma A C, Jana T, Kesavamoorthy R, *et al.* A General Photonic Crystal Sensing Motif: Creatinine in Bodily Fluids [J]. *Journal of American Chemical Society*, 2004(126): 2 971 – 2 977.
- [37] Ross D P, Brian T C, Juan E A. A Photonic Crystal Biosensor Assay for Ferritin Utilizing Iron-Oxide Nanoparticles [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2014(56): 320 – 327.
- [38] Rahmat M, Maulina W, Rustami E, *et al.* Performance in Real Condition of Photonic Crystal Sensor Based NO₂ Gas Monitoring System [J]. *Atmospheric Environment*, 2013(79): 480 – 485.
- [39] Zhao Y, Deng Z Q, Li J. Photonic Crystal Fiber Based Surface Plasmon Resonance Chemical Sensors [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014(330): 135 – 139.
- [40] Safavi-Naeini A H, Painter O. Design of Optomechanical Cavities and Waveguides on a Simultaneous Bandgap Photonic-Photonic Crystal Slab [J]. *Optics Express*, 2010(18): 14 926 – 14 943.
- [41] Akahane Y, Asano T, Song B S, *et al.* High-Q Photonic Nanocavity in a Two-Dimensional Photonic Crystal [J]. *Nature*, 2003(425): 944 – 947.
- [42] Tandraechanurat A, Ishida S, Guimard D, *et al.* Lasing Oscillation in a Three-Dimensional Photonic Crystal Nanocavity with a Complete Bandgap [J]. *Nature Photonics*, 2011(5): 91 – 94.
- [43] Hughes S, Yao P. Theory of light Emission from a Strongly-Coupled Single Quantum Dot Photonic Crystal Cavity System [J]. *Optics Express*, 2009(17): 3 322 – 3 330.
- [44] Solli D R, McCormick C F, Chiao R Y, *et al.* Photonic Crystal Polarizers and Polarizing Beam Splitters [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003(93): 9 429 – 9 431.
- [45] Perina Jr J, Centini M, Sibilia C, *et al.* Properties of Entangled Photon Pairs Generated in One-Dimensional Nonlinear Photonic Band Gap Structures [J]. *Physical Review A*, 2006(73): 033 823.
- [46] Bergfeld S, Daum W. Second-Harmonic Generation in GaAs: Experiment Versus Theoretical Predictions of $X_{xyz}^{(2)}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2003(90): 036 801 – 1 – 4.
- [47] De Dood M J A, Irvine W T M, Bouwmeester D. Nonlinear Crystal as a Source of Entangled Photons [J]. *Physical Review Letters*, 2004(94): 040 504 – 1 – 4.