

光子晶体光纤的研究新进展

余重秀 苑金辉 申向伟

(北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘要 介绍了国内外光子晶体光纤(PCF)研究的新进展,涉及到大负色散 PCF 研究、光子带隙型 PCF 的带隙与模式研究、利用 PCF 的波长可调节有效频率变换、基于 PCF 的可见光波段平坦超连续谱(SC)和高效宽带切伦科夫辐射(CR)的产生等,并介绍了近期在 PCF 相关理论和实验方面研究进展,包括 PCF 的数值分析新方法,极大负色散的 PCF、反共振引导型 PCF(ARG-PCF)和三种高非线性 PCF 的研究与设计,利用所设计的新型 PCF,在实验上实现波长可调节的高效反斯托克斯信号转换,产生了 470~805 nm 范围内的平坦 SC,产生了可见光波段高效和宽带的 CR 等。

关键词 光子晶体光纤;大负色散;光子带隙;频率变换;超连续谱;切伦科夫辐射

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900139

Recent Progress of Study on Photonic Crystal Fiber

Yu Chongxiu Yuan Jinhui Shen Xiangwei

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract The recent studies at home and abroad on photonic crystal fiber (PCF) are introduced, referring to the large negative dispersion PCF, the band-gap and mode characteristics of photonic band-gap PCF, the wavelength-tunable effective frequency conversion, the flat supercontinuum (SC) and the highly effective and broadband Cherenkov radiation (CR). Moreover, the theoretical and experimental achievements on PCF in our laboratory are presented, including the new numerical method for analyzing the PCF, the large-negative-dispersion PCF, the study and design of anti-resonance guiding PCF (ARG-PCF) and three kinds of highly nonlinear PCF, the generations of the highly effective wavelength-tunable anti-Stokes signal, the flat SC from 470 to 805 nm, and the highly effective and broadband CR at visible wavelength.

Key words photonic crystal fiber; large negative dispersion; photonic band-gap; frequency conversion; supercontinuum; Cherenkov radiation

OCIS codes 060.2270; 060.4370; 060.5295

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)是在现代光纤技术的基础上兴起的一个新研究领域,由于它的包层中二维光子晶体结构能够以从前没有的特殊方式控制纤芯中的光波,使其具有诸多优异的光学特性,如无截止单模传输特性、可调节的色散特性、高双折射特性、大模面积和高非线性特性等,因此 PCF 的研究一直是光通信和光电子领域科学家们关注的热点。从 1991 年 Russell 等提出 PCF 的概念和 1996 年制备

出首根 PCF 至今,PCF 也从最初的理论研究转向理论和应用并重的阶段。它的研究与应用不仅可产生新型的全光网络通信和全光信号处理器件,而且为“器件集成化”提供了有效的解决方案。本文主要介绍国内外对大负色散的 PCF 研究、光子带隙型 PCF 的带隙与模式研究、PCF 的波长可调节高效频率变换、基于 PCF 的可见光波段平坦超连续谱(SC)和高效宽带切伦科夫辐射(CRs)的产生等以及本课题组光子晶体光纤研究新进展。

收稿日期: 2011-08-02; **收到修改稿日期**: 2011-08-15

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327605)和北京邮电大学优秀博士生基金(CX201023)资助课题。

作者简介: 余重秀(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光信息处理、光电子技术及其应用等方面的研究。

E-mail: cxyu@bupt.edu.cn

2 大负色散的 PCF 研究

光纤通信系统中无中继传输距离的两个主要限制因素是光纤的损耗和色散。随着掺铒光纤放大器(EDFA)的出现,其在石英光纤的最低损耗窗口(1550 nm 波段)的优异性能使得传输光功率的损耗得到了有效的补偿。这样,色散则成为对光纤通信系统尤其是高速宽带通信系统的主要制约因素。现有的色散管理技术包括采用色散补偿光纤(DCF)、啁啾光纤光栅、频谱反转和正负色散位移光纤交替传输等技术,而 DCF 技术适合长距离补偿,而且其具有可控的色散补偿量、足够大的带宽和与波分复用(WDM)兼容等优点,因而实际中常采用 DCF 进行色散补偿。人们通过掺杂折射率的办法,设计了 W 型和多包层型 DCF,但这些 DCF 的补偿能力只能达到 $-100 \sim -300 \text{ ps} \cdot (\text{km}/\text{nm})^{-1}$,而且具有较大损耗。

PCF 在色散补偿方面具有显著的优势。从 1998 年 Birks 等^[1]提出用 PCF 来进行色散补偿的设想以后,人们对 PCF 的色散补偿特性进行了大量的理论与实验研究。截止目前,色散补偿 PCF 的设计主要是通过改变包层孔的大小和排列顺序,或者通过掺杂纤芯来实现。由于很容易实现极大的负色散,特别是混合包层的双层芯 PCF(DCCPCF)的研究引起了人们的极大关注。研究表明,混合包层 DCCPCF 的结构参数和外芯中填充介质的有效折射率对内芯和外芯区之间的模式耦合特性有着重要影响,完全的模式耦合是形成大负色散的内在机理;DCCPCF 的泄露模耦合是引起大负色散的主要因素,Roberts 等^[2]展示了内芯基模和外芯缺陷模在反共振点之间的耦合。Renversez 等^[3]分析了反共振光波导中的模式耦合特性。Zhang 等^[4]研究了混合包层的 DCCPCF 中泄露模的耦合对损耗的依赖特性,分析了有效折射率的虚部在模式耦合过程中的关键作用。Huttunen 等^[5]研究高掺杂内芯的 DCCPCF,得到的高阶模色散值达到了 $-55000 \text{ ps} \cdot (\text{km}/\text{nm})^{-1}$ 。Zhang 等^[6]报道了在高填充外芯的 DCCPCF 中,基模的色散值达到了 $-36000 \text{ ps} \cdot (\text{km}/\text{nm})^{-1}$ 。

3 光子带隙型 PCF 的带隙与模式研究

光子带隙型 PCF(PBGPCF)的包层结构具有严格的周期性,它不同于折射率引导型 PCF,主要依靠光子带隙效应控制光子运动和导光,即位于光频率带隙范围内的光波才可以纵向传输,它是真正意义上的

PCF。目前所报道的 PBGPCF 一般可分为空芯(Hollow-core)PCF(HC-PCF)和反共振引导型(Anti-resonance guiding)PCF(ARG-PCF)^[7~11]。

HC-PCF 带隙的形成主要基于不同包层结构的共振效应,依靠多重布拉格散射效应传导光能量。自从 Cregan 等^[12]论述了真正能够实现光在空芯中传输的 PBGPCF 以来,HC-PCF 的研究已经取得了很大进展。Bouwman 等^[13]实验分析了 HC-PCF 在 850 nm 处的导模特性。Konorov 等^[14]讨论了 HC-PCF 中可见光波段的动态传输过程。Couny 等^[15]研究了 HC-PCF 中带隙的形成机理,给出了导模和包层模之间的关系,并指出不同的包层结构尤其是间隙节点对带隙的位置和导模的存在形式具有重要影响。ARG-PCF 的导光机理可利用平面波导的散射理论来解释。Litchinister 等^[16]理论研究了反共振反射光波导(ARROW)的带隙和模式特性。Birks 等^[17]利用一种近似理论分析了 ARROW 中带隙的形成机制,并展示了包层中高折射率柱对光能量的限制类似于单个平面波导的散射效应。由于具有低损耗、低色散和低非线性等特性,HC-PCF 在高功率光波能量传输、超短光脉冲的色散与非线性传输控制和光与物质的非线性相互作用等方面具有极大的应用潜力。而 ARG-PCF 的包层孔中填充介质的折射率可以灵活调节,使其传输光波对介质的光学特性(如吸收和温敏特性等)较为敏感,它在传感器件方面具有潜在的应用前景。

4 基于 PCF 的波长可调节高效频率变换

PCF 的出现为非线性光学研究打开了一个新局面,它的可控色散和增强非线性特性使得激光脉冲工作于不同的色散区域,并实现一系列显著的非线性效应,如自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)等。自从首次在 PCF 中利用 FWM 效应产生新频率的信号光以来^[18],PCF 中基于相位匹配(PM)的 FWM 被广泛应用于频率变换^[19~27]。所产生的短波长辐射源在超快光子学、分子生物学、原子物理、光学精密测量和高分辨率图像处理等领域中具有重要的潜在应用。

Dudley 等^[25]研究了 PCF 中高阶模的 FWM 过程中的相位匹配现象,得到了 LP_{01} 和 LP_{11} 模的色散曲线,由拉曼和参量效应决定 SC 的产生和扩展,所产生的 SC 宽度与参量过程的相位匹配宽度相等。

Akimov 等^[26]首次实现了高阶模的反斯托克斯信号转换,产生的反斯托克斯信号在 520~530 nm 之间,反斯托克斯信号与残余抽运成分的最大比率为 1.7。王伟等^[27]利用二阶模在双零色散点 PCF 中实现了有效的信号转换,200 fs 的抽运脉冲工作在 820,830 和 840 nm,在 550 nm 附近产生的反斯托克斯信号与残余抽运成分之比为 1.03。

胡明列等^[28]实验研究了多模光纤中的矢量非线性光学过程,并依据相位匹配条件控制基模和二阶模的频率转换过程。在常规 PCF 中,抽运能量更易耦合进入高阶模,通过合理设计光纤结构,可将光纤基模的零色散波长移至抽运脉冲工作波长附近,这样利用基模也可以实现有效的信号转换^[29]。而相对于高阶模,不仅抽运能量更容易耦合进入基模,且其具有较好的输出光束质量。

5 基于 PCF 的可见光波段平坦 SC 和高效宽带切伦科夫辐射的产生

PCF 中 SC 产生(SCG)是一个复杂的非线性光学过程。SPM, XPM, FWM, 拉曼孤子频移(RSSFS)及在可见光波段产生的蓝移色散波(DW)或 CRs 等一系列非线性效应的综合作用导致了频谱的展宽。SC 的产生是这些效应综合作用的结果,它在生物医学和高精度频率测量等方面具有重要的应用,是当前国内外研究的热点。2000 年,Ranka 等^[30]利用蓝宝石激光器输出的短脉冲,经由一段 75 cm 的 PCF 传输后,首次观察到 400~1600 nm 的 SC。Yamamoto 等^[31]于 2003 年利用 2.2 ps, 40 GHz 光脉冲和一段 200 m 的保偏色散平坦 PCF,在 1.55 μm 波长区域获得了形状对称的超连续谱。Coen 等^[32]研究发现,当输入脉冲宽度为纳秒或皮秒量级时,SC 的产生主要由于受激拉曼散射(SRS)和 FWM,可忽略 SPM 的影响。当工作在光纤正常色散区的脉冲宽度为飞秒量级时,频谱的展宽主要由于 SPM;当飞秒脉冲工作在零色散波长附近的反常色散区时,由 SPM 和反常色散综合作用形成高阶孤子(HOS),在传输过程中,HOS 和 FWM 被认为是导致频谱展宽的主要原因。当输入脉宽较宽时, N 阶孤子裂变为 N 个具有不同中心波长的基孤子(FS),每个 FS 会在短波段产生满足波矢匹配的 DW,同时 XPM 和 FWM 的作用使得展宽的光谱变得较平坦。Tartara 等^[33]研究了当抽运工作在零色散波长附近时,SCG 过程中三次谐波的产生。Cristiani 等^[34]研究了当

飞秒脉冲在 PCF 的反常色散区工作时,由孤子效应产生的 CR 现象,当抽运脉冲的工作波长逐渐偏离光纤的零色散波长时,孤子逐渐向长波方向移动,所产生的 CR 也逐渐向短波方向移动。Chang 等^[35]基于孤子自频移效应,研究了抽运脉冲参数(如输入能量等)对产生高效和宽带 CR 的影响。

从 PCF 中首次观测到 SCG 至今,大量的理论和实验工作主要涉及到分析不同阶模式和不同抽运工作条件下的 SCG。Wadsworth 等^[36]研究了无限单模截止的 PCF 中 SCG。Cherif 等^[37]分析了高阶模中 SCG 的动态过程。相对于高阶模,虽然利用基模产生 SC 的过程中,小于截止波长时损耗会显著增加,但基模具有较好的光束质量和较低的传输损耗,利用其可产生平坦的 SC,且可抑制信号传输过程中的噪声干扰,进而改善长距离传输系统的稳定性^[38~40]。

6 本课题组在 PCF 研究上的新成果

针对国内外的 PCF 最新研究,深入研究了 PCF 的色散、带隙和非线性特性,开展了相关的应用研究,并希望在进一步理解 PCF 的新颖光学特性和开发其应用方面能够产生一定作用。由于篇幅所限,主要研究成果(详见参考文献[41])仅能做一简要介绍:

1) 基于 PCF 各包层有效折射率的差异,提出了可用于分析多包层 PCF 的包层环等效的有效折射率法,此法可数值分析不同包层结构的 PCF 的色散、模式截止和非线性特性。与其他数值方法相比,它可准确地分析具有复杂多包层结构的 PCF,不需要计算包层区域中每个空气孔附近的电磁场分布情况,也不需要考虑区域场之间复杂的电磁边界条件,从而使计算时间极大地缩短。这对快速而准确地设计和分析复杂多包层结构 PCF 具有实际意义。

2) 理论研究了 DCCPCF 中的完全模式耦合特性,当相位和损耗匹配被同时满足时,内芯基模和外芯缺陷模将在反共交波长处因发生完全耦合而出现传输特性的交替。通过推导内芯基模与外芯缺陷模的等效传输常数,并将两种模式的等效传输常数的实部和虚部进行对比,来判断完全的模式耦合是否发生,这将为实际设计中准确预测此种 DCCPCF 的色散和模式特性提供指导。通过恰当调节 PCF 的参数,使任意的外芯缺陷模能被选择与内芯基模发生完全耦合,从而实现极大的负色散,并设计了基于完全模式耦合特性的 1.55 μm 波段极大负色散光纤;综合

考虑色散和非线性效应,设计的 $1.55 \mu\text{m}$ 波段对色散和色散斜率进行同时补偿色散补偿光纤,其最大色散值 D_{max} 达到了 $-39500 \text{ ps} \cdot (\text{km}/\text{nm})^{-1}$,可有效抑制通信光纤链路中由一系列非线性效应引起的脉冲劣化。

3) 从理论和实验上研究了 HC-PCF 的带隙和模式特性,对带隙形成中包层间隙节点的分析揭示了第一布里渊区中倒格矢空间的不同对称点对带隙上、下边界的形成具有的不同作用,间隙孔的存在将使带隙的位置向短波段方向发生移动,实验中对传输谱和输出模场的观测验证了此分析结论。理论设计了工作在近红外波段的一种 ARG-PCF,应用等效平面波导理论,推导了此种 ARG-PCF 中导模的截止方程,并分析了模式的共振和反共振波特特性,从而为开展此类带隙型光纤器件的应用研究提供依据。

4) 设计了三种高非线性 PCF,利用它们的基模和二阶模,基于相位匹配的简并 FWM,在实验上实现了波长可调节的高效反斯托克斯信号转换。利用第一种 PCF 在 $535 \sim 603 \text{ nm}$ 的波长范围内产生的反斯托克斯信号转换效率高达 42% 。利用第二种 PCF 通过分别改变抽运脉冲的工作波长(位于正常和反常色散区)和功率,产生了 46% 的信号转换效率,其信号与残余抽运成分的功率之比达到 $22.6:1$,这是当前利用基模实现短波段频率变换的最大比率和最高转换效率。利用第三种 PCF 同时改变抽运脉冲的工作波长和功率,实现的反斯托克斯信号转换效率为 36% ,其信号与残余抽运成分的功率之比达 $5:1$ 。通过分析实验过程及抽运脉冲的工作波长和功率对信号转换的影响等,展示了所涉及的 SPM, FWM 和 XPM 等非线性光学效应,这将有助于超快光子学中新型光器件的研究与应用。

5) 基于中心抽真空法制备了一种带中心孔的 PCF,实验产生了 $470 \sim 805 \text{ nm}$ 范围内的平坦 SC,它作为宽带光源可用于可见光通信系统。使用大于 100 fs 的短脉冲在靠近高非线性 PCF 基模零色散波长的反常色散区抽运,基于拉曼孤子红移至 2000 nm 后,产生了转换效率高达 31% 和带宽为 54 nm 的可见光波段 CR,这是获取短波段信号源的有效途径之一。

7 结 论

PCF 作为新一代优异的光学介质,在非线性光学、光纤通信和全光器件等方面具有广泛的应用前

景。世界各国对 PCF 的研究如火如荼,在 PCF 的色散、带隙、非线性特性及应用方面均有了长足进展。PCF 的大负色散实现了 $-55000 \text{ ps} \cdot (\text{km}/\text{nm})^{-1}$ 的高阶模色散值、 $-36000 \text{ ps} \cdot (\text{km}/\text{nm})^{-1}$ 的基模色散值。对光子带隙型 PCF 的带隙与模式研究,有助于解决光波的非线性传输控制和光与物质的非线性相互作用等问题。利用 PCF 及其非线性效应,实现了波长可调节且高效的频率变换、可见光波段平坦 SC 和高效宽带 CR 的产生等。本文还介绍了本实验室对 PCF 特性及应用的研究现状,同时分析和总结了国内外 PCF 的最新研究进展,以便挖掘 PCF 的更多优异特性并开拓其更广泛的应用领域。

参 考 文 献

- 1 T. A. Birks, D. Mogilevtsev, J. C. Knight *et al.*. Dispersion compensation using single-material fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 674~676
- 2 P. J. Roberts, B. J. Mangan, H. Sabert *et al.*. Control of dispersion in photonic crystal fibers [J]. *J. Opt. Fiber. Commun.*, 2005, **2**(12): 435~461
- 3 G. Renversez, P. Boyer, A. Sagrini. Antiresonant reflecting optical waveguide microstructured fibers revisited: a new analysis based on leaky mode coupling[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(12): 5682~5687
- 4 Z. H. Zhang, Y. F. Shi, B. M. Bian *et al.*. Dependence of leaky mode coupling on loss in photonic crystal fiber with hybrid cladding [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 1915~1922
- 5 A. Huttunen, P. Törmä. Optimization of dual-core and microstructure fiber geometries for dispersion compensation and larger mode area [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(2): 627~635
- 6 Z. H. Zhang, Y. F. Shi, B. M. Bian *et al.*. Larger negative dispersion in dual-core photonic crystal fibers based on optional mode coupling [J]. *IEEE photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(16): 1402~1404
- 7 A. Cerqueira, F. Luan, C. M. B. Cordeiro *et al.*. Hybrid photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(2): 926~931
- 8 P. J. Roberts, D. P. Williams, B. J. Mangan *et al.*. Realizing low loss air core photonic crystal fibers by exploiting an antiresonant core surround [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(20): 8277~8285
- 9 A. Fuerbach, P. Steinvurzel, J. A. Dolger *et al.*. Nonlinear pulse propagation at zero dispersion wavelength in anti-resonant guiding photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 2977~2987
- 10 G. Bouwmans, L. Bigot, Y. Quiquempois *et al.*. Fabrication and characterization of an all solid 2D photonic bandgap fiber with a low-loss region ($< 20 \text{ dB}/\text{km}$) around 1550 nm [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(21): 8452~8459
- 11 J. H. Yuan, X. Z. Sang, C. X. Yu *et al.*. Theoretical investigation of band-gap and mode characteristics of anti-resonance guiding photonic crystal fibres [J]. *Chin. Phys. B*, 2011, **20**(2): 024213
- 12 R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. *Science*, 1999, **285**(5433): 1537~1539
- 13 G. Bouwmans, F. Luan. Properties of a hollow-core photonic bandgap fiber at 850 nm wavelength [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(14): 1613~1620

- 14 S. O. Konorv, V. P. Mitrokhin, A. B. Fedotov *et al.*. Laser ablation of dental tissues with picosecond pulses of 1.06 m radiation transmitted through a hollow-core photonic-crystal fiber [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(11): 2251~2256
- 15 F. Couny, F. Benabid, P. J. Roberts *et al.*. Identification of Bloch-modes in hollow-core photonic crystal fibers cladding [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 325~338
- 16 N. M. Litchinitser, S. C. Dunn, B. Usner *et al.*. Resonances in microstructured optical waveguides [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(10): 1243~1251
- 17 T. A. Birks, G. J. Pearce, D. M. Bird. Approximate band structure calculation for photonic bandgap fibres [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9483~9490
- 18 J. E. Sharping, M. Fiorentino, A. Coker *et al.*. Four-wave mixing in microstructure fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(14): 1048~1050
- 19 T. Sloanes, K. McEwan, B. Lowans *et al.*. Optimisation of high average power optical parametric generation using a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(24): 19724~19733
- 20 S. O. Konorov, D. A. Akimov, A. A. Ivanov *et al.*. Anti-Stokes generation in guided modes of photonic-crystal fibers modified with an array of nanoholes [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2004, **1**(8): 402~405
- 21 T. T. Yang, C. Shu, C. Lin. Depolarization technique for wavelength conversion using four-wave mixing in a dispersion-flattened photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(14): 5409~5415
- 22 S. Asimakis, P. Petropoulos, F. Poletti *et al.*. Towards efficient and broadband four-wave-mixing using short-length dispersion tailored lead silicate holey fibers [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 596~601
- 23 L. Provino, J. M. Dudley, H. Maillotte *et al.*. Compact broadband continuum source based on microchip laser pumped microstructured fibre [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(9): 558~560
- 24 J. H. Yuan, X. Z. Sang, C. X. Yu *et al.*. Anti-Stokes signal conversion in the higher-order modes of photonic crystal fiber [J]. *J. Optoelectron. Adv. Mater.-Rapid Commun.*, 2010, **4**(1): 23~27
- 25 J. M. Dudley, L. Provino, N. Grossard *et al.*. Supercontinuum generation in air-silica microstructured fibers with nanosecond and femtosecond pulse pumping [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 765~771
- 26 D. A. Akimov, E. E. Serebryannikov, A. M. Zheltikov *et al.*. Efficient anti-Stokes generation through phase-matched four-wave mixing in higher-order modes of a microstructure fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(20): 1948~1950
- 27 W. Wang, F. Gao, L. T. Hou *et al.*. Anti-Stokes line in an index-guiding photonic crystal fibre with two zero-dispersion wavelengths [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(6): 2055~2057
- 28 M. L. Hu, C. Y. Wang, Y. J. Song *et al.*. Mode-selective mapping and control of vectorial nonlinear-optical processes in multimode photonic-crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3): 1189~1198
- 29 J. H. Yuan, X. Z. Sang, C. X. Yu *et al.*. Highly efficient wavelength-tunable anti-Stokes signal conversion of femtosecond pulses in the fundamental mode of photonic crystal fiber [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2010, **46**(5): 728~733
- 30 J. K. Ranka, R. S. Windeler, A. J. Stentz. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 25~27
- 31 T. Yamamoto, H. Kubota, S. Kawanishi *et al.*. Supercontinuum generation at 1.55 m in a dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(13): 1537~1540
- 32 S. Coen, A. H. L. Chau, R. Leonhardt *et al.*. White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(17): 1356~1358
- 33 L. Tartara, I. Cristiani, V. Degiorgio. Blue light and infrared continuum generation by soliton fission in a microstructured fiber [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **77**(2): 307~311
- 34 I. Cristiani, R. Tediosi, L. Tartara *et al.*. Dispersive wave generation by solitons in microstructured optical fibers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(1): 124~135
- 35 G. Q. Chang, L. J. Chen, F. X. Kärtner. Highly efficient cherenkov radiation in photonic crystal fibers for broadband visible wavelength generation [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(14): 2361~2363
- 36 W. Wadsworth, N. Joly, J. C. Knight *et al.*. Supercontinuum and four-wave mixing with Q-switched pulses in endlessly single-mode photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(2): 299~309
- 37 R. Cherif, M. Zghal, L. Tartara *et al.*. Supercontinuum generation by higher-order mode excitation in a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 2147~2152
- 38 J. C. Travers, A. B. Rulkov, B. A. Cumberland *et al.*. Visible supercontinuum generation in photonic crystal fibers with a photonic fibers with a 400 W continuous wave fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 14435~14447
- 39 M. H. Frosz, P. M. Moselund, P. D. Rasmussen *et al.*. Increasing the blue-shift of a supercontinuum by modifying the fiber glass composition [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25): 21076~21086
- 40 B. A. Cumberland, J. C. Travers, S. V. Popov *et al.*. Toward visible cw-pumped supercontinua [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(18): 2122~2124
- 41 Yuan Jinhui. Study on Characteristics of Photonic Crystal Fibers and its Applications [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011
- 苑金辉. 光子晶体光纤特性及其应用的研究 [D]. 北京邮电大学, 2011