

光子晶体光纤光栅及其在激光器中的应用

刘学静 毕卫红

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 对近年来国内外光子晶体光纤(PCF)光栅和 PCF 光栅激光器的研究现状按发展进程进行综述。概要叙述 PCF 光栅成栅理论与工艺的研究进展;重点阐述窄线宽单频光纤光栅激光器的研究现状,特别介绍近年来 PCF 光栅激光器的研究成果。

关键词 光子晶体光纤;光纤光栅;激光器

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.020002

Research on Photonic Crystal Fiber Grating and Its Application in Lasers

Liu Xuejing Bi Weihong

(Department of Information Science and Engineering, Yanshan University,
Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract We review the recent research of photonic crystal fiber Bragg grating and photonic crystal fiber grating lasers at home and abroad according to the process of development. The progress in theory and technique of grating formation is briefly introduced. The research status of narrow-linewidth single-frequency fiber grating lasers is emphasized, especially for the PCF grating lasers.

Key words photonic crystal fiber; fiber grating; fiber grating laser

OCIS codes 060.5295; 060.3735; 060.3510

1 引言

光子晶体光纤(PCF)是一种新型光纤,也叫微结构光纤(MOF)或多孔光纤(HF),最早由 Knight 等^[1]于 1996 年研制成功。PCF 通过包层中沿轴向排列的微小空气孔对光进行约束,从而实现光的轴向传输。作为一种新型特种光纤,PCF 因其高非线性、色散可控性、高双折射性、无限单模特性和大单模模场等特点^[2~4],可用于制作各种 PCF 传感器、PCF 激光器、PCF 色散补偿器和 PCF 陀螺仪等光纤器件,在光纤通信、光纤传感、生物医学等领域应用前景广泛^[5~10],这必将推动未来光通信和光电子元件的更新换代。为此,近年来我国大力开展 PCF 基础领域的研究,这些研究使 PCF 技术进入一个新的发展应用阶段。

PCF 光栅在 PCF 上刻制而成,是一种新型的无源光器件。与常规光纤光栅相比,在某些方面具有更加优良的特性:1)二维或多维空间结构,提供了更大的设计自由度(如可做单芯或多芯,空气孔还可加入介质提高对被测参量的敏感性);2)波长调谐范围宽(可达 100 nm 以上);3)低阶包层模不受外界折射率变化影响;4)大的模场面积,可承载更大的光功率,这一点在大功率光纤激光器研究方面尤为重要;5)可进行多参量多功能感测,如流体的流速矢量监测等^[11,12]。

单频光纤激光器以其效率高、阈值低、线宽较窄、可调谐、紧凑小巧、性价比高和易于与光纤系统兼容等众多优点受到普遍关注,是光通信、光传感系统及其他许多应用领域的关键器件。PCF 由于自身独特的结构

收稿日期: 2011-08-19; **收到修改稿日期**: 2011-10-25; **网络出版日期**: 2011-12-23

基金项目: 国家“973”计划(2010CB327801)和河北省自然科学基金(A2009000329)资助课题。

作者简介: 刘学静(1988—),女,硕士研究生,主要从事光纤激光器与传感等方面的研究。E-mail: lxj723@yeah.net

导师简介: 毕卫红(1960—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事光电器件与光纤传感等方面的研究。

E-mail: bwhong@ysu.edu.cn(通信联系人)

特点,使其在实现高功率、高光束质量的激光输出方面有着先天的优势,PCF 光纤激光器有望将输出功率提高一个或几个数量级^[13]。均匀光纤布拉格光栅(FBG)具有优异的选频特点,选用光纤光栅做为光纤激光器腔镜实现选频,容易得到噪声低的稳定、窄线宽的单模激光输出,使得激光器的综合指标得到提升,更具实用性。

本文主要对近年来国内外 PCF 光栅和 PCF 光栅激光器的研究现状按发展进程进行综述,为这方面进一步研究的开展提供参考。

2 PCF 光栅成栅理论与工艺

光纤光栅是在光纤基础上发展而来的一种新型光无源器件。如图 1 所示,它利用光纤材料的光敏性,即外界入射光子和纤芯内锗离子相互作用引起折射率的永久性变化,在纤芯内形成空间相位光栅,其实质作用是在纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤波片或反射镜。利用这一特性可研制出许多性能独特的光纤无源器件。PCF 是一种特殊的光纤,它的包层由规则周期排列着空气孔的石英光纤阵列构成,纤芯则是由一个破坏了包层结构周期性的缺陷构成的,如图 2 所示。光子晶体光纤自 1996 年问世以来,引起了国内外学者的极大关注。该种光纤具有很多普通光纤所没有的奇异特性。自 2002 年起,许多学者对各种 PCF 光栅的制备及特性做了大量研究。

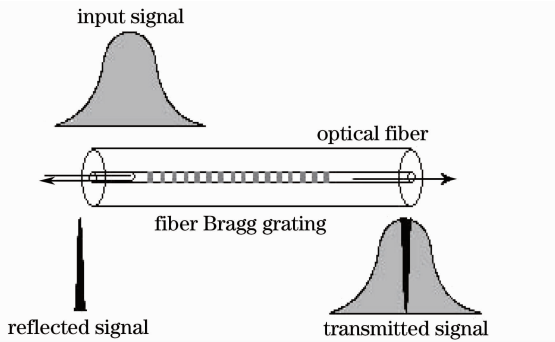


图 1 光纤光栅传光特性示意图

Fig. 1 Light propagation in fiber gratings

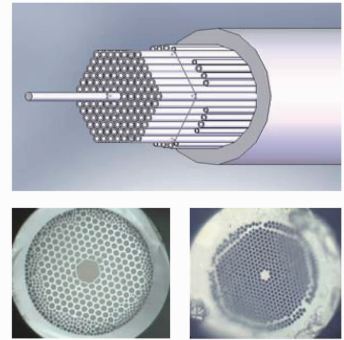


图 2 PCF 结构示意图

Fig. 2 Structure of PCF

2002 年,Kakarantzas 等^[14]在纯硅纤芯的 PCF 上刻写出世界上第一根结构性改变 PCF 光栅。该研究是将 PCF 两端固定,由功率为 20 W 的 CO₂ 激光器发出连续激光束,经反射镜聚焦到光纤上,精确控制激光束对于 PCF 的照射时间和聚焦位置,可使包层空气孔按照设定间距和深度塌缩变形,在光纤轴向形成周期性的结构微扰,造成 PCF 包层折射率的周期性调制,从而形成光栅。

2003 年,Zhu 等^[15]利用此方法在无掺杂 PCF 上写制出长周期 PCF 光栅。Humbert 等^[16]则于 2006 年利用电弧放电法在无掺杂纤芯的 PCF 上成功地写制了 PCF 光栅。

2006 年,Wang 等^[17]利用与 Zhu^[15]同样的办法,在优化了加工参数以后制作出了低插入损耗、低温度敏感性的 PCFG 光栅。实验中 CO₂ 激光器的输出功率为 0.5 W,聚焦光束半峰全宽(FWHM)为 35 μm,激光器扫描的线速度为 2.326 mm/s,脉冲重复频率为 10 kHz,脉冲宽度为 4.1 μs。实验中由于减小了激光器聚焦光斑的直径,在激光光束脉冲逐点写入 PCF 光栅时,可以更精确地控制聚焦光斑在光纤上的位置,因此制作的光栅插入损耗降低至 2 dB。

2007 年,徐玲玲等^[18]也在 PCF 光栅的制备和应用方面进行了开创性的探索,他们利用相位掩模的紫外曝光法在掺锗 PCF 上写制出 FBG,并对 FBG 的应变和传感性能进行了一系列研究。与此同时,刘锐等^[19]指出 PCF 光栅包层模共振引起的损耗峰可与正反向纤芯模耦合引起的损耗峰相比拟,而包层模共振的间隔也比常规光纤光栅的包层模共振间隔要大。他们还给出了 PCF 截面上空气孔的占空比和排布层数对于传输谱影响的规律。

2008 年,Wang 等^[20]又报道了利用 CO₂ 激光脉冲加热的方法在空芯光子带隙光纤上成功地写制出 PCF 光栅。他们在实验中发现随着栅格周期的增加,谐振波长向短波长方向移动,即出现了蓝移现象,这与

普通光纤光栅的情况恰恰相反。该实验中制作的 PCF 光栅具有插入损耗小、3 dB 带宽窄、对温度和折射率不敏感的特性,可以用于消除应变传感测量中温度交叉敏感带来的误差。同年,Wang 等^[21]利用 CO₂ 激光采用非对称方式在光纤上刻写出光栅,他们所使用的激光光斑直径为 35 μm,所成光栅周期为 406 μm,塌缩深度为 17 μm,周期数为 40,在 1520.65 nm 处得到最大 36 dB 的谐振峰。理论方面,他们对这种非对称径向改变所引入的模式损耗和消光特性进行了详细分析计算,并对这种独特的光栅的温度和应力特性进行了分析^[22]。

2009 年, Lee 等^[23]通过在热激法写作过程中施加应力的方法提高了长周期 PCF 光栅的耦合效率。王智等^[24]在 PCF 光栅的理论研究方面做了大量的工作,他们利用紧凑的超格子模型,从理论上研究了具有高双折射的 PCF 中均匀 FBG 的光谱特性,研究了正向传输和反向传输模式之间的耦合规律,并对 PCF 的传输特性进行详细分析。

2010 年, Liu 等^[25]利用飞秒激光沿 PCF 横向钻孔的方法实现了长周期 PCF 光栅的刻写。研究发现通过光纤侧面周期性钻孔也可以成栅,而且实验中仅刻写 9 个周期就使透射峰达到了 40 dB。

在上述制备光栅的方法中,热激法与 CO₂ 激光脉冲加热法写入的光栅技术关键是准确控制能量的大小与写入时间,这种方法写出的光栅具有永久不退化等优点,且设备比较简易,但只能用于制备长周期光纤光栅;利用相位掩模板的紫外曝光法制备光栅的周期取决于相位掩模板,但相位掩模板和紫外光源都很昂贵,此外还需要纤芯具有光敏特性或在写光栅前先做载氢。

2010 年,齐跃峰等^[26,27]对 PCF 的热传递及形变机理、成栅机理与成栅工艺等进行了系统研究,研究证明:通过改变激光能量的变化规律可改变 PCF 成栅截面的温度规律^[26];PCF 光栅的传输特性峰值随周期数先增后减,如图 3 所示。当光纤参数固定时,改变深度改变和周期变化都会改变谐振波长,图 4 是周期分别

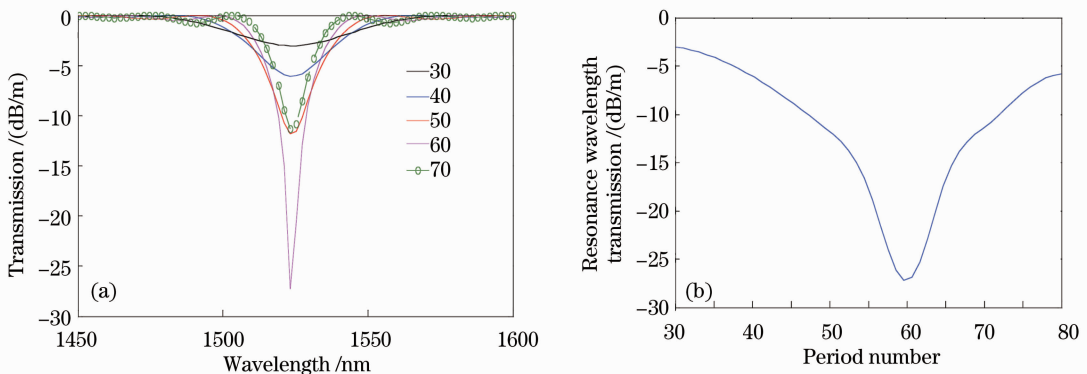


图 3 (a)塌缩深度为 10 μm 时周期数变化对应的的光谱图;(b)谐振波长传输特性随周期数的变化

Fig. 3 (a) Spectra corresponding to different numbers of cycles when the collapse depth is 10 μm; (b) resonance wavelength transmission versus period number

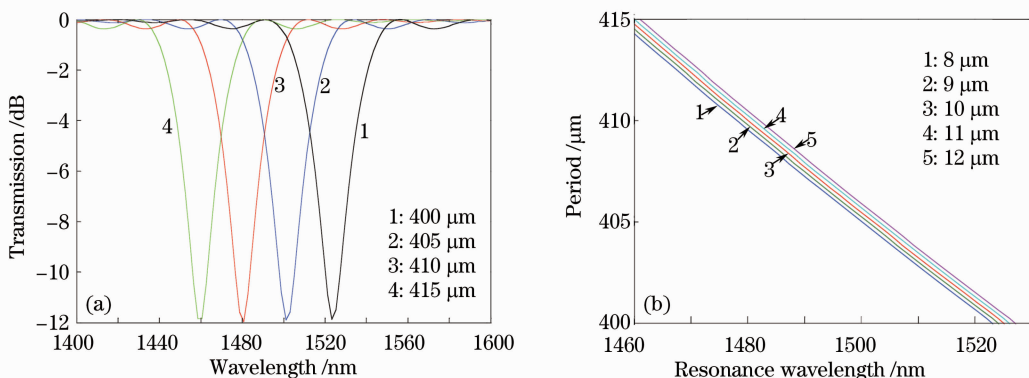


图 4 (a)谐振波长与光栅周期的关系;(b)周期、塌缩深度与谐振波长的关系

Fig. 4 (a) Relation between cycle and resonant wavelength; (b) relation among cycle, collapse depth and resonant wavelength

为 400、405、410、415 μm 时对应的光谱,以及周期、塌缩深度与谐振波长的关系。由图 4(a)可以看出,随着周期的增加,谐振波长出现蓝移;由图 4(b)可以看出,当周期不变时,随着塌缩程度的增加,谐振波长出现红移;当 PCF 中的空气孔增加到一定层数以后,PCF 光栅的谐振峰位置几乎不变,即外层空气孔对其反射谱的影响消失^[28]。

3 窄线宽单频光纤光栅激光器的研究

激光器由谐振腔、增益介质和抽运源三部分构成,其中谐振腔的作用是使光往返反馈振荡;抽运的作用是使粒子数反转,形成光受激辐射条件;增益介质的作用是对产生的激光进行放大。激光器按增益介质分为固体激光器、气体激光器、液体激光器和光纤激光器;光纤激光器按输出特色分类有高功率激光器、常规激光器和窄线宽单频光纤激光器,高功率激光器最大功率已经达到 1.29 MW,而窄线宽单频光纤激光器带宽最小达到 0.5 kHz。高功率光纤激光器研制的关键技术在于光纤中掺杂介质的选择和抽运源功率的大小;窄线宽单频光纤激光器的关键则在于用光纤光栅进行选频的结构设计。

光纤光栅激光器利用光纤光栅的窄带高反射率特性构成光纤反馈腔,即作为激光器的谐振腔,在此基础上依靠掺铒光纤作为增益介质,激光二极管(LD)作为抽运源,形成光纤激光器,如图 5 所示。与普通激光器相比,光纤光栅激光器具有结构简单、性能稳定、输出质量好等特点。利用光纤光栅的滤波特性可制成光纤光栅传感器,根据光栅结构改变和对应反射波长的变化关系,可广泛应用于检测应力、变力、温度等诸多参量的光纤传感器和传感网。

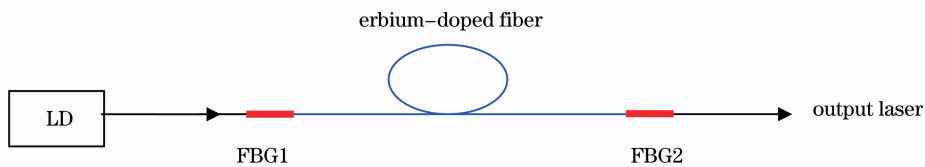


图 5 光纤光栅激光器构成原理图

Fig. 5 Schematic of fiber grating laser

光纤激光器按输出光带宽可分为常规激光器和窄线宽单频光纤激光器,而窄线宽单频光纤激光器作为光纤激光器的一个重要研究方向,在高速光通信、光传感和高精度光谱应用等领域中有很大的发展潜力。利用光纤光栅可构成结构简单的超窄线宽单频光纤激光器,故这里主要介绍单频光纤激光器的发展历程。

1991 年,Ball 等^[29]首次用写入 FBG 光栅的方法实现了单频输出光纤激光器,线宽约为 47 kHz。1992 年,Sabert 等^[30]采用偏振非相干技术得到了 12 kHz 线宽的激光输出。1993 年,Kringlebotn 等^[31]采用 Er/Yb 共掺光纤制作了短腔单频光纤激光器,腔长 10 cm,以二向色镜和光纤光栅为端反射器,自外差方法测量线宽小于 2.5 kHz。1994 年,Horowitz 等^[32]首先在线型形光纤激光器腔内加入一段掺铒光纤饱和吸收体来抑制跳模,获得了 5 kHz 窄线宽激光。1995 年,Cheng 等^[33]报道了环形腔掺铒光纤饱和吸收体窄线宽光纤激光器,得到了线宽为 0.95 kHz 的输出。1997 年,Kurkov 等^[34]采用相移分布反馈式(DFB)光纤光栅与另一个光纤光栅作为频率选择器件和腔反射器,掺铒光纤为增益介质,分别构造了 30、50、90 cm 腔长的单频激光器,测量线宽小于 1 kHz。

2000 年以后,随着高掺杂浓度光纤的制作以及新型传感系统对窄线宽光纤激光器的应用要求,光纤激光器的设计结构更为成熟,逐渐商品化,比如美国 NP Photonics 公司采用短腔 DFB 或分布式布拉格反射(DBR)结构在窄线宽激光输出方面获得了一些重要结果^[35~38],并在市场上推出了线宽小于 2 kHz 的 1550 nm 波长光纤激光器成品(<http://www.npphotonics.com>)。俞本立等^[39]报道了使用掺铒光纤饱和吸收体的光纤环形腔激光器,获得了波长 1539 nm,功率 1 dBm,线宽小于 0.5 kHz 的激光输出。

4 光子晶体光纤光栅激光器的研究

伴随着 PCF 应用技术研究不断深入,高功率双包层光纤激光器获得突飞猛进的发展。目前报道的掺

杂 PCF 激光器主要有掺 Yb^{3+} 、掺 Nd^{3+} 和掺 Er^{3+} 三种 PCF 激光器,其中最多的是掺 Yb^{3+} 的 PCF 激光器^[11]。近年来,国内国外都在研究这种新型的 PCF 光栅激光器,它的主要特点是根据 PCF 参数的不同可得到不同性能(输出波长和功率)的激光器。

4.1 国外光子晶体光纤光栅激光器的研究

2000 年,Wadsworth 等^[40]用 Ti 蓝宝石激光器(波长 970 nm)抽运一段 81 mm 长的掺 Yb^{3+} PCF,观察到了波长为 1040 nm 的激光输出,标志着第一台 PCF 激光器问世。2001 年,Wadsworth 等^[41]报道了第一台大模面积掺 Yb^{3+} PCF 激光器,当抽运光为 1.03 W 时得到了波长 1040 nm 处 315 mW 的单模激光输出。2003 年,Wadsworth 等^[42]报道了利用大模面积空气包层 PCF 研制的高功率 PCF 激光器,实现单横模运转。同年,德国和丹麦的科研人员共同报道了输出波长 1070 nm,输出功率达到 80 W,斜率效率为 78% 的高功率双包层 PCF 激光器^[43]。

2005 年,Limpert 等^[44]用 Yb^{3+} 掺杂 PCF 实现主振荡功率放大(MOPA)脉冲激光输出,光束质量因子 $M^2 < 3$,峰值功率 1.1 MW,平均功率 10.2 W。2006 年,Limpert 等^[45]报道了利用 0.58 m 的光纤在 425 W 的抽运功率下,获得 320 W 连续单模的激光输出,斜率效率为 78%,相当于 1 m 光纤产出 550 W 激光功率。2007 年,丹麦 Photonic Crystal Fiber 公司制备出双包层 Yb^{3+} 掺杂光纤,单根光纤的连续输出功率已达到 2.5 kW^[46]。2008 年,Schmidt 等^[47]报道了一种 Yb^{3+} 掺杂单横模棒状 PCF 激光器,输出功率高达 163 W。

4.2 国内光子晶体光纤光栅激光器的研究

国内 PCF 激光器的研究起步稍晚。由于 PCF 研制技术等方面的限制,国内的研究限于中低功率的 PCF 激光器,并且大多采用进口的 PCF^[11]。

2004 年,阮双琛等^[48]采用多模大功率 972 nm 半导体激光器抽运 20 m 掺 Yb^{3+} 双包层 PCF,获得了 1.09 μm ,功率为 2.2 W 的激光输出。同年,他们再次采用多模大功率 980 nm 半导体激光器抽运 20 m 掺 Yb 双包层 PCF,将输出功率提升至 15 W^[49]。

2005 年,张炜等^[50]报道了一种新型的、具有大模面积的掺 Yb^{3+} 双包层 PCF 激光器。光纤的长度约为 5 m,输出激光的中心波长为 1068.7 nm,激光最大输出功率为 4.26 W。

2009 年,林伟欣等^[51]以中心波长 976 nm、输出功率 70 W 的半导体激光器作为抽运源,掺铽双包层保偏 PCF 为增益介质,采用法布里-珀罗(F-P)光学谐振腔结构,利用后向抽运,实现了波长约 1040 nm、最大功率 5.3 W 的激光输出。王建明等^[52]在实验中选择了吸收系数为 1.45 dB/m 的掺 Yb^{3+} 双包层 PCF 作为增益介质,在抽运光功率为 560 W 时,获得了 428.5 W 的高功率单模连续输出,斜率效率为 76.5%,光束质量因子 $M^2 < 1.2$ 。杨林等^[53]利用 F-P 谐振腔实验研究了高功率掺 Yb^{3+} PCF 激光器。使用 915,976 nm 两种波长的抽运源进行双端抽运,在 23 m 长的双包层 PCF 中获得了 552 W 的连续单模激光输出。该激光器的斜率效率约为 76%,光-光转换效率为 56%,光谱中心波长为 1078 nm,光束质量因子 $M^2 = 1.2$ 。

2010 年起,燕山大学特种光纤与光纤传感河北省重点实验室开展了用于研制高功率光纤激光器所需的掺杂 PCF 和超窄带 PCF 激光器的研究,目前正在实验室实现了带宽为 0.01 nm 的超窄带 PCF 激光器。

综上所述,近年来 PCF 激光器将 PCF 光栅与光纤激光器技术相结合,利用光纤光栅构成激光器谐振腔,实现窄线宽单频高功率光纤激光器,从而为窄线宽单频高功率光纤激光器的实现提供了一种新的手段。

5 结束语

近年来,各国研究人员在光纤激光器的研究方面做了大量工作,并取得了大量的研究成果。未来的发展趋势主要集中在超大功率激光器和超窄带激光器的研究上。人们在研究新的材料或新的结构以使超大功率激光器输出功率更高、超窄带激光器的带宽更窄,并对环境干扰有自免疫能力,以满足特殊应用需要。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 Philip Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362

- 3 S. Yang, Y. Zhang, L. He *et al.*. Broadband dispersion-compensating photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(19): 2830~2832
- 4 P. Petropoulos, T. M. Monro, W. Belardi *et al.*. 2R-regenerative all-optical switch based on a highly nonlinear holey fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(16): 1233~1235
- 5 J. T. Moeser, N. A. Wolchover, J. C. Knight *et al.*. Initial dynamics of supercontinuum generation in highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(4): 391~393
- 6 M. C. P. Huy, G. Laffont, V. Dewynter *et al.*. Tilted fiber Bragg grating photowritten in microstructured optical fiber for improved refractive index measurement [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(22): 10359~10370
- 7 H. L. Ho, Y. L. Hoo, W. Jin *et al.*. Optimizing microstructured optical fibers for evanescent wave gas sensing [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, **122**(1): 289~294
- 8 P. J. A. Sazio, A. Amezcua-Correa, C. E. Finlayson *et al.*. Microstructured optical fibers as high-pressure micro-fluidic reactors [J]. *Science*, 2006, **311**(5767): 1583~1586
- 9 Duan Dewen, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. A miniature extrinsic Pabry-Perot interferometer strain sensor based on hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 17~20
段德稳, 朱涛, 饶云江等. 基于空芯光子晶体光纤的微小型非本征光纤法布里珀罗干涉应变传感器 [J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 17~20
- 10 Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. High power femtosecond laser with large-mode photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1603~1606
王清月, 胡明列, 宋有建等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光 [J]. 中国激光, 2007, **34**(12): 1603~1606
- 11 Lingling Ji, Peixiang Lu, Wei Chen *et al.*. Polarization-dependent blue-shifted emissions in microstructure fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(4): 640~643
- 12 Yin Wang, Wei Zhang, Yidong Huang *et al.*. Stimulated Brillouin scattering slow light in high nonlinearity silica microstructure fiber [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2009, **15**(1): 1~4
- 13 Xia Changming, Zhou Guiyao, Hou Lantian *et al.*. Yb³⁺-doped photonic crystal fiber laser research [J]. *Optical Communication Technology*, 2008, **32**(12): 8~10
夏长明, 周桂耀, 侯蓝田等. 掺 Yb³⁺ 光子晶体光纤激光器的研究进展 [J]. 光通信技术, 2008, **32**(12): 8~10
- 14 G. Kakarantzas, T. A. Birks, P. St. J. Russell. Structural long-period gratings in photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(12): 1013~1015
- 15 Yinian Zhu, P. Shum, Hin-Joo Chong. Strong resonance and a highly compact long-period grating in a large-mode-area photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(16): 1900~1905
- 16 G. Humbert, A. Malki, S. Fevrier *et al.*. Electric arc-induced long-period gratings in Ge-free air-silica microstructure fibres [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(4): 349~350
- 17 Y. P. Wang, L. M. Xiao, D. N. Wang *et al.*. Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(23): 3414~3415
- 18 Xu Lingling, Jin Long, Gui Yun *et al.*. Switchable dual-wavelength erbium-doped fiber laser with a tilted fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1658~1662
徐玲玲, 金龙, 开桂云等. 利用倾斜光纤光栅的可开关双波长光纤激光器 [J]. 光学学报, 2007, **27**(9): 1658~1662
- 19 Liu Rui, Qu Ronghui, Cai Haiwen *et al.*. Analysis of the transmission spectral characteristics of fiber Bragg grating in photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1007~1012
刘锐, 瞿荣辉, 蔡海文等. 光子晶体光纤布拉格光栅传输谱特性的分析 [J]. 光学学报, 2006, **26**(7): 1007~1012
- 20 Y. P. Wang, W. Jin, J. Ju *et al.*. Long period gratings in air-core photonic bandgap fibers [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(4): 2784~2790
- 21 Yiping Wang, D. N. Wang, Wei Jin *et al.*. Mode field profile and polarization dependence of long period fiber gratings written by CO₂ laser [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(9): 2522~2525
- 22 Yiping Wang, Wei Jin, D. N. Wang. Unique temperature sensing characteristics of CO₂-laser-notched long-period fiber gratings [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2009, **47**(10): 1044~1048
- 23 H. W. Lee, K. S. Chiang. CO₂ laser writing of long-period fiber grating in photonic crystal fiber under tension [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(6): 4533~4539
- 24 Wang Zhi, Zhang Limei, Wang Jin *et al.*. Dual resonance interference of cascaded LPG inscribed in photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2909~2913
王智, 张丽梅, 王晶等. 光子晶体光纤中级联长周期光栅双谐振波长干涉的研究 [J]. 光学学报, 2009, **29**(10):

2909~2913

- 25 Shujing Liu, Long Jin, Wei Jin *et al.*. Structural long period gratings made by drilling micro-holes in photonic crystal fibers with a femtosecond infrared laser [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 5496~5503
- 26 Qi Yuefeng, Bi Weihong. Preparation of heat-shock method PCFG in heat transfer characteristics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(3): 034214
齐跃峰, 毕卫红. 热激法 PCFG 制备工艺中热传导特性研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(3): 034214
- 27 Qi Yuefeng, Bi Weihong. Theoretical study on a kind of photonic crystal fiber grating based on structural change [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106003
齐跃峰, 毕卫红. 一种基于结构性改变的光子晶体光纤光栅理论研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0106003
- 28 Yuefeng Qi, Hanping Qiao, Weihong Bi. Study of heat transfer characteristics in PCFG fabrication technology using heat method [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(2): 020605
- 29 G. A. Ball, W. W. Morey, W. H. Glenn. Standing-wave monomode erbium fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(7): 613~615
- 30 Hendrik Sabert, Reinhard Ulrich. Gain stabilization in a narrow-band optical filter [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(16): 1161~1163
- 31 J. T. Kringlebotn, P. R. Morkel, L. Reekie *et al.*. Efficient diode-pumped single-frequency erbium:ytterbium fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(10): 1162~1164
- 32 M. Horowitz, R. Daisy, B. Fischer *et al.*. Narrow-linewidth, single mode erbium-doped fibre laser with intracavity wave mixing in saturable absorber [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(8): 648~649
- 33 Y. Cheng, J. T. Kringlebotn, W. H. Loh *et al.*. Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(8): 875~877
- 34 A. S. Kurkov, P. Bernage, P. Niay. 1.55 μm single-frequency long cavity fiber laser with $\pi/2$ phase shifted DFB mode selection [C]. IEE Colloquium on Optical Fiber Gratings, 1997, 12/1~12/4
- 35 C. Spiegelberg, J. Geng, Y. Hu *et al.*. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 57~62
- 36 C. Spiegelberg, J. Geng, Y. Hu. Compact 100 mW fiber laser with 2 kHz linewidth [C]. OFC'2003, 2003, PD451-3
- 37 J. Geng, C. Spiegelberg, S. Jiang. Narrow linewidth fiber laser for 100-km optical frequency domain reflectometry [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(9): 1827~1829
- 38 Y. Hu, C. Spiegelberg, J. Geng *et al.*. High power single-frequency narrow-linewidth erbium-doped fiber laser [C]. Lasers and Electro-Optics Society(LEOS), 2003; 794~795
- 39 Yu Benli, Qian Jingren, Jia Tong. Linewidth less than 0.5 kHz steady-state single-frequency fiber ring laser [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2001, **18**(4): 345~347
俞本立, 钱景仁, 家童等. 线宽小于 0.5 kHz 稳态的单频光纤环形腔激光器 [J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(4): 345~347
- 40 W. J. Wadsworth, W. H. Reeves, P. S. Russell *et al.*. Yb³⁺-doped photonic crystal fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(17): 1452~1454
- 41 W. J. Wadsworth, J. C. Knight, P. J. Russell *et al.*. Large mode area photonic crystal fiber laser [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 2001, 319~322
- 42 W. J. Wadsworth, R. M. Rercival, G. Bouwmans. High power air-clad photonic crystal fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(1): 48~53
- 43 J. Limpert, T. Schreiber, S. Nolter. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(7): 818~823
- 44 J. Limpert, N. R. Deguil, I. H. Manek *et al.*. High-power rod-type photonic crystal fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(4): 1055~1058
- 45 J. Limpert, O. Schmidt, J. Rothhardt *et al.*. Extended single-mode photonic crystal fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2715~2720
- 46 Crystal Fibre. Large-Mode Area Polarization-Maintaining Double-Clad Rod for High-Power Applications [OL]. <http://www.crystal-fibre.com/datasheets/DC-200-70-PM-Yb-rod.pdf>, 2007
- 47 O. Schmidt, J. Rothhardt, T. Eidam *et al.*. Single-polarization ultra-large-mode-area Yb doped photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(6): 3918~3923
- 48 Ruan Shuangchen, Yang Bing, Zhu Chunyan *et al.*. 2.2 W Yb³⁺-doped double-clad photonic crystal fiber laser [J]. *Acta*

- Photonica Sinica, 2004, **33**(1): 15~16
- 阮双琛, 杨 冰, 朱春艳 等. 2.2 W 掺 Yb^{3+} 双包层光子晶体光纤激光器 [J]. 光子学报, 2004, **33**(1): 15~16
- 49 Ruan Shuangchen, Du Chenling, Yang Bing *et al.*. The research on 15 W PCF laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1156~1158
- 阮双琛, 杜晨林, 杨 冰 等. 15 W 光子晶体光纤激光器的研究 [J]. 光子学报, 2004, **33**(10): 1156~1158
- 50 Zhang Wei, Li Yigang. Large mode area double-clad Yb^{3+} -doped photonic crystal fiber laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(4): 418~420
- 张 炜, 李乙钢, 闫培光 等. 大模面积双包层掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤激光器 [J]. 光电子·激光, 2005, **16**(4): 418~420
- 51 Lin Weixin, Ruan Shuangchen. Polarization maintaining photonic crystal fiber laser research [J]. *J. Shenzhen University*, 2009, **26**(1): 20~23
- 林伟欣, 阮双琛. 保偏光子晶体光纤激光器实验研究 [J]. 深圳大学学报理工版, 2009, **26**(1): 20~23
- 52 Wang Jianming, Duan Kailiang, Zhao Zhenyu *et al.*. Experimental study of power photonic crystal fiber laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(1): 11~14
- 王建明, 段开棕, 赵振宇 等. 高功率光子晶体光纤激光器实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(1): 11~14
- 53 Yang Lin, Duan Kailiang, Luo Shirong *et al.*. Experimental investigation of high power photonic crystal fiber laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(10): 1446~1448
- 杨 林, 段开棕, 罗时荣 等. 高功率光子晶体光纤激光器实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(10): 1446~1448