

光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展

柴路 胡明列 方晓惠 刘博文 宋有建 栗岩锋 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 光子晶体光纤自诞生至今的十几年来得到了快速发展,不同结构和各具特色的光子晶体光纤层出不穷。以应用于飞秒激光技术的各种光子晶体光纤为主线,介绍了目前基于光子晶体光纤飞秒激光技术的实验研究进展,尤其是高功率、高能量飞秒激光系统的研究现状和发展方向。

关键词 激光技术;光子晶体光纤;飞秒激光;高功率;高能量

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0101001

Advances in Femtosecond Laser Technologies with Photonic Crystal Fibers

Chai Lu Hu Minglie Fang Xiaohui Liu Bowen Song Youjian
Li Yanfeng Wang Qingyue

(Ultrafast Laser Laboratory, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Photonic crystal fibers (PCFs) have made a rapid development for the last several years since the first report in 1996. Consequently, all kinds of PCFs with different structures and characteristics have emerged in endlessly. Based on a main thread that the PCFs are used especially to femtosecond laser technologies, a brief overview of the experimental research in this field is presented. Especially the current status and perspective in the high-power/high-energy femtosecond laser systems is highlighted.

Key words laser technique; photonic crystal fiber; femtosecond laser; high-power; high-energy

OCIS codes 140.3510; 140.4050; 140.7090; 140.3280; 190.7110

1 引言

光子晶体光纤^[1](PCF)是具有许多明显不同于传统单模光纤特性的一类新型光纤,这些特性都来源于包层特殊设计(二维光子晶体结构)所导致的与波长相关有效折射率的可调谐性。更重要的是这些特殊设计可以利用一种基质材料的不同掺杂来实现,这也是 PCF 在制造和应用中的优势所在。

根据 PCF 的导光机制,一般可分为两种类型:当包层的有效折射率小于芯区的折射率时,其导光机制与传统光纤相同,被称为“折射率导引型”或“调制的全内反射型”^[2];当包层的有效折射率大于芯区

的折射率时,PCF 芯区的全内反射导引机制不存在,导光只是依靠包层形成的某些带隙将特定波长的光限制在芯区,被称为“光子带隙导引型”PCF (PBGF)^[3]。

从构成 PCF 的材料性质和包层形式看,PBGF 还可分为两类:采用掺杂玻璃(折射率大于硅基)材料填充 PCF 的包层空气孔,由于没有传统的空气孔结构,被称为“全固型 PBGF”(AS-PBGF)^[4],该类 PCF 的高折射率棒包层与芯区折射率差相对较大,带隙结构由单层高折射率环即可确定,因此其带隙产生机理被归于反谐振反射光波导(ARROW)^[5];

收稿日期: 2012-08-31; 收到修改稿日期: 2012-10-07

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327604, 2011CB508101)、国家自然科学基金(60838004, 60978022, 61078028, 60118015, 60177013, 61027083)、高等学校博士点学科点专项科研基金(20090032110050)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET|07-0597)资助课题。

作者简介: 柴路(1956-),男博士,教授,博士生导师,主要从事超快激光及其应用等方面的研究。

E-mail: lu-chai@tju.edu.cn

而具有大空气填充比包层和较大尺度空气芯区(较小的包层和芯区折射率差)的“空气-硅基”PBGF,则被称为“空芯型 PCF”(HC-PCF),其带隙形成机理被归于周期性气孔层的布拉格反射^[6]。

自从 1996 年 PCF 问世以来^[7],PCF 的制造工艺、导波特性和特型光纤设计、填充、以及应用等方面的研究一直都是国内外研究人员的关注热点^[8]。本课题组及时瞄准这一新兴研究方向,在国家 973 计划、863 计划和国家自然科学基金的资助下,率先开展了相关研究工作,并在该研究领域取得了多项创新性成果^[9,10]。

本文主要介绍 PCF 在飞秒激光技术领域的实验研究,同时总结本课题组在这方面的主要研究进展。而有关 PCF 的发展历程、基本特性及应用,可以参考文献^[1~3,6,8,11]。

2 非增益型 PCF 及其在飞秒激光技术中的应用

目前应用于飞秒激光技术领域的 PCF 分为“非增益型”和“增益型”两大类,所谓“非增益型”就是没有掺杂激活离子的 PCF。该类 PCF 在飞秒激光技术领域的应用主要是作为色散补偿和频率变换器件。图 1 为几种非增益型 PCF 的结构图。

2.1 高非线性 PCF

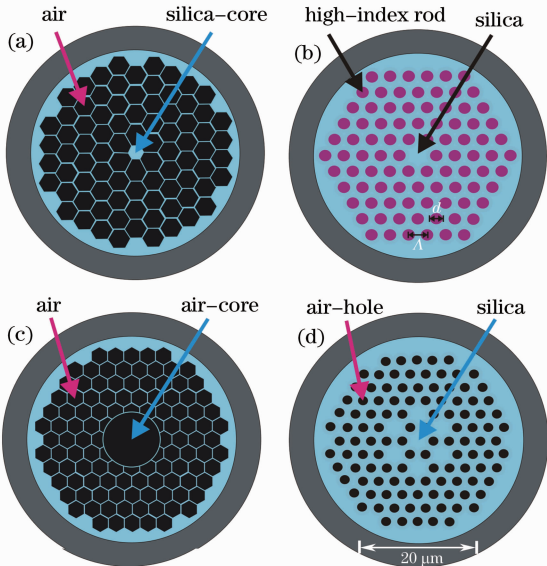


图 1 几种非增益型 PCF 的结构图。(a)高非线性 PCF; (b)全固型 PBGF;(c)空芯型 PCF;(d)多芯高非线性 PCF

Fig.1 Structures of non-gain PCF. (a) High nonlinear PCF; (b) all-solid PBGF; (c) hollow core PCF; (d) multicore high nonlinear PCF

高非线性 PCF(HNL-PCF)是利用大空气填充率包层加小芯径纤芯(微米量级)的结构,典型光纤截面如图 1(a)所示。该类 PCF 在飞秒激光技术领域的主要应用是非线性频率变换,比如可以直接产生高亮度的超快超连续谱^[12],并作为超连续源应用于生物医学、光纤通信、光学频率梳与计量、激光光谱学等领域^[13];这种技术也在飞秒光参量振荡(OPO)、光参量放大(OPA)和啁啾放大(OPCPA)中广泛使用;或者直接用于对飞秒激光脉冲的光谱展宽,再进行啁啾脉冲压缩,以获得极限脉冲宽度^[14];此外利用该类 PCF 中的非线性效应,如四波混频(FWM)、受激拉曼散射(SRS)等,可实现频率变换,例如利用 FWM 效应的高非线性 PCF 已经成为产生纠缠光子对的技术手段之一^[15]。

2000 年,Ranka 等^[16]首次报道了采用飞秒激光脉冲在高非线性 PCF 中产生可见光波段超连续谱的实验结果,之后有关基于 PCF 的超连续产生机理及其与高非线性 PCF 特性(不同材料和结构)和抽运参数(平均功率、脉冲能量、偏振方向、啁啾、脉冲宽度、波长和带宽)之间关系的研究就一直是国内外的研究热点。由于超连续产生的机理与抽运脉冲宽度相关,所以一般以抽运脉冲宽度为指标将产生的超连续分成两类:一类为“飞秒脉冲超连续”,另一类是“长脉冲(皮秒-连续光)超连续”。2006 年,Dudley 等^[17]总结了基于 PCF 产生超连续的主要研究成果,全面、详细地比较了以上两类超连续的异同。本课题组在基于 PCF 的飞秒超连续产生和频率变换方面也取得了一系列成果^[9,18]。从 2006 年至今,基于 PCF 飞秒超连续方面的研究主要集中在开发新型 PCF(不同基质材料和零色散点),并在不同实验条件下追求输出参数(带宽、波段、平均功率、脉冲能量等)的突破。目前报道的红外波段最大光谱带宽已达 4000 nm(789~4870 nm)^[19];而在紫外波段,最短波长达到深紫外的 280 nm^[20];在可见波段,本课题组利用多芯高非线性 PCF[图 1(b)]实现了 5.4 W 的最高平均功率输出^[21]。

为了在可见光波段获得高功率超连续源,方晓惠等^[22]提出“多芯高非线性 PCF”的设计方案,并最终优化设计出 7 芯-高非线性 PCF,并由华中科技大学武汉国家光电子重点实验室拉制成功。该 PCF 的单个芯径为 3.8 μm,长为 20 m,零色散点在 1025 nm。实验中,采用高功率 PCF 飞秒激光放大系统作为抽运源,在 16 W 抽运下获得了 5.4 W 的超连续输出^[21]。特别是,这种多芯高非线性 PCF

不但通过“集束”增加了超连续谱的平均功率,而且通过芯间耦合作用实现了同相位超模运转^[23],从而保证了超连续谱输出功率和模场分布的稳定性,同时保持较高的相干性,图2为实验结果,其中图(a)、(c)、(e)分别为近场超连续光谱[图(a)中插图为局

部放大图]、模场分布和相干性检测结果;图(b)、(e)、(f)分别为远场的超连续光谱(EXP:实验曲线;SL:模拟曲线)、模场分布和相干性检测结果。结果表明多芯高非线性 PCF 可以成为产生高功率飞秒白光源的技术手段之一。

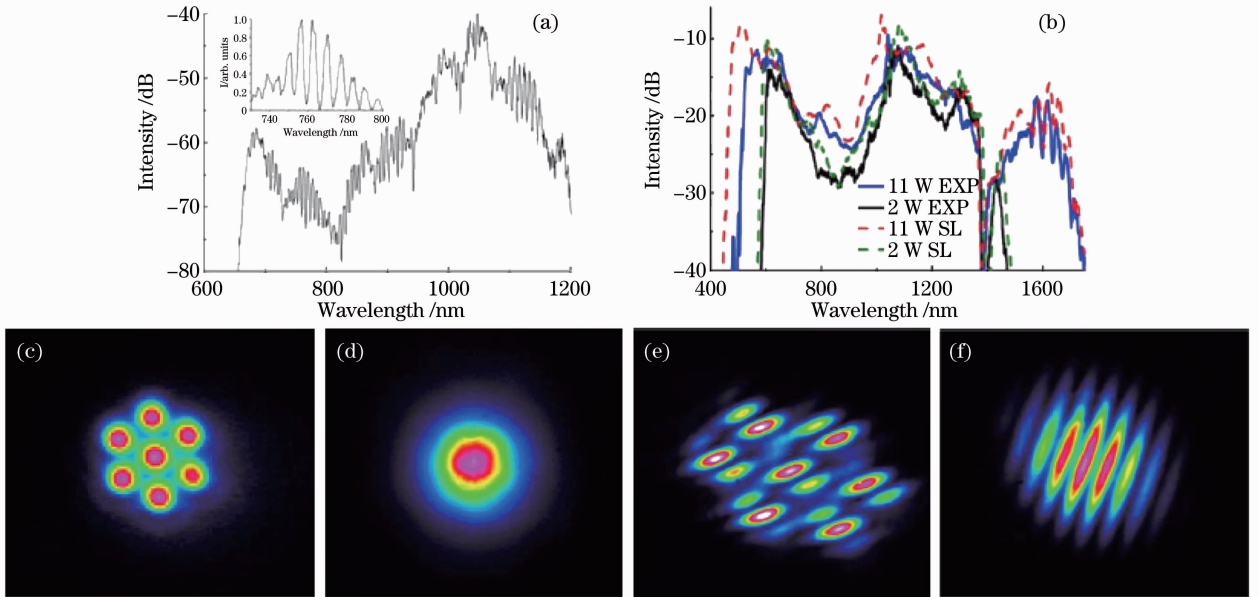


图2 多芯高非线性 PCF 的高功率飞秒超连续实验。(a) 5 cm-PCF 和(b) 20 m-PCF 的超连续谱;(c) 近场和(d) 远场的模场分布;(e) 近场和(f) 远场的相干性检验

Fig. 2 Experiment of high-power femtosecond super continuum in multicore high nonlinear PCF. Spectra of supercontinuum of (a) 5 cm and (b) 20 m PCFs; beam profiles of (c) near-field and (d) far-field; interference of the supercontinuum of (e) near-field and (d) far-field

2.2 全固型 PBGF

2005年 Luan 等^[4]首次研制出全硅材料的 PCF,将高折射率棒填充入普通 PCF 的包层空气孔,使包层的有效折射率高于硅基芯区的折射率,即为全固型 PBGF,见图 1(b)。该类 PCF 的主要优点是全固态结构,并且可以选择同种材料进行不同掺杂,容易拉制;固体芯区便于掺杂和加工,进而可以构成增益型光纤和光纤光栅器件;另外,全固结构便于与普通的单模光纤连接,构成全光纤系统。非增益型全固型 PBGF 在飞秒激光技术领域应用,除了与高非线性 PCF 相同可作为飞秒超连续产生的介质之外,主要是作为色散补偿器件和利用其带隙特性作为滤波器件使用。

通过设计光纤参数,全固型 PBGF 在 $1\ \mu\text{m}$ 波段可以提供负群速度色散(GVD),因此该类光纤首先被用于飞秒激光的色散补偿。2006年 Nielsen 等^[24,25]在掺 Yb^{3+} 光纤振荡器中将全固型 PBGF 作色散补偿器件,并与普通掺 Yb^{3+} 光纤直接熔接构成了全光纤型飞秒激光振荡器,分别获得了 158 fs 和 460 fs 的激

光脉冲。作为色散补偿器件,全固型 PBGF 的缺点是具有较大的三阶色散(TOD)和损耗。

全固型 PBGF 由于其带隙导光特性和带隙边缘处较高的色散斜率,在飞秒超连续产生实验中能够实现光谱裁剪,从而实现超连续光谱可控和稳定性好的宽带光源^[26],其物理机制来自于带隙边缘较强的 TOD 对孤子自频移的急剧减加速作用。

考虑到飞秒光纤激光器中的滤波应用,本课题组在 2008 年利用全固型 PBGF 与全固型布拉格光纤结合,研制成全固光纤型带通滤波器^[27]。该光纤滤波器仅仅通过改变两种光纤的弯曲半径就能够同时调整滤波带宽和中心频率,可以用于飞秒光纤激光系统工作波段的选择与调谐。该滤波器当年被国际光学类评论性杂志《Phonics Spectra》冠予“易调谐的全光纤带通滤波器”加以评述^[28]。

2.3 空芯型 PCF

1999年 Cregen 等^[6]首次拉制出空芯型 PBGF,是采用抽出芯区的 7 根预制棒,形成大空气芯。现在一般将具有较大空气芯和大空气填充比包层(一

一般为网状、蜂巢状、Kagome 包层结构)的 PBGF 称为空芯型 PCF,图 1(c)为该类 PCF 的结构图。空芯型 PCF 是目前研究较多的一类 PCF,这得益于其大空气包层和中空结构便于填充流体材料,使之在传感器、微流器件、非线性频率变换器件和光谱技术方面得到广泛应用^[29]。特别是该类光纤的空心结构使得芯区的非线性、色散和损耗大大降低,因此空芯型 PCF 可以承受较大光场功率或能量,非常适合于高功率激光的传输和脉冲压缩^[30]。

空芯型 PCF 在飞秒激光技术中的应用主要是用于传输和压缩高能量飞秒脉冲,2003 年 Ouzounov 等^[31]采用纤芯直径为 12.7 μm 的空芯型 PCF,在 1500 nm 波段成功传输了的 900 nJ、100 fs 左右的孤子脉冲;2004 年, Luan 等^[32]在 800 nm 波段传输了 65 nJ、300 fs 的孤子脉冲;2010 年 Mosley 等^[33]将 300 fs、540 nm、20 MHz、平均功率为 1 W 的绿激光脉冲注入到零色散波长在 540 nm、1 m 长的空芯型 PCF 中,获得了平均功率超过 500 mW 的 100 fs 光脉冲;2012 年 Wang 等^[34]采用 2.3 m 长、充氦气的 70 μm 大芯径、低损耗(40 dB/km)的空芯型 PCF,在 1550 nm 波段成功传输了 74 μJ、850 fs、40 kHz 的高能飞秒脉冲,并在空气填充空芯型 PCF 的条件下,将 105 μJ、850 fs 光脉冲压缩到了 300 fs。

利用空芯型 PCF 的上述特性,它可以替代高功率光纤飞秒激光放大系统中常用的光栅型脉冲压缩器,从而构成全光纤的飞秒激光放大系统。2003 年, Limpert 等^[35]利用空芯型 PCF 作为脉冲压缩器构建了全光纤啁啾脉冲放大器(FCPA),获得了脉冲宽度为 100 fs、平均功率为 6 W,重复频率为 73 MHz,单脉冲能量为 82 nJ,峰值功率为 0.82 MW 的激光脉冲。2006 年 Nielsen 等^[24]在掺 Yb³⁺ 光纤主振荡功率放大器(MOPA)中的放大级输出端采用了空心型 PCF 进行色散补偿,最终获得 158 fs、5.3 nJ 的激光输出。2009 年,本课题组利用 0.39 m 的空芯型 PCF 直接对 Yb-PCF 飞秒激光振荡器输出的 475 fs 脉冲压缩至接近变换极限的 108 fs,传输效率为 89%^[36]。

3 增益型 PCF 及其在飞秒激光技术中的应用

所谓增益型 PCF 就是在实芯 PCF[如图 1(a)、(b)、(d)所示]的芯区掺入激活离子,构成增益波导。根据增益型 PCF 的发展,该类光纤的主要分类见图 3。增益型 PCF 的主要掺杂离子有稀土离子:

Er³⁺、Yb³⁺、Tm³⁺^[37~39],以及金属离子:Nd³⁺、Bi³⁺^[40,41]。与普通单模增益光纤不同,由于 PCF 的色散可控和有效单模大模场面积(LMA),使其能够成为一种集增益、非线性、负色散于一身的新型增益介质,使得由 PCF 构成的飞秒激光器能够实现小型化和高功率输出^[42]。目前基于 PCF 的飞秒激光系统的激光参数已经达到(有些甚至超过)了以钛宝石为代表的固体飞秒激光系统的水平,成为新一代的超快激光技术^[43,44]。

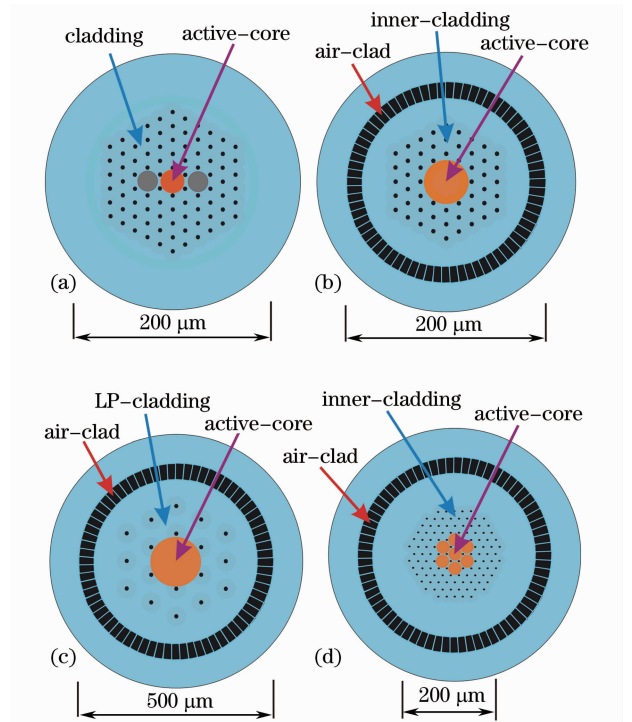


图 3 主要增益型 PCF 的结构图。(a)单包层保偏/大模场面积 PCF;(b)双包层 LMA/棒状 PCF;(c)双包层大空气孔间隔 PCF;(d)双包层多芯 PCF

Fig. 3 Structures of gain PCF. (a) Single cladding polarization maintaining/LMA-PCF; (b) double cladding LMA/rod-tape-PCF; (c) double cladding large-pitch-PCF; (d) double cladding multicore-PCF

3.1 增益型小芯径 PCF

自 PCF 问世以来,参照普通光纤的发展轨迹,对增益型 PCF 的研究就成为 PCF 发展的主要方向之一。首先是在小芯径(芯径一般小于 15 μm)PCF 中实现了增益型 PCF,其结构示意图如图 3(a)所示。按时间先后顺序,其中掺杂的激活离子有:1999 年实现掺 Er³⁺ 的 PCF^[37];2000 年实现掺 Yb³⁺ 的 PCF^[38];2004 年实现掺 Nd³⁺ 的 PCF^[40];2010 年实现掺 Bi³⁺ 的 PCF^[41] 和 2011 年实现掺 Tm³⁺ 的 PCF^[39]。

3.1.1 增益型小芯径 PCF 在飞秒激光振荡器的应用

2001年,基于小芯径 Yb-PCF 的激光振荡器首次实现皮秒级锁模^[45]。2005年,Moenster 等^[46]采用在 1 μm 波段具有负色散的小芯径 Nd-PCF,仅用单根长 0.56 m 的光纤,辅助半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 锁模就实现了孤子锁模,获得了近转换极限、脉冲宽度为 400 fs、重复频率为 95 MHz、平均功率为 9.5 mW、脉冲能量为 100 pJ 的激光输出;2006年,该课题组又报道了最短脉冲宽度为 180 fs、重复频率为 117 MHz、脉冲能量为 7.8 pJ 的实验结果^[47]。2006年,Isomäki 等^[48]采用掺 Yb³⁺ 的全固型 PBGF 作为增益介质,其芯径为 9 μm ,长度为 0.27 m,被直接熔接到 0.47 m 的单模光纤 (SMF),锁模方式为 SESAM,最终获得了近转换极限、脉冲宽度为 335 fs、重复频率为 117.5 MHz、平均功率为 3 mW、脉冲能量为 25.5 pJ 的激光输出。2008年,Ouyang 等^[49]通过数值模拟讨论了基于掺 Yb³⁺ 全固型 PBGF 的“弱呼吸型”环形腔在滤波作用下的锁模动力学过程。2011年,Lecaplain 等^[50]采用 12 m 长、模场直径为 16 μm 的单根掺 Yb³⁺ 全固型 PBGF 构建了“全正色散型”环形激光器,激光脉冲参数:平均功率为 350 mW、脉冲宽度为 4 ps,脉冲能量为 21 nJ,压缩后脉冲宽度达到 230 fs,对应峰值功率为 73 kW;2012年,该课题组又将该激光器压缩后的脉冲宽度缩短至 50 fs^[51]。

3.1.2 增益型小芯径 PCF 在飞秒激光放大器中的应用

2002年,Price 等^[52]利用小芯径 Yb-PCF 构成飞秒激光放大器,通过在增益光纤中的孤子自频移、拉曼效应、负色散、自相位调制 (SPM) 效应实现了在 1.06~1.33 μm 宽带可调谐的百飞秒级运转。

由于增益型单包层小芯径 PCF 具有较高的非线性和较小的抽运数值孔径,因此只适用于低功率抽运,实现飞秒级激光运转的报道不多。要实现高功率/高能量的飞秒级激光运转,就必须提高光纤非线性效应的阈值,增加抽运功率和效率。实现上述要求的主要技术手段就是尽可能增加 PCF 的有效模场面积和采用包层抽运方式。而 PCF 的无截止单模和包层有效折射率可变的特性使之在实现超 LMA 和大数值孔径抽运包层方面具有先天优势,由此诞生了以下几种适用于 1 μm 波段的高功率/高能量激光系统的掺 Yb³⁺ LMA-PCF。

3.2 双包层大模场面积 PCF

LMA 是与普通 SMF 的单模模场面积相比而言的。普通 SMF 在 1 μm 波段维持单模的芯径一般在 10 μm 以下,因此可将有效单模芯径大于 15 μm 的 PCF 称为 LMA-PCF^[53]。为了维持光纤的 LMA,工艺上必须减小包层与芯区的折射率差。与 SMF 不同,PCF 可以通过减小小包层空气孔直径 d 与空气孔间隔 Λ 的比值 (d/Λ) 来减小折射率差;理论上,对于填充一个中心孔的 PCF,当 $d/\Lambda < 0.4$ 时,维持单模场的芯径甚至可以拓展到无限^[44,54]。如果将激活离子掺杂到 LMA-PCF 的芯区,同时工艺上保持芯区的折射率基本不变,就构成了增益型 LMA-PCF。再采用普通增益光纤的包层抽运技术,即在 PCF 的微结构包层 (称为内包层) 之外再加入一层空气孔包层 (称为外包层),就称为双包层 (DC),其结构见图 3(b)。由于空气外包层的有效折射率由气孔壁的厚度决定,目前工艺上该壁厚已经可以做到远小于导模波长,这使得外包层的有效折射率接近空气的折射率,这明显加大了内、外包层的折射率差,从而大大增加了内包层的数值孔径 (NA),使之更加适于高功率多模半导体激光器 (LD) 抽运^[55];如果在芯区两侧加入应力区 (棒) 则就构成了保偏 (PM) 型双包层 LMA-PCF^[56]。采用包层抽运技术增加了 PCF 的抽运面积和效率,使得进一步提高激光器的功率/能量水平成为可能。自 2001 年掺 Yb³⁺ 的双包层大模场面积 PCF (DC-LMA-PCF) 诞生^[53] 之后,各种结构该类光纤的设计和研制^[57] 逐渐展开,并很快有商品面世^[58],促进了 PCF 在高功率激光领域的应用^[44,59,60]。

3.2.1 Yb-DC-LMA-PCF 在飞秒激光振荡器中的应用

Ortac 等^[61]在 2007 年首次实现了掺 Yb-DC-LMA-PCF 飞秒激光振荡器。该激光器工作在负色散区,以 30 μm 芯径的 DC-LMA-PCF 为增益介质,采用 976 nm 的 LD 抽运,SESAM 辅助非线性偏振旋转 (NPE) 锁模,获得了平均功率为 880 mW、重复频率为 53.33 MHz、脉冲宽度为 493 fs,单脉冲能量为 16.5 nJ 的激光输出。随后 Lecaplain 等^[62]报道了基于 Yb-DC-LMA-PCF 的全正色散飞秒激光运转。该激光器腔内没有负色散元件,仅采用 1 m 长的 Yb-DC-LMA-PCF,模场直径为 33 μm ,SESAM 锁模,LD 抽运,获得了最高平均功率为 3.3 W,脉冲宽度为 5.6 ps,重复频率为 46.4 MHz,单脉冲能量为 71 nJ 的激光输出,再经腔外啁啾补偿最终获得

脉冲宽度为 516 fs,平均功率为 2.3 W,相应的峰值功率超过 96 kW 的激光输出。2008 年,Ortac 等^[63]采用相同腔型,实现了 Yb-DC-LMA-PCF(40 μm 芯径,1.2 m 长)的锁模运转,获得了 1.6 W 的平均功率,63 MHz 的重复频率,3.7 ps 的脉冲宽度,相应 25 nJ 的单脉冲能量,压缩后脉冲宽度为 750 fs;2009 年,Lecaplain 等^[64]采用 1.5 m 长的同样光纤和长腔结构,实现了耗散孤子锁模,获得了 22 MHz、1.4 W、2.2 ps 的脉冲序列,相应 63 nJ 的单脉冲能量,压缩后脉冲宽度为 150 fs,平均功率为 950 mW,相应的峰值功率大于 280 kW。2010 年 Lefrançois 等^[65]采用长为 1.25 m、模场直径为 33 μm 的 Yb-DC-LMA-PCF 构建了全正色散光纤激光器,获得了 12 W 的平均功率,84 MHz 的重复频率,对应单脉冲能量达到 140 nJ,压缩后脉冲宽度为 115 fs,将耗散孤子锁模脉冲的峰值功率提高到了兆瓦水平。同年,Baumgartl 等^[66]采用相同 Yb-DC-LMA-PCF 构建了全正色散多通长腔激光器,得到压缩后的脉冲宽度为 77 fs,脉冲能量为 130 nJ,峰值功率超过 1.2 MW。

本课题组同时也开展了基于 PCF 的飞秒激光振荡器的研究^[10],2007 年采用 70 μm 芯径的 Yb-

PM-DC-LMA-PCF 和 SESAM 锁模,实现了平均功率为 2 W,重复频率为 51 MHz,压缩后脉冲宽度 450 fs,对应脉冲能量为 45 nJ 的激光输出^[67]。此后,陆续实现了稳定的孤子锁模^[68]、全正色散锁模^[69]、呼吸孤子锁模^[70]和 NPE 耗散孤子锁模^[71]。其中获得最高平均输出功率达到 10 W,脉冲宽度为 1.03 ps,重复频率为 49 MHz,对应单脉冲能量为 202 nJ,色散补偿后脉冲宽度为 95.5 fs 的激光输出^[11];2012 年,本课题组利用长度为 1.1 m、芯径为 30 μm 的 Yb-PM-DC-LMA-PCF 构建全正色散多通长腔激光器,如图 4 所示,直接输出 4.9 W 的 1.32 ps 的脉冲序列,重复频率为 15.58 MHz,相应的单脉冲能量达到 314 nJ;该脉冲直接经光栅对去啾啾后的脉冲宽度为 75 fs,平均功率为 3.6 W,对应的峰值功率达到 3 MW;为了实现更窄的脉冲,采用 0.38 m 的 PCF 展宽光谱,然后再经滤波器和光栅对去啾啾,最终获得了平均功率为 1 W,脉冲宽度为 25 fs 的激光脉冲,对应峰值功率为 2.1 MW^[72]。由文献 [61~71] 可知,上述的最窄脉冲宽度 (25 fs)、单脉冲能量 (314 nJ) 和峰值功率 (3 MW) 是迄今为止采用 Yb-PM-DC-LMA-PCF 的全正色散多通长腔飞秒激光振荡器的最好结果。

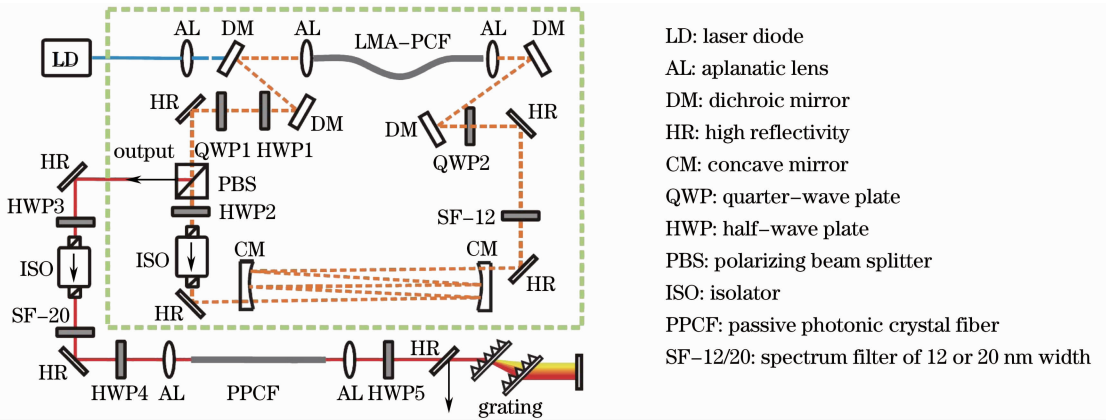


图 4 基于 Yb-PM-DC-LMA-PCF 的全正色散多通长腔飞秒激光振荡器及其 PCF 光谱展宽和光栅压缩器的实验装置
Fig. 4 Schematic setup of all normal dispersion multipass long cavity Yb-PM-DC-LMA-PCF femtosecond laser oscillator and spectral broadening and pulse compressing system

3.2.2 Yb-DC-LMA-PCF 在飞秒激光放大器中的应用

从光纤放大器的结构和机理上讲,目前基于 PCF 高功率飞秒激光放大器主要使用 MOPA、啾啾脉冲放大(CPA)、非线性放大和自相似放大^[44]。其中 MOPA、非线性放大和自相似放大都属于直接放大技术,主要区别在于 MOPA 系统中放大级属于直接功率放大;非线性放大系统的放大过程中需要伴

随 SPM 效应对光谱足够的展宽效应;自相似放大系统的放大过程中时域脉冲需要经过足够长的增益光纤,在非线性和增益和正色散的作用下最终形成抛物线型脉冲。

采用增益型 LMA-PCF 实现飞秒级激光放大要早于其在飞秒激光振荡器中的使用。2003 年,Limpert 等^[35]首次实现了一种全光纤的 CPA 飞秒激光放大器,其中采用 1.9 m 长的 SMF 作为展宽

器, 2.1 m 长的 Yb-DC-LMA-PCF 作为放大级增益介质, 2 m 长的 HC-PCF 作为色散补偿器; 经过 HC-PCF 后获得平均功率为 6 W, 重复频率为 73 MHz, 脉冲宽度为 100 fs, 相应的峰值功率为 0.82 MW 的激光输出。2005 年, Shah 等^[73] 也实现了一台 CPA 飞秒激光系统: 振荡器为掺 Yb³⁺ 光纤飞秒激光器, 展宽采用普通 SMF, 两级预放大为 Yb-SMF, 功放级是 Yb-DC-LMA-PCF, 压缩器为光栅对; 获得了脉冲宽度为 650 fs, 重复频率为 100 kHz, 单脉冲能量为 100 μ J 的激光输出。同年, Röser 等^[74] 使用两级 Yb-DC-LMA-PCF 放大的 CPA 系统, 实现了平均功率为 131 W, 重复频率为 73 MHz, 脉冲宽度为 220 fs, 对应的单脉冲能量为 1.8 μ J, 峰值功率为 8.2 MW 的激光输出; 2007 年, 该课题组采用三级 Yb-DC-LMA-PCF 放大的 CPA 系统, 降低重复频率到 900 kHz, 将脉冲能量提高 100 μ J (平均功率为 90 W, 脉冲宽度为 500 fs, 峰值功率为 120 MW)^[75]。2008 年, Eidam 等^[76] 采用两级 Yb-DC-LMA-PCF 的 CPA 系统, 输出脉冲再经过长 6 cm 的短 PCF 和一对啁啾镜构成的“非线性脉冲压缩器”实现了平均功率为 57 W, 重复频率为 78 MHz, 脉冲宽度短至 27 fs, 相应的峰值功率为 20 MW 和脉冲能量为 0.73 μ J 的激光输出; 2009 年, 该课题组又采用两级 Yb-DC-LMA-PCF 非线性放大的 CPA 系统, 在预放大级用 1.4 m 长、40 μ m 芯径、200 μ m 内包层直径的 Yb-PM-DC-LMA-PCF, 在功放级用 7.5 m 长、30 μ m 芯径、500 μ m 内包层直径的 Yb-DC-LMA-PCF, 将 Yb:YAG 振荡级的 180 fs、40 MHz 种子脉冲放大到平均功率高达 325 W, 脉冲宽度达 375 fs, 相应的峰值功率达到 22 MW, 单脉冲能量达 8.2 μ J^[77]。因此, 截止目前, 基于 Yb-DC-LMA-PCF 的高重复频率的 CPA 系统获得的最窄脉宽为 27 fs^[76], 最高脉冲能量和峰值功率分别为 100 μ J 和 120 MW^[75], 最高平均功率为 325 W^[77]。

2006 年, Schreiber 等^[78] 在全保偏光纤的放大系统中, 首次实现了飞秒自相似放大; 该课题组使用 1.2 m 的 Yb-PM-DC-LMA-PCF 作为主放大, 获得平均功率为 21 W, 重复频率为 17 MHz, 脉冲宽度为 240 fs, 单脉冲能量为 1.25 μ J 的实验结果。

本课题组于 2007 年首次使用国产 Yb-DC-LMA-PCF 实现 MOPA 系统^[67]。2008 年, 采用模场直径为 25 μ m, 内包层直径为 220 μ m 的 Yb-PM-DC-LMA-PCF 构建了全 PCF 的单级非线性放大系

统, 获得平均功率为 16 W, 重复频率为 50 MHz, 单脉冲能量为 320 nJ, 压缩后脉冲宽度为 85 fs 的激光输出^[79]; 随后通过系统优化将脉冲宽度缩短至 39 fs^[80]。2010 年, 通过降低重复频率到 1 MHz, 又获得了脉冲宽度的 124 fs, 脉冲能量为 1.56 μ J, 峰值功率为 12.6 MW 的激光输出^[81]。2011 年, 通过光栅对和吉莱-图努瓦(G-T)镜结合的“矢量色散补偿”对高重复频率(50 MHz)的全 PCF 的单级非线性放大系统^[82]中的高阶啁啾进行补偿, 获得了基底干净的 44 fs 脉冲, 平均功率为 26.6 W, 相应的脉冲能量为 531 nJ 和峰值功率为 10.8 MW 的激光输出^[83]。基于 Yb-PM-DC-LMA-PCF 的高重复频率(MHz)单级非线性放大系统, 目前本课题组获得的脉冲宽度为 39 fs^[80], 单脉冲能量为 1.56 μ J 和峰值功率为 12.6 MW^[81], 平均功率为 26.6 W^[83] 仍是最好结果。

3.3 棒状 PCF

追求高重复频率下的高平均功率、高峰值功率、高脉冲能量的光纤基飞秒激光, 其主要限制因素是在高功率/高能量下光纤中的非线性积累^[84]; 为了进一步限制光纤中的非线性效应, 只有尽量增加增益光纤的模场/抽运面积和减小光纤长度(同时减小了吸收损耗)。然而, 随着 Yb-LMA-PCF 的模场面积的不断增大, 光纤模场分布对弯曲更加敏感, 因此只能尽量保持该光纤为直线使用; 后来省去外涂覆层(聚合物材料), 因而消除了其低阈值的热损害因素; 最后再加厚支撑该光纤的石英玻璃包覆层(直径达毫米量级), 并缩短光纤长度(米量级), 由此形成了棒状 PCF(rod-tape PCF)^[85], 其中心微结构区的示意图见图 3(b), 目前报道的棒状 PCF 的芯径都在 70~100 μ m 范围。

3.3.1 掺 Yb³⁺ 棒状 PCF 在飞秒激光振荡器中的应用

2007 年, Ortaç 等^[86] 首次将 70 μ m 芯径、0.51 m 长的掺 Yb³⁺ 棒状 PCF 用于环形多通长腔飞秒激光振荡器, 在重复频率为 10.18 MHz 下获得平均输出功率为 2.7 W, 单脉冲能量高达 265 nJ, 色散补偿后脉冲宽度为 400 fs, 对应峰值功率为 500 kW 的激光输出; 2009 年, 该课题组在原有基础上采用更长(1.2 m)的 80 μ m 芯径掺 Yb³⁺ 棒状 PCF 作为增益介质, 以及 7 cm 长的 SMF 作为滤波器, 使激光器工作在全正色散区, 获得了平均功率为 9 W, 重复频率为 9.7 MHz, 单脉冲能量高达 927 nJ, 腔外压缩后脉冲宽度为 711 fs, 对应峰值功率达 1.3 MW 的激光输出^[87]。2010 年, Lecaplain 等^[88] 采用

0.95 m长相同增益光纤作为增益介质,辅助9 m长的LMA-PCF增加腔内的正色散量,在40 W抽运下获得了平均功率11 W,重复频率15.5 MHz,单脉冲能量710 nJ,腔外压缩后脉冲宽度为300 fs,对应峰值功率高达1.9 MW的激光输出。迄今为止,基于掺Yb³⁺棒状PCF的飞秒激光振荡器获得的最高单脉冲能量为927 nJ^[87];最窄脉冲宽度为300 fs,最高峰值功率为1.9 MW,最高平均功率为11 W^[88]。

3.3.2 掺Yb³⁺棒状PCF在飞秒激光放大器中的应用

2007年,Röser等^[89]采用两级CPA系统,振荡级为Yb:KGW固体飞秒激光器,展宽器为光栅对,预放大级采用1.2 m长的掺Yb-PM-DC-LMA-PCF(芯径/内包层直径为40 μm/170 μm),功率放大级采用同样长度的Yb³⁺棒状PCF(芯径/内包层直径为80 μm/200 μm),压缩器仍为光栅对。最终获得脉冲宽度为800 fs,在100 kHz重复频率下,平均输出功率为100 W,相应脉冲能量为1 mJ,峰值功率约为1 GW的激光输出;在50 kHz重复频率下,平均输出功率为71 W,相应脉冲能量为1.45 mJ。2009年,Boulet等^[90]采用相同结构的非线性CPA系统,即在放大前对种子脉冲采用5 cm长的LMA-PCF进行频域展宽和透射光栅对进行时域展宽,最终在100 kHz重复频率下,获得平均功率为10 W,脉冲宽度为270 fs,相应的脉冲能量为100 μJ和峰值功率为355 MW的激光输出。2011年,Saraceno等^[91]报道了采用0.55 m长(芯径/内包层直径为70 μm/200 μm)掺Yb³⁺棒状PCF的单级CPA系统,振荡级为Yb:YAG锁模激光器,展宽器和压缩器为透射光栅对;最终获得平均功率为55 W,脉冲宽度为98 fs,重复频率为10.6 MHz,相应的脉冲能量为5.2 μJ和峰值功率为32.7 MW的激光输出。因此,截止目前,在基于掺Yb³⁺棒状PCF的CPA系统中,获得的最窄脉宽为98 fs^[91];最高脉冲能量为1.45 mJ和最高峰值功率为1 GW^[90];最高平均功率为100 W^[89]。

2008年,Zaouter等^[92]仅用0.85 m长的掺Yb³⁺棒状PCF(芯径/内包层直径为80 μm/200 μm)构成单级非线性放大系统,将Yb:KYW振荡级的330 fs、100 nJ、10 MHz的脉冲直接放大后,再经过两组不同参数的透射光栅压缩,分别获得了脉冲宽度为40 fs、脉冲能量为870 nJ、峰值功率为12 MW和脉冲宽度为71 fs、脉冲能量为1.25 μJ、峰值功率为16 MW的激光输出。2011年,Saraceno等^[91]在同一篇文献中也报道了一台采用

短长度、大芯径、保偏的掺Yb³⁺棒状PCF(仅0.36 m长;芯径/内包层直径(d/Λ)为100 μm/285 μm)的单级非线性放大系统,与前面的CPA系统相比,只是去掉了展宽器;最终获得平均功率为34 W,脉冲宽度为65 fs,重复频率为10.6 MHz,相应的脉冲能量为3.2 μJ,峰值功率为32 MW的激光输出。截止目前,在基于掺Yb³⁺棒状PCF的单级非线性放大系统中,获得的最窄脉宽为40 fs^[92];最高脉冲能量为3.2 μJ,最高平均功率为34 W和最高峰值功率为32 MW的激光输出^[91]。

3.4 大空气孔间隔包层PCF

尽管掺Yb³⁺棒状PCF已经将芯径提高到80~100 μm,但是在工艺上要保持很小 d/Λ 的玻璃管且在整根光纤长度上不出现塌陷是很难的,因此实际掺Yb³⁺棒状PCF一般按照“少模运转”设计;这样在高功率/高能量激光条件下,几个横模的竞争就成为限制高功率/高能量激光器光束质量和稳定性的主要因素之一^[93];尽管可以采取“激发模式匹配”、“微弯曲”或“共振模滤波”等方法,限制高阶模运转^[94],但是很难继续增大光纤的模场面积。2010年,Jansen等^[95]根据PCF包层的“模式筛子”的作用原理,提出了大空气孔间隔包层PCF(LPF)的设计方案,其结构见图3(c)。在基模损耗保持1 dB/m的条件下,讨论了包层与芯区折射率差 Δn 和包层参数 d/Λ 对模式鉴别率的影响,得出包层采用两环大 Λ 结构(一般 $\Lambda > 10\lambda$)时,基模与临近高阶模之间有最高的鉴别率,即高阶模的损耗远大于基模的损耗(1 dB/m)^[95]。所以在芯区掺杂增益离子后,基模可以通过增益抵消其损耗,实现基模激光运转,而高阶模获得的增益不足以补偿其损耗,则被湮灭。因此LPF也被认为是唯一能够实现有效单模运转激光模场直径超过50 μm的光纤^[96]。

3.4.1 掺Yb³⁺的LPF在飞秒激光振荡器中的应用

2011年,Baumgartl等^[97]采用1.2 m长的掺Yb³⁺的LPF(1030 nm基模的模场直径为41 μm;976 nm的小信号吸收为24 dB/m)构成全正色散环形腔啁啾激光振荡器(见图5),其中:采用NPE锁模方式,普通双折射光纤作为滤波器(16 nm带宽),30 cm块状玻璃展宽器,整个激光器工作在全正色散域(色散约为0.03 ps²)。结果在52 W抽运功率下获得平均输出功率为27 W,重复频率为50.57 MHz,脉冲宽度为2.4 ps,相应的单脉冲能量高达534 nJ的激光输出;再经过腔外光栅对压缩后,获得脉冲宽度98 fs,单脉冲能量为427 nJ,对应的峰值功率达

3.2 MW的激光输出。2012年,该课题组又将该振荡级的指标推到新的高度:平均功率66 W(76 MHz重复频率),相应的单脉冲能量达到0.9 μ J,

腔外压缩后脉冲宽度91 fs,对应高达7 MW的峰值功率^[98]。这是目前光纤基飞秒激光振荡器获得的最高平均输出功率、单脉冲能量和峰值功率。

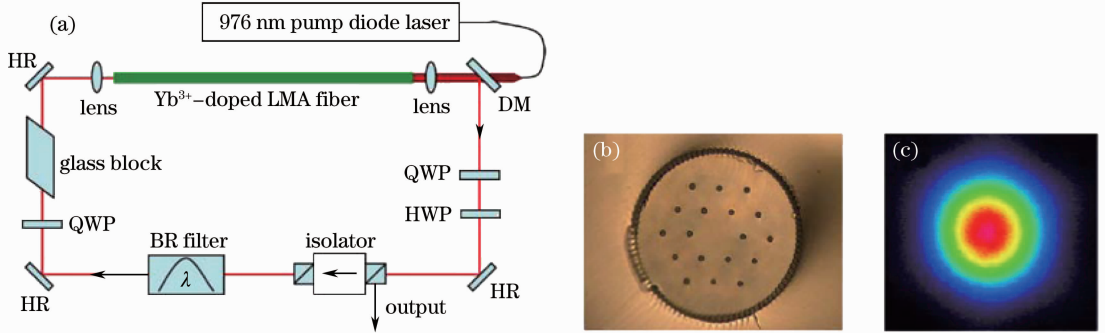


图5 (a)基于Yb-DC-LPF的全正色散飞秒激光啁啾脉冲振荡器实验装置。(b)LPF的截面图;(c)输出功率为27 W时的激光模式

Fig. 5 (a) Schematic setup of the Yb-LPF all normal dispersion femtosecond laser chirped pulse oscillator; (b) cross section of LPF; (c) beam profile with output power of 27 W

3.4.2 掺Yb³⁺的LPF在飞秒激光放大器中的应用

2011年,Eidam等^[98]报道了利用掺Yb³⁺的LPF作为功率放大级的四级放大CPA系统(见图6)。振荡级为钛宝石飞秒激光器(工作波长在1028 nm,重复频率为78 MHz,脉冲能量为皮焦量级);100 m保偏SMF作为一级展宽器将信号脉冲展宽到100 ps;经过第一级掺Yb³⁺的SMF放大后,

信号脉冲进入Öffner型光栅展宽器展宽到3 ns左右;然后经过空间光调制器(SLM)构成的脉冲整形器进行啁啾预补偿;随后再分别经过两级预放大级,其中第二级放大采用掺Yb³⁺的SMF,第三级放大采用1.2 m的Yb-DC-LMA-PCF(模场直径/内包层直径为30 μ m/170 μ m),两级预放大前都用声光调制器(AOM)减小重复频率;最后将5 kHz重复频率的40 μ J脉冲输入到功率放大级,该放大级采用

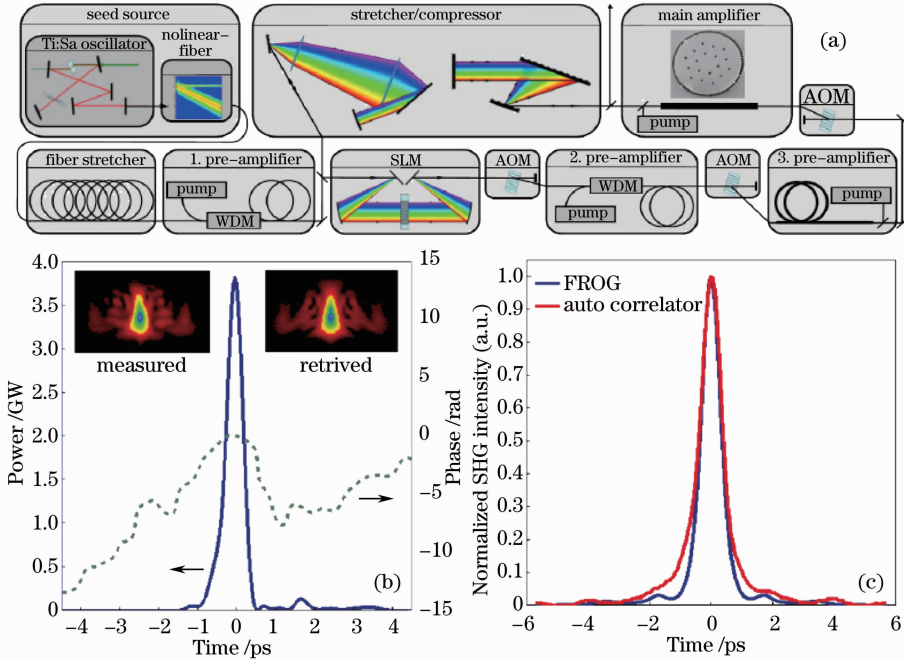


图6 (a)基于Yb-LPF作为功率放大级的四级CPA系统实验装置;输出脉冲能量为2.2 mJ时的(b)频率分辨光学开关法测量结果和(c)自相关曲线的比较

Fig. 6 (a) Experimental setup of four-stage CPA system with Yb-LPF as power amplification; (b) measurement results of FROG and (c) comparison with autocorrelation traces when energy of output pulse is 2.2 mJ

1.3 m 的掺 Yb^{3+} 的 LPF($\Lambda=60 \mu\text{m}, d/\Lambda=0.22$; 模场直径和内包层直径分别为 $105 \mu\text{m}$ 和 $340 \mu\text{m}$; 976 nm 的小信号吸收为 24 dB/m); 最后脉冲再经过光栅压缩器获得飞秒级高能脉冲。该系统最终获得了脉冲宽度为 480 fs , 重复频率为 5 kHz , 平均功率为 11 W , 脉冲能量为 2.2 mJ , 峰值功率对应高达 3.8 GW 的激光输出。该峰值功率是目前基于光纤 CPA 系统直接输出的最高水平。

3.5 多芯 PCF

另外一种可以实现高功率/高能量飞秒激光的 PCF 类型是多芯 PCF(MC-PCF), 它也是在普通多芯光纤激光器的基础上发展起来, 其结构见图 3(d)。2001 年, Cheo 等^[100] 利用 7 个掺 Yb^{3+} 的单模芯“集束”形成双包层光纤的芯区, 通过包层抽运, 首次观察到各芯之间模式耦合形成的同相位超模, 实现了激光功率的明显提升; 2004 年, 该课题组又用 19 芯的同样光纤构建了 MOPA 系统, 实现了 0.65 mJ 的近基模的放大输出^[101]。早在 PCF 诞生的第二年(1997 年), Knight 等^[102] 就提出了 PCF 技术更适合制作 MC-PCF, 并拉制出 3 芯和 6 芯的 PCF, 应用于弯曲传感。首次报道的增益型 MC-PCF 激光器是在 2005 年, Michaille 等^[103] 采用掺 Yb^{3+} 的 6 芯和 7 芯 LAM-PCF, 通过弯曲损耗实现同相位超模选取, 获得了 44 W 、1.1 倍衍射极限的连续激光输出; 2008 年, 用 6 芯掺 Yb^{3+} 的 LAM-PCF 实现了调 Q 运转^[104]; 2009 年, 该课题组又报道了用 18 芯掺

Yb^{3+} 的 LMA-PCF 的调 Q 激光器^[105]。

基于 MC-PCF 的激光器的首要问题是选取同相位超模, 并使各个芯的模式振幅相等, 这样才能在远场形成高斯型分布。MC-PCF 选取同相位超模的方式可以分为外部施加和内部调整。外部施加方法主要有 Talbot 共振腔^[106]、远场滤波和弯曲损耗等^[105]; 内部调整方法是基于各芯之间的倏逝波耦合原理^[100], 通过调整 MC-PCF 的设计和参数使各芯之间的模式的耦合系数最大且相等, 从而实现同相位超模的自然选取; 主要方法是调整各芯之间的空气孔大小^[107], 或者在各芯之间插入高折射率棒^[23,108], 但后者更容易控制。基于 Yb-MC-PCF 的飞秒级激光运转, 目前所见的报道多是由本课题组所做, 该项工作一直处于国际领先地位。

3.5.1 掺 Yb^{3+} 多芯 PCF 在飞秒激光振荡器中的应用

2010 年, Fang 等^[108] 首先数值研究了基于掺 Yb^{3+} 的 7 芯 PCF 的 SESAM 锁模激光器的锁模动力学过程, 得出了实现锁模的种子脉冲激发和时间关系; 2011 年, 采用 1.5 m 长的掺 Yb^{3+} 的 18 芯 PCF 和 SESAM 加 NPE 组合锁模技术构建了多通长腔环形激光器, 在全正色散区实现平均功率为 2.6 W , 脉冲宽度为 1.15 ps , 重复频率为 14.48 MHz , 相应的脉冲能量为 180 nJ 的激光输出, 经腔外压缩后的脉冲宽度为 690 fs ^[110], 实验装置及结果见图 7。

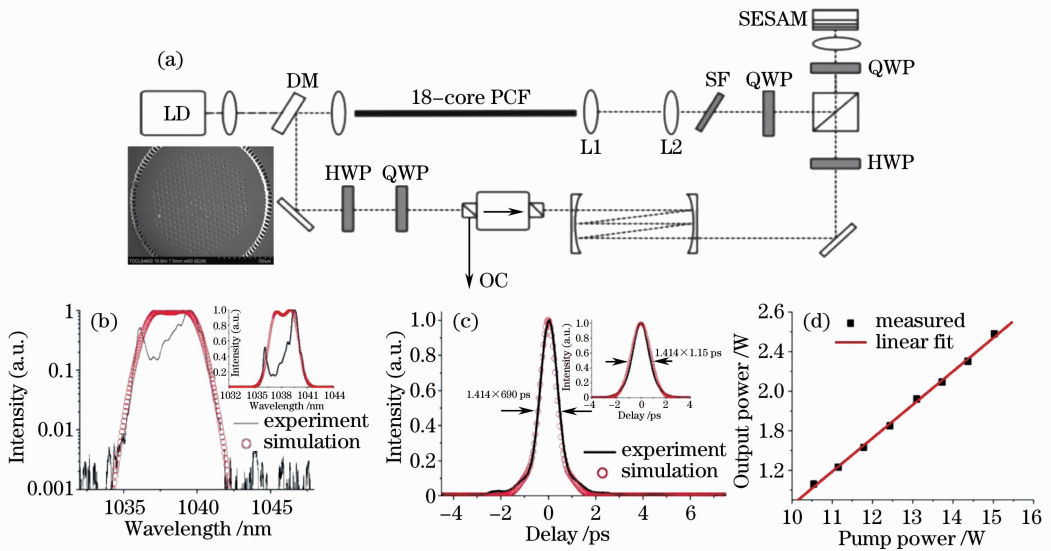


图 7 (a) 基于 Yb-DC-MC-PCF 的全正色散多通长腔飞秒激光振荡器实验装置; (b) 光谱曲线; (c) 自相关曲线; (d) 输入-输出关系

Fig. 7 (a) Experimental setup of Yb-DC-MC-PCF all normal dispersion multipass long cavity femtosecond laser oscillator; (b) spectral curves; (c) autocorrelation traces; (d) input-output characteristics

3.5.2 掺 Yb³⁺ 多芯 PCF 在飞秒激光放大器中的应用

2010年, Fang等^[111]报道了一台全PCF的二级非线性放大飞秒激光系统(见图8)。其中振荡级采用Yb-PM-DC-LMA-PCF(1.5 m长、29 μm 芯径), 输出600 fs、50 MHz、400 mW、1040 nm的激光脉冲; 经过声光调制器(AOM)降低重复频率到1 MHz, 进入预放大级; 该级采用与振荡级相同的PCF(3.5 m长), 将种子脉冲放大到700 mW, 并展宽到1.9 ps; 主放大级采用1 m长的掺Yb³⁺的7芯DC-LMA-PCF, 整个芯区面积达5000 μm^2 , 经过主放大后, 在同相位超模运转下获得了平均功率为24 W的激光输出; 再经过光栅压缩器去啾啾后, 获得了平均功率为17.1 W、脉冲宽度为110 fs、重复

频率为1 MHz的脉冲序列, 对应的脉冲峰值功率高达150 MW。2011年Hu等^[112]又采用掺Yb³⁺的18芯DC-LMA-PCF作为功率放大级增益介质实现了MOPA系统, 经过光栅压缩后, 直接获得了脉冲宽度为80 fs、重复频率为50 MHz、脉冲能量为1 μJ 的激光输出。

本课题组的实验结果表明, MC-PCF是发展高功率/高能量飞秒激光器的有效技术手段之一。此外, 2010年Eidam等^[113,114]报道了一种采用由微纳细丝集束构成增益芯的多芯双包层光纤(模场直径/内包层直径为27 μm /500 μm)作为功率放大级增益介质的三级CPA系统, 最终实现了830 W的平均功率、640 fs的脉冲宽度、78 MHz的重复频率的最高平均功率输出。

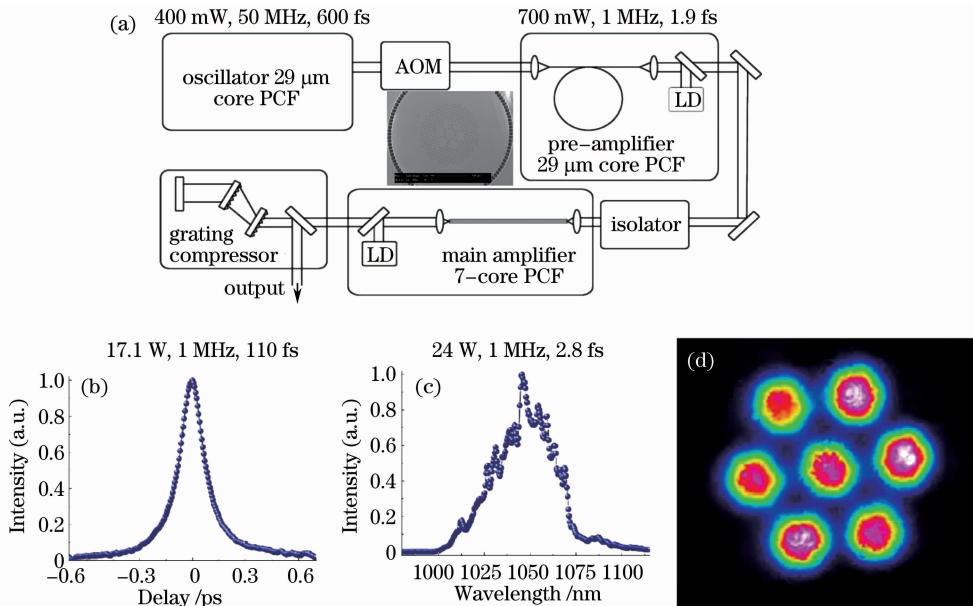


图8 (a)基于Yb-DC-MC-PCF的全PCF飞秒激光放大器实验装置;(b)自相关曲线;(c)光谱曲线;(d)近场光斑分布

Fig. 8 (a) Experimental setup all-PCF femtosecond laser amplification system with Yb-DC-MC-PCF as power amplification; (b) autocorrelation traces; (c) spectra curves; (d) distribution of beam profile in near-field

上述高功率/高能量的PCF飞秒激光系统已经在许多前沿技术领域得到了应用, 本课题组实现了高功率超连续产生^[21]、高功率超快太赫兹产生^[115]、高功率超快深紫外产生^[116]、高速微纳加工^[82]; 最近国际上由此在一个倍频程的超宽带光参量啾啾脉冲放大(OPCPA)中实现了载波包络相位稳定的22 W、5 fs光脉冲^[117]。

4 结 论

由于PCF具有许多独有特性, 使其在飞秒激光领域有着广泛的应用。以PCF为主线, 分别介绍了基于非增益型和增益型PCF飞秒激光技术的主要

实验研究进展。包括飞秒超连续产生、高功率激光传输、光谱展宽与脉冲压缩、非线性频率变换、高功率飞秒激光振荡器、高功率/高能量飞秒激光放大器等。

从基础科学和工业应用需求来看, 高功率超宽带飞秒白光光源、基于非线性频率变换的精密光谱技术(光学频率梳技术)、高重复频率(千赫兹至兆赫兹)/高平均功率(千瓦)/高峰值功率(吉瓦)/高脉冲能量(毫焦)的飞秒激光系统、以及上述技术的应用, 是PCF飞秒激光技术的主要发展方向。

PCF飞秒激光技术的核心是PCF, 经过十几年的发展, 已经取得了丰富的科学和实用的成果。但是从科学和应用发展对PCF的各种需求上看, 研制

出性能可靠、特点鲜明、满足应用的 PCF 和辅助器件仍然有技术和市场瓶颈。相信在不远的将来,通过继续深入研究,加强技术交流与合作,这些瓶颈一定能够被打突破。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight. Photonic crystal fibres [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 847~851
- 2 P. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 3 J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks *et al.*. Photonic band gap guidance in optical fibers[J]. *Science*, 1998, **282**(5393): 1476~1478
- 4 F. Luan, A. K. George, T. D. Hedley *et al.*. All-solid photonic bandgap fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(20): 2369~2371
- 5 N. M. Litchinitser, A. K. Abeeluck, C. Headley *et al.*. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(18): 1592~1594
- 6 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
- 7 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
- 8 P. St. J. Russell. Photonic-crystal fibers[J]. *J. Lightwave Tech.*, 2006, **24**(12): 4729~4749
- 9 Yanfeng Li, Minglie Hu, Lu Chai *et al.*. Enhanced nonlinear effects in photonic crystal fibers[J]. *Front. Phys. China*, 2006, **1**(2): 160~170
- 10 Hu Minglie, Song Youjian, Liu Bowen *et al.*. Development and advanced applications of femtosecond photonic crystal fiber laser technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1660~1670
胡明列, 宋有建, 刘博文等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展及其前沿应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1660~1670
- 11 P. St. J. Russell. Photonic crystal fibers: a historical account [J]. *IEEE Lasers & Electro-Optics Society Newsletter*, 2007, **21**(5): 11~15
- 12 A. Apolonski, B. Povazay, A. Unterhuber *et al.*. Spectral shaping of supercontinuum in a cobweb photonic-crystal fiber with sub-20-fs pulses[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9): 2165~2170
- 13 A. M. Zheltikov. Let there be white light: supercontinuum generation by ultrashort laser pulses [J]. *Physics Uspekhi*, 2006, **49**(6): 605~628
- 14 B. Schenkel, R. Paschoyia, U. Keller. Pulse compression with supercontinuum generation in microstructure fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(3): 687~693
- 15 O. Cohen, J. S. Lundeen, B. J. Smith *et al.*. Tailored photon-pair generation in optical fibers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(12): 123603
- 16 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
- 17 J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, **78**(4): 1135~1184
- 18 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66
王清月, 胡明列, 柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66
- 19 P. Domachuk, N. A. Wolchover, M. Cronin-Golomb *et al.*. Over 4000 nm bandwidth of mid-IR supercontinuum generation in sub-centimeter segments of highly nonlinear tellurite PCFs[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(10): 7161~7168
- 20 S. P. Stark, J. C. Travers, P. St. J. Russell. Extreme supercontinuum generation to the deep UV [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(5): 770~772
- 21 X. H. Fang, M. L. Hu, L. L. Huang *et al.*. Multiwatt octave-spanning supercontinuum generation in multicore photonic-crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(12): 2292~2294
- 22 Fang Xiaohui, Hu Minglie, Li Yanfeng *et al.*. Numerical analysis for structure optimization of Seven-core photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(4): 2495~2500
方晓惠, 胡明列, 栗岩峰等. 七芯光子晶体光纤结构优化的数值分析[J]. *物理学报*, 2009, **58**(4): 2495~2500
- 23 X. H. Fang, M. L. Hu, Y. F. Li *et al.*. Hybrid multicore photonic-crystal fiber for in-phase supermode selection[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(4): 493~495
- 24 C. K. Nielsen, K. G. Jespersen, S. R. Keiding. A 158 fs 5.3 nJ fiber-laser system at 1 μm using photonic bandgap fibers for dispersion control and pulse compression [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13): 6063~6068
- 25 A. Isomäki, O. G. Okhotnikov. All-fiber ytterbium soliton mode-locked laser with dispersion control by solid-core photonic bandgap fiber[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(10): 4368~4373
- 26 A. Bétourné, A. Kudlinski, G. Bouwmans *et al.*. Control of supercontinuum generation and soliton self-frequency shift in solid-core photonic bandgap fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(20): 3083~3085
- 27 B. W. Liu, M. L. Hu, X. H. Fang *et al.*. Tunable bandpass filter with solid-core photonic bandgap fiber and bragg fiber[J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2008, **20**(8): 581~583
- 28 B. Hitz. Easy-to-tune all-fiber bandpass filter [J]. *Photonics Spectra*, 2008, **94**(6), <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=33897>
- 29 F. Benabid, F. Couny, J. C. Knight *et al.*. Compact, stable and efficient all-fiber gas cells using hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2005, **434**(7032): 488~491
- 30 G. Humbert, J. C. Knight, G. Bouwmans *et al.*. Hollow core photonic crystal fibers for beam delivery [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(8): 1477~1484
- 31 D. G. Ouzounov, F. R. Ahmad, D. Müller *et al.*. Generation of megawatt optical solitons in hollow-core photonic band-gap fibers[J]. *Science*, 2003, **301**(5640): 1702~1704
- 32 F. Luan, J. C. Knight, P. St. J. Russell *et al.*. Femtosecond soliton pulse delivery at 800 nm wavelength in hollow-core photonic bandgap fibers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5): 835~840
- 33 P. J. Mosley, W. C. Huang, M. G. Welch *et al.*. Ultrashort pulse compression and delivery in a hollow-core photonic crystal fiber at 540 nm wavelength [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(21): 3589~3591
- 34 Y. Y. Wang, X. Peng, M. Alharbi *et al.*. Design and fabrication of hollow-core photonic crystal fibers for high-power ultrashort pulse transportation and pulse compression [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(15): 3111~3113
- 35 J. Limpert, T. Schreiber, S. Nolte *et al.*. All fiber chirped-pulse amplification system based on compression in air-guiding photonic bandgap fiber [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(24): 3332~3337
- 36 Liu Bowen, Wang Qingyue, Xu Bo *et al.*. Femtosecond pulse compression through hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 620~624
刘博文, 王清月, 徐博等. 基于中空光子带隙光纤的飞秒激光脉冲压缩[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 620~624
- 37 R. F. Cregan, J. C. Knight, P. St. J. Russell *et al.*. Distribution of spontaneous emission from an Er^{3+} -doped photonic crystal fiber[J]. *J. Lightwave Tech.*, 1999, **17**(11): 2138~2141
- 38 W. J. Wadworth, J. C. Knight, W. H. Reeves *et al.*. Yb^{3+} -doped photonic crystal fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2000,

- 36(17): 1452~1454
- 39 N. Madsching, P. Kadwani, R. A. Sims *et al.*. Lasing in thulium-doped polarizing photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(19): 3873~3875
- 40 M. Moenster, P. Was, G. Steinmeyer *et al.*. Mode-locked Nd-doped microstructure fiber laser[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2004. CThX4
- 41 I. Razdobreev, H. El. Hamzaoui, L. Bigot *et al.*. Optical properties of bismuth-doped silica core photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(19): 19479~19484
- 42 J. C. Knight. Photonic crystal fibers and fiber lasers (invited)[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1661~1668
- 43 Chai Lu, Hu Minglie, Li Yanfeng *et al.*. The new generation high-power photonic crystal femtosecond lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(2): 48~50
- 柴路, 胡明列, 栗岩峰等. 新一代大功率光子晶体光纤飞秒激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(2): 48~50
- 44 J. Limpert, F. Röser, T. Schreiber *et al.*. High-power ultrafast fiber laser systems[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2006, **12**(2): 233~244
- 45 K. Furusawa, T. M. Monro, P. Petropoulos *et al.*. Modelocked laser based on ytterbium doped holey fibre[J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(9): 560~561
- 46 M. Moenster, P. Glas, G. Steinmeyer *et al.*. Femtosecond neodymium-doped microstructure fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(21): 8671~8677
- 47 M. Moenster, P. Glas, R. Iliew *et al.*. Microstructure fiber soliton laser[J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2006, **18**(23): 2502~2504
- 48 A. Isomäki, O. G. Okhotnikov. Femtosecond soliton mode-locked laser based on ytterbium-doped photonic bandgap fiber[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9238~9243
- 49 C. M. Ouyang, L. Chai, M. L. Hu *et al.*. Impact of spectral filtering on a weak breathing laser based on AS-Yb-PBGF with large net normal dispersion cavity[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(23): 5846~5850
- 50 C. Lecaplain, L. Rasoloniaina, J. Michaud *et al.*. Mode-locked all-solid photonic bandgap fiber laser[C]. Advanced Solid-State Photonics (ASSP), 2011. ATuB11
- 51 C. Lecaplain, L. Rasoloniaina, O. N. Egorova *et al.*. Mode-locked all-solid photonic bandgap fiber laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2012, **107**(2): 4939~4941
- 52 J. H. V. Price, K. Furusawa, T. M. Monro *et al.*. Tunable, femtosecond pulse source operating in the range 1.06~1.33 μm based on an Yb³⁺-doped holey fiber amplifier[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(6): 1286~1294
- 53 W. J. Wadsworth, R. M. Percival, G. Bouwmans *et al.*. High power air-clad photonic crystal fibre laser[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(1): 48~53
- 54 J. Limpert, O. Schmidt, J. Rothhardt *et al.*. Extended single-mode photonic crystal fiber lasers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2715~2720
- 55 K. Furusawa, A. Malinowski, J. H. V. Price *et al.*. Cladding pumped ytterbium-doped fiber laser with holey inner and outer cladding[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 714~720
- 56 T. Schreiber, F. Röser, O. Schmidt *et al.*. Stress-induced single-polarization single-transverse mode photonic crystal fiber with low nonlinearity[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7621~7630
- 57 J. Limpert, T. Schreiber, S. Nolte *et al.*. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(7): 818~823
- 58 NKT Photonics[OL]. <http://www.nktphotonics.com>
- 59 J. C. Knight. Photonic crystal fibers and fiber lasers (invited)[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1661~1668
- 60 D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson. High power fiber lasers; current status and future perspectives (invited)[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(11): 63~92
- 61 B. Ortaç, J. Limpert, A. Tünnermann. High-energy femtosecond Yb-doped fiber laser operating in the anomalous dispersion regime[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2149~2151
- 62 C. Lecaplain, C. Chédot, A. Hideur *et al.*. High-power all-normal-dispersion femtosecond pulse generation from a Yb-doped large-mode-area microstructure fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(18): 2738~2740
- 63 B. Ortaç, C. Lecaplain, A. Hideur *et al.*. Passively mode-locked single-polarization microstructure fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 2122~2128
- 64 C. Lecaplain, B. Ortaç, A. Hideur. High-energy femtosecond pulses from a dissipative soliton fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(23): 3731~3733
- 65 S. Lefrançois, K. Kieu, Y. Deng *et al.*. Scaling of dissipative soliton fiber lasers to megawatt peak powers by use of large-area photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(10): 1569~1571
- 66 M. Baumgartl, B. Ortaç, C. Lecaplain *et al.*. Sub-80 fs dissipative soliton large-mode-area fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(13): 2311~2313
- 67 Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Large-mode-area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1603~1607
- 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): 1603~1607
- 68 Y. J. Song, M. L. Hu, C. L. Wang *et al.*. Environmentally stable, high pulse energy Yb-doped large-mode-area photonic crystal fiber laser operating in the soliton-like regime[J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2008, **20**(13): 1088~1090
- 69 Y. J. Song, M. L. Hu, C. Zhang *et al.*. High pulse energy femtosecond large-mode-area photonic crystal fiber laser[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2008, **53**(23): 3741~3745
- 70 Y. J. Song, M. L. Hu, C. L. Gu *et al.*. Mode-locked Yb-doped large-mode-area photonic crystal fiber laser operating in the vicinity of zero cavity dispersion[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, **7**(3): 230~235
- 71 Zhang Dapeng, Hu Minglie, Xie Chen *et al.*. A high power photonic crystal fiber laser oscillator based on nonlinear polarization rotation mode-locking[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(4): 044206
- 张大鹏, 胡明列, 谢辰等. 基于非线性偏振旋转锁模的高功率光子晶体光纤飞秒激光振荡器[J]. 物理学报, 2012, **61**(4): 044206
- 72 C. Xie, M. L. Hu, D. P. Zhang *et al.*. Generation of 25-fs high energy pulses by SPM-induced spectral broadening in a photonic crystal fiber laser system[J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2012, **24**(7): 551~553
- 73 L. Shah, Z. Liu, I. Hartl *et al.*. High energy femtosecond Yb cubicon fiber amplifier[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(12): 4717~4722
- 74 F. Röser, J. Rothhardt, B. Ortaç *et al.*. 131 W 220 fs fiber laser system[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(20): 2754~2756
- 75 F. Röser, D. Schimpf, O. Schmidt *et al.*. 90 W average power 100 J energy femtosecond fiber chirped-pulse amplification system[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15): 2230~2232
- 76 T. Eidam, F. Röser, O. Schmidt *et al.*. 57 W, 27 fs pulses from a fiber laser system using nonlinear compression[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **92**(1): 9~12
- 77 T. Eidam, S. Hädrich, F. Röser *et al.*. A 325-W-average-power fiber CPA system delivering sub-400 fs pulses[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2009, **15**(1): 187~190
- 78 T. Schreiber, C. K. Nielsen, B. Ortaç *et al.*. Microjoule-level all-polarization-maintaining femtosecond fiber source[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(5): 574~576
- 79 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Sub-100 fs high power Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber laser amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(11): 6921~6925
- 刘博文, 胡明列, 宋有建等. 亚百飞秒高功率掺镱大模面积光

- 子晶体光纤飞秒激光放大器的实验研究[J]. 物理学报, 2008, **57**(11): 6921~6925
- 80 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. 39 fs, 16 W all photonic crystal fiber laser system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 811~814
- 刘博文, 胡明列, 宋有建 等. 39 fs, 16 W 全光子晶体光纤飞秒激光系统[J]. 中国激光, 2008, **35**(6): 811~814
- 81 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Photonic crystal fiber femtosecond laser amplifier with millijoules and 100 fs level output[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2415~2418
- 刘博文, 胡明列, 宋有建 等. 微焦耳、百飞秒光子晶体光纤飞秒激光放大器[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2415~2418
- 82 B. W. Liu, M. L. Hu, X. H. Fang *et al.*. High-power wavelength-tunable photonic-crystal-fiber-based oscillator-amplifier-frequency shifter femtosecond laser system and its applications for material microprocessing [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(1): 44~48
- 83 C. Xie, B. W. Liu, H. L. Niu *et al.*. Vector-dispersion compensation and pulse pedestal cancellation in a femtosecond nonlinear amplification fiber laser system[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(21): 4149~4151
- 84 J. Limpert, F. Röser, D. N. Schimpf *et al.*. High repetition rate gigawatt peak power fiber laser systems; challenges, design, and experiment[J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2009, **15**(1): 159~169
- 85 J. Limpert, N. Deguil-Robin, I. Manek-Hönninger *et al.*. High-power rod-type photonic crystal fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(4): 1055~1058
- 86 B. Ortaç, O. Schmidt, T. Schreiber *et al.*. High-energy femtosecond Yb-doped dispersion compensation free fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(17): 10725~10732
- 87 B. Ortaç, M. Baumgartl, J. Limpert *et al.*. Approaching microjoule-level pulse energy with mode-locked femtosecond fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1585~1587
- 88 C. Lecaplain, B. Ortaç, G. Machinet *et al.*. High-energy femtosecond photonic crystal fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **35**(19): 3156~3158
- 89 F. Röser, T. Eidam, J. Rothhardt *et al.*. Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber chirped-pulse amplification system [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(24): 3495~3497
- 90 J. Bouillet, Y. Zaouter, J. Limpert *et al.*. High-order harmonic generation at a megahertz-level repetition rate directly driven by an ytterbium-doped-fiber chirped-pulse amplification system[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(9): 1489~1491
- 91 C. J. Saraceno, O. H. Heckl, C. R. E. Baer *et al.*. Pulse compression of a high-power thin disk laser using rod-type fiber amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(2): 1395~1407
- 92 Y. Zaouter, D. N. Papadopoulos, M. Hanna *et al.*. Stretcher-free high energy nonlinear amplification of femtosecond pulses in rod-type fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(2): 107~109
- 93 C. Jauregui, T. Eidam, J. Limpert *et al.*. Impact of modal interference on the beam quality of high-power fiber amplifiers [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(4): 3258~3271
- 94 J. Limpert, F. Stutzki, F. Jansen *et al.*. Yb-doped large-pitch fibres; effective single-mode operation based on higher-order mode delocalization[J]. *Light: Science & Applications*, 2012, **1**(8): 1~5
- 95 F. Jansen, F. Stutzki, H. J. Otto *et al.*. The influence of index-depressions in core-pumped Yb-doped large pitch fibers [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(26): 26834~26842
- 96 F. Stutzki, F. Jansen, T. Eidam *et al.*. High average power large-pitch fiber amplifier with robust single-mode operation[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(5): 689~691
- 97 M. Baumgartl, F. Jansen, F. Stutzki *et al.*. High average and peak power femtosecond large-pitch photonic-crystal-fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(2): 244~246
- 98 M. Baumgartl, C. Lecaplain, A. Hidear *et al.*. 66 W average power from a microjoule class sub-100 fs fiber oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **37**(10): 1640~1642
- 99 T. Eidam, J. Rothhardt, F. Stutzki *et al.*. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(1): 255~260
- 100 P. K. Cheo, A. Liu, G. G. King. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array [J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2001, **13**(5): 439~441
- 101 Y. Hu, P. K. Cheo, G. G. King. Fundamental mode operation of a 19-core phaselocked Yb-doped fiber amplifier[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6230~6239
- 102 P. M. Blanchard, J. G. Burnett, G. R. G. Erry *et al.*. Two-dimensional bend sensing with a single, multi-core optical fibre [J]. *Smart Mater. Struct.*, 2000, **9**(2): 132~140
- 103 L. Michaille, C. R. Bennett, D. M. Taylor *et al.*. Phase locking and supermode selection in multicore photonic crystal fiber lasers with a large doped area[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(13): 1668~1670
- 104 L. Michaille, D. M. Taylor, C. R. Bennett *et al.*. Characteristics of a Q-switched multicore photonic crystal fiber laser with a very large mode field area[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(1): 72~74
- 105 L. Michaille, C. R. Bennett, D. M. Taylor *et al.*. Multicore photonic crystal fiber lasers for high power/energy applications [J]. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 2009, **15**(2): 328~336
- 106 C. C. Wang, F. Zhang, R. Geng *et al.*. Photonic crystal fiber for fundamental mode operation of multicore fiber lasers and amplifiers[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(21): 5364~5371
- 107 A. Mafi, J. V. Moloney. Shaping modes in multicore photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2005, **17**(2): 348~350
- 108 X. H. Fang, M. L. Hu, Y. F. Li *et al.*. Spatially flat in-phase supermode in multicore hybrid photonic crystal fiber[J]. *J. Lightwave Tech.*, 2011, **29**(22): 3428~3432
- 109 X. H. Fang, M. L. Hu, Y. F. Li *et al.*. Numerical analysis of mode locking in multi-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2010, **55**(18): 1864~1869
- 110 X. H. Fang, M. L. Hu, C. Xie *et al.*. High pulse energy mode-locked multicore photonic crystal fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 1005~1007
- 111 X. H. Fang, M. L. Hu, B. W. Liu *et al.*. Generation of 150 MW, 110 fs pulses by phase-locked amplification in multicore photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(14): 2326~2328
- 112 M. L. Hu, X. H. Fang, B. W. Liu *et al.*. Multicore photonic-crystal-fiber platform for high-power all-fiber ultrashort-pulse sources[J]. *J. Modern Optics*, 2011, **58**(21): 1966~1970
- 113 T. Eidam, S. Hanf, E. Seise *et al.*. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(2): 94~96
- 114 A. Tünnermann, T. Schreiber, J. Limpert. Fiber lasers and amplifiers: an ultrafast performance evolution[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(25): 71~78
- 115 F. Liu, Y. J. Song, Q. R. Xing *et al.*. Broadband terahertz pulses generated by a compact femtosecond photonic crystal fiber amplifier[J]. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 2010, **22**(11): 814~816
- 116 H. G. Liu, M. L. Hu, B. W. Liu *et al.*. Compact high-power multiwavelength photonic-crystal-fiber-based laser source of femtosecond pulses in the infrared-visible-ultraviolet range[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(11): 2284~2289
- 117 J. Rothhardt, S. Demmler, S. Hädrich *et al.*. Octave-spanning OPCPA system delivering CEP-stable few-cycle pulses and 22 W of average power at 1 MHz repetition rate[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(10): 10870~10878