

高功率超连续谱光源研究进展与关键技术分析

侯静 陈胜平 陈子伦 王泽锋 张斌 宋锐

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 随着特种光纤制造工艺与高亮度激光二极管抽运技术的发展,超连续谱输出平均功率得到快速提升,目前已超过百瓦。在简要介绍国内外高功率超连续谱光源研究概况的基础上,分析了高功率超连续谱光源的关键技术,介绍了国防科学技术大学近几年在高功率超连续谱光源方面所做的相关工作:利用脉冲光纤激光器抽运国产光子晶体光纤取得平均功率为 101 W 的超连续谱输出;采用大模面积双包层光纤放大器直接输出超连续谱方案,得到 177 W 近红外超连续谱输出;利用 2 μm 脉冲光抽运 ZBLAN 光纤,获得 10 W 中红外超连续谱输出。

关键词 非线性光学;超连续谱;高功率;非线性;光子晶体光纤

中图分类号 O437; TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.080010

Recent Developments and Key Technology Analysis of High Power Supercontinuum Source

Hou Jing Chen Shengping Chen Zilun Wang Zefeng Zhang Bin Song Rui

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract With the development of special fiber fabrication technology and the pumping technology with high brightness laser diode, the average output power of supercontinuum source increases dramatically to hundred watt level in recent years. Based on the introduction of recent developments in high power supercontinuum fiber source, the key technologies of high power supercontinuum generation are analyzed. The up-to-date progress on high power supercontinuum fiber source in the National University of Defense Technology is presented: 101 W supercontinuum average output power is extracted from a homemade photonic crystal fiber by using a pulsed fiber laser as the pump; 177 W near-infrared supercontinuum power is obtained directly from a large-mode-area double-cladding fiber amplifier; 10 W mid-infrared supercontinuum is achieved from a ZBLAN fiber with a 2 μm pulse pump.

Key words nonlinear optics; supercontinuum; high power; nonlinearity; photonic crystal fiber

OCIS codes 190.4370; 320.6629; 140.3510

1 引言

近年来,高亮度激光二极管抽运技术的发展以及光纤拉制工艺水平的提高,使高功率光纤激光器的诞生成为可能^[1],也推动了高功率超连续谱光源的发展。超连续谱光源,俗称白光激光器,具有传统宽带光源的宽光谱特性和激光光源的高空间相干性,在基础科学研究、光学检测、光纤通信等众多领域有着广泛的应用潜力^[2]。超连续谱的产生是激光与非线性介质相互作用的结果:窄带激光在非线性介质中传输时,在介质的色散和各种非线性效应综合作用下,入射激光的光谱被大范围连续展宽,从而形成超连续谱。导致超连续谱产生的非线性效应主要包括自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)、受激拉曼散射(SRS)以及孤子自频移(SSFS)等。在光谱展宽的初始阶段,根据入射激光和非线性介质的特性,理论上可以预测某一种或几种非线性效应会占据主导作用,实验中也可观察和区分各种不同的非线性效应。但是,在光谱展宽的后期,参与光谱展宽的非线性效应增多,多种非线性效应同时作用将光谱大范围连续展宽,导致

收稿日期: 2013-06-20; **收到修改稿日期**: 2013-06-26; **网络出版日期**: 2013-07-22

基金项目: 科技部国际科技合作专项(2012DFG11470)、湖南省杰出青年基金(12JJ1010)

作者简介: 侯静(1975—),女,研究员,博士生导师,主要从事光纤激光及光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: houjing25@sina.com

从实验上较难区分某种非线性效应的单独影响。采用传统硅基光纤可以产生覆盖整个可见光和近红外波段的超连续谱,通过改变产生超连续谱的介质材料,还能将超连续谱的光谱范围进一步扩展至近紫外和中红外波段。

最早的超连续谱现象是在块状介质中观察到的^[3-4],其形成机制主要是自相位调制,要求光源能够产生高密度的聚焦光束,且需要较长的作用距离。由于光束在块状介质中的衍射效应使得作用距离受限,要产生较好的超连续谱就必然要求光源具有极高的峰值功率,这成为早期产生超连续谱的一个难点。光纤的出现解决了这一难题,光纤良好的光束约束能力极大地提高了激光与物质的相互作用距离,降低了超连续谱产生对光源的要求,中等峰值功率的脉冲光甚至是连续光都可以在光纤中转化为超连续谱^[5]。随着实现难度的降低,超连续谱的研制步伐更快,应用范围更广。用于产生超连续谱的光纤除了需要具有较高的非线性系数外,还需要具有特定的色散曲线,以满足产生超连续谱的各种非线性效应的相位匹配条件。普通光纤由于结构单一,色散曲线的改变范围十分有限,从而限制了其输出超连续谱的能力。光子晶体光纤(PCF)由于结构设计灵活,满足高非线性和色散特性灵活可控这两方面的要求,是产生超连续谱的理想介质,为实现高性能超连续谱提供了一条非常有效的途径,掀起了超连续谱的研究热潮,推动了超连续谱的快速发展^[6]。

经过十多年的发展,不同光谱范围、不同功率水平的超连续谱层出不穷。目前的研究工作主要集中在超连续谱光源特性的细化与应用研究、超连续谱光谱控制研究以及输出功率的进一步提升。超连续谱产生是多种非线性效应综合作用的结果,光纤介质中对激光功率密度的要求较高,这就要求光纤芯径不能太大,从而限制了超连续谱输出功率的提升。通常,瓦量级的输出功率在超连续谱光源中已经属于较高的功率水平,目前商品化超连续谱光源的最高输出功率即在数瓦量级。然而,最近几年的技术进步和方案创新使几十瓦甚至上百瓦超连续谱的产生成为可能^[7-8]。本文围绕是什么样的技术和方案实现了这一惊人的超连续谱输出功率这一问题展开论述,结合国内外在高功率超连续谱光源方面的最新研究进展,分析了这些高功率超连续谱光源的关键技术,并详细介绍了国防科学技术大学近几年在高功率超连续谱光源方面所开展的研究工作。

2 高功率超连续谱光源国内外研究概况

正如激光器的输出功率决定了其应用领域范围一样,超连续谱的输出功率水平也决定了其应用领域范围,从超连续谱光源诞生的那一刻起,人们就没有停止过对其输出功率提升的追求。特别是近十年来各国研究者对高功率超连续谱光源方面的研究给予了极大关注,超连续谱的输出功率水平取得了快速发展。

2.1 国外高功率超连续谱光源研究概况

国外开展高功率超连续谱光源方面的研究工作相对较早,从2002年起,就陆续有瓦量级、10 W量级的超连续谱报道^[9-10]。由于激光器分为连续光与脉冲光两种,首先来看连续光抽运光子晶体光纤产生超连续谱方案。目前国外该方案产生超连续谱的最高输出功率是2008年帝国理工大学报道的50 W^[11],采用一个输出功率432 W、中心波长1.07 μm 、谱宽3.6 nm、随机偏振的商用连续光纤激光器作为抽运源,通过准直、聚焦系统耦合到过渡光纤中,再将过渡光纤的输出端与光子晶体光纤进行熔接。抽运激光器与光子晶体光纤之间的总耦合效率在30%~50%之间,超连续谱的最高输出功率为50 W,光谱范围覆盖1~2 μm 。通过改变所用光子晶体光纤的类型,还可以得到光谱范围覆盖0.6~1.9 μm 、输出平均功率为28 W的超连续谱。

连续光纤激光器抽运光子晶体光纤产生超连续谱方案的优势在于连续光纤激光器输出功率较高,技术比较成熟并且已经实现商品化,所以该方案产生超连续谱的输出功率也相对较高。与脉冲光抽运光子晶体光纤产生超连续谱方案相比,连续抽运源到超连续谱的转换效率相对较低,而且需要较长的光子晶体光纤,光谱范围的控制也比较困难。虽然该报道距今已经有五年时间,但目前还未商品化或进入实用状态。脉冲光抽运光子晶体光纤产生超连续谱方案中抽运光到超连续谱的转换效率较高,超连续谱的光谱控制相对容易,比较适合商业应用。目前,国内外已有厂家销售瓦量级的超连续谱光源,如英国的Fianium公司、丹麦的NKT Photonics、国内的武汉安扬激光等,采用的均是脉冲光抽运光子晶体光纤方案。

脉冲光抽运光子晶体光纤产生超连续谱方案的技术难点在于高平均功率短脉冲抽运源的研制。由于非线性效应和光纤损伤的限制,脉冲光纤激光器输出平均功率的提升难度较大。目前国外脉冲光抽运光子晶体光纤产生超连续谱方案的最高输出功率是2010年英国南安普顿大学报道的39 W^[12],以平均输出功率为100 W的

皮秒脉冲光纤激光器作为抽运源,经过透镜和激光隔离装置耦合到光子晶体光纤中,得到光谱范围覆盖 400~2250 nm、输出平均功率为 39 W 的超连续谱。与帝国理工大学采用 400 W 连续光抽运得到 50 W 超连续谱输出相比,南安普顿大学采用 100 W 皮秒脉冲抽运得到 39 W 超连续谱输出,不仅系统的转换效率更高,而且产生超连续谱的光谱范围更广,所以脉冲光抽运光子晶体光纤方案在超连续谱光源中应用得更加广泛。

虽然国外的研究机构 5 年前便实现了输出功率高达 50 W 的超连续谱光源,但是,之后没有更高功率的实验报道。究其原因,主要在于他们的高功率超连续谱光源中含有空间耦合部分,没能实现全光纤化,系统转换效率较低,这正是制约超连续谱光源输出功率进一步提高的瓶颈之一。

2.2 国内其它单位高功率超连续谱光源研究概况

在国内,很多单位都对超连续谱光源开展了相关的研究工作,以关键词“超连续谱”在 CNKI 文献总库中搜索,仅硕士和博士学位论文就超过百篇,足见国内研究人员对超连续谱研究的重视程度。但是,多数研究集中在百毫瓦以下的低输出功率上,实现 10 W 量级输出功率的单位只有少数几家。首先来看连续光抽运光子晶体光纤产生超连续谱方案,国内关于该方案的报道相对国外而言比较少。2010 年,深圳大学通过级联光子晶体光纤和高非线性光纤的方法实现了输出平均功率为 8 W、10 dB 光谱宽度为 420 nm 的超连续谱,当没有级联高非线性光纤时,光子晶体光纤直接输出超连续谱的平均功率为 10.3 W,对应 10 dB 光谱宽度为 360 nm^[13]。

下面来看脉冲光抽运光子晶体光纤产生超连续谱方案,国内关于该方案的报道比较多。2010 年,天津大学利用输出功率为 11 W 的掺镱飞秒激光器抽运光子晶体光纤,实现了输出平均功率为 3.95 W、光谱范围覆盖 500~1750 nm 的超连续谱^[14]。2012 年,该小组又用输出平均功率为 14.7 W 的飞秒脉冲抽运光子晶体光纤,得到了输出平均功率为 7.45 W、光谱范围覆盖 650~1750 nm 的超连续谱^[15]。2011 年,北京工业大学采用自主研发的超短脉冲激光器抽运国产光子晶体光纤,实现了平均功率为 8.14 W 的全光纤超连续谱光源,光谱范围覆盖 450~1700 nm^[16]。2011 年,深圳大学利用自主研发的高功率皮秒光纤激光器抽运国产光子晶体光纤,实现了输出平均功率为 5 W 的超连续谱,光谱范围覆盖 600~1700 nm,系统抽运光-超连续谱的转换效率为 24%^[17]。同年,中国科学院西安光学精密机械研究所利用百瓦皮秒掺镱光纤激光器抽运光子晶体光纤实现了输出平均功率为 49.8 W 的超连续谱^[18],光谱范围覆盖 500~1700 nm,整个光谱范围内系统工作在基模模式下。随后该小组又报道了输出平均功率为 89.5 W 的超连续谱^[7],光谱范围不变,平均功率谱密度大于 26 mW/nm。

3 高功率超连续谱光源关键技术分析

从以上介绍的高功率超连续谱光源的发展概况可以看出,虽然国内关于高功率超连续谱的研究起步相对较晚,但超连续谱的输出功率水平超过了国外,并至今保持领先态势。下面对高功率超连续谱光源的关键技术进行介绍和分析。

3.1 高功率高光束质量全光纤脉冲激光器技术

在高功率超连续谱光源的公开报道中,抽运激光器的功率水平是限制超连续谱输出功率进一步提高的重要因素。抽运激光器是超连续谱产生的核心部分之一,其输出功率水平一定程度上决定了超连续谱的最终输出功率。为了使超连续谱光源具有较宽的光谱和较高的转换效率,通常采用短脉冲光纤激光器作为超连续谱的抽运源。由于非线性效应和光纤损伤的限制,短脉冲光纤激光器输出平均功率的提升难度较大,这是获得高功率超连续谱输出首先需要解决的问题。国防科学技术大学研制的超连续谱光源输出功率水平能够超越国外,其中一个很重要的原因就是成功研制出百瓦级高功率短脉冲光纤激光器^[19-21]。

超连续谱产生过程中需要尽可能激发和利用非线性效应,而高功率短脉冲光纤激光器需要抑制和避免非线性效应。由于非线性效应的强弱与材料非线性系数、有效相互作用长度、光功率密度等因素有关,在高功率脉冲光纤激光器中,为了抑制非线性效应,可以通过降低光纤材料的非线性系数、减小有效相互作用长度、降低光功率密度等手段实现。但是,为了使信号光具有足够高的增益,脉冲激光器中所用增益光纤的组分不能随意改变,因而很难降低其非线性系数。而且,增益光纤必须足够长才能得到较高的增益,因此有效相互作用长度也不能太短。降低光功率密度可以通过增加激光器光纤芯面积实现,不过纤芯面积增加到一定尺度后会降

低输出激光的光束质量;此外降低光功率密度也可以通过降低脉冲峰值功率实现,但脉冲的峰值功率必须达到一定水平才能在光子晶体光纤中产生超连续谱。因此,在实际研制高功率脉冲光纤激光器时,各种抑制非线性效应的手段都有一定的局限性,需要综合考虑激光器各参数对非线性效应的抑制效果以及对后续超连续谱产生过程的影响,折中选取最优参数,以得到满足需求的高功率高光束质量脉冲激光输出。

3.2 高功率超连续谱光源的全光纤化技术

从国内超连续谱光源的发展过程可以看出,全光纤化是研制高功率超连续谱光源的关键技术之一,而全光纤化需要解决的问题是实现脉冲光纤激光器输出尾纤与光子晶体光纤之间的低损耗熔接。为了抑制非线性效应,脉冲光纤激光器通常会选用较大模场面积的光纤,而为了激发非线性效应,光子晶体光纤的模场面积通常较小,所以二者模场面积一般相差数倍甚至一个数量级以上。要实现模场面积相差悬殊的两种不同类型光纤的低损耗熔接,并要保证高功率下熔接点的安全和稳定,非常具有挑战性。目前常用的方法有以下三种。

1) 采用光纤拉锥的方法,将激光器大模场面积尾纤以一定比例缓变拉锥成小模场面积光纤,再与小芯径光子晶体光纤进行熔接,从而实现二者的低损耗熔接。这一过程需要保证拉锥区域满足缓变条件,才可将激光器输出大模场低损耗转变成小模场。不过,由于激光器尾纤拉锥过程中纤芯与包层尺寸近似同比例变化,为了保证激光器尾纤纤芯模场与光子晶体光纤模场匹配,有可能拉锥后的光纤与光子晶体光纤包层尺寸会有较大差异,这会增加拉锥后的尾纤与光子晶体光纤的熔接难度。

2) 利用先进的后处理技术对光子晶体光纤进行扩芯处理。通过对光子晶体光纤进行选择性空气孔塌缩,将其纤芯扩展到与大模场激光器尾纤相匹配,再进行低损耗熔接,可以得到低至 0.2 dB 的熔接损耗。这一方法的自由度比较大,不仅可以将模场差别很大的光纤低损耗地熔接在一起,还可以制作出各种类型的全光纤模式转换器。由于该技术难度很大,目前国际上还只有少数几家单位掌握这一技术,在下文中会对这一技术进行比较详细的介绍。

3) 利用过渡光纤。在激光器尾纤与光子晶体光纤之间增加一段过渡光纤,过渡光纤模场面积小于激光器尾纤模场面积并且大于光子晶体光纤模场面积,从而可以减小熔接点两端光纤模场的差别,再结合加热扩芯的方法将小芯径的光纤模场适当扩大后进行熔接,也可以使总熔接损耗相对较低。

上述三种方法所采取的技术手段各不相同,不过,目的和基本原理是一样的,就是要保证整个链路中光场模式处于缓变状态,使激光器输出光场在进入光子晶体光纤的过程中不发生模场突变,从而降低耦合损耗。在实际应用中这三种方法可以单独使用也可以配合使用。只有整个链路均满足模式缓变条件,才能得到高耦合效率,从而保证超连续谱光源在高功率下能够稳定运行。

3.3 高性能光子晶体光纤设计制作技术

光子晶体光纤是产生超连续谱的理想非线性介质,其参数设计是否合理、性能指标是否达到要求,直接关系到能否成功实现高功率超连续谱输出。为了得到高功率超连续谱,要求所用光子晶体光纤在整个超连续谱光谱范围内具有低传输损耗、合理的色散曲线、良好的模式控制特性和耐高功率能力。只有同时满足这几个条件,才能产生高功率、高效率的超连续谱。光子晶体光纤的宽谱低损耗特性是实现高功率超连续谱输出的先决条件,只有在整个超连续谱光谱范围内均具有足够低的损耗,才能保证高功率运转时光纤不会因为热积累而损坏。合理的色散曲线则是保证光子晶体光纤中能够高效率发生非线性转换的前提条件。只有光纤色散曲线设计合理,才能满足诸如四波混频等非线性效应的相位匹配条件和孤子形成条件,从而将光谱展宽。色散曲线中零色散点位置的设计尤其重要。光子晶体光纤的色散曲线和抽运激光特性共同决定了参与光谱展宽的主要非线性效应和最终所能得到的超连续谱光谱宽度。光子晶体光纤的耐高功率能力则是能否得到稳定高功率超连续谱输出的保证,首先是光纤耐高功率脉冲的能力,其次是光纤的耐热能力。即使光子晶体光纤自身的损耗很低,不会因为损耗引起热积累导致光纤损伤,也会存在热积累问题:在超连续谱产生过程中的非线性效应均具有一定的转换效率,其中的能量损耗除了部分会辐射出去,剩余的最终都会转化成热。这就要求光纤材料自身具备一定的耐热能力,再辅以一定的热管理技术,才能保证高功率下系统运转的稳定性和可靠性。

3.4 光纤放大器直接输出超连续谱技术

传统上实现高功率超连续谱采取的主要技术方案是利用高功率大模面积光纤激光器抽运高非线性光子

晶体光纤。如何实现大模场抽运激光器与小芯径光子晶体光纤之间的高效率耦合是这一方案的关键技术之一。虽然通过光纤拉锥、光子晶体光纤后处理技术以及增加过渡光纤的办法能够将激光器尾纤与光子晶体光纤熔接点的损耗降至 0.2 dB 左右,但是,在高功率下,即使 0.2 dB 的损耗所产生的热量也不容忽视,这正是限制这一方案超连续谱输出功率进一步提升的瓶颈所在。

为了解决这一问题,国防科学技术大学提出了在大模场面积双包层光纤(DCF)放大器中直接产生超连续谱的方案,在国际上首次实现了超过 100 W 的超连续谱输出^[8]。该方案中,增益放大过程和级联非线性效应同时发生,二者相互作用导致光谱被大范围连续展宽,从而直接由光纤放大器输出高平均功率超连续谱。产生超连续谱的级联非线性效应发生在光纤放大器中,可以采用大芯径的双包层光纤,相比传统激光器抽运光子晶体光纤方案增益光纤的纤芯直径可以大幅增加,克服了传统方案中小芯径对超连续谱输出功率的限制。同时,由于是光纤放大器直接输出超连续谱,半导体抽运光到超连续谱的转换效率也得到大幅提升。因此,该方案与激光器抽运光子晶体光纤的传统方案相比,能够得到更高功率的超连续谱。但是,由于增益光纤中相位匹配很难满足,这一方案产生的超连续谱通常向长波方向展宽,在短波方向较难产生新的光谱成分。因为所用增益光纤为硅基光纤,零色散点位于 1.3 μm 附近,当采用中心波长为 1.06 μm 的激光进行抽运时,在超连续谱产生初始阶段受激拉曼散射效应发挥主要作用,该效应会使光谱向长波方向展宽。在超连续谱展宽的后期,四波混频和孤子色散波是将超连续谱向可见光区域扩展的主要原因,产生可见光要求在长波端具有满足色散匹配条件的红外成分存在,由于大模面积双包层光纤色散曲线的限制,该方案中较难产生满足色散匹配条件的可见光成分。

4 国防科学技术大学在高功率超连续谱光源方面的研究进展

国防科学技术大学针对高功率超连续谱光源研制的难点,开展了一系列基础研究与技术攻关,主要研究工作涵盖了超连续谱产生的各个过程:脉冲抽运源的研制,包括被动锁模脉冲光纤激光器和高功率脉冲光纤放大器的研制;非线性介质的研究,即光子晶体光纤的设计、特性参数测量与后处理技术研究;超连续谱产生的实验与理论研究,包括可见光波段、近红外波段以及中红外波段超连续谱光源的研制等。

4.1 高功率短脉冲光纤激光器研究

抽运激光器是产生超连续谱的核心部分,其输出功率的大小一定程度上决定了超连续谱最终的输出功率水平,短脉冲激光抽运光子晶体光纤产生超连续谱方案的难点之一即是高平均功率脉冲光纤激光器的研制。由于其具有较高的峰值功率和脉冲能量,高功率短脉冲光纤激光器很难采用一级结构得到较高的平均输出功率,通常采用主振荡功率放大(MOPA)结构,即由主振荡器加上一级或多级放大器组成^[22]。主振荡器是一个低功率的脉冲激光器种子源^[23],用于产生性能优异的种子激光,由于平均功率低,其光束质量、光谱特性、时域特性都较容易控制。放大器对种子光进行功率放大。这种结构结合了低功率种子源的良好脉冲特性与双包层光纤放大器的高功率放大特性,能够在保证高输出光束质量的同时得到高输出功率。

图 1 显示的是百瓦级高功率皮秒脉冲激光器的原理图^[20]。针对激光器中高峰值功率容易引起强非线性效应这一难题,国防科学技术大学设计并研制了重复频率倍增器,将种子源输出脉冲的重复频率从

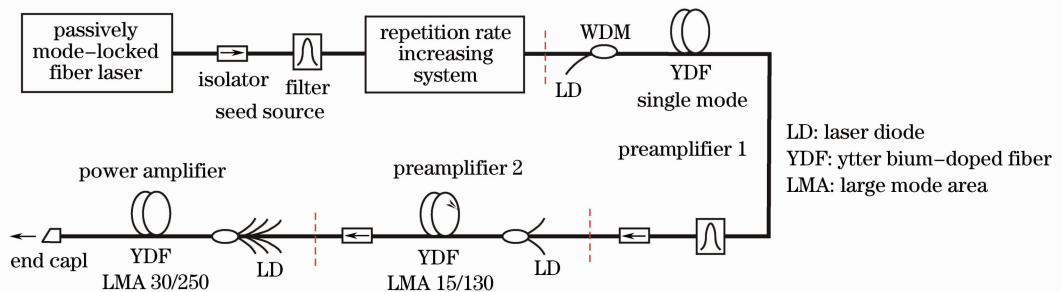


图 1 百瓦级脉冲光纤激光器实验结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the hundred watt level pulsed fiber laser

59.8 MHz提高到 478 MHz,再进行功率放大,有效避免了非线性效应导致的光谱展宽。在略高于 150 W 的抽运功率下,得到 96 W 高平均功率皮秒脉冲输出,输出功率水平当时国际领先。脉冲宽度 16 ps,光束质量因子 $M^2 < 1.5$ 。之后,通过进一步提高激光器的重复频率,国防科学技术大学又研制出输出平均功率为 125 W 的全光纤皮秒脉冲激光器^[21],系统的光-光转换效率高达 86.12%,脉冲重复频率最高达到 1 GHz,最后一级光纤放大器采用增益光纤的纤芯直径为 15 μm 。为了进一步提高脉冲光纤激光器的输出功率水平,优化脉冲输出光谱,在重复频率倍增技术的基础上,结合缩短所用增益光纤长度的方法,国防科学技术大学又研制出输出平均功率为 157 W 的全光纤皮秒脉冲激光器^[19],光谱宽度为 0.6 nm。此外,也开展了长腔锁模纳秒脉冲光纤激光器^[24]和利用电直接调制的增益开关半导体激光器^[25-26]的研究,获得了各种不同脉宽(10 ps至纳秒量级)、不同重复频率(百千赫兹至百兆赫兹)、不同波长(1、1.5、2 μm)的脉冲激光输出^[27-34]。这些工作为高功率超连续谱光源的研制打下了坚实的基础。

4.2 光子晶体光纤后处理技术研究

大模场面积的激光器尾纤与小模场面积的光子晶体光纤间的低损耗熔接是研制高功率超连续谱光源需要解决的最为重要的问题之一。针对这一问题,国防科学技术大学开展了光子晶体光纤后处理技术研究^[35-37]。光子晶体光纤的后处理技术是通过一些特殊的工具改变光纤结构参数从而实现光子晶体光纤潜在应用价值的重要技术手段。光子晶体光纤的后处理技术主要包括拉锥技术、膨胀后拉锥技术和选择性空气孔塌缩技术^[38-39]。利用光子晶体光纤拉锥技术可以在保持空气孔和孔间距不变的情况下改变纤芯的大小,从而可以改变光纤的模场直径、控制光纤的零色散点等。利用膨胀后拉锥技术可以先改变光纤空气孔直径和孔间距的大小,然后通过拉锥改变光纤的芯径,这样就可以根据需要任意改变现有光纤的结构参数从而制作一些光纤器件。光子晶体光纤的选择性空气孔塌缩后处理技术,是利用光纤特殊的空气孔结构选择性地塌缩一个或者几个空气孔,进而改变光纤纤芯形状的一种后处理技术,具体原理见图 2:光子晶体光纤在熔融加热时空气孔受到表面张力的作用塌缩,如果在熔融加热之前增加空气孔的压强,加热时空气孔内高压气体产生的压力将超越空气孔的表面张力而使空气孔膨胀。如果用紫外固化胶堵住光纤一端的几个空气孔,并在堵孔端进行充气,光纤另一端所有的空气孔塌缩密封,空气孔气压达到平衡后,用熔融拉锥机加热一段光子晶体光纤,加热部分为大气压强的空气孔(被堵空气孔)受到表面张力的作用塌缩,其他为充气压强的空气孔(被充气空气孔)由于内部气体的压力大于空气孔的表面张力而膨胀,控制加热区域的加热时间,可以使被堵空气孔恰好完全塌缩,塌缩后的空气孔与原始纤芯形成一个新的芯区,通过逐渐缩短加热区域使没有塌缩和完全塌缩区域之间形成一个过渡区域,使纤芯的变形满足渐变条件,从而降低引入的损耗。

采用光子晶体光纤的选择性空气孔塌缩技术,可以实现光子晶体光纤纤芯的任意变形,制作出具有圆形、方形和环形等形状纤芯的光子晶体光纤^[40-41],如图 3 所示。在研制高功率超连续谱光源的过程中,正是利用这一技术增加了光子晶体光纤激光输入端的模场面积,使之与短脉冲激光器尾纤相匹配,从而实现激光器尾纤到光子晶体光纤间的低损耗熔接,如图 4 所示^[36]。

在上述光子晶体光纤后处理技术的基础上,国防科学技术大学开展了拉锥与级联拉锥光子晶体光纤产生超连续谱的理论和实验研究,利用中心波长为 1064 nm 的脉冲抽运级联拉锥光子晶体光纤,成功将超连续谱的短

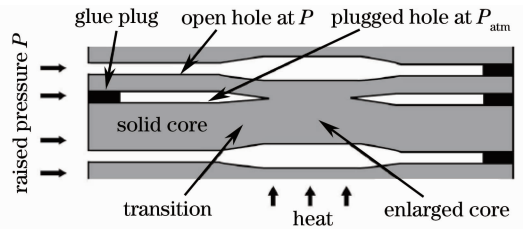


图 2 光子晶体光纤选择性空气孔塌缩原理图

Fig. 2 Schematic diagram of selected hole collapsing of photonic crystal fiber

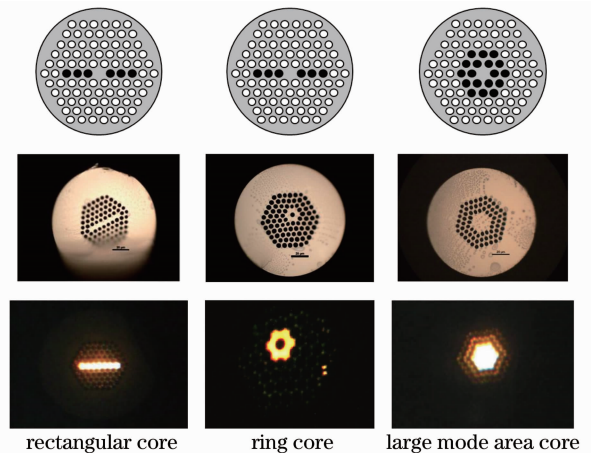


图 3 选择性空气孔塌缩技术制成的各种形状纤芯

Fig. 3 Different cores made by selected hole collapse technology

波扩展至 352 nm^[42]。利用光子晶体光纤后处理技术,国防科学技术大学还设计了一种光子晶体光纤表面等离子体共振(PCF-SPR)折射率传感器^[43-44],如图 5 所示。通过控制光子晶体光纤空气孔的塌缩来控制光子晶体光纤的模场,从而控制纤芯模场与金属表面等离子体模式的共振耦合,计算结果表明对于水性的被分析物,折射率探测灵敏度能够达到 1700 nm/RIU(RIU 为折射率单位)。此外,国防科学技术大学利用光子晶体光纤的选择性空气孔塌缩技术还提出了一种基于选择性液体填充的光子晶体光纤温度传感器^[45],通过测量液体在不同温度下的损耗谱计算液体的温度变化。

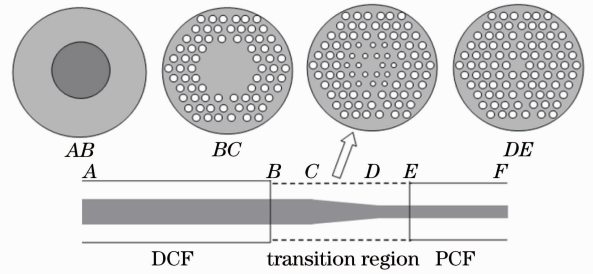


图 4 利用选择性空气孔塌缩技术熔接大芯径双包层光纤与小芯径光子晶体光纤示意图

Fig. 4 Fusion splicing of large core double-cladding fiber with small core photonic crystal fiber

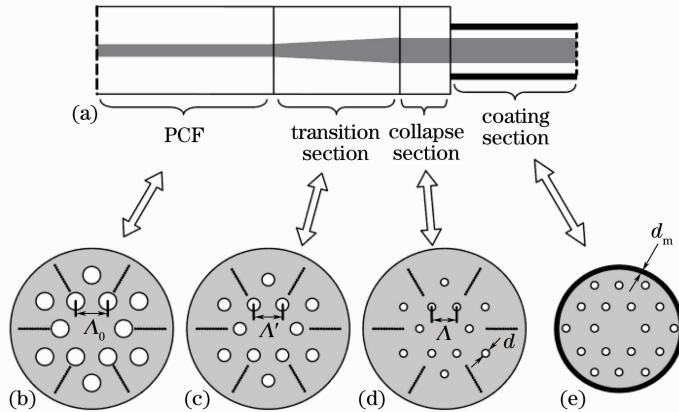


图 5 利用选择性空气孔塌缩技术熔接大芯径双包层光纤与小芯径光子晶体光纤示意图

Fig. 5 Fusion splicing of large core double-cladding fiber with small core photonic crystal fiber

4.3 利用光子晶体光纤实现的高功率超连续谱

为了更好地开展实验,国防科学技术大学在方案的具体参数选择方面开展了一些探索性的研究。首先,为了使数值模拟结果更加准确,基于马赫-曾德尔干涉法搭建了色散测量平台^[46-48],利用超连续谱作为干涉装置的光源测量光子晶体光纤与增益光纤的色散,极大地拓展了可测量色散的光谱范围。在此基础上,还开展了超连续谱相干性方面的理论和实验研究^[49-51]。其次,在入射激光参数选择方面,不仅从理论上对超短脉冲、纳秒量级长脉冲以及连续光抽运光子晶体光纤产生超连续谱展开了数值模拟,而且还从实验上进行了相应的验证实验,为后续高功率超连续谱实验提供了指导^[52]。最后,在抽运方式上,对双波长抽运也开展了相应的理论和实验研究^[53-55]。

在上述研究的基础上,结合 4.1 节所述的中百瓦级皮秒脉冲光纤激光器,利用光子晶体光纤后处理技术实现激光器尾纤与光子晶体光纤之间的低损耗熔接,研制高功率全光纤结构超连续谱光源。2010 年,国防科学技术大学研制出输出平均功率为 35 W 的全光纤超连续谱光源,输出功率是当时全光纤结构超连续谱的最高水平^[56]。后来经过技术改进,在该技术方案下又研制出输出平均功率为 101 W 的全光纤超连续谱光源,输出光谱和功率特性曲线如图 6 所示。此处所用的光子晶体光纤为武汉长飞公司所产,纤芯直径为 7 μm ,零色散点在 1150 nm 附近。由于零色散点离抽运激光波长比较远,所得到的超连续谱展宽范围不是很理想,尤其是往短波方向。如果将零色散点往短波方向移动,光子晶体光纤需要更小的纤芯直径,这会限制超连续谱的输出功率水平。为了解决这一问题,与长飞公司合作共同开展了多芯光子晶体光纤产生超连续谱的实验研究^[57-58]。研究表明,多芯光子晶体光纤的色散特性主要由单芯尺寸决定,将单芯尺寸做小,便可将零色散点控制在抽运激光波长附件。而由于各芯之间存在倏逝波耦合,整个光纤的模场面积为多芯的面积之和。利用这一结构,理论上可以得到色散曲线满足要求的大模面积光子晶体光纤,用于产生高功率和光谱特性优良的超连续谱。目前已经得到一些初步的实验结果,光子晶体光纤输出超连续谱的平均功

率达到 74 W, 输出光谱如图 7 所示。从光谱展宽的情况来看, 基本实现了预想的功能, 后续工作有望得到更高功率的可见光超连续谱输出。在光谱控制方面, 一方面, 国防科学技术大学利用全固光子带隙光纤产生了光谱范围可控的定域超连续谱^[59-60], 另一方面, 制作了光子晶体光纤合束器用于超连续谱光的合成^[61-62]。

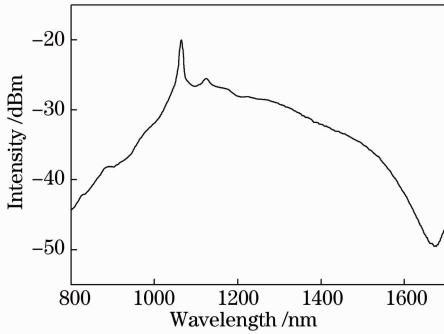


图 6 光子晶体光纤输出 101 W 超连续谱光谱图

Fig. 6 Spectrum of the 101 W supercontinuum from photonic crystal fiber

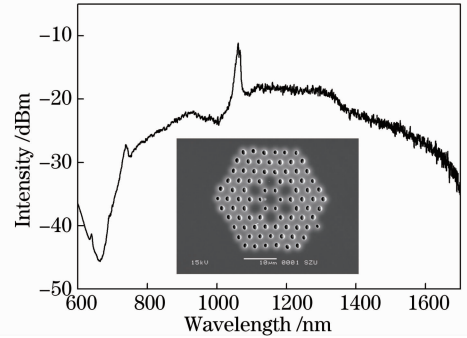


图 7 多芯光子晶体光纤输出 74 W 超连续谱光谱图 (插图为光纤横截面图)

Fig. 7 Spectrum of the 74 W supercontinuum from multi-core photonic crystal fiber (Inset shows the cross section of the fiber)

4.4 利用放大器直接产生的高功率超连续谱

在上述利用光子晶体光纤实现高功率超连续谱光源的过程中, 虽然通过光子晶体光纤选择性空气孔塌缩技术可将激光器尾纤与光子晶体光纤之间熔接点的损耗降至 0.2 dB 左右, 但是在高功率下, 熔接点处所产生的热量仍然不容忽视。这正是这一方案中限制超连续谱输出功率进一步提升的瓶颈所在, 也是为什么在单模光纤激光器输出功率达到万瓦时, 超连续谱输出功率仍然没有突破百瓦的原因所在。为了解决这一问题, 获得更高功率超连续谱输出, 国防科学技术大学采用在光纤放大器中直接产生超连续谱方案^[63], 2010 年实现了输出平均功率为 70 W 的全光纤近红外超连续谱光源^[64-65], 输出功率当时国际领先。光谱范围覆盖 1064 ~ 1700 nm, 光谱平坦度小于 12 dB, 976 nm 半导体抽运光-超连续谱的转换效率为 67.3%, 平均功率谱密度大于 70 mW/nm。2011, 通过对系统进行改进, 又进一步将超连续谱的输出平均功率提升至 177 W^[8,66], 光谱图与测试照片如图 8 所示, 10 dB 光谱宽度约为 740 nm, 平均功率谱密度大于 150 mW/nm。

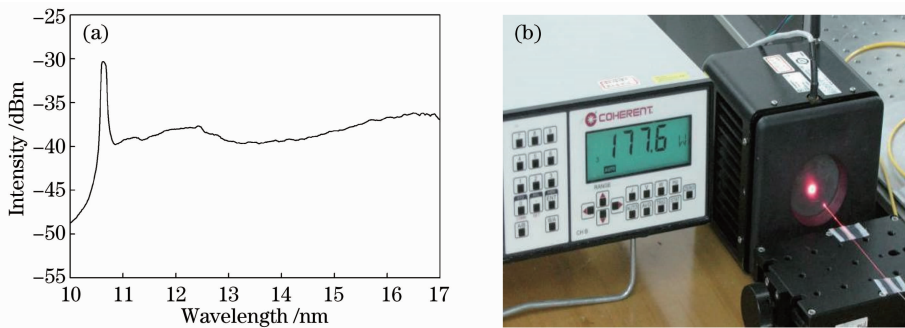


图 8 177 W 超连续谱输出(a)光谱图及(b)测试照片

Fig. 8 (a) Spectrum and (b) testing photograph of the 177 W supercontinuum

该方案中, 增益放大过程与级联非线性效应同时产生, 二者相互作用导致光谱极大展宽, 从而直接由光纤放大器输出高平均功率超连续谱。产生超连续谱的级联非线性效应发生在光纤放大器中, 从而可以采用大芯径的双包层光纤, 相比传统激光器抽运光子晶体光纤方案而言所用增益光纤的纤芯直径可以大幅增加, 突破了传统方案中光子晶体光纤较小的纤芯直径对超连续谱输出功率的限制。此外, 该方案中由光纤放大器直接输出超连续谱, 半导体抽运光到超连续谱的转换效率也得到大幅提升。因此, 该方案相对传统激光器抽运光子晶体光纤方案而言能够得到更高功率的近红外超连续谱输出。

4.5 中红外超连续谱光源研究

中红外波段超连续谱在分子光谱学、医学诊断与治疗以及爆炸物探测等领域有着广泛的应用和独特的优势。为了将超连续谱的光谱范围拓展到中红外波段,需要选择在该波段具有低损耗的软玻璃光纤,同时为了确保系统的安全性和稳定性,需采用全光纤结构。然而软玻璃光纤的热学性能和力学性能均差于石英光纤,所以软玻璃光纤的端面处理以及与石英光纤的连接是实现系统全光纤化必须攻克的技术难题。经过长期探索,国防科学技术大学实现了 ZBLAN 氟化物光纤的端面处理以及与石英光纤的低损耗连接,以该光纤作为非线性介质,成功将超连续谱的光谱范围拓展到中红外波段,在国内报道了全光纤中红外超连续谱光源的实验结果^[67-70]。系统采用主振荡结构的 1550 nm 纳秒脉冲作为抽运源,通过长 10 m、纤芯直径为 8 μm 的单模 ZBLAN 光纤,将光谱展宽到中红外波段,光谱范围覆盖 1.9~4.3 μm ,如图 9(a)所示,平均功率为 185 mW。2012 年底,通过对系统进行改进,进一步将中红外超连续谱平均功率提升至 1.2 W,光谱如图 9(b)所示。

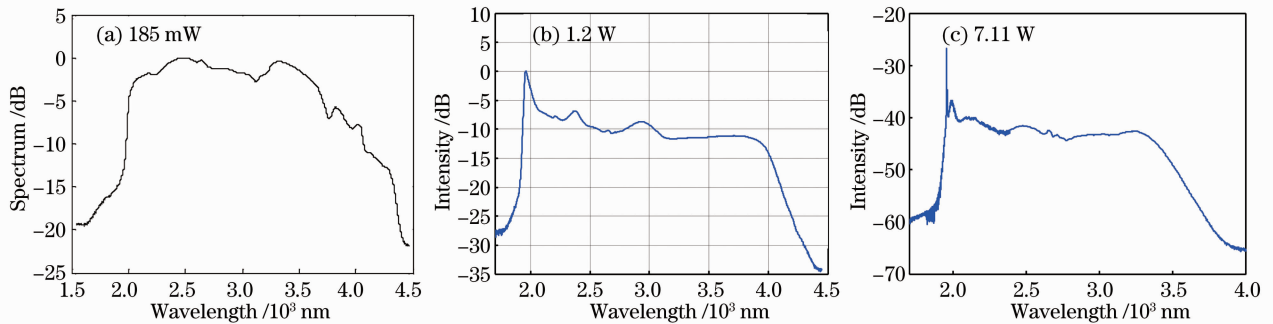


图 9 中红外超连续谱光谱图

Fig.9 Spectra of mid-infrared supercontinuum

2013 年,通过进一步提高抽运功率,优化处理 ZBLAN 氟化物光纤与石英光纤的连接点,得到平均功率为 7.11 W 的中红外超连续谱输出,光谱如图 9(c)所示,光谱范围覆盖 1.9~3.9 μm ,其中 2.5 μm 以上的光谱功率为 3.52 W。最近,这一光源的输出功率达到 10 W,详细的实验数据测试与结果分析正在进行。

5 结束语

本文从提升超连续谱输出功率的角度,分析了高功率超连续谱光源中的关键技术,对国内外的研究现状进行了简要介绍,对国防科学技术大学在高功率超连续谱光源方面的工作进行了概括性介绍。可以看出,最近几年光纤领域的技术进步使百瓦级超连续谱光源的诞生成为可能,而且随着相关技术的持续进步以及一些新方法、新方案的不断发明,超连续谱输出功率必将得到进一步提升,千瓦量级的超连续谱输出有可能在不久的将来实现。而随着输出功率的持续提升,超连续谱光源的应用范围也必将越来越广泛。

需要说明的是,本文重点关注超连续谱光源的输出功率,输出功率对超连续谱光源而言是很重要的一个指标,但是,超连续谱光源还有很多其它同样重要的指标,如光谱宽度、光谱平坦度、时域特性、光束质量等,研究超连续谱光源的这些特性也很有意义,限于篇幅,不再逐一进行介绍。

参 考 文 献

- Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B63-B92.
- Dudley John M, Taylor James Roy. Supercontinuum Generation in Optical Fibers[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- Alfano R R, Shapiro S L. Emission in the region 4000 to 7000 \AA via four-photon coupling in glass[J]. Phys Rev Lett, 1970, 24(11): 584-587.
- Alfano R R, Shapiro S L. Observation of self-phase modulation and small-scale filaments in crystals and glasses[J]. Phys Rev Lett, 1970, 24(11): 592-594.
- Lin Chinlon, Stolen R H. New nanosecond continuum for excited state spectroscopy[J]. Appl Phys Lett, 1976, 28(4):

- 216—218.
- 6 Dudley John M, Genty Goëry, Coen Stéphane. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. Rev Mod Phys, 2006, 78(4): 1135—1184.
- 7 Zhao Wei, Hu Xiaohong, Wang Yishan, *et al.*. The progress of high-power all-fiber supercontinuum technology[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1107002.
赵卫, 胡晓鸿, 王屹山, 等. 高功率全光纤超连续谱激光技术进展[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1107002.
- 8 Song Rui, Hou Jing, Chen Shengping, *et al.*. All-fiber 177.6 W supercontinuum source[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5): 054217.
宋锐, 侯静, 陈胜平, 等. 177.6 W 全光纤超连续谱光源[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 054217.
- 9 Travers J C, Kennedy R E, Popov S V, *et al.*. Extended continuous-wave supercontinuum generation in a low-water-loss holey fiber[J]. Opt Lett, 2005, 30(15): 1938—1940.
- 10 Champert P A, Popov S V, Taylor J R. Generation of multiwatt, broadband continua in holey fibers[J]. Opt Lett, 2002, 27(2): 122—124.
- 11 Travers J C, Rulkov A B, Cumberland B A, *et al.*. Visible supercontinuum generation in photonic crystal fibers with a 400 W continuous wave fiber laser[J]. Opt Express, 2008, 16(19): 14435—14447.
- 12 Chen Kang Kang, Alam Shaif-Ul, Price Jonathan H, *et al.*. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power[J]. Opt Express, 2010, 18(6): 5426—5432.
- 13 Guo Chunyu, Ruan Shuangchen, Yan Peiguang, *et al.*. Flat supercontinuum generation in cascaded fibers pumped by a continuous wave laser[J]. Opt Express, 2010, 18(11): 11046—11051.
- 14 Fang Xiaohui, Wang Qingyue, Liu Junjie, *et al.*. Experimental research on the 3.95 W high-power supercontinuum generation[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1585—1588.
方晓惠, 王清月, 刘俊杰, 等. 3.95 W 高功率超连续光谱产生的实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1585—1588.
- 15 Li Bin, Fang Xiaohui, Liu Bowen, *et al.*. Research on 7.45 W supercontinuum generation by femtosecond laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2012—2016.
李斌, 方晓惠, 刘博文, 等. 飞秒激光产生 7.45 W 超连续光谱实验[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2012—2016.
- 16 Ge Tingwu, Yu Feng, Zhang Wenqi, *et al.*. Home-made all-fiber supercontinuum with average power above 8 W[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0202003-6.
葛廷武, 于峰, 张文启, 等. 国产全光纤结构超连续谱激光输出突破 8 W[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202003-6.
- 17 Guo Chunyu, Ruan Shuangshen, Chen Zuchong, *et al.*. An all fiber supercontinuum source pumped with a 18.4 W picosecond fiber laser[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2011, 28(3): 218—224.
郭春雨, 阮双琛, 陈祖聪, 等. 18.4 W 皮秒光纤激光器及其全光纤化超连续谱源[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2011, 28(3): 218—224.
- 18 Hu Xiaohong, Zhang Wei, Yang Zhi, *et al.*. High average power, strictly all-fiber supercontinuum source with good beam quality[J]. Opt Lett, 2011, 36(14): 2659—2661.
- 19 Song Rui, Hou Jing, Chen Shengping, *et al.*. 157 W all-fiber high-power picosecond laser[J]. Appl Opt, 2012, 51(13): 2497—2500.
- 20 Chen Sheng-Ping, Chen Hong-Wei, Hou Jing, *et al.*. 100 W all fiber picosecond MOPA laser[J]. Opt Express, 2009, 17(26): 24008—24012.
- 21 Chen H W, Lei Y, Chen S P, *et al.*. High efficiency, high repetition rate, all-fiber picoseconds pulse MOPA source with 125 W output in 15 μm fiber core[J]. Appl Phys B, 2012, 109(2): 233—238.
- 22 Lin Dongfeng, Chen Shengping, Hou Jing, *et al.*. Ultra-short pulsed fiber laser in MOPA configuration [J]. Photoelectronics Technology, 2008, 28(4): 277—282.
林东风, 陈胜平, 侯静, 等. MOPA 结构的超短脉冲光纤光源[J]. 光电子技术, 2008, 28(4): 277—282.
- 23 Gu Qingyuan, Hou Jing, Cheng Xiangai, *et al.*. All-fiber passive mode-locked laser realized by semiconductor saturable absorber mirror[J]. Chinese J Lasers, 2008, 5: 655—659.
谷庆元, 侯静, 程湘爱, 等. 利用半导体可饱和吸收镜实现的全光纤被动锁模激光器[J]. 中国激光, 2008, 5: 655—659.
- 24 Rui Song, Hong-Wei Chen, Sheng-Ping Chen, *et al.*. A SESAM passively mode-locked fiber laser with a long cavity including a band pass filter[J]. J Optics, 2011, 13(3): 035201.
- 25 Chen He, Chen Shengping, Hou Jing, *et al.*. The research progress of ultrashort pulse gain-switching semiconductor laser system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 111204.
陈河, 陈胜平, 侯静, 等. 超短脉冲增益开关半导体激光系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(11): 111204.
- 26 Yang Weiqiang, Zhang Bin, Hou Jing, *et al.*. Gain-switched and mode-locked 2 μm Tm/Ho-codoped fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(11): 2521—2522.
杨未强, 张斌, 侯静, 等. 增益开关锁模 2 μm 铥/钬共掺光纤激光器[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(11): 2521—2522.
- 27 Yang Weiqiang, Zhang Bin, Hou Jing, *et al.*. A semiconductor saturable absorber mirror passively Q-switched fiber laser

- near 2 μm [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(7): 1515–1516.
- 杨未强, 侯静, 张斌, 等. 2 μm 波段半导体可饱和吸收镜被动调 Q 光纤激光器[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(7): 1515–1516.
- 28 Lei Y, Chen H W, Chen H, *et al.*. All-fiber picoseconds MOPA laser with a narrow spectrum output[J]. Laser Phys, 2012, 22(9): 1411–1414.
- 29 Rui Song, Shengping Chen, Jing Hou, *et al.*. All-fiber pulsed laser with narrow line width[C] Proceedings of 2011 International Conference on the Electronics and Optoelectronics (ICEOE), 2011, 3: 116–119.
- 30 Yang W Q, Zhang B, Hou J, *et al.*. Gain-switched and mode-locked Tm/Ho-codoped 2 μm fiber laser for mid-IR supercontinuum generation in a Tm-doped fiber amplifier[J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(4): 045106.
- 31 Liu Pengzu. Research of MOPA-Frame 1550 nm Passively Mode-Locked Fiber Laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- 刘鹏祖. MOPA 结构的 1550 nm 被动锁模光纤激光器研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- 32 Yang Weiqiang, Hou Jing, Zhang Bin, *et al.*. Semiconductor saturable absorber mirror passively Q-switched fiber laser near 2 μm [J]. Appl Opt, 2012, 51(23): 5664–5667.
- 33 Liu Shiyao. Passively Mode-Locked Fiber Laser and Its Dispersion Management[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- 刘诗尧. 被动锁模光纤激光器及其色散管理[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- 34 Liu Pengzu, Hou Jing, Zhang Bin, *et al.*. Passively mode-locked fiber laser by SESAM at 1550 nm[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0702017.
- 刘鹏祖, 侯静, 张斌, 等. 基于半导体可饱和吸收镜的 1550 nm 被动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702017.
- 35 Chen Zilun, Hou Jing, Xi Xiaoming, *et al.*. Endlessly single-mode operation of highly nonlinear photonic crystal fibers by controlled hole collapse[J]. Opt Commun, 2010, 283(23): 4645–4648.
- 36 Chen Z, Xiong C, Xiao L M, *et al.*. More than threefold expansion of highly nonlinear photonic crystal fiber cores for low-loss fusion splicing[J]. Opt Lett, 2009, 34(14): 2240–2242.
- 37 Chen Zilun, Hou Jing, Jiang Zongfu. Post-processing techniques of photonic crystal fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(2): 020602.
- 陈子伦, 侯静, 姜宗福. 光子晶体光纤的后处理技术[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(2): 020602.
- 38 Xi Xiaoming, Sun Guilin, Chen Zilun, *et al.*. The realization of taped photonic crystal fiber using ordinary fusing tapering rig[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1481–1484.
- 奚小明, 孙桂林, 陈子伦, 等. 利用普通熔融拉锥机实现光子晶体光纤拉锥[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1481–1484.
- 39 Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Guilin, *et al.*. The hole-collapse splicing technology between ordinary fiber and solid-core photonic crystal fiber with a small core diameter[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0106004.
- 奚小明, 陈子伦, 孙桂林, 等. 普通光纤与小芯径实芯光子晶体光纤的塌孔熔接技术[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0106004.
- 40 Sun Guilin, Chen Zilun, Xi Xiaoming, *et al.*. Research on all-fiber deformation of the PCF core[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(8): 084220.
- 孙桂林, 陈子伦, 奚小明, 等. 光子晶体光纤的全光纤纤芯变形研究[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 084220.
- 41 Sun Guilin. Studies on Controlled Air Hole Collapse in Photonic Crystal Fiber[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- 孙桂林. 光子晶体光纤选择性空气孔塌缩技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- 42 Haihuan Chen, Zilun Chen, Xuanfeng Zhou, *et al.*. Cascaded PCF tapers for flat broadband supercontinuum generation[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(12): 120603.
- 43 Huang Zhi-he, Hou Jing, Peng Yang, *et al.*. Surface plasmon resonance sensor based on supercontinuum source[C]. SPIE, 2011, 8191: 81910Z.
- 44 Zhang Yang, Peng Yang, Hou Jing, *et al.*. Effects of refractive index of mixed solution on localized surface plasmon resonance[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(2): 500–504.
- 张杨, 彭杨, 侯静, 等. 混合溶液折射率对局域表面等离子体共振的影响[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(2): 500–504.
- 45 Yang Peng, Jing Hou, Qisheng Lu. Simulation of a surface plasmon resonance based on photonic crystal fiber temperature sensor[C]. Proceedings of the Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), 2011, 1: 274–277.
- 46 Aijun Jin, Zefeng Wang, Jing Hou, *et al.*. Experimental measurement and numerical calculation of dispersion of ZBLAN fiber[C]. Proceedings of 2011 International Conference on, the Electronics and Optoelectronics (ICEOE), 2011, 3: 181–184.
- 47 Liu Xiaoming. Theoretical and Experimental Research of the Dispersion Character of Photonic Crystal Fiber[D]. Changsha:

- National University of Defense Technology, 2009.
- 刘小明. 光子晶体光纤色散特性的理论和实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- 48 Wang Zefeng, Liu Xiaoming, Hou Jing. Broadband dispersion measurement of photonic crystal fiber based on supercontinuum white light interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1496–1500.
- 王泽锋, 刘小明, 侯静. 基于超连续谱白光干涉仪的宽波段光子晶体光纤色散测量[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1496–1500.
- 49 Jin Aijun. Research on the Coherence Properties of Supercontinuum Source[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- 靳爱军. 超连续谱光源相干特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- 50 Jin Aijun, Wang Zefeng, Hou Jing, *et al.*. Coherence properties of supercontinuum quantified by complex degree of self-coherence[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(15): 154201.
- 靳爱军, 王泽锋, 侯静, 等. 复自相干度量超连续谱相干性[J]. 物理学报, 2012, 61(15): 154201.
- 51 Li Ying, Hou Jing, Wang Yanbin, *et al.*. Theoretical research on the generation of coherent supercontinuum[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(9): 094212.
- 李莹, 侯静, 王彦斌, 等. 高相干度超连续谱产生的理论研究[J]. 物理学报, 2012, 61(9): 094212.
- 52 Wang Yanbin, Xiong Chunle, Hou Jing, *et al.*. Modeling of four-wave mixing and supercontinuum with long pulses in photonic crystal fibers[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(1): 014201.
- 王彦斌, 熊春乐, 侯静, 等. 长脉冲抽运光子晶体光纤四波混频和超连续谱的理论研究[J]. 物理学报, 2011, 60(1): 014201.
- 53 Wang Yanbin, Xiong Chunle, Hou Jing, *et al.*. Continuous wave, dual-wavelength-pumped supercontinuum generation in an all-fiber device[J]. Appl Opt, 2011, 50(17): 2752–2758.
- 54 Wang Y, Hou J, Xiong C, *et al.*. Improved dual-wavelength-pumped supercontinuum generation in an all-fiber device[C]. SPIE, 2010, 7987: 79870Z.
- 55 Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Guilin, *et al.*. Supercontinuum generation in a tapered photonic crystal fiber pumped by two wavelength[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0206001.
- 奚小明, 陈子伦, 孙桂林, 等. 双波长抽运拉锥光子晶体光纤产生超连续谱研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0206001.
- 56 Chen Shengping, Wang Jianhua, Chen Hongwei, *et al.*. 35.6 W high-power all-fiber supercontinuum[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 3018.
- 陈胜平, 王建华, 湛鸿伟, 等. 35.6 W 高功率高效率全光纤超连续谱光源[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3018.
- 57 Wei H F, Chen H W, Chen S P, *et al.*. A compact seven-core photonic crystal fiber supercontinuum source with 42.3 W output power[J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(4): 045101.
- 58 Chen Hongwei, Chen Shengping, Liu Tong, *et al.*. High power supercontinuum source based on multi-core photonic crystal fiber[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(5): 1073–1074.
- 湛鸿伟, 陈胜平, 刘通, 等. 多芯光子晶体光纤高功率超连续谱光源[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(5): 1073–1074.
- 59 Zhang Bin, Hou Jing, Jiang Zongfu. Effects of material dispersion on dispersion in bandgaps of all-solid photonic bandgap fibers[J]. J National University of Defense Technology, 2011, 33(2): 5–8.
- 张斌, 侯静, 姜宗福. 材料色散对全固态带隙光纤带内色散的影响[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(2): 5–8.
- 60 Zhang Bin, Hou Jing, Jiang Zongfu. Controllable high-power supercontinuum generation in all-solid photonic bandgap fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2513–2518.
- 张斌, 侯静, 姜宗福. 全固态光子带隙光纤中实现光谱可控的大功率超连续谱输出[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2513–2518.
- 61 Zhou Hang, Chen Zilun, Li Jie, *et al.*. The effect of PCF combiners on the whole loss under different lengths of transition zone[C]. SPIE, 2011, 81911: 81911Y.
- 62 Liang Dongming. Optical Fiber Combiner for Supercontinuum[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- 梁冬明. 超连续谱合束器研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- 63 Zhang B, Hou J, Liu P Z, *et al.*. Flat supercontinuum generation covering C-band to U-band in two-stage Er/Yb co-doped double-clad fiber amplifier[J]. Laser Phys, 2011, 21(11): 1895–1898.
- 64 Song Rui, Chen Shengping, Hou Jing, *et al.*. All-fiber 70 W supercontinuum[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 569–570.
- 宋锐, 陈胜平, 侯静, 等. 70 W 全光纤超连续谱光源[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 569–570.
- 65 Song Rui, Hou Jing, Chen Shengping, *et al.*. High power supercontinuum generation in a nonlinear ytterbium-doped fiber amplifier[J]. Opt Lett, 2012, 37(9): 1529–1531.
- 66 Song R, Hou J, Chen S P, *et al.*. Near-infrared supercontinuum generation in an all-normal dispersion MOPA configuration above one hundred watts[J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(1): 015401.
- 67 Zhang Bin, Yang Weiqiang, Hou Jing, *et al.*. The first domestic realization of all-fiber mid-infrared supercontinuum in 1.9~4.3 μm region[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1202001-4.

- 张 斌, 杨未强, 侯 静, 等. 国内首次实现 $1.9\sim 4.3\ \mu\text{m}$ 全光纤中红外超连续谱光源[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1202001-4.
- 68 Yang W Q, Zhang B, Hou J, *et al.*. Mid-IR supercontinuum generation in Tm/Ho codoped fiber amplifier[J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(5): 055107.
- 69 Zhang Bin, Hou Jing, Jiang Zongfu. Tellurite glass microstructured fibers for mid-IR supercontinuum generation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 328-331.
- 张 斌, 侯 静, 姜宗福. 碲化物微结构光纤应用于中红外超连续谱的产生[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 328-331.
- 70 Zhang Bin, Hou Jing, Jiang Zongfu. Research progress on mid-infrared supercontinuum generation in nonsilica glass fibers [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(6): 575-579.
- 张 斌, 侯 静, 姜宗福. 非石英玻璃光纤中产生中红外超连续谱研究进展[J]. 激光与红外, 2010, 40(6): 575-579.