

利用光纤产生平坦超连续谱的研究进展

梁田¹ 冯小妹²

¹中国科学院成都文献情报中心, 四川 成都 610041

²中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800

摘要 随着20世纪90年代末光子晶体光纤的问世,人们利用这种具有诸多优良特性的新型光导纤维极大地拓展了制造超宽带、高亮度相干超连续谱光源的研究空间,大批新技术、新方法不断涌现。在实际应用中,采用在宽波段范围内产生的平坦超连续谱光源,不仅可以满足系统对光谱带宽的要求,还能提高测量精度,降低功率均衡的技术难度,平坦超连续谱光源已成为国内外研究机构的重要研发方向。简要介绍了国外各机构的相关研究项目信息,对利用超短脉冲及连续光抽运光纤产生超连续谱及光谱调控技术的发展现状进行了总结,对平坦超连续谱的发展方向进行了展望。

关键词 非线性光学; 光纤; 平坦超连续谱; 光子晶体光纤

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.060002

Research Progress Toward Flat Supercontinuum Generation in Fibers

Liang Tian¹ Feng Xiaomei²

¹ Chengdu Documentation and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China

² Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract With the advent of photonic crystal fiber in 1990s, researchers extend the research on the broadband high-brightness coherent supercontinuum light source. A lot of new technologies and new methods are emerging. In practical applications, the broadband high-brightness flat supercontinuum light source can not only satisfy system requirements on spectral bandwidth, but also improve detection accuracy and decrease difficulty to equalize the optical power. The supercontinuum light source has become an important research direction. The latest supercontinuum projects are introduced, then the research progress in supercontinuum generation in fibers with ultrashort pulses and continuous waves and the status of spectral manipulation are reviewed, and the prospect and applications of supercontinuum development are presented.

Key words nonlinear optics; fiber; flat supercontinuum; photonic crystal fiber

OCIS codes 190.4370; 300.6360; 320.6629

1 引言

强短脉冲通过非线性介质(如光子晶体光纤)时,脉冲的光谱覆盖范围会在非线性效应与群速度色散的共同作用下产生光谱展宽现象,展宽后的光谱范围能够从可见光波长区域一直连续扩展到紫外和红外区域,展宽后的脉冲光谱称为超连续谱(SC)。由于在光纤中传输的光不会发生衍射,能够在较长范围内提供高光强输出,因此光纤广泛应用于超连续谱产生。在实际应用中,采用在宽波段范围内产生平坦光谱的超连续谱光源,不仅可以满足系统对光谱带宽的要求,还能提高测量精度并降低功率均衡的技术难度。平坦超连续谱光源已成为国内外研究机构的重要研发方向。

本文简要介绍了国内外各类机构的相关研究项目,对光纤中产生超连续谱的各类技术手段的发展现状进行了总结,并对平坦超连续谱的应用领域进行了展望,以为设计宽带平坦超连续谱光源方案提供参考。

收稿日期: 2016-01-08; **收到修改稿日期:** 2016-02-02; **网络出版日期:** 2016-05-24

作者简介: 梁田(1982-),男,博士,馆员,主要从事光电子领域学科态势发展分析等方面的研究。

E-mail: liangt@clas.ac.cn

2 国内外研究项目

超连续谱光源同时兼备白炽灯的宽带属性以及激光器的良好方向性和亮度,因此在密集波分复用技术(DWDM)领域^[1-4]、光谱学^[5-6]、超光谱遥感技术^[6-8]、光学相干层析成像(OCT)^[9-11]以及军事领域都有广泛的应用。

在测量 OCT 领域,超连续谱光源输出的宽带光谱优点显著。宽带光谱可以测量表面粗糙度等表面属性。使用近红外超连续谱光源对汽车传动系统中的平面及曲面加工部件进行非接触式粗糙度测量,测量范围为 0.05~0.35 μm 。2015 年,浙江大学报道了基于超连续谱激光光源的超高分辨率谱域 OCT 系统,对不同型号的工业砂纸精细结构进行了成像,系统轴向分辨率为 0.9 μm ,轴向扫描速率为 28600 line/s,横向分辨率为 3.9 μm ,横向视场为 1 mm,最大成像深度为 0.6 mm(空气中)^[12]。

在保健领域的医疗诊断与治疗方面,超连续谱光源也有较多应用。作为脂类(脂肪、胆固醇和脂肪酸)主要构成要素,碳氢键的基频振动和转动键位于 3.3~3.6 μm 之间,可以采用超连续谱激光器作为测量吸收光谱的光源,用于探测正常动脉以及动脉粥样硬化斑块的成分,包括动物脂肪组织、巨噬细胞以及泡沫细胞。研究人员在碳氢脂肪酸以及胆固醇脂吸收波长中使用超连续谱激光系统,在不损伤富含蛋白质血管壁的情况下,演示了对富含脂质动物脂肪组织的区分损伤。在 2011 年 1 月的 Photonics West 展会上,NKT Photonics 公司推出了最新系列的光纤超连续谱激光器^[13]。该系列激光器可针对不同的实际需求,通过一系列附件实现不同光谱范围和不同输出功率的超连续谱输出,以满足其在荧光寿命成像显微镜、荧光共振能量转移、流式细胞仪、OCT、非接触检测等不同场景中的应用。2013 年 5 月,Bioptigen 公司在西雅图视觉和眼科研究协会的会议上,发布了其使用 NKT Photonics 公司超连续谱白光激光器实现的 1 μm 分辨率谱域 OCT 系统^[14]。鉴于肥胖症和心血管疾病中的大量保健问题,未来超连续谱激光系统必将在保健领域有更多的应用。

除了民用领域外,超连续谱光源在国土安全(爆炸物及有毒物质检测)领域中也广泛的应用^[15]。包括爆炸物以及军火在内的多数固体材料,在近红外至中红外波段具有特定的光谱,因此超连续谱光源可以应用于光谱特征识别中,产生探测图谱所需的宽光谱光源。与之相比,采用扩散反射光谱测量方法,仅能探测到爆炸物等固体材料的一条或两条谱线。2013 年,华北光电技术研究所与电子科技大学联合在远红外波段内,对宽光谱激光雷达探测有毒气体进行了仿真^[16]。研究结果表明,同时存在三种有毒气体时,可以采用远红外波段的超连续谱激光对其光谱进行探测。对采集到的光谱进行分析,不仅可以辨别混合的三种化学毒剂,还可以较好地实时监测有毒气体浓度的变化。

在军事领域中,为了保护大型飞机和直升机免遭红外制导导弹,特别是单兵便携式红外制导地对空导弹(SAM 导弹)的威胁,国外研究机构一直在进行红外对抗(IRCM)系统的研发工作。因为不同的寻的器工作在不同波段,典型工作波段有 0.2~0.45 μm 、1~10.6 μm ,这要求干扰导弹寻的系统的对抗光源能够在所有波段产生干扰^[17-18]。导弹寻的技术的发展如图 1 所示。过去长期采用的全向弧光灯光源的能量分布在整个自由空间,导致对导弹寻的器进行有效干扰的能量较弱,难以在全方位辐射足够的能量用以实施全方位干扰。因此,近红外定向对抗(DIRCM)系统自海湾战争后一直在不断发展,目前已开始采用能够产生宽光谱范围的激光源作为定向干扰的光源设备,使得干扰能量集中且强度大大增加,已成为对抗单兵便携式防空导弹的最有效手段^[19]。在 2009 年美国陆军航空协会的飞行器生存能力学术研讨会中,美国陆军电子战空中/地面生存部门主任 Troisio 表示,红外超连续谱激光器是 DIRCM 系统下一代光源的三大研究方向之一^[20]。

虽然 DIRCM 已经证明了其有效性和可靠性,但是存在体积大、造价高等缺点。此外,随着先进红外凝视阵列寻的器的出现,寻的器覆盖的光谱范围已经拓展到紫外和可见光波段。考虑到单兵便携式防空导弹可在 2~20 s 内捕获并截击目标,干扰器需有效、快速。因此,设计高功率、光谱范围可调、成本低、可靠性高、体积小、重量轻的宽光谱定向红外对抗系统已经成为各国研发的重点^[21]。

超连续谱光源的输出光谱类似于热物体的黑体辐射,与许多固体的振动及转动频率相重叠,例如许多热制导导弹会瞄准发热的引擎,其光谱波段约为 1.5~5 μm ,因此超连续谱光源可以用作军用 IRCM 系统的光源。与大多数其他激光器相比,该方案不会受到滤波器的影响。

目前,基于激光的红外定向对抗方式有两种^[22]。大多超连续谱红外对抗系统采用带内破坏机制。2009

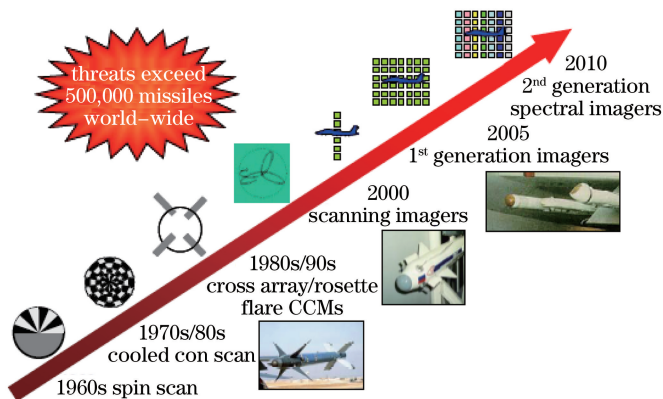
图 1 导弹寻的技术发展^[20]

Fig. 1 Development of missile seeking guidance system

年,国防科学技术大学研究了超连续谱光源辐照面阵 CCD 的干扰效应^[23]。实验研究和理论研究结果表明,在超连续谱光源现有的功率密度水平($3.14 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$)下,可以实现对 CMOS 图像传感器的干扰。

2005 年起,美国国防先进研究项目局(DARPA)几乎每年都会资助若干产学研一体化的商业企业。如密歇根大学下属的 Omni Sciences 公司,被资助开发基于中红外超连续谱的光纤激光器(MISCL)^[24]及其应用。该公司在 2004—2011 年期间所获资助情况如图 2 所示。Omni Sciences 公司 2011 年的 MISCL 项目研发计划^[25]是开发高效率多波段中红外超连续光纤激光 DIRCM 系统,目标是使输出的超连续光谱全面覆盖 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 波长范围,同时使 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波长范围的干扰信号能量达到 0.5 W,使 $2 \sim 4 \mu\text{m}$ 波长范围且占空比为 25% 的干扰信号能量达到 1.5 W。此外,该系统使用掺铋光纤放大器改善 MISCL 的电光转换效率,提高输出的空间光束质量。据 2012 年 5 月的相关报道,目前这一目标已经基本实现^[21]。

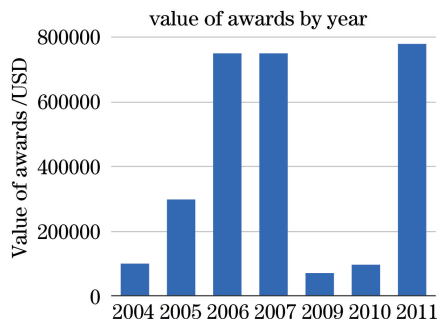
图 2 2004—2011 年 Omni Sciences 公司获得的美国能源部经费资助^[26]

Fig. 2 Funding of Omni Sciences Inc. from the Department of Energy, U.S. from 2004 to 2011

在光纤超连续谱激光器研究领域中,除 Omni Sciences 公司外,近年来 DARPA 也资助了其他公司对超连续谱各个子方向开展了大量研究,如 PolarOnyx 公司^[27]、Agiltron 公司^[28]、NP Photonics 公司^[29]和 Q Peak 公司^[30]等,各公司所获的资助项目如表 1 所示。

2010 年,美国陆军正式开始通用红外对抗(CIRCM)系统计划^[19]。目前,作为 CIRCM 项目的竞争者,诺格公司已于 2013 年 2 月向美国陆军交付了首批 8 套用于测试的 CIRCM 导弹防御系统^[31],该系统将一个中红外传输光纤耦合激光器整合到红外自保护系统中^[32]。该公司 IRCM 业务发展部主任 Jack Pledger 表示,从基于弧光灯的 DIRCM 到基于激光器的 DIRCM,为了抗衡导弹寻的技术的发展,干扰源与目标热辐射强度比从 $10 : 1$ 提高至 $1000 : 1$ ^[18]。掺铋光纤激光器和量子级联激光器很有希望降低工作在 $-45 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 IRCM 系统的成本和重量,并提高其可靠性。

表 1 美国政府资助的部分超连续谱项目
Table 1 Some of the U.S. government funded supercontinuum projects

Corporation	Project name	Source	Phase	Year	Project amount /(million USD)
	Supercontinuum laser systems				
Optical Sciences Corporation	and simulation of the high radiance solar lunar spectrum for space sensor testing	Department of Defense	Phase II	2013	75
PolarOnyx Inc.	Supercontinuum fiber laser for multi-spectral energy propagation	Department of Defense	Phase II	2012	75
Optical Sciences Corporation	Supercontinuum laser systems and simulation of the high radiance solar lunar spectrum for space sensor testing	Department of Defense	Phase II	2011	65
Omni Sciences Inc.	High efficiency multi-band mid-infrared supercontinuum fiber laser for DIRCM	Department of Defense	Phase II	2011	78
NP Photonics Inc.	Supercontinuum laser for multi-spectral energy propagation	Department of Defense	Phase II	2011	75
Omni Sciences Inc.	High-reliability IRCM supercontinuum laser with fiber for transporting over 10 m on an aircraft	Department of Defense	Phase I	2010	10
Optical Sciences Corporation	Supercontinuum laser systems and simulation of the high radiance solar lunar spectrum for space sensor testing	Department of Defense	Phase I	2010	10
PolarOnyx Inc.	Supercontinuum fiber laser for multi-spectral energy propagation	Department of Defense	Phase I	2010	10
PolarOnyx Inc.	Compact ultra-wideband optical frequency comb fiber laser	National Aeronautics and Space Administration	Phase I	2010	10
Mesa Photonics LLC	High power mid-infrared fiber supercontinuum light source	Department of Commerce	Phase II	2009	30
NP Photonics Inc.	Supercontinuum laser for multi-spectral energy propagation	Department of Defense	Phase I	2009	8
Mesa Photonics LLC	High power mid-infrared fiber supercontinuum light source	Department of Commerce	Phase I	2008	9
Omni Sciences Inc.	Mid-infrared fiber laser based on supercontinuum	Department of Defense	Phase II	2007	75
Omni Sciences Inc.	Mid-infrared fiber laser based on supercontinuum	Department of Defense	Phase I	2005	10

更强大的激光器、更先进的光电子、光电机组件不仅降低了 IRCM 系统的尺寸和重量,更推进其在民用飞机上的应用。以色列 Elbit 公司的光电系统分部 Elop 公司在 2011 年巴黎航展上展出了商用 DIRCM 吊舱,如图 3 所示^[18]。Elop 公司制造的商用多光谱红外对抗系统(C-MUSIC DIRCM)使用光纤激光器配合 FLIR 系统的高速率热成像相机工作。该系统吊舱的高度和重量只有同类产品的一半,将飞机的飞行阻力

降至极低水平,适用于波音 747 和空客 320 级别的大型飞机。MUSIC 和 C-MUSIC 不仅在军用机、民用机上取得了成功,还受到需要飞越敏感军事区域的货运公司和 VIP 飞机公司的青睐。据英国“国际飞行”网站 2013 年 1 月 18 日报道,以色列空军以波音 707-300 为载机,成功验证了 C-MUSIC DIRCM 机载反导系统。C-MUSIC 已被以色列运输部所选用,用于保护整个以色列的商用机队。



图 3 Elbit 公司的 C-MUSIC DIRCM 吊舱^[18]

Fig. 3 C-MUSIC DIRCM pod of Elbit Inc.

3 光纤产生超连续谱的研究进展

根据抽运光与光纤色散区的配合方式不同,产生超连续谱的方法主要有两种:1) 在光纤反常色散区进行抽运,利用孤子效应实现光谱展宽;2) 在光纤正常色散区进行抽运,一般利用光子晶体光纤中产生的自相位调制和色散效应实现光谱展宽。当抽运脉冲位于光纤反常色散区时,所产生的超连续谱受到孤子机制及调制不稳定性影响,其光谱平坦性会劣化;在光纤正常色散区进行抽运时,能够产生平坦度和相干性更好的超连续谱,因此更适合用作 DWDM 通信及光谱仪系统中的光源。这种方法的缺点是所获得的超连续谱的光谱宽度比在反常色散区进行抽运时窄,目前多采用具有小色散值和高非线性系数的光子晶体光纤来克服这一缺点。

近几年来,利用光纤产生超连续谱激光输出方面的相关研究很多,从抽运方式看主要分为超短脉冲抽运(多采用飞秒脉冲)和纳秒脉冲/连续光抽运。由于飞秒脉冲的线宽较宽,可利用的光谱成分多,因而更有利于超连续谱的产生;而纳秒脉冲/连续光抽运超连续谱光源具有更高的光谱功率密度、更平滑的光谱、更低的强度噪声和更短的相干长度,因此两种抽运方式都受到研究人员的重视^[33-43]。以下将简要介绍利用光纤产生超连续谱激光的研究进展。

3.1 飞秒脉冲抽运超连续谱光源研究进展

直到最近,超连续谱激光器还主要用于实验室,这是因为通常需要大型桌面锁模激光器抽运非线性介质(如光纤)来产生超连续谱输出。现在,这些体积庞大的抽运激光器正逐渐被已经在通信行业中发展得十分成熟的半导体激光器和光纤放大器抽运源所取代。2013 年,波兰军事科技大学 Swiderski 等^[44]利用增益锁模光纤激光器和光纤放大器获得重复频率为 26 kHz、平均功率为 2.3 W 的抽运光,对长为 20 m 的单模 ZBLAN 光纤进行抽运,获得了平均功率为 0.74 W、波长范围为 1.9~3.8 μm 的超连续谱,实验原理如图 4 所示。

为了在大于 2.5 μm 的光谱范围内产生超连续谱,有必要采用 ZBLAN、碲化物或硫族化合物制成的非线性光纤,而不采用二氧化硅光纤。这是因为与二氧化硅相比,这些玻璃材料的熔点更低,所以在设计高功率(大于 1 W)系统时采用这些材料可以限制非线性光纤中的热量产生,避免光纤损伤;还能使损耗尽可能分散,从而使冷却系统变得更加简单。为了达到以上目的,至少需要有数米长的具有低传输损耗的非线性光纤。而各类中红外光纤中 ZBLAN 光纤的传输损耗最低,且 ZBLAN 玻璃稳定性相对较高,使得 ZBLAN 成为中红外超连续谱光源的理想选择。目前,通过兆瓦量级峰值功率的飞秒抽运脉冲对几厘米长的 ZBLAN 光纤进行抽运,能够获得展宽到 6.28 μm 的超连续谱。但是,该方法获得的连续激光输出不仅平均功率低且非线性光纤会发生过热现象,对于高平均功率光源需要采用更长的光纤使得热负荷均匀分布。此外,由于受到 ZBLAN 材料在大于 4.5 μm 的波长范围内材料吸收显著上升的影响,ZBLAN 光纤产生的超连续谱能够达到的最大波长为 4.75 μm ^[25],如图 5 所示。

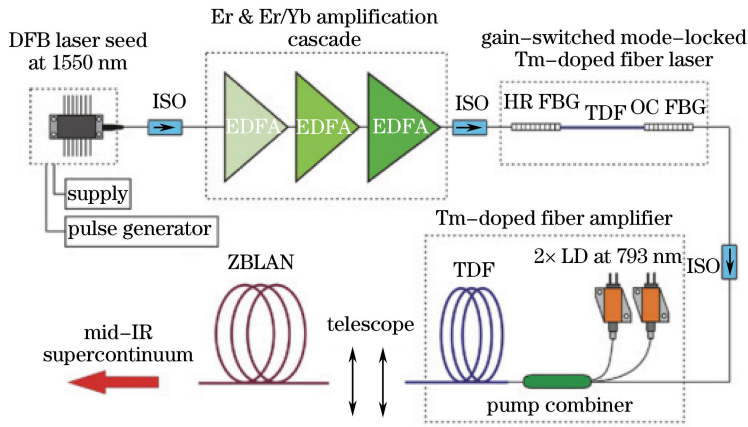
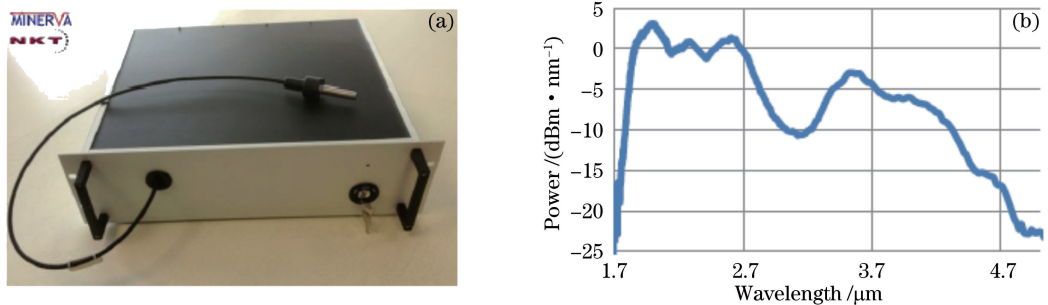
图4 波兰军事科技大学 Swiderski 等设计的实验原理图^[44]Fig. 4 Block diagram of fiber mid-IR SC source from Swiderski *et al.*图5 (a) NKT 公司制造的一体化 1.2 W 中红外超连续谱光源及(b) 其输出光谱^[25]

Fig. 5 (a) Compact 1.2 W mid-IR supercontinuum source from NKT Photonics and (b) its output spectrum

在国内,2010年深圳大学采用级联光子晶体光纤和高非线性光纤的方法实现了输出光谱宽度为420 nm、平均功率为8 W的超连续谱^[45]。2011年,中科院西安光学精密机械研究所在光子晶体光纤的反常色散区利用百瓦皮秒掺镱光纤激光器进行抽运,获得了光谱范围覆盖500~1700 nm、平均输出功率为49.8 W的超连续谱稳定输出^[46]。在整个输出光谱范围内,系统工作在基模模式下。随后该课题组又获得了光谱范围覆盖500~1700 nm、平均输出功率为89.5 W、平均功率谱密度大于26 mW/nm的超连续谱输出^[43]。

2012年6月,国防科学技术大学利用ZBLAN单模光纤作为非线性介质,成功研制出全光纤结构的中红外超连续谱光源,将超连续谱扩展到4 μm以上^[47]。2014年,北京工业大学采用自主研发的全光纤被动锁模激光器以及高功率光纤模场匹配器,将中心波长为1066 nm、脉宽小于20 ps的脉冲耦合进纤芯直径为4.8 μm、零色散波长为1040 nm、非线性系数为11 W⁻¹ · km⁻¹、长度为5 m的光子晶体光纤,最终得到了67.9 W的高功率白光超连续谱输出^[48]。2015年,清华大学提出在1550 nm波段采用双波长相干超短脉冲光源抽运高非线性光纤获得超连续谱,从而在相同抽运光功率下,获得宽度远大于单波长脉冲抽运的超连续谱^[49]。

3.2 纳秒脉冲或连续光抽运超连续谱光源研究进展

由于纳秒脉冲或连续光抽运源激光器输出功率较高、技术比较成熟并且已经实现商品化,因此该方案是超连续谱光源实现高功率、低成本、小型化的候选方案之一,国内外各研究机构一直致力于该方案的研究。

除了初始的连续波(CW)在调制不稳定性影响下会转换为脉宽、峰值功率和重复频率等不固定的超短脉冲串以外,采用CW抽运光纤产生超连续谱的总体机制与超短脉冲抽运光纤产生超连续谱类似。因为有不同的脉冲在光纤中传输,所以产生的新光谱成分和这些新的光谱频率所在的位置都与每个脉冲的特性相关。与脉冲抽运方案相比,虽然连续光抽运方案产生超连续谱的条件更为严苛,但是连续光抽运产生的超连续谱具有较高的功率谱密度和相对平滑的光谱。从实用的观点来看,近期在高功率CW光纤激光器方面取得的进展将有助于获得更紧凑、稳定的高功率密度全光纤超连续谱光源,也将进一步拓展超连续谱光源的应

用范围。因此,近年来国内外科研人员在此领域开展了大量研究。

在早期实验中,主要采用 1500 nm 的拉曼光纤激光在色散位移光纤或高非线性光纤的零色散波长(ZDW)附近进行抽运。根据已有文献,抽运光波长在光纤的 ZDW 附近非常有必要。同时,由于孤子自频移(SSFS)效应,短波长(与抽运光波长相比)方向的蓝移主要来源于色散波。谱宽达到 1000 nm 且具有强功率谱密度(10 mW/nm, 即 10 dBm/nm)的超连续谱已有报道。近期,为了更进一步增加连续波抽运产生的超连续谱功率密度,Avdokin 等^[50]和 Travers 等^[51]采用更高功率的掺 Yb 光纤激光器和高非线性光子晶体光纤(PCF)进行实验。这种方法的主要缺点之一是在光子晶体光纤产生的超连续谱中,在 1380 nm 附近有一个 OH⁻ 离子吸收峰。这一现象会妨碍超连续谱光谱的展宽或极大地降低功率谱密度。随后,Travers 等^[51]设计了低损耗 PCF 光纤(73.2 dB/km),产生光谱范围为 1100~1500 nm、功率谱密度约为 30 mW/nm(即 15 dBm/nm)的超连续谱。但是,因为超连续谱主要基于受激拉曼散射,该方案需要的光纤长度非常长(约 100 m)。同时,虽然极大地减小了水吸收峰,但仍约有 50% 的耦合抽运光能量损耗在 PCF 光纤中。

2014 年,美国海军研究室 Gattass 等^[52]采用基于周期性极化铌酸锂晶体(PPLN)的微片激光器,在 3.82 μm 波长处对 2 m 长的 As₂Se₃ 光子晶体光纤进行抽运,实验装置如图 6 所示。作为抽运源的微片激光器输出光中心波长为 1064 nm,脉宽为 700 ps,重复频率在 10~100 kHz 范围内可调,输出光束质量 M² 因子小于 1.2。输出的超连续谱平均输出功率为 5 mW,光谱范围为 3.74~4.64 μm ,平坦性为 -10 dB,其中在 3.65~4.9 μm 波长范围的平坦性为 -20 dB。

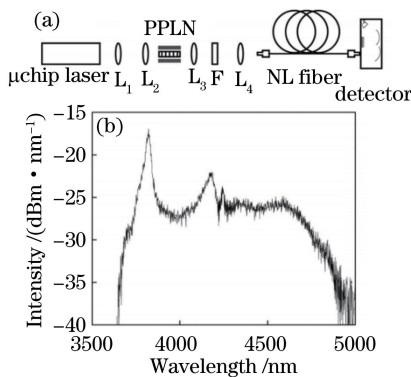


图 6 (a) 美国海军研究室 Gattass 等设计的实验原理图及 (b) 其输出光谱^[52]

Fig. 6 (a) Schematic of SC system from the U.S. Naval Research Laboratory and (b) measured output spectrum

利用纳秒脉冲抽运源产生超连续谱的研究中,Omni Sciences 公司的研究方案比较有代表性。2012 年,受 DARPA 资助的美国密歇根大学的研究小组,通过 Omni Sciences 公司开发并商业化 0.8~4.5 μm 波段的中红外超连续谱激光器。该类中红外超连续谱激光器的一种版本基于铟镱共掺功率放大器,另一版本基于掺铥功率放大器。Omni Sciences 研究小组在超连续谱激光器方面取得了三大主要突破。首先,将超连续谱的光谱范围拓展到了中红外波段,从接近可见光谱边缘的 0.8 μm 、经过整个 1~2 μm 的近红外波段、直至覆盖了 2~4.5 μm 的大部分中红外波段。其次,抛弃了过去笨重的锁模激光器,而采用电信波长元件作为抽运源。最后,通过增加重复频率并采用高功率光纤放大器,超连续谱激光器的输出功率能提高到 10 W 甚至更高。

Omni Sciences 公司的全光纤、高功率中红外超连续谱激光器的优点在于构造简单,利用调制不稳定性诱发超连续谱产生,如图 7 所示。将波长约为 1550 nm,脉宽约为 0.5~2.0 ns 的分布反馈式半导体激光器的输出通过多级光纤放大器放大。第一级预放大器是标准的掺铒光纤放大器(EDFA),用于获得最佳的噪声性能。在每级放大器之间,均采用带通滤波器滤除放大自发辐射,同时采用隔离器避免背向反射。功率放大器采用包层抽运光纤放大器以将非线性失真降至最低。这一抽运激光器结构完全采用常规电信标准的设计。

超连续谱产生在紧随抽运激光器之后相对较短的光纤内。抽运光首先通过长为 1~2 m 的标准单模光纤(SMF),然后入射到几米长的超连续谱光纤。在单模光纤中,脉冲峰值功率可以达到几千瓦,并且抽运波长位于反常群速度色散区。在该色散区内如果峰值功率很高,纳秒脉冲在调制不稳定性作用下会变得很不稳定,这实际上是一种参量放大过程,其中光纤的非线性对脉冲纤维匹配有辅助作用。因此,随着调制不

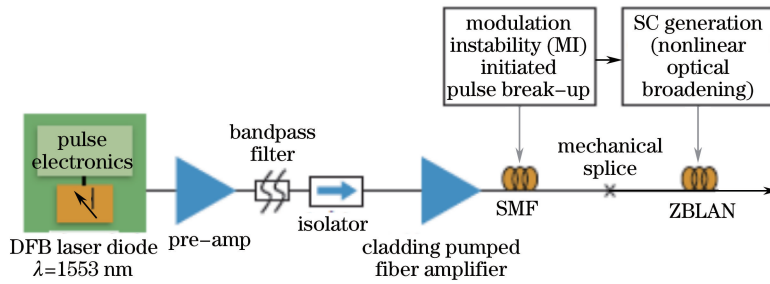
图 7 Omni Sciences 公司的中红外超连续谱激光器^[21]

Fig. 7 Schematic of mid-infrared supercontinuum laser from Omni Sciences

稳定性试图在准连续波背景下形成孤子,纳秒抽运脉冲被分裂为许多更短的脉冲。

尽管分布反馈式半导体激光器和放大过程以纳秒脉冲开始,但是较短的单模光纤中调制不稳定性会形成 0.5 ps 至几皮秒的高强度脉冲。因此,几米长的单模光纤可产生类似于锁模激光器的输出,但是却比锁模激光器的结构更简单,且更具成本效益。

通过调制不稳定性产生的短脉冲,随后耦合到用于超连续谱产生的非线性光纤中。产生宽带超连续谱的机制包括四波混频或自相位调制,以及光学拉曼效应。由于拉曼效应自身满足相位匹配,并且通过发射光学声子使波长移动到更长波段,因此超连续谱光能够有效扩展到长波长波段。短波长波段源自四波混频,其展宽范围通常受到光纤靠近短波长波段逐渐增大的色散波的限制。根据经验,对于获得足够峰值功率的特定光纤及超连续谱光纤,超连续谱产生过程将覆盖长波长直到光纤的传输窗口。

用作功率放大器的成熟光纤放大器包括掺镱光纤(1060 nm)、铒镱共掺光纤(1550 nm)以及掺铥光纤(2000 nm)。超连续谱光纤的其他选择包括熔融石英光纤(用于产生 0.8~2.7 μm 的超连续光),中红外光纤,例如氟化物光纤、硫化物光纤以及碲化物光纤(用于产生 4.5 μm 甚至波长更长的超连续光),光子晶体光纤(用于产生 0.4~1.7 μm 的超连续光),或者这些光纤的不同组合。选择合适的光纤放大器掺杂和非线性光纤,可以产生可见光、近红外或中红外波段的超连续谱。

Omni Sciences 公司开发的第一代中红外超连续谱激光器^[21](GEN I MISCL)用铒镱共掺光纤放大器作为功率放大器,用 ZBLAN 光纤产生超连续谱(50%调制占空比),该光源的输出功率为 3.9 W,波长范围为 0.8~4.3 μm ,如图 8 所示。由于宽带光谱从单模光纤输出,因此整个光谱是空间相干的,并且近似变换极限的光束可以传输很远的距离。例如,从 GEN I MISCL 输出的光束,在 2.5~3.5 μm 波长范围内与变换极限高斯光束的差别小于 20%(光束质量因子 $M^2 < 1.2$)。

在另一台 MISCL(GEN II)系统中^[21],功率放大器为掺铥光纤放大器,超连续谱产生光纤依然采用 ZBLAN 光纤,如图 9 所示。GEN II MISCL 的波长范围覆盖 1.9~4.5 μm ,平均输出功率为 2.6 W,在超过 3.8 μm 波段处,时间平均功率约为 0.7 W,调制占空比依然为 50%。采用掺铥功率放大器的该系统起始工作波长接近 1.9 μm ,但长波长波段比 GEN I 超出 270 nm。

通过改变系统的重复频率可以调节 MISCL 的输出功率。GEN II MISCL 系统的重复频率变化范围为 125~500 kHz,相应的中红外输出功率调节范围达到 0.4~1.6 W,并且输出光谱几乎不变。

近年来,全球范围内针对连续光抽运方案产生超连续谱输出进行研究较多的团队是英国帝国理工学院。根据报道,2008 年该校 Travers 等^[53]基于透镜耦合的实验方案,通过准直、聚焦系统将 IPG 公司生产的商用连续光纤激光器的自由空间激光输出耦合到过渡光纤中,再将过渡光纤的输出端与光子晶体光纤进行熔接,利用中心波长为 1.07 μm 、等效抽运光功率为 170 W 的连续光产生了输出功率为 50 W 的超连续谱输出,光谱范围覆盖 1~2 μm 波长范围,实验原理如图 10 所示。这也是迄今为止采用连续光抽运获得的最高超连续谱输出功率。通过改变所用光子晶体光纤,该实验还得到了平均输出功率为 28 W,光谱范围覆盖 0.6~1.9 μm 的超连续谱。

英国帝国理工学院 Kelleher 等^[54]研究了连续光激光器抽运条件下由于调制不稳定性产生的光孤子动力学特性,具体分析了连续光抽运源的强度波动对产生超连续谱的影响,如图 11 所示。英国帝国理工学院

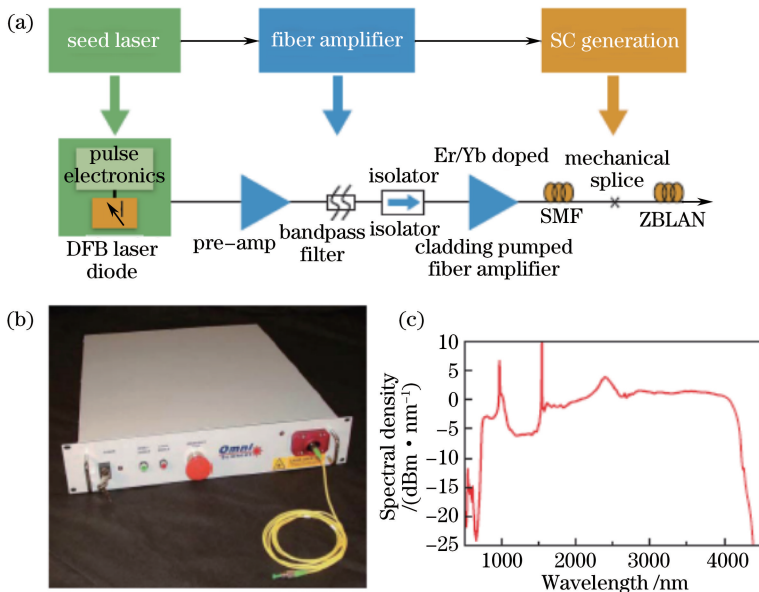


图 8 采用钕镜共掺功率放大器的 GEN I MISCL 的输出光谱^[21]

Fig. 8 Spectral output of GEN I MISCL with erbium/ytterbium co-doped power amplifier

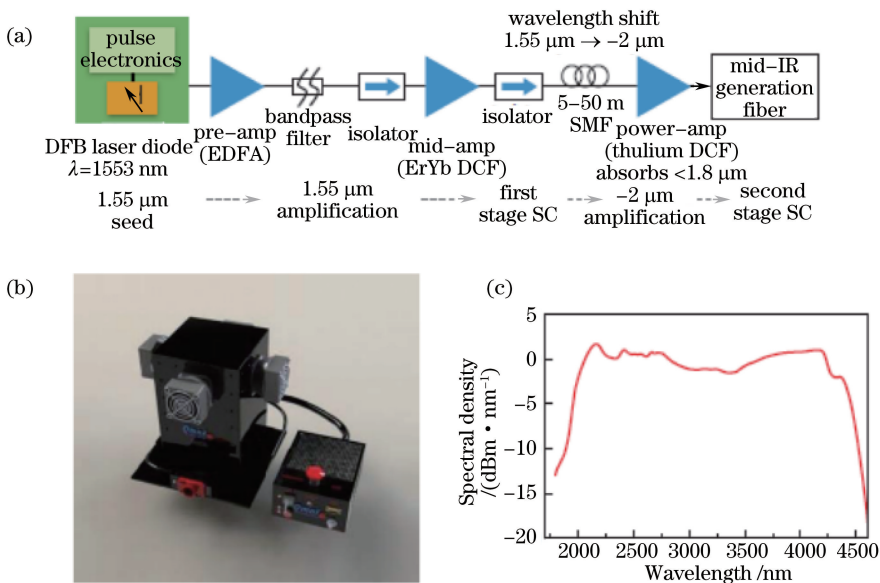


图 9 采用掺铥功率放大器的 GEN II MISCL 的输出光谱移到了更长波段^[21]

Fig. 9 Spectral output shifts to longer wavelength for the GEN II MISCL with a thulium-doped power amplifier

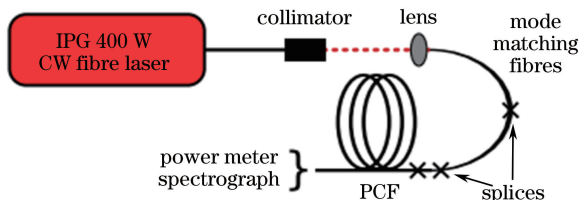


图 10 Travers 等进行连续光抽运产生超连续谱的实验原理图^[53]

Fig. 10 Experimental setup of supercontinuum generation in PCF with continuous wave laser pumping from Travers *et al.*

Chapman 等^[55]采用连续光对 300 m 长的高非线性光纤的正常色散区进行抽运,在 1.15~2.15 μm 波长范围内产生了 5 dB 的平坦超连续谱,并研究了拉曼散射效应对连续光抽运条件下产生超连续谱的影响,如图 12

所示。研究发现,连续波产生超连续谱的机理是由于连续波抽运光在调制不稳定性的作用下在时域上分裂为孤子。虽然抽运光能量随后也能够通过孤子与色散波之间的相互作用转移到正常色散区,但是在反常色散区进行抽运是连续波形成超连续谱的主要内在因素。在正常色散区进行抽运也能够通过拉曼散射将能量转移到反常色散区,进而形成反常色散抽运源,产生超连续谱。虽然 Chapman 等的研究是在远离 ZDW 的位置进行抽运,但是连续波抽运产生超连续谱的机理条件已经得到了证明。

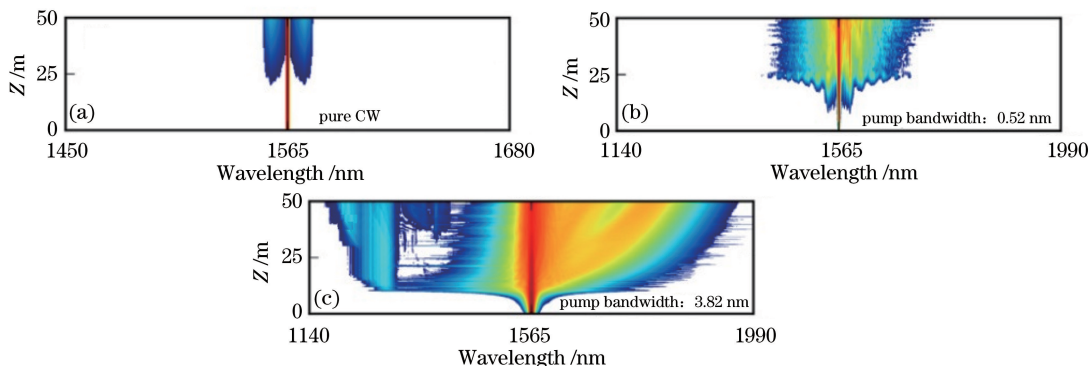


图 11 Kelleher 等进行的 CW 抽运条件下的数值模拟^[54]

Fig. 11 Simulation of supercontinuum generation with continuous wave laser pumping from Kelleher *et al.*

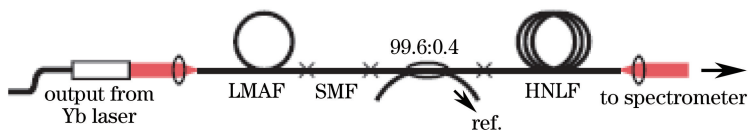


图 12 Chapman 等的实验原理图^[55]

Fig. 12 Experimental setup from Chapman *et al.*

2013 年,葡萄牙亚威罗大学的科研人员采用工作波长为 1480 nm 的连续光激光器(IPG RLR-10-1480)对长为 800 m 的高非线性光纤(零色散波长为 1531 nm)进行抽运,并数值模拟了超连续谱产生,理论与实验结果能够较好地吻合^[56]。

2010 年,南京大学用 1064 nm 的准连续长脉冲激光抽运纯石英 PCF,得到了 450~2400 nm 波长范围的超连续谱^[57]。2011 年,国防科学技术大学进行了连续光抽运 PCF 产生超连续谱的相关研究^[58],为产生高功率密度的宽带超连续谱提供了有益的参考。同年,香港大学在脉宽为 5.8 fs 的抽运脉冲基础上叠加了约 80 μ W 的弱连续光作为触发源,对 50 m 高非线性光纤进行抽运,在 1400~1700 nm 波长范围内得到了超连续谱,研究结果如图 13、14 所示^[59]。

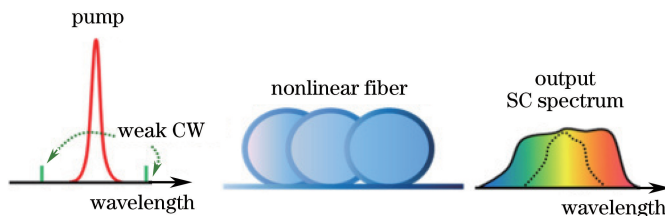


图 13 在抽运脉冲基础上叠加弱连续光作为触发源产生超连续谱^[59]

Fig. 13 Schematic of CW-triggered mechanism for manipulating SC generation

2013 年,深圳大学采用高非线性 PCF 作为超连续谱产生的非线性介质,搭建主振荡功率放大器(MOPA)结构的连续波单模掺 Yb 光纤激光器作为抽运源,实验原理和实验结果如图 15 所示。掺 Yb 光纤激光器尾纤与高非线性 PCF 之间,采用 GRIN 光纤熔接技术将模场适配器的输出光纤与一段长为 200 m 的高非线性 PCF 进行高效率耦合,实现了高功率连续波光纤激光器对高非线性 PCF 的全光纤化抽运,得到最大输出功率为 36.5 W、光谱范围覆盖 990~1700 nm 的全光纤化超连续谱光源^[60-61]。

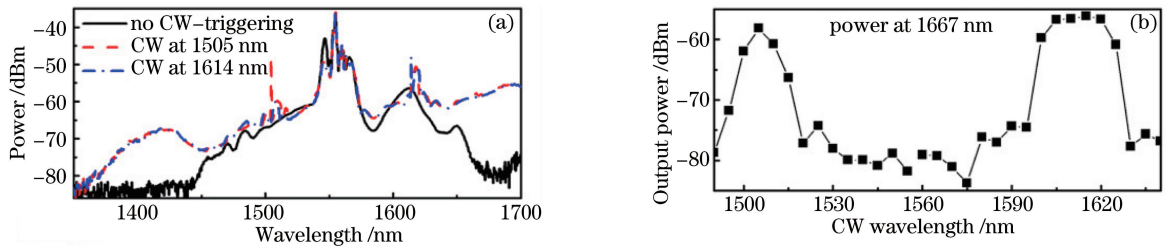
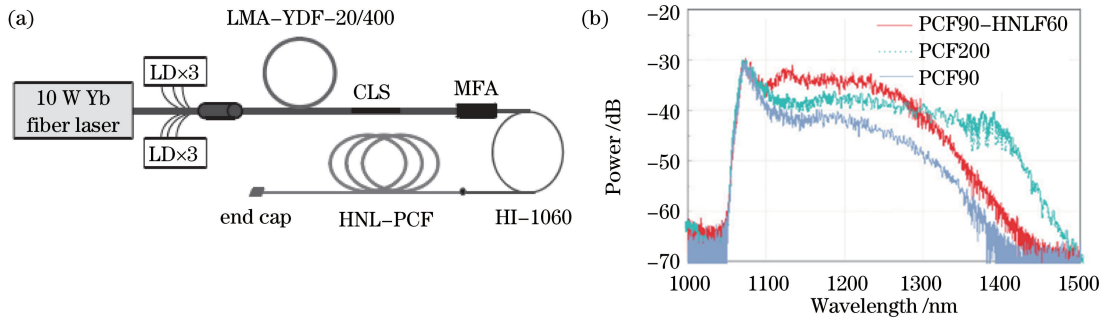
图 14 叠加连续光后可以观察到光谱进一步展宽^[59]

Fig. 14 SC enhancement as a function of weak CW wavelength

图 15 深圳大学郭春雨等的(a) 实验原理图和(b) 实验结果^[60-61]Fig. 15 (a) Experimental setup and (b) output spectra from Guo *et al.*

2015年,北京工业大学报道了一个基于类噪声脉冲抽运的高功率全光纤结构中红外超连续谱光源^[62]。利用非线性环境锁模技术,在1966 nm处实现类噪声脉冲激光输出,3 dB光谱带宽为11 nm,脉冲包络宽度为1.4 ns,重复频率为3.36 MHz。将该纳秒类噪声脉冲作为两级单模掺铥光纤放大器的种子源进行功率放大。在此过程中,类噪声脉冲的最大输出功率可达28.5 W,相应的光谱范围为1.9~2.4 μm 。最后将放大的类噪声脉冲耦合到一段10 m长的ZBLAN光纤中,实现光谱的进一步展宽。此时,ZBLAN光纤的最大输出功率为14.3 W,相应的光谱范围为1.9~3.62 μm 。

3.3 利用多芯PCF产生超连续谱输出研究进展

超连续谱的产生是多种非线性效应综合作用的结果,而具有合适的零色散波长以及小模场面积的PCF能够提供高非线性效应,这对于超连续谱的产生非常有必要,且要求光纤芯径不能太大。但是由于光纤介质对激光功率密度的要求较高,小纤芯通常会使得超连续谱光源的平均输出功率限制在数瓦以内,从而限制了超连续谱输出功率的提升。随着一系列PCF后处理技术的发展,Chen等^[63]通过扩大输入端PCF纤芯直径得到了功率为35.6 W的高功率全光纤超连续谱。Travers等^[53]采用一系列模式匹配的单模光纤以降低与小纤芯PCF拼接时的损耗,进而在连续光抽运条件下获得了平均功率为50 W的超连续谱输出。因为多芯PCF具有大模场面积并能够降低由于热和应力引起的光束畸变,所以将多芯PCF作为提升光纤激光器功率的非线性光学元件加以应用非常具有吸引力。据报道,Q开关^[64]以及锁模多芯PCF激光器^[65-66]的输出脉冲能量已达到2.2 mJ^[64],脉冲峰值功率可达到150 MW^[65]。多芯PCF各个纤芯之间的光场相互耦合可以形成超模,其中的同相超模具有类高斯型远场强度分布。这些特性吸引人们不断探索利用多芯PCF产生高功率超连续谱。

2012年,天津大学采用具有稳定独立超模的7芯PCF光纤产生了超连续谱^[67]。在飞秒掺Yb光纤激光抽运条件下,多芯PCF产生的超连续谱输出的光谱范围为500~1700 nm。输出光束截面在7个纤芯中光强均匀分布,且具有高斯型远场强度分布,如图16所示。此类输出光束强度分布可以稳定保持数小时,且不随输入参数的改变而变化。考虑到输入脉冲参数的变化,实验得到了高光束质量的稳定输出。研究还发现,非线性折射率与相位自同步效应并不相关。此外,由于光纤各芯没有使用激光增益材料掺杂,因此增益效应与相干形成也没有联系。

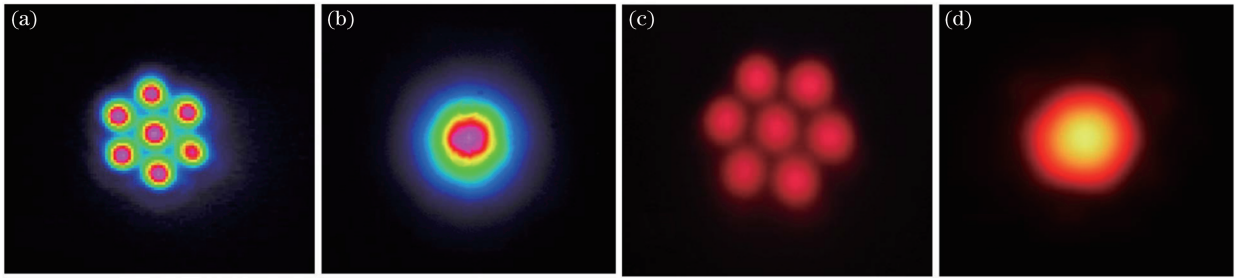


图 16 天津大学采用 20 m 长的 7 芯 PCF 得到的光束截面^[67]。(a) 采用光束分析仪得到的近场图样；(b) 采用光束分析仪得到的远场图样；(c) 照相机记录的近场图样；(d) 照相机记录的远场图样

Fig. 16 Beam profiles of the seven-core PCF output with a fiber length of 20 m. (a) Near-field and (b) far-field profiles measured with a beam analyzer; (c) near-field and (d) far-field profiles taken with a camera

2014 年,国防科学技术大学采用平均功率为 141.6 W 的皮秒光纤激光抽运一段国产 7 芯 PCF,获得了平均功率为 104.2 W、连续光谱覆盖范围为 750~1700 nm 的超连续谱输出^[68]。该超连续谱光源的输出功率仅受限于抽运激光功率。以上实验表明通过合理的系统设计,基于多芯 PCF 能够获得平均功率更高、光谱更为优化的超连续谱。

3.4 光谱调控研究进展

在实际应用中,超连续谱光源的光谱质量多采用光谱宽度和平坦度进行衡量。对于 DWDM 光通信系统、光谱仪等系统中的多波长光源,采用在宽波段范围内产生平坦光谱的超连续谱光源,不仅可以满足系统对光谱带宽的要求,还能提高测量精度,降低功率均衡的技术难度。由于 PCF 独特的周期性结构,人们能够根据需要对其特性进行优化设计,因此研究人员不断尝试采用各种不同技术方案来实现超连续谱的调控。

对于超连续谱调控技术的研究,主要发展方向集中在对光谱宽度进行控制和对光谱平坦性进行调整两个方面。通过改变激光功率、脉宽等抽运光参数,虽然能够改变超连续谱的展宽程度,但是无法在指定波长范围产生超连续谱。要解决这一问题可设计 PCF 的几何结构或者改变拉锥光纤的拉锥参数,以获得需要的色散条件来控制产生的超连续谱范围。另一种方法是利用实芯光子带隙光纤的带隙效应以及带隙边缘的色散特性来控制超连续谱的范围。

2005 年,悉尼大学 Fuerbach 等^[69]通过在高非线性 PCF 的包层空气孔中填充高折射率材料($n > 1.4$)实现了带隙导光,并对带隙内飞秒脉冲的传输进行了理论和实验研究^[70-71]。随后的理论和实验研究进一步证实,由于在带隙边缘光纤色散斜率较大,导致其 SSFS 效应受带隙边缘处的高三阶色散抑制,实现了实心光子带隙光纤对光谱展宽的控制,研究结果如图 17 所示。

2012 年,北京邮电大学通过使用 Littman-Metcalf 型光带通滤波器增强超连续谱产生过程中的四波混频效应,进而改善超连续谱的平坦度^[72]。实验中用带宽为 3.5 nm 的滤波器,将超连续谱的平坦度改善为 0.22 dB,实验原理如图 18 所示,结果如图 19 所示。

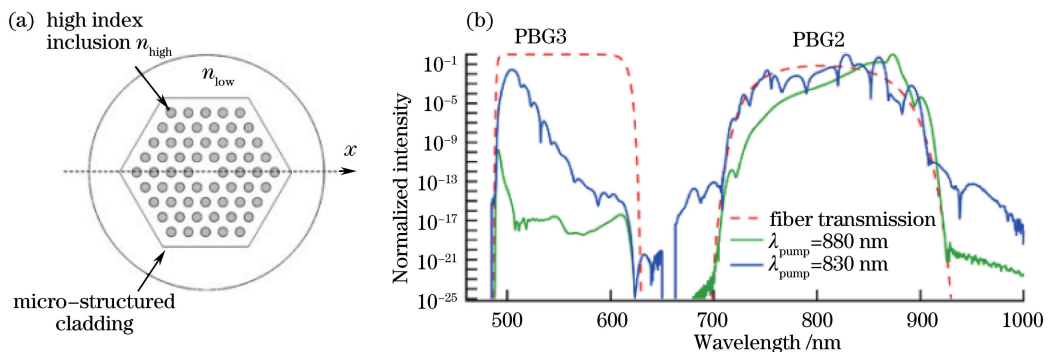


图 17 典型实芯光子带隙光纤^[70-71]。(a) 截面示意图；(b) 输出光谱

Fig. 17 Solid core photonic bandgap fiber. (a) Schematic of cross-sectional view; (b) output spectra

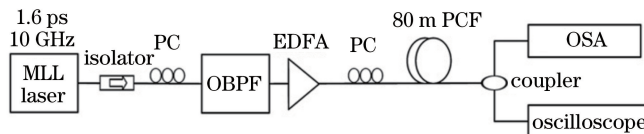
图 18 北京邮电大学研究的实验原理图^[72]

Fig. 18 Experimental setup from the Beijing University of Posts and Telecommunications

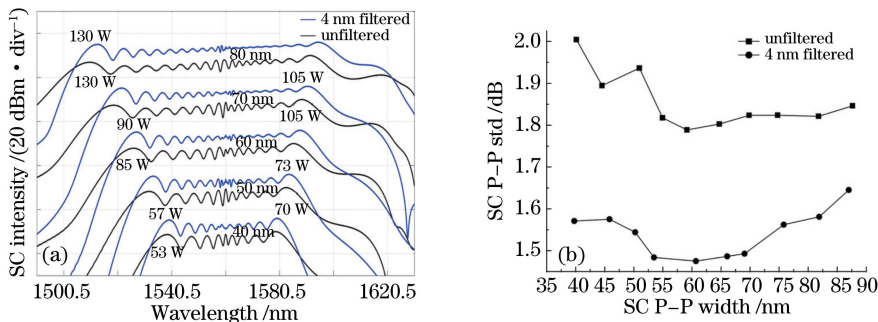
图 19 利用 Littman-Metcalf 型光带通滤波器改善超连续谱的平坦度^[72]

Fig. 19 Littman-Metcalf optical bandpass filter used to improve spectral flatness

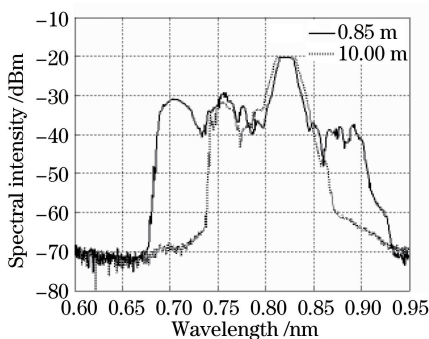
图 20 国防科学技术大学采用中心波长 820 nm 抽运实芯光子带隙光纤获得的输出光谱^[77]

Fig. 20 Output spectra of solid core photonic bandgap fiber with 820 nm laser pumping from the National University of Defense Technology

2012 年,国防科学技术大学利用实芯光子带隙光纤产生了光谱范围可控的定域超连续谱^[73-74],还制作了 PCF 合束器用于超连续谱光的合成^[75-76]。国防科学技术大学采用中心波长 820 nm 抽运实芯光子带隙光纤获得的输出光谱如图 20 所示。

2014 年,北京工业大学利用全光纤结构皮秒脉冲光纤激光器种子源、4 级放大系统及热扩芯技术,将高功率皮秒脉冲激光高效率地耦合到国产小芯径高非线性 PCF 中,得到了平均功率为 4.18 W、10 dB 光谱带宽为 1040 nm 的超连续谱激光输出^[78]。

3.5 利用液体填充光纤产生超连续谱研究进展

对于 PCF 来说,其色散、偏振及传输特性可通过改变 PCF 结构或者将乙醇、聚合物、液晶等各种液体完全或选择性地填充到 PCF 的空气孔中来调节。最近,由于液芯光纤或液芯 PCF 在中红外区能够有效透过并能够使用高非线性液体(如 CS_2),因此人们开始研究采用这种光纤产生中红外超连续谱。研究表明,非有机液体(如 CCl_4 和 CS_2)在中红外区域一直到 12 μm 均有很高的透射率,且在中红外范围内吸收峰很少。这些液体与 SiO_2 相比非线性系数非常高,甚至达到两个数量级的差别。利用液体光纤产生非线性光学效应的潜力已被理论研究所证实。此外,具有较高非线性系数和近零平坦色散曲线的光纤有助于得到平坦的超连续谱。液芯 PCF 能够满足以上要求,因此目前国内外越来越多的研究人员已开始利用液芯光纤产生超连续谱。

2010 年,德国马克斯·玻恩非线性光学和短时间光谱学研究所 Bethge 等^[79]采用中心波长为 1200 nm、峰值功率为 150 MW 的 45 fs 激光抽运注水的液芯 PCF,产生了光谱范围为 410~1640 nm 的超连续谱。同

年,德国斯图加特大学 Vieweg 等^[80]采用中心波长为 1030 nm、峰值功率为 10 kW 的 210 fs 激光抽运注 CCl₄ 的液芯 PCF,产生了光谱范围为 700~1300 nm 的超连续谱。

2013 年,美国亚利桑那大学科研人员分别采用中心波长为 1560 nm 和 1910 nm 的锁模光纤激光器抽运填充 CS₂ 的液芯光纤,产生了波长范围为 1460~2100 nm 和 1790~2400 nm 的超连续谱^[81],如图 21 所示。该研究认为光谱展宽主要是由于 CS₂ 非线性光学响应增强了拉曼效应。此外,通过该实验还可以看出,采用液芯光纤能够显著缩短输出超连续谱的光纤长度,这对器件小型化具有重要的意义。

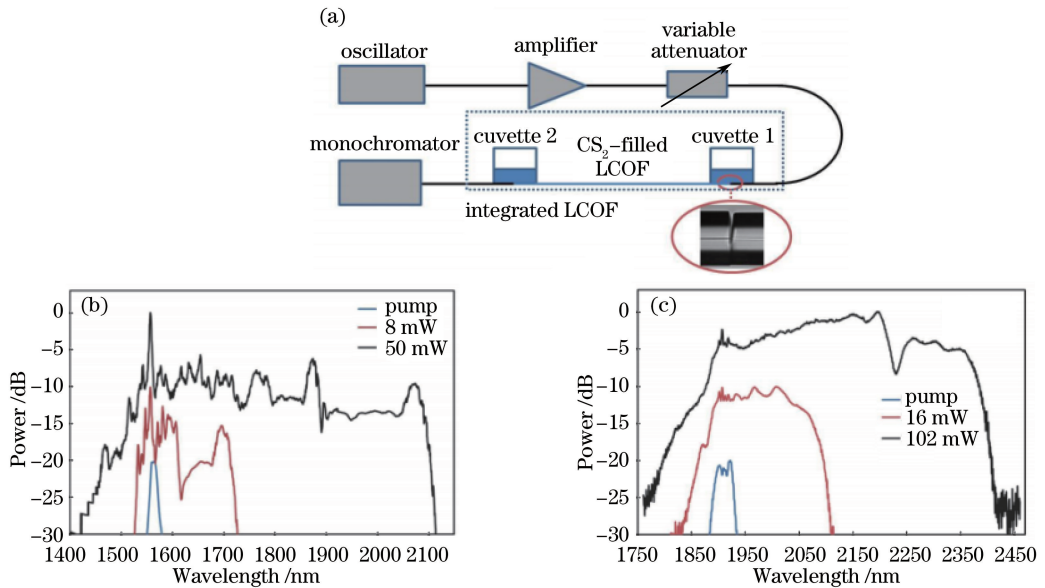


图 21 (a) 实验装置简图; (b) 波长范围为 1460~2100 nm 的输出超连续谱;

(c) 波长范围为 1790~2400 nm 的输出超连续谱^[81]

Fig. 21 (a) Schematic diagram of experimental setup; (b) supercontinuum spectra

in the wavelength range of 1460~2100 nm; (c) supercontinuum spectra in the wavelength range of 1790~2400 nm

一般来说,产生超连续谱所需要的光学非线性与抽运脉冲和介质相互作用相关。光纤中许多非线性影响来自光学克尔效应,即有效折射率随强度发生变化。这会引引起在光谱展宽过程中起重要作用的自相位调制。虽然克尔非线性理论只能描述材料对一定强度能量的非线性响应,但是对于高折射率光纤,即使在中等能量条件下,由于介质的饱和和非线性效应的影响,其高阶非线性极化仍不可避免。对于高折射率($n > 1.4$)的液体,如 CS₂、NO、CHCl₃ 等,其折射率远大于传统 SiO₂ 光纤,因此即使在中等功率条件下也会发生非线性饱和吸收。此外,由于高折射率液体填充的 PCF 光纤的非线性远大于 SiO₂ 纤芯的 PCF,这也会改变光纤的吸收系数。以上因素会使填充液体受双光子吸收等因素的影响而产生气泡膨胀,导致光纤损坏。因此,人们开始采用低折射率($n < 1.4$)的液体进行填充^[82]。2014 年, Ebnali-Heidari 等^[83]采用折射率为 1.32~1.38 的液体填充 PCF 的空气孔,在 1325 nm 波长为中心的近红外波长范围得到了近零反常色散的平坦曲线,并数值模拟了不同中心波长($1250 \text{ nm} < \lambda_0 < 1625 \text{ nm}$)对超连续谱输出光谱展宽的影响。研究发现,当中心抽运波长位于色散平坦区时,中心波长的变化会使输出光谱在基本不改变光谱宽度的条件下发生平移。在近零反常平坦色散区,通过改变抽运中心波长能够实现可调谐的超连续谱输出光谱范围。

此外,为了更好地控制液体在 PCF 中的填充方式,人们不断研究液体注入方法。德国斯图加特大学 Vieweg 等^[84-86]和 Gerosa 等^[87]先后对 PCF 液体填充方法进行了研究。2012 年,Vieweg 等^[84]采用 3D 激光直写技术实现了在 PCF 光纤中人为控制液体填充区域的技术,如图 22 所示。

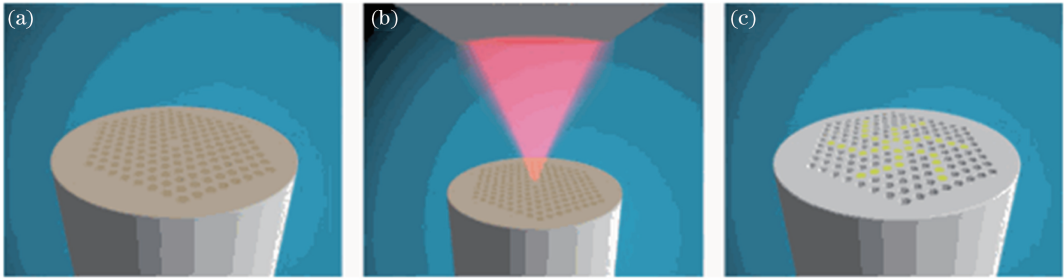


图 22 利用 3D 激光直写技术人为控制液体填充区域^[84]

Fig. 22 3D direct laser-writing technique used to selectively seal single holes

4 结束语

在实际应用中,基于光纤的超连续谱光源设计简单,能够获得宽带、变换极限以及空间相干的光束,使其非常适合现有以及将来的多种新兴应用。随着电信元件以及抽运激光二极管功率的提高,小型一体化超连续谱激光器的输出功率也会提高至 10 W 甚至更高。发展基于光纤的超连续谱光源无论在民用领域还是在军用领域都有非常重要的意义。

虽然基于光纤的平坦超连续谱光源前景光明,但有许多问题尚待研究。由于 PCF 本身特殊的波导特性和丰富的非线性特性,基于 PCF 的超连续谱模型还不完善,现有研究在一定程度上可以解释超连续谱的光谱结构,但缺乏对光谱平坦性参数定量描述的研究报道。因此,为了实现高平均功率、高光谱平坦性的超连续谱光源,很有必要进一步明确光纤结构参数对超连续谱输出影响的物理机制和影响因素,研究超短脉冲抽运条件下控制超连续谱输出光谱平坦性的方法及定量评价参数,研究纳秒脉冲抽运条件下 PCF 超连续谱平坦性及输出功率的影响因素和控制方法,为基于 PCF 的平坦超连续谱光源进一步走向实用奠定基础。

参 考 文 献

- Morioka T, Takara H, Kawanishi S, *et al.*. 1 Tbit/s (100 Gbit/s \times 10 channel) OTDM/WDM transmission using a single supercontinuum WDM source[J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(10): 906-907.
- Morioka T, Mori K, Kawanishi S, *et al.*. Multi-WDM-channel, Gbit/s pulse generation from a single laser source utilizing LD-pumped supercontinuum in optical fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, 6(3): 365-368.
- Liu B, Zhang L J, Xin X J, *et al.*. Symmetric terabit WDM pre-DFT OFDM access network using PCF-supercontinuum [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24356-24363.
- Nguyen-The Q, Matsuura M, Kishi N. WDM-to-OTDM conversion using supercontinuum generation in a highly nonlinear fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(18): 1882-1885.
- Langridge J M, Laurila T, Watt R S, *et al.*. Cavity enhanced absorption spectroscopy of multiple trace gas species using a supercontinuum radiation source[J]. *Optics Express*, 2008, 16(14): 10178-10188.
- Chen Y W, Raikkonen E, Kaasalainen S, *et al.*. Two-channel hyperspectral LiDAR with a supercontinuum laser source [J]. *Sensors*, 2010, 10(7): 7057-7066.
- Manninen A, Kaariainen T, Parviainen T, *et al.*. Long distance active hyperspectral sensing using high-power near-infrared supercontinuum light source[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7172-7177.
- Kaasalainen S, Lindroos T, Hyypä J. Toward hyperspectral lidar: Measurement of spectral backscatter intensity with a supercontinuum laser source[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(2): 211-215.
- Joo J E, Han L J, Sup R B, *et al.*. Spectrally sampled OCT imaging based on 1.7- μ m continuous-wave supercontinuum source[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, 18(3): 1200-1208.
- Xu B, Nagata T, Yamashita S. Supercontinuum generation in nonlinear fibers using high-energy figure-of-eight mode-locked fiber laser for SD-OCT application[C]. *SPIE*, 2014, 9157: 91572Y.
- Moon S, Kim D Y. Wide-band supercontinuum generation for sub-micron-resolution OCT by using a laser-diode-seeded amplified pulse source[C]. *SPIE*, 2006, 6103: 61030Y.

- 12 Tang Tao, Zhao Chen, Chen Zhiyan, *et al.*. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography and its application in inspection of industrial materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(17): 118-124.
唐 弢, 赵 晨, 陈志彦, 等. 超高分辨光学相干层析成像技术与材料检测应用[J]. *物理学报*, 2015, 64(17): 118-124.
- 13 Liang W, Xia H, Li J, *et al.*. Human adipose tissue derived mesenchymal stem cells are resistant to several chemotherapeutic agents[J]. *Cytotechnology*, 2011, 63(5): 523-530.
- 14 光粒网. NKT 激光器助 Bioptigen 成功实现 1 μm SD-OCT 成像系统[N/OL]. (2013-05-17) [2015-12-20] <http://www.diodelaser.com.cn/a/gongsijujiao/hotpoint/2013/0515/5048.html>.
- 15 Supercontinuum laser for multi-spectral energy propagation[Z/OL]. [2015-12-20] <https://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/9073>.
- 16 Yang Jinchuan, Huang Baoku, Zhang Zhengyu, *et al.*. Simulation study of detecting various gases based on far-infrared wide spectrum laser lidar[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(7): 743-746.
杨进川, 黄宝库, 章正宇, 等. 宽光谱激光雷达探测多种气体的仿真研究[J]. *激光与红外*, 2013, 43(7): 743-746.
- 17 Gan Yuanliu, Wang Xiaofei, Li Fudong. Development of abroad airborne IR counter measure technology[J]. *Tactical Missile Technology*, 2011(1): 122-126.
涂元柳, 王晓飞, 李富栋. 国外机载红外对抗技术的发展[J]. *战术导弹技术*, 2011(1): 122-126.
- 18 Overton G. IR countermeasures aim for safer flights[J]. *Laser Focus World*, 2011, 47(8): 35-43.
- 19 Zhang Jie. Development of US military CIRCUM system technology[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2013, 28(1): 7-11.
张 洁. 美军通用红外对抗系统技术的发展[J]. *光电技术应用*, 2013, 28(1): 7-11.
- 20 Suite of Infrared Countermeasures[SIIRCM][R/OL]. [2015-12-20] <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/siircm.htm>.
- 21 Islam M N. All-fiber designs extend supercontinuum sources into the mid-IR region[J]. *Laser Focus World*, 2012, 48(3): 56-60.
- 22 Zhong Ming, Ren Gang. 3~5 μm medium infrared laser countermeasure weapon system[J]. *Sichuan Ordnance Journal*, 2007, 28(1): 3-6.
钟 鸣, 任 钢. 3~5 μm 中红外激光对抗武器系统[J]. *四川兵工学报*, 2007, 28(1): 3-6.
- 23 Zhu Chen, Li Yao, Wang Xiongfei, *et al.*. Experiment study of interference of super-continuum light source on CMOS photodetectors[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(4): 374-377.
朱 辰, 李 尧, 王雄飞, 等. 超连续谱光源对 CMOS 图像传感器的干扰实验研究[J]. *激光与红外*, 2014, 44(4): 374-377.
- 24 Omni Sciences, Inc. Award List[R/OL]. [2015-12-20] <http://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/255463>.
- 25 Moselund P, Petersen C, Leick L, *et al.*. Highly stable, all-fiber, high power ZBLAN supercontinuum source reaching 4.75 μm used for nanosecond mid-IR spectroscopy[C]. *Advanced Solid-State Lasers Congress, Paris, 2013: JTh5A.9*.
- 26 Omni Sciences, Inc. [Z/OL]. [2015-12-20] <http://sbirsource.com/sbir/firms/4139-omni-sciences-inc>.
- 27 Supercontinuum fiber laser for multi-spectral energy propagation [Z/OL]. [2015-12-20] <http://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/387923>.
- 28 High power, broad band photonic crystal fiber lasers[Z/OL]. [2015-12-20] <http://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/381863>.
- 29 Supercontinuum laser for multi-spectral energy propagation[Z/OL]. [2015-12-20] <http://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/384931>.
- 30 High power mid-IR laser system for ESASE[Z/OL]. [2015-12-20] <http://www.sbir.gov/sbirsearch/detail/410311>.
- 31 中国新闻网. 美陆军接收机载通用红外对抗导弹防御系统[N/OL]. (2013-02-05) [2015-12-20] <http://www.chinanews.com/mil/2013/02-05/4548133.shtml>.
- 32 Ye Wen, Ye Benzhi, Huan Kewei, *et al.*. Development of the airborne laser anti-missile weapon[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(5): 481-486.
叶 文, 叶本志, 宦克为, 等. 机载激光反导武器的发展[J]. *激光与红外*, 2011, 41(5): 481-486.
- 33 Chai Lu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0101001.

- 柴路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0101001.
- 34 Chen Haihuan, Chen Zilun, Zhou Xuanfeng, *et al.*. Research progress on supercontinuum generation in fiber tapers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 070004.
陈海寰, 陈子伦, 周旋风, 等. 拉锥光纤产生超连续谱的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 070004.
- 35 陈胜平, 王建华, 谌鸿伟, 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.
- 36 Fang Hong, Ma Ruilong, Wei Hui Feng. Effect of fiber splicing of photonic crystal fiber and single-mode fiber on supercontinuum generation[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2012, 32(3): 187-191.
房鸿, 马瑞龙, 韦会峰. 光子晶体与单模光纤熔接对超连续谱展宽的影响[J]. 西安工业大学学报, 2012, 32(3): 187-191.
- 37 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.
- 38 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.
- 39 Song Rui, Hou Jing, Chen Shengping, *et al.*. All-fiber 177.6 W supercontinuum source[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5): 546-549.
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): 546-549.
- 40 Song Yanrong, Zhu Jianyin, Zhang Xiao, *et al.*. The influence of zero-dispersion point of photonic crystal fiber on supercontinuum generation[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2011, 17(3): 237-241.
宋晏蓉, 朱建银, 张晓. 不同零色散点光子晶体光纤的超连续谱产生[J]. 量子光学学报, 2011, 17(3): 237-241.
- 41 Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Guilin, *et al.*. Dual-wavelength pumped supercontinuum generation in tapered photonic crystal fiber[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.
- 42 Zhang Xiaojuan. Supercontinuum generation in photonic crystal fibers with different dispersion[J]. *Journal of Weinan Teachers University*, 2011, 26(2): 14-20.
张晓娟. 不同色散区光子晶体光纤中超连续谱的产生[J]. 渭南师范学院学报, 2011, 26(2): 14-20.
- 43 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): 1107002-6.
- 44 Swiderski J, Michalska M, Maze G. Mid-IR supercontinuum generation in a ZBLAN fiber pumped by a gain-switched mode-locked Tm-doped fiber laser and amplifier system[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 7851-7857.
- 45 Guo C Y, Ruan S C, Yan P G, *et al.*. Flat supercontinuum generation in cascaded fibers pumped by a continuous wave laser[J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11046-11051.
- 46 Hu X H, Zhang W, Yang Z, *et al.*. High average power, strictly all-fiber supercontinuum source with good beam quality[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2659-2661.
- 47 张斌, 杨未强, 侯静, 等. 国内首次实现 1.9~4.3 μm 全光纤中红外超连续谱光源[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1202001-4.
- 48 Sun Chang, Ge Tingwu, Li Siyuan, *et al.*. 67.9 W high power all-fiber white-light supercontinuum laser source[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(12): 120101.
孙畅, 葛廷武, 李思源, 等. 67.9 W 高功率全光纤白光超连续谱激光器[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(12): 120101.
- 49 Li Min, Huo Li, Wang Dong, *et al.*. Supercontinuum generation based on dual-wavelength coherent ultrashort pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0406001.
李旻, 霍力, 王东, 等. 基于双波长相干超短脉冲光源的超连续谱产生[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0406001.
- 50 Avdokhin A V, Popov S V, Taylor J R. Continuous-wave, high-power, in Raman continuum generation holey fibers[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(15): 1353-1355.
- 51 Travers J C, Popov S V, Taylor J R, *et al.*. Extended bandwidth CW-pumped infrared supercontinuum generation in low water-loss PCF[C]. *Conference on Lasers & Electro-Optics*, 2005, 3: 2325-2327.
- 52 Gattass R R, Shaw L B, Sanghera J S. Microchip laser mid-infrared supercontinuum laser source based on an As_2Se_3 fiber[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3418-3420.
- 53 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]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14435-14447.
- 54 Kelleher E J R, Erkintalo M, Travers J C. Fission of solitons in continuous-wave supercontinuum[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(24): 5217-5219.
- 55 Chapman B, Popov S V, Taylor R. Continuous wave supercontinuum generation through pumping in the normal dispersion region for spectral flatness[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(15): 1325-1327.
- 56 Facao M, Carvalho M I, Fernandes G M, *et al.*. Continuous wave supercontinuum generation pumped in the normal group velocity dispersion regime on a highly nonlinear fiber[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(4): 959-966.
- 57 Wang Q, Fan Y X, Li Y Q, *et al.*. Ultrabroadband SCG with quasi-continuous wave nanosecond-long pump pulses in PCF[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(7): 071405.
- 58 Wang Yanbin. The study on supercontinuum generation by pumping photonic crystal fibers with long-pulses and continuous-wave[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
王彦斌. 长脉冲和连续光泵浦光子晶体光纤产生超连续谱的相关研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- 59 Cheung K K Y, Zhang C, Zhou Y, *et al.*. Manipulating supercontinuum generation by minute continuous wave[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(2): 160-162.
- 60 Guo C Y, Ruan S C, Yan P G, *et al.*. A low-cost CW-pumped supercontinuum source[J]. *Laser Physics*, 2013, 23(5): 1382-1391.
- 61 Guo Chunyu, Lin Huaiqin, Ruan Shuangchen, *et al.*. High-power all-fiber CW-pumped supercontinuum source[J]. *Journal of Shenzhen University (Science & Engineering)*, 2013, 30(4): 423-427.
郭春雨, 林怀钦, 阮双琛, 等. 连续波抽运的高功率全光纤化超连续谱光源[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2013, 30(4): 423-427.
- 62 Liu Kun, Shi Hongxing, Liu Jiang, *et al.*. High-power all-fiber mid-infrared supercontinuum generation pumped by noise-like pulses[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0902003.
刘 昆, 师红星, 刘 江, 等. 基于类噪声脉冲抽运的高功率全光纤中红外超连续谱光源[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0902003.
- 63 Chen H W, Chen S P, Wang J H, *et al.*. 35 W high power all fiber supercontinuum generation in PCF with picosecond MOPA laser[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(23): 5484-5487.
- 64 Michaille L, Taylor D M, Bennett C R, *et al.*. Characteristics of a Q-switched multicore photonic crystal fiber laser with a very large mode field area[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(1): 71-73.
- 65 Fang X H, Hu M L, Liu B W, *et al.*. Generation of 150 MW, 110 fs pulses by phase-locked amplification in multicore photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2326-2328.
- 66 Fang X H, Hu M L, Xie C, *et al.*. High pulse energy mode-locked multicore photonic crystal fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 1005-1007.
- 67 Fang X H, Hu M L, Huang L L, *et al.*. Multiwatt octave-spanning supercontinuum generation in multicore photonic-crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2292-2294.
- 68 Chen Hongwei, Wei Huifeng, Liu Tong, *et al.*. Hundred-watt-level supercontinuum generation in seven-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(4): 044205.
谔鸿伟, 韦会峰, 刘 通, 等. 七芯光子晶体光纤中百瓦量级超连续谱的产生[J]. *物理学报*, 2014, 63(4): 044205.
- 69 Fuerbach A, Steinvurzel P, Bolger J A, *et al.*. Nonlinear propagation effects in antiresonant high-index inclusion photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(8): 830-832.
- 70 Pureur V, Dudley J M. Nonlinear spectral broadening of femtosecond pulses in solid-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(16): 2813-2815.
- 71 Pureur V, Dudley J M. Design of solid core photonic bandgap fibers for visible supercontinuum generation[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(6): 1661-1668.
- 72 Jing Qi. Theoretical and experimental researches on photonic crystal fibers nonlinearity and polarization demultiplexing technologies[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.
景 琦. 光子晶体光纤非线性效应及偏振解复用技术的理论与实验研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.
- 73 Zhang Bin, Hou Jing, Jiang Zongfu. Effects of material dispersion on dispersion in bandgaps of all-solid photonic bandgap

- fibers[J]. Journal of 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.
- 74 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.
- 75 Zhou H, Chen Z L, Li J, *et al.*. The effect of PCF combiners on the whole loss under different lengths of transition zone [C]. SPIE, 2011, 8191: 81911Y.
- 76 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.
- 77 Zhang Bin. Study on controllable visible supercontinuum generation and mid-IR supercontinuum generation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- 张 斌. 光谱可控的可见光超连续谱与中红外超连续谱产生研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- 78 高 静, 葛廷武, 李伍一, 等. 吉赫兹高功率全光纤超连续谱激光光源[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1102004-7.
- 79 Bethge J, Husakou A, Mitschke F, *et al.*. Two-octave supercontinuum generation in a water-filled photonic crystal fiber [J]. Optics Express, 2010, 18(6): 6230-6240.
- 80 Vieweg M, Gissibl T, Pricking S, *et al.*. Ultrafast nonlinear optofluidics in selectively liquid-filled photonic crystal fibers [J]. Optics Express, 2010, 18(24): 25232-25240.
- 81 Churin D, Nguyen T N, Kieu K, *et al.*. Mid-IR supercontinuum generation in an integrated liquid-core optical fiber filled with CS₂ [J]. Optical Materials Express, 2013, 3(9): 1358-1364.
- 82 Maji P S, Chaudhuri P R. A new design for all-normal near zero dispersion photonic crystal fiber with selective liquid infiltration for broadband supercontinuum generation at 1.55 μm [J]. Journal of Photonics, 2014, 2014: 728592.
- 83 Ebnali-Heidari M, Saghaei H, Koohi-Kamali F, *et al.*. Proposal for supercontinuum generation by optofluidic infiltrated photonic crystal fibers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 582-589.
- 84 Vieweg M, Gissibl T, Giessen H. Photonic-crystal fibers are selectively filled with nonlinear liquids[J]. Laser Focus World, 2011, 47(6): 53-55.
- 85 Gissibl T, Vieweg M, Vogel M M, *et al.*. Preparation and characterization of a large mode area liquid-filled photonic crystal fiber: Transition from isolated to coupled spatial modes[J]. Applied Physics B, 2012, 106(3): 521-527.
- 86 Kedenburg S, Vieweg M, Gissibl T, *et al.*. Linear refractive index and absorption measurements of nonlinear optical liquids in the visible and near-infrared spectral region[J]. Optical Materials Express, 2012, 2(11): 1588-1611.
- 87 Gerosa R M, Bozolan A, de Matos C J S, *et al.*. Novel sealing technique for practical liquid-core photonic crystal fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(3): 191-193.