

用于实现高功率超短脉冲源的关键技术

李荣华,唐城田,魏淮

(北京交通大学 电子信息工程学院,北京 100044)

摘要:高功率超短脉冲源应用广泛,在信息、精密加工、医疗、国防和基础科学研究等领域备受关注。针对各个领域对高功率需求不断增长的趋势,分别从种子源、放大技术和堆叠技术3个方面介绍了实现高峰值功率的主流技术,并对目前出现的新型锁模激光器、新型放大器以及各种脉冲堆叠等重要新技术的实现方法和国内外研究进展进行了介绍。最后对未来超高功率的实现技术进行了预测和展望。

关键词:高功率脉冲;光纤激光器;光纤放大器;脉冲堆叠

中图分类号:TN248 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)12-0021-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.12.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Key technologies for implementing high power ultrashort pulse source

LI Ronghua, TANG Chengtian, WEI Huai

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: High-power ultra-short pulse sources are widely used in information, precision machining, medical, defense, and basic scientific research. Aiming at the increasing trend of high power demand in various fields, the mainstream technologies for achieving high peak power are introduced from three aspects of seed source, amplification technology and stacking technology. The implementation methods of important new technologies such as new mode-locked lasers, new amplifiers and various pulse stacks and the research progress at home and abroad are introduced. Finally, the future implementation of ultra-high power technology is predicted and forecasted.

Key words: high power pulses; optical fiber laser; optical fiber amplifier; pulse stacking

0 引言

高功率超短脉冲激光在军事、工业和医学等领域发挥重要作用。为了获得高峰值功率需要增加激光器的腔内增益,但单纯地通过提高激光器泵浦功率和腔内增益只会导致腔内不能维持单脉冲状态,出现多脉冲或混沌不稳定状态,从而限制单脉冲峰值功率的提升。因此,为了获得稳定的单脉冲,腔内增益只能维持在低水平附近,单脉冲峰值功率提高受限^[1];另外,高

功率超短脉冲传输时会引发介质的雪崩问题^[2],造成光纤损伤,以及高功率会引发温度过高而导致光纤热损伤。因此,实现高功率超短脉冲仅靠单纯提高作为种子源的锁模激光器的峰值功率是不够的,必须从多方面入手。目前的高功率超短脉冲系统通常由种子源、放大器和脉冲相干合成系统构成。通过适当提高作为种子源的锁模光纤激光器的峰值功率,结合放大器实现功率的进一步提高,再与各种脉冲相干合成技术相结合来综合提高最终的输出功率。本文就近年来种子源、放大器和脉冲相干合成系统的新技术发展状况展开讨论。

1 种子源技术

1.1 正常色散耗散孤子锁模激光器

锁模光纤激光器在色散的演变历程如下:最初的锁模光纤激光器是工作在反常色散的孤子锁模激光

收稿日期:2019-05-31。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61775015)资助。

作者简介:李荣华(1993-),女,硕士生,现就读于北京交通大学电子信息工程学院通信与信息系统专业,主要从事光纤通信中新型锁模光纤激光器的设计和改进方面的研究。



器,受面积定理^[3,4]的影响,输出的脉冲能量会受限,通常为 0.1 nJ^[5]。后来出现了先展宽再压缩的色散管理孤子锁模光纤激光器,它是由 MIT 研究组最先实现^[6]。展宽是为了降低功率,从而进一步达到降低非线性的目的,脉冲输出的能量约为 1 nJ^[6],脉宽在 100 fs 左右。之后又出现了腔内净色散为正色散的自相似锁模光纤激光器。2000 年,Fermann 等人首次指出抛物线型脉冲在传输时具有线性啁啾并避免波分裂特性^[7];2004 年,Cornell 大学的 Ilday 等人完成实验验证,输出能量在 10 nJ^[8];2006 年,由美国康奈尔大学的 Wise 研究小组首次提出并成功研制全正色散锁模光纤激光器,获得了 3 nJ、120 mW 的脉冲序列^[9]。

从色散方面演变的锁模光纤激光器中可看到脉冲能量在不断地提升。但是,这 4 种光纤激光器都存在很大的限制因素,都受到非线性效应的制约,像孤子和色散管理孤子锁模光纤激光器,最多可以保持约 π ^[5] 的非线性相移;自相似和全正色散锁模光纤激光器最多可以保持约 10π 的非线性相移^[10],所以能量的进一步提升需要从非线性管理入手。

1.2 基于超强非线性管理的 Mamyshev 振荡器

想进一步提高脉冲的能量,需要很好地管理光纤中的非线性。最新出现的 Mamyshev 振荡器在管理波导介质中非线性的方面展示出强大的能力,峰值功率可实现数量级的改进。Mamyshev 振荡器是由 Mamyshev 再生技术发展而来的,这种理念是 1998 年由 Bell 实验室的 Mamyshev 最先提出并进行验证^[11]。输入强度和脉宽不同的信号经过一段非线性光纤,利用自相位调制进行频谱的展宽,然后再经过光谱滤波器进行滤波,最终输出强度和脉宽都一致的再生脉冲。Mamyshev 再生器对低功率信号有隔离作用,所以 Mamyshev 谐振腔对噪声会有非常强的抑制能力,这是其它激光器所不具备的。Mamyshev 振荡器是由 2 个 Mamyshev 再生器级联构成。通过设计振荡器来支持抛物线脉冲形成并利用 Mamyshev 再生的阶跃式饱和吸收器特性。

2015 年,Regelskis 等人首先展示了一个高性能的 Mamyshev 振荡器,这种环境稳定的振荡器产生持续时间为几皮秒(ps)量级能量为 2.8 nJ 的脉冲,并且是线性啁啾,可以通过光栅进行压缩,变换极限可达飞秒(fs)量级,但是系统不可以自启动,需要外加种子源^[12]。

2017 年,Frank 等人搭建了一种 Mamyshev 腔振荡器结构,如图 1 所示。掺镱光纤提供增益,所有光纤都是保偏光纤。注入中心波长为 1035 nm 的种子脉冲频

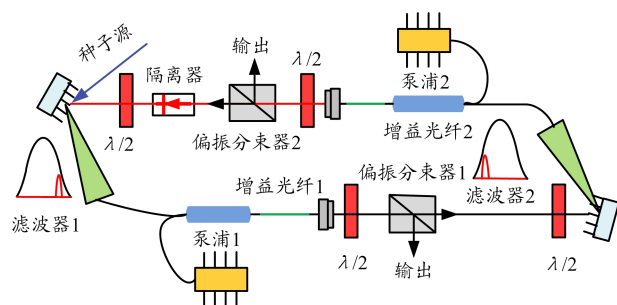


图 1 Mamyshev 振荡器示意图

谱放大展宽至 1040 nm 和 1030 nm 附近,高斯滤波器用于对 2 个目标波长 (1030 nm 和 1040 nm) 进行选取,偏振分束器用作耦合器输出,半波片用于调整进入保偏光纤的光的偏振态并优化输出耦合比。实验结果揭示了 Mamyshev 振荡器可管理约 60π 的非线性相移,理论上,脉冲可以累积 140π 的往返非线性相移并仍然稳定。在实验中,产生约 17 MHz 的约 50 nJ 和约 40 fs 脉冲^[13]。2018 年,Frank 等人对结构进行了优化,最终输出脉宽为 400 fs,能量为 200 nJ 的高质量脉冲^[14]。2019 年,天津大学超快光学实验室实现了 50 fs、13 MW 的脉冲输出,为论文发表时输出功率最高的激光器^[15]。

Mamyshev 腔振荡器结构为峰值功率的进一步提高开拓了思路。近几年,Regelshis 等人的实验报道^[11]很好地说明了 Mamyshev 振荡器相较于传统的锁模激光器的潜在实际优势,可以管理超大的非线性相移,且对噪声和连续波有很强的抑制作用,但同时会引发自启动问题。解决的方案如让放大的自发辐射(ASE)通过相互重叠的滤波器,系统运转后再分离,或者外加一个辅助腔。但是,自启动机理尚不明确。

光纤振荡器的峰值功率随着所使用脉冲的演变呈现数量级增长的趋势。迄今为止,研究的振荡器峰值功率已达兆瓦(MW)量级,与商用固体激光器相媲美,甚至,高能超短脉冲某些指标(如持续时间(约 40 fs))已超过钛蓝宝石激光器。图 2 为不同类型光纤激光器峰值功率的发展史^[16]。

2 放大器技术

光纤激光器输出实现高功率达到一定程度后,进一步提高功率就需要寻找其它的途径,继而有利用激光器作为种子源的放大器出现。光纤放大器是利用非线性效应或者受激辐射对入射光信号进行放大,对于高峰值功率脉冲常用的光纤放大技术有啁啾脉冲放大(CPA)和自相似脉冲放大。

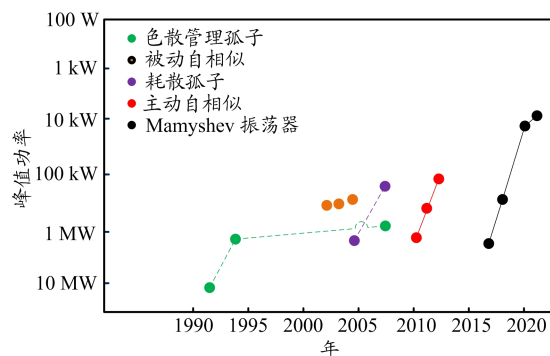


图2 不同类型光纤激光器峰值功率的发展

2.1 CPA 技术

功率增加带来的是介质的损伤问题,所以峰值功率进一步提升会受此限制。CPA 概念的出现成功地将峰值功率提升到几十兆瓦量级;而大模场面积光纤和色散补偿光纤的广泛应用,将峰值功率提升到千兆瓦(GW)量级。振荡器产生种子脉冲,展宽器对输入的脉冲进行展宽,达到降低峰值功率的目的,进而降低光纤放大中的非线性效应的影响,最后对放大后的脉冲进行压缩,实现高功率。

1985年,Rochester 大学的 Gerard 与 Donna 正式提出该技术的概念^[17],在 1993 年,Stock 等人最先搭建系统,成功实现了能量为 1.4 nJ 的脉冲输出^[18]。2001 年,Galvanauskas 等人首次实现了全光纤飞秒激光 CPA 系统毫焦(mJ)量级的脉冲输出,搭建了三级放大系统,实现了脉宽为 250 fs、能量为 1.2 mJ 和峰值功率为 3 MW 的脉冲输出^[19]。

2.2 自相似脉冲放大技术

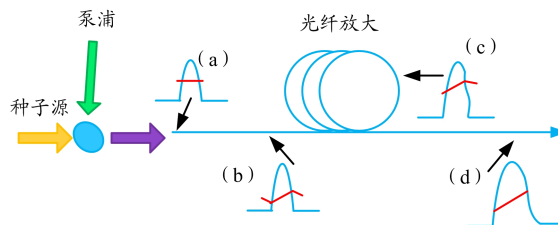
在种子脉冲质量不高的情况下,自相似脉冲放大技术表现出突出的优点,不论输入的初始脉冲是何种形状,只要演化距离够长,最终都会以抛物线形状的自相似脉冲输出。该放大技术利用的是正色散增益光纤,在光纤放大过程中利用其非线性与正色散相互作用形成的自相似演化来避免非线性啁啾累积,以此达到实现提高放大脉冲的可压缩性。而且,自相似脉冲可容忍高的非线性且不发生波裂,利于能量的提升。1996 年,Tamura 等人首次在具有正常色散和增益的光纤进行了非线性脉冲演化的仿真尝试^[20]。2000 年,Fermann 等人实现了压缩后脉冲宽度为 68 fs,峰值功率为 80 kW 的抛物线脉冲输出^[21]。

自相似放大器受益于自相似非线性吸引子,它与种子的许多特性无关,但在更高的能量下,它们的光谱会溢出增益带宽,降低压缩脉冲的质量。

2.3 增益管理非线性放大(GMN)技术

在典型的 CPA 系统中,由于放大器增益窄化和展宽器与压缩器的残余色散失配问题,脉冲的持续时间被限制在 200 fs 左右,虽然自相位调制(SPM)产生的非线性相位可以在一定程度上减小色散失配问题,但增益窄化仍然是一个持续且主要的挑战。通过非线性脉冲压缩可以得到较短的脉冲,但这增加了系统的复杂性、降低了系统的整体效率。最近,FRANK WISE 等人发现了一种新的放大技术——GMN,成功解决了高功率超短脉冲系统中非线性管理和增益窄化问题^[22]。

这种放大机制的主要特点是使用动态演化的增益谱作为自由度:当脉冲经历非线性光谱展宽时,吸收和放大会积极地重塑它的脉冲和增益谱形状,其放大过程如图 3 所示。输入的脉冲(图 3(a)处)最初演化成自相似或类似的脉冲(图 3(b)处)。随着脉冲能量和带宽的增加,增益整形开始阻碍脉冲能量的增长,导致预期的非线性脉冲畸变和自相似传播的损失(图 3(c)处)。然而,如果允许脉冲演化继续下去,就会出现一种新的机制,输出脉冲能量增加且演变成具有平滑光谱的不对称时间分布的轮廓(图 3(d)处)。新的脉冲产生了一种单调的啁啾,可以用光栅对来补偿。Frank Wise 等人的实验展示了最新的科研成果,获得了能量为 200 nJ,压缩后持续时间为 40 fs 的宽带放大脉冲,可管理 120π 的非线性相移。仿真表明:在泵浦功率较大的情况下,能量为 300 nJ 和脉宽为 30 fs 脉冲是可能的^[22]。

图3 GMN结构示意图^[21]

3 脉冲合成技术

虽然上述各种脉冲放大技术可进一步扩展光纤激光器的性能,但单一的光纤仍无法提供更高的性能。因此,脉冲合成技术应运而生并且成功地将性能提升到目前单一发射器系统的极限之外。可参考的相干合成技术如空间合束脉冲放大技术、时域分割脉冲放大技术、光谱分割脉冲放大技术和脉冲相干堆叠放大技术等。

3.1 空间合束脉冲放大技术

在脉冲放大过程中受光纤纤芯直径和非线性效应的影响,即使用大模场面积的光子晶体光纤,将脉冲展到最宽,在光纤输出端获得的能量也远小于光纤中储存的能量,峰值功率只有千瓦量级。由此,研究学者想到了空间合束的解决办法,将脉冲分成若干路,分别放大再合成。理论上证明可以将上千根光纤的光合束,但实际上的研究达不到预期的效果。

空间合束被认为是光纤的模场直径的人为增加,而没有相关的有害影响,例如降低的光束质量。空间合束主要应用的是非相干合束技术,不需要考虑脉冲的相位和波长是否匹配,结构简单、操作方便;相干合束技术需要保持合成脉冲的相位一致、波长一致,实际结构复杂、操作难度大。在2016年的实验中利用非相干合束实现了合成了8根光纤,输出功率1 kW,输出能量1 mJ^[23]。

3.2 时域分割脉冲放大技术

受CPA概念中先展宽后压缩的启发,时域分割放大技术出现。将一个时域脉冲分割成几个小脉冲,如图4所示。首先,利用偏振分光技术,将时域脉冲进行切割,分割后的多个子脉冲采用时间延迟技术实现重复频率倍增;然后,将分割后的子脉冲耦合进一根光纤,作用类似于脉冲展宽;之后,利用放大器分别进行放大,正向的一系列操作完成后再逆向操作;最终,将几个子脉冲合成一个脉冲,以此来达到提高脉冲功率的目的。此技术可以和空间合束结合起来,使得分割合成的脉冲数目大大增加。这种技术需要的装置比较复杂,操作过程相对繁琐^[24]。

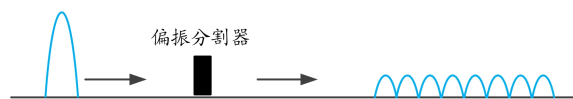


图4 时域分割放大

2016年,文献[25]报道了通过偏振分割多路复用32个分割脉冲,产生脉宽为126 fs、能量为20.3 nJ和重复频率为80 MHz变换极限脉冲,对应于161 kW的峰值功率。

2017年,德国耶拿大学的Stark等人提出了一种新技术——电光调制时域分割技术,将单脉冲分割成4路脉冲,最终输出能量在0.35~3.5 μJ ^[26]。该技术优于传统时域分割技术,因为该技术对每个子脉冲的幅度和相位进行调整,利于解决子脉冲能量饱和效应和相位失配带来的影响,为克服脉冲能量和峰值功率的进一步提升遇到的瓶颈提供了新的思路。

2019年,文献[27]报道了一种新引进的技术——大功率光电控制分频脉冲放大(EDPA)技术,将8个拉伸的飞秒量级脉冲在2个高功率光纤放大器通道中放大,然后相干合成一个脉冲;最后将信号压缩到255 fs,脉冲能量为3 mJ,平均功率为105 W。EDPA提供的额外自由度,如直接获取每个脉冲中所有单个脉冲的振幅和相位,被用来补偿增益饱和效应。

时域脉冲分割放大类似于时间脉冲持续时间的人为增加,因此它可以导致可实现的脉冲能量和峰值功率的增加。该技术可与空间合束技术、CPA技术相结合,能够产生更高的脉冲输出。利用时域、空域等多维技术相结合,为高功率输出提供可能。

3.3 光谱分割脉冲放大技术

与时域分割脉冲放大技术相对应的是频域的操作,将脉冲光谱切割,几个小光谱经过各自的放大部分整合输出,就是所说的光谱分割放大技术。通常的光谱分割是利用光栅实现的,经过光栅分割后耦合进一根多芯光纤,之后经过增益光纤放大,最后再由光栅整合输出。2015年,文献[28]报道了该技术的实验,实验中把40 nm的光谱分割成12个小光谱,耦合到15芯光纤中,放大到平均功率100 mW,最终光谱合成产生100 fs的脉冲。

3.4 脉冲相干堆叠放大技术

时域分割放大技术,操作过程复杂,而出现的脉冲相干堆叠放大技术相对简单,即将脉冲列中大量的脉冲在腔内罗列叠加起来,概念图如图5所示。此技术需要腔增强技术,提出了高Q值腔^[29]和低Q值腔^[30]。这2种腔体的区别在于输入耦合镜的反射率和堆积后的脉冲从腔内的导出方式。

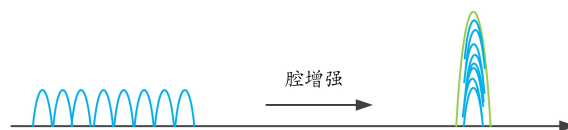


图5 脉冲时间堆积

2017年,John Ruppe等人利用相干脉冲堆叠技术,将81个脉冲相干叠加成单脉冲,将光脉冲的持续时间延长了2~3个数量级,最终实现了堆叠脉冲压缩后变换极限为300 fs、重复频率为1 kHz和能量为5.4 mJ的脉冲输出,且失真较小^[31]。

2018年,文献[32]报道了CPA技术与相干脉冲堆叠技术相结合的实例。在掺铯光纤CPA系统产生的81个毫焦脉冲被相干地堆积在4+4个多路复用腔中,

由4组1 ns往返腔和4组9 ns往返腔组成。经叠加后,利用衍射光栅脉冲压缩器将拉伸脉冲压缩到540 fs以下,最终输出能量高达十几毫焦。

各种脉冲堆积技术,与高性能的放大器相结合,可以进一步地对光脉冲的质量进行优化,最终产生的高功率和高重复频率的光脉冲有可能超过CPA技术输出的脉冲,对进一步提高功率提供了可能的思路。

4 未来可能产生高功率的高阶模光纤激光器

锁模光纤激光器中多模光纤的研究刚起步。最新的研究进展是时空非线性多模光纤,使用渐变折射率光纤,不同模式下的超短脉冲可以产生强烈的相互作用,随着模式数量的增加,克尔非线性光束清除和时空模式锁定现象会出现。克尔非线性清除已被证明为在多模光纤系统内产生高能量脉冲提供手段,可用于激光器和放大器^[2]。时空模式锁定现象中当模式色散很小时,不同模式下的脉冲不会分离成子脉冲,而是可以锁定在一起形成高功率超短多模脉冲。2017年有报道显示:此种技术下的去啁啾脉冲可达1 GW^[34]。

5 结束语

近年来,用于实现高功率超短脉冲的技术在种子源、放大器和脉冲相干合成方面都有了新的发展,在种子源方面,Mamyshev振荡器的出现解决了激光器中非线性效应制约的问题,将激光器的峰值功率提升到MW量级;在放大器方面,CPA技术是目前获得高功率超短脉冲的主流技术,可以产生GW^[35]量级的脉冲,而GMN技术的出现解决了光纤放大系统中高非线性管理和增益窄化问题,利用非线性可以产生比低于100 fs的脉冲的增益谱更宽的带宽,可以管理约 200π 的非线性相移;在能量提升受光纤纤芯和压缩光栅器件等的制约时,脉冲相干合成技术可以提供单一光纤系统无法产生的能量。由此可见,只有多种技术结合起来才能达到最高脉冲能量,多模光纤结合激光器和放大器可能会产生超过传统单模的脉冲,不同模式不同维度的脉冲之间产生强烈反应,可能意味着高功率的出现。

未来,对非线性和多模光纤的研究会更加深入,更加新型的高功率超短脉冲源也将不断涌现。从激光器到放大器再到结合了激光器和放大器的各种脉冲堆积放大技术,体现了技术发展的整体性,时域、空域多维度的技术相结合才能实现更高的输出功率。

参考文献:

- [1] WEI H, LI B, SHI W, et al. General description and understanding of the nonlinear dynamics of mode-locked fiber lasers[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1292-1-1292-12.
- [2] 李潮,徐文成. 高功率飞秒脉冲光纤激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(10): 17-23.
- [3] 周勤. 光孤子传输特性的解析研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [4] WANG Z, DU S, WANG Z, et al. Passive Mode-Locked Yb~(3+)-Doped Laser Based on Chired Fiber Bragg Grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0802002-1-0802002-5.
- [5] MOLLENAUER L F, STOLEN R H. The soliton laser [J]. Optics Letters, 1984, 9(1): 13-15.
- [6] SONG Y J, HU M L, WANG C L, et al. Environmentally Stable, High Pulse Energy Yb-Doped Large-Mode-Area Photonic Crystal Fiber Laser Operating in the Soliton-Like Regime [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(13): 1088-1090.
- [7] FERMAN M E, KRUGLOV V I, THOMSEN B C, et al. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(26): 6010-6013.
- [8] ILDAY F O, BUCKLEY J R, WISE F W, et al. Self-Similar Evolution of Parabolic Pulses in a Laser [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(21): 213902-1-213904.
- [9] CHONG A, BUCKLEY J, RENNINGER W, et al. All-normaldispersion femtosecond fiber laser[J]. Opt. Express, 2006, 14(21): 10095-10100.
- [10] ILDAY F O, BUCKLEY J R, WISE F W, et al. Self-Similar Evolution of Parabolic Pulses in a Laser [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(21): 213902-1-213902-4.
- [11] MAMYSHEV P V. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect [C]// Optical Communication, September 20-23, 1998, Madrid, Spain. New Jersey: IEEE, 1998: 475-476.
- [12] REGELSKIS K, ŽELUDEVICIUS J, VISKONTAS K, et al. Ytterbium-doped fiber ultrashort pulse generator based on self-phase modulation and alternating spectral filtering[J]. Opt. Lett., 2015, 40(22): 5255-5258.
- [13] LIU Z, ZIEGLER Z M, WRIGHT L G, et al. Megawatt peak power from a Mamyshev oscillator[J]. Optica, 2017, 4(6): 649-654.
- [14] SIDORENKO P, FU W, WRIGHT L G, et al. Self-seeded, multi-megawatt, Mamyshev oscillator[J]. Opt. Lett., 2018, 43(11): 2672-2675.
- [15] LIU W, LIAO R, ZHAO J, et al. Femtosecond Mamyshev oscillator with 10-MW-level peak power[J]. Optica, 2019, 6(2): 194-197.
- [16] WALTER F, WRIGHT L G, PAVEL S, et al. Several new directions for ultrafast fiber lasers [Invited][J]. Optics Express, 2018, 26(8): 9432-9463.
- [17] STRICKLAND D, MOUROU G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 55(6): 447-449.
- [18] STOCK M L, MOUROU G. Chirped pulse amplification in an erbium-doped fiber oscillator/erbium-doped fiber amplifier system[J]. Optics Communications, 1994, 106(4): 249-252.
- [19] GALVANAUSKAS A, SARTANIA Z, BISCHOFF M. Millijoule femtosecond all-fiber system [C]// Conference on Lasers & Electro-optics, May 6-10, 2001, Baltimore, MD, USA. New Jersey: IEEE, 2001: 314-315.

李荣华,唐城田,魏淮:用于实现高功率超短脉冲源的关键技术

- [20] TAMURA K, NAKAZAWA M. Pulse compression by nonlinear pulse evolution with reduced optical wave breaking in erbium-doped fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 1996, 21(1): 68–70.
- [21] FERMAN M E, KRUGLOV V I, THOMSEN B C, et al. Self-Similar Propagation and Amplification of Parabolic Pulses in Optical Fibers[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(26): 6010–6013.
- [22] PAVEL S, WALTER F, FRANK W W. Nonlinear ultrafast fiber amplifiers beyond the gain-narrowing limit [J]. Optics, 2019, 18 (2): 045231–045246.
- [23] MÜLLER M, KIENEL M, KLENKE A, et al. 1 kW 1 mJ eight-channel ultrafast fiber laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(15): 3439–3442.
- [24] 张志刚. 相干脉冲堆积——超越啁啾脉冲放大的新技术[J]. 激光与光电子学进展, 2017(12): 1–10.
- [25] WANG C, LI W, LI L, et al. Femtosecond Er-doped fiber laser based on divided-pulse nonlinear amplification [J]. Journal of Optics, 2016, 18 (2): 025503–025505.
- [26] HENNING S, MÜLLER MICHAEL, MARCO K, et al. Electro-optically controlled divided-pulse amplification[J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13494–13503.
- [27] STARK H, BULDT J, MÜLLER M, KLENKE A, et al. High-power electro-optically controlled divided-pulse amplification [C]// Fiber Lasers XIV-Technology and Systems, February 4–7, 2019, San Francisco, United States. San Francisco: SPIE LASE, 2019: 108970–108971.
- [28] RIGAUD P, KERMENE V, BOUWMANS G, et al. Spectral division amplification of a 40 nm bandwidth in a multicore Yb doped fiber and femtosecond pulse synthesis with in-fiber delay line [J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27448–27456.

- [29] WILCOX R, DAHLEN D, SANO T. Femtosecond Beam Combination Using Diffractive Optic Pairs[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics, May 14–19, 2017, San Joes, California United States. New York: OSA, 2017: SM41.2.
- [30] ZHOU T, RUPPE J, ZHU C, et al. Coherent pulse stacking amplification using low-finesse Gires-Tournois interferometers [J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7442–7462.
- [31] PEI H, CHEN S, et al. Multi-mJ Ultrashort Pulse Coherent Pulse Stacking Amplification in a Yb-doped 85 μm CCC Fiber Based System[J]. The Optical Society, 2017, 27(9): 14–19.
- [32] PEI H Z, CHEN S, RUPPE J, et al. Technology and Systems - Near-complete stored energy extraction from fiber amplifiers in ultrashort 10 mJ energy pulses using coherent pulse stacking amplification (Conference Presentation) [C]//Fiber Lasers XIV-Technology and Systems, March 14, 2018, San Francisco, United States. San Francisco: SPIE LASE, 2018: 105112–1051209.
- [33] DEMAS J, PRABHAKAR G, et al. Wavelength-agile high-power sources via four-wave mixing in higher-order fiber modes [J]. Optics Express, 2017, 25(7): 7455–7464.
- [34] WRIGHT L G, CHRISTODOULIDES D N, WISE F W. Spatiotemporal mode-locking in multimode fiber lasers [J]. Science, 2017, 358(6359): 94–97.
- [35] KLENKE A, MUELLER M, STARK H, et al. Coherent beam combination of ultrafast fiber lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 4(5): 1–1.

首届《光通信技术》优秀论文评选结果公示公告

为了活跃光通信学术氛围,提高光通信科技水平,提升《光通信技术》杂志所刊登光通信技术文章的科技含量和实用性,《光通信技术》编辑部决定从 2019 年起,每年举办一次年度优秀论文评选活动,评选出本年度 6~10 篇已正式刊登(纸质版)的优秀论文,对获优秀论文奖的第一署名作者颁发荣誉证书和现金奖励(500 元/篇)。经专家评审,共评出 2019 年《光通信技术》优秀论文 10 篇,现予以公布表彰,评选结果如下:

首届《光通信技术》优秀论文名单

序号	第一作者	作者单位	论文题目	发表刊期
1	鲍克勤	上海电力学院	基于 VMD 算法的光栅莫尔条纹去噪方法	2019-1 期
2	付浩	长春理工大学	基于 ARMA-LSTM 的光功率预测方法	2019-1 期
3	夏中金	安徽理工大学	可见光通信 LED 高速驱动电路研究与设计	2019-2 期
4	成湘	西安邮电大学	基于改进粒子群优化算法的可见光室内定位技术	2019-4 期
5	魏昊文	南京邮电大学	高灵敏度布喇格光纤光栅温度传感器	2019-5 期
6	彭怀敏	桂林聚联科技有限公司	基于小波变换的 OTDR 降噪算法研究	2019-7 期
7	徐学武	桂林电子科技大学	一种新型的基片式高灵敏度 FBG 温度传感器	2019-7 期
8	肖磊	上海大学	基于氧化锆陶瓷的光纤 F-P 腔压力传感器研究	2019-8 期
9	赵星	中国信息通信研究院	面向 5G 的 SDOTN 南北向接口标准化进展及趋势分析	2019-9 期
10	蒋雯丽	西安邮电大学	基于贝叶斯网络的 SDON 控制器自学习负载均衡算法	2019-12 期

《光通信技术》编辑部