

掺镱光纤-固体高功率超短脉冲放大研究进展

徐岩^{1,2}, 彭志刚^{1,2*}, 程昭晨^{1,2}, 石宇航^{1,2}, 王贝贝^{1,2}, 王璞^{1,2**}¹北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124;²北京工业大学北京激光应用技术研究中心, 北京 100124

摘要 高功率超短脉冲激光器在工业、科研和国防等领域有着广泛应用。光纤-固体混合放大技术将光纤激光器的光束质量好、单程增益大、散热性好等优势 and 单晶光纤/棒状(块状)固体放大器的脉冲峰值功率高、非线性效应弱等优势结合,是实现结构紧凑、稳定性好、成本低的高峰值功率、大能量超短脉冲激光器的有效手段。总结了近年来 1 μm 波段掺镱光纤激光器、光子晶体光纤放大器、单晶光纤放大器和棒状(块状)固体放大器的国内外研究进展,重点介绍了本课题组在高功率超短脉冲光纤激光器、光子晶体光纤与固体放大器等领域的工作,同时探讨并展望了光纤-固体混合放大技术未来的发展方向。

关键词 激光器; 激光放大器; 超短脉冲; 光纤-固体混合放大; 高峰值功率

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0501003

1 引言

高功率超短脉冲激光在工业高端精密加工、高次谐波产生以及光谱学等领域具有重要应用。超短脉冲激光通常是指脉冲宽度在皮秒和飞秒量级的脉冲激光,具有窄脉冲宽度、高峰值功率等特点。21 世纪以来,传统制造业面临转型和升级,世界各国相继推出本国的制造业升级计划,着力发展高附加值的高端精密加工,这对超短脉冲激光器提出了更高的要求,使其向着功率更高、结构更紧凑、稳定性更好、成本更低、操作和维护更简单的方向发展。

在通常情况下,皮秒、飞秒激光振荡器输出的功率难以满足高端精密加工需要,因此需要通过主振荡级功率放大(MOPA)、啁啾脉冲放大(CPA)^[1]、脉冲分割放大(DPA)^[2]、再生放大或脉冲相干合束等技术对脉冲能量进行进一步放大。再生放大系统虽然容易获得很大的增益,但其多通过程中需要高压控制的普克尔盒,技术要求和成本都较高,稳定性也大打折扣;脉冲相干合束是将多路放大器的脉冲输出进行相干合成,需要复杂的时域和空间匹配,对装置稳定性和环境要求高;因此研究人员常采用 MOPA、CPA 和

DPA 技术,以获得低成本、高稳定性的高功率超短脉冲输出。根据增益介质的不同形状,可以将放大器分为光纤放大器、棒状(块状)晶体放大器、板条晶体放大器、碟片晶体放大器和单晶光纤放大器等。

掺镱光纤由于具有宽增益谱、高光-光转换效率、高光束质量等特点,被广泛用于超短脉冲激光的产生和放大。基于掺镱光纤的全光纤振荡器由于低成本和免维护的优点,常作为超短脉冲放大系统振荡器的首选,并且结合全光纤放大器可以实现较好的环境稳定性。但普通光纤的纤芯直径小,较低功率的激光在光纤中传播时很容易达到很高的功率密度,引起强烈的非线性效应、脉冲畸变甚至损伤,这限制了峰值功率的提升。为了能够在降低功率密度的同时保证光束质量,研究人员采取了两种不同的解决方法:一种是 CPA 技术,该技术可展宽脉冲宽度,降低放大时的脉冲峰值功率密度,并对放大后的脉冲进行压缩,以获得高峰值功率输出;另一种是通过增加光纤的模场面积来降低峰值功率密度。为了同时保证输出光束质量,研究人员发展了小数值孔径、大模场光子晶体光纤(PCF)。受限于石英材质自身的特性,PCF 可承受的线偏振光峰值功率不超

收稿日期: 2020-11-05; 修回日期: 2020-12-14; 录用日期: 2020-12-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405201)、国家自然科学基金(61527822)

*E-mail: pzg@bjut.edu.cn; **E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn

过 4 MW^[3-5],因此在单路放大的情况下依然难以获得很高的峰值功率。采用相干脉冲合束技术可以克服这种限制,该技术已经获得万瓦量级的超短脉冲输出^[6],但其装置十分庞大复杂,而且成本高昂。

传统的棒状(块状)晶体结构简单、容易制备,因此被广泛用于激光放大器。除了用于太瓦甚至拍瓦量级峰值功率输出的 Ti:Sapphire 放大器,最常用于放大器的棒状(块状)晶体是掺钕晶体,例如 Nd:YVO₄、Nd:YAG 等,这些晶体受到研究人员的广泛研究^[7-11]。与 Nd³⁺ 离子相比,Yb³⁺ 离子具有更简单的能级结构、更小的量子缺陷^[12-14],并且可以通过提高掺杂浓度弥补发射截面相对较小的缺陷。Yb³⁺ 离子更宽的光谱带宽使其能够支持飞秒激光运转。棒状(块状)掺钕晶体由于表面积和体积之比比较小,其很高的热负荷限制了平均功率的提升。为了解决该问题,研究人员早期需要采用低温冷却技术改善 Yb:YAG 的散热,但这种方式的装置的复杂程度高,只适合有特殊需求的科研应用。因此一段时间内,常温条件下的掺钕晶体超短脉冲放大器是以板条和碟片结构为主。板条晶体放大器和碟片晶体放大器由于都具有很大的表面积和体积之比,可以极大缓解掺钕晶体的热负荷,目前已经可以实现平均功率为千瓦级的超短脉冲输出^[15-18]。然而板条晶体放大器的几何形状决定其需要结构复杂的泵浦光和信号光整形系统;碟片晶体放大器虽然是目前可达到最高超短脉冲输出功率的放大方案,但很薄的增益介质使其必须采用复杂的多通结构,并且其单通增益较小,需要足够的入射功率以有效提取能量,这使得对振荡器的预放大必不可少。因此这两种结构的高复杂性和高成本不可避免。

单晶光纤放大器(SCF)是近年来发展起来的一种新型放大器^[19-20]。这种放大器的结构与棒状(块状)放大器类似,但其波导结构可以将多模泵浦光和自由空间传播的信号光很好地匹配,从而可获得更高的放大效率;优良的热管理性能也使该结构能获得中高功率的超短脉冲输出,并且其结构简单,具有很好的应用前景。随着近些年光纤耦合激光二极管亮度的不断提升,常温下掺钕棒状(块状)晶体在中低功率的放大效率也已经与单晶光纤不相上下,这两种形式的放大器因其结构简单和成本低的特点而独具吸引力。因此,可以通过将光纤前端与单晶光纤/棒状(块状)晶体放大器的优势相结合,获得简单经济、稳定可靠的高功率、大能量超短脉冲激光输出。这种放大技术不仅可以直接用于工业应用,还可以作为板条或碟

片放大器的前级,大幅降低系统的复杂程度和成本。

本文总结了近年来高功率掺钕光纤激光器和单晶光纤/棒状(块状)晶体放大器的国内外研究进展,从峰值功率角度指出了全光纤放大器和光子晶体光纤放大器的瓶颈,以及基于单晶光纤/棒状(块状)晶体的光纤-固体混合超短脉冲放大技术在这方面的优势,重点介绍了本课题组在高功率超短脉冲掺钕光纤振荡器与放大器、光子晶体光纤放大器与光纤-固体混合放大器等领域的工作,同时探讨了单晶光纤放大器和棒状(块状)晶体放大器的技术特点和未来超短脉冲光纤-固体混合放大的发展方向。

2 高功率超短脉冲光纤激光的产生和放大技术研究进展

2.1 超短脉冲掺钕全光纤结构振荡器

激光振荡器是超短脉冲激光放大系统的起始点,它的输出参数对放大后的激光输出有关键影响。相比于采用 Yb:KYW 等掺钕晶体的空间锁模振荡器,掺钕全光纤振荡器在环境稳定性、搭建便捷性和灵活性等方面有很大的优势,是放大系统中振荡器的首选类型。经过研究人员多年的不断探索,锁模光纤振荡器得到了快速发展。2012 年,本课题组利用窄带的布拉格光栅和半导体可饱和吸收镜(SESAM)在 1064 nm 处实现了 846 MHz 高重复频率的皮秒脉冲输出。进一步调节腔长,当重复频率为 490 MHz 时,输出平均功率为 17 mW,光谱带宽为 0.13 nm,脉冲宽度为 21 ps,对应的时间带宽积为 0.72^[21]。2013 年,本课题组基于多模干涉原理制备了单模-多模-单模结构的光纤滤波器,其中心波长为 1067 nm,光谱带宽为 7.5 nm。利用该滤波器搭建了全光纤结构耗散孤子锁模光纤振荡器,获得了平均功率为 8 mW、重复频率为 18.5 MHz、脉冲宽度为 21 ps 的稳定皮秒脉冲输出,光谱带宽为 4.32 nm^[22]。同年又通过数值模拟研究了 1 μm 波段掺钕光纤振荡器中色散管理耗散孤子的产生,并分析了色散管理耗散孤子在腔内不同位置及腔外的输出特性^[23]。近年来,为实现宽光谱、平滑光谱的输出,本课题组利用啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)作为色散管理器件,将 SESAM 作为可饱和吸收体,通过搭建全保偏掺钕色散管理锁模光纤振荡器,在 1033.43 nm 处获得平均功率为 12 mW、重复频率为 52.9 MHz、脉冲宽度为 4.36 ps 的输出,光谱带宽为 18.61 nm,这有利于在后续啁啾放大时对脉冲进行进一步展宽。

除了利用 SESAM 作为可饱和吸收体外,本课题组还开展了基于新型二维材料可饱和吸收体的掺镱锁模光纤振荡器的研究。2011 年,本课题组利用在 6H-SiC 衬底外延生长的石墨烯作为可饱和吸收体,搭建了环形腔结构的全正色散被动锁模掺镱光纤振荡器,在泵浦功率为 250 mW 时得到重复频率为 1.05 MHz 的稳定锁模脉冲,输出功率为 6 mW,在泵浦功率增加到 480 mW 时输出功率为 20 mW,对应的单脉冲能量为 19 nJ,脉冲宽度为 520 ps^[24]。2015 年,本课题组利用垂直蒸发法制备的氧化石墨烯聚乙烯醇(PVA)薄膜作为可饱和吸收体,搭建了基于透射式氧化石墨烯可饱和吸收体的环形腔锁模光纤振荡器,通过调节偏振控制器,在 170 mW 的泵浦功率下获得了中心波长为 1059.7 nm、重复频率为 9.17 MHz、10 dB 光谱宽度为 1.32 nm、脉冲宽度为 220 ps 的耗散孤子输出,光谱呈陡沿结构,当泵浦功率增大到 183 mW 时获得了平均功率为 1.59 mW、10 dB 光谱宽度为 1.44 nm、脉冲宽度为 286 ps 的类噪声输出。同年,本课题组又利用跳线头间法布里-珀罗干涉引发的反饱和吸收效应,在基于氧化石墨烯可饱和吸收体的掺镱光纤振荡器中观察到耗散孤子共振现象,并获得了中心波长为

1064.9 nm、重复频率为 0.927 MHz 的脉冲输出,输出脉冲宽度随泵浦功率的增大而展宽,最大单脉冲能量达到 159.4 nJ^[25]。

由于实体可饱和吸收体存在损伤阈值低、寿命相对较短的缺点,基于实体可饱和吸收体的锁模光纤振荡器长期工作时存在稳定性低的问题。近年来锁模光纤振荡器逐步向着全光纤化、全保偏化方向发展。为了进一步提高锁模光纤振荡器的抗环境干扰能力,本课题组开展了基于虚拟可饱和吸收体的全保偏锁模光纤振荡器的研究。相比于 SESAM 锁模等实体可饱和吸收体,非线性放大环形镜(NALM)锁模具有全光纤结构,通过结合全保偏光纤可使振荡器具有更好的工作稳定性,使其在重复频率为几十兆赫兹到 10^5 Hz 的范围内实现稳定锁模,输出光谱较宽的可压缩脉冲。2019 年,本课题组实现了重复频率范围为 21 MHz~100 kHz 的全保偏非线性放大环形镜锁模,输出能量从纳焦量级到百纳焦量级,脉冲宽度可被压缩至亚皮秒量级,其装置结构如图 1 所示^[26]。直接采用低重复频率的 NALM 锁模振荡器作为放大器前端,可以避免多级光纤预放大级和声光调制器(AOM)等脉冲选择器件的使用,使得整个激光器系统更加紧凑、集成化。

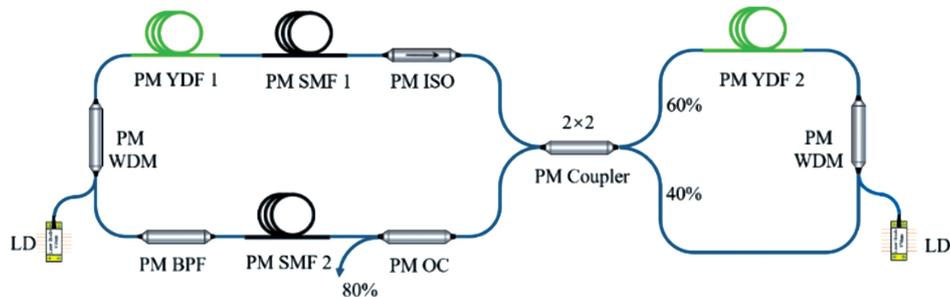


图 1 全保偏(all-PM)NALM 锁模掺镱光纤振荡器的结构示意图^[26]

Fig. 1 Structural diagram of all-PM Yb-doped NALM mode-locked fiber oscillator^[26]

2020 年,本课题组利用保偏光纤慢轴角度熔接和偏振敏感损耗器件组成光纤式虚拟可饱和吸收体,并进一步搭建了基于非线性偏振旋转锁模机制的色散管理锁模光纤振荡器,其结构如图 2 所示^[27]。通过优化泵浦强度、无源光纤长度及熔

接角度,获得了中心波长为 1030.15 nm、平均功率为 2.3 mW、重复频率为 6.17 MHz、光谱带宽为 37.84 nm、脉冲宽度为 10.35 ps 的色散管理孤子输出,经过压缩后的输出脉冲的脉冲宽度为 161.37 fs。

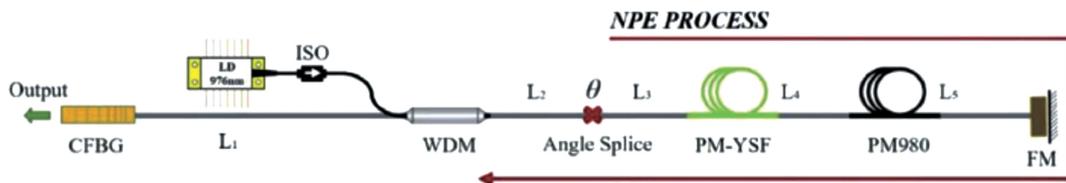


图 2 全保偏 NPE 光纤振荡器结构图^[27]

Fig. 2 Structural diagram of all-PM-NPE fiber oscillator^[27]

2.2 超短脉冲掺镱全光纤结构放大器

激光振荡器输出的脉冲能量低,无法直接应用在工业等领域,因此需要对其进行进一步放大。在搭建超短脉冲放大器时,采用全光纤结构可以避免引入空间元器件,可充分发挥光纤激光器的环境稳定性的优势。2012年,土耳其比尔肯特大学的 Elahi 等^[28]采用掺杂管理的全光纤结构激光器,减弱了光纤中的非线性效应。他们以不同掺杂浓度的 25/250 μm (纤芯直径为 25 μm ,包层直径为 250 μm ,用 25/250 μm 表示,下同)光纤作为主放大级,结合预啁啾管理技术,在 100 MHz 重复频率下获得了平均功率为 100 W、脉冲能量为 1 μJ 、脉冲宽度为 4.5 ps 的脉冲激光输出,对应峰值功率约为 200 kW,脉冲性能受限于非线性效应;2013年,英国南安普顿的 Teh 等^[29]以增益开关二极管作为种子源搭建了全光纤化的保偏 MOPA 激光,信号脉冲宽度为 28 ps。通过电光调制器将重复频率调节

为 858 MHz 时,输出功率为 200 W,重复频率调节为 53 MHz 时的平均功率为 171 W,此时脉冲能量为 3.23 μJ ,该工作的脉冲能量提取主要受限于非线性效应。2016年,天津大学的 Yu 等^[30]采用如图 3 所示的全光纤 MOPA 激光器,获得平均功率为 117 W、脉冲宽度为 11 ps、重复频率为 15 MHz、脉冲能量为 7.8 μJ 的超短脉冲输出。该工作采用 50/400 μm 大模场掺镱光纤作为主放大级,以减小非线性带来的影响,泵浦吸收没有出现饱和,输出功率仅受限于泵浦功率;2020年,俄罗斯科学院的 Bobkov 等^[31]在 MOPA 激光器系统中采用拉锥光纤作为主放大级。这种拉锥光纤的小芯径端可与普通光纤熔接,其大芯径端(纤芯直径为 46 μm)能够减弱放大时的非线性效应,并且不激发高阶模。利用拉锥光纤在泵浦功率约为 240 W 时可获得平均功率为 150 W、重复频率为 18.4 MHz、脉冲宽度为 8.3 ps、峰值功率为 0.92 MW 的脉冲输出。

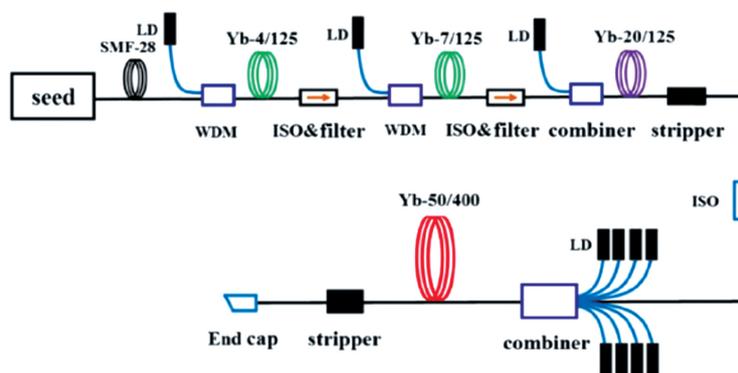
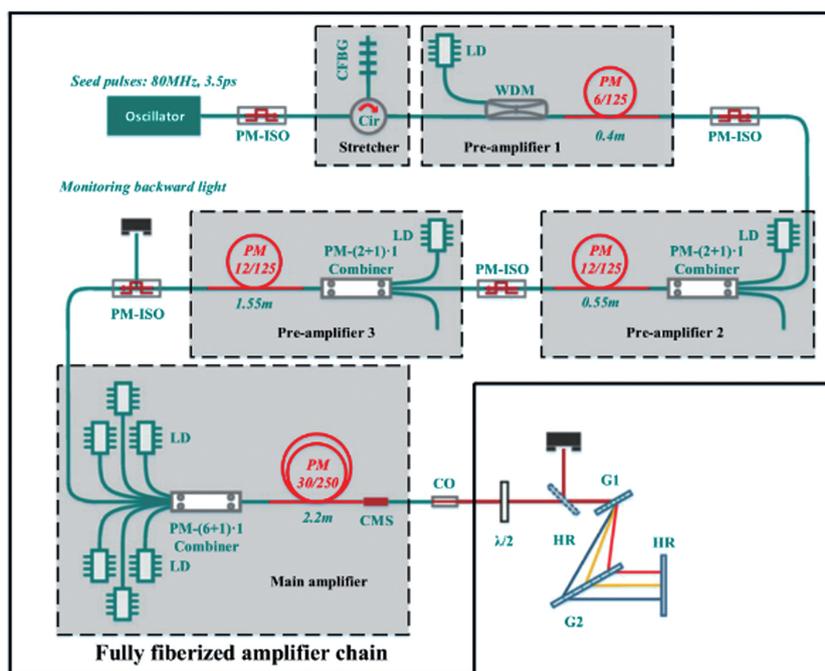


图 3 主振荡功率放大器装置示意图^[30]

Fig. 3 Experimental setup of master oscillator power amplifier^[30]

啁啾脉冲放大技术可以在保持高平均功率输出的同时进一步提高输出脉冲的峰值功率,实现飞秒脉冲输出。2013年,美国 PolarOny 公司的 Wan 等^[32]采用 30/400 μm 掺镱光纤作为 CPA 系统的主放大级,在泵浦功率为 1.6 kW 时,将平均功率为 50 W、脉冲宽度为 1 ns、重复频率为 69 MHz 的信号光放大到平均功率为 1.05 kW、单脉冲能量为 15.2 μJ 、峰值功率为 15.2 kW、脉冲宽度可压缩到 800 fs 的信号光。2016年,国防科技大学 Yu 等^[33-34]采用 30/250 μm 掺镱光纤作为保偏全光纤 CPA 系统的主放大级,实现了非线性啁啾脉冲放大,实验装置如图 4 所示。他们采用光纤展宽器对飞秒种子源的脉冲进行展宽,脉冲经过光纤放大器的放大后,平均输出功率为 193 W,此时脉冲宽度为 209 ps,重复频率为 80 MHz,对应的峰值功率为

11.5 kW,经过压缩后的脉冲宽度为 352 fs,平均功率为 119 W。同年,他们进一步将光纤展宽器更换为 CFBG 展宽器,并将最后一级主放大器的增益光纤从 1.7 m 延长至 2.2 m,最终输出的最大平均功率为 425 W,脉冲宽度为 617 ps,经过脉冲压缩后的平均功率为 300 W,脉冲宽度为 344 fs,对应的峰值功率为 11 MW。2020年,天津大学的牛佳等^[35]采用平均功率为 80 mW、重复频率为 50 MHz、中心波长为 1033 nm、光谱宽度为 18.6 nm、脉冲宽度为 3.32 ps 的全光纤锁模振荡器作为种子源。种子源输出的信号光被与压缩器色散参量匹配的可调 CFBG 展宽,为了避免 CFBG 有限带宽引入的光谱滤波作用,采用带宽为 12 nm 的双折射滤波片对信号光进行滤波,展宽后的脉冲宽度为 350 ps。信号光经过一级单模光纤预放

图 4 保偏光纤集成 CPA 系统示意图^[33]Fig. 4 Diagram of integrated CPA system with PM fiber^[33]

大器和一级大模场面积双包层掺镱光纤放大器的放大后,被一对透射光栅压缩,最终获得了重复频率为 50 MHz、平均功率为 24 W、脉冲宽度为 198 fs 的脉冲输出。

本课题组也开展了基于全光纤结构的掺镱光纤激光器的研究工作。2014 年,本课题组通过使用 SESAM 锁模光纤皮秒振荡器,结合全光纤 MOPA 技术,实现了中心波长为 1030 nm、平均功率为 101 W、光谱带宽为 1.46 nm、重复频率为 29 MHz、脉冲宽度为 36.6 ps 的输出,主放大斜效率为 76.7%^[36]。为进一步提高输出脉冲的单脉冲能量,在此结构基础之上,本课题组采用脉冲选择器将脉冲重复频率降低至 1.83 MHz,并用无源光纤对信号光脉冲进行展宽,在 1064.1 nm 中心波长处获得了平均功率为 131 W、光谱带宽为 9.27 nm、脉冲宽度为 800 ps、单脉冲能量为 72 μJ 的皮秒脉冲输出,斜效率达到 80.1%。2018 年,本课题组又报道了一个全光纤线偏振皮秒 MOPA 系统^[37],同样采用无源光纤展宽器的 MOPA 结构,在 1064.5 nm 中心波长处获得平均功率为 225 W、重复频率为 58.2 MHz、脉冲宽度为 80 ps 的输出,水平和垂直方向上的光束质量 M^2 分别为 1.41 和 1.49,消光比为 14.5 dB。

为了进一步提高输出的平均功率和峰值功率,本课题组开展了基于掺镱光纤 CPA 技术的研究。在之前工作的基础上使用光纤作为展宽器,同时利

用声光调制器(AOM)作为脉冲选择器、50/400 μm 大模场掺镱作为主放大级、透射式光栅对作为压缩器,获得了中心波长为 1064 nm、平均功率为 106 W、重复频率为 4.93 MHz、脉冲宽度为 13.6 ps 的高功率皮秒激光输出,对应的单脉冲能量为 21.5 μJ 、峰值功率为 1.6 MW。2016 年,本课题组进一步利用非线性频率转换技术研制了宽光谱色散光源,建立飞秒 CPA 系统^[38],装置如图 5 所示。使用 1.5 μm 波段飞秒激光泵浦一段高非线性光纤,使其波长产生频移,在 1 μm 波段获得光谱宽度为 40 nm 的色散波脉冲激光输出,并且光谱轮廓平滑,这有利于脉冲展宽和放大。通过无源光纤将脉冲展宽后,采用掺镱全光纤放大器对输出功率进行进一步放大,最终获得 125 W 的输出功率,此时脉冲宽度为 525 ps,对应的峰值功率为 13.6 kW。利用啁啾体布拉格光栅(CVBG)压缩器对脉冲进行压缩后,获得了平均功率为 107 W、重复频率为 17.5 MHz、中心波长为 1064 nm、脉冲宽度为 566 fs、脉冲能量为 6.1 μJ 的激光输出。2018 年,本课题组在之前工作的基础上进行了进一步优化,通过 AOM 将脉冲重复频率降低至 1.09 MHz,并采用透射式光栅替换带宽有限的 CVBG 作为压缩器,在 1065.1 nm 中心波长处实现了平均功率为 7.7 W、单脉冲能量为 7.1 μJ 、10 dB 光谱宽度为 21.4 nm、脉冲宽度为 270 fs 的输出,对应的峰值功率进一步提升至 26 MW^[39]。

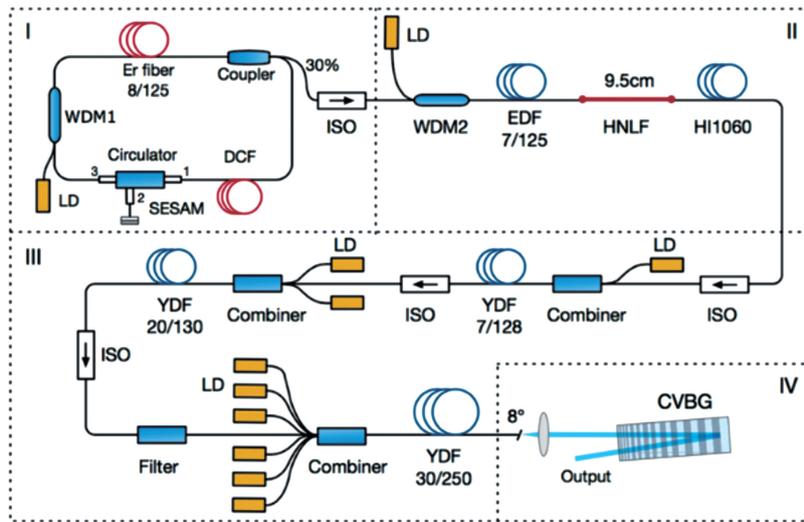


图 5 高功率飞秒光纤 CPA 系统示意图^[38]

Fig. 5 Diagram of high-power femtosecond fiber CPA system^[38]

2.3 超短脉冲光子晶体光纤放大器

为了减小非线性效应对光纤放大器的影响,提升可承受的脉冲能量和峰值功率,研究人员发展了光子晶体光纤。这种光纤可以在大模场的情况下保持激光的单模运转。当模场较小时,PCF 可以在一定程度上保持柔性传输的特性,但随着模场面积的进一步增加,光纤模场分布对弯曲变得十分敏感,甚至不能弯曲,因此高功率光子晶体光纤放大器往往为棒状 PCF。2017 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的白洋等^[40]采用 MOPA 结构进行放大,主放大级采用纤芯直径为 85 μm 的大模场掺镱 PCF 棒,这极大地减小了非线性带来的影响,最终获得了脉冲宽度为 11.1 ps、峰值功率为 3.4 MW、 M^2 为 1.01 的近衍射极限输出。

通过结合 CPA 技术,可以使大模场 PCF 放大器的性能进一步提高。2007 年,德国耶拿大学的 Tünnermann 课题组采用纤芯直径分别为 40 μm

和 80 μm 的两级 PCF 作为增益介质,利用光栅将脉冲展宽至 2 ns,在 100 kHz 重复频率时获得了超过 100 W 的输出功率,在重复频率为 50 kHz 时获得 71 W 的平均功率,50 kHz 时的脉冲能量为 1.45 mJ,利用光栅对压缩后的脉冲能量为 1 mJ,脉冲宽度为 800 fs,峰值功率约为 1 GW,该工作中放大器直接输出的脉冲峰值功率为 725 kW^[41];2011 年,Eidam 等^[42]采用纤芯直径为 108 μm 的掺镱 PCF 作为主放大级增益光纤,利用空间光调制器对脉冲进行预补偿,以抑制放大器中非线性相移、高阶色散等负面影响,最终在 1030 nm 波段获得了平均功率为 11 W、脉冲宽度为 480 fs、脉冲能量为 2.2 mJ、峰值功率为 3.8 GW 的近衍射极限脉冲输出,放大器直接输出脉冲的峰值功率约为 1 MW,其实验装置如图 6 所示。2.2 mJ 也是目前基于 CPA 的单路掺镱 PCF 放大器输出的最大脉冲能量。

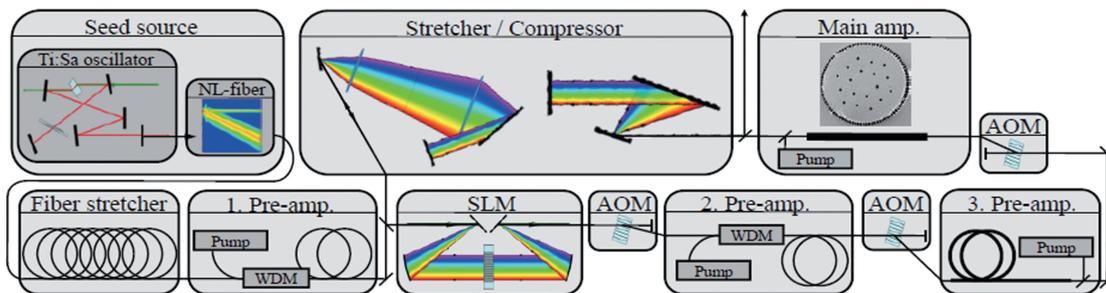


图 6 大间距 PCF 啁啾脉冲放大系统的示意图^[42]

Fig. 6 Diagram of large-pitch PCF chirped-pulse amplification system^[42]

2017 年,巴黎-萨克莱大学的 Lavenu 等^[43]利用自相似放大技术、CPA 技术、空间光脉冲整形技术,

将种子振荡器的光谱展宽至 30 nm、脉冲宽度展宽至 1 ns,并用 AOM 将重复频率降低至 200 kHz。

通过将信号光注入长度为 1 m、模场直径为 $60\ \mu\text{m}$ 的棒状光纤放大器中,获得了脉冲宽度为 130 fs、脉冲能量为 $250\ \mu\text{J}$ 的超短脉冲输出。在此基础上,输出脉冲被一个由氙气填充的空芯毛细管支撑的非线性压缩级和一组啁啾镜压缩,获得脉冲宽度为 14 fs、脉冲能量为 $250\ \mu\text{J}$ 的少周期脉冲输出。2018 年,西安电子科技大学 Yang 等^[44]利用 CFBG 作为展宽器,将非线性偏振旋转锁模振荡器的脉冲展宽至约 1 ns,经过多级全光纤预放大器和纤芯直径为 $85\ \mu\text{m}$ 的大模场掺镱 PCF 主放大器的放大并通过透射式光栅对的压缩,获得了单脉冲能量为 $32\ \mu\text{J}$ 、脉冲宽度为 153 fs、峰值功率为 209 MW 的超短脉冲,光束质量因子约为 1.3,其装置如图 7 所示。2019 年,多伦多大学的 Manchee 等^[45]利用定制的无源光纤将脉冲展宽至

2 ns,并且实现了 CPA 系统二阶和三阶色散管理,之后利用纤芯直径为 $85\ \mu\text{m}$ 的 PCF 作为主放大级,在 1030 nm 处获得了 100 W 的平均功率,在 200 kHz 的重复频率下脉冲能量达到 $400\ \mu\text{J}$,压缩脉冲宽度为 330 fs,峰值功率达到 1.2 GW,同时保持了良好的光束质量($M^2 < 1.2$)。2020 年,上海理工大学的贺明洋等^[46]通过非线性光谱展宽将光谱范围为 6.8 nm、脉冲宽度为 1.26 ps 的信号光的光谱展宽至 28 nm,脉冲宽度展宽至 3 ps。通过提供负色散的一对透射式光栅,得到脉冲宽度为 130 fs 的预啁啾脉冲。经过由模场直径为 $40\ \mu\text{m}$ 的大模场光子晶体光纤组成的主放大级的放大和压缩器的压缩后,输出激光的平均功率为 34 W,脉冲宽度为 50 fs,重复频率为 40 MHz,对应的峰值功率为 17 MW。

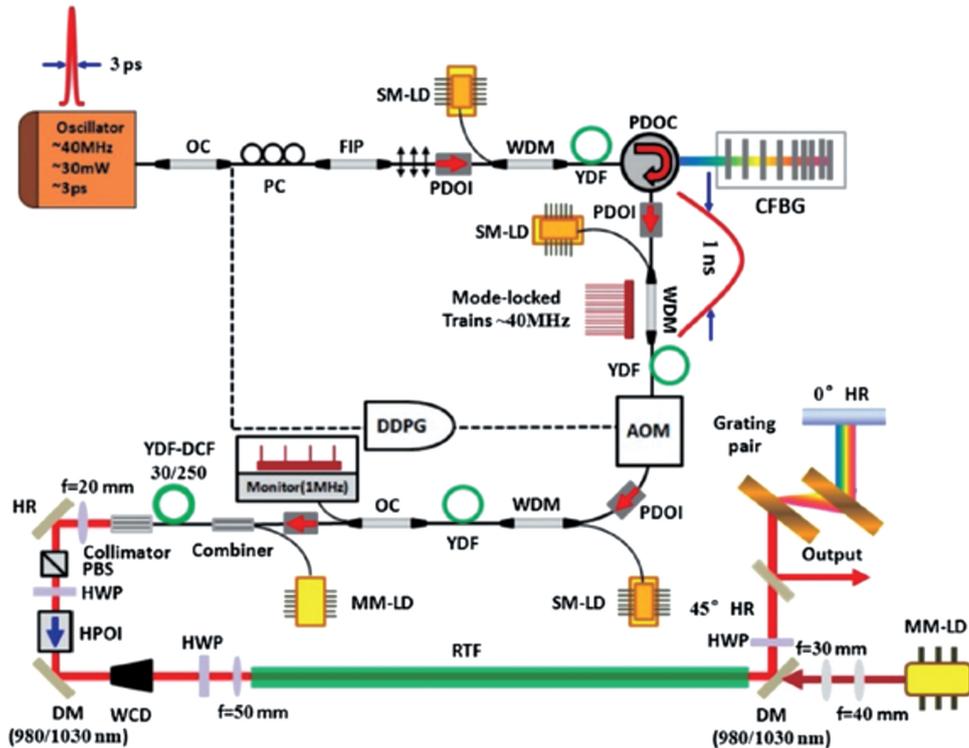


图 7 光纤啁啾脉冲放大系统示意图^[44]

Fig. 7 Diagram of fiber chirped pulse amplification system^[44]

本课题组为实现高功率、大能量超短脉冲输出,也开展了基于大模场掺镱 PCF 的啁啾脉冲放大工作。2019 年,本课题组在对非线性放大过程中光谱演化的理论模拟的基础上,搭建了一套基于频域-时域映射整形的全光纤飞秒 CPA 系统^[47]。如图 8 所示,首先利用 CFBG 和 SESAM 搭建全保偏色散管理掺镱锁模光纤振荡器,经过一级预放大后,利用 CFBG 将脉冲压缩至飞秒脉冲,然后通过一段

$6/125\ \mu\text{m}$ 的保偏双包层掺镱光纤进行自相似放大,光谱在放大过程中演化成抛物线形。通过频域-时域映射脉冲整形技术并利用 CFBG 展宽器的二阶正色散,将抛物线形的光谱映射至时域上,获得了脉冲宽度为 580 ps 的时域抛物线形脉冲。通过纤芯直径为 $40\ \mu\text{m}$ 的柔性掺镱光子晶体光纤的放大得到的输出功率为 17.5 W、重复频率为 500 kHz、峰值功率为 60 kW,经过光栅对压缩后的脉冲能量为

27 μJ 、脉冲宽度为 172 fs、峰值功率为 113 MW。该工作中展宽器为 CFBG，它可以同时提供正二阶色散和负三阶色散，因此能够对整个放大系统的二阶、三阶色散进行精确管理。在放大过程中，抛物线形脉冲允许更大的非线性相移，引入可压缩的线性啁

啾，从而对提高脉冲峰值功率起到重要作用。因此本工作在输出较大脉冲能量的同时，得到的脉冲宽度小于 200 fs。此外，除了主放大级的泵浦装置和后端的压缩器外，整个放大系统采用全光纤结构有利于提高激光器的紧凑性和稳定性。

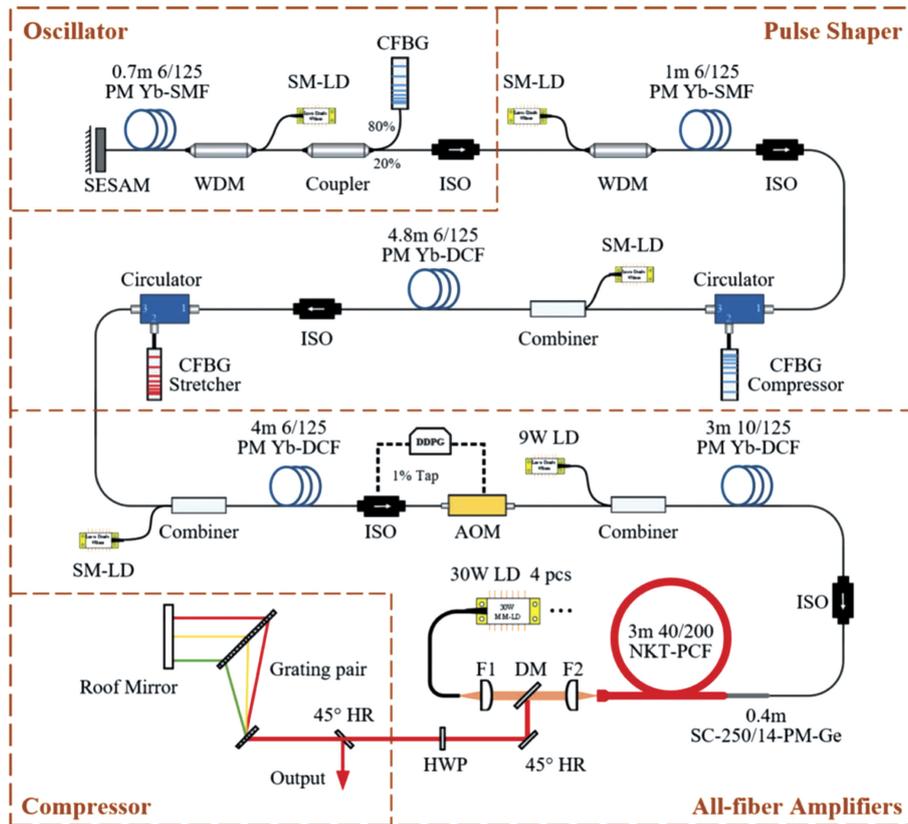


图 8 高能量飞秒光纤 CPA 系统示意图^[47]

Fig. 8 Diagram of high energy femtosecond fiber CPA system^[47]

同年，本课题组又采用更大模场面积的棒状 PCF 进行啁啾脉冲放大。种子源为基于 NALM 的全保偏锁模掺镱光纤振荡器，其重复频率为 21 MHz，脉冲宽度为 5.3 ps，之后脉冲重复频率被声光调制器降低到 4.2 MHz，使用长度为 800 m 的无源光纤展宽器将脉冲宽度展宽至 360 ps，经过三级全光纤放大器获得了 8 W 的平均功率，此时 3 dB 带宽为 8 nm，主放大级增益介质采用模场直径为 65 μm 的大模场棒状掺镱 PCF，实验设置如图 9 所示，最终得到平均功率为 120 W 的放大脉冲，脉冲宽度由于增益窄化变为 145 ps，此时对应脉冲的峰值功率约为 197 kW。在输出功率为 71 W 时采用 1740 mm 反射式光栅对将输出脉冲宽度压缩至 14 ps，压缩后的输出功率为 51 W，中心波长为 1034 nm，光谱宽度为 7 nm，压缩效率为 71%^[48]。

2020 年，本课题组在前述实验的基础上，采用中国科学院上海光学精密机械研究所自制的大模场

棒状掺镱 PCF 作为主放大器，将种子源更换为利用 CFBG 和 SESAM 搭建的全保偏色散管理锁模光纤振荡器，其结构如图 10(a) 所示。其中，保偏无源光纤的长度为 1.26 m，保偏掺镱光纤的长度约为 1 m，光纤对泵浦光的吸收系数为 250 dB/m；SESAM 的调制深度为 30%，弛豫时间为 500 fs；CFBG 提供的色散为 -0.1139 ps^2 ，反射带宽为 18 nm，反射率 $\geq 10\%$ 。通过调节腔内光纤长度进行色散管理，腔内光纤长度设置为 2.26 m，对应的重复频率为 45 MHz。展宽后的脉冲被两级双包层光纤放大器进行功率放大，如图 10(b) 所示。放大后的信号光经过空间耦合进入由国产棒状 PCF 组成的主放大器中，如图 10(c) 所示。锁模振荡器输出的光谱和测量的自相关曲线如图 11 所示，输出光谱的中心波长位于 1033 nm，带宽为 17.6 nm，测量的自相关曲线显示脉冲宽度为 5.3 ps。锁模振荡器的输出功率为 9 mW，对应的单脉冲能量为 200 pJ。

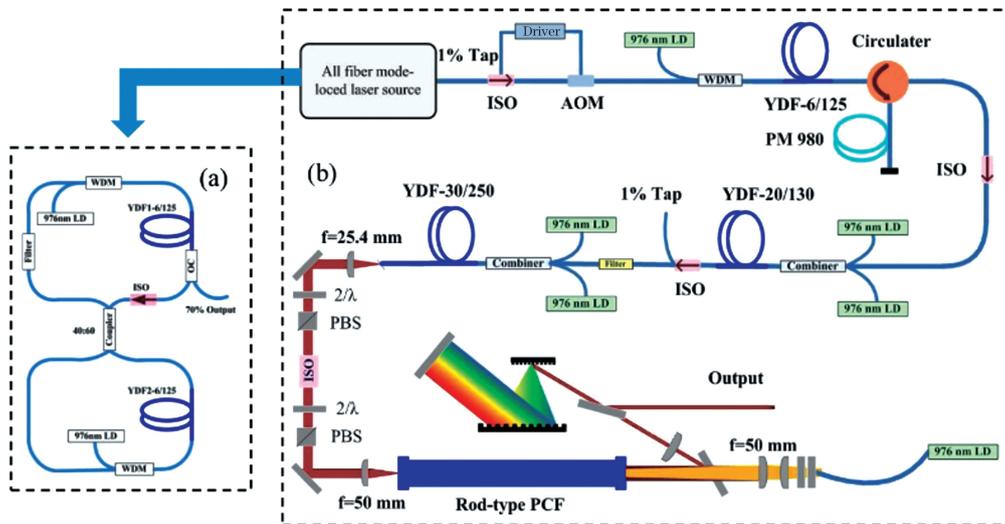


图 9 全保偏 NALM 锁模光纤振荡器示意图及 1.03 μm 皮秒 CPA 系统示意图^[48]。(a)全保偏 NALM 锁模光纤振荡器示意图；(b)1.03 μm 皮秒 CPA 系统示意图

Fig. 9 Diagram of all-polarization-maintaining NALM mode-locked fiber oscillator, and diagram of 1.03 μm picosecond CPA system^[48]. (a) Diagram of all-polarization-maintaining NALM mode-locked fiber oscillator; (b) diagram of 1.03 μm picosecond CPA system

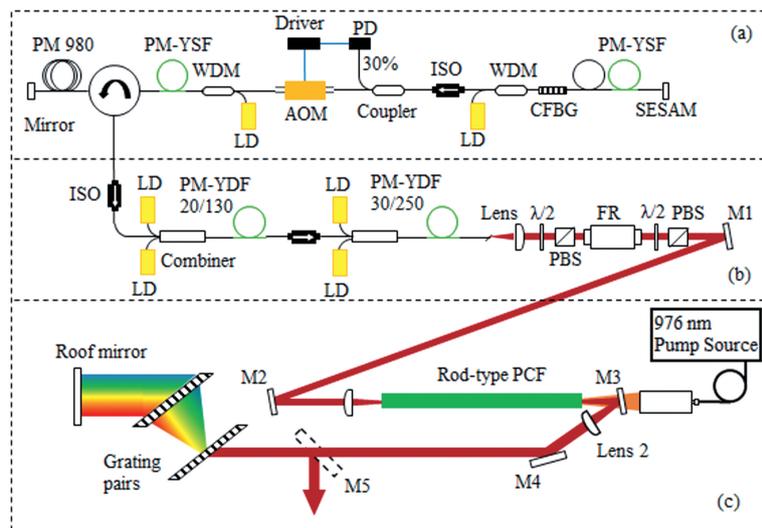


图 10 国产 PCF 放大实验装置示意图。(a)全光纤振荡器和脉冲展宽器示意图；(b)双夹层光纤放大器示意图；(c)国产 PCF 主放大器示意图

Fig. 10 Diagrams of experimental setups of domestic PCF amplification. (a) Diagram of all-fiber oscillator and pulse stretcher; (b) diagram of double-cladding fiber amplifier; (c) diagram of domestic PCF main amplifier

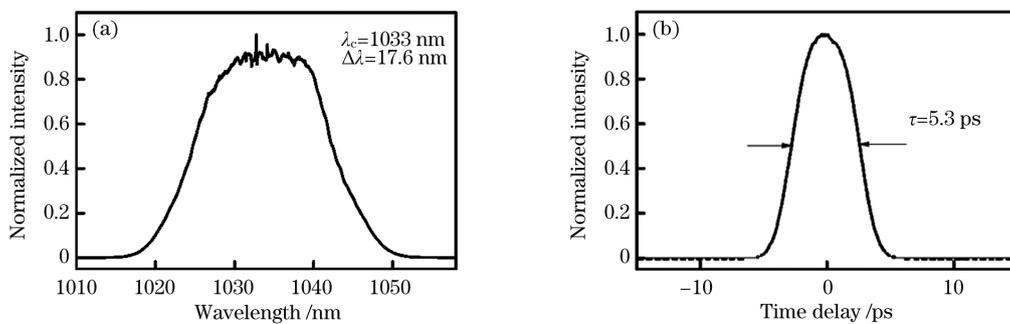


图 11 锁模振荡器的光谱图和自相关曲线。(a)光谱图；(b)自相关曲线

Fig. 11 Spectrum and autocorrelation curve of mode-locked oscillator. (a) Spectrum; (b) autocorrelation curve

利用 AOM 将脉冲重复频率降低至 1 MHz, 经过单模纤芯放大后, 平均功率为 5.4 mW, 对应的单脉冲能量为 5.4 nJ。输出的光谱如图 12(a) 所示, 由于受到非线性效应的影响, 光谱带宽展宽到 20.3 nm。脉冲宽度经过无源光纤的展宽后变为 380 ps, 如图 12(b) 所示。

展宽后的脉冲被两级双包层光纤放大器进行功率放大。两级放大器的增益光纤分别为 20/130 μm 的保偏双包层掺镱光纤和 30/250 μm 的保偏双包层掺镱光纤。脉冲经过两级放大后, 平均功率分别

被放大到 700 mW 和 11 W, 由于增益窄化效应, 放大后的光谱带宽窄化到 4.2 nm, 啁啾信号脉冲的宽度窄化为 167 ps, 如图 13 所示。

主放大器中采用了模场直径约为 70 μm 、纤芯直径为 85 μm 、内包层直径为 260 μm 、长度约为 1 m 的 PCF。通过采用焦距为 25.4 mm 和 75 mm 的透镜组, 将 30/250 μm 双包层掺镱光纤输出的脉冲光耦合进入 PCF 纤芯中, 在 184 W 泵浦功率下获得了平均功率为 140 W 的输出, 相应的斜效率为 69.8%。输出平均功率随泵浦功率的变化如图 14(a)

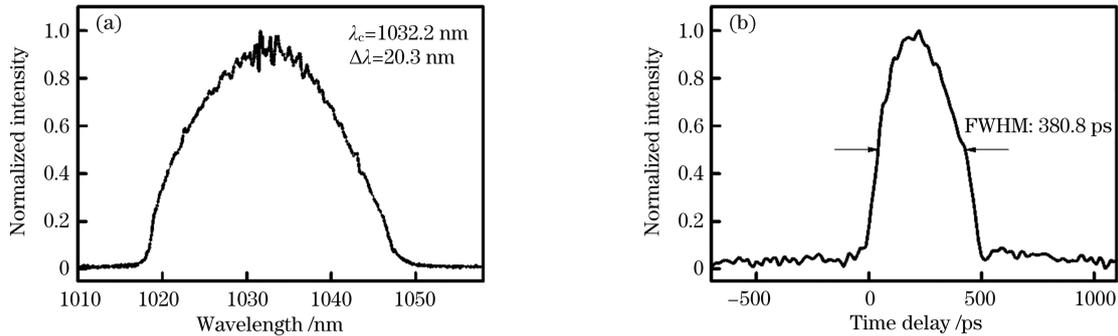


图 12 初级预放大后的输出光谱和无源光纤展宽后的脉冲形状。(a) 初级预放大后的输出光谱; (b) 无源光纤展宽后的脉冲形状

Fig. 12 Output spectrum after primary pre-amplification, and pulse shape broadened by passive fiber. (a) Output spectrum after primary pre-amplification; (b) pulse shape broadened by passive fiber

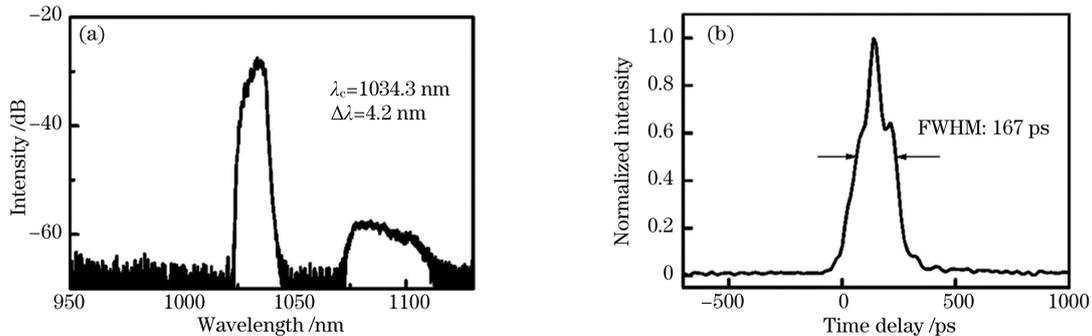


图 13 30/250 μm 掺镱光纤放大器的输出光谱和脉冲形状。(a) 输出光谱; (b) 脉冲形状

Fig. 13 Output spectrum and pulse shape of 30/250 μm ytterbium doped fiber amplifier. (a) Output spectrum; (b) pulse shape

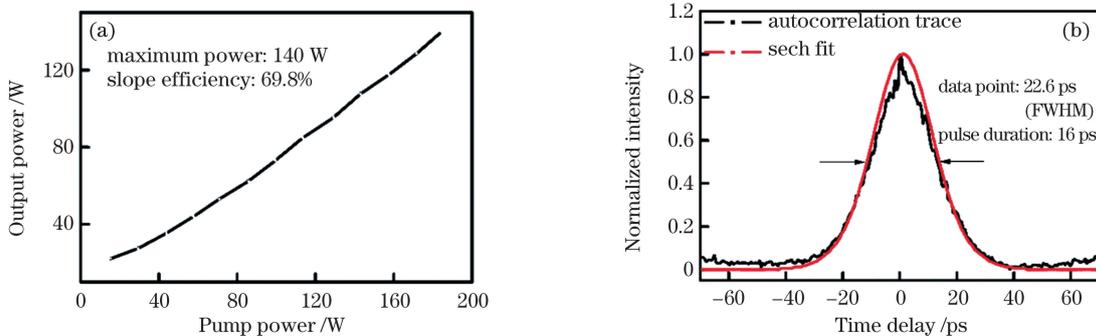


图 14 主放大级输出功率与泵浦功率的关系, 以及主放大后输出脉冲经过压缩后的自相关曲线。(a) 主放大级输出功率与泵浦功率的关系; (b) 主放大后输出脉冲经过压缩后的自相关曲线

Fig. 14 Output power as a function of pump power in main amplification stage, and autocorrelation trace of compressed output pulse after main amplification. (a) Output power as a function of pump power in main amplification stage; (b) autocorrelation trace of compressed output pulse after main amplification

所示。经透射式光栅对压缩后的平均输出功率为 77 W, 压缩效率为 55%, 脉冲宽度为 16 ps, 如图 14(b)所示, 对应的峰值功率为 4.8 MW。

3 高功率超短脉冲光纤-固体混合放大器研究进展

PCF 通过增大模场面积, 减小了非线性效应的影响, 降低了损伤风险, 使脉冲峰值功率达到兆瓦量级, 同时可保证良好的光束质量; 但 PCF 受限于石英材料的自聚焦效应, 其极限峰值功率不超过 4 MW, 这限制了 PCF 直接输出的峰值功率的进一步提升, 因此 PCF 更适用于高重复频率下几十瓦到百瓦级的功率输出。与普通光纤和 PCF 相比, 晶体可以承受的峰值功率可达百兆瓦量级以上。由此可以想到, 将光纤振荡器输出的信号光经过光纤放大器的放大后, 进一步采用固体放大器对其进行放大, 这不仅可以提升超短脉冲的能量和峰值功率, 还可以凭借光纤放大器较好的紧凑性和稳定性以及高光-光转换效率的优势成为一种非常有吸引力的放大技术。晶体放大器不仅可用于平均功率为几十瓦的低重复频率、高能量、高峰值功率超短脉冲输出, 还可以通过多级放大的方式获得百瓦级的平均功率。在超短脉冲放大中, 最常采用的固体增益介质是掺镱晶体, 其中 Yb: YAG 由于其出色的热机械性能, 在高功率放大中被广泛使用。

常温下 Yb³⁺ 离子的能级结构为准三能级, 温度升高会导致其终端能级的粒子数增加, 因此放大效率容易受到晶体温度变化的影响。为了获得有效的

激光运转, 所需的泵浦功率是其阈值的 5~6 倍。早期的光纤耦合输出激光二极管受限于耦合技术, 需要采用纤芯直径为数百微米的多模光纤, 输出的激光模式多, 光束质量差, 导致泵浦光亮度低且发散角度大, 无法以较低功率达到有效泵浦强度。为了达到足够的泵浦强度, 只能使用长度较短的掺镱晶体, 为了保证增益, 晶体需要具有较高的掺杂浓度。增益介质较小的表面积和体积之比使其在高功率泵浦下会产生剧烈的热效应, 严重时会导致晶体损坏。为了克服这一缺点, 研究人员采取了两种不同的技术路线。一种是通过采用特殊的泵浦系统和晶体结构, 例如板条和碟片放大器等, 使晶体在常温下承受很高的泵浦功率。其复杂的结构和工艺目前只被少数公司和机构掌握。另一种是采用液氮对掺镱晶体进行低温冷却, 这种方式可以直接采用棒状(块状)晶体, 晶体加工难度低, 但低温冷却系统的复杂性和成本使其只能用作特殊用途的科研应用^[49-52]。

3.1 超短脉冲单晶光纤放大器

在面向工业等实际应用时, 需要采用更便捷且成本更低的常温水冷方式; 为了克服激光二极管的低光束质量和小体积高掺杂晶体所带来的热负荷问题, 2002 年, 日本福井大学的 Kawato 等^[53] 提出了可以使泵浦光波导传输的晶体细棒放大器结构。如图 15 所示, 泵浦光斜入射至晶体内部, 通过在侧壁上的反射增加低掺杂晶体长度方向的泵浦吸收, 信号光则是以自由空间传播的形式通过晶体, 该放大器的冷却方式类似于板条放大器; 通过再生放大技术, 最终获得的最高平均功率为 20 W, 脉冲宽度为 2 ps^[54-55]。

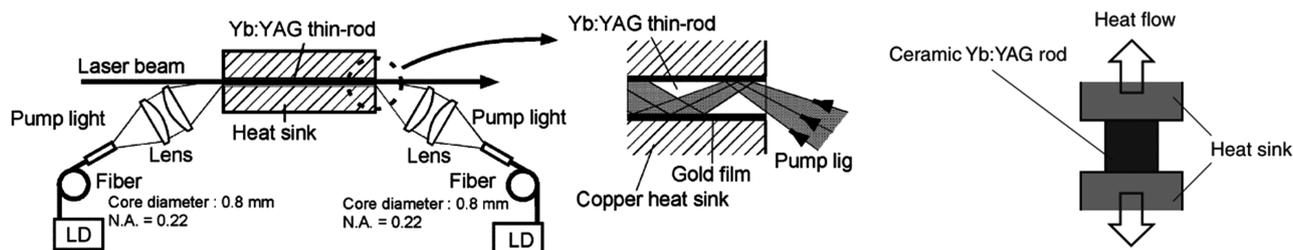


图 15 端泵 Yb: YAG 细棒放大器示意图^[53]

Fig. 15 Diagram of end-pumped thin rod Yb: YAG amplifier^[53]

近年来, 为了克服传统石英介质光纤存在的热导率低和非线性效应等问题, 人们希望将晶体与传统光纤结合, 获得可以兼具晶体良好的物理、化学性质和光纤散热优势的晶体光纤。在高功率放大中, 最广泛使用的是由巴黎第十一大学研究人员提出的与福井大学结构类似的无包层形式单晶光纤, 其直径通常为 400 μm~1 mm, 长度为 40~60 mm。信

号光在单晶光纤内以自由空间形式传播, 泵浦光则是以波导形式传播, 因此单晶光纤可以采用较低的掺杂浓度和较长的长度, 使泵浦光沿晶体长度方向的衰减更少, 产生的热量更均匀, 如图 16(a)所示, 这样可以在保证放大器增益的同时降低晶体内的热负荷; 另一方面, 虽然单晶光纤较小的直径有利于降低晶体中心与边缘之间的温差, 但这也同时伴随着

散热表面积的减小,为此巴黎第十一大学和 Fibercryst 公司联合开发了 Taranis 模块,该模块可为单晶光纤提供均匀高效的热管理,不仅大幅降低了高功率泵浦时晶体中心的温度,还使温度梯度在晶体内的分布更均匀,其结果如图 16(b)所示^[56]。2011 年,巴黎第十一大学的 Zaouter 等^[57]首次采用直径为 1 mm、长度为 40 mm、掺杂浓度(原子数分数)为 1%的 Yb:YAG 单晶光纤对超短脉冲进行放大,在泵浦功率为 180 W 时直接通过双通将平均功率为 600 mW、重复频率为 30 MHz、脉冲宽度为 270 fs 的信号光放大至 12 W,此时实验中的光-光转换效率仅为 7%。2013 年,Délen 等^[3]采用数值孔径为 0.15、纤芯直径为 105 μm 的高亮度 940 nm 泵浦源,并使用 CPA 技术在泵浦功率为 72 W 时将

平均功率为 500 mW 的信号光放大至 12 W,这说明使用高亮度的二极管可以大幅提高放大效率,并且在重复频率为 10 kHz 时获得了 1.3 mJ 的脉冲输出,此时由于增益窄化,脉冲宽度减小至 150 ps,对应的峰值功率为 8.7 MW,经过压缩后的脉冲宽度为 380 fs,脉冲能量为 1 mJ;2016 年 Lesparre 等^[58]采用 $\Phi 1 \times 30$ mm、掺杂浓度为 2% 的单晶光纤,将平均功率为 78 mW、脉冲宽度为 8.5 ps、重复频率为 2 MHz 的信号放大至 9.4 W,获得了 21 dB 的大增益。在这一放大级基础上,采用基于 DPA 的 $\Phi 1 \times 40$ mm、掺杂浓度为 1% 的单晶光纤放大器,在重复频率为 12.5 kHz 时获得了 2 mJ 的单脉冲能量输出,脉冲宽度为 6 ps,峰值功率为 320 MW。

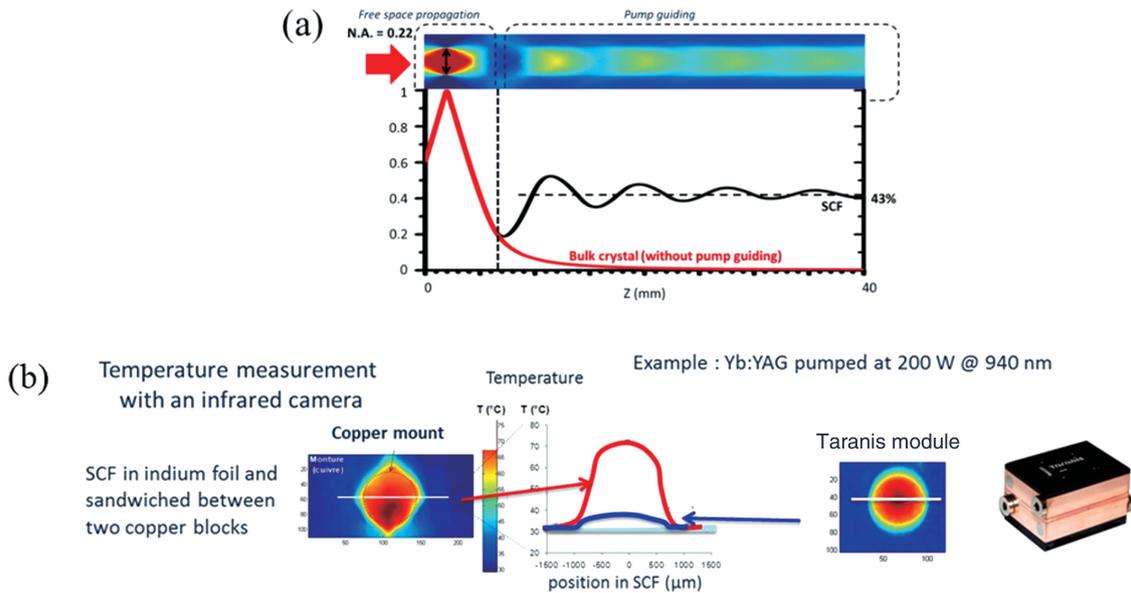


图 16 单晶光纤中心泵浦功率吸收比率示意图,以及普通装配技术和 Taranis 模块中单晶光纤泵浦端面的温度分布^[56]。

(a)单晶光纤中心泵浦功率吸收比率示意图;(b)普通装配技术和 Taranis 模块中单晶光纤泵浦端面的温度分布

Fig.16 Evolution of fraction of pump power absorbed in central part of SCF, and temperature distribution of SCF pumped facet in Taranis module and conventional mounting technique^[56]. (a) Evolution of fraction of pump power absorbed in central part of SCF; (b) temperature distribution of SCF pumped facet in Taranis module and conventional mounting technique

俄罗斯科学院的 Kuznetsov 等^[59]也在这一领域做了许多工作。2016 年,他们提出了锥形 Yb:YAG 细棒放大器的概念,数值模拟和实验表明在相同泵浦条件下,锥形细棒的细端区域的粒子数反转得到明显改善,相比单晶光纤具有更大的小信号增益;2018 年,他们通过对多种规格的侧面抛光 Yb:YAG 圆柱细棒放大器进行理论和实验研究^[60],指出更高掺杂、更短长度的晶体细棒的小信号增益要优于低掺杂、较长长度的晶体细棒,他们在实验中采

用基于 CVBG 的 CPA 结构和两级侧抛细棒放大配置,将重复频率为 11.5 kHz、平均功率为 10 mW、脉冲宽度为 300 fs 的信号光放大至 28 W,脉冲能量为 2 mJ,压缩后的脉冲宽度为 2.8 ps,对应的峰值功率为 714 MW;在这两级放大的基础上,他们又采用一级多通碟片放大器,将脉冲能量提高到 10 mJ,对应的平均功率为 120 W,实验装置如图 17 所示^[61]。

中国科学院西安光学精密机械研究所在 Yb:YAG 单晶光纤放大方面做了许多工作^[62-65]。他们

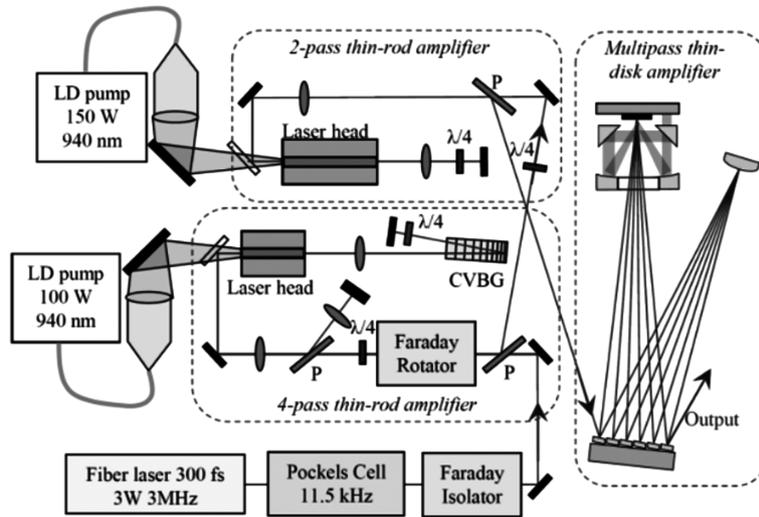


图 17 Yb : YAG 细棒和多通碟片放大系统示意图^[61]

Fig. 17 Diagram of Yb : YAG thin rod and multi-pass disk amplification system^[61]

在 2020 年的最新工作中采用了光纤、键合棒状晶体、两级 SCF 的实验设置,分别将信号光的平均功率放大到 7.2,26.7,96 W。由于增益窄化效应,放大后的脉冲光谱带宽为 2.8 nm,通过 CVBG 对脉冲进行压缩,脉冲宽度被压缩至 2.5 ps,其相应的平均功率为 67.8 W,光-光转换效率为 72.4%^[66]。

2020 年,本课题组在再生放大实验中对 Yb : YAG 棒状晶体和 Yb : YAG 单晶光纤的光-光转换效率,发现单晶光纤的转换效率要远高于 $\Phi 2 \times (5+40+5)$ mm、掺杂浓度为 1% 的棒状晶体,并进一步采用晶体尺寸为 $\Phi 1 \times 30$ mm、掺杂浓度为 1% 的 Taranis 模块结合 NALM 光纤振荡器进行了单晶光纤再生放大实验研究^[67]。实验结构如图 18 所示,非线性放大环行镜锁模光纤激光器的输出分为两路,一路作为普克尔盒调制的触发信号,另一路为准直耦合输出,并被注入再生腔内。再生放大器为线性腔,有助于降低普克尔盒的驱动高压。普克尔盒中的晶体为双 BBO,这成功地降低了所需的 1/4 波长电压。根据计算,4 mm×4 mm×25 mm 的双 BBO

的 1/4 波长电压为 2100 V 左右。BBO 晶体端面镀对信号光的高透膜。普克尔盒与 1/4 波片一起组成了脉冲选择器,在加压时间内提供了 $\lambda/2$ 的相移,允许脉冲在腔内往返以提取增益介质的能量。将单晶光纤的热沉温度设置为 20 °C。整个再生腔集成在 30 cm × 70 cm 的区域。利用单晶光纤的再生放大器将平均功率为 4 mW、脉冲能量为 190 pJ 的信号脉冲,在重复为频率 200 kHz 和 100 kHz 下分别被放大到 21 W 和 10.4 W,单脉冲能量为 105 μ J,脉冲能量放大倍率为 57.4 dB。测量光谱带宽为 1.48 nm,脉冲宽度为 2.4 ps,经光栅对的压缩后,脉冲宽度为 1 ps,输出的光束质量为 1.3。

同年,德国斯图加特大学的 Beirou 等^[68]探索了单级单晶光纤放大器在波长为 969 nm 的高功率激光二极管泵浦下的放大性能。实验中使用晶体尺寸为 $\Phi 1 \times 40$ mm、掺杂浓度为 1% 的 Taranis 模块,在泵浦功率为 1 kW 时,将平均功率为 53 W、重复频率为 48.5 MHz、脉冲宽度为 784 fs 的信号光直接放大至 290 W,脉冲宽度为 829 fs,对应的峰值功率为 7.2 MW。他们指出单晶光纤在光束质量和放大效率方面虽然不如碟片放大器,但是其在结构简单、占地面积小和总成本低等方面具有很大优势。

3.2 超短脉冲棒状(块状)晶体放大器

伴随着单晶光纤放大器的发展和光纤耦合激光二极管输出亮度的提升,研究人员也对在常温下直接采用棒状(块状)Yb : YAG 晶体作为放大器增益介质的方式产生了极大的兴趣。2015 年,巴黎第十一大学的 Pouysegur 等^[69]采用一段 0.8 m 长、85/265 μ m

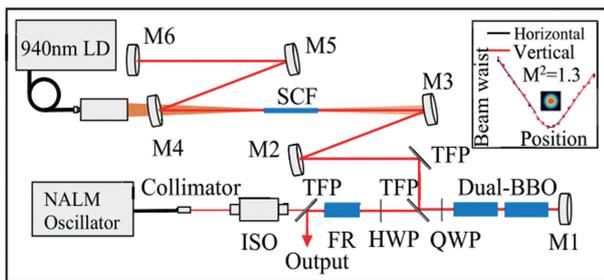


图 18 单晶光纤再生放大器示意图^[67]

Fig. 18 Diagram of SCF regenerative amplifier^[67]

的棒状掺镱光纤和一个 10 mm 长的 Yb : YAG 晶体,结合 DPA 技术在 50 kHz 重复频率下获得了脉冲宽度为 3 ps、脉冲能量为 350 μ J、峰值功率为 116 MW 的输出。2016 年,他们采用一个长度为 15 mm、宽度为 1 mm、掺杂浓度为 3% 的 Yb : YAG 晶体,得到的输出激光的脉冲宽度为 350fs、脉冲能量为 200 μ J、重复频率为 100 kHz,振荡器的脉冲宽度被展宽至 500 ps。在重复频率为 5 kHz 时,通过采用 DPA 技术的放大器获得 3 mJ 的脉冲能量。经过压缩后,输出的脉冲能量为 2.3 mJ,脉冲宽度为 520 fs,峰值功率达到 4.4 GW^[70]。

立陶宛物理科学与技术中心的 Rodin 等^[71-72]在

2017 年通过相同的实验配置对比了 $\Phi 1 \times 40$ mm、掺杂浓度为 1% 的单晶光纤和尺寸为 2 mm \times 2 mm \times 20 mm、掺杂浓度为 2% 的 Yb : YAG 晶体对中心波长为 1030 nm、平均功率为 550 mW、重复频率为 500 kHz、脉冲宽度为 210 ps 的信号光进行双通放大的结果,实验装置如图 19 所示;在双端泵浦总功率为 120 W (70 W + 50 W) 时, $\Phi 1 \times 40$ mm 的单晶光纤和 2 mm \times 2 mm \times 20 mm 的块状 Yb : YAG 晶体的输出功率分别为 29 W 和 39.5 W,经过压缩后脉冲宽度约为 600 fs。他们在文章中指出在这一泵浦水平下,单晶光纤并没有显现相比于 Yb : YAG 棒的优势。

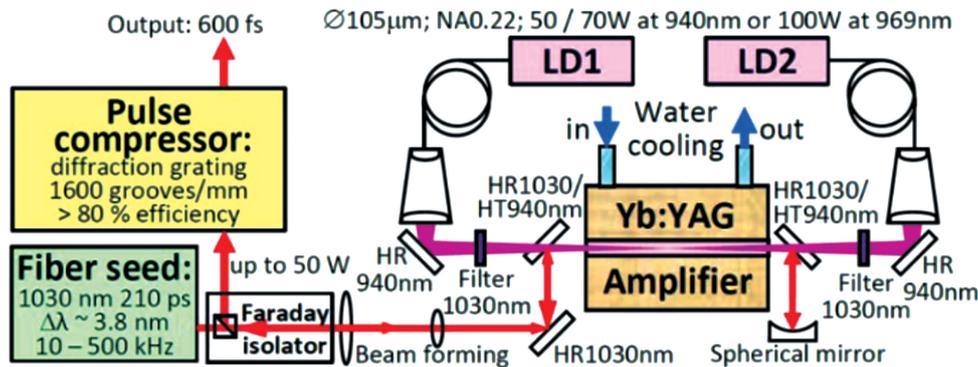


图 19 Yb : YAG 双通放大器示意图^[71]

Fig. 19 Diagram of Yb : YAG double-pass amplifier.^[71]

2018 年,立陶宛 Ekspla 公司的 Veselis 等^[73-74]的工作也证实了这一结果。他们采用基于如图 20 所示的 CFBG 和 CVBG 进行色散补偿的 CPA 系统

对平均功率为 450 mW、重复频率为 200 kHz、脉冲宽度为 4 ps 的信号光进行放大,采用增益介质为长度 12 mm、掺杂浓度为 3.6% 的 Yb : YAG 棒,在

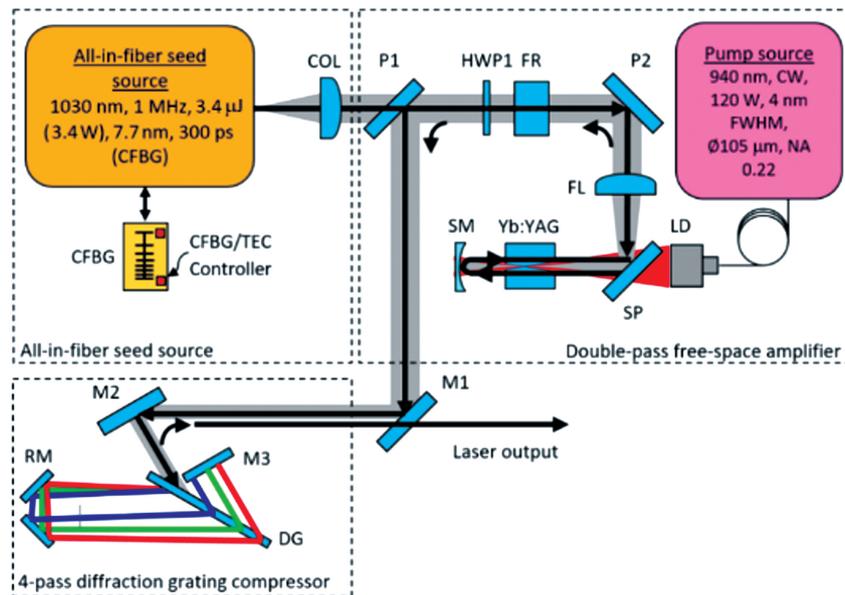


图 20 具有光纤前端和自由空间 Yb : YAG 放大器的 CPA 系统的示意图^[74]

Fig. 20 Diagram of CPA system with fiber frontend and free-space Yb : YAG amplifier.^[74]

泵浦功率为 84 W 时通过双通放大获得了 20 W 的输出,压缩后的脉冲宽度为 764 fs。2020 年,他们在同样装置的基础上,采用平均功率为 3.4 W、重复频率为 1 MHz、脉冲宽度为 320 ps 的光纤前端,在 110 W 的泵浦功率下进一步获得了 42 W 的输出,输出脉冲经空间滤波和脉冲压缩后的平均功率为 35 W,脉冲宽度为 465 fs,对应的峰值功率约为 90 MW。同年,莫斯科工程物理学院的 Obronov 等^[75]研究了更高亮度的泵浦源对放大效率的影响。他们采用一个波长为 920 nm、平均功率为 35 W 的掺铈光纤激光器泵浦直径为 1 mm、长度为 17 mm、掺杂浓度为 5% 的 Yb:YAG 晶体,当全光纤前端的输出功率为 1.4 W 时,以不到 30 W 的泵浦功率获得 14 W 的输出功率,斜效率超过 50%,其放大效率远高于光纤耦合激光二极管泵浦源,可见通过进一步提升泵浦源的亮度可以有效提高掺铈材料的放大效率。

2020 年,本课题组采用全光纤前端和三级 Yb:YAG 细棒放大的方式,获得了平均功率为 100.4 W、重复频率为 20 MHz、脉冲宽度为 7 ps 的输出^[76],光纤前端采用非保偏光纤。种子源为一个 SESAM 锁模的掺铈全光纤环形振荡器,其中:滤波器带宽为 8 nm,中心波长为 1030 nm;掺铈增益光纤在 976 nm 的吸收系数为 250 dB/m,长度为 1 m,耦合输出比为 30%。实验中采用的 SESAM 的中心波长位于 1064 nm,导致锁模后中心波长相对 1030 nm 向长波方向偏移。随后采用两级光纤放大

器对信号光进行放大。第一级纤芯放大增益光纤为长度为 1 m 的 6/125 μm 掺铈单模光纤,其在 976 nm 的吸收系数为 250 dB/m。第二级放大的增益光纤为长度为 2 m 的掺铈 20/130 μm 双包层光纤,其在 976 nm 处的吸收系数为 10.8 dB/m,经过薄膜偏振片后并在晶体放大之前输出功率维持在 1.5 W,重复频率为 20 MHz,脉冲宽度为 17.4 ps,中心波长为 1032.99 nm,3 dB 光谱宽度为 0.87 nm。固体放大结构如图 21 所示。第一级放大采用传导冷却的 $\Phi 2 \times 10$ mm、掺杂浓度为 3% 的 Yb:YAG 细棒。泵浦源为最大输出功率为 200 W 的光纤耦合 LD,中心波长为 940 nm,纤芯直径为 135 μm ,数值孔径为 0.22。将平均功率为 1.5 W 的信号光经过双通放大后实现了平均功率为 20 W 的线偏振输出,此时反向泵浦功率为 123 W。将双通放大器的输出功率稳定在 17 W 左右并进行后续两级的放大。第二、三级使用 $\Phi 2 \times (5+40+5)$ mm、掺杂浓度为 1% 的非侧抛 Yb:YAG 键合细棒进行单通放大,泵浦方式为双端泵浦,泵浦源的中心波长为 940 nm,纤芯直径为 105 μm ,数值孔径为 0.22,并且采用传导冷却。在双端泵浦功率分别为 112 W 与 113 W 时,第二级放大的最大输出功率为 55.1 W。第三级放大器的泵浦配置与第二级相同,在泵浦功率分别为 113 W 和 120 W 时获得 100.4 W 的输出,此时输出脉冲宽度为 7 ps,相比全光纤前端的脉冲宽度有所窄化,在输出功率 91 W 时测得 M^2 为 4。

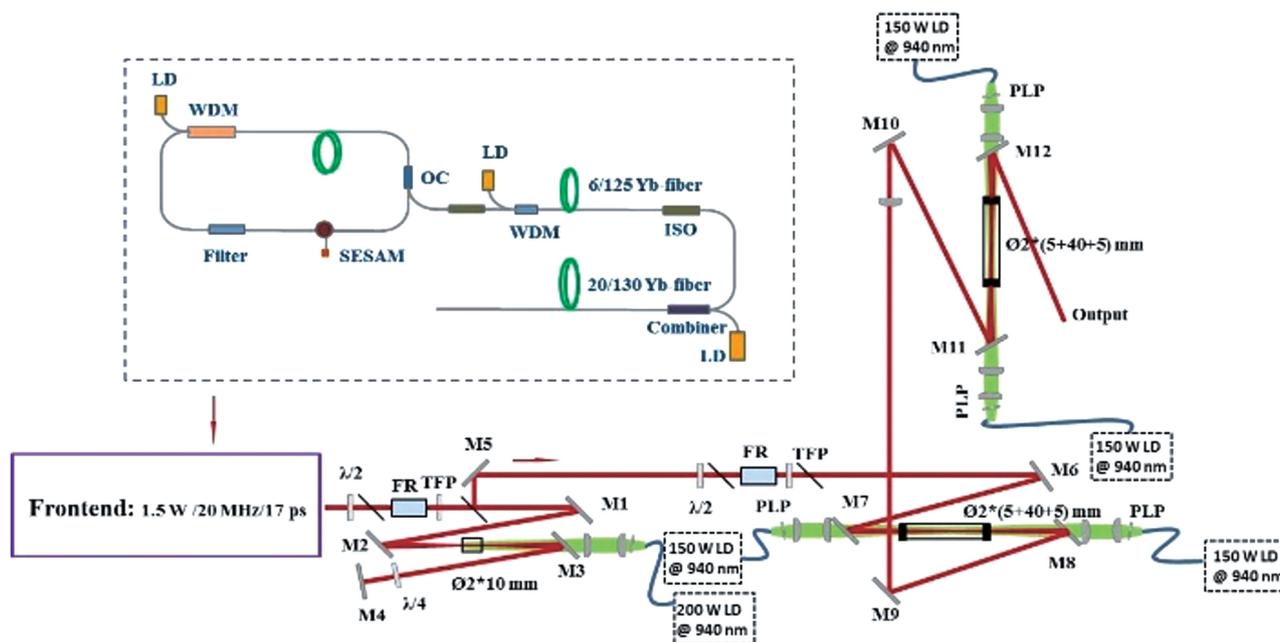


图 21 掺铈光纤和 Yb:YAG 细棒混合 MOPA 系统的示意图^[76]

Fig. 21 Diagram of hybrid MOPA system with Yb-fiber and Yb:YAG thin-rod^[76]

为了进一步降低晶体内的热效应,将第三级放大更换为尺寸为 $\Phi 2 \times (5+60+5)$ mm、掺杂浓度为 0.5% 的非侧抛 Yb : YAG 键合细棒,冷却方式为直接水冷;注意到,泵浦光在经直接水冷的圆柱状晶体内传播时,如果存在全内反射,则其在靠近晶体侧壁附近会形成螺旋传播的放大自发辐射(ASE),这造成晶体内存能的损耗。如图 22 所示,螺旋状 ASE 的分布与晶体和冷却液的折射率有关^[77]。为了避免泵浦光在直径为 2 mm 的晶体内产生螺旋状 ASE 和寄生振荡等有害效应,没有采用侧面抛光的

晶体。这一级放大在光纤前端和两级固体放大结构不变的情况下实现了 90.4 W 的输出,此时的泵浦总功率低于之前的 230 W。

后续改进工作中在光纤前端后直接采用了两级双端泵浦的 $\Phi 2 \times (5+40+5)$ mm 的 Yb : YAG 键合细棒放大器,装置如图 23 所示。第一级放大通过双通放大实现了最大功率为 25 W 的输出,此时双端总泵浦功率约为 192 W,放大效率约为 12.2%。在第一级输出功率约为 17.5 W 时,通过第二级单通放大实现了 60 W 的输出,双端泵浦总功率约为

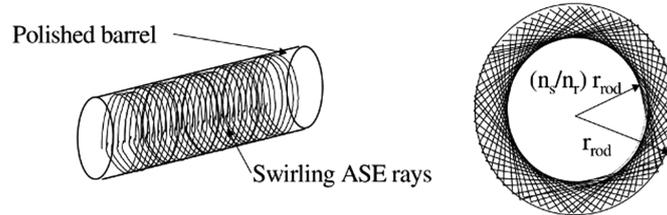


图 22 侧面及端面角度的直接水冷时侧抛晶体棒捕获 ASE 的路径示意图,ASE 会减小在晶体棒中的环形区域存储的激光增益^[77]

Fig. 22 Diagrams of optical path of sidecast crystal rod trapping ASE for direct water cooling at side and end angles. ASE decreases laser gain stored in annular region of crystal rod^[77]

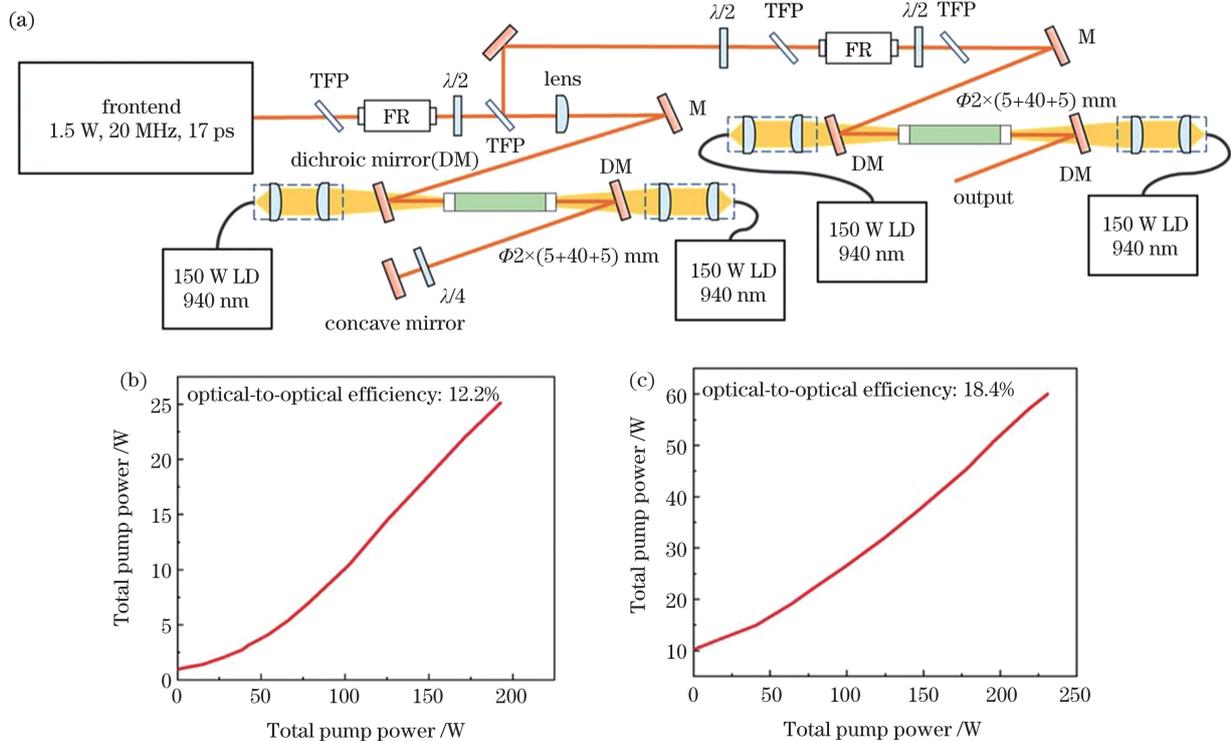


图 23 两级双端泵浦的 $\Phi 2 \times (5+40+5)$ mm 的 Yb : YAG 键合细棒放大器示意图,以及第一级和第二级放大器的输出功率。(a)两级双端泵浦的 $\Phi 2 \times (5+40+5)$ mm 的 Yb : YAG 键合细棒放大器示意图;(b)第一级放大器的输出功率;(c)第二级放大器的输出功率

Fig. 23 Diagram of two-stage double-end pumped $\Phi 2 \times (5+40+5)$ mm Yb : YAG bonding thin rod amplifier, and output powers of first stage amplifier and second stage amplifier. (a) Diagram of two-stage double-end pumped $\Phi 2 \times (5+40+5)$ mm Yb : YAG bonding thin rod amplifier; (b) output power of first stage amplifier; (c) output power of second stage amplifier

231 W, 放大效率约为 18.4%。在第一级输出功率为 25 W 时, 热透镜造成信号光与泵浦光的失配, 此时放大功率比输出功率为 17.5 W 时有所降低。

在之前 MOPA 工作的基础上, 为了进一步对比晶体细棒和单晶光纤的放大效率, 采用一级 Taranis 模块对光纤前端输出的信号光进行了直接放大; 在反向泵浦功率为 100 W 时, 采用 Taranis 模块得到的单通放大功率为 5.2 W, 相同泵浦条件下

$\Phi 2 \times (5+40+5)$ mm 键合细棒的单通放大功率为 3.4 W; 采用双通放大[图 24(b)]时 Taranis 模块的输出功率约为 10 W, 而之前采用 $\Phi 2 \times 10$ mm、掺杂浓度为 3% 的 Yb : YAG 细棒并经双通放大得到的输出功率为 16.3 W, 斜效率为 14.8%。在此基础上, 用 Taranis 模块进行了四通放大的实验, 在泵浦条件不变的情况下输出功率增加到 22.4 W, 结果如图 24(c) 所示(图中百分数代表原子数分数)。为了

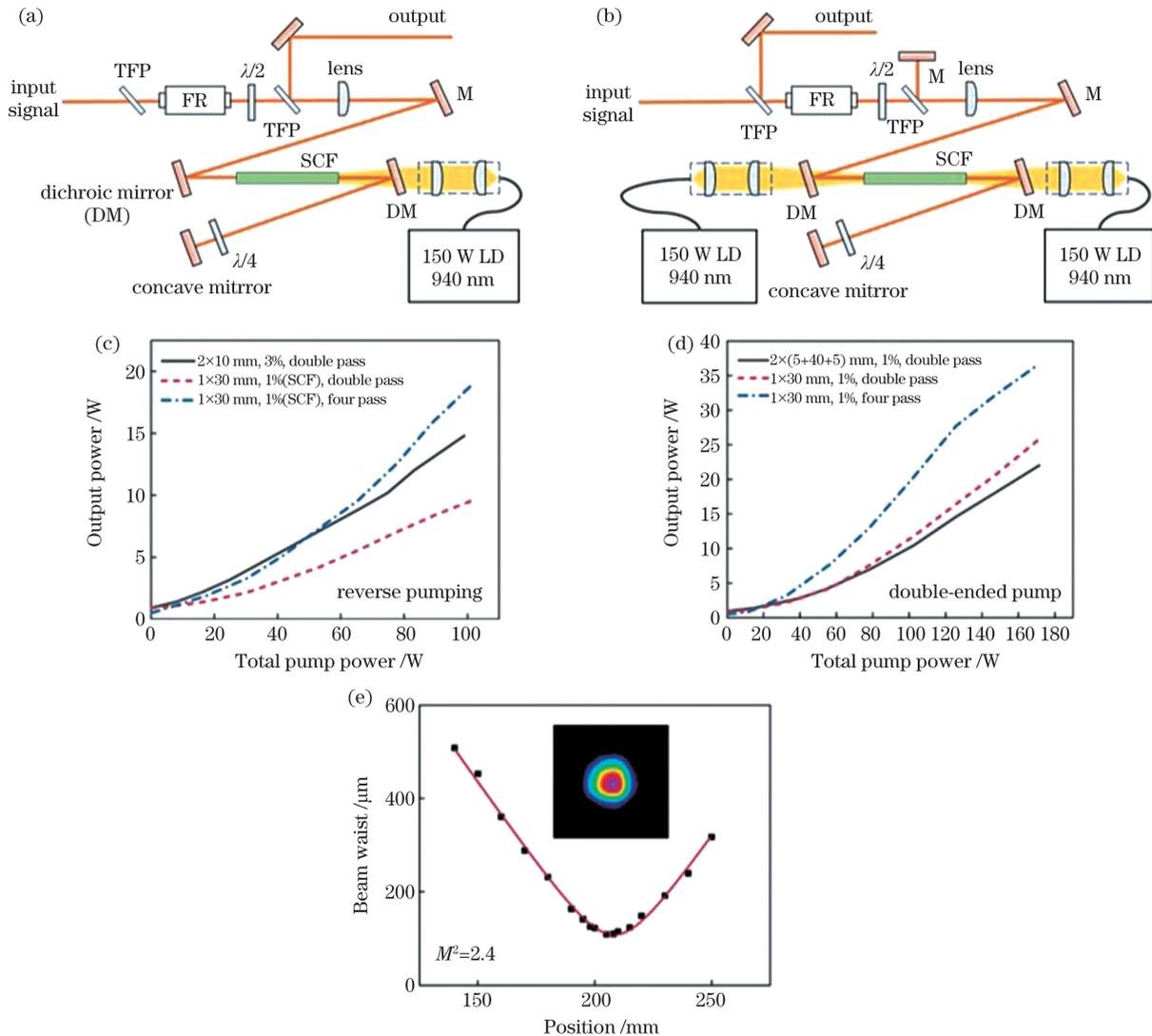


图 24 反向泵浦双通放大、双端泵浦四通放大示意图, 反向泵浦、双端泵浦时不同规格 Yb : YAG 晶体的输出功率, 以及单晶光纤双端泵浦四通放大的光束质量因子。(a) 反向泵浦双通放大示意图; (b) 双端泵浦四通放大示意图; (c) 反向泵浦时不同规格 Yb : YAG 晶体的输出功率; (d) 双端泵浦时不同规格 Yb : YAG 晶体的输出功率; (e) 单晶光纤双端泵浦四通放大的光束质量因子

Fig. 24 Diagrams of reverse-pumped double-pass amplification and dual-end-pumped four-pass amplification, output powers of Yb : YAG crystals of different specifications during reverse pumping and dual-end-pumped, and beam quality factor of SCF dual-end-pumped four-pass amplification. (a) Diagram of reverse-pumped double-pass amplification; (b) diagram of double-ended pumped four-pass amplification; (c) output power of Yb : YAG crystals of different specifications during reverse pumping; (d) output power of Yb : YAG crystals of different specifications during dual-end-pumping; (e) beam quality factor of SCF dual-end-pumped four-pass amplification

进一步提升放大功率,采用了双端泵浦结构。Taranis 模块在双端泵浦总功率为 171 W 时通过双通放大获得了 25.7 W 的输出功率,放大效率约为 14.2%,这说明双端泵浦可以有效提升细长的低掺杂晶体的放大效率;在相同泵浦条件下,采用 $\Phi 2 \times (5+40+5)$ mm 的非侧抛晶体细棒得到的输出功率为 22 W,放大效率为 12%。为了进一步提升放大效率,在此基础上对单晶光纤和 $\Phi 2 \times (5+40+5)$ mm 晶体细棒进行了四通放大实验,相同泵浦功率下单晶光纤可以获得最高为 36.6 W 的输出功率,放大效率为 20.5%,并在输出功率为 31 W 时测得 M^2 为 2.4,实验结果如图 24(d)、(e)所示。实验说明在对低功率信号光进行放大时,使用较短的高掺杂晶体时得到的增益更大;而对于增益较小的单晶光纤,可以采用多通放大的方式弥补晶体掺杂浓度较低导致增益不足的问题。对比 $\Phi 1 \times 30$ mm、掺杂浓度为 1% 的单晶光纤和 $\Phi 2 \times (5+40+5)$ mm、掺杂浓度为 1% 的 Yb:YAG 非侧抛晶体细棒的放大结果可以发现,具有泵浦波导结构的长度较短的单晶光纤比长度较长的非侧抛晶体细棒的放大效率更高,这说明泵浦波导使泵浦光在晶体长度方向得到更有效的吸收,提高了泵浦光的利用效率。通过对比实验还可以发现,在高功率放大时单晶光纤的泵浦波导结构和双端泵浦的结构可以有效提升放大效率。综合目前国内外研究和本课题组的工作可以发现,掺杂浓度较低、长度较长的 Yb:YAG 晶体因具有较低的热负荷,适用于高功率泵浦,其中利用未侧抛的 $\Phi 2 \times (5+40+5)$ mm、掺杂浓度为 1% 的 Yb:YAG 键合晶体细棒可以获得 100 W 以上的输出功率,但其放大效率低于散热更好且具有泵浦波导的 $\Phi 1 \times 40$ mm、掺杂浓度为 1% 的单晶光纤模块。目前以 Taranis 模块为主的单晶光纤放大器已经可以获得平均功率为 200 W 以上的超短脉冲输出,其输出功率在未来有望得到进一步提升。更高掺杂浓度(掺杂浓度大于 2%)的短棒状晶体和短单晶光纤可以更有效地放大低功率的信号光,但不适合高功率泵浦,通常可作为输出功率为数十瓦的放大器的增益介质。在低重复频率、高脉冲能量方面,棒状晶体和单晶光纤的放大能力基本相当,能量范围为 2~3 mJ,但棒状晶体在低成本、高国产化率、易维护等方面更有优势。

4 结束语

掺镱光纤激光器以其结构紧凑、稳定性高、维护

简单而广受青睐,但较小的纤芯直径使其无法承受超短脉冲过高的峰值功率,大模场 PCF 由于受到石英材料极限峰值功率的限制,无法直接获得更高峰值功率的脉冲输出,这一限制可以通过以 Yb:YAG 晶体为主的掺镱晶体得到有效克服。这种光纤-固体混合超短脉冲放大技术有效地结合光纤放大器的高增益和晶体放大器的高峰值功率、高脉冲能量的优势,使激光器具有更低的成本和更紧凑的结构,输出功率小于 200 W 时可以有效替代板条与碟片放大器,同时也能为碟片等高功率激光放大器提供参数优良、稳定可靠且成本更低的放大前级。通过合束等技术,光纤-固体放大也有望获得更高平均功率的超短脉冲激光输出。随着未来可用泵浦源的合适波长的光纤激光器的开发或光纤耦合激光二极管亮度的进一步提升,掺镱棒状(块状)晶体和单晶光纤的放大效率会得到进一步提升。发展高效的常温散热技术也有利于进一步提升掺镱棒状(块状)晶体和单晶光纤放大器的性能。采用包层结构的晶体光纤可实现长距离基模波导,增大单晶光纤表面积和体积之比、降低热管理难度,这也是未来发展的重要方向。

参 考 文 献

- [1] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 56(3): 219-221.
- [2] Zhou S A, Wise F W, Ouzounov D G. Divided-pulse amplification of ultrashort pulses[J]. Optics Letters, 2007, 32(7): 871-873.
- [3] Délen X, Zaouter Y, Martial I, et al. Yb:YAG single crystal fiber power amplifier for femtosecond sources[J]. Optics Letters, 2013, 38(2): 109-111.
- [4] Daniault L, Hanna M, Lombard L, et al. Coherent beam combining of two femtosecond fiber chirped-pulse amplifiers[J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 621-623.
- [5] Yan D Y, Liu B W, Song H Y, et al. Research status and development trend of high power femtosecond fiber laser amplifiers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508012.
闫东钰, 刘博文, 宋寰宇, 等. 高功率光纤飞秒激光放大器的研究现状与发展趋势[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508012.
- [6] Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. Optics Letters, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [7] Liu B, Liu C, Wang Y, et al. 100 MW peak power

- picosecond laser based on hybrid end-pumped Nd : YVO₄ and side-pumped Nd : YAG amplifiers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(5): 1-7.
- [8] Chu H W, Qiao W C, Wang X M, et al. Powerful ultrafast hybrid PM Yb : fiber-Nd : GdVO₄ master oscillator power amplifier [J]. Optics Communications, 2020, 460: 125109.
- [9] Agnesi A, Carrá L, Pirzio F, et al. Low repetition rate, hybrid fiber/solid-state, 1064 nm picosecond master oscillator power amplifier laser system [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2013, 30(11): 2960-2965.
- [10] Nie M M, Liu Q, Ji E C, et al. High peak power hybrid MOPA laser with tunable pulse repetition frequency and pulse duration [J]. Applied Optics, 2017, 56(12): 3457-3461.
- [11] Wang Y, Liu B, Ye Z B, et al. High peak power and high beam quality fiber-solid hybrid amplification laser system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401007.
汪勇, 刘斌, 叶志斌, 等. 高峰值功率高光束质量光纤-固体混合放大激光系统 [J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401007.
- [12] Brown D C. Ultrahigh-average-power diode-pumped Nd : YAG and Yb : YAG lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(5): 861-873.
- [13] Brown D C. Heat, fluorescence, and stimulated-emission power densities and fractions in Nd : YAG [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(3): 560-572.
- [14] Chénais S, Druon F, Forget S, et al. On thermal effects in solid-state lasers: the case of ytterbium-doped materials [J]. Progress in Quantum Electronics, 2006, 30(4): 89-153.
- [15] Nubbemeyer T, Kaumanns M, Ueffing M, et al. 1 kW, 200 mJ picosecond thin-disk laser system [J]. Optics Letters, 2017, 42(7): 1381-1384.
- [16] Russbuedt P, Mans T, Weitenberg J, et al. Compact diode-pumped 1.1 kW Yb : YAG Innoslab femtosecond amplifier [J]. Optics Letters, 2010, 35(24): 4169-4171.
- [17] Dietz T, Dietz T, Jenne M, et al. Ultrafast thin-disk multi-pass amplifier system providing 1.9 kW of average output power and pulse energies in the 10 mJ range at 1 ps of pulse duration for glass-cleaving applications [J]. Optics Express, 2020, 28(8): 11415-11423.
- [18] Negel J P, Loescher A, Voss A, et al. Ultrafast thin-disk multipass laser amplifier delivering 1.4 kW (4.7 mJ, 1030 nm) average power converted to 820 W at 515 nm and 234 W at 343 nm [J]. Optics Express, 2015, 23(16): 21064-21077.
- [19] Sangla D, Martial I, Aubry N, et al. High power laser operation with crystal fibers [J]. Applied Physics B, 2009, 97(2): 263-273.
- [20] Wang T, Zhang J, Zhang N, et al. Research progress in preparation of single crystal fiber and fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170611.
王涛, 张健, 张娜, 等. 单晶光纤制备及单晶光纤激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170611.
- [21] Liu J, Xu J, Wang P. High repetition-rate narrow bandwidth SESAM mode-locked Yb-doped fiber lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(7): 539-541.
- [22] Tan F Z, Liu J, Sun R Y, et al. All-normal-dispersion passively mode-locked Yb-doped fiber laser with multimode interference effect [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0402010.
谭方舟, 刘江, 孙若愚, 等. 基于多模干涉效应的全正色散被动锁模掺镱光纤激光器 [J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402010.
- [23] Li H H, Liu J, Sun R Y, et al. Dissipative dispersion-managed solitons in Yb-doped fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(B12): s102001.
李辉辉, 刘江, 孙若愚, 等. 掺镱光纤激光器中的色散管理耗散孤子 [J]. 中国激光, 2013, 40(B12): s102001.
- [24] Liu J, Wei R S, Xu J, et al. Passively mode-locked Yb-doped fiber laser with graphene epitaxially grown on 6H-SiC substrates [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(8): 0802003.
刘江, 魏汝省, 徐佳, 等. 基于 6H-SiC 衬底外延石墨烯的被动锁模掺镱光纤激光器 [J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0802003.
- [25] Cheng Z C, Li H H, Shi H X, et al. Dissipative soliton resonance and reverse saturable absorption in graphene oxide mode-locked all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7000-7006.
- [26] Shi Y H, Cheng Z C, Peng Z G, et al. Mode-locked fiber laser with a nonlinear amplifying loop mirror at different repetition rate varying from 100 kHz to 21 MHz [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11437: 114370L.
- [27] Yu M, Yu M, Cheng Z C, et al. Numerical modeling and experimental investigation of ultrafast pulses generation from all-polarization-maintaining dispersion-managed nonlinear polarization evolution

- Yb-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32764-32776.
- [28] Elahi P, Yılmaz S, Akçaalan Ö, et al. Doping management for high-power fiber lasers: 100 W, few-picosecond pulse generation from an all-fiber-integrated amplifier[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3042-3044.
- [29] Teh P S, Lewis R J, Alam S U, et al. 200 W diffraction limited, single-polarization, all-fiber picosecond MOPA[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 25883-25889.
- [30] Yu Z H, Shi W, Dong X Z, et al. 110 W all-fiber picosecond master oscillator power amplifier based on large-core-diameter ytterbium-doped fiber [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(15): 4119-4122.
- [31] Bobkov K K, Levchenko A E, Kochergina T A, et al. Generation of picosecond pulses with 150 W of average and 0.92 MW of peak power from an Yb-doped tapered fiber MOPA[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11260: 1126020.
- [32] Wan P, Yang L M, Liu J. All fiber-based Yb-doped high energy, high power femtosecond fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29854-29859.
- [33] Yu H L, Wang X L, Zhang H W, et al. Linearly-polarized fiber-integrated nonlinear CPA system for high-average-power femtosecond pulses generation at 1.06 μm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(18): 4271-4277.
- [34] Yu H L, Zhang P F, Wang X L, et al. High-average-power polarization maintaining all-fiber-integrated nonlinear chirped pulse amplification system delivering sub-400 fs pulses [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 1-7.
- [35] Niu J, Liu B W, Song H Y, et al. Femtosecond chirped-pulse amplifier system based on spectrum control and dispersion optimization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0101006.
牛佳, 刘博文, 宋寰宇, 等. 基于光谱控制与色散优化的飞秒啁啾脉冲放大系统[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0101006.
- [36] Sun R Y, Jin D C, Cao Y, et al. Hundred-watt-level 1030 nm ytterbium-doped picosecond all-fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1002004.
孙若愚, 金东臣, 曹镱, 等. 百瓦级 1030 nm 皮秒脉冲掺镱全光纤激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1002004.
- [37] Hong C, Liu J, Sun R Y, et al. High-power all fiber-integrated linearly polarized picosecond ytterbium-doped master-oscillator power amplifier [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10619: 106190E.
- [38] Sun R Y, Jin D C, Tan F Z, et al. High-power all-fiber femtosecond chirped pulse amplification based on dispersive wave and chirped-volume Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22806-22812.
- [39] Sun R Y, Tan F Z, Jin D C, et al. 1 μm femtosecond fiber chirped pulse amplification system based on dispersion wave [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0101001.
孙若愚, 谭方舟, 金东臣, 等. 基于色散波的 1 μm 飞秒光纤啁啾脉冲放大系统[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0101001.
- [40] Bai Y, Zou F, Wang Z W, et al. Spectral properties of picosecond fiber laser system with 3.4 MW peak power[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0501004.
白洋, 邹峰, 王子薇, 等. 3.4 MW 峰值功率皮秒光纤激光系统的光谱特性[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0501004.
- [41] Röser F, Rothhardt J, Eidam T, et al. Millijoule pulse energy high repetition rate femtosecond fiber CPA system [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(24): 3495-3497.
- [42] Eidam T, Rothhardt J, Stutzki F, et al. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power[J]. *Optics Express*, 2011, 19(1): 255-260.
- [43] Lavenu L, Natile M, Guichard F, et al. High-energy few-cycle Yb-doped fiber amplifier source based on a single nonlinear compression stage [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7530-7537.
- [44] Yang P L, Hao T, Hu Z Q, et al. Highly stable Yb-fiber laser amplifier of delivering 32- μJ , 153-fs pulses at 1-MHz repetition rate [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(8): 1-6.
- [45] Manchec C P K, Möller J, Miller R J D. Highly stable, 100 W average power from fiber-based ultrafast laser system at 1030 nm based on single-pass photonic-crystal rod amplifier [J]. *Optics Communications*, 2019, 437: 6-10.
- [46] He M Y, Li M, Yuan S, et al. High-power femtosecond self-similar fiber amplification system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0308001.
贺明洋, 李敏, 袁帅, 等. 高功率飞秒自相似光纤激光放大系统[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0308001.
- [47] Chang H, Cheng Z C, Sun R Y, et al. 172-fs, 27- μJ , Yb-doped all-fiber-integrated chirped pulse amplification system based on parabolic evolution by passive spectral amplitude shaping [J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 34103-34112.
- [48] Li H J, Bu X B, Wang P. High-power chirped pulse amplification based on Yb-doped rod-type PCF and

- nonlinear amplifying loop mirror oscillator [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11437: 114370Q.
- [49] Hong K H, Siddiqui A, Moses J, et al. Generation of 287 W, 5.5 ps pulses at 78 MHz repetition rate from a cryogenically cooled Yb : YAG amplifier seeded by a fiber chirped-pulse amplification system [J]. Optics Letters, 2008, 33(21): 2473-2475.
- [50] Chang C L, Krogen P, Hong K H, et al. High-energy, kHz, picosecond hybrid Yb-doped chirped-pulse amplifier [J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10132-10144.
- [51] Morrissey F X, Fan T Y, Miller D E, et al. Picosecond kilohertz-class cryogenically cooled multistage Yb-doped chirped pulse amplifier [J]. Optics Letters, 2017, 42(4): 707-710.
- [52] Brown D C, Singley J M, Kowalewski K, et al. High sustained average power cw and ultrafast Yb : YAG near-diffraction-limited cryogenic solid-state laser [J]. Optics Express, 2010, 18(24): 24770-24792.
- [53] Kawato S, Sugiura Y, Kobayashi T. Gain and thermal characteristics of end-pumped thin-rod Yb : YAG amplifier [C] // Advanced Solid-State Lasers, Washington, D.C.: OSA, 2020: WB4.
- [54] Sueda K, Kawato S, Kobayashi T. LD pumped Yb : YAG regenerative amplifier for high average power short-pulse generation [J]. Laser Physics Letters, 2008, 5(4): 271-275.
- [55] Matsubara S, Tanaka M, Takama M, et al. A picosecond thin-rod Yb : YAG regenerative laser amplifier with the high average power of 20 W [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10: 055810.
- [56] Délen X, Aubourg A, Deyra L, et al. Single crystal fiber for laser sources [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9342: 934202.
- [57] Zaouter Y, Martial I, Aubry N, et al. Direct amplification of ultrashort pulses in μ -pulling-down Yb : YAG single crystal fibers [J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 748-750.
- [58] Lesparre F, Gomes J T, Délen X, et al. Yb : YAG single-crystal fiber amplifiers for picosecond lasers using the divided pulse amplification technique [J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1628-1631.
- [59] Kuznetsov I, Mukhin I, Palashov O, et al. Thin-tapered-rod Yb : YAG laser amplifier [J]. Optics Letters, 2016, 41(22): 5361-5364.
- [60] Kuznetsov I, Mukhin I, Palashov O, et al. Thin-rod Yb : YAG amplifiers for high average and peak power lasers [J]. Optics Letters, 2018, 43(16): 3941-3944.
- [61] Kuznetsov I. High average and peak power laser based on Yb : YAG amplifiers of advanced geometries developed in IAP RAS [C] // IEEE 2018 International Conference Laser Optics (ICLO), June 4-8, 2018, Saint Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2018.
- [62] Li F, Yang Z, Lv Z, et al. Hundred micro-joules level high power chirped pulse amplification of femtosecond laser based on single crystal fiber [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 1-7.
- [63] Wang N N, Wang X L, Hu X H, et al. 41.8 W output power, 200 kHz repetition rate ultra-fast laser based on Yb : YAG single crystal fiber (SCF) amplifier [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 127: 106202.
- [64] Li F, Yang Z, Lv Z, et al. Hybrid CPA system comprised by fiber-silicate glass fiber-single crystal fiber with femtosecond laser power more than 90 W at 1 MHz [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106291.
- [65] Li F, yang Z, Wang Y S, et al. Hybrid high energy femtosecond laser system based on Yb : YAG single crystal fiber amplifier [J]. Optik, 2018, 156: 155-160.
- [66] Wang N N, Wang N N, Li F, et al. Development of a 67.8 W, 2.5 ps ultrafast chirped-pulse amplification system based on single-crystal fiber amplifiers [J]. Applied Optics, 2020, 59(27): 8106-8110.
- [67] Peng Z G, Shi Y H, Bu X B, et al. 21 W, 105 μ J regenerative amplifier based on Yb : YAG SCF and NALM fiber oscillator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(6): 333-336.
- [68] Beirou F, Eckerle M, Graf T, et al. Amplification of radially polarized ultra-short pulsed radiation to average output powers exceeding 250 W in a compact single-stage Yb : YAG single-crystal fiber amplifier [J]. Applied physics B, 2020, 126(9): 1-10.
- [69] Pouysegur J, Guichard F, Zaouter Y, et al. Hybrid high-energy high-power pulse width-tunable picosecond source [J]. Optics Letters, 2015, 40(22): 5184-5187.
- [70] Pouysegur J, Weichelt B, Guichard F, et al. Simple Yb : YAG femtosecond booster amplifier using divided-pulse amplification [J]. Optics Express, 2016, 24(9): 9896-9904.
- [71] Rodin A M, Zopelis E. Comparison of Yb : YAG single crystal fiber with larger aperture CPA pumped at 940 nm and 969 nm [C] // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), July 31-August 4, 2017, Singapore, Singapore. New York: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [72] Rodin A, Zopelis E. Optimised configuration for two cascaded double-pass Yb : YAG chirped pulse

- amplifier [C] // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2017.
- [73] Veselis L, Bartulevicius T, Madeikis K, et al. Compact 20 W femtosecond laser system based on fiber laser seeder, Yb : YAG rod amplifier and chirped volume Bragg grating compressor[J]. Optics Express, 2018, 26(24): 31873-31879.
- [74] Veselis L, Bartulevicius T, Madeikis K, et al. Generation of 40 W, 400 fs pulses at 1 MHz repetition rate from efficient, room temperature Yb : YAG double-pass amplifier seeded by fiber CPA system [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11259: 1125925.
- [75] Obrovov I V, Demkin A S, Myasnikov D V. Solid-state Yb : YAG amplifier pumped by a single-mode laser at 920 nm [J]. Quantum Electronics, 2018, 48 (3): 212-214.
- [76] Bu X B, Xu Y, Peng Z G, et al. 100 W, 7 ps hybrid Yb-fiber and Yb : YAG thin-rod MOPA laser [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11455: 114553T.
- [77] Beach R J, Honea E C, Sutton S B, et al. High-average-power diode-pumped Yb : YAG lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3889: 246-260.

Research Progress of Ytterbium-Doped Fiber-Solid High-Power Ultrashort Pulse Amplification

Xu Yan^{1,2}, Peng Zhigang^{1,2*}, Cheng Zhaochen^{1,2}, Shi Yuhang^{1,2}, Wang Beibei^{1,2}, Wang Pu^{1,2**}

¹*Institute of Laser Engineering, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*

²*Beijing Engineering Research Center of Laser Applied Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

Abstract

Significance High-power ultrashort pulse lasers have significant applications in the fields of industrial high-end precision machining, high-order harmonic generation, and spectroscopy. Since the 21st century, countries around the world have successively launched their own manufacturing upgrade plans to focus on the development of high-end precision machining. This puts forward higher requirements for ultrashort pulse lasers and makes them toward the direction of high power, compact structure, high stability, low cost, simple operation, and maintenance.

The average power of an ultrashort laser oscillator does not meet the requirements of high-end precision machining. Therefore, it is necessary for further amplification by using the master oscillator power amplifier (MOPA), regenerative amplifier (RA), chirped pulse amplification (CPA), divided-pulse amplification (DPA), coherent beam combining (CBC), etc. An RA provides 60 dB pulse energy amplification, but however, the Pockels cell inside the RA cavity requires high-voltage driving which reduces stability. CBC can be realized by using multiple amplifiers and multiple time delay line, and it is sensitive to the environmental disturbance. As a result, MOPA, CPA, and DPA are often used to obtain low-cost, high-stability, and high-power ultrashort pulse lasers. The gain materials used in the amplification technologies mentioned above can be categorized as fiber, rod or bulk crystal, slab crystal, thin-disk crystal, and single-crystal fiber (SCF).

Ytterbium-doped fiber is widely used in the ultrashort pulse oscillator and amplifier due to its large gain spectrum bandwidth, high optical-to-optical efficiency, and high beam quality. However, the limited core diameter of fiber causes strong nonlinear effects, pulse distortion, and even damage when high-peak power pulses pass through. In order to reduce the nonlinear effect of fiber while maintaining the fundamental transverse mode, two solutions have been investigated. One is to stretch pulse duration and compress pulse duration after amplification, which is a well-known CPA technology; the other is to expand fiber mode field area, which uses a large mode field photonic crystal fiber (PCF). The restriction for single-channel ultrashort pulse amplification is a self-focus nonlinear effect; the threshold is usually lower than 4 MW. CBC technology can avoid self-focus effect and can further increase average power to 10 kW. Nonetheless, the CBC system increases complexity and cost.

The most commonly used crystals for ultrashort pulse amplification are neodymium-doped crystals and

ytterbium-doped crystals, for instance, Nd : YVO₄, Nd : YAG, and Yb : YAG. Compared with Nd³⁺ doped crystals, Yb³⁺ doped ones exhibit small quantum defect, wide spectrum bandwidth, and weak concentration quenching effect. Yb : YAG crystal shaped in slab or thin-disk configuration, pumped by high-power laser diodes, can realize ultrashort pulses with kilowatt average power. However, a slab crystal amplifier contains a signal shaping system with a complex pump light path; a thin-disk crystal amplifier needs multi-pass pump light path and signal light path. Therefore, the high complexity and high cost of these two structures are inevitable.

The SCF amplifier developed in recent years has promising application prospects. Side-polished thin Yb : YAG crystal is soldered in heat-sink with minimalized void rate, enabling pump light to travel in a waveguide. Large mode area, excellent heat-dissipation, and high-brightness pump improve its optical-to-optical efficiency, average power, and peak power simultaneously. With the continuous improvement of the brightness of fiber-coupled laser diodes, the amplification ability of SCF and rod (bulk) crystals will be further improved. Therefore, it is possible to obtain simple, cost-effective, reliable high-power, and high-energy ultrashort pulse laser by combining the fiber front-end and SCF or rod (bulk) crystal amplifier. This kind of amplification technology can not only be directly used in industrial applications, but also can be used as the front amplification stage for the slab and thin-disk amplifier, which greatly reduces the complexity and the cost.

This article summarizes the domestic and abroad research progress of ytterbium-doped fiber lasers, PCF amplifiers, SCF amplifiers, and rod (bulk) solid-state amplifiers in recent years, highlights our work in the fields of ultrashort pulse fiber lasers, PCF amplifiers, and solid-state amplifiers, and discusses and prospects the future development direction of hybrid amplification technology.

Progress The beginning of ultrashort pulse amplification is a mode-locked oscillator. The stability of the mode-locked pulse train has a significant impact on amplified pulse train. Therefore, a polarization-maintained (PM) mode-locked all-fiber laser with strong resistance to environmental disturbance is preferred. In recent years, a PM all-fiber oscillator has been widely investigated (Fig. 1 and Fig. 2). Ultrashort pulses generated by an anti-disturbance all-fiber oscillator need to be amplified in order to meet more applications. According to different shapes and materials, amplifiers can be classified as all-fiber amplifier, PCF amplifier, SCF amplifier, rod-shaped crystal amplifier, and fiber-crystal hybrid amplifier. In 2016, Shi's research group from Tianjin University has achieved an average power of 117 W, pulse duration of 11 ps, repetition rate of 15 MHz, and pulse energy of 7.8 μJ by using an all-fiber MOPA (Fig. 3). In 2017, We reported an all-fiber picosecond MOPA system with an average power of 225 W at repetition rate of 58.2 MHz (Fig. 5). In order to reduce the impact of nonlinear effect in the process of fiber amplification and increase the output average power and pulse energy, PCF has been developed. In 2017, Lavenu et al. from France presented a high-energy femtosecond ytterbium-doped fiber amplifier delivering 130 fs, 250 μJ laser at 200 kHz. In 2020, we have built a PCF CPA system by using domestic home-made PCF, which achieves 140 W, 167 ps laser at 1 MHz (Fig. 10). Combining fiber amplifier and crystal amplifier is an attractive amplification technology, which not only increases pulse energy and peak power, but also improves the compactness and stability. In 2020, Beirou et al. from University of Stuttgart reported a simple and compact single-stage Yb : YAG single-crystal fiber amplifier delivering 290 W, 6 μJ laser at 48.5 MHz. With the improvement of pump light brightness, it is possible to achieve an average power of greater than 100 W by using the rod crystal. In 2019, we reported a low-cost hybrid Yb : YAG thin-rod MOPA laser pumped by high-brightness laser diodes, which delivers 100.4 W, 7 ps laser at 20 MHz (Fig. 21).

Conclusions and Prospects Ytterbium-doped fiber lasers are widely used because of their compact structure, high stability, and simple maintenance. However, the limited core diameter restricts the peak power of ultrashort pulses. The threshold of self-focus nonlinear effect of quartz materials limits the amplified peak power. This limitation can be effectively overcome by using ytterbium-doped crystals. Fiber-crystal hybrid ultrashort pulse amplification effectively combines the high gain of fiber amplifier and the high peak power and high pulse energy of the crystal amplifier. By employing the CBC technology and a high brightness pump source, the amplification efficiency, amplified average power, and amplified pulse energy will be further improved. The development of efficient room temperature heat-dissipation technology is a direction for future investigation.

Key words lasers; laser amplifier; ultrashort pulses; fiber-solid hybrid amplification; high peak power

OCIS codes 140.3280; 140.3460; 140.3615; 140.7090;