

纳秒脉冲掺镱全光纤激光器研究进展

曲 研^{1,2}, 宁超宇^{1,3,4}, 邹淑珍^{1,4}, 于海娟^{1,4}, 陈雪纯^{1,3,4}, 许 爽^{1,3,4},
左杰希^{1,3,4}, 韩世飞^{1,3,4}, 李心瑶^{1,3,4}, 林学春^{1,4*}

- (1. 中国科学院半导体研究所 全固态光源实验室, 北京 100083;
2. 北京新材料和新能源科技发展中心, 北京 100094;
3. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 101407;
4. 北京市全固态激光器先进制造工程技术研究中心, 北京 100083)

摘 要: 掺镱全光纤纳秒脉冲激光器发展迅猛, 已经为诸多领域开辟了新的道路, 特别是高平均功率、大脉冲能量的纳秒脉冲光纤激光器在激光清洗等领域得到了广泛应用。多路光纤激光合束是实现高平均功率、大脉冲能量激光输出的主要手段, 其结构复杂程度取决于单模块激光器的输出特性, 提升单模块纳秒脉冲全光纤激光器输出特性对于激光清洗等领域具有重要意义。文中总结了单模块掺镱全光纤纳秒脉冲激光器的研究进展, 分析了当前限制其功率和能量进一步提升的主要因素。首先, 从主动调 Q、被动调 Q 以及增益开关技术三个层面回顾了纳秒脉冲掺镱全光纤振荡器的研究进展; 其次, 从大脉冲能量、高平均功率、两者协同发展三个指标层面总结了纳秒脉冲掺镱全光纤放大器的研究现状; 最后, 从限制高指标掺镱全光纤激光器输出特性的因素出发, 展望了其在未来功率和能量提升上的发展趋势。

关键词: 高平均功率; 大脉冲能量; 纳秒脉冲; 掺镱全光纤激光器; 激光清洗
中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220055

Recent advances in nanosecond-pulsed Ytterbium-doped all-fiber lasers

Qu Yan^{1,2}, Ning Chaoyu^{1,3,4}, Zou Shuzhen^{1,4}, Yu Haijuan^{1,4}, Chen Xuechun^{1,3,4}, Xu Shuang^{1,3,4},
Zuo Jiexi^{1,3,4}, Han Shifei^{1,3,4}, Li Xinyao^{1,3,4}, Lin Xuechun^{1,4*}

- (1. Laboratory of All-Solid-State Light Sources, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
2. Beijing Advanced Materials and New Energy Technology Development Center, Beijing 100094, China;
3. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China;
4. Beijing Engineering Technology Research Center of All-Solid-State Lasers Advanced Manufacturing, Beijing 100083, China)

Abstract: Ytterbium-doped all-fiber nanosecond-pulsed lasers have developed rapidly in recent years and have opened up new horizons in many fields. Especially in the field of laser cleaning, there is a strong demand for nanosecond pulsed fiber laser with high-power and high-energy. Multi-channel fiber laser beam combining is the main means to achieve high-power and high-energy laser output. The complexity of the structure depends on the output characteristics of a monolithic laser. Improving the output characteristics of monolithic nanosecond pulsed all-fiber laser is very important for laser cleaning and other applications. In this paper, the research progress of

收稿日期:2022-01-18; 修订日期:2022-03-14

基金项目:国家自然科学基金(U2033211, 62175230, 2175232); 中国科学院科学仪器研制项目(YJKYYQ20200001)

作者简介:曲研,女,助理研究员,硕士,主要从事激光器研制方面的研究。

导师(通讯作者)简介:林学春,男,研究员,博士生导师,博士,长期从事高功率激光关键技术方面的研究。

monolithic Ytterbium-doped all-fiber nanosecond pulsed lasers is summarized, and the main factors that limit its power and energy expansion are analyzed. Firstly, the recent advances of nanosecond pulsed Ytterbium-doped all-fiber oscillator is reviewed with active Q-switching, passive Q-switching and gain-switching technology. Then, the research status of nanosecond pulse Ytterbium-doped all-fiber amplifiers is summarized with large pulse energy, high average power and collaborative development of the two. In the end, the development trend of Ytterbium-doped all-fiber laser in scaling of power and energy is prospected from the factors limiting the output characteristics.

Key words: high average power; large pulse energy; nanosecond-pulse; Ytterbium-doped all-fiber lasers; laser cleaning

0 引言

光纤激光器具有光束质量好、转换效率高、结构紧凑、系统稳定可靠且环境适应性强等优点,在医疗、工业加工、科学研究等领域有着广泛的应用^[1-4],而激光清洗等领域对高平均功率、大脉冲能量、高峰值功率的纳秒脉冲激光器更是有着重要需求^[5-6]。自 1994 年首次报道掺镱双包层光纤激光器以来^[7],随着高功率、高亮度的半导体激光泵浦源以及大模场面积增益光纤的不断发展,纳秒脉冲掺镱光纤激光器已经取得了一系列突破性进展^[8-12]; IPG 公司的纳秒光纤激光器可实现平均功率 3 000 W,单脉冲能量 100 mJ,脉宽范围 25~100 ns,重频范围 2~300 kHz^[13];国内,锐科激光也可实现平均功率 2 000 W,单脉冲能量 100 mJ,脉宽范围为 120~160 ns,重频范围 20~50 kHz^[14]。然而,这些高指标纳秒脉冲激光器主要基于自由空间结构或多路全光纤放大模块合束获得,合束获得的指标受限于单个全光纤模块。因此,提升单模块全光纤激光器输出性能对于高功率大能量系统具有重要意义。文中系统梳理了近十年来单模块高功率大能量掺镱全光纤纳秒脉冲激光振荡器及放大器的研究现状,分析了目前限制其功率、能量进一步扩展的主要因素,展望了全光纤纳秒脉冲激光器的发展趋势。

1 全光纤纳秒脉冲振荡器

纳秒脉冲光纤振荡器的实现主要依靠调 Q 技术

和增益开关技术^[15-18]。调 Q 是通过调节谐振腔的损耗来获得激光脉冲的技术,包括主动调 Q 和被动调 Q。主动调 Q 技术是在谐振腔内通过主动元器件(如电光调制器 EOM、声光调制器 AOM)来引入损耗而实现 Q 值调节;被动调 Q 技术则采用被动元件(如可饱和吸收体)来对 Q 值进行调制^[19]。增益开关是一种利用足够短的泵浦脉冲来捕捉激光弛豫振荡尖峰,从而实现脉冲输出的技术;当泵浦脉冲具有固定的重频和脉宽,激光器就可以稳定输出脉冲^[20-21]。

主动调 Q 是一种较为成熟的纳秒脉冲实现技术,具有脉宽和重复频率可调的优点。基于主动调 Q 技术,掺镱光纤纳秒脉冲激光在其典型波长 1 064 nm、强吸收强发射波长 976 nm,以及其峰值拉曼增益波长 1 120 nm 都得到了发展。在长波长方面,2013 年国防科技大学 Wang J H 等人采用 AOM 搭建了 1 120 nm 全光纤单模主动调 Q 激光器,其结构如图 1 所示,实现了重频 1 kHz、平均功率 111 mW、脉宽 140 ns 的激光输出,此时 1 060 nm 处 ASE 低于信号峰 40 dB;重频为 10 kHz 时,脉宽为 181 ns、平均功率达 291 mW^[22]。在短波长方面,2014 年天津大学 Fang Q 等人搭建了单频主动调 Q 全光纤 978 nm 激光器:高反光栅和部分反射光栅分别刻在非保偏和保偏的石英光纤上,利用一个 3 mm 长的压电元件在腔内周期性地压缩掺镱石英光纤来产生应力双折射以改变腔内光的偏振状



图 1 1 120 nm 调 Q 光纤激光器结构示意图^[22]

Fig.1 Structure diagram of 1 120 nm Q-switched fiber laser^[22]

态,实现对激光腔 Q 因子的调制。该结构可以产生脉冲宽度数十纳秒到数百纳秒、重复频率 20~800 kHz 的单频光纤激光脉冲^[23]。此外,2019 年中国科学院安徽光学精密机械研究所 Yao B 等人搭建了主动调 Q 环形腔全光纤激光器,其结构及输出特性如图 2 所示。该团队采用双包层掺镱光纤同时作为包层光剥离器 (CPS) 输入端光纤和增益光纤 (纤芯/包层直径 10/130 μm) 来减少增益光纤与 CPS 之间的熔点,从而减弱反向 ASE;此外,通过将一段长度优化的单包层高掺杂镱光纤熔接到合束器输入端,并利用反向传输的 ASE 进行自泵浦,避免了 ASE 的增益自饱和,放大了窄带光栅反馈的初始弱信号,最终获得中心波长 1064.5 nm、重频 175 kHz、脉宽 9 ns、平均功率 1.3 W 的激光脉冲^[24],该脉冲宽度是调研到的主动调 Q 技术获得的最窄脉冲。

腔内主动调 Q 技术的脉冲宽度通常在几十到几百纳秒,但很难实现脉宽<50 ns 的激光脉冲,研究人员将 AOM 或 EOM 置于谐振腔外,通过对连续激光进行调制斩波实现较窄的脉冲输出,EOM 斩波可实现脉宽<10 ns 的输出。近年来,国防科技大学对于纳秒光纤激光的研究就主要采用斩波技术来实现窄脉冲^[25-26],2018 年该单位 Huang L 等人利用电光强度调制器 (EOIM) 对基于超短腔的连续线偏振单频激光进行调制 (结构如图 3 所示),产生了脉宽 4 ns、重频 10 MHz、平均功率 0.48 mW 的纳秒脉冲,进一步采用纤芯/包层直径 6/125 μm 单模双包层保偏掺镱光纤进行预放大,并使用 AOM 滤除脉冲之间的泄漏光来提高消光比,得到了 2 mW 的平均功率^[27]。通过连续激光斩波技术可以实现短脉冲宽度,但其平均功率较低,需要额外的预放大级来实现纳秒脉冲平均功率的提升。

被动调 Q 技术可采用半导体可饱和吸收镜、石

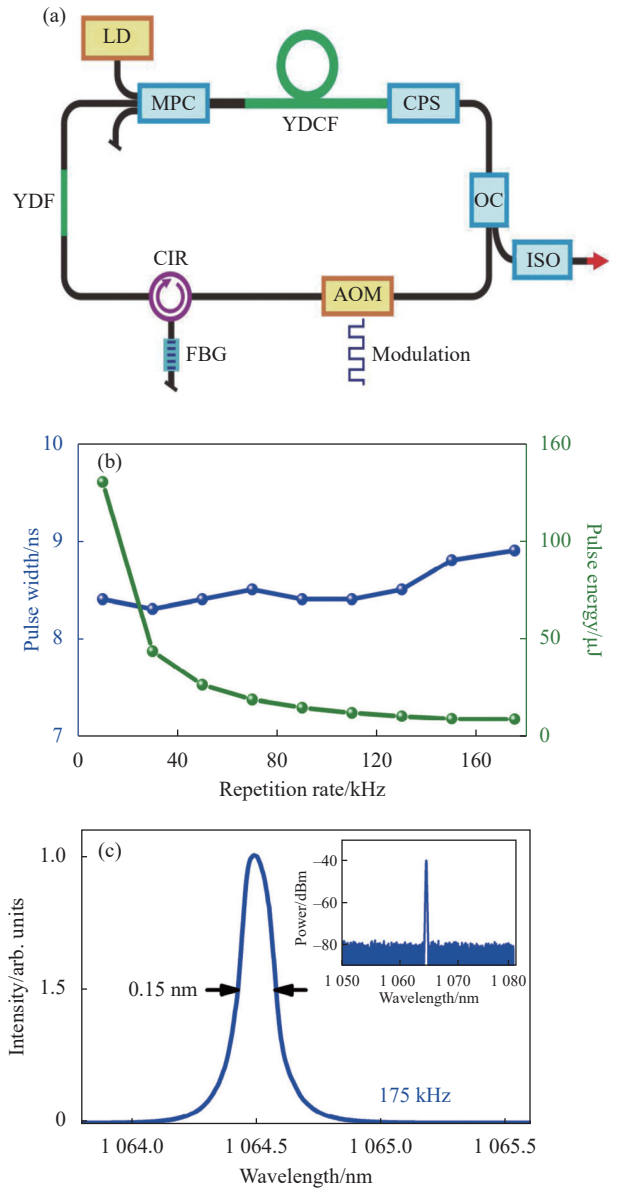


图 2 主动调 Q 环形腔光纤激光器。(a) 结构示意图; (b) 不同重频下脉宽及单脉冲能量变化; (c) 光谱, 插图为对数坐标下的光谱^[24]

Fig.2 Active Q-switched ring cavity fiber laser. (a) Schematic diagram of structure; (b) Change of pulse width and pulse energy at different repetition frequencies; (c) Spectra, illustrated in logarithmic coordinates^[24]

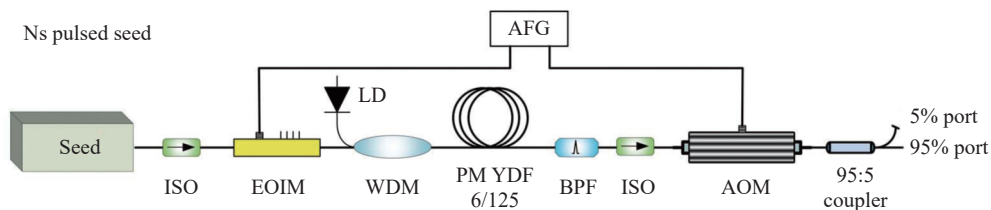


图 3 EOIM 调制连续波产生纳秒脉冲^[27]

Fig.3 Nanosecond pulse obtained by EOIM modulated continuous wave^[27]

墨烯、掺杂稀土元素光纤等作为可饱和吸收体,实现结构紧凑的全光纤激光器。可饱和吸收镜、石墨烯等可饱和吸收体材料损伤阈值较低,不利于高功率的纳秒脉冲输出^[28],掺杂稀土元素光纤作为可饱和吸收体可以有效提高被动调 Q 光纤激光器的输出功率,是近年来被动调 Q 技术的研究热点,其掺杂元素主要包括: Yb^[29], Sm^[30], Bi^[31], Cr^[32], Ho^[33]。2011 年,美国桑迪亚国家实验室 Soh D B S 等人数值模拟了图 4 的被动调 Q 全光纤激光器,其增益介质为纤芯/包层直径 20/125 μm 掺镱光纤,可饱和吸收体为绝热锥向非泵浦的单模掺镱光纤(纤芯直径 5 μm),通过这种模场失配实现可饱和吸收光纤的快速漂白,模拟得到脉冲宽度 14 ns、脉冲能量 0.5 mJ、重复频率 200 kHz 的激光脉冲^[34]。2014 年,加拿大瑞尔森大学 Lu Y 等人利用纤芯/包层直径为 7/128 μm 的掺镱可饱和吸收光纤,纤芯/包层直径为 15/130 μm 的掺镱增益光纤搭建被

动调 Q 激光器,实现了脉宽 140 ns、重频 100 kHz、平均功率 14 W 的脉冲输出^[35],是当时采用模场失配法结合镜饱和和吸收光纤实现的最高功率。该单位在 2015 年搭建图 5 的单模-多模-单模(SMS)被动调 Q 掺镱光纤激光器,抑制了自相位调制(SPM)和受激拉曼散射效应(SRS),实现了重频 100 kHz、平均功率 9.15 W、脉宽 100 ns 的脉冲输出^[36],该 SMS 结构的线宽小于传统结构的 1/3,其 SRS 信噪比也是传统结构的 2 倍。

可饱和吸收光纤结合模场失配法实现被动调 Q 的方案在大功率输出时,会造成熔接锥区的高温。为突破熔接锥区高温引起的功率限制,研究人员提出了基于光纤可饱和吸收体的双谐振腔,在实现被动调制时进行多次波长变换,结合被动调 Q 及增益开关特点来输出稳定纳秒脉冲^[37]。2013 年,北京工业大学 Jin D C 等人搭建双腔结构,如图 6 所示:通过泵浦外

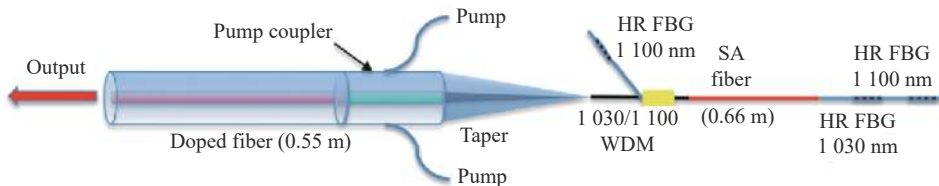


图 4 掺镱光纤作为可饱和吸收体的被动调 Q 激光器^[34]

Fig.4 Passive Q-switched laser with Ytterbium-doped fiber as saturable absorber^[34]



图 5 SMS 结构光纤激光器^[36]

Fig.5 Fiber laser with SMS structure^[36]

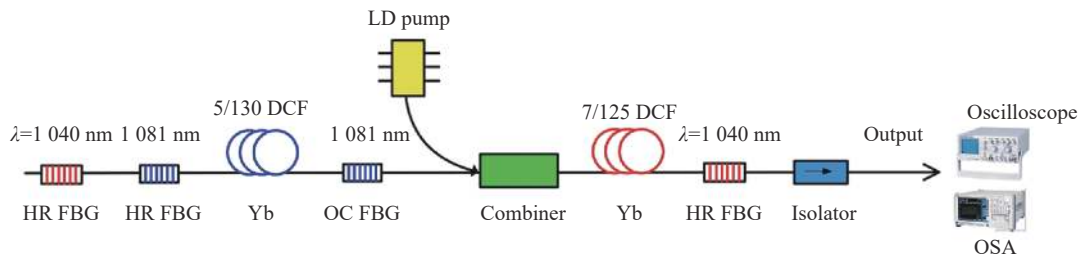


图 6 双腔复合结构被动调 Q 光纤激光器结构示意图^[38]

Fig.6 Structure diagram of passive Q-switched fiber laser with double cavity compound structure^[38]

腔增益光纤产生的 1040 nm 激光,经内腔未泵浦的掺镱光纤调制实现被动调 Q,由于外腔采用两个高反光纤布拉格光栅,外腔调 Q 脉冲在腔内不断振荡并泵浦内腔掺镱光纤,实现内腔 1081 nm 的激光脉冲输出,内腔脉冲输出后经过外腔增益光纤又得以放大,可获得高功率激光脉冲;在泵浦功率 4.8 W 时,可输出重频 30 kHz、最大输出功率 1.8 W,脉宽 45 ns 的激光脉冲^[38],该脉宽是调研到的掺镱全光纤被动调 Q 激光输出的最窄脉宽。2015 年,该单位将内腔和外腔掺镱光纤都扩展为纤芯/包层直径 10/130 μm,实现了平均功率 21 W、脉宽 49 ns、重频 113.6 kHz 脉冲输出,此为目前全光纤掺镱激光被动调 Q 技术的最高平均功率;纤芯/包层直径均为 20/130 μm 时,单脉冲能量可进一步扩展到 484 μJ^[39],为调研所知的全光纤纳秒脉冲振荡器最高能量。

除了调 Q 技术外,通过对泵浦脉冲进行快速调制的增益开关技术也可实现全光纤纳秒脉冲输出。

2019 年,斯洛文尼亚卢布尔雅那大学 Agrez V 等人将增益开关技术与全光纤主振荡器和泵浦-恢复放大器结构相结合,即通过在主振荡器后增加一段额外的增益光纤来吸收残余泵浦并放大种子激光,解决了增益开关模式下产生短脉宽需要短振荡腔长造成的效率降低问题,其结构如图 7 所示。此外,他们利用掺镱光纤的窄带吸收峰在不同泵浦波长下吸收系数的变化来实现脉冲宽度调谐,获得了脉冲随需应变、脉宽精确调谐的高适应性光纤激光器。通过泵浦-恢复放大器结构,他们将效率从无该结构下的 10%~30% 提高到了 65%~75%;在保持峰值功率约 1 kW 时,其重频在 1 kHz~1 MHz 可调;重频 1 MHz 时,可输出波长 1030 nm、平均功率 30 W、脉宽 37.5 ns 的激光脉冲^[40]。据我们所知,该平均功率是目前全光纤纳秒脉冲激光振荡器可实现的最高功率输出。

表 1 展示了近年来全光纤纳秒脉冲振荡器的发展情况,其脉宽在几十纳秒到几百纳秒都得到了发

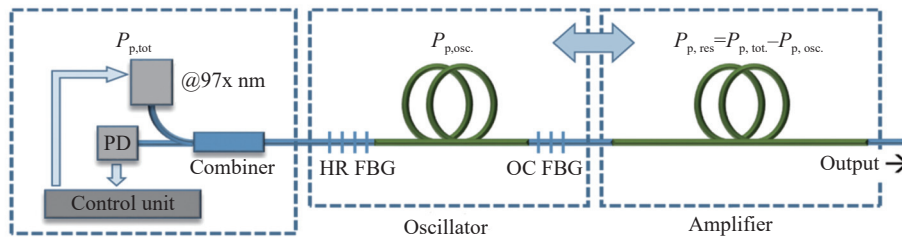


图 7 增益开关纳秒脉冲光纤激光器结构示意图^[40]

Fig.7 Schematic diagram of gain-switched nanosecond pulse fiber laser^[40]

表 1 全光纤纳秒激光振荡器研究进展

Tab.1 Research progress of all-fiber nanosecond laser oscillator

Measure	Year ^[Ref.]	Average power	Pulse duration	Repetition rate	Pulse energy	Peak power
Active Q-switching	2013 ^[22]	111.0 mW	140 ns	1 kHz	111.0 μJ	0.8 kW
		291.0 mW	181 ns	10 kHz	29.1 μJ	0.2 kW
	2014 ^[23]	11.3 mW	40 ns	100 kHz	113.0 nJ	2.8 W
	2019 ^[24]	1.3 W	9 ns	175 kHz	7.4 μJ	0.8 kW
Passive Q-switching	2010 ^[42]	9.9 mW	430 ns	9 kHz	1.1 μJ	2.6 W
	2011 ^[28]	12.0 mW	70 ns	257 kHz	46.0 nJ	0.7 W
	2013 ^[38]	1.8 W	45 ns	30 kHz	62.0 μJ	1.4 kW
	2014 ^[35]	14.0 W	140 ns	100 kHz	141.0 μJ	1.0 kW
	2015 ^[36]	9.2 W	100 ns	100 kHz	92.0 μJ	0.9 kW
	2015 ^[39]	6.0 W	143 ns	12 kHz	484.0 μJ	3.4 kW
		21.0 W	49 ns	114 kHz	187.0 μJ	3.8 kW
Gain-switching	2019 ^[40]	30.0 W	38 ns	1 MHz	30.0 μJ	0.8 kW

展,平均输出功率可达瓦级,峰值功率可达千瓦级,为后续高功率大能量全光纤激光放大器的发展提供了坚实的基础。调 Q 技术是目前全光纤种子源中使用较为广泛的技术,主动调 Q 可以实现脉宽和重复频率的调节,但需要在腔内插入声光或电光器件,或利用额外机电器件对光栅进行应变调谐,使得结构较为复杂,损耗较高;由于多纵模振荡及自脉冲效应引入的噪声、Q 开关快速切换引入的微扰等复杂机制影响,脉冲会出现多峰毛刺等现象^[41]。此外,利用 AOM 或 EOM 对连续光进行斩波,也可实现纳秒脉冲输出,特别是利用 EOM 斩波,能实现<10 ns 的纳秒脉冲,但其输出功率较低,需要进行预放大才可作为高功率高能量放大器的种子源。被动调 Q 技术具有结构更为紧凑等优点,但其重频和脉宽难以主动控制,受传统可饱和吸收体的影响,其输出功率较低,而且稳定性不够高;近年来,基于掺杂稀土元素增益光纤较高的损伤阈值,将其作为可饱和吸收体,可实现平均功率 20 W 级的输出。增益开关技术可实现脉宽和重频可调的窄脉冲输出,但其平均功率较低,新发展的利用额外增益光纤吸收残余泵浦来对种子进行放大可实现 30 W 平均功率输出。

2 全光纤纳秒脉冲放大器

全光纤纳秒脉冲振荡器产生的脉冲能量及平均功率较低,无法应用于工业加工等领域,因此需要采用额外光路进行放大。主振荡功率放大技术 (MOPA) 是实现全光纤纳秒脉冲高功率、大能量输出的主要手

段(结构如图 8(a) 所示),但是其平均功率或能量的进一步扩展都受限于 SBS、SRS 等非线性效应:SBS 效应产生的 Stokes 光沿光纤反向传播,会造成激光振荡器或放大器稳定性的降低,甚至破坏光纤及器件,从而限制激光功率及能量的进一步提升^[43];SRS 效应会将信号激光能量大幅度转移到频率下移的 Stokes 光中,使信号光功率及转换效率降低,而拉曼频移引起的量子亏损会造成严重的热效应,导致光纤及器件烧毁^[44]。尽管 MOPA 技术通过逐级增加增益光纤的有效模场面积可在一定程度上抑制非线性效应,但由于量子亏损及光子暗化产热与大模场面积光纤支持的多个模式共同作用引发 TMI,使基模能量周期性的耦合到高阶模中,泄漏到包层的高阶模被 CPS 滤除造成信号光的能量损失,而纤芯中遗留的高阶模也会破坏光束质量^[45-48]。因此,该部分主要概述了通过对这些非线性效应及热效应的抑制而实现大能量、高平均功率全光纤纳秒脉冲放大器的技术方案。

大脉冲能量的全光纤纳秒脉冲放大器可以通过两类方案实现,一是利用连续泵浦光实现重频 10 kHz 级的激光脉冲,连续光泵浦偏向于重复频率较高的放大器,而在 Hz 级的低重频放大器中,由于脉冲提取效率较低会引起放大的自发辐射 (ASE),因此重频几十 Hz 级的脉冲放大器常通过同步脉冲泵浦技术实现(如图 8(b) 所示)。此外,大脉冲能量的纳秒光纤放大器多在主放大级前使用空间光路来滤除 ASE,而全光纤结构的大脉冲能量纳秒激光研究较少。2014 年,天津大学 Fang Q 等人搭建 MOPA 光纤激光

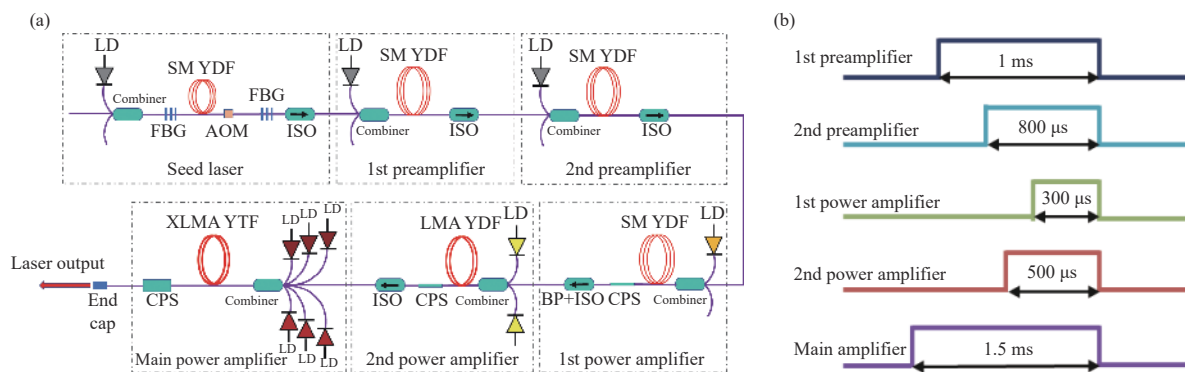


图 8 低重频纳秒脉冲放大器及同步脉冲泵浦技术示意图。(a) 全光纤 MOPA 结构图;(b) 不同放大级泵浦脉冲的时间序列

Fig.8 Low repetition rate nanosecond pulse amplifier and its synchronous pulse pumping technology. (a) Schematic diagram of all-fiber MOPA structure; (b) Time series of pump pulses at different amplification stages

器,主放大采用 0.68 m 纤芯/包层直径 50/400 μm 双包层掺镱光纤作为增益纤,获得了单脉冲能量 2.3 mJ、脉宽 3 ns、峰值功率 697 kW 的脉冲输出^[49]。据笔者所知,该团队实现了 50 μm 芯径增益光纤输出的最高峰值功率。2013 年,清华大学 Zheng C 等人使用超辐射发光二极管 (SLD) 作为宽谱种子源来搭建六级放大系统,所有放大级都采用同步脉冲泵浦的方法来抑制 ASE,获得了脉宽 12 ns、重频 20 Hz、单脉冲能量 31 mJ、谱宽 10 nm 的 1063 nm 脉冲输出^[50]。2018 年,该课题组再次将 SLD 种子进行 6 级全光纤放大实现了 30 mJ 的单脉冲能量,最后采用空间滤波片滤除 ASE 后将信号光耦合到纤芯/包层直径 200/600 μm 超大模场面积 (XLMA) 光纤中,并结合低重频同步脉冲泵浦技术来抑制 ASE 和解决热问题,获得了峰值功率 8 MW,单脉冲能量 100 mJ,脉宽 10 ns,重频 10 Hz 的纳秒脉冲输出^[51],是国内在纳秒光纤激光方面报道的最高单脉冲能量和峰值功率。

高平均功率的全光纤纳秒脉冲放大器常使用 MHz 量级的重复频率来降低脉冲峰值功率,以避免非线性效应。北京工业大学、国防科技大学等单位都进行了相应的研究,特别是国防科技大学利用 EOM 对连续单频激光调制斩波得到脉宽 <10 ns 纳秒种子源,采用 MOPA 结构实现了窄线宽全光纤放大器在高平均功率方面的诸多突破。2013 年,北京工业大学 Chi J J 等人采用非线性偏振旋转被动锁模的掺镱单模光纤激光器作为种子源,经过放大实现了重频 26.3 MHz、平均功率 120 W、脉宽 0.62 ns 的亚纳秒脉冲输出^[52]。国防科技大学主要从非保偏和保偏两方面对全光纤纳秒脉冲放大器进行了研究。在非保偏方面:2012 年,该单位 Su R T 等人通过 EOM 调制连续波得到纳秒脉冲种子,搭建 MOPA 系统实现了重频 10 MHz、平均功率 505 W、脉宽 6 ns 的脉冲输出^[53];2014 年,该团队通过缩短信号激光与斯托克斯光相互作用长度来抑制 SBS,其结构及输出特性如图 9 所示,最终实现了重频 10 MHz、平均功率 913 W、脉宽 3 ns 的激光脉冲^[54],其平均功率是目前脉宽 <10 ns 的最高单纤功率。在保偏方面:2015 年,他们采用强度调制联合相位调制技术抑制 SBS,通过电光强度调制使放大信号脉宽小于 SBS 产生所需的声子寿命,结合电光相位调制展宽光谱线宽,使光信号能量分布在更

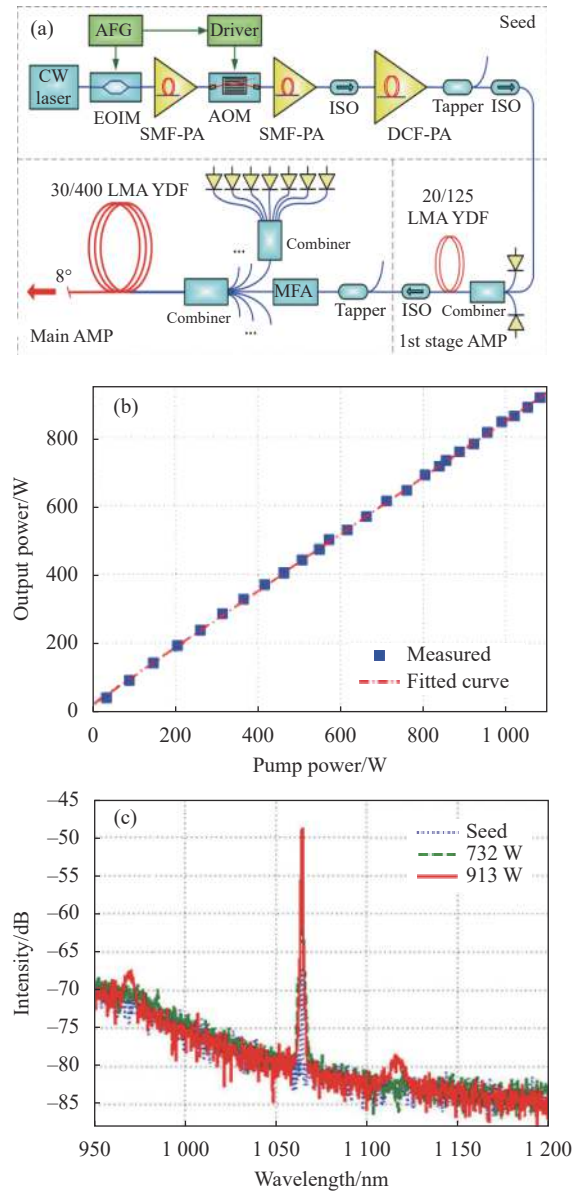


图 9 近千瓦级激光放大器。(a) 结构示意图; (b) 平均功率随泵浦功率变化曲线; (c) 光谱特性^[54]

Fig.9 Nearly kilowatt average power laser amplifier. (a) Schematic of structure; (b) Curve of average power vs. pump power; (c) Spectral pattern^[54]

多频率中来降低光功率谱密度,进一步提高了 SBS 阈值,最终获得了重频 20 MHz、平均功率 293 W、脉宽 3.5 ns 的保偏激光输出^[55];2018 年,他们搭建了如图 10(a) 的全光纤线偏振窄线宽纳秒脉冲放大器,利用大模场直径短增益光纤结合小于声子寿命的窄脉冲宽度来抑制 SBS,实现了重频 10 MHz、平均功率 466 W,脉宽 4 ns 的激光输出^[27],该平均功率是脉宽 <10 ns 量级的最高保偏功率输出。此外,该课题组还

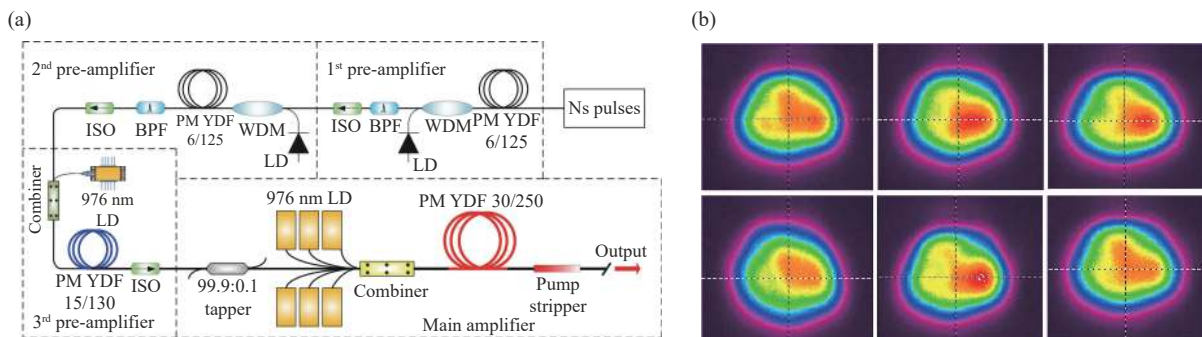


图 10 全光纤线偏振 MOPA 激光系统。(a) 结构图; (b) 最大功率处采集的 6 个光斑, 表明 TMI 出现^[27]

Fig.10 All-fiber linearly polarized MOPA laser system. (a) Structural diagram; (b) 6 spots randomly collected during the maximum power output, indicating that TMI appears^[27]

研究了亚纳秒量级的全光纤保偏激光系统: 2015 年, Ma P F 等人使用窄带线偏振增益开关半导体激光器作为种子源进行放大, 其结构及输出特性如图 11 所示, 通过选择 915 nm 泵浦波长代替 976 nm 波长来降低光纤产热, 使受限于 TMI 的平均功率从 380 W 提升到了 608 W, 其重频为 10 MHz, 脉宽为 0.81 ns^[56], 该平均功率是目前报道的亚纳秒级全光纤激光器最高输出。

由于工业加工等领域的需求, 国内外关于全光纤纳秒脉冲激光器的研究更倾向高平均功率和大脉冲能量的协同发展。国外, 2013 年, 英国 SPI 公司 Malinowski A 等人使用直接调制半导体激光器作为种子源搭建 MOPA 系统, 通过利用 AOM 对预放大脉冲前沿进行整形来防止脉冲迅速压缩, 实现了平均功率 265 W、单脉冲能量 10.6 mJ、脉宽 500 ns 的脉冲输出^[57]; 2014 年, 德国 Rofin 公司 Dinger R 等人采用粉末烧结法制

备芯径 300 μm 掺镱光纤, 实现了平均功率 400 W、单脉冲能量 40 mJ、脉宽 12 ns 的激光输出^[58]。该公司在 2017 年再次利用粉末烧结法制备了超大模场面积镱/铈共掺光纤作为主放大级增益光纤, 通过使用种子预整形技术和超大模场面积光纤实现了平均功率 1500 W、单脉冲能量 150 mJ、脉宽 90 ns 以及平均功率 1150 W、单脉冲能量 115 mJ、脉宽 30 ns 的输出^[59]。尽管 Rofin 公司的高指标纳秒脉冲激光放大器内部结构并不透明, 但考虑 300 μm 光纤芯径非线性效应阈值非常高, 文中暂将其处理为全光纤结构, 因此其平均功率和单脉冲能量是调研到的纳秒量级全光纤激光放大器的最高功率和能量输出。

国内, 中国工程物理研究院、北京航天控制仪器研究所、华中科技大学等单位均研究了同时具备高平均功率、大脉冲能量的全光纤纳秒激光放大器。2016 年, 中国工程物理研究院 Li Z B 等人发现较小的

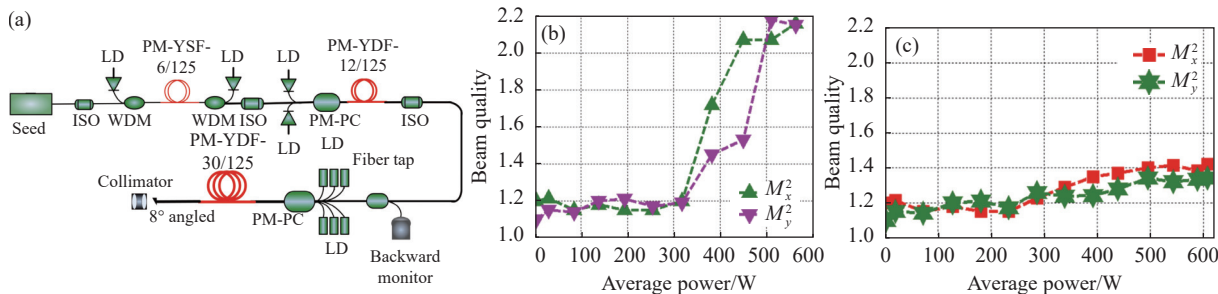


图 11 全光纤亚纳秒激光放大器及输出特性。(a) 结构示意图; (b) 976 nm 泵浦下光束质量变化; (c) 915 nm 泵浦下光束质量变化; 光束质量的改善表明 TMI 得到抑制^[56]

Fig.11 All-fiber sub-nanosecond laser amplifier and its output characteristics. (a) Schematic of structure; (b) Changes of beam quality at 976 nm pumping wavelength; (c) Changes of beam quality at 915 nm pumping wavelength. The improvement of beam quality shows that TMI is suppressed^[56]

增益光纤盘绕直径具有更高的斜效率,他们认为这是因为小盘绕直径使得高阶模损耗增加,并使基模比高阶模具有更高的重叠因子所致,在主放大增益纤为纤芯/包层直径 48/400 μm 双包层掺镱光纤时,实现了平均功率 188 W、脉冲能量 4.5 mJ、脉宽 101 ns 的激光输出^[60]。2018 年,北京航天控制仪器研究所 Li P 等人采用双向泵浦技术缓解了单向泵浦引入的 ASE 和热量集中的问题,研制了平均功率 302 W、单脉冲能量 3 mJ、脉宽 203 ns 的纳秒脉冲激光器(见 图 12),并用于除锈效果探究^[61]。2019 年,华中科技大学

Wang SJ 等人采用自主研发的纤芯/包层直径 100/400 μm 掺镱光纤作为主放大光纤,获得了 60 kHz 重频下平均功率 761 W、单脉冲能量 12.6 mJ、脉宽 350 ns 的脉冲输出,但功率扩展受限于光纤的高温;在重频 30 kHz 下,实现了平均功率 526 W、单脉冲能量 17.5 mJ、脉宽 210 ns 的激光输出,但是功率扩展受限于 1030 nm 的寄生振荡^[62]。该团队在 2021 年将主放大级泵浦波长由 975 nm 改为 915 nm,对寄生振荡和光纤温度进行了改善,其结构如图 13 所示,实现了平均功率 1000 W、单脉冲能量 16.7 mJ、脉宽 260 ns 的激光输出^[63],该平

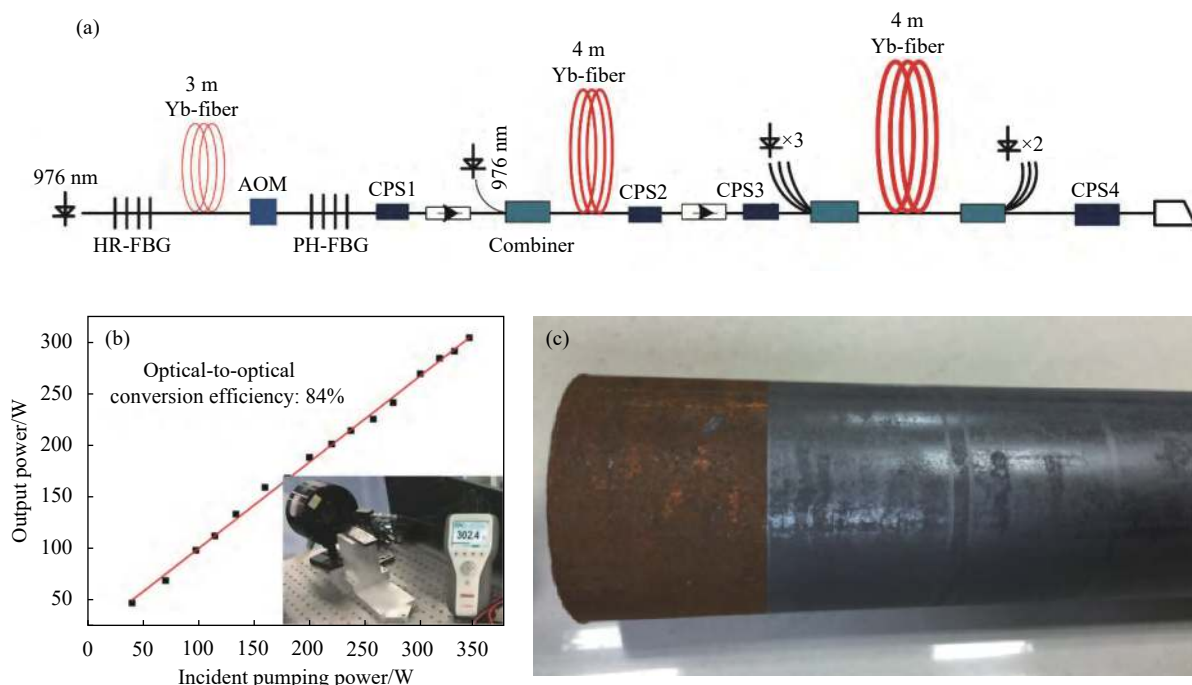


图 12 光纤放大器输出特性。(a) 300 W 放大器结构;(b) 平均功率随泵浦功率变化曲线;(c) 激光除锈效果展示^[61]

Fig.12 Output characteristics of fiber amplifier. (a) Amplifier construction with an average power of 300 W; (b) Curve of average power vs. pump power; (c) Display of laser cleaning^[61]

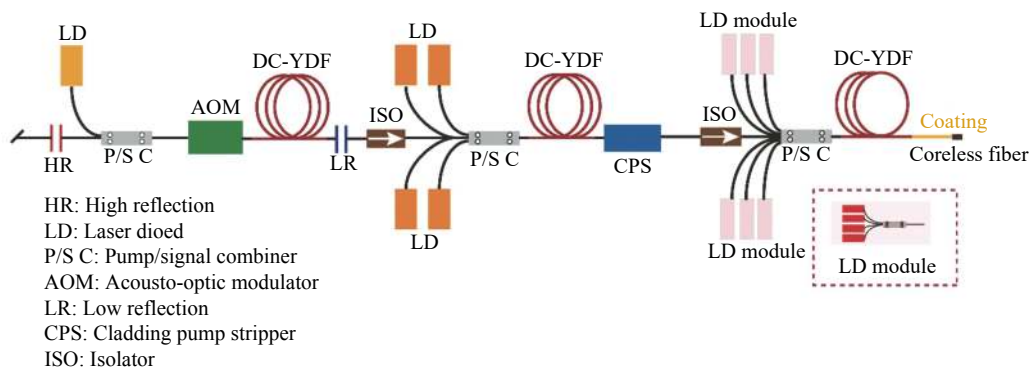


图 13 千瓦级全光纤激光系统^[63]

Fig.13 1000 W all-fiber laser system^[63]

均功率是目前国内实现的纳秒量级全光纤激光放大器的最高指标。

表 2 展示了近十年来全光纤纳秒激光放大器的研究进展。随着高功率半导体激光器和大模场、超大模场面积光纤的发展,全光纤纳秒激光放大器已经实现了单纤百毫焦级、平均功率千瓦级的输出,在峰值功率上更是出现了单纤兆瓦级输出,脉宽范围也跨越了亚纳秒到百纳秒量级。但这些激光器中高平均功率输出常常伴随较低的单脉冲能量或较低的峰值功率,大脉冲能量的输出常常伴随着较低的平均功率,难以实现集高平均功率、大脉冲能量和高峰值功率一体的高指标输出,而激光清洗这类应用常需要高平均功率来提高清洗效率,又需要较大的脉冲能量来达到加工阈值,因此发展同时具备高功率、大能量的纳秒激光脉冲具有实际的应用价值。SRS 等非线性效应及 TMI 等热效应是限制集高平均功率、大脉冲能量、

高峰值功率一体的纳秒全光纤激光放大器发展的主要因素。在抑制 SRS 等非线性效应的技术层面,最直接的方式是通过使用短的大芯径高掺杂增益光纤,但较大的模场面积又将导致 TMI 的出现。因此,针对这些非线性效应及热效应的抑制发展了更为独特的手段:(1) 利用光谱选择性光纤(如特殊设计的 3 C 光纤或 W 型光纤)滤除 SRS 产生的斯托克斯光,以及利用长周期光纤光栅 (LPFG) 或啁啾倾斜光纤光栅 (CTFBG) 等滤波器件对斯托克斯光形成高损耗,来实现 SRS 抑制^[64-67]; (2) 通过声光剪裁或特种光纤(如锥形光纤)改变布里渊频移来降低布里渊增益峰值,以及采用相位调制技术展宽种子光线宽等方式实现 SBS 效应的抑制^[68-71]; (3) 通过声光偏转器或光子灯笼等器件改变种子光中的模式激发,以及采用特种光纤(3 C 光纤,大间距微结构光纤等)保证单模激光运行等技术手段来抑制 TMI^[72-75]。然而,这些抑制技术研

表 2 全光纤纳秒脉冲激光放大器研究进展

Tab.2 Research progress of all-fiber nanosecond pulse laser amplifier

Year ^[Ref.]	Active fiber	Average power	Pulse duration	Repetition rate	Pulse energy	Peak power
2010 ^[76]	$D_{core}=20\ \mu\text{m}$	21.07 W	100 ns	200 kHz	0.1 mJ	1 kW
2012 ^[77]	$D_{core}=30\ \mu\text{m}$	300.8 W	8 ns	10 MHz	30 μJ	3.75 kW
2012 ^[53]	$D_{core}=30\ \mu\text{m}$	505 W	6 ns	10 MHz	50.5 μJ	7.9 kW
2013 ^[50]	$D_{core}=200\ \mu\text{m}$	0.62 W	12 ns	20 Hz	31 mJ	2.58 MW
2013 ^[78]	$D_{core}=30\ \mu\text{m}$	102 W	14.9 ns	100 kHz	1.02 mJ	68 kW
2013 ^[57]	$D_{core}=50\ \mu\text{m}$	265 W	500 ns	25 kHz	10.6 mJ	21.2 kW
2014 ^[79]	$D_{core}=30\ \mu\text{m}$	25.3 W	0.223 ns	100 MHz	0.253 μJ	1.13 kW
2014 ^[54]	$D_{core}=30\ \mu\text{m}$	913 W	3 ns	10 MHz	91.3 μJ	28.6 kW
2014 ^[58]	$D_{core}=300\ \mu\text{m}$	400 W	12 ns	10 kHz	40 mJ	3.5 MW
2014 ^[49]	$D_{core}=50\ \mu\text{m}$	23 W	3 ns	10 kHz	2.3 mJ	697 kW
2014 ^[52]	$D_{core}=30\ \mu\text{m}$	120 W	0.62 ns	26.3 MHz	4.56 μJ	7.35 kW
2015 ^[55]	—	293 W	3.5 ns	20 MHz	14.65 μJ	3.9 kW
2015 ^[56]	$D_{core}=30\ \mu\text{m}$	608 W	0.81 ns	10 MHz	60.8 μJ	128 kW
2016 ^[60]	$D_{core}=20\ \mu\text{m}$	188 W	101 ns	40 kHz	4.5 mJ	46.5 kW
2017 ^[59]	—	1 500 W	90 ns	10 kHz	150 mJ	1.7 MW
		1 150 W	30 ns	10 kHz	115 mJ	3.5 MW
2018 ^[61]	$D_{core}=30\ \mu\text{m}$	302 W	203 ns	100 kHz	3 mJ	15 kW
2018 ^[80]	$D_{core}=25\ \mu\text{m}$	189 W	250 ns	200 kHz	0.95 mJ	3.8 kW
2018 ^[27]	$D_{core}=30\ \mu\text{m}$	466 W	4 ns	10 MHz	46.6 μJ	8.8 kW
2019 ^[62]	$D_{core}=100\ \mu\text{m}$	526 W	150 ns	30 kHz	17.5 mJ	116 kW
		761 W	280 ns	60 kHz	12.6 mJ	45 kW
2021 ^[63]	$D_{core}=100\ \mu\text{m}$	1 000 W	260 ns	60 kHz	16.7 mJ	64 kW

究大多在连续光纤激光中,在纳秒脉冲方向的可行性仍有待考量。

3 总结和展望

光纤器件、半导体泵浦源的发展,以及新奇的技术理念不断推动着全光纤激光技术的进步,促进着纳秒脉冲全光纤激光器功率、能量的提升,为诸多领域的进步开辟了新的道路。在全光纤纳秒脉冲振荡器方面,调 Q 技术和增益开关技术是产生纳秒脉冲的主要方案,已经能实现十纳秒到百纳秒量级脉冲的瓦级输出,可作为全光纤纳秒脉冲激光放大器的种子源。但目前用于纳秒脉冲激光放大器的种子源输出指标较低,常需要多级放大才可实现近千瓦级或几十毫焦级的脉冲输出,其结构较为复杂。在未来研究中,发展性能稳定的高指标种子可以为优化放大器结构做出巨大贡献。目前,采用掺杂稀土元素的光纤作为可饱和吸收体结合复合腔进行波长转换,并利用外腔对信号放大可实现高指标的纳秒脉冲,但其稳定性和重频可控需要进一步研究,例如将主被动调 Q 技术结合实现高指标、重频可调的窄脉冲输出。全光纤振荡器高指标输出还受限于 AOM、波分复用器(WDM)、光栅等器件的损伤阈值,因此发展具备高功率、大能量承受能力的全光纤器件也是提升纳秒脉冲全光纤振荡器输出性能的重要方向。

在全光纤纳秒激光放大器方面,已经实现了百毫焦级脉冲能量、千瓦级平均功率输出,但由于 SBS、SRS 以及 TMI 的限制,使得同时具备高平均功率、大脉冲能量和高峰值功率特性的全光纤纳秒激光器发展受到阻碍。而现存的诸多抑制方案大多在连续激光器中研究,其损伤阈值尚不能承受纳秒脉冲激光的高峰值功率,因此许多抑制器件只能适用于低功率或低能量的纳秒脉冲放大级,使进入主放大级的信号无法得到较大的优化,从而限制输出性能的提升;一些特种光纤可以在抑制非线性效应的同时实现高指标输出,如光子晶体光纤,但其熔接难度大,适合空间耦合,这又丢失了全光纤结构的紧凑性。因此,发展适用于全光纤纳秒脉冲放大器的非线性抑制技术是推进其性能扩展的重要方向。近年来发展的 3 C 光纤、锥形光纤等可熔接性强,对非线性效应也具有较好的抑制作用,为未来实现集高平均功率、大脉冲能量、

高峰值功率一体的纳秒脉冲全光纤激光器打下了坚实的基础。纳秒脉冲全光纤掺镱激光器的研究将在未来持续性创新和发展,推动激光清洗等工业加工领域的迅猛发展。

参考文献:

- [1] Shi W, Schulzgen A, Amezcua R, et al. Fiber lasers and their applications: Introduction [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): FLA1.
- [2] Harun S W, Alam S U, Kurkov A S, et al. Introduction to the issue on fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 3.
- [3] Clery D. Physics laser fusion, with a difference [J]. *Science*, 2015, 347(6218): 111-112.
- [4] Zheng Y, Yang Y F, Wang J H, et al. 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12063-12071.
- [5] Han J H, Cui X D, Wang S, et al. Laser effects based optimal laser parameter identifications for paint removal from metal substrate at 1064 nm: A multi-pulse model [J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(19): 1947-1959.
- [6] Chen Y M, Zhou L Z, Yan F, et al. Mechanism and quality evaluation of laser cleaning of aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1202005. (in Chinese)
- [7] Pask H M, Hanna D C. Operation of cladding-pumped Yb³⁺-doped silica fibre lasers in 1 μm region [J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(11): 863-865.
- [8] Limpert J, Hofer S, Liem A, et al. 100-W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier [J]. *Applied Physics B*, 2002, 75(4-5): 477-479.
- [9] Cheng M Y, Chang Y C, Galvanauskas A, et al. High-energy and high-peak-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200- μm core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(4): 358-360.
- [10] Fabio D T, Brooks C D. Multistage Yb-doped fiber amplifier generating megawatt peak-power, subnanosecond pulses [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(24): 3299-3301.
- [11] Fabio D T, Brooks C D. Multi-MW peak power, single transverse mode operation of a 100 micron core diameter, Yb-doped photonic crystal rod amplifier[C]//Proceedings of the 4th Conference on Fiber Laser-Technology, Systems, and Applications, 2007: 6453.
- [12] Li W X, Hao Q, Yan M, et al. Tunable flat-top nanosecond fiber

- laser oscillator and 280 W average power nanosecond Yb-doped fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2009, 17(12): 10113-10118.
- [13] IPG Photonics. YLPN-S 25×100 ns,1-3 kW[DB/OL]. [2022-01-17]<http://www.ipgphotonics.com/en/products/laser/nanosecond-fiber-lasers/1-06-micron/ylpn-s>.
- [14] Raycus. RFL-P2000[DB/OL]. [2022-01-17]<http://www.raycuslaser.com/view/1792.html>.
- [15] Lecourt J B, Bertrand A, Hernandez Y, et al. Short pulse and high repetition rate actively Q-switched all-in-fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(5): 365-U5478.
- [16] Ji X, Wang X L, Zhou P. Supercontinuum source using Q-switched all-fiber nanosecond pulsed laser based on acousto-optical modulation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(1): 119-122. (in Chinese)
- [17] Yang W Q, Zhang B, Hou J, et al. Gain-switched and mode-locked 2 μm Tm/Ho-codoped fiber laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11): 2521-2522. (in Chinese)
- [18] Chen P F, Wu B, Wang H Y, et al. Experimental study of gain-switched high repetition rate pulse fiber laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(4): 109-113. (in Chinese)
- [19] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, et al. The Principles of Laser[M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 222-223. (in Chinese)
- [20] Zenteno L A, Snitzer E, Po H, et al. Gain switching of a Nd³⁺-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(13): 671-673.
- [21] Larsen C, Hansen K P, Mattsson K E, et al. The all-fiber cladding-pumped Yb-doped gain-switched laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1490-1499.
- [22] Wang J H, Cui S Z, Si L, et al. All-fiber single-mode actively Q-switched laser at 1120 nm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 289-294.
- [23] Fang Q, Shi W, Tian X P. 978 nm single frequency actively Q-switched all fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(9): 874-876.
- [24] Yao B, Zhang D, Zhang J, et al. Narrow-bandwidth actively Q-switched all-fiber laser by suppressing ASE gain self-saturation [J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 27345-27353.
- [25] Li C, Zhao W J, Han Y P. Narrow-linewidth linearly polarized nanosecond pulsed all-fiber amplifier with 75 kW peak power [J]. *Optik*, 2019, 185: 183-190.
- [26] Huang L, Ma P F, Su R T, et al. Comprehensive investigation on the power scaling of a tapered Yb-doped fiber-based monolithic linearly polarized high-peak-power near-transform-limited nanosecond fiber laser [J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 761-782.
- [27] Huang L, Ma P F, Meng D R, et al. Monolithic high-average-power linearly polarized nanosecond pulsed fiber laser with near-diffraction-limited beam quality [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: 8.
- [28] Liu J, Wu S D, Yang Q H, et al. Stable nanosecond pulse generation from a graphene-based passively Q-switched Yb-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 4008-4010.
- [29] Moore S W, Soh D B S, Bisson S E, et al. 400 μJ 79 ns amplified pulses from a Q-switched fiber laser using an Yb³⁺-doped fiber saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23778-23789.
- [30] Lu Y, Gu X J. All-fiber passively Q-switched fiber laser with a Sm-doped fiber saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1997-2002.
- [31] Tao M M, Feng G B, Luan K P, et al. Modeling of a pulsed, single cavity Yb-Bi fiber laser taking mode field area mismatch into consideration [J]. *Laser Physics*, 2019, 29(3): 035101.
- [32] Dussardier B, Maria J, Peterka P. Passively Q-switched ytterbium- and chromium-doped all-fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(25): E20-E23.
- [33] Yang S, Yang Y Y, Zhang L, et al. Alternated Q-switched and gain-switched dual-pulse Yb fiber laser with Tm-Ho co-doped fiber as saturable absorber [J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 113: 159-163.
- [34] Soh D B S, Bisson S E, Patterson B D, et al. High-power all-fiber passively Q-switched laser using a doped fiber as a saturable absorber: Numerical simulations [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2536-2538.
- [35] Lu Y, Gu X J. Kilowatt peak power pulses from a passively Q-switched Yb-doped fiber laser with a smaller-core Yb-doped fiber as a saturable absorber [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(3): 7.
- [36] Zhou J Q, Lu Y, He B, et al. Q-switched laser in an SMS cavity for inhibiting nonlinear effects [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(19): 6080-6084.
- [37] Dvoyrin V V. Pulsed fiber laser with cross-modulation of laser cavities[C]//Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2012.
- [38] Jin D C, Sun R Y, Shi H X, et al. Stable passively Q-switched and gain-switched Yb-doped all-fiber laser based on a dual-cavity with fiber Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26027-26033.
- [39] Jin D C, Sun R Y, Wei S Y, et al. Nanosecond Yb-doped monolithic dual-cavity laser oscillator with large core fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(14): 1477-1480.

- [40] Agrez V, Petkovsek R. Highly adaptable gain-switched fiber laser with improved efficiency [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 121100-121109.
- [41] Hao H Y, Li L, Yang Y T. Experimental research on multi-peak phenomenon of acousto-optic Q-switched fiber laser output pulse [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0601005. (in Chinese)
- [42] Tsai T Y, Fang Y C, Huang H M, et al. Saturable absorber Q- and gain-switched all-Yb³⁺ all-fiber laser at 976 and 1064 nm [J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 23523-23528.
- [43] Kobayakov A, Sauer M, Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, 2(1): 1-59.
- [44] Jauregui C, Limpert J, Tunnermann A. High-power fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [45] Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse mode instability [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(2): 429-484.
- [46] Wirth C, Schreiber T, Rekas M, et al. High-power linear-polarized narrow linewidth photonic crystal fiber amplifier[C]//Proceedings of the 7 th Conference on Fiber Lasers - Technology, Systems, and Applications, 2010: 7580.
- [47] Eidam T, Wirth C, Jauregui C, et al. Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13218-13224.
- [48] Yang B L, Zhang H W, Shi C, et al. Mitigating transverse mode instability in all-fiber laser oscillator and scaling power up to 2.5 kW employing bidirectional-pump scheme [J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27828-27835.
- [49] Fang Q, Shi W, Fan J L. 700-kW-peak-power monolithic nanosecond pulsed fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(16): 1676-1678.
- [50] Zheng C, Gong M L, Zhang H T, et al. All-fiber high energy and peak power broadband Yb-doped fiber amplifier [J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(5): 052201.
- [51] Shen X L, Zhang H T, Gong M L. High energy (100 mJ) and high peak power (8 MW) nanosecond pulses delivered by fiber lasers and self-focusing analysis based on a novel mode decomposition method [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 0901306.
- [52] Chi J J, Li P X, Hu H, et al. 120 W subnanosecond ytterbium-doped double clad fiber amplifier and its application in supercontinuum generation [J]. *Laser Physics*, 2014, 24(8): 085103.
- [53] Su R T, Wang X L, Zhou P, et al. All-fiberized master oscillator power amplifier structured narrow-linewidth nanosecond pulsed laser with 505 W average power [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(1): 015105.
- [54] Su R T, Zhou P, Wang X L, et al. Kilowatt high average power narrow-linewidth nanosecond all-fiber laser [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2014, 2: e3.
- [55] Ran Y, Su R T, Ma P F, et al. 293 W, GHz narrow-linewidth, polarization maintaining nanosecond fiber amplifier with SBS suppression employing simultaneous phase and intensity modulation [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25896-25905.
- [56] Ma P F, Tao R M, Huang L, et al. 608 W average power picosecond all fiber polarization-maintained amplifier with narrow-band and near-diffraction-limited beam quality [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(7): 075501.
- [57] Malinowski A, Gorman P, Codemard C A, et al. High-peak-power, high-energy, high-average-power pulsed fiber laser system with versatile pulse duration and shape [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4686-4689.
- [58] Dinger R, Grundmann F P, Hapke C, et al. High peak- and average-power, pulse shaped fiber laser in the ns-regime applying step-index XLMA gain fibers[C]//Proceedings of the Conference on Fiber Lasers XI - Technology, Systems, and Applications, 2014: 8961.
- [59] Dinger R, Grundmann F P, Hapke C, et al. Short-pulse MOPA fiber laser with kilowatt average power and multi-megawatt peak power, applying advanced XLMA fiber amplifiers[C]//Proceedings of the Conference on Fiber Lasers XIV - Technology and Systems, 2017: 10083.
- [60] Li Z B, Guo C, Li Q, et al. 188 W nanosecond pulsed fiber amplifier at 1064 nm [J]. *Laser Physics*, 2016, 26(7): 075103.
- [61] Li P, Shi H X, Fu C. High power nanosecond pulsed ytterbium-doped fiber laser for laser cleaning [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 121406. (in Chinese)
- [62] Wang S J, Zhang Z L, Cao C. Nanosecond pulse laser output with average power of 761 W and pulse energy of 17.5 mJ based on domestic fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1215002. (in Chinese)
- [63] Wang S J, Cai Y M, Zhang Z L, et al. 1000 W nanosecond pulsed laser output based on homemade 100 μm/400 μm fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0115001. (in Chinese)
- [64] Kim J, Dupriez P, Codemard C, et al. Suppression of stimulated Raman scattering in a high power Yb-doped fiber amplifier using a W-type core with fundamental mode cut-off [J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5103-5113.
- [65] Hu Q H, Zhao X F, Tian X, et al. Raman suppression in high-

- power fiber laser oscillator by long period fiber grating [J]. *Results in Physics*, 2021, 26: 104460.
- [66] Hu Q H, Zhao X F, Tian X, et al. Stimulated raman scattering filters based on long period fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1806003. (in Chinese)
- [67] Song H Q, Yan D L, Wu W J, et al. SRS suppression in multi-kW fiber lasers with a multiplexed CTFBG [J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 20535-20544.
- [68] Nagel J, Temyanko V, Likhachev M E, et al. Experimental investigation of Silicate-Glass-Based Raman gain fibers with enhanced SBS suppression by selective transverse doping [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(3): 928-942.
- [69] Filippov V, Chamorovskii Y, Kerttula J, et al. Double clad tapered fiber for high power applications [J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 1929-1944.
- [70] Yang Y F, Li B L, Liu M Z, et al. Optimization and visualization of phase modulation with filtered and amplified maximal-length sequence for SBS suppression in a short fiber system: a theoretical treatment [J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 16781-16803.
- [71] Lai W C, Ma P F, Liu W, et al. Seeding high brightness fiber amplifiers with multi-phase coded signal modulation for SBS effect management [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 127682-127689.
- [72] Otto H-J, Jauregui C, Stutzki F, et al. Controlling mode instabilities by dynamic mode excitation with an acousto-optic deflector [J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 17285-17298.
- [73] Montoya J, Hwang C, Martz D, et al. Photonic lantern kW-class fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27543-27550.
- [74] Limpert J, Stutzki F, Jansen F, et al. Yb-doped large-pitch fibres: effective single-mode operation based on higher-order mode delocalisation [J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1: e8.
- [75] Ma X Q, Zhu C, Hu I N, et al. Single-mode chirally-coupled-core fibers with larger than 50 μm diameter cores [J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9206-9219.
- [76] Zhou J, Yan P, Yin S P, et al. All-fiber cascaded ytterbium-doped nanosecond pulsed amplifier [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(5): 457-459.
- [77] Su R T, Zhou P, Wang X L, et al. Single-frequency nanosecond pulsed laser with output power of 300 W in all-fiber format [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(5): 1009-1010. (in Chinese)
- [78] Zhang K, Zhang D Y, Li Y, et al. A 100 W all fiber nanosecond linearly polarized ytterbium-doped fiber amplifier [J]. *Laser Physics*, 2013, 23(9): 095110.
- [79] Zhu C, Wang X F, Zhang K, et al. Experimental study of high power pulse fiber laser based on gain-switched LD [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(2): 145-148. (in Chinese)
- [80] Yao W, Fan Z, Zhang X H. High power nanosecond pulse ytterbium doped fiber laser based on semiconductor laser modulation technology[C]//Proceedings of the Asia Communications and Photonics Conference (ACP), 2018.