

高重频全固态掺镱飞秒激光放大器研究进展

白川¹, 田文龙¹, 王阁阳¹, 郑立¹, 徐瑞¹, 张大成¹, 王兆华², 朱江峰^{1*}, 魏志义²

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

²中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190

摘要 高重频全固态掺镱飞秒激光放大器在工业超快非热微加工、极紫外光学频率梳、高通量高次谐波产生、角分辨电子动量谱等领域有着重要的作用。首先总结了高重复频率飞秒激光放大面临的增益介质热管理和增益窄化效应等关键技术瓶颈, 并对近年来不同掺镱晶体全固态再生放大和行波放大技术的参数特点、适用范围及研究进展进行了梳理。最后展望了基于新型掺镱激光介质的全固态高功率飞秒激光放大器。

关键词 激光光学; 高重复频率; 再生放大器; 行波放大器; 掺镱激光介质

中图分类号 TN216

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0501005

1 引言

1985 年, Gerard Mourou 和 Donna Strickland 发明的啁啾脉冲放大(CPA)技术^[1]为飞秒激光能量的提升提供了可靠的思路, 两人也因此获得 2018 年诺贝尔物理学奖。结合 CPA 技术, 钛宝石飞秒放大器得到了十足的发展, 输出脉冲能量达到焦耳量级, 峰值功率可到拍瓦量级, 在阿秒科学及强场物理等领域获得广泛应用。例如, 具有周期量级脉宽的飞秒钛宝石激光与惰性气体相互作用, 已产生小于 100 as 的脉冲^[2-3]。同时, kHz 量级重复频率、mJ 量级能量的飞秒钛宝石激光系统驱动高温高密等离子体, 获得了强度高达千特斯拉(kT)量级、自组织放大的强磁场阵列^[4]。然而, 由于钛宝石激光系统泵浦功率、热管理及上能级寿命的限制, 平均功率的提升十分困难, 重复频率也被限制在 1~20 kHz, 使得钛宝石激光系统在 XUV 光学频率梳^[5]、角分辨电子动量谱仪(ARPES)^[6]、光发射电子显微镜(PEEM)^[7]、高通量高次谐波产生^[8]等领域的应用受到一定的限制。

近年来, 出现的二极管泵浦掺镱离子(Yb³⁺)的

全固态飞秒激光器为高功率高重复频率超短脉冲激光的产生开辟了新的路径。Yb³⁺ 作为能级较简单的激活离子, 理论上不存在激发态吸收和上转换过程; 因其 940~980 nm 的吸收波长与砷化镓(InGaAs)激光二极管(LD)发射波长相匹配, 不仅可以极大地降低成本, 而且可保证足够的泵浦功率; 高达 95% 的量子效率和优良的热导率使得 Yb 激光器在高功率输出方面也表现出明显的优势, 基于板条^[9]、薄片^[10]和光纤^[11]等增益介质的激光放大器的平均功率已达到 kW 量级; 除此之外, 在短脉冲方面, 由于 Yb 离子能级分裂产生的发射谱宽可达几十个纳米, 足以支持小于 100 fs 的超短脉冲激光输出^[12-13]。从 20 世纪 90 年代开始, 随着二极管泵浦技术的迅速发展, 掺 Yb 材料的激光放大器逐渐成为高功率固体激光领域的研究热点。

本文将从高重复频率飞秒激光放大器的方法原理出发, 分析实现高重复频率超短脉冲激光的技术挑战; 针对不同的增益介质、放大方式, 对近年来国际上高重频飞秒激光放大器的技术路线和研究进展进行综述; 最后对输出平均功率大于 100 W、脉冲宽度为 fs 量级的全固态放大器进行展望。

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2020-12-06; 录用日期: 2020-12-21

基金项目: 科技部重点研发计划(2016YFB0402105, 2017YFB0405202)、国家自然科学基金(11774277, 61705174)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JCW-03)、中央高校基本科研业务费(JB190501, ZD2006)

*E-mail: jfzhu@xidian.edu.cn

2 高重频再生放大研究

2.1 再生放大技术简介

再生放大器的工作原理如图 1 所示,由具有一个调 Q 电光开关元件的谐振腔构成,用于在种子脉

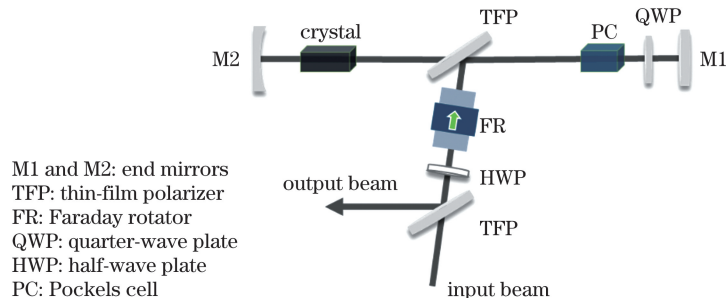


图 1 再生放大器原理图

Fig. 1 Schematic of regenerative amplifier

再生放大器的出现,使得超短脉冲激光的能量得到进一步提升,很低的入射激光能量也能在多次往返放大中实现足够大的增益。但对于高重复频率的再生放大器而言,一方面放大器的重复频率受限于电光开关的开关速度,一般不会超过 2 MHz;另一方面,随着重复频率的提升,脉冲时间间隔缩短,同时受限于普克尔盒高压电源的高压占空比(一般 $<30\%$),为保证种子光脉冲在再生腔中有足够往返次数,高重频再生放大器需要采取短腔设计,因此腔长也是制约重复频率的主要因素。除此之外,过高的重复频率对脉冲的能量萃取提出新的挑战,如 Yb 增益介质的上能级寿命大多大于 $200 \mu\text{s}$ ^[14],在高重复频率下采用连续光泵浦,可能会使抽运阶段没有足够的时间来恢复稳定的反转粒子数,破坏了放大过程所消耗的反转粒子数和抽运阶段增加的反转粒子数之间的平衡,致使相邻再生放大脉冲之间相互影响,出现倍周期分叉现象^[15]。而随着腔内激光能量和连续光泵浦功率的提升,热效应成为限制高功率飞秒放大输出的主要原因,由于材料的折射率随着温度变化而发生变化,在增益介质中按温度梯度分布导致热透镜^[16]和热致双折射^[17]等热积累问题会使再生腔模式发生改变,甚至使再生腔进入不稳定区域,严重影响其输出功率和光束质量。抑制热效应主要有三种途径,一是主动降温来减少热积累^[18],二

冲序列中选出单个脉冲。将单个脉冲注入到该谐振腔内,通过对脉冲进行时域控制和空域模式匹配,放大脉冲在腔内几十次甚至上百次通过激光介质以提取储能,待能量达到最大时从腔内导出,最后得到能量达 μJ 甚至 mJ 量级的放大脉冲。

是增加再生腔的热不敏感性^[19],三是采用相应的手段去补偿热透镜带来的影响^[20]。不仅如此,随着功率的进一步提升,过高的功率密度可能引起介质电离,甚至破坏放大器中的增益介质和光学元件^[21]。

虽然再生放大器可以大幅提升脉冲能量,但是由于在增益带宽内对输入脉冲不同频谱分量的增益不同,输入脉冲光谱在多次增益后有损失,即存在增益窄化效应^[22]。腔内多个色散元件引入的高阶色散也会影响输出脉冲的时域特性,因此为了使最终得到的放大脉冲能够保持与种子脉冲一致的时间质量特性,需要在放大过程中对种子脉冲的频谱、光谱相位及各阶啁啾进行精确的控制。其中光谱整形、腔内插入双折射滤波片及非线性放大技术等是补偿增益窄化效应的有效手段。

增益介质特性、腔型结构、热效应、器件性能等诸多方面都会影响放大器的输出特性,其中增益介质特性是主要因素,基于不同增益介质的再生放大器在结构和功能上都会有较大的差异。Yb 飞秒放大器中常用的增益晶体有 Yb:YAG^[23]、Yb:KGW/Yb:KYW^[24-25]、Yb:CaF₂^[26]以及 Yb:CALGO(Yb:CGA)^[27]等,基本参数如表 1 所示,其中 τ 为上能级寿命、 $\sigma_{a,p}$ 为泵浦光吸收截面、 $\sigma_{e,l}$ 为激光发射截面、 $\Delta\lambda$ 为增益带宽、 K 为热导率。

表 1 Yb 掺杂激光材料的基本性质
Table 1 Basic properties of Yb-doped laser materials

Laser material	$\tau / \mu\text{s}$	$\sigma_{a,p} / (10^{-20} \cdot \text{cm}^2)$	$\sigma_{e,l} / (10^{-20} \cdot \text{cm}^2)$	$\Delta\lambda / \text{nm}$	$K / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Yb : YAG ^[23]	951	0.75	2.1	10–11	5.7
Yb : KGW ^[24]	~600	12	2.8	20	3.3
Yb : KYW(n_m) ^[25]	600	13.3	3.0	16	3.3
Yb : CaF ₂ ^[26]	2400	0.54	0.25	70	9.7
Yb : CALGO ^[27]	420	1.0(a)	0.75(a)	80	6.3

2.2 基于 Yb : YAG 的再生放大研究

Yb : YAG, 分子式为 $\text{Yb}_{3,x} : \text{Y}_{3-3,x} \text{Al}_5 \text{O}_{12}$, 属立方晶系。在 940 nm 和 969 nm 处具有较强的吸收谱线, 其中 940 nm 处吸收截面最大, 且该波长处的吸收带宽高达 18 nm, 因此激光二极管不需要复杂的控温系统。此外, Yb : YAG 拥有 $5.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的热导率和 951 μs 的上能级粒子数寿命, 非常容易产生高功率激光脉冲。在重复频率为 100 kHz 的情况下, 基于块状 Yb : YAG 晶体的再生放大器于 2008 年和 2013 年分别实现了平均功率达 10 W 和 20 W 的高重频激光再生放大输出^[18]。

然而传统块状结构的晶体热管理困难, 限制了其平均功率进一步的提升。为了获得更高的平均功率, 人们发展了散热性能更加优越的薄片激光技术^[28], 其热管理如图 2 所示。薄片激光器的增益介质厚度通常只有 100~400 μm , 大的体表比可以有效促进介质的散热, 且在激光提取过程中, 激光传播方向与温度梯度方向重合, 则在一阶近似的条件下, 光束波前不会受到温度梯度的影响, 从而保证了在高重复频率下的高单脉冲能量^[29]。

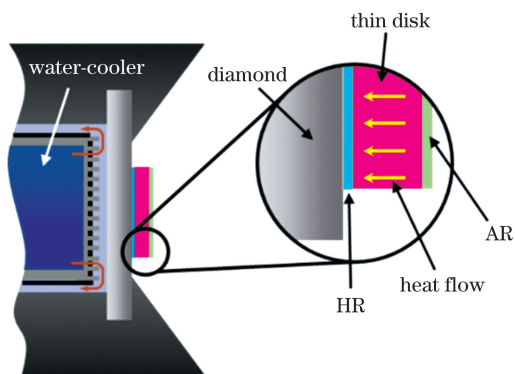


图 2 薄片散热示意图

Fig. 2 Heat dissipation schematic of thin disk

2009 年, Metzger 等^[30]使用 Yb : YAG 薄片作为增益介质, 采用 20 程泵浦结构, 实现了平均功率为 75 W、重复频率为 3 kHz、单脉冲能量为 25 mJ、脉冲宽度为 1.6 ps 的激光脉冲输出。由于脉冲的

重复周期(333 μs)小于材料荧光寿命(951 μs), 每次放大后上能级粒子数未能恢复, 放大过程中出现了倍周期分叉效应^[15], 严重影响放大脉冲的稳定性。但 2007 年, Grishin 等^[31]已通过理论模拟和实验验证了种子光脉冲能量、小信号增益是影响倍周期分叉现象的主要因素, 故 Metzger 等^[30]在实验中加入光纤放大器作为预放大级, 提高种子能量, 并对泵浦功率进行调节, 从而改变小信号增益, 最终脉冲能量的波动低于 0.7%。2015 年, Smrz 等^[32]引入基于啁啾体布拉格光栅(CVBG)的展宽压缩装置, 种子光经 CVBG 展宽至 150 ps 后注入到基于 Yb : YAG 晶体的薄片再生放大器中, 随后经 CVBG 压缩得到平均功率为 95 W、重复频率为 100 kHz、单脉冲能量为 0.95 mJ、脉冲宽度为 1.9 ps 的高重频激光脉冲输出。2019 年, Krötz 等^[33]利用双薄片的 Yb : YAG 晶体环形再生放大器, 获得了重复频率为 20 kHz、平均功率为 1.9 kW 的高功率激光放大输出。虽然基于 Yb : YAG 薄片的再生放大器在高功率输出方面表现优秀, 但其发射带宽仅仅~10 nm, 由于增益窄化效应的影响, 很难直接获得亚皮秒的超短脉冲输出。缓解增益窄化效应的一种有效手段是采用非线性放大方式, 即控制脉冲啁啾、自相位调制和色散的相互作用, 随着放大过程中能量的提升, 自相位调制渐渐抵消增益窄化效应, 并最终占主导地位, 经放大光谱将得到一定程度的展宽^[34-35]。2015 年, Pouysegur 等^[35]报道了基于 Yb : YAG 薄片的非线性再生放大器, 实现了脉冲宽度为 300 fs、重复频率为 100 kHz、平均功率为 36 W 的高功率飞秒激光输出。2016 年, Ueffing 等^[36]将单脉冲能量为 0.8 nJ、脉冲宽度为 106 fs 的种子脉冲展宽至 2 ps, 并注入到基于 Yb : YAG 薄片的再生放大器中, 利用非线性放大技术, 通过 30 片啁啾镜补偿自相位调制引入的额外啁啾量, 最终获得平均功率为 200 W、重复频率为 100 kHz、单脉冲能量为 2 mJ、脉冲宽度为 210 fs 的高重频飞秒激光输出。

2.3 基于 Yb: KGW/Yb: KYW 的再生放大研究

Yb: KGW/Yb: KYW, 即 Yb: KGd(WO₄)₂ 与 Yb: KY(WO₄)₂ 晶体具有高达 2.8×10^{-20} cm² 与 3.0×10^{-20} cm² 的增益截面、50 GW/cm² 的损伤阈值及 ~18 nm 的增益光谱带宽^[23-24], 适合实现大能量 (>1 mJ)、短脉冲宽度 (<200 fs) 的飞秒激光放大, 但如果不对增益窄化效应进行抑制, 脉冲宽度往往限制在 300 fs 以上^[37-39]。除非线性放大技术外, 对种子光进行光谱整形是抑制增益窄化效应的另一种方法^[40]。比如, 利用 Yb: KGW 与 Yb: KYW 晶体不同光轴发射光谱范围不同的特性, 通过两块轴向正交放置的 Yb: KGW 或 Yb: KYW 晶体, 增益谱峰值交叉, 可以有效抑制放大过程中的增益窄化效应^[41]。2007 年, Stučinskas 等^[42] 采用基于双 Yb: KGW 晶体的再生腔, 每块晶体由 2 个平均功率为 50 W 的 LD 泵浦, 在 100 kHz 重复频率下获得平均功率为 30 W 的激光放大输出, 同时光谱宽度为 5.4 nm, 对应小于 300 fs 的脉冲宽度。2013 年, Kim 等^[43] 将平均功率为 1.6 W、脉冲宽度为 100 fs、重复频率为 76 MHz 的种子脉冲展宽后注入到基于 2 块不同切割方向的 5% 掺杂的 Yb: KGW 晶体的再生放大腔中, 压缩后获得重复频率为 500 kHz、单脉冲能量为 15 μJ、脉冲宽度为 267 fs 的高重复频率激光输出。同年, 他们^[44] 将脉冲宽度为 110 fs、单脉冲能量为 10 nJ、光谱宽度为 9 nm 的种子源展宽, 并使用干涉滤波器进行光谱整形后, 注入到基于双 Yb: KYW 晶体的再生放大器中, 获得了重复频率为 500 kHz、单脉冲能量为 17.4 μJ、脉冲宽度为 182 fs 的高重复频率超短脉冲输出。2014 年, Calendron 等^[45] 使用 2 块 Yb: KYW 作为增益介质, 获得了中心波长为 1021~1033 nm、重复频率为 1 kHz、单脉冲能量为 4.7 mJ 的大能量激光脉冲, 因为更高的脉冲能量对应更大的小信号增益和更多的往返放大次数, 势必导致更强的增益窄化效应, 使得输出脉冲宽度为 650 fs。2020 年, He 等^[46] 使用基于 2 块切向正交放置的 Yb: KGW 双晶体构型再生腔, 获得了重复频率为 1 kHz、单脉冲能量为 1.2 mJ 的激光脉冲, 在获得 mJ 量级能量的同时将脉冲宽度缩短至 227 fs。

2014 年, Pouysegur 等^[34] 利用非线性放大方式将光谱宽度为 10 nm 的种子光注入到基于 Yb: KYW 晶体的薄片再生放大器中, 获得了重复频率为 50 kHz、单脉冲能量为 32 μJ、脉冲宽度为 145 fs、光谱宽度为 14 nm 的高重复频率超短脉冲输出。

2019 年, Yan 等^[47] 对振荡器输出的种子脉冲进行预啾啾处理后, 经再生放大获得重复频率为 60 kHz、单脉冲能量为 21 μJ、脉冲宽度为 270 fs 的高重复频率激光脉冲输出。

2.4 基于 Yb: CaF₂ 的再生放大研究

Yb: CaF₂ 晶体上能级寿命为 2.4 ms, 增益谱宽为 70 nm, 优于绝大部分 Yb 激光增益介质, 在高峰值功率飞秒激光放大领域具有很大潜力。而且在低温条件下, Yb³⁺、Na³⁺ 共掺的 CaF₂ 晶体的吸收截面和发射截面可增加约 3 倍^[48]。2009 年, Pugžlys 等^[49] 将光纤激光器输出的能量为 0.6 nJ 的种子源注入到低温制冷的 Yb, Nd: CaF₂ 晶体再生放大器中, 获得了重复频率为 1 kHz、单脉冲能量为 3 mJ、脉冲宽度为 195 fs、峰值功率为 15 GW 的超短脉冲激光输出。2011 年, Ricaud 等^[50] 将振荡器输出的光谱宽度为 15 nm、中心波长为 1043 nm 的种子光展宽后注入到再生放大腔内, 使用 2.6% 掺杂、5 mm 长的 Yb: CaF₂ 晶体作为增益介质, 在重复频率为 10 kHz 下获得中心波长为 1045 nm、平均功率为 0.6 W、单脉冲能量为 60 μJ、脉冲宽度为 400 fs 的激光放大输出; 在重复频率为 500 Hz 下获得中心波长为 1040 nm、单脉冲能量为 1.4 mJ、脉冲宽度为 178 fs、峰值功率为 7.8 GW 的超短脉冲激光输出。

2014 年, Caracciolo 等^[51] 将平均功率为 650 mW、重复频率为 63 MHz、脉冲宽度为 95 fs 的种子激光展宽至 400 ps, 再注入到基于 Yb: CaF₂ 晶体的再生放大器中, 压缩后获得重复频率为 5 kHz、单脉冲能量为 1 mJ、脉冲宽度为 324 fs、峰值功率为 3 GW 的激光放大输出。2017 年, Sevillano 等^[52] 采用 22 mm 长、1.7% 掺杂的 Yb: CaF₂ 作为增益介质, 同时利用平均功率为 27 W、光束质量 $M^2 = 1.1$ 的光纤激光器作为泵浦源, 以保证长晶体下的模式匹配。将脉冲宽度为 70 fs、平均功率为 1.1 W 的种子激光经选单注入到再生腔中, 最终获得脉冲宽度为 130 fs、重复频率为 5~50 kHz 的超短脉冲输出, 重复频率为 5 kHz 时单脉冲能量可达 1 mJ, 重复频率为 50 kHz 时, 对应的单脉冲能量为 86 μJ。

2.5 基于 Yb: CGA 的再生放大研究

Yb: CALGO (Yb: CGA) 能够同时兼顾优秀热导性质 ($6.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 和宽的增益谱 (~80 nm), 被广泛应用于高功率短脉宽飞秒激光放大器。2013 年, Caracciolo 等^[53] 将振荡器输出的单脉冲能量为 10 nJ、脉冲宽度为 92 fs 的种子脉冲展宽后, 注入到基于 Yb: CGA 晶体的再生放大器

中,获得了平均功率为 36 W 的激光放大,最后经透射光栅压缩后实现平均功率为 28W、重复频率为 500 kHz、单脉冲能量为 56 μ J、脉冲宽度为 217 fs、峰值功率为 258 MW 的高重频超短脉冲激光输出。2017 年,Caracciolo 等^[54]又将振荡器输出的平均功率为 750 mW、单脉冲能量为 4.4 nJ、脉冲宽度为 80 fs 的种子激光展宽后注入到基于 Yb : CGA 的再生放大腔中,通过增益谱峰值与种子光谱的匹配,令脉冲宽度进一步降低,最终获得平均功率为 34 W、重复频率为 500 kHz、脉冲宽度为 140 fs 的

超短脉冲激光输出。

2013 年,Pouysegur 等^[55]使用非线性放大方式,将振荡器输出的脉冲宽度为 165 fs、谱宽为 15 nm 的脉冲展宽至 20 ps,再注入到基于 Yb : CGA 晶体的再生放大器中,实现了重复频率为 50 kHz、单脉冲能量为 24 μ J、脉冲宽度为 97 fs 的超短脉冲激光输出,对应光谱宽度和峰值功率分别为 19 nm 和 218 MW,首次将 Yb 再生放大的脉冲宽度缩短至亚 100 fs,实验装置及放大过程中脉冲演变规律如图 3 所示。

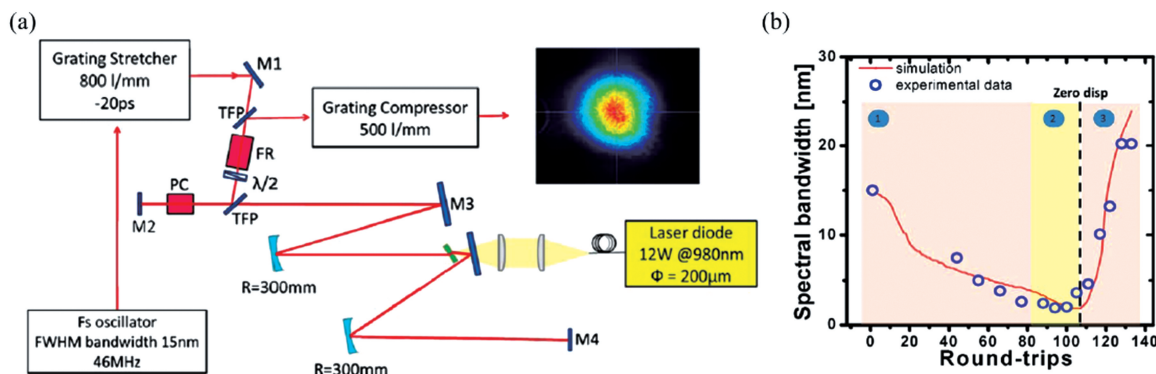


图 3 非线性放大器^[55]。(a)实验装置图;(b)放大过程中脉冲演变规律

Fig. 3 Diagram of nonlinear amplifier^[55]. (a) Experimental equipment; (b) evolution rule of pulse during amplification process

Yb : CGA 晶体在高峰值功率方面也表现出明显的优势。2013 年,Calendron^[56]将振荡器输出的重复频率为 42.5 MHz、脉冲宽度为 210 fs、单脉冲能量为 16 nJ 的种子光展宽后,并搭配 2 根增益光纤保证展宽后的脉冲能量保持在 1 nJ,随后注入到将 2 块 Yb : CGA 作为增益介质的再生放大器中,双晶体设置的再生腔不仅可以分配泵浦光带来的热负荷,同时大大增强了再生腔的热不敏感性,经放大后获得中心波长为 1040 nm、重复频率为 1 kHz、单脉冲能量为 4 mJ、脉冲宽度为 500 fs、峰值功率为 8 GW 的高峰值功率激光输出,图 4 为双晶体再生腔实验装置。

2.6 基于其他 Yb 掺杂晶体的再生放大研究

除了上述几种常用晶体,还有许多 Yb 激光增益介质具有优秀的热光性质,在飞秒振荡器中具有不错的表现。如 Yb : YVO₄ 晶体拥有 $10 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 的增益截面;Yb : CYA 晶体、Yb : SSO(Yb : Sc₂SiO₅) 晶体拥有大于 50 nm 的带宽;Yb : LuAlO₃ 晶体具有 $\sim 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的热导率;Yb : Lu₂O₃ 晶体拥有比 Yb : YAG 更宽的增益带宽,且热导率随掺杂浓度的变化基本不变(未掺杂时为 $12.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,9%掺杂时为 $12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)等,因此科研人员对这些晶体的飞秒激光放大性能也进行了研究。2015 年,Rudnikov 等使用 Yb : YVO₄ 再生放大器,实现了重复频率为 200 kHz、单脉冲能量为 21 μ J、脉冲宽度为 200 fs 的飞秒激光放大^[57];2016 年又报道了基于 Yb : CYA 晶体的再生放大装置,获得重复频率为 200 kHz、平均功率为 4.2 W、脉冲宽度为 310 fs 的 σ 偏振光及重复频率为 200 kHz、平均功率为 2.3 W、脉冲宽度为 190 fs 的 π 偏振光输出^[58];并在 2018 年实现了重复频率为 200 kHz、平均功率为 3 W、脉冲宽度仅为 120 fs 的超短激光脉冲输出^[59];2017 年他们使用基于倍半氧化物 Yb : LuAlO₃ 的

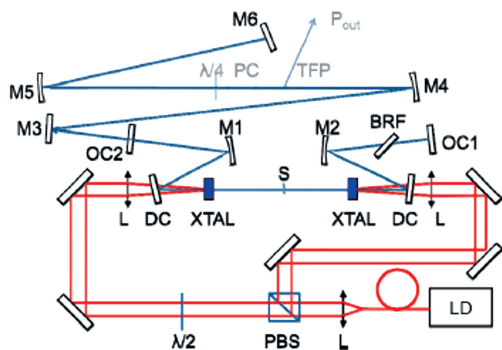


图 4 双晶体再生腔实验装置图^[56]

Fig. 4 Experimental diagram of double crystal regeneration cavity^[56]

再生放大器,在晶体为 c 切时,获得平均功率为 4.5 W、重复频率为 200 kHz、单脉冲能量为 45 μJ 、脉冲宽度为 165 fs 的超短脉冲激光输出^[60]; 2019 年,报道了基于 Yb:YAB 的再生放大器,实现平均功率为 4.6 W、重复频率为 100 kHz、单脉冲能量为 46 μJ 、脉冲宽度为 695 fs 的飞秒激光放大^[61]。2015 年,Pirzio 等^[62]使用基于 Yb:SSO 晶体的再生放大系统,获得重复频率为 500 kHz、单脉冲能量为 3.4 μJ 、脉冲宽度为 296 fs 的超短脉冲激光输出。2016 年,Caracciolo 等^[63]使用基于 Yb:Lu₂O₃ 晶体的再生放大器获得了重复频率为 500 kHz、平均功率为 42 W 的高平均功率输出,压缩后脉冲宽度为 780 fs。2018 年,Huynh 等^[64]使用基于 Yb:YGAG(Y₃Ga₂Al₃O₁₂) 的新型陶瓷获得了重复频率为 100 kHz、单脉冲能量为 8 μJ 、脉冲宽度为 405 fs 的高重频飞秒激光输出。

综合以上再生放大器的研究进展可以看出,虽然

Yb 掺杂激光材料的整体增益截面较低,但是凭借较多的放大次数也可以实现可观的放大结果,将单脉冲能量为 nJ 量级的飞秒脉冲放大至 μJ 甚至 mJ 量级,脉冲能量呈指数型增长,以此可作为飞秒激光功率放大的预放大级。为了提高能量提取效率,获得更高的脉冲能量,通常采用行波放大的方式,此时脉冲能量呈线性增长,可在有限的放大次数中使输出能量得到进一步的提升。另一方面,对于更高重复频率(>2 MHz)的飞秒激光放大,一般也采用行波放大方式。

3 高重频行波放大研究

3.1 行波放大技术简介

与再生放大器不同的是,行波放大器没有谐振腔,根据种子激光经增益介质的次数,可以分为单通、两通、四通甚至八通放大器,其中典型的四通放大光路如图 5 所示,通过改变激光的偏振状态以控制往返次数,从而实现种子激光的有效放大。

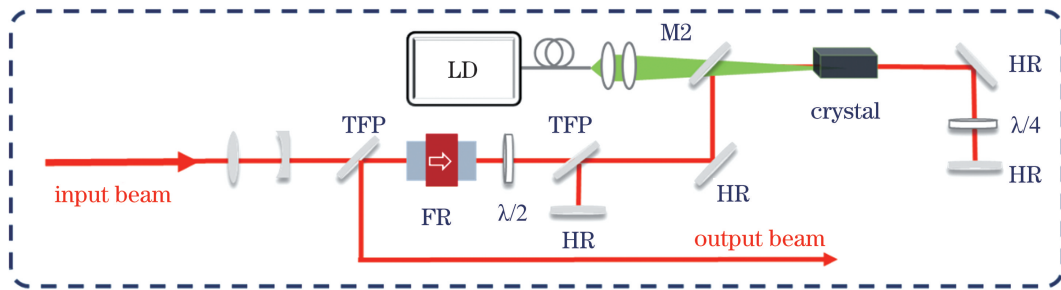


图 5 四通行波放大器原理图

Fig. 5 Schematic of four-pass travelling-wave amplifier

相比钛宝石晶体而言,基于掺 Yb 的新型激光晶体拥有更长的上能级粒子寿命和更大的饱和能流密度,使得 Yb 晶体的储能效率及可达到的能量上限都进一步提升。在高重复频率行波放大器中,增益介质的自激振荡^[65]、自发辐射跃迁^[66]等效应,量子亏损、无辐射跃迁等导致的热积累问题^[16],过高温度导致的光学元件损伤限制了放大器的效率和输出脉冲质量^[67]。其中,高平均功率固体激光器实质上是把低亮度泵浦光束转换成高亮度的激光输出,并由于热力学第二定律的约束伴随着总功率降低及废热的产生,激光增益材料上的热负载决定了材料的热应力极限,从而限制了增益介质的储能,是阻碍激光器输出功率提升的主要因素。因此对于主放大的技术路线,主要以减小输出激光的热光畸变和提高输出激光亮度为目标。

3.2 基于板条、薄片的行波放大研究

基于薄片、板条等晶体特殊的热管理方式,并结

合 CPA 及行波放大的技术是获得高重频高功率激光脉冲的重要手段。板条的激光放大原理如图 6 所示,板条激光器沿激光传播的垂直方向将晶体压缩至毫米数量级,晶体上下表面散热,泵浦光从板条左右两端对增益介质进行抽运,晶体仅在上下表面存在热梯度,通过一定角度将种子光入射至板条内部并沿“之”字形光路传输,使光束在垂直方向上的热效应经不同区域时进行叠加而相互补偿,传输路径中热透镜和热光畸变的影响将大大减小,可大幅度提高激光输出功率和光束质量^[68]。2013 年,Negel 等^[69]使用 Yb:YAG 薄片放大器,获得了重复频率为 800 kHz、平均功率为 1.105 kW、单脉冲能量为 1.38 mJ、脉冲宽度为 7.3 ps 的超短脉冲输出。2010 年 Russbuehdt 等^[70]在室温下使用级联 Yb:YAG 板条放大技术,获得重复频率为 20 MHz、平均功率为 1.1 kW、脉冲宽度为 615 fs 的飞秒激光输出,为得到高功率放大,采用了 7+1 程

的放大结构,放大器结构相对比较复杂。2011 年 Schulz 等^[71]使用 Yb:YAG 板条放大器,获得重复频率为 100 kHz、平均功率为 200 W、脉冲宽度为 830 fs 的飞秒激光输出。然而,受限于薄片较低的单通增益和复杂的多通结构,技术复杂性也大大提

高,相较于薄片激光器,板条激光器在整体结构上颇具优势,但是板条激光器多为侧面泵浦或角泵浦,使得板条在宽度和厚度两方向都存在热梯度,高功率下光束质量会迅速恶化,导致其输出光束质量较难控制^[71]。

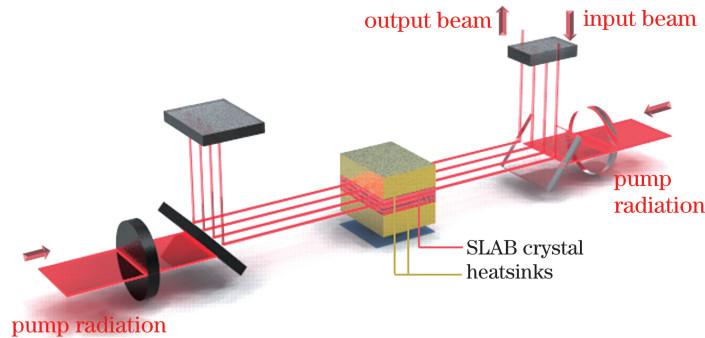


图 6 双端泵浦板条激光技术原理图

Fig 6 Schematic of double-ended pumped slab laser technology

而基于单晶光纤(SCF)和传统块状(棒状)材料的行波放大器因结构简单、模块成熟、不需要额外复杂的整形系统等优势有着良好的发展前景^[72]。目前,基于 Yb 掺杂的行波放大器主要以 Yb:YAG 晶体为主,科研工作者们已经实现了百 kHz 重复频率、mJ 量级能量的高重频超短脉冲激光输出。

3.3 基于单晶光纤的行波放大研究

光纤放大是实现高平均功率高重复频率脉冲激光的另一种方式,随着半导体激光泵浦技术和光纤制造工艺的发展,光纤激光器因良好的热管理能力在高功率方面表现出十足的潜力^[73-75]。但以玻璃光纤作为增益介质的高功率光纤激光器模式不稳定性^[76-77],受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)等非线性效应在一定程度上对其功率的提升提出挑战^[78-79]。SCF 原理如图 7 所示,结合了体块晶体和玻璃光纤的优点,大长径比的外形结构能有效抑制放大中热效应的产生,还同时兼具了块状晶体优秀的理化性质,成为近年来获得高功率高重频超快激光输出的全新选择。Délén 等^[80]使用了直径

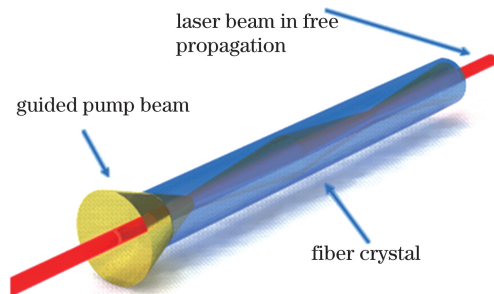


图 7 单晶光纤原理图

Fig. 7 Schematic of single crystal fiber

为 1 mm、1% 掺杂的 Yb:YAG SCF 作为增益介质,在 515 W 的泵浦功率下,实现了 251 W 的最大连续激光功率输出,对应的斜效率为 53%,这是目前为止采用 SCF 获得的最高连续光功率,较高的能量提取率也充分证明其在高重频放大器中的潜力。

2011 年,Zaouter 等^[81]首次将 Yb:YAG 单晶光纤用于超短脉冲放大,实验采用直径为 1 mm、长度为 40 mm 的 Yb:YAG 单晶光纤作为增益介质,对重频为 30 MHz、脉冲宽度为 270 fs 的种子光直接进行放大,后经平均功率为 175 W、中心波长为 940 nm 的泵浦光泵浦,经 GTI 镜压缩后得到平均功率为 12 W、重复频率为 30 MHz、脉冲宽度为 330 fs 的高重频激光脉冲输出。然而因入射激光能量、二极管的亮度、泵浦光引导阶段的模式匹配欠缺等问题,实验中光光转换效率仅为 7%,光束质量也较差。2013 年 Délén 等^[82]引入数值孔径为 0.15、芯径为 105 μm 的光纤耦合激光二极管作为泵浦源,优化了泵浦引导阶段的模式匹配,同时采用 CPA 技术,对重频为 10 kHz~10 MHz、最大脉冲能量为 150 μJ 、最大平均功率为 10 W 的种子光进行放大。高亮度的二极管大大提升了泵浦光的吸收效率,最终在重复频率为 10 kHz 时获得的单脉冲能量可达 1 mJ,同时脉冲宽度仅为 380 fs,实验中光光转换效率提高至 28.5%,斜效率可接近 50%。且随着泵浦功率的增加,输出功率并没有达到饱和,但是过高的泵浦功率容易对单晶光纤端面造成损伤,伴随的晶体内的热梯度也会进一步影响放大效率。

2015 年,Markovic 等^[83]引入双端泵浦,采用

多级放大方式降低热积累,采用全重频放大的方式直接对平均功率为 2.8 W、重复频率为 83.4 MHz 的种子光脉冲进行放大,在两级共 300 W 泵浦功率下,获得平均功率为 160 W、脉冲宽度为 800 fs、重复频率为 83.4 MHz 的高重频激光脉冲输出。此外,2020 年,Li 等^[84]采用光纤-单晶光纤混合放大的方式也获得了高重频、高功率激光输出,将前端光纤放大器输出的重复频率为 1 MHz、平均功率为 92 W 的种子光注入到掺杂浓度为 1%、直径为 1 mm、长度为 30 mm 的 Yb:YAG 单晶光纤放大器中,实现 112 W 的平均功率输出,因为在高功率泵浦下单晶光纤热退偏的影响,压缩效率仅为 73.8%,压缩后获得脉冲宽度为 660 fs、平均功率为 90 W 的高功率激光输出。除此之外,科研工作者对相干合成和分割脉冲放大等新型单晶光纤激光放大器的探索也从未停止,均获得了可观的研究成果^[85-87]。

基于单晶光纤的行波放大器是高重频大能量飞秒激光放大的一种突破,以 YAG 单晶为光纤的增

表 2 Yb:YAG SCF 和 Yb:YAG 块状晶体在 940 nm 和 969 nm 泵浦下的 CPA 性能^[89]

Table 2 CPA of Yb:YAG SCF and Yb:YAG rods pumped at 940 nm and 969 nm^[89]

Pump power /W	Seed repetition /kHz	Output power /W	Small signal gain /dB	M_x^2	M_y^2
Yb:YAG SCF with size of 1 mm×40 mm and doping concentration of 1% under 940 nm pump					
70	100	8.5	17	1.06	1.07
105(70+35)	100	21	26	1.09	1.09
120(70+50)	500	26	28	1.13	1.10
Yb:YAG rod with size of 5 mm×5 mm×5 mm and doping concentration of 5% under 940 nm pump					
70	100/500	7.2/7.8	17	1.10	1.17
Yb:YAG rod with size of 5 mm×5 mm×20 mm and doping concentration of 2% under 940 nm pump					
70	500	11.2	24	1.17	1.08
Yb:YAG rod with size of 2 mm×2 mm×20 mm and doping concentration of 2% under 940 nm pump					
70	500	13.5	25	1.06	1.08
120(70+35)	500	39.5	40	1.07	1.09
140(70+50)	500	47.5	42.3	1.13	1.17
Yb:YAG rod with size of 2 mm×2 mm×20 mm and doping concentration of 2% under 969 nm pump					
87	500	17.9	24.4	1.06	1.06

从表 2 可以看出,尽管单晶光纤特殊的结构可以引导泵浦光在更长的距离内激发反转粒子数,但相比于传统块状材料,似乎在低功率水平的输出参数上并没有表现出明显的优势。2018 年,Kuznetsov 等^[90]将光纤激光器输出的重复频率为 3 MHz、脉冲宽度为 300 fs、平均功率为 3 W 的种子

益介质,综合受激布里渊散射和热效应的影响,YAG 单晶光纤的输出极限为玻璃光纤的~50 倍,理论可达近 10 kW 的功率输出^[88]。但高质量单晶光纤的制备仍然是目前发展的难题,晶体生长等方面与国际最高水平仍有不小的差距,随着研究的不断深入及单晶光纤生长工艺愈发的成熟,相信在不久的将来,基于单晶光纤的放大系统会服务于各个工业及科研领域。

3.4 基于棒、块状晶体的行波放大研究

受限于单晶光纤的制备工艺,研究人员将目光聚焦至结构简单、模块成熟的传统棒状(块状)放大器。2017 年,Rodin 等^[89]使用尺寸为 2 mm×2 mm×20 mm 的 Yb:YAG 晶体获得重复频率为 10 kHz、单脉冲能量达 3.5 mJ 的行波放大输出。并对尺寸为 1 mm×40 mm、掺杂浓度为 1%的 Yb:YAG 单晶光纤与尺寸为 5 mm×5 mm×5 mm、5%掺杂,5 mm×5 mm×20 mm、2%掺杂,2 mm×2 mm×20 mm、2%掺杂的 Yb:YAG 块状晶体进行对比实验,在相同的装置下获得的结果如表 2 所示。

光经选单至 11.5 kHz,利用 CVBG 作为展宽器,将脉冲宽度展宽至 2 ns,在泵浦功率 50 W 的情况下,经两通将种子光功率放大至 2.8 W。后续将其注入到基于一块 30 mm 长、2%掺杂的 Yb:YAG 晶体的二级两通放大器中,经 CVBG 压缩后最终获得平均功率为 28 W、重复频率为 11.5 kHz、单脉冲能量

为 2.5 mJ 的脉冲激光输出。由于 Yb:YAG 本身带宽的限制及使用的 CVBG 质量较差,脉冲宽度为 2.8 ps。

2018 年, Veselis 等^[91]以重复频率为 200 kHz、单脉冲能量为 2.3 μ J 的光纤前端放大器作为种子光源,使用啁啾光纤光栅(CFBG)将脉冲展宽至 220 ps,随后注入到晶体长度为 12 mm、掺杂浓度为 3.6%的 Yb:YAG 晶体棒两通放大器中,放大后的光束质量因热透镜像差而恶化,于是在聚焦透镜的近焦平面放置一陶瓷孔进行空间滤波,大约有 3%的功率损失。同时为了得到更好的色散补偿并减小放大器的体积,使用了与 CFBG 提供的色散量相匹配的 CVBG 作为压缩器,并在 CFBG 施加热梯度来补偿光纤放大及后续放大过程中的残余色散,最终实现了平均功率为 20.8 W、重复频率为 200 kHz、

单脉冲能量为 104 μ J 的激光输出,并将脉冲宽度降至 762 fs。然而,利用 CFBG 中热梯度的变化补偿 CVBG、光纤预放大及主放大过程中的残余色散及高阶色散显得有些不足。2020 年,他们^[92]采用四通透射光栅作为压缩器,进一步补偿 CFBG、光纤预放大及主放大过程中引入的色散量,采用相同的实验设计,获得了重复频率为 1 MHz、单脉冲能量为 35 μ J、脉冲宽度为 330 fs、光束质量 M^2 约为 1.0 的超短脉冲输出,图 8 为双通行波放大实验装置。除 Yb:YAG 晶体外,2019 年, Kim 等^[93]利用尺寸为 1 mm \times 27 mm、0.5%掺杂的 Yb:Y₂O₃ 陶瓷棒,在最大 123.7 W 的泵浦功率下,对振荡器输出的种子光进行四通放大,得到重复频率为 80 MHz、平均功率为 8.1 W、脉冲宽度为 239 fs 的超短脉冲输出。

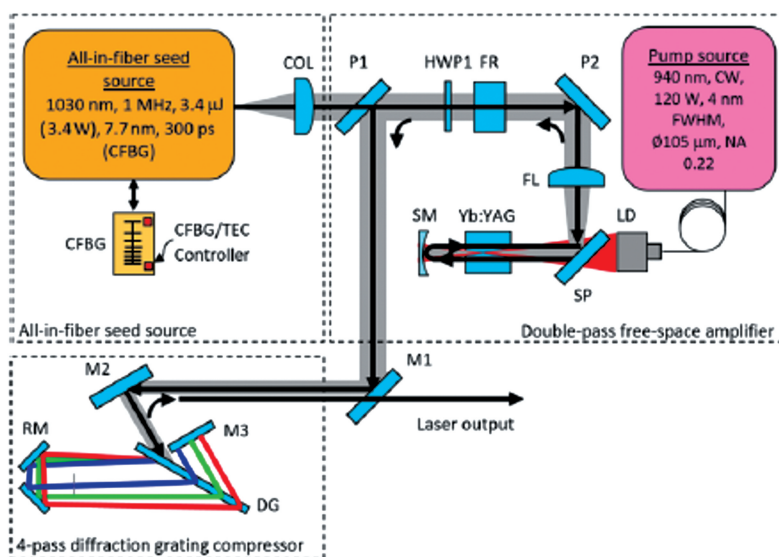


图 8 双通行波放大实验装置图^[92]

Fig. 8 Experimental setup of double-pass travelling-wave amplification^[92]

但是在高功率水平下,棒状、块状晶体热效应将变得尤为突出,过高的温度不仅会损坏增益晶体和光学元件,而且热透镜和热致双折射等热积累问题也会导致光束波前畸变,从而进一步影响压缩效率和输出结果。因此,要想利用块状晶体获得高功率激光输出,需要结合低温冷却技术来降低晶体的热积累^[94-96]。2011 年, Rand 等^[97]将 Yb:KYW 振荡器输出的重复频率为 30.5 MHz、脉冲宽度为 450 fs 的种子光再生放大选单至 5 kHz,并通过基于 2 块 2.5 cm 长、1%掺杂、低温冷却的 Yb:YAG 晶体的四通放大器,为补偿热致双折射,加强泵浦光与种子光的匹配,在放大过程中引入 4f 望远系统,最终获得重复频率为 5 kHz、平均功率为 115 W 的激光放

大输出。其中再生预放大的输出光谱中心波长为 1029.8 nm,比低温冷却的 Yb:YAG 晶体增益谱中心略长,但两者有足够的重叠,使种子光可提取晶体增益,放大后的光谱经计算仅支持 2~3 ps 的脉冲宽度。为了获得更短的脉冲宽度,他们将 1 块 1.5 cm 长、2%掺杂的 Yb:GSAG 晶体代替其中 1 块 Yb:YAG 晶体,因为其性质与 Yb:YAG 类似,都是氧化石榴石,低温下的增益谱重叠,但有所偏移,能有效地降低增益窄化效应^[98],当入射脉冲宽度为 1.6 ps 时,最终获得重复频率为 5 kHz、平均功率为 60 W、脉冲宽度为 1.4 ps 的激光放大输出。2016 年, Zapata 等^[99]利用低温制冷技术,将 2 块尺寸为 5 mm \times 15 mm \times 23 mm、1%掺杂的 Yb:YAG

晶体经液氮冷却至 77 K,将再生放大器输出的重复频率为 100 kHz、单脉冲能量为 40 μJ 的种子光经四通放大至 2.5 mJ,对应平均功率为 250 W,脉冲宽度为 20 ps,光光转换效率高达 50%,图 9 为四通偏振控制放大器装置图。因为在低温冷却下, Yb:YAG 晶体增益谱进一步变窄,仅为 1.6 nm,导致基于低温冷却 Yb:YAG 晶体的功率放大器脉冲宽度难以突破 ps 量级。另外一种晶体 Yb:YLF 在低温冷却下增益光谱达 10 nm(a 切),支持 400 fs 以下的激光脉冲输出^[100],其在重复频率 10 Hz 下已获得单脉冲能量为 190 mJ、脉冲宽度为 1.35 ps 的激光输出^[101]。因种子光光谱无法匹配 Yb:YLF 增益谱,输出脉冲宽度仍为皮秒量级,但 Yb:YLF 的出现,科研人员有望从低温制冷的全固态行波放大器中得到飞秒量级的脉冲宽度。

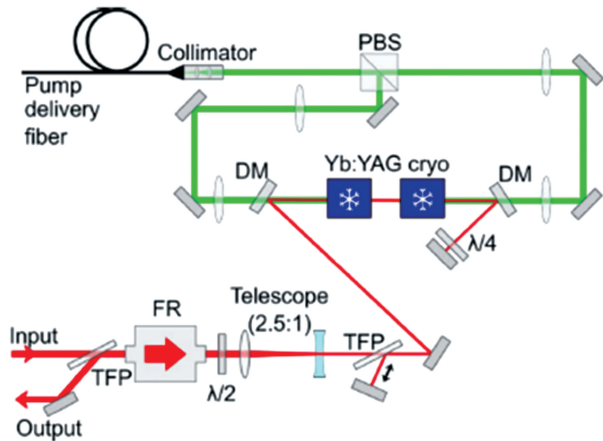


图 9 四通偏振控制放大器设置^[99]

Fig. 9 Layout of the four-pass polarization switched amplifier^[99]

4 总结与展望

LD 泵浦全固态飞秒激光放大器是全固态领域的研究热点,得益于高效的半导体泵浦技术的发展^[102]及各类新型 Yb 掺杂激光介质的出现,科研工作者们在高功率飞秒激光工作中取得了优秀的研究结果。在百瓦甚至千瓦级飞秒激光放大系统中,目前薄片、板条、单晶光纤结构为主流方案,增益介质主要为 Yb:YAG 晶体,已获得平均功率为 250 W 的激光放大输出,受限于增益带宽,输出脉冲宽度为 20 ps,很难压缩至飞秒量级,更短的脉冲宽度和更高的光束质量需要复杂的非线性压缩装置和整形系统实现。而除热导性质优良、生长技术成熟的 Yb:YAG 晶体外,关于基于其他材料的高功率高重频 Yb 飞秒激光多通行波放大的研究鲜有报道^[103]。

究其原因,一方面受限于掺镱激光材料目前的生长技术,新型激光晶体的研究还处于探索阶段;另一方面受限于泵浦阈值较高、单程增益较小,高功率飞秒激光的获取需通过增加放大次数和提高泵浦功率密度等方式来实现,然而晶体的散热和放大效率仍然是亟需解决的难点。目前,基于 Yb:CaF₂ 的离轴多通主功率放大结合低温冷却技术在 50 Hz 重频下已经实现单脉冲能量为 110 mJ、脉冲宽度为 225 fs 的成果^[104],突破了 Yb:YAG 晶体在低温下增益带宽较窄的限制。此外,在 90 K 低温下, Yb:Lu₂O₃ (32.3 W·m⁻¹·K⁻¹)、Yb:Sc₂O₃ (19.8 W·m⁻¹·K⁻¹)、Yb:YLF (33.7 W·m⁻¹·K⁻¹) 等晶体都拥有优秀的热导性质^[97]。随着这些新型激光晶体生长水平的发展,基于掺镱激光介质的超短脉冲激光放大器在放大效率和输出功率方面定能达到新的高度。结合目前全固态超快激光的发展趋势和本课题组的研究基础,计划使用亚 40 fs 全固态飞秒激光振荡器作为种子光源,获得重复频率为 1 MHz、单脉冲能量 >20 μJ 、脉冲宽度 <100 fs、峰值功率 >100 MW、平均功率 >20 W 的全固态超快激光再生放大系统。并以此作为预放大级,通过结合低温制冷方式,研究基于 Yb:Lu₂O₃、Yb:Sc₂O₃、Yb:CGA、Yb:KGW 等新型激光晶体的行波主放大技术,进而实现平均功率 >100 W 的输出,获得脉冲宽度 <500 fs 的研究结果。

参 考 文 献

- [1] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. Optics Communications, 1985, 56(3): 219-221.
- [2] Goulielmakis E, Schultze M, Hofstetter M, et al. Single-cycle nonlinear optics[J]. Science, 2008, 320(5883): 1614-1617.
- [3] Zhao K, Zhang Q, Chini M, et al. Tailoring a 67 attosecond pulse through advantageous phase-mismatch[J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3891-3893.
- [4] Zhou S Y, Bai Y F, Tian Y, et al. Self-organized kilotesla magnetic-tube array in an expanding spherical plasma irradiated by kHz femtosecond laser pulses[J]. Physical Review Letters, 2018, 121(25): 255002.
- [5] Cingöz A, Yost D C, Allison T K, et al. Direct frequency comb spectroscopy in the extreme ultraviolet[J]. Nature, 2012, 482(7383): 68-71.
- [6] Koralek J D, Douglas J F, Plumb N C, et al. Laser based angle-resolved photoemission, the sudden

- approximation, and quasiparticle-like spectral peaks in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(1): 017005.
- [7] Stockman M I, Kling M F, Kleineberg U, et al. Attosecond nanoplasmonic-field microscope [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(9): 539-544.
- [8] Lorek E, Larsen E W, Heyl C M, et al. High-order harmonic generation using a high-repetition-rate turnkey laser [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(12): 123106.
- [9] Russbuehdt 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.
- [10] 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.
- [11] Eidam T, Hanf S, Seise E, et al. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(2): 94-96.
- [12] Gao Z Y, Zhu J F, Wang J L, et al. Generation of 33 fs pulses directly from a Kerr-lens mode-locked Yb : CaYAlO₄ laser[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(6): 335-338.
- [13] Machinet G, Sevillano P, Guichard F, et al. High-brightness fiber laser-pumped 68 fs-2.3 W Kerr-lens mode-locked Yb : CaF₂ oscillator[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4008-4010.
- [14] Südmeyer T, Kränkel C, Baer C R E, et al. High-power ultrafast thin disk laser oscillators and their potential for sub-100-femtosecond pulse generation [J]. *Applied Physics B*, 2009, 97(2): 281-295.
- [15] Dörring J, Killi A, Morgner U, et al. Period doubling and deterministic chaos in continuously pumped regenerative amplifiers[J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1759-1768.
- [16] Salin F, Blanc C, Squier J, et al. Thermal eigenmode amplifiers for diffraction-limited amplification of ultrashort pulses[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(9): 718-720.
- [17] Frede M, Wilhelm R, Brendel M, et al. High power fundamental mode Nd : YAG laser with efficient birefringence compensation [J]. *Optics Express*, 2004, 12(15): 3581-3589.
- [18] 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(5): 055810.
- [19] Lü Q, Kugler N, Weber H, et al. A novel approach for compensation of birefringence in cylindrical Nd : YAG rods [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1996, 28(1): 57-69.
- [20] Sichelstiel B, Waters W, Wild T. Self-focusing array research model[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1964, 12(2): 150-154.
- [21] Zhao K. Laser, chirped pulse amplification, ultrafast optics, and Nobel prize in physics [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(14): 1433-1440. 赵昆. 激光、啁啾脉冲放大、超快光学和诺贝尔奖 [J]. *科学通报*, 2019, 64(14): 1433-1440.
- [22] Rouyer C, Mazataud É, Allais I, et al. Generation of 50-TW femtosecond pulses in a Ti: sapphire/Nd chain[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(3): 214-216.
- [23] Fan T Y, Ripin D J, Aggarwal R L, et al. Cryogenic Yb³⁺-doped solid-state lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 448-459.
- [24] Kuleshov N V, Lagatsky A A, Podlipensky A V, et al. Pulsed laser operation of Yb-doped KY(WO₄)₂ and KGd(WO₄)₂ [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(17): 1317-1319.
- [25] 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.
- [26] Siebold M, Bock S, Schramm U, et al. Yb : CaF₂—a new old laser crystal[J]. *Applied Physics B*, 2009, 97(2): 327-338.
- [27] Xing H Y. Research progress of Yb : CaGdAlO₄ crystal [J]. *Foundry Technology*, 2017, 38: 280-284. 邢恒远. Yb : CaGdAlO₄ 晶体的研究进展 [J]. *铸造技术*, 2017, 38: 280-284.
- [28] Hönninger C, Johannsen I, Moser M, et al. Diode-pumped thin-disk Yb : YAG regenerative amplifier [J]. *Applied Physics B*, 1997, 65(3): 423-426.
- [29] Havrilla D, Ryba T, Holzer M. High-power disk lasers: advances and applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8235: 82350W.
- [30] Metzger T, Schwarz A, Teisset C Y, et al. High-repetition-rate picosecond pump laser based on a Yb : YAG disk amplifier for optical parametric amplification [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(14): 2123-2125.
- [31] Grishin M, Gulbinas V, Michailovas A. Dynamics of high repetition rate regenerative amplifiers [J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9434-9443.
- [32] Smrż M, Chyla M, Novák O, et al. Amplification of picosecond pulses to 100 W by an Yb : YAG thin-disk with CVBG compressor [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9513: 951304.
- [33] Krötz P, Wandt C, Grebing C, et al. Towards

- 2 kW, 20 kHz ultrafast thin-disk based regenerative amplifiers[C]//Advanced Solid State Lasers 2019, September 29-October 3, 2019, Vienna, Austria. Washington, DC: OSA, 2019: ATh1A.8.
- [34] Pouysegur J, Delaigue M, Hönninger C, et al. Generation of 150-fs pulses from a diode-pumped Yb : KYW nonlinear regenerative amplifier [J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9414-9419.
- [35] Pouysegur J, Delaigue M, Hönninger C, et al. Numerical and experimental analysis of nonlinear regenerative amplifiers overcoming the gain bandwidth limitation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(1): 212-219.
- [36] Ueffing M, Lange R, Pleyer T, et al. Direct regenerative amplification of femtosecond pulses to the multimillijoule level[J]. Optics Letters, 2016, 41(16): 3840-3843.
- [37] Liu H H, Nees J, Mourou G. Directly diode-pumped Yb : KY(WO₄)₂ regenerative amplifiers[J]. Optics Letters, 2002, 27(9): 722-724.
- [38] Liu H, Nees J, Mourou G, et al. Yb : KGd(WO₄)₂ chirped-pulse regenerative amplifiers [J]. Optics Communications, 2002, 203(3/4/5/6): 315-321.
- [39] Delaigue M, Manek-Hönninger I, Salin F, et al. 300 kHz femtosecond Yb : KGW regenerative amplifier using an acousto-optic Q-switch [J]. Applied Physics B, 2006, 84(3): 375-378.
- [40] Leng Y X, Lin L H, Xu Z Z. Spectrum shaping in a Ti : sapphire regenerative amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(2): 170-173.
冷雨欣, 林礼煌, 徐至展. 掺钛蓝宝石再生放大器的光谱整形[J]. 光学学报, 2002, 22(2): 170-173.
- [41] Zhao H T, Major A. Dynamic characterization of intracavity losses in broadband quasi-three-level lasers [J]. Optics Express, 2014, 22(22): 26651-26658.
- [42] Stučinskas D, Antipenkov R, Varanavičius A. 30 W dual active element Yb : KGW regenerative amplifier for amplification of sub-500 fs pulses[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6731: 67312Y.
- [43] Kim G H, Yang J, Kulik A V, et al. Power limitations and pulse distortions in an Yb : KGW chirped-pulse amplification laser system [J]. Quantum Electronics, 2013, 43(8): 725-730.
- [44] Kim G H, Yang J H, Lee D S, et al. Femtosecond laser based on Yb : KYW crystals with suppression of spectral narrowing in a regenerative amplifier by spectral profiling of the pulse[J]. Journal of Optical Technology, 2013, 80(3): 142-147.
- [45] Calendron A L, Çankaya H, Kärtner F X. High-energy kHz Yb : KYW dual-crystal regenerative amplifier[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24752-24762.
- [46] He H J, Yu J, Zhu W T, et al. A Yb : KGW dual-crystal regenerative amplifier[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2020, 8: e35.
- [47] Yan D Y, Liu B W, Chu Y X, et al. Hybrid femtosecond laser system based on a Yb : KGW regenerative amplifier for NP polarization [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(4): 041404.
- [48] Pugžlys A, Sidorov D, Ali T, et al. Spectroscopic and lasing properties of cryogenically cooled Yb, Na : CaF₂ [C]//Advanced Solid-State Photonics, January 27-30, 2008, Nara, Japan. Washington, DC: OSA, 2008: MF4.
- [49] Pugžlys A, Andriukaitis G, Baltuška A, et al. MultimJ, 200-fs, cw-pumped, cryogenically cooled, Yb, Na : CaF₂ amplifier [J]. Optics Letters, 2009, 34(13): 2075-2077.
- [50] Ricaud S, Druon F, Papadopoulos D N, et al. Diode-pumped Yb : CaF₂ regenerative amplifier [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7912: 79120S.
- [51] Caracciolo E, Kemnitzer M, Guandalini A, et al. Multi-kHz, high energy, femtosecond diode-pumped Yb : CaF₂ regenerative amplifier[C]//CLEO: Science and Innovations 2014, June 8-13, 2014, San Jose, California. Washington, DC: OSA, 2014: STh4E.2.
- [52] Sevillano P, Camy P, Doualan J L, et al. Fiber laser pumped Yb : CaF₂ regenerative amplifier delivering 130 fs pulses with 4.3 W output power [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.
- [53] Caracciolo E, Kemnitzer M, Guandalini A, et al. 28-W, 217 fs solid-state Yb : CALGdO₄ regenerative amplifiers[J]. Optics Letters, 2013, 38(20): 4131-4133.
- [54] Caracciolo E, Guandalini A, Pirzio F, et al. High power Yb : CALGO ultrafast regenerative amplifier for industrial application [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 1008: 100821F.
- [55] Pouysegur J, Delaigue M, Zaouter Y, et al. Sub-100-fs Yb : CALGO nonlinear regenerative amplifier[J]. Optics Letters, 2013, 38(23): 5180-5183.
- [56] Calendron A L. Dual-crystal Yb : CALGO high power laser and regenerative amplifier [J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26174-26181.
- [57] Rudenkov A S, Kisel V, Matrosov V, et al. 200 kHz 5.5 W Yb³⁺ : YVO₄-based chirped-pulse regenerative amplifier[J]. Optics Letters, 2015, 40

- (14): 3352-3355.
- [58] Rudenkov A S, Kisel V, Yasukevich A S, et al. Yb³⁺: CaYAlO₄-based chirped pulse regenerative amplifier[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2249-2252.
- [59] Rudenkov A S, Kisel V E, Yasukevich A S, et al. Yb: CALYO-based femtosecond chirped pulse regenerative amplifier for temporally resolved pump-probe spectroscopy [J]. Devices and Methods of Measurements, 2018, 9(3): 205-214.
- [60] Rudenkov A S, Kisel V E, Yasukevich A, et al. Yb³⁺: LuAlO₃ crystal as a gain medium for efficient broadband chirped pulse regenerative amplification [J]. Optics Letters, 2017, 42(13): 2415-2418.
- [61] Rudenkov A S, Kisel V E, Gorbachenya K N, et al. Growth, spectroscopy and high power laser operation of Yb: YAl₃(BO₃)₄ crystal: continuous-wave, mode-locking and chirped pulse regenerative amplification[J]. Optical Materials, 2019, 89: 261-267.
- [62] Pirzio F, Caracciolo E, Kemnitzer M, et al. Performance of Yb: Sc₂SiO₅ crystal in diode-pumped femtosecond oscillator and regenerative amplifier[J]. Optics Express, 2015, 23(10): 13115-13120.
- [63] Caracciolo E, Pirzio F, Kemnitzer M, et al. 42 W femtosecond Yb: Lu₂O₃ regenerative amplifier[J]. Optics Letters, 2016, 41(15): 3395-3398.
- [64] Huynh J, Smrž M, Miura T, et al. Femtosecond Yb: YGAG ceramic slab regenerative amplifier[J]. Optical Materials Express, 2018, 8(3): 615-621.
- [65] Moran B D, Brent Dane C, Crane J K, et al. Suppression of parasitics and pencil beams in the high-gain national ignition facility multipass preamplifier[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3264: 56-64.
- [66] Zhang Z G. Femtosecond laser technology (optics and photonics series) [M]. Beijing: Science Press, 2011.
张志刚. 飞秒激光技术(光学与光子学丛书)[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [67] Stuart B C, Feit M D, Rubenchik A M, et al. Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond-to-subpicosecond pulses [J]. Physical Review Letters, 1994, 74(12): 2248-2251.
- [68] Huang Y X. Study on slab laser amplifiers thermal effect influence of transmission characteristics [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
黄泳鑫. 板条激光放大器热效应对传输特性影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [69] Negel J P, Voss A, Ahmed M A, et al. 1.1 kW average output power from a thin-disk multipass amplifier for ultrashort laser pulses [J]. Optics Letters, 2013, 38(24): 5442-5445.
- [70] Russbueldt 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.
- [71] Schulz M, Riedel R, Willner A, et al. Yb: YAG Innoslab amplifier: efficient high repetition rate subpicosecond pumping system for optical parametric chirped pulse amplification[J]. Optics Letters, 2011, 36(13): 2456-2458.
- [72] Zhao Z G, Cong Z H, Liu Z J. Review on ultrashort pulse laser amplifiers based on bulk Yb-doped gain media[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7), 57: 071605.
赵智刚, 丛振华, 刘兆军. 基于掺镱块材料的超短脉冲激光放大器综述[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7), 57: 071605.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [78] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 861-867.
- [79] 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.
- [80] Délen X, Piehler S, Didierjean J, et al. 250 W single-crystal fiber Yb: YAG laser [J]. Optics Letters,

- 2012, 37(14): 2898-2900.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] Markovic V, Rohrbacher A, Hofmann P, et al. 160 W 800 fs Yb : YAG single crystal fiber amplifier without CPA [J]. Optics Express, 2015, 23(20): 25883-25888.
- [84] 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.
- [85] Kienel M, Müller M, Demmler S, et al. Coherent beam combination of Yb : YAG single-crystal rod amplifiers[J]. Optics Letters, 2014, 39(11): 3278-3281.
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] Liu Z J, Gao X B, Cong Z H, et al. Crystal fiber and crystal-derived fiber preparation and application: a review[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(11), 48: 1148003.
刘兆军, 高悉宝, 丛振华, 等. 晶体光纤及晶体衍生光纤制备与应用综述 [J]. 光子学报, 2019, 48(11), 48: 1148003.
- [89] 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. New York: IEEE Press, 2017.
- [90] 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.
- [91] 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.
- [92] 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, 1125: 1125925.
- [93] Kim J W, Sall E, Lee B, et al. 8 W 240 fs diode-pumped Yb : Y₂O₃ ceramic thin-rod femtosecond amplifier[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31418-31424.
- [94] Hemmer M, Reichert F, Zapata K, et al. Picosecond, 115 mJ energy, 200 Hz repetition rate cryogenic Yb : YAG bulk-amplifier [C] // 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2015, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015.
- [95] Mackonis P, Rodin A M. Laser with 1.2 ps, 20 mJ pulses at 100 Hz based on CPA with a low doping level Yb : YAG rods for seeding and pumping of OPCPA[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 1261-1268.
- [96] Chang C L, Krogen P, Liang H, et al. Multi-mJ, kHz, ps deep-ultraviolet source [J]. Optics Letters, 2015, 40(4): 665-668.
- [97] Rand D, Miller D, Ripin D J, et al. Cryogenic Yb³⁺-doped materials for pulsed solid-state laser applications[J]. Optical Materials Express, 2011, 1(3): 434-450.
- [98] Rand D A, Shaw S E, Ochoa J R, et al. Picosecond pulses from a cryogenically cooled, composite amplifier using Yb : YAG and Yb : GSAG [J]. Optics Letters, 2011, 36(3): 340-342.
- [99] Zapata L E, Reichert F, Hemmer M, et al. 250 W average power, 100 kHz repetition rate cryogenic Yb : YAG amplifier for OPCPA pumping[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 492-495.
- [100] Demirbas U, Cankaya H, Thesinga J, et al. Efficient, diode-pumped, high-power (> 300 W) cryogenic Yb : YLF laser with broad-tunability (995-1020.5 nm): investigation of E//a-axis for lasing[J]. Optics Express, 2019, 27(25): 36562-36579.
- [101] Cankaya H, Cankaya H, Cankaya H, et al. 190-mJ cryogenically-cooled Yb : YLF amplifier system at 1019.7 nm [J]. OSA Continuum, 2019, 2(12): 3547-3553.
- [102] Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.
陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 半导体激光器研究进展 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500001.

- [103] Volkov M R, Kuznetsov I I, Mukhin I B, et al. Thin-rod active elements for amplification of femtosecond pulses [J]. *Quantum Electronics*, 2019, 49(4): 350-353.
- [104] Kaksis E, Almási G, Fülöp J A, et al. 110-mJ 225-fs cryogenically cooled Yb : CaF₂ multipass amplifier [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (25): 28915-28922.

Progress on Yb-Doped All-Solid-State Femtosecond Laser Amplifier with High Repetition Rate

Bai Chuan¹, Tian Wenlong¹, Wang Geyang¹, Zhen Li¹, Xu Rui¹, Zhang Dacheng¹, Wang Zhaohua², Zhu Jiangfeng^{1*}, Wei Zhiyi²

¹ *School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;*

² *Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

Abstract

Significance In 2018, Gerard Mourou and Donna Strickland were awarded the Nobel Prize in Physics for their work on chirped pulse amplification (CPA) technology, which provides a reliable concept for improvement in femtosecond-laser energy. Ti : sapphire femtosecond amplifiers have been developed using CPA technology and are widely used in the fields of attosecond science, and strong-field physics. Due to the limitations of pump power and thermal management, the repetition rate of Ti:sapphire amplifiers is typically less than 100 kHz. However, high-repetition-rate amplifiers at several hundred kilohertz and megahertz are essential for some scientific and industrial applications, such as XUV optical-frequency combing, high-flux high-harmonic generation, angle-resolved photo-emission spectroscopy, and micromachining. Under a fixed pulse energy, work at a high repetition rate means work at a high average power, which causes severe thermal issues.

With the rapid development of diode-pumping technology since the 1990, all-solid-state Yb femtosecond lasers have opened up a new path for the generation of high-power ultrashort laser pulses. Yb-doped lasers are very promising for high-power ultrashort-pulse generation due to their ability to be pumped by readily available high-power diode lasers, their intrinsically high efficiency and narrow pulse width made possible by their simple energy-level diagram, and their broad emission bandwidth and low quantum defect. Moreover, Yb-doped laser materials possess higher gain and thermal conductivity at cryogenic temperatures than at room temperature, enabling much higher output powers. Some Yb-doped materials with emission cross sections broad enough for femtosecond-pulse amplification include Yb : YAG, Yb : KGW, Yb : KYW, Yb : CaF₂, and Yb : CGA; these were evaluated and found to have potential for use in high-repetition-rate amplifiers (Table 1). In combination with cryogenic refrigeration and traveling-wave amplification (Fig. 5), the average power can reach several hundred watts.

Progress The key technical bottlenecks arise from thermal management of gain media and the gain-narrowing effects that accompany high-repetition-rate femtosecond amplification. Thus, the technical routes and research progress on amplifiers with different gain media are comprehensively summarized with reference to previous research on regenerative and traveling-wave amplifiers. For regenerative amplifiers (Fig. 1), Caracciolo's research group at the University of Pavia, Italy, has made pioneering contributions using crystals of Yb : Lu₂O₃, Yb : CGA, and Yb : CaF₂. Pouysegur's research group from University of Paris-Sud reported on the first sub-100-fs regenerative amplifier based on an Yb-doped bulk gain medium (Fig. 3). For hundred kilohertz and above, traveling-wave amplification is one of the most effective ways to further enhance the power to mJ level and even higher. Thin-disk and slab technologies have proven to be very efficient and enable high output powers in the ultrashort regime with up to several kW of output power because of their thermal-management advantages. However, their inherently complex amplifier setups undermine their stability and wider industrial applicability. Single-crystal fiber is a promising alternative with a compact size, greater simplicity, and lower cost compared with other such technologies for obtaining several hundred watts of output power. In addition, most lasers are dominated by Yb : YAG crystals; other Yb materials are also used in traditional rod amplifiers. Thermal effect and amplified efficiency of rod amplifiers are outstanding difficulties that need to be solved urgently. Among currently available technologies, diode-pumped

cryogenically cooled solid-state amplifiers have emerged as the most promising alternative for achieving an output power of hundreds of watts with a rod amplifier. Zapata at the Center for Free-Electron Laser Science, Deutsches Elektronen Synchrotron increased the output power of the Yb : YAG rod amplifier to 250 W (Fig.9). Due to the gain bandwidth of Yb : YAG at low temperature, a femtosecond pulse is still difficult to achieve. Therefore, research on simple and versatile high-power amplifiers for femtosecond-pulsed operation is still ongoing. The problems faced in this field and our ongoing research are discussed.

Conclusions and Prospects Ultrafast pulse-laser amplifiers based on an Yb-doped laser medium can reach new heights of amplification efficiency and output power due to the development of efficient diode-pumping technology and the emergence of various new laser media. In the near future, we expect that the amplification system will serve in both scientific and industrial applications. Combining the current development trend of an all-solid-state ultrashort laser with the research basis of our group, we recognize the prospect of achieving a femtosecond laser with an output power of >100 W using new Yb-doped laser crystals and cryogenic technology.

Key words laser optics; high repetition rate; regenerative amplifier; traveling-wave amplifier; Yb-doped gain medium

OCIS codes 140.3280; 140.3480; 140.3615; 140.7090