

专题: 阿秒物理 • 封面文章

Yb:CaYAlO₄ 再生放大器*

王阁阳¹⁾ 白川¹⁾ 麦海静¹⁾ 郑立¹⁾ 田轩¹⁾ 于洋²⁾ 田文龙^{1)†}
徐晓东⁴⁾ 魏志义³⁾ 朱江峰^{1)‡}

1) (西安电子科技大学光电工程学院, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学前沿交叉研究院, 西安 710071)

3) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

4) (江苏师范大学物理与电子工程学院, 徐州 221116)

(2022年11月9日收到; 2022年12月22日收到修改稿)

阿秒科学是驱动超强超快激光往高平均功率和短脉冲宽度方向快速发展的动力之一. 本文针对高重复频率阿秒光源的实际需求, 开展了基于国产 Yb:CaYAlO₄ 晶体的再生放大理论和实验研究. 在理论研究中, 根据 Yb:CaYAlO₄ 晶体的热透镜计算结果, 设计了热稳定性良好的模式可调再生腔; 并对晶体 π 和 σ 偏振的放大输出能量和光谱进行计算. 在此基础上, 开展了 Yb:CaYAlO₄ 晶体不同偏振性质的再生放大实验研究. 在晶体 π 偏振的实验中, 获得了平均功率 16.1 W、单脉冲能量 1.61 mJ、光谱中心波长 1030 nm、光谱半高全宽 16 nm 的放大输出, 压缩后的激光脉冲宽度为 149 fs, 压缩效率为 92.1%, 峰值功率大于 9.5 GW. 在 σ 偏振获得了平均功率 28.7 W、单脉冲能量 2.87 mJ、光谱中心波长 1037 nm、光谱半高全宽 11 nm 的放大输出, 压缩后的激光脉冲宽度为 178 fs, 压缩效率为 91.5%, 峰值功率大于 14.2 GW, 光束质量因子 $M^2 < 1.2$. 以上研究结果实现了目前 Yb:CaYAlO₄ 晶体最高平均功率和最大单脉冲能量的输出. 针对高重复频率阿秒光源、太赫兹和光参量放大领域的应用, 后续计划增加两级行波放大实现平均功率 200 W、脉冲能量 20 mJ、脉冲宽度小于 200 fs 的激光输出.

关键词: 掺镱激光晶体, 再生放大器, 高功率飞秒激光, 阿秒科学**PACS:** 42.55.-f, 42.55.Xi, 42.60.Da, 42.65.Re**DOI:** 10.7498/aps.72.20222141

1 引言

超高峰值功率、超短脉冲宽度的飞秒激光, 为阿秒科学^[1]、等离子体物理^[2]、凝聚态物理^[3]和精密光谱学^[4]等研究提供了极端的强场条件和超快的时间分辨, 是基础科学研究领域重要的工具. 此外, 高峰值功率和短脉冲宽度的特性使得飞秒激光与物质发生相互作用时, 作用区域精确且作用时间

极短. 因此, 在医学诊断与治疗^[5]、微纳制造^[6]和先进材料加工^[7]等领域也具有广阔的应用前景.

目前, 能够产生高峰值功率飞秒激光的增益介质主要包括钛宝石晶体和掺镱激光晶体. 其中, 钛宝石晶体发射光谱宽、增益截面大, 是产生周期量级高峰值功率飞秒激光的首选. 典型的钛宝石再生放大器提供重复频率 1—10 kHz、平均功率 5—15 W、脉冲宽度小于 30 fs 的飞秒激光输出, 是目前阿秒科学和非线性光学研究中的重要工具. 但在光电子

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB4601102)、国家自然科学基金 (批准号: 11774277, 61975071)、陕西省自然科学基金研究计划 (批准号: 2019JCW-03) 和西安市科技创新计划 (批准号: 202005YK01) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wltian@xidian.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: jfzhu@xidian.edu.cn

能谱研究中,需要更高重复频率的驱动激光来克服空间电荷效应,实现能量分辨率和测量信噪比的提升^[8].此外,在光发射电子显微镜^[9]、相干衍射成像^[10]和瞬态吸收光谱^[11]等研究中,高重复频率的驱动激光还可以有效缩短数据的采集时间.然而,在同样的峰值功率下,飞秒激光放大器重复频率的提高意味着平均输出功率的增大.但钛宝石激光器受限于较低的量子效率和昂贵的泵浦源成本,平均功率的提升进入了瓶颈期.

相较而言,掺镱增益介质的吸收峰与铟砷化镓激光二极管(laser diode, LD)的发射波长吻合,且量子效率超过90%,可支持高功率激光运转^[12].此外,由于三价镱离子(Yb^{3+})只有两个分立能级 ${}^2\text{F}_{5/2}$ 和 ${}^2\text{F}_{7/2}$,有效避免了激发态吸收、上转换、交叉弛豫和浓度猝灭等能量损失,有助于提高发射激光效率^[13].基于以上优点,高平均功率、大脉冲能量的掺镱全固态飞秒激光研究如火如荼^[14].但受限于掺镱增益介质的发射带宽,以掺镱钇铝石榴石($\text{Yb}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, $\text{Yb}:\text{YAG}$)薄片^[15]和板条^[16]为代表的高功率飞秒激光器输出的激光脉冲宽度往往在亚皮秒量级,难以直接满足科学研究对超快时间分辨的要求.而 $\text{Yb}:\text{CaYAlO}_4$ ($\text{Yb}:\text{CYA}$)等掺镱铝酸盐晶体,由于基质晶格的无序性,使得发射光谱非均匀展宽(半高全宽77 nm),具备输出超短脉冲的潜力^[17].

2016年,白俄罗斯国立技术大学^[18]首次报道了基于 $\text{Yb}:\text{CYA}$ 晶体的再生放大工作,研究了晶体不同轴向的放大性质,种子激光偏振方向平行晶体 π 轴时获得了脉冲宽度为190 fs、平均功率为2.3 W、中心波长为1031.8 nm、光谱宽度为12.5 nm的激光放大输出;之后通过改变晶体放置方向,在种子激光偏振方向平行晶体 σ 轴时获得了脉冲宽度为310 fs、平均功率为4.2 W、中心波长为1037.4 nm、光谱宽度为7.7 nm的放大输出.为进一步验证 $\text{Yb}:\text{CYA}$ 晶体在短脉冲放大方面的潜力,2018年白俄罗斯国立技术大学研究者^[19]将光谱宽度12.5 nm、脉冲宽度100 fs的激光脉冲耦合进10 m长的单模光纤,获得了光谱宽度60 nm、脉冲宽度7.5 ps的种子激光.在200 kHz重复频率下,实现了平均功率4 W、光谱宽度19.4 nm的激光输出,压缩后的脉冲宽度为120 fs、平均功率为3 W.2022年,索菲亚大学研究者^[20]报道了基于 $\text{Yb}:\text{CYA}$ 晶体产生毫焦耳量级飞秒脉冲的工作,在

1 kHz重复频率下,实现了中心波长1040 nm、光谱半高宽16.6 nm、脉冲宽度为135 fs、单脉冲能量1 mJ的放大输出.上述研究工作证明 $\text{Yb}:\text{CYA}$ 晶体在放大过程中不仅可以提供宽带增益,还支持短脉冲宽度输出.但目前报道的放大结果受限于平均功率,仍难以满足阿秒科学和非线性光学等领域的研究需求.

为了获得兼顾高平均功率、大脉冲能量和窄脉冲宽度的飞秒激光,本文提出了如图1所示的发展路线.基于国产自研 $\text{Yb}:\text{CYA}$ 晶体的再生放大器和两级行波放大器,获得平均功率大于200 W、最大脉冲能量大于20 mJ、脉冲宽度小于200 fs、重复频率覆盖1 kHz—1 MHz的飞秒激光放大输出.相比脉冲宽度在亚皮秒量级的 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 薄片激光器和结构复杂的低温制冷激光器,该方案优点在于利用了 $\text{Yb}:\text{CYA}$ 晶体不同偏振的增益特性,在获得高功率飞秒激光的同时,保持较短的脉冲宽度,紧凑可靠的结构可满足后端应用对激光器平均功率、脉冲能量、脉冲宽度和重复频率的不同需求.该方案的难点在于再生放大过程中的增益控制以及高功率连续泵浦下的激光晶体热管理技术研究.增益控制技术主要包括利用激光晶体的偏振发射特性去抑制放大过程中的增益窄化效应,是实现短脉冲输出的关键;激光晶体热管理主要是结合微通道流体技术研究有效的散热结构,降低激光晶体泵浦端面的温度,避免热退偏和热梯度对放大激光脉冲质量和光束质量的影响.

本文主要介绍其中再生放大器部分的理论分析和实验研究结果.理论分析部分,首先对影响激光放大过程模式匹配的热透镜焦距进行求解,在120 W连续泵浦下,计算得到的 $\text{Yb}:\text{CYA}$ 晶体 π 和 σ 偏振方向的热透镜焦距分别为307.9 mm和309.4 mm,并据此对再生谐振腔进行热稳定性设计.其次对再生放大动力学过程进行仿真,计算可得 $\text{Yb}:\text{CYA}$ 晶体在重复频率10 kHz、泵浦功率120 W下, π 偏振和 σ 偏振输出的单脉冲能量分别为2.03 mJ和2.91 mJ,对应的放大光谱宽度分别为14 nm和13 nm.在实验研究部分,重复频率为10 kHz时, $\text{Yb}:\text{CYA}$ 晶体在 π 偏振状态下获得了平均功率16.1 W、单脉冲能量1.61 mJ、光谱宽度16 nm的输出,压缩后的激光脉冲宽度为149 fs,压缩效率为92.1%,峰值功率大于9.5 GW;在 σ 偏振状态下获得了平均功率28.7 W、单脉冲能量

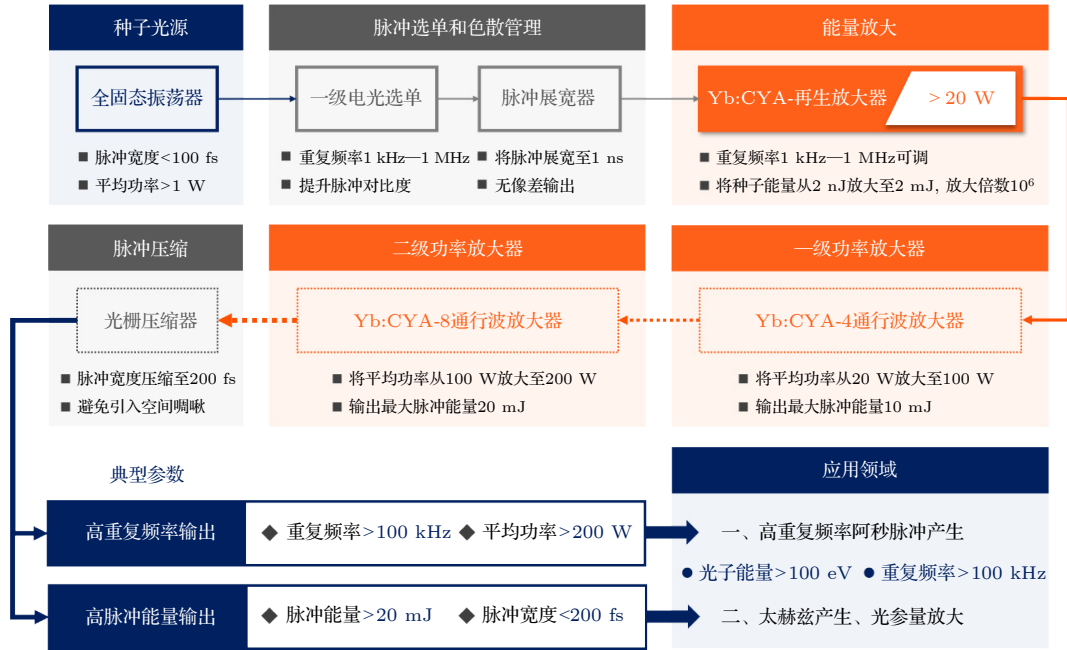


图 1 Yb:CfA 全固态放大器的技术路线

Fig. 1. Schematic illustration of the all-solid-state Yb:CfA amplifier.

2.87 mJ、光谱宽度 11 nm 的高功率输出, 压缩后的激光脉冲宽度为 178 fs, 压缩效率为 91.5%, 峰值功率大于 14.2 GW, 光束质量因子 $M^2 < 1.2$. 实验结果获得了目前 Yb:CfA 晶体中最高平均功率和最大单脉冲能量的激光输出, 与理论仿真基本符合.

2 理论仿真

2.1 再生放大过程中的热透镜效应

激光放大过程中, 增益介质处种子激光与泵浦激光的模式匹配决定了输出激光的效率. 而激光晶体处的热透镜效应是影响再生腔模式匹配的关键因素. 尤其在高功率连续泵浦的全固态放大器中, 热透镜对再生腔模式匹配的影响尤为严重, 导致此类放大器的光光效率普遍在 20% 以下. 在此情况下, 需要增加更大的泵浦功率以获得额定的输出, 此举会加重激光晶体处的热负荷, 带来光束质量恶化和偏振对比度降低等问题, 无法保证放大输出的激光质量.

采用有限元分析法, 对 Yb:CfA 晶体泵浦端面的温度分布和形变量进行计算. Yb:CfA 晶体的模型参数 [17,21] 在表 1 列出. 在 120 W 的泵浦功率下, Yb:CfA 晶体在泵浦端面沿 π 和 σ 轴的温度分布如图 2(a) 所示, 泵浦中心的最高温度分别为 124.44 $^{\circ}\text{C}$ 和 123.29 $^{\circ}\text{C}$. 此时, 根据光程差拟合得

到沿晶体 π 和 σ 轴的热透镜焦距如图 2(b) 所示, 分别为 307.9 mm 和 309.4 mm. 后续实验以此作为再生腔热稳定性和模式匹配设计的参考.

再生腔设计需要考虑光学元件的损伤阈值、透射元件处的非线性积累、增益介质处的泵浦强度和热透镜等因素. 其中, 增益介质处的热透镜效应是影响再生腔激光模式的主要原因. 因此, 设计了如图 3(a) 所示的激光模式可调的再生腔型, 较短的腔长使再生腔具有良好的热稳定性. 如图 3(b) 所示, 激光晶体处的热透镜焦距在 100—500 mm 范围内, 对再生腔激光模式影响较小. Yb:CfA 晶体在 120 W 泵浦功率下, π 轴和 σ 轴的热透镜焦距分别 307.9 mm 和 309.4 mm, 可以算出此时的激光模式半径分别为 172.4 μm 和 172.6 μm . 此外, 通过调节腔内透镜位置使再生腔失调灵敏度降低并处于稳腔边沿, 此时的再生腔衍射损耗增大, 腔内多横模起振困难, 更有利于获得高平均功率、高光束质量的单横模激光输出.

2.2 再生放大动力学过程仿真

连续激光泵浦下的全固态激光放大器, 其晶体储能的建立、消耗、恢复关系相比脉冲激光泵浦更为复杂. 掺镱增益介质的上能级寿命普遍在 ms 量级. 因此, 重复频率大于 1 kHz 的激光放大中, 种子脉冲的放大周期会小于激光晶体的上能级寿命. 一些

表 1 Yb:CYA 晶体的热性质参数
Table 1. Parameters of thermal performance for Yb:CYA crystal.

晶体 轴向	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	折射率 <i>n</i>	密度/ (g·cm ⁻³)	热光系数/ (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	热膨胀系数/ (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	比热容/ (J·g ⁻¹ ·K ⁻¹) (301 K)
π	3.2	1.886	4.748	-7.8	8.99	0.593
σ	3.6	1.909		-8.7	8.97	

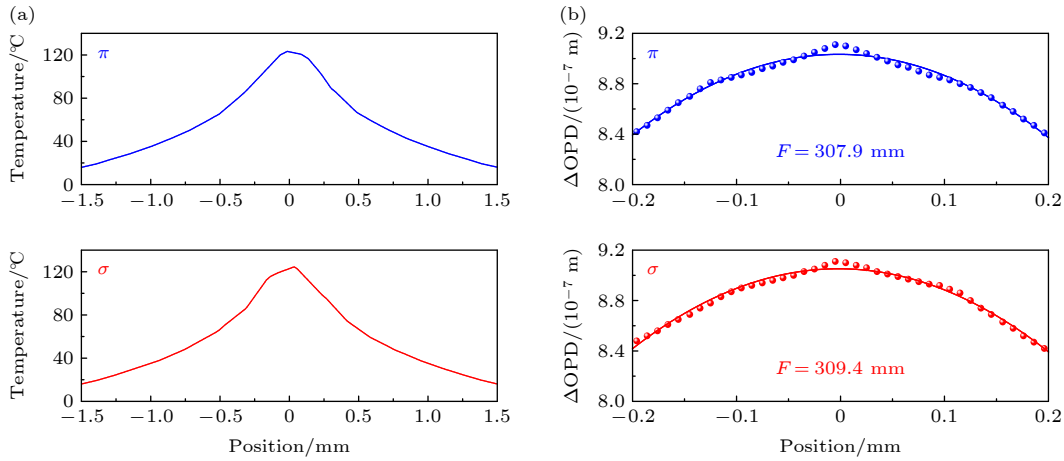


图 2 Yb:CYA 晶体泵浦端面沿 π 轴和 σ 轴的温度分布和屈光度变化 (a) 温度分布; (b) 屈光度变化

Fig. 2. Simulated temperature and dioptricity distributions along π and σ axes of the Yb:CYA crystal: (a) Temperature distribution; (b) dioptricity distribution.

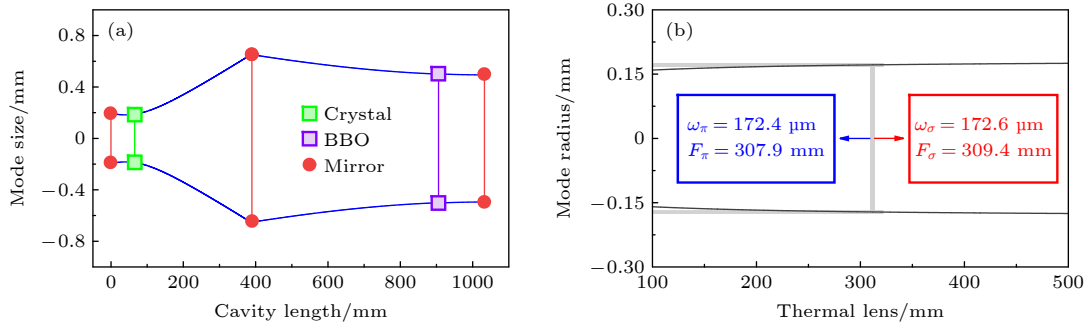


图 3 Yb:CYA 再生腔的激光模式计算 (a) 本征模式分布; (b) 热透镜对增益介质处激光模式的影响

Fig. 3. Calculated resonant cavity mode of the Yb:CYA regenerative amplifier: (a) Laser mode distribution; (b) laser mode at the crystal affected by the thermal lens.

重复频率下会发生晶体增益恢复不及时的情况, 从而引发相邻放大周期脉冲能量紊乱的问题 [22]. 为了实现稳定的能量输出, 基于改进型 F-N 方程 [23], 仿真了在 10 kHz 重复频率下, Yb:CYA 晶体不同偏振的放大输出能量和光谱变化. Yb:CYA 晶体 π 和 σ 偏振在不同增益圈数下的脉冲能量输出仿真如图 4(a) 所示, 种子激光在 π 偏振方向增益 40 圈后获得 2.03 mJ 的饱和输出; 在 σ 偏振方向增益 56 圈后获得 2.91 mJ 的饱和输出. 在图 4(b) 中, 分别对 Yb:CYA 晶体 π 和 σ 偏振饱和输出下的放大光谱进行仿真, π 偏振方向的放大光谱中心

为 1030 nm, 光谱半高宽 14 nm; σ 偏振方向的放大光谱中心为 1034 nm, 光谱半高宽为 13 nm.

3 实验结果和分析

基于再生谐振腔设计以及 Yb:CYA 晶体的放大数值模拟, 搭建了如图 5 所示的再生放大光路开展实验研究. 采用中心波长 1034 nm、重复频率 75.3 MHz、脉冲宽度 105 fs 的 Yb:KGW 振荡器作为种子光源, 可提供的最大种子能量为 80 nJ. 种子激光首先通过由法拉第旋光器和 1/2 波片组成

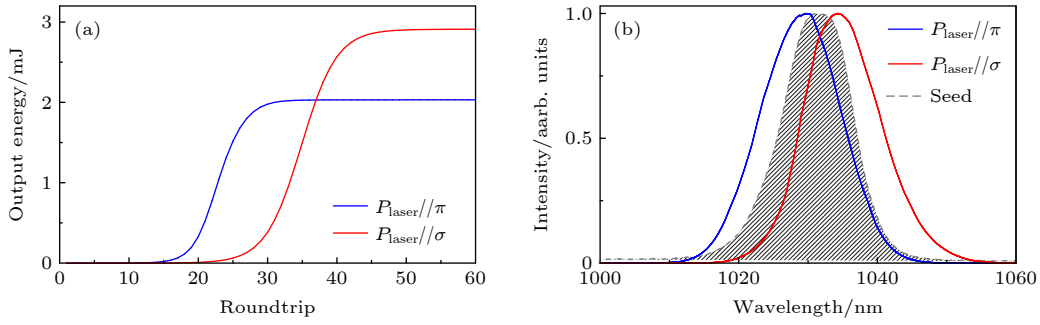


图 4 Yb:CYA 晶体在 π 和 σ 偏振方向下的放大输出仿真 (a) 脉冲能量; (b) 放大光谱

Fig. 4. The output characteristics and simulation results along π and σ axes of Yb:CYA crystal: (a) Pulse energy; (b) amplified spectrum.

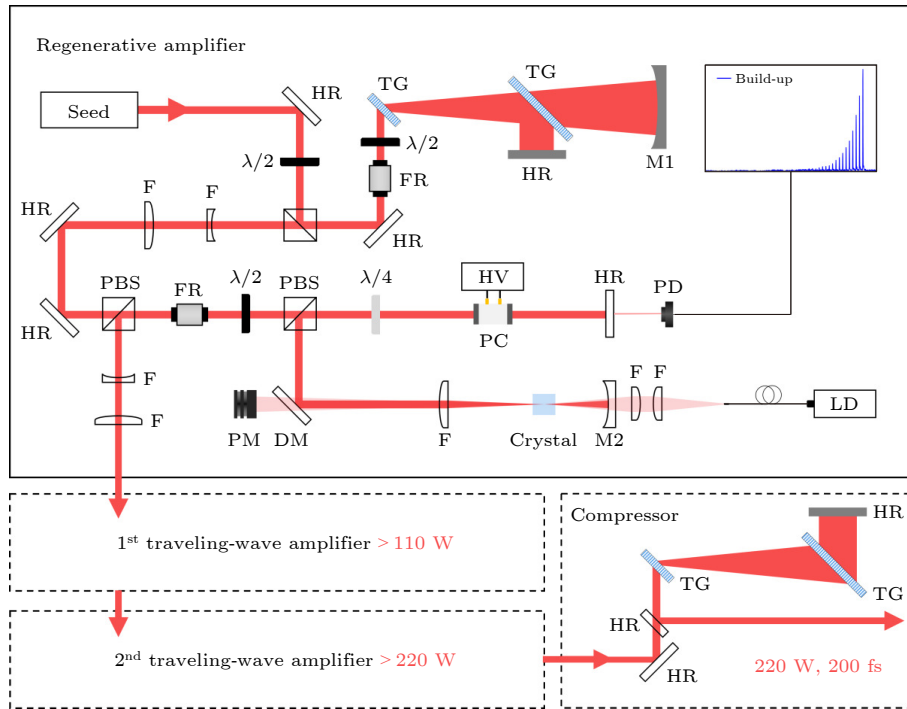


图 5 Yb:CYA 再生放大器实验装置 (Seed 为 Yb:KGW 振荡器, HR 为平面高反镜片, $\lambda/2$ 为 1/2 波片, PBS 为偏振分光棱镜, FR 为法拉第旋光器, TG 为透射光栅, M1 为平凹反射镜, F 为激光透镜, $\lambda/4$ 为 1/4 波片, HV 为高压驱动, PC 为普克尔盒, Crystal 为激光晶体, M2 为激光双色镜, LD 为 981 nm 半导体激光器, DM 为激光双色镜, PM 为功率计, PD 为光电探测器)

Fig. 5. Experimental set-up of the Yb:CYA regenerative amplifier. (Seed, Yb:KGW oscillator; HR, dielectric flat mirror; $\lambda/2$, half-wave plate; PBS, polarizing beam splitter; FR, faraday rotator; TG, transmission grating; M1, concave laser mirror; F, lens; $\lambda/4$, quarter wave plate; HV, pockels cell driver; PC, pockels cell; Crystal, Yb:CYA crystal; M2, dichroic mirror; LD, 981 nm laser diode; DM, dichroic mirror; PM, power meter; PD, photodiode).

的一级隔离装置, 避免光学元件回光干扰种子光源的锁模状态. 之后种子激光进入同心展宽器进行时域脉冲展宽. 展宽器采用的透射光栅刻线为 1600 mm^{-1} , 当两个光栅的间距为 160 mm 时, 提供 -9.04 ps^2 的二阶群延迟色散和 0.0794 ps^3 的三阶色散, 理论上能够将种子脉冲展宽至 321.3 ps. 利用高速示波器 (罗德施瓦茨 RTP164, 带宽为 16 GHz, 采样率为 $4 \times 10^{10} \text{ sample/s}$) 实际测量的展宽脉冲宽度 328.5 ps. 再生腔的总腔长 1.037 m,

种子脉冲往返再生腔一圈的时间为 6.92 ns, 普克尔盒加载高压的上升/下降沿时间为 5 ns, 种子脉冲的间隔为 13.3 ns, 因此满足控制单个脉冲在再生腔进行增益的时序条件. 再生腔中 Yb:CYA 晶体处的激光模式半径为 $182.9 \mu\text{m}$, 通过测量进入再生腔前的展宽激光光斑大小并加入像传递系统, 使展宽激光在 Yb:CYA 激光晶体处的光斑与泵浦激光和再生腔激光模式三者实现空间匹配, 以实现高效率的放大输出. 再生腔中的电光晶体为 40 mm

长的偏硼酸钡 (β -BaB₂O₄, BBO)晶体, BBO 处的激光模式半径为 505.3 μm . 为了评估放大过程中积累的非线性相位对脉冲的不利影响, 在再生腔输出能量 3 mJ 时, 计算得 Yb:CYA晶体和 BBO 晶体处的 B 积分分别为 1.11 和 0.135.

3.1 Yb:CYA 晶体在 π 偏振下的放大实验

Yb:CYA 晶体的 π 轴与种子激光的偏振方向平行时, 将再生放大器的重复频率设置为 10 kHz. 通过观察放大脉冲的稳定性, 对注入再生腔的种子能量进行优化. 在注入种子能量为 1.5 nJ 时, 放大脉冲强度稳定、无脉冲能量分叉情况. 放大输出功率曲线如图 6(a) 所示, Yb:CYA 晶体 π 轴放大的斜效率为 23.4%, 泵浦吸收斜率为 75.6%, 未被晶体吸收的泵浦功率由图 5 中的功率计实时测量. 在 LD 最大泵浦功率 120 W 情况下, 吸收泵浦功率为 88.1 W, 吸收率为 72.9%, 放大输出功率为 16.1 W, 对应的单脉冲能量大于 1.6 mJ, 吸收泵浦下的光光转换效率为 18.2%. 此时, 放大输出光谱如图 6(b) 所示, 中心波长为 1030 nm, 光谱半高宽为 16 nm. 如图 7 所示, 放大光谱对应的傅里

叶变换极限 (Fourier transform limited, FTL) 为 100 fs, 压缩后的激光脉冲宽度为 149 fs, 压缩效率为 92.1%, 对应的峰值功率大于 9.5 GW. 输出能量为 1.6 mJ 时, 普克尔盒的加压时间为 250 ns, 增益圈数为 36 圈. 而在放大仿真中, 增益 40 圈获得的饱和输出能量为 2.03 mJ, 光谱中心位于 1029.7 nm, 光谱半高宽为 14 nm. 总体来看, 实验结果和仿真结果较为吻合, 说明文中所论述的放大模型比较准确地反映了 Yb:CYA 晶体 π 偏振的放大性质.

3.2 Yb:CYA 晶体在 σ 偏振下的放大实验

通过旋转 Yb:CYA 晶体, 使其 σ 轴与种子激光的偏振方向平行. 在重复频率 10 kHz、注入种子能量 2 nJ 情况下, Yb:CYA 晶体 σ 偏振的放大功率曲线如图 8(a) 所示, 放大斜效率为 38.3%, 泵浦吸收斜率为 82.6%. 在 LD 最大功率 120 W 泵浦下, Yb:CYA 晶体吸收的泵浦功率为 99.81 W, 泵浦吸收率为 83.18%, 放大输出功率为 28.7 W, 对应吸收泵浦下的光转换效率为 28.8%. 此时, 放大输出光谱如图 8(b) 所示, 中心波长为 1037 nm, 光

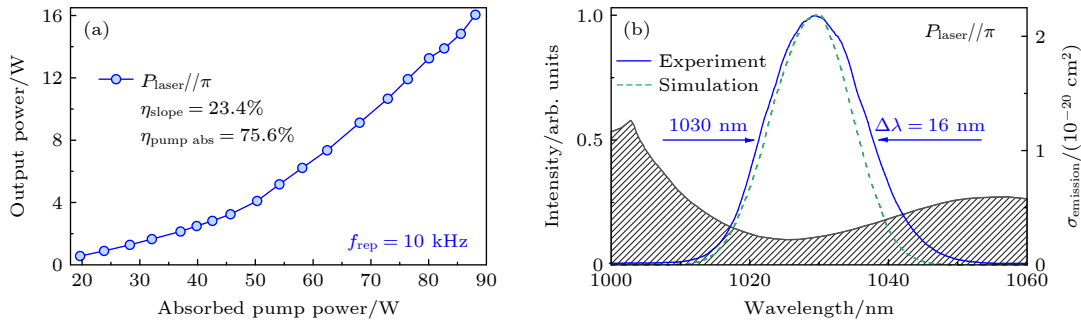


图 6 Yb:CYA 晶体在 π 偏振方向下的放大输出 (a) 功率曲线; (b) 放大光谱

Fig. 6. The amplified output results along π -axis of Yb:CYA crystal: (a) Measured power performance of the regenerative amplifier; (b) optical spectrum of amplified pulse.

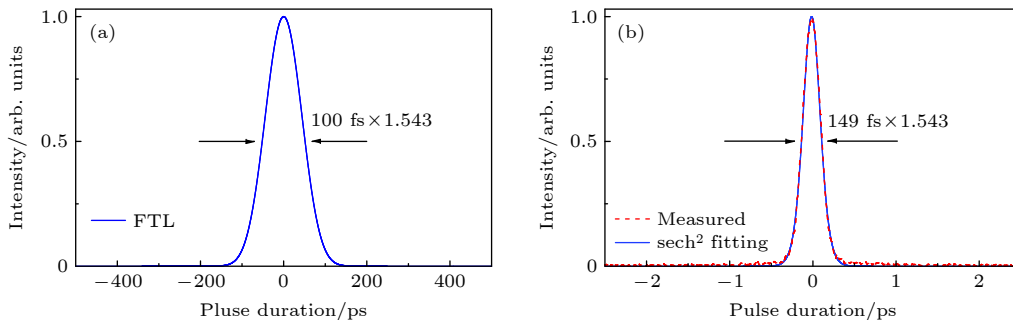


图 7 (a) 傅里叶变换极限脉冲宽度; (b) 压缩脉冲的自相关曲线

Fig. 7. (a) Fourier transform limited pulse duration; (b) intensity autocorrelation trace of amplified pulse.

谱半高宽为 11 nm. 由图 9 可看出, 放大光谱支持的傅里叶极限脉冲宽度和压缩脉冲宽度分别为 120 fs 和 178 fs, 压缩效率为 91.5%, 对应的峰值功率大于 14.2 GW. 有效的热管理使 Yb:CYA 放大器在高功率输出下, 保持了良好的光束质量. 在最大输出功率下 x 轴和 y 轴的光束质量因子 M^2 分别为 1.09 和 1.17, 如图 10(a) 所示, 近场光斑圆度为 0.95. 同时, 使用高速示波器对放大脉冲建立过程和输出脉冲时域序列进行监测. 放大脉冲建立过程如图 10(b) 所示, 普克尔盒的加压时间为 347 ns,

种子增益圈数为 50 圈, 实验中通过调节再生腔的损耗有效抑制了放大过程中的自发辐射. 输出脉冲的时域状态如图 11 所示, 为了保证时域信号的准确性, 测试期间对普克尔盒高压振铃信号进行屏蔽. 在 500 ps/div 的尺度下, 单发测量主脉冲与其 1 ns 之前噪声信号的峰值强度比值大于 1500:1; 主脉冲与其 1 ns 之后噪声信号的峰值强度比值大于 210:1. 在 50 μ s/div 的尺度下, 测得相邻激光脉冲的重复频率为 10.005 kHz, 脉冲间强度保持一致, 长时间监测无能量分叉和紊乱情况.

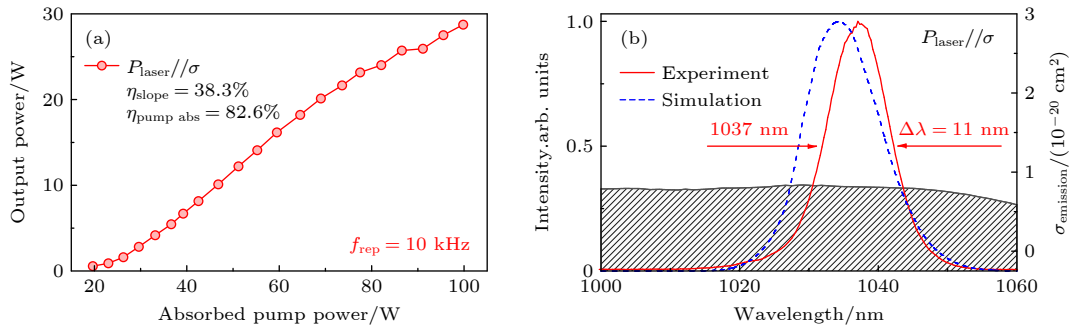


图 8 Yb:CYA 晶体在 σ 偏振方向下的放大输出 (a) 功率曲线; (b) 放大光谱

Fig. 8. The amplified output results along σ -axis of Yb:CYA crystal: (a) Measured power performance of the regenerative amplifier; (b) optical spectrum of amplified pulse.

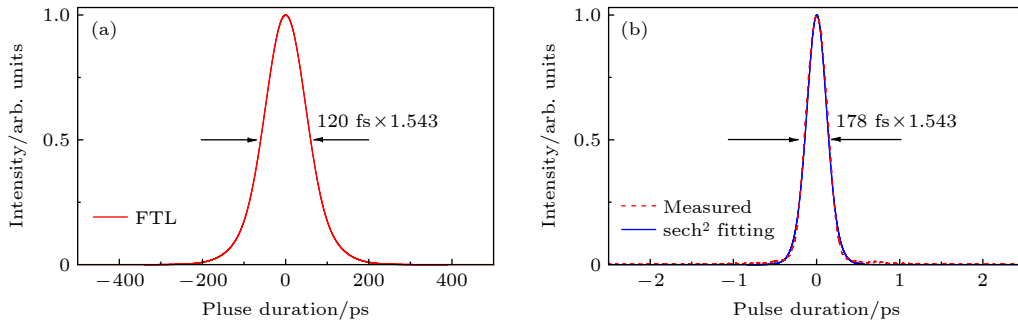


图 9 (a) 傅里叶极限脉冲宽度; (b) 压缩脉冲的自相关曲线

Fig. 9. (a) The Fourier-limit pulse duration; (b) intensity autocorrelation trace of amplified pulse.

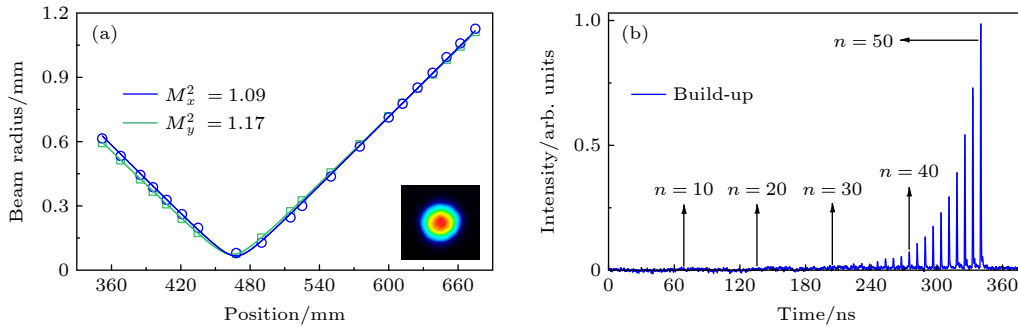


图 10 (a) 光束质量和光斑形状; (b) 放大脉冲建立过程

Fig. 10. (a) The output beam quality and profile; (b) the build-up of pulse energy.



图 11 高速示波器测量的脉冲轨迹 (a) 500 ps/div; (b) 50 μs/div

Fig. 11. Sampling oscilloscope traces of laser pulse in the time scale of (a) 500 ps/div and (b) 50 μs/div.

表 2 Yb:CYA 晶体 π 和 σ 偏振放大参数比较

Table 2. Comparison of amplification indicators for π and σ axes of Yb:CYA crystal.

偏振	类型	平均功率 P/W	重复频率 f/kHz	脉冲能量 E/mJ	中心波长 λ/nm	光谱宽度 $\Delta\lambda/nm$	脉冲宽度 τ/fs
π	仿真	20.3	10	2.03	1030	14	115
	实验	16.1	10	1.61	1030	16	149
σ	仿真	29.1	10	2.91	1034	13	117
	实验	28.7	10	2.87	1037	11	178

3.3 Yb:CYA 晶体放大结果分析

Yb:CYA 晶体 π 和 σ 偏振放大参数的比较见表 2. 实验结果与放大模型计算的 Yb:CYA 晶体 π 和 σ 偏振下的增益发射性质基本一致. 在 1000—1060 nm 内, Yb:CYA 晶体 π 偏振的激光发射截面峰值在 1005.7 nm 出现, 大小为 $1.28 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 且中心位于 1025.1 nm 处的增益凹陷有利于抑制放大过程中的增益窄化效应. 因此, 实验研究和仿真计算得到的放大光谱均往短波处偏移且无明显的增益窄化. 特别是放大光谱 1030 nm 的中心波长与 Yb:YAG 的增益峰重合, 因此可采用千瓦级的 Yb:YAG 薄片激光装置进行行波放大, 是产生单脉冲能量百毫焦量级飞秒激光一个可行的技术路线.

Yb:CYA 晶体 σ 偏振增益发射谱十分平坦, 处于 1000—1050 nm 范围内的发射截面均大于 $0.7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 非常适合产生高功率的放大激光. 但不同频率成分增益一致带来的问题是, 种子光谱的中心频率会在增益竞争中占据主导地位, 会产生不同程度的增益窄化. 在仿真计算中, 采用放大光谱从最初的 15 nm 窄化至 13 nm. 而在实验研究中, 放大光谱从最初的 15 nm 窄化至 11 nm. 可以看出, 实际放大过程中的增益窄化效应的影响更大. 因此, 在 Yb:CYA 晶体 σ 偏振的放大过程中, 有必要研究增益编辑的手段对种子光谱进行整形, 以同时获得高平均功率和窄脉冲宽度的输出.

4 结论与展望

本文开展了对 Yb:CYA 晶体 π 和 σ 偏振放大特性的理论和实验研究. 在理论研究中, 根据 Yb:CYA 晶体的热透镜焦距, 设计了热稳定性良好的模式可调再生腔; 并对晶体 π 和 σ 偏振的放大输出能量和光谱进行计算, 以此指导实验. 在 10 kHz 重复频率下, 从 Yb:CYA 晶体 π 偏振的放大实验中, 获得了平均功率 16.1 W、光谱中心 1030 nm、光谱半高宽 16 nm 的输出, 压缩后脉冲宽度为 149 fs, 压缩效率为 92.1%, 对应的峰值功率大于 9.5 GW; 在 σ 偏振获得了平均功率 28.7 W、光谱中心 1037 nm、光谱半高宽 11 nm 的输出, 压缩脉冲宽度为 178 fs, 压缩效率为 91.5%, 对应的峰值功率大于 14.2 GW. 结合实验结果与理论计算可以得出, 由于 Yb:CYA 晶体 π 偏振的发射截面在 1025.1 nm 附近的凹陷, 有利于抑制增益窄化, 因此适合宽光谱的激光放大; 在 1000—1060 nm 内, σ 偏振的增益截面更大, 有利于获得高平均功率的激光放大.

以上研究结果实现了目前 Yb:CYA 晶体最高平均功率和最大单脉冲能量的再生放大输出, 但 Yb:CYA 晶体的潜力远不止此. 对 Yb:CYA 晶体的行波放大模拟结果如图 12(a) 所示, 将 Yb:CYA 再生放大器输出的平均功率 28.7 W 的激光, 注入第 1 级泵浦功率 400 W 的 4 通行波放大器可以获

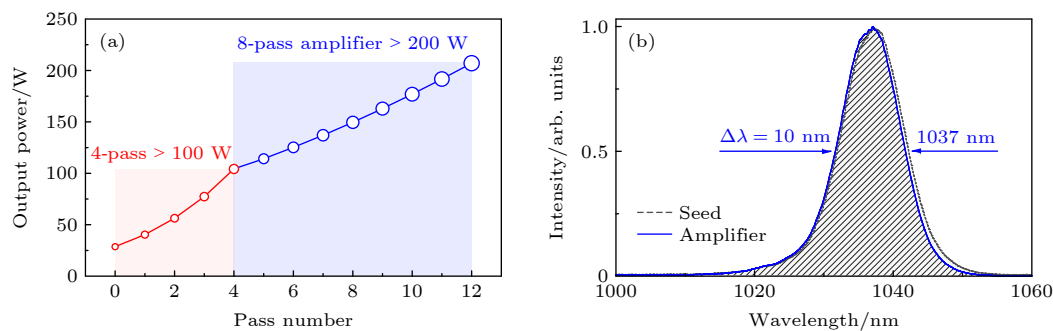


图 12 Yb:CYA 晶体的行波放大仿真 (a) 输出功率; (b) 放大光谱

Fig. 12. The simulation results of the Yb:CYA traveling-wave amplifier: (a) Output power; (b) amplified spectrum.

得平均功率 104.2 W 的输出, 继续通过第 2 级泵浦功率 500 W 的 8 通行波放大器可以将平均功率提升至 207.1 W. 经过两级行波放大后的光谱如图 12(b) 所示, 中心波长为 1037 nm, 光谱宽度为 10 nm. 压缩后有望获得最高平均功率 200 W、最大单脉冲能量 20 mJ、脉冲宽度小于 200 fs 的激光输出. 上述光源将为高重复频率阿秒光源^[24]、太赫兹^[25]以及激光离子加速^[26]领域的研究奠定光源基础.

参考文献

- [1] Midorikawa K 2022 *Nat. Photonics* **16** 267
- [2] D'Arcy R, Chappell J, Beinortaite J, et al. 2022 *Nature* **603** 58
- [3] Lloyd-Hughes J, Oppeneer P M, Pereira dos Santos T, et al. 2021 *J. Phys. Condens. Matter* **33** 353001
- [4] Maiuri M, Garavelli M, Cerullo G 2020 *J. Am. Chem. Soc.* **142** 3
- [5] Kroll F, Brack F E, Bernert C, et al. 2022 *Nat. Phys.* **18** 316
- [6] Lin Z Y, Hong M H 2021 *Ultrafast Sci.* **2021** 9783514
- [7] C. Phillips K, H. Gandhi H, Mazur E, Sundaram S K 2015 *Adv. Opt. Photonics* **7** 684
- [8] Iwasawa H 2020 *Electron. Struct.* **2** 043001
- [9] Zheng W, Jiang P Z, Zhang L F, Wang Y, Sun Q, Liu Y Q, Gong Q H, Wu C Y 2021 *Rev. Sci. Instrum.* **92** 043709
- [10] Miao J W, Ishikawa T, K. Robinson I, M. Murnane M 2015 *Science* **348** 530
- [11] Auböck G, Consani C, Mourik F V, Chergui M 2012 *Opt. Lett.* **37** 2337
- [12] Hönninger C, Paschotta R, Graf M, et al. 1999 *Appl. Phys. B* **69** 3
- [13] Zhu J F, Tian W L, Gao Z Y, Wei Z Y 2017 *Chin. J. Lasers* **44** 0900001 (in Chinese) [朱江峰, 田文龙, 高子叶, 魏志义 2017 *中国激光* **44** 0900001]
- [14] Bai C, Tian W L, Wang G Y, Zheng L, Xu R, Zhang D C, Wang Z H, Zhu J F, Wei Z Y 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 0501005 (in Chinese) [白川, 田文龙, 王阁阳, 郑立, 徐瑞, 张大成, 王兆华, 朱江峰, 魏志义 2021 *中国激光* **48** 0501005]
- [15] Russbueldt P, Mans T, Weitenberg J, Hoffmann H D, Poprawe R 2010 *Opt. Lett.* **35** 4169
- [16] Negel J P, Voss A, Ahmed M A, Bauer D, Sutter D, Killi A, Graf T 2013 *Opt. Lett.* **38** 5442
- [17] Li D Z, Xu X D, Zhu H M, Chen X Y, Tan W D, Zhang J, Tang D Y, Ma J, Wu F, Xia C T, Xu J 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 1650
- [18] Rudenkov A, Kisel V, Yasukevich A, Hovhannesian K, Petrosyan A, Kuleshov N 2016 *Opt. Lett.* **41** 2249
- [19] Rudenkov A, Kisel V, Yasukevich A, Hovhannesian K, Petrosyan A, Kuleshov N 2018 *Devices Methods Meas.* **9** 205
- [20] S. Petrov L, Georgiev K, Velkov D, Trifonov A, Xu X D, Xu J, Buchvarov I 2022 *Conference on Lasers and Electro-Optics San Jose* The United States of America, May 15–20, 2022 pJTh3B.23
- [21] Loiko P, Becker P, Bohatý L, et al. 2017 *Opt. Lett.* **42** 2275
- [22] Dörring J, Killi A, Morgner U, Lang A, Lederer M, Kopf D 2004 *Opt. Express* **12** 1759
- [23] Kroetz P, Rühl A, Murari K, Cankaya H, Kärtner F X, Hartl I, Miller R J D 2016 *Opt. Express* **24** 9905
- [24] Ye P, Oldal L G, Csizmadia T, Filus Z, Grósz T, Jójárt P, Seres I, Bengery Z, Gilicze B, Kahaly S, Varjú K, Major B 2022 *Ultrafast Sci.* **2022** 9823783
- [25] Wang T Z, Lei H Y, Sun F Z, Wang D, Liao G Q, Li Y T 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 085205 (in Chinese) [王天泽, 雷弘毅, 孙方正, 王丹, 廖国前, 李玉同 2021 *物理学报* **70** 085205]
- [26] Ma W J, Liu Z P, Wang P J, Zhao J R, Yan X Q 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 084102 (in Chinese) [马文君, 刘志鹏, 王鹏杰, 赵家瑞, 颜学庆 2021 *物理学报* **70** 084102]

SPECIAL TOPIC—Attosecond physics • COVER ARTICLE

Yb:CaYAlO₄ regenerative amplifier*

Wang Ge-Yang¹⁾ Bai Chuan¹⁾ Mai Hai-Jing¹⁾ Zheng Li¹⁾
 Tian Xuan¹⁾ Yu Yang²⁾ Tian Wen-Long^{1)†} Xu Xiao-Dong⁴⁾
 Wei Zhi-Yi³⁾ Zhu Jiang-Feng^{1)‡}

1) (*School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*Academy of Advanced Interdisciplinary Research, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

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

4) (*School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China*)

(Received 9 November 2022; revised manuscript received 22 December 2022)

Abstract

Attosecond science is one of the driving forces for developing the femtosecond amplifiers of high average power and ultrashort pulse duration. In this work, the regenerative amplification is studied experimentally and theoretically based on Yb:CaYAlO₄ crystal for the practical needs of high-repetition-rate attosecond light sources. In the theoretical study, a mode-tunable regenerative cavity with good thermal stability is designed based on the thermal lens calculations of Yb:CaYAlO₄ crystal; the amplified output energy and spectra of π and σ polarization of the crystal are calculated. In the experiment, the π -axis of Yb:CaYAlO₄ crystal is parallel to the laser polarization, and the laser amplifier emits 1.61 mJ pulses with average power 16.1 W. Notably, the dip of the π -polarization emission spectrum near 1025.1 nm compensates for the gain narrowing of the seed laser during amplification. Thus, the center wavelength and the spectral full width at a half maximum of the amplified laser are 1030 nm and 16 nm respectively. Using a grating-pair for compression, 149 fs pulses with peak power 9.5 GW are obtained. In comparison, the σ -polarization emission spectrum of Yb:CaYAlO₄ crystal is relatively flat in a range from 1000 to 1050 nm, but with a larger gain cross-section. When the laser polarization is parallel to the σ -axis of Yb:CaYAlO₄ crystal, 2.87 mJ pulses at 10 kHz repetition rate are achieved, with an average power of 28.7 W. In this case, the center wavelength and the spectral full width at half maximum of the amplified laser are 1037 nm and 11 nm respectively. Using a grating-pair for compression, 178 fs pulses with peak power of 14.2 GW are obtained. The beam quality factor measured is 1.09 along the x -axis of the amplified laser and 1.17 along the y -axis. To the best of our knowledge, this is the highest average power and the maximum pulse energy obtained from the Yb:CaYAlO₄ amplifier. For applications in high-repetition-rate attosecond light sources, terahertz generation and optical parametric amplification, subsequent laser outputs with average power 200 W, pulse energy 20 mJ and pulse duration less than 200 fs are expected to be achieved by adding two stages of traveling-wave amplification.

Keywords: ytterbium-doped laser crystal, regenerative amplifier, high power femtosecond laser, attosecond science

PACS: 42.55.-f, 42.55.Xi, 42.60.Da, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.72.20222141

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFB4601102), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11774277, 61975071), the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi, China (Grant No. 2019JCW-03), and the Science and Technology Program of Xi'an, China (Grant No. 202005YK01).

† Corresponding author. E-mail: wltian@xidian.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jfzhu@xidian.edu.cn



Yb:CaYAlO₄再生放大器

王阁阳 白川 麦海静 郑立 田轩 于洋 田文龙 徐晓东 魏志义 朱江峰

Yb:CaYAlO₄ regenerative amplifier

Wang Ge-Yang Bai Chuan Mai Hai-Jing Zheng Li Tian Xuan Yu Yang Tian Wen-Long Xu Xiao-Dong Wei Zhi-Yi Zhu Jiang-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 054204 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222141

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222141>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于M型掺镱光纤的近单模2 kW光纤放大器

Near-single-mode 2-kW fiber amplifier based on M-type ytterbium-doped fiber

物理学报. 2022, 71(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211751>

基于锯齿波脉冲抑制自相位调制的高功率窄线宽单频脉冲光纤激光放大器

High-power narrow-linewidth single-frequency pulsed fiber amplifier based on self-phase modulation suppression via sawtooth-shaped pulses

物理学报. 2021, 70(21): 214202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210496>

基于双向正交泵浦半导体光放大器结构的全光相位保持幅度再生技术

All-optical phase-preserving amplitude-regeneration technology based on bidirectional orthogonal-pumped semiconductor optical amplifier configuration

物理学报. 2022, 71(20): 204204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220703>

窄线宽纳秒脉冲光纤拉曼放大器的理论模型和数值分析

Theoretical and numerical study on narrow-linewidth nanosecond pulsed Raman fiber amplifier

物理学报. 2018, 67(15): 154202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172679>

少模光纤放大器中的准静态模式不稳定实验研究

Quasi-static mode instability in few-mode fiber amplifier

物理学报. 2018, 67(14): 144203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180140>

一种可用于轨道角动量的受激布里渊放大的光子晶体光纤放大器

Design of photonic crystal fiber amplifier based on stimulated Brillouin amplification for orbital angular momentum

物理学报. 2022, 71(7): 074206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211909>