

激光与光电子学进展

时域波形可编程的飞秒脉冲串掺镱光纤放大

张聪聪¹, 刘洋^{1**}, 谢戈辉¹, 邓泽江¹, 熊世萍¹, 罗大平¹, 李文雪^{1,2*}, 吴斌³, 陈坤峰³¹华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062;²山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006;³中国电子科技集团公司第四十一研究所电子测试科学技术实验室, 山东 青岛 266000

摘要 提出了一种可编程的激光脉冲选取和幅度控制的方法, 以产生具有任意时域波形的脉冲串模式激光。采用具有灵活的可编程性的基于现场可编程门阵列结构的脉冲选择单元驱动声光调制器, 实现对脉冲串内每个激光脉冲能量的精确控制。基于该创新的脉冲时域特性调控技术, 利用掺镱啁啾脉冲光纤放大系统, 实现了不同时域波形的高能量激光脉冲串, 脉冲串能量为 20 μJ , 脉冲串间重复率为 1 MHz, 脉冲串内单脉冲宽度小于 300 fs。

关键词 激光光学; 超快激光器; 光纤激光; 脉冲整形

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2314001

Time-Domain Waveform Programmable Femtosecond Burst-Mode Ytterbium-Doped Fiber Amplification

Zhang Congcong¹, Liu Yang^{1**}, Xie Gehui¹, Deng Zejiang¹, Xiong Shiping¹, Luo Daping¹, Li Wenxue^{1,2*}, Wu Bin³, Chen Kunfeng³

¹State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

²Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

³Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, The 41st Research Institute of CETC, Qingdao, Shandong 266000, China

Abstract In this paper, a programmable method of laser pulse selection and amplitude control is proposed to generate pulse bursts with arbitrary time-domain waveform. A flexible and programmable pulse picker unit based on field-programmable gate array is used to drive the acousto-optic modulator to realize the fine control of each pulse's energy in bursts. Based on this innovative regulation technology of pulses' time-domain characteristics, high-energy bursts with different time-domain waveforms are realized by using ytterbium-doped chirped pulse fiber amplification system. The outputs of the system are the bursts with burst energy of 20 μJ , burst repetition rate of 1 MHz, and pulse width of less than 300 fs.

Key words laser optics; ultrafast lasers; fiber lasers; pulse shaping

OCIS codes 140.7090; 140.3510; 320.5540

1 引言

在过去的十年里,超短脉冲串模式激光技术已

经广泛应用在激光诊断^[1-2]、材料微加工^[3-4]、组织消融^[5-6]等科学、工业、生物医疗相关的领域。脉冲串模式是指一组有限数量的高重复率脉冲以低的多

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-02-27; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(11874153, 11904105, 11621404)、国家重点研发计划量子调控与量子信息专项(2018YFA0306301)、中国博士后科学基金面上项目(2020M681223)

通信作者: *wxli@phy.ecnu.edu.cn; **yliu@lps.ecnu.edu.cn;

的重复率进行重复。其内部高的重复率对应短的脉冲间隔,使高能量脉冲能够在脉冲诱导热扩散之前以较短的时间尺度传送到目标^[7],提高了烧蚀效率。同时通过降低脉冲串间的重复率,有效地降低了热效应。另外,脉冲串能同时实现 MHz 的高重复率和高脉冲能量,进一步推动了高速流量测量^[8]、激光加速器^[9]和燃烧诊断^[10]的发展。

随着光纤激光器领域的发展^[11-12],脉冲串模式光纤激光器因其具有较高的单通增益、高转换效率和高紧凑性等优点而倍受关注。光纤激光器还可提供等间距脉冲串,不仅具有高重复率、飞秒脉冲持续时间、近衍射极限光束质量等方面的优势,而且能够提供高能量的脉冲。凭借这些优势,在 2011 年土耳其比尔肯特大学的 Kalaycıoğlu 等^[13]报道了单脉冲能量为 20 μJ 的高能量脉冲串光纤激光器,脉冲串内重复率为 100 MHz。2012 年该小组又提出了采用预整形的方式实现能量分布极为均匀的脉冲串^[14]。同年,德国应用物理研究所的 Breitkopf 等^[15]也报道了在 10 MHz 脉冲串内重复率下实现的 30 μJ 单脉冲能量的飞秒脉冲串。2014~2018 年 Kalaycıoğlu 课题组为探究超短脉冲串在材料加工过程中的消融冷却机制而开发了高平均功率^[16-17]和 GHz 高重复率^[18-19]的飞秒脉冲串光纤激光器,并基于上述系统输出的脉冲串激光,证明了脉冲串激光独特的消融冷却特性能够将烧蚀效率提高一个数量级^[7]。此外,也有报道基于掺铥光纤的脉冲串模式激光器,工作波长为 2 μm ^[20-21],为研究高含水量组织的烧蚀冷却材料去除机制提供了新的光源选择。

基于脉冲串模式光纤激光器在材料加工研究方面的巨大潜力,使得实现一种时域波形可编程的飞秒脉冲串就显得尤为重要。此前有报道可以直接产生脉冲串激光的光纤振荡器^[22-24],这种振荡器的频率及脉冲数量的调节范围和灵活性都有限,难以实现对脉冲串中任意一个脉冲的强度调控。现有的脉冲串模式光纤激光器系统^[13-14,16-19],大多采用声光调制器(AOM)产生脉冲串激光。特别是,结合 AOM 的强度调制能力和任意波形发生器,脉冲串模式的光纤激光器具有能量分布可调节的特点,既可以灵活地变化脉冲串的宽度,又可以调控串内脉冲的强度。与脉冲时域波形固定的激光器相比,可以在线快速优化工艺以应对不同的材料,提高加工效率。该方案受限于对脉冲时域波形的

调节依赖于任意波形发生器产生的调制信号,并且需要配合现场可编程门阵列(FPGA)电路实现对驱动控制信号时序的精确控制,以及难以实现对单个脉冲强度的精确调控。此外,该方案的电路控制系统存在体积庞大、操作复杂的缺点,能够生成的脉冲串形状也会受到任意波形发生器有限的波形种类的限制。

为了解决上述问题,本文提出了一种系统简单的、集成化的、可编程时域波形的飞秒脉冲串模式光纤激光器控制方案,既能够实现脉冲串中任意单个脉冲的强度控制,又能够简单灵活地编辑脉冲串的时域波形。利用 FPGA 电路高速信号处理能力实现快速的任意驱动信号编辑,可实现在单一的脉冲激光源的基础上生成任意形状的脉冲串。结合光纤啁啾脉冲放大系统,分别演示了矩形、阶梯形、正弦形、凹形和指数形等五种波形的脉冲串及放大,产生了脉冲串间重复率为 1 MHz,脉冲串能量为 20 μJ ,单脉冲宽度可压缩至 300 fs 的脉冲串激光。基于实验研究,该方案相比任意波形发生器具有更好的操作灵活性,简化了电路控制系统,降低了系统成本,特别是对脉冲串内任意脉冲强度的调控能力更强,为进一步研究不同材料的烧蚀冷却工艺提供了新的光源脉冲调控方案。

2 实验系统

整个实验系统如图 1 所示,包括了锁模光纤振荡器、脉冲展宽器、四级光纤放大器和位于预放大器后的可编程脉冲选择器。该振荡器采用工作在展宽脉冲状态的非线性偏振旋转锁模激光器,输出的脉冲重复率为 41 MHz,中心波长为 1040 nm,光谱带宽为 29 nm,平均输出功率为 6.5 mW。本文选用了 TeraXion 公司的 TPSR-1040T-22F-0P2-0T1 型啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)作为展宽器,将脉冲展宽到 500 ps,以减小放大过程中的非线性效应的累积。它的中心波长为 1040 nm,反射的光谱宽度为 22 nm,二阶色散的常规值为 22.2089 ps^2 ,调谐范围 $\geq 0.45 \text{ ps}^2$,三阶色散的常规值为 -0.30514 ps^3 ,调谐范围 $\geq 0.02 \text{ ps}^3$ 。CFBG 的群延迟色散和三阶色散经过精确设计,用于匹配各级光纤放大器和压缩器的色散。脉冲压缩器使用的光栅对为 1740 line/mm 的透射式光栅。展宽后的脉冲进入一级单模光纤预放大器来补偿展宽器的损耗。该预放大器使用长度为 1 m 的掺镱单包层保偏光纤

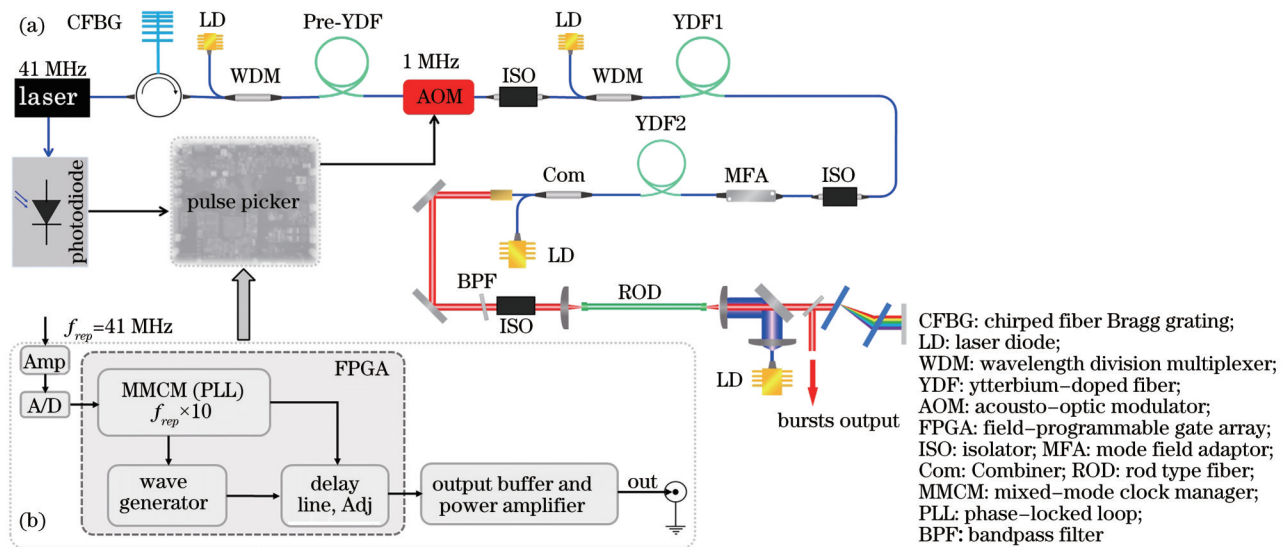


图1 实验装置示意图。(a)掺镱光纤放大器系统;(b)脉冲选择器功能实现框图

Fig. 1 Schematic of experimental setup. (a) Ytterbium-doped fiber amplifier system; (b) function realization block diagram of pulse picker

(Yb401-PM, Coractive, 加拿大)作为增益介质,光纤的纤芯直径为 $6 \mu\text{m}$,在 976 nm 处吸收增益为 600 dB/m 。使用 $976/1064 \text{ nm}$ 波分复用器将半导体激光器输出的 976 nm 泵浦光耦合到放大器中。使用相对较长的增益光纤可确保 60% 的放大效率,同时也会引起增益窄化效应。在耦合进入脉冲选择器之前,脉冲序列的平均输出功率被提升到 160 mW ,光谱半峰全宽为 15 nm 。由于较高的脉冲串重复率 1 MHz ,实验采用连续泵浦的方式,其放大自发辐射(ASE)也很小且在可接受范围内^[16]。

脉冲选择器包括 FPGA 电路和 AOM。AOM (S-M200-0.1C2G-3-F2P, Gooch&Housego, 英国)的插入损耗为 3.5 dB ,消光比为 45 dB ,上升/下降时间为 10 ns 。在系统中 AOM 既可以用于选择单个脉冲,又可以用于调整脉冲串时域波形,编辑不同的脉冲串形状。实验中采用快速光电二极管来检测振荡器的重复率信号,并将其作为 FPGA 的参考时钟源。FPGA 的功能实现框图如图 1(b)所示。为了保证检测的正确性,需要将脉冲信号转换为逻辑电平信号,并将时域中的脉冲从皮秒展宽到纳秒,这些均可通过高速电压比较器实现。FPGA 用于进行一系列的信号处理操作。通过内部参数的配置,可以实现单脉冲和任意脉冲串两种工作模式。通过移位寄存器引入额外的时间延迟,调节相移来匹配光脉冲,实现最佳输出。高速数模转换器和功率放大器用于输出模拟驱动信号。选择

FPGA 作为信号处理单元,不仅因为 FPGA 具有丰富的逻辑资源,而且具有很强的可编程性、可扩展性和可实现较高的时钟频率。利用 FPGA 内部的混合模式时钟管理器,将从激光器的重复率得到的时钟源乘以 10 ,倍频得到的高频时钟作为信号处理的时钟。这有助于在延迟调整时获得更高的分辨率,以及更好地抑制声光调制时不需要的脉冲。对 FPGA 的内部逻辑电路布线和输入/输出端口块进行了优化,以提供最佳的时序和电路利用率。脉冲幅度、脉冲分频数和脉冲串时间宽度均可设置为不同的参数。因此,用户可以使用各种配置进行操作。在实验中,脉冲串间重复率被固定在 1 MHz ,并选择了 5 种脉冲串包络形状,脉冲串时间宽度分别为 150 ns 和 500 ns ,用来演示可编程脉冲串的放大。

经过 AOM 的调制,获得了重复率为 1.045 MHz 、平均功率为 3 mW 的脉冲串,以五种时域形状作为示例。一种是矩形的脉冲串,包含了 6 个脉冲,脉冲串能量为 1 nJ ,平均单脉冲能量为 0.17 nJ 。另外四种形状的脉冲串,如正弦形或阶梯形等,包含 20 个脉冲,每个脉冲串能量为 1 nJ ,单个脉冲的平均能量为 0.05 nJ 。利用三级掺镱光纤放大器作脉冲串放大器,光隔离器位于各级放大器之间,以防止反射 ASE。第一级放大器 Ytterbium-doped fiber 1 (YDF1)采用长度为 2 m 的掺镱光纤(PM-YSF-LO-HP, Nufem, 美国),纤芯直径为 $5 \mu\text{m}$,由 976 nm 激

光二极管正向泵浦。第二级放大器 YDF2 是芯径为 $10\ \mu\text{m}$ 、长度为 $2\ \text{m}$ 的保偏双包层掺镱光纤 (PLMA-YDF-10/125-HA, Nufern, 美国), 使用 $976\ \text{nm}$ 多模光纤耦合激光二极管反向泵浦。采用模场适配器扩展输入单模光纤的模场, 使之与 LP₀₁ 模的模场大小相匹配。这种特性确保了最大的光功率传输和最小的信号光束质量退化。将光纤盘绕为 $10\ \text{cm}$ 直径的圆环, 以保持预放大器的光束质量接近于单模。第二级放大器输出脉冲串激光的平均功率为 $1\ \text{W}$, 光谱半峰全宽为 $15.5\ \text{nm}$ 。

在第二级放大器之后, 使用中心波长为 $1040\ \text{nm}$ 的 $15\ \text{nm}$ 带通滤波器过滤输出光束以去除 ASE。第三级放大器采用了一个纤芯直径为 $85\ \mu\text{m}$ 、长度为 $0.8\ \text{m}$ 的棒状光纤增益模块 (aeroGAIN-rod, NKT-Photonics, 丹麦), 由光纤耦合的激光二极管在 $976\ \text{nm}$ 处反向泵浦。由于输入脉冲能量较低, 第三级放大器没有工作在增益饱和区, 所以转换效率只有 20% 。

3 结果与讨论

在激光系统的输出端, 脉冲串被放大到平均功

率 $20\ \text{W}$, 脉冲串重复率为 $1\ \text{MHz}$, 对应于 $20\ \mu\text{J}$ 的脉冲串能量。为了表征 AOM 的性能, 首先选择了一个时间宽度为 $150\ \text{ns}$ 的矩形波形来选取 6 个脉冲, 如图 2(a) 所示。图 2(b) 下图显示了在频域宽度为 $27\ \text{MHz}$ 的范围内放大矩形脉冲串的频谱特性, 分辨率带宽 (RBW) 为 $1.8\ \text{kHz}$, 中心频率为 $41.78\ \text{MHz}$ 。主旁瓣的 $3\ \text{dB}$ 带宽约为 $6.67\ \text{MHz}$, 与 $150\ \text{ns}$ 的脉冲串时间宽度对应一致。脉冲串频谱构成一个梳状结构, 内部间隔为 $1\ \text{MHz}$, 与脉冲串的重复率一致, 如图 2(b) 上图所示。其中, 在 $30\sim 40\ \text{MHz}$ 和 $45\sim 55\ \text{MHz}$ 变得比较明显的小信号频谱分量, 是图 2(a) 中脉冲串的第一个脉冲和最后一个脉冲受到门信号上升沿和下降沿的影响, 不能完全地被选择出来, 脉冲串的矩形包络不完全规则而造成的谐波分量。图 2(c) 是各级放大的光谱, 与种子脉冲的光谱 (阴影) 相比, 在非线性和增益的相互作用下, 各级放大后的光谱主峰出现红移, 并且受到增益窄化效应的影响, 脉冲的半峰全宽随着级联放大而不断减小。在第一级单模光纤放大 (YSF-LO-HP) 与第二级双包层光纤放大 (YDF 10/125) 输出光谱中 $1050\sim 1100\ \text{nm}$ 处均有不同强度 ASE。而由于带通

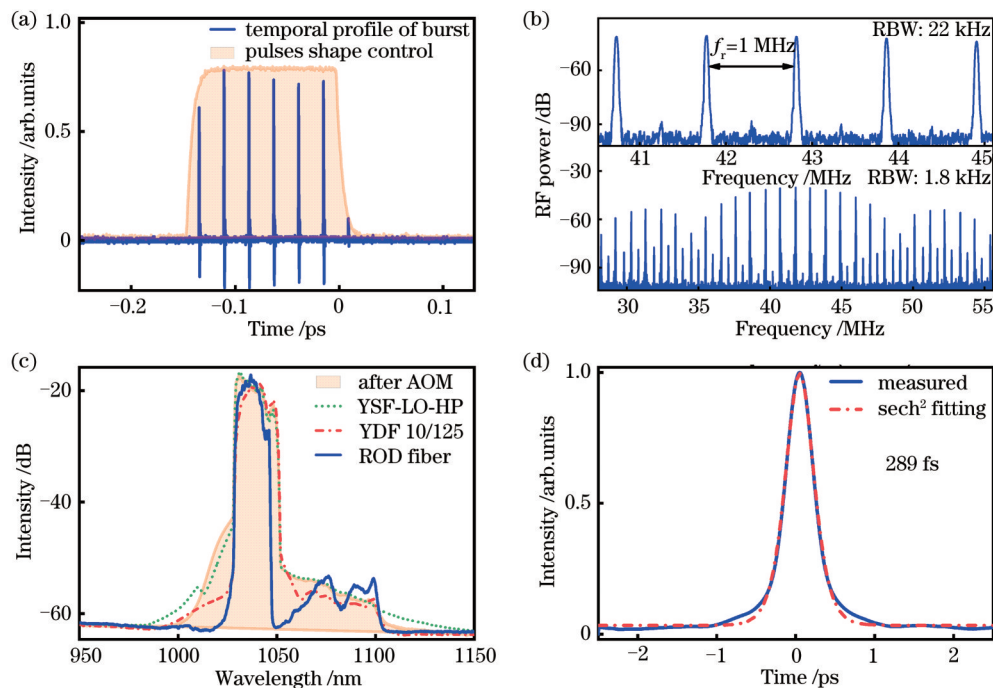


图 2 具有矩形波形的脉冲串分布。(a) $150\ \text{ns}$ 脉冲串的时间分布;(b) 放大脉冲串的射频频谱;(c) AOM 和三级放大器输出脉冲串的光谱;(d) 最后一级放大器的压缩脉冲的自相关轨迹

Fig. 2 Pulse burst profile with a rectangular shape. (a) Temporal profile of the amplified pulse burst with $150\ \text{ns}$ burst duration; (b) radio frequency spectrum of the amplified burst train; (c) optical spectrum of the output pulse bursts from the AOM and three stage amplifiers; (d) autocorrelation traces of the compressed pulse from the main amplifier

滤光片对入射进入第三级主放大器(ROD fiber)的信号光进行了滤光,使第三级主放大器输出光谱中的 ASE 光谱与主峰之间出现凹陷。主放大器的输出光谱在短波方向并未表现出明显的 ASE,在右侧 1080 nm 处出现红移峰则是由于放大过程中受激拉曼散射导致的拉曼峰。在输出光谱主峰上,主放大输出光谱对比第二级放大输出光谱有一定的光谱调制,说明放大过程中存在一定的非线性效应,进而引起了受激拉曼散射,但引起的受激拉曼散射峰强度与主峰强度差接近 40 dB,放大过程中受激拉曼散射效应较弱,尚未成为限制放大器输出功率的主要因素。接下来使用了自相关仪测量了压缩后脉冲的自相关曲线,如图 2(d)所示,其脉冲的半峰全宽为 422 fs,对应双曲正割平方(Sech^2)函数的脉冲宽度为 289 fs。自相关曲线中不存在明显的旁瓣结构,表示 CFBG 较好地匹配了放大过程中的非线性啁啾和高阶色散。

为了演示系统能够在时域上生成任意波形的脉冲串,探究了四种不同波形的脉冲串和脉冲串放大后的频域和时域特性。为了比较脉冲功率放大过程中脉冲串时域波形对非线性效应的影响,主放大器的平均输出功率被固定在 20 W,脉冲串的重复率设定为 1 MHz,每个脉冲串包含 20 个脉冲,对应的平均单脉冲能量为 1 μJ 。同时,为了避免主放大器饱和增益对脉冲串波形的影响,减小了预放大器输出功率,使主放大器工作在非增益饱和状态。经过主放大器后,具有阶梯、正弦、凹斜坡和指数时域波形脉冲串分别如图 3(a)~(d)所示。这里使用阴影表示 FPGA 产生的电调制驱动信号,并显示了驱动信号和包络形状之间的重叠情况。通过控制每个调制门的驱动电压,对脉冲串中每个脉冲的幅度进行调节,因此脉冲串中的单个脉冲幅度分布就被限制为对应的时域波形,并且不会失真,从而在放大后产生一致的脉冲串时域形状。

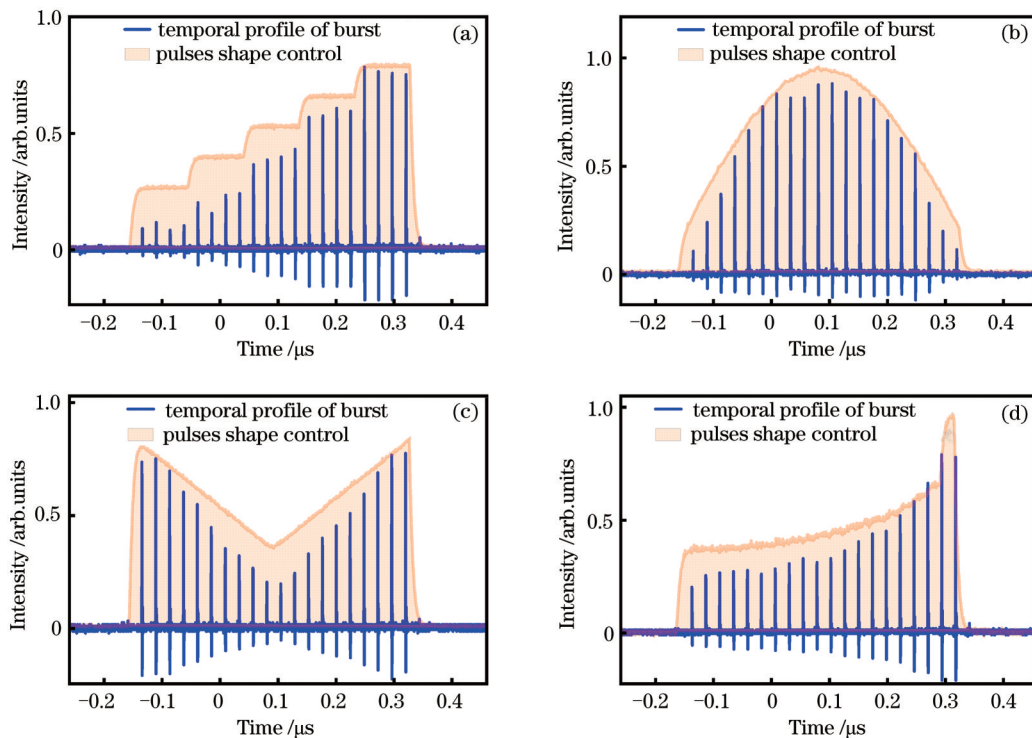


图 3 不同编程形状的 500 ns 脉冲串放大脉冲的时间分布。(a)阶梯形;(b)正弦形;(c)凹斜坡形;(d)指数形

Fig. 3 Temporal profile of the amplified pulse burst on 500 ns bursts duration with different programming shapes. (a) A stair shape; (b) a sine shape; (c) a concave slope shape; (d) an exponential shape

图 4 为四种时域波形脉冲串放大后的光谱。图 4(a)~(d)分别为阶梯、正弦、凹斜坡、指数波形脉冲串的光谱。每个光谱图中都展示了 AOM、第一级放大器、第二级放大器和主放大器的输出的光谱,各个模块对应的单脉冲能量分别为 0.05 nJ、1 nJ、50 nJ

和 1 μJ 。脉冲序列经过 AOM 调制脉冲幅度后,分别形成了四种不同时域波形,它们具有相同的光谱特性,光谱半峰全宽为 13.5 nm,中心波长为 1036 nm,如图 4 阴影所示。经过各级放大器后脉冲的光谱发生了变化。YDF1 的输出光谱与以前相比变化不

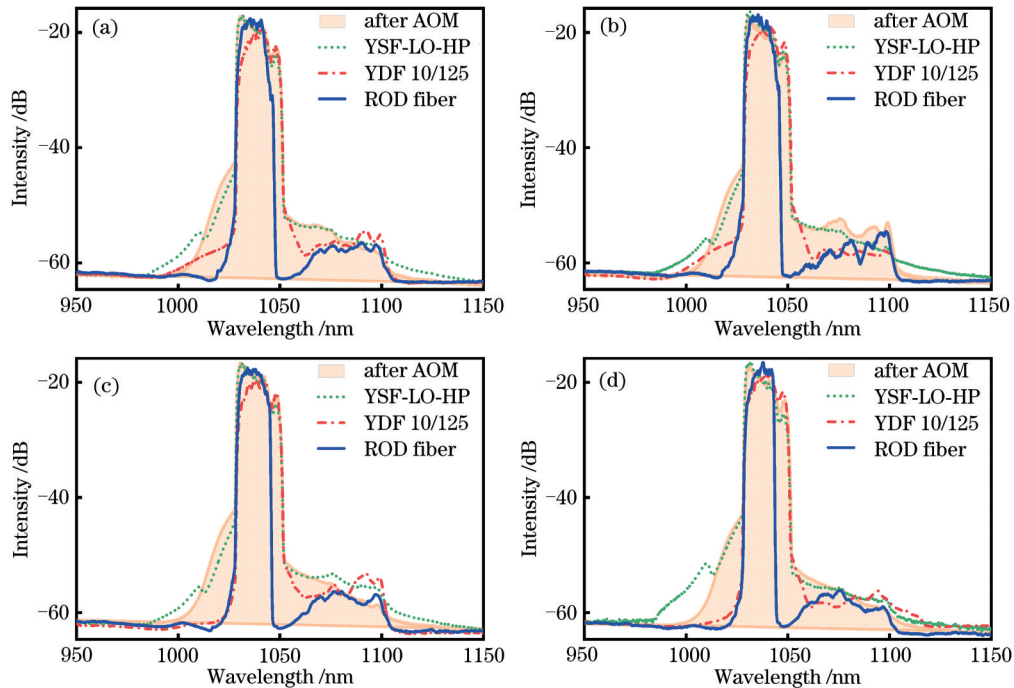


图4 AOM、第一级放大器 YDF1、第二级放大器 YDF2 和第三级棒光纤放大器脉冲压缩后的输出脉冲串的光谱。(a) 阶梯形；(b) 正弦形；(c) 凹斜坡形；(d) 指数形

Fig. 4 Optical spectrum of AOM, first-stage amplifier YDF1, second-stage amplifier YDF2, and third-stage rod fiber amplifier output pulse train spectrum after pulse compression. (a) A stair shape; (b) a sine shape; (c) a concave slope shape; (d) an exponential shape

大,只是 ASE 的强度上略有差别。与种子脉冲光谱相比,在非线性和增益的相互作用下,YDF2 后的放大谱主峰出现红移。由于放大脉冲能量的增加,这一级的非线性积累显著增强。经过最终棒状光纤放大后,由于增益变窄效应与自相位调制的复杂相互作用,左侧主峰得到了较大的放大。此外,在图 4 中,具有不同形状的脉冲串中,单个脉冲串内脉冲具有不同的脉冲能量。一些能量高的脉冲被放大过程中导致更多的非线性积累。脉冲序列在 AOM 中被调制成不同的包络形状,其光谱发生微小的变化在能量低时未显现出来。脉冲放大到一定程度后,可以显现出光谱的微小变化。所有这些都导致了放大前后光谱之间的差别。在脉冲压缩过程中,由于光栅对长度的限制,光栅对边缘的一些光谱分量被切断,光谱右侧的小尖峰消失。

图 5 展示了主放大器输出单脉冲能量为 $1 \mu\text{J}$ 时,压缩后的脉冲自相关曲线(实线)。通过调节 CFBG 的展宽参数,匹配光栅的高阶色散和放大器引入的非线性啁啾,可以优化压缩后的脉冲宽度。使用 Sech^2 函数对自相关曲线进行拟合(虚线),获得的脉冲半峰全宽分别为 383 fs、470 fs、431 fs、453 fs,相应

的脉冲宽度为 262 fs、322 fs、295 fs、310 fs,分别对应于阶梯、正弦、凹斜坡和指数形状。通过对测量得到的光谱进行傅里叶逆变换,对应的傅里叶极限脉冲宽度分别为 163 fs、164 fs、165 fs、183 fs。通过引入 Strehl 比值,评估了放大过程中非线性效应对脉冲压缩质量的影响。Strehl 比值定义为实际测量的峰值功率和傅里叶变换极限脉冲峰值功率之间的比率^[25]。压缩后脉冲的 Strehl 比值分别为 0.62、0.51、0.56、0.59。该比值可以表示放大过程中非线性累积的情况。四种脉冲串波形中,具有正弦形状的脉冲串 Strehl 比值较小,说明压缩脉冲质量较差,非线性效应积累较多。而对应的阶梯形状的脉冲串具有较大的比值,说明阶梯形脉冲串在放大过程中累积的非线性较小。

图 6 所示为远场测量的放大脉冲串光束的强度分布。激光束的强度分布高度集中在中心,光束周围的光强度逐渐减小。得益于大模场面积光子晶体光纤放大器良好的光束输出质量,在水平和垂直方向上,光强分布近似为高斯分布,高斯形状的拟合度为 0.991。

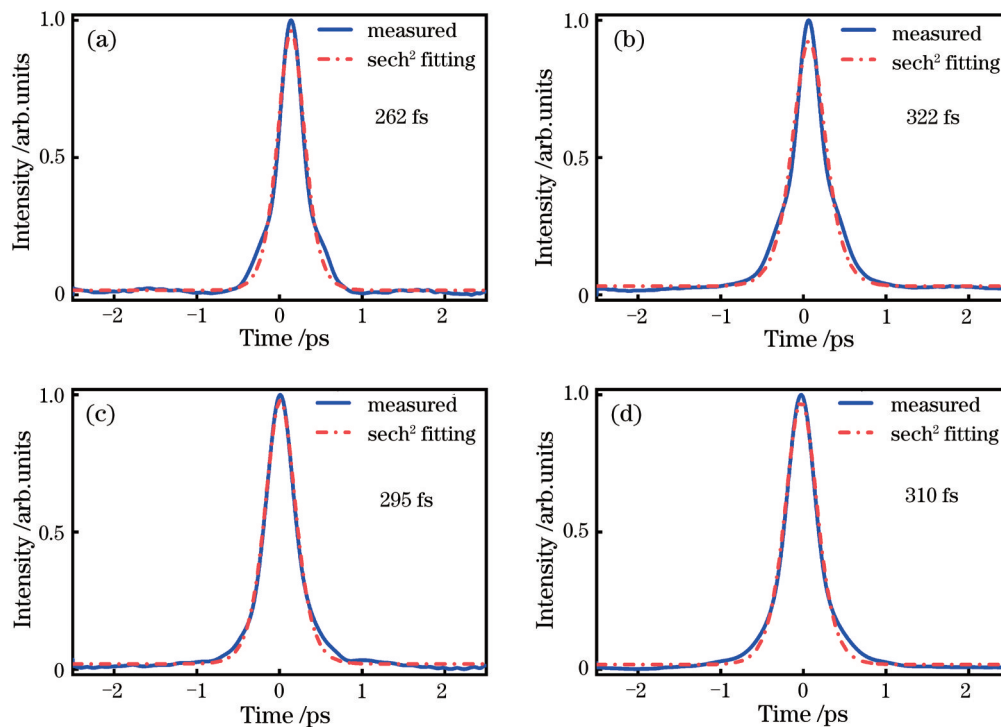


图5 来自 $1\ \mu\text{J}$ 脉冲能量的主放大器的压缩脉冲的强度自相关曲线在 $5\ \text{ps}$ 的时间跨度内,用双曲正割平方函数拟合。

(a)阶梯形;(b)正弦形;(c)凹斜坡形;(d)指数形

Fig. 5 Intensity autocorrelation curves of the compression pulse from the main amplifier with $1\ \mu\text{J}$ pulse energy are fitted by hyperbolic secant square function within $5\ \text{ps}$ time span. (a) A stair shape; (b) a sine shape; (c) a concave slope shape; (d) an exponential shape

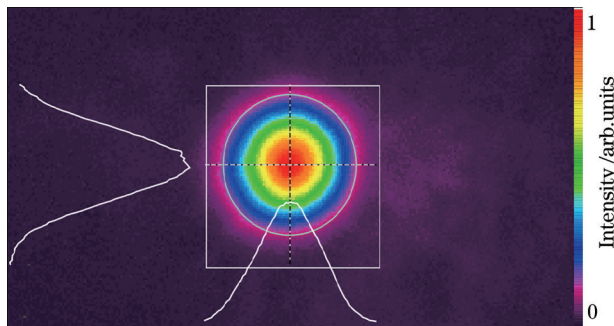


图6 远场测量的放大脉冲串的二维光束显示

Fig. 6 Two-dimensional beam display of amplified pulse train

4 结 论

综上所述,本文利用FPGA结合高速AOM作为脉冲时域波形整形器,通过对驱动信号进行编程操作,实现对脉冲串内能量分布的精细控制,从而获得了任意时域形状和重复率的脉冲串。并利用啁啾脉冲放大技术和大模场面积光纤,对脉冲串进行放大,实现了 $1\ \text{MHz}$ 重复率和 $20\ \mu\text{J}$ 能量的任意波形飞秒激光脉冲串。该放大脉冲串内的脉冲重

复率为 $41\ \text{MHz}$,脉冲宽度可压缩至小于 $300\ \text{fs}$ 。这种时域波形可编程的飞秒脉冲串为材料加工和烧蚀过程的精细优化、热效应管理提供了新的激光光源。虽然本文的实验仅展示了在中心波长在 $1040\ \text{nm}$ 附近的近红外波段的可编程激光脉冲串,但这种实现时域波形可编程的脉冲串的方法同样可以拓展到中红外的波段,为探究软组织处理在消融冷却方式中更优的脉冲串参数开辟了新途径。

参 考 文 献

- [1] Thurow B, Jiang N B, Lempert W. Review of ultra-high repetition rate laser diagnostics for fluid dynamic measurements[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(1): 012002.
- [2] Slipchenko M N, Miller J D, Roy S, et al. Quasi-continuous burst-mode laser for high-speed planar imaging[J]. Optics Letters, 2012, 37(8): 1346-1348.
- [3] Gattass R R, Cerami L R, Mazur E. Micromachining of bulk glass with bursts of femtosecond laser pulses at variable repetition rates[J]. Optics Express, 2006, 14(12): 5279-5284.
- [4] Knappe R. Applications of picosecond lasers and pulse-

- bursts in precision manufacturing[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8243: 82430I.
- [5] Marjoribanks R S, Dille C, Schoenly J E, et al. Ablation and thermal effects in treatment of hard and soft materials and biotissues using ultrafast-laser pulse-train bursts[J]. Photonics & Lasers in Medicine, 2012, 1(3): 155-169.
- [6] Jiang J T, Wei M E, Xiong Z D, et al. Observation of dentin ablation using an Er: YAG laser in a sub-pulse sequence mode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0107001.
江健涛, 魏蒙恩, 熊正东, 等. 子脉冲序列模式 Er: YAG 激光消融牙本质的实验观察[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0107001.
- [7] Kerse C, Kalaycıoğlu H, Elahi P, et al. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses[J]. Nature, 2016, 537(7618): 84-88.
- [8] Thurow B S, Satija A, Lynch K. Third-generation megahertz-rate pulse burst laser system[J]. Applied Optics, 2009, 48(11): 2086-2093.
- [9] Will I, Templin H I, Schreiber S, et al. Photoinjector drive laser of the FLASH FEL[J]. Optics Express, 2011, 19(24): 23770-23781.
- [10] Wu P F, Lempert W R, Miles R B. Megahertz pulse-burst laser and visualization of shock-wave/boundary-layer interaction[J]. AIAA Journal, 2000, 38: 672-679.
- [11] Hu M L, Cai Y. Research progress on mid-infrared ultrafast fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500009.
胡明列, 蔡宇. 中红外波段超快光纤激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500009.
- [12] Lai W C, Ma P F, Liu W, et al. 550-W single-frequency all-fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0415001.
来文昌, 马鹏飞, 刘伟, 等. 全光纤单频光纤放大器实现 550 W 近衍射极限输出[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0415001.
- [13] Kalaycıoğlu H, Eken K, Ilday F Ö. Fiber amplification of pulse bursts up to 20 μ J pulse energy at 1 kHz repetition rate[J]. Optics Letters, 2011, 36(17): 3383-3385.
- [14] Kalaycıoğlu H, Eldeniz Y B, Akçaalan, et al. 1 mJ pulse bursts from a Yb-doped fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2586-2588.
- [15] Breitkopf S, Klenke A, Gottschall T, et al. 58 mJ burst comprising ultrashort pulses with homogenous energy level from an Yb-doped fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5169-5171.
- [16] Elahi P, Yılmaz S, Eldeniz Y B, et al. Generation of picosecond pulses directly from a 100 W, burst-mode, doping-managed Yb-doped fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2014, 39(2): 236-239.
- [17] Yılmaz S, Elahi P, Kalaycıoğlu H, et al. Amplified spontaneous emission in high-power burst-mode fiber lasers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2015, 32(12): 2462-2466.
- [18] Kalaycıoğlu H, Elahi P, Akçaalan Ö, et al. High-repetition-rate ultrafast fiber lasers for material processing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 1-12.
- [19] Elahi P, Akçaalan Ö, Ertek C, et al. High-power Yb-based all-fiber laser delivering 300 fs pulses for high-speed ablation-cooled material removal[J]. Optics Letters, 2018, 43(3): 535-538.
- [20] Elahi P, Kalaycıoğlu H, Akçaalan Ö, et al. Burst-mode thulium all-fiber laser delivering femtosecond pulses at a 1 GHz intra-burst repetition rate[J]. Optics Letters, 2017, 42(19): 3808-3811.
- [21] Wang X, Zhou P, Wang X L, et al. Bursts with shape-alterable pulses in a compact Tm-doped fiber laser with simultaneous active intracavity phase and intensity modulations[J]. Photonics Research, 2014, 2(6): 172-176.
- [22] Li X L, Zhang S M, Hao Y P, et al. Pulse bursts with a controllable number of pulses from a mode-locked Yb-doped all fiber laser system[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6699-6706.
- [23] Liu J M, Li X L, Zhang S M, et al. Wavelength-tunable burst-mode pulse with controllable pulse numbers and pulse intervals[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(4): 1-6.
- [24] Yu H J, Qi Y Y, Zhang J Y, et al. 8.3 mJ, 166 W burst mode pulse fiber amplifier based on a Q-switched mode-locked fiber seed laser[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 1-5.
- [25] Martial I, Papadopoulos D, Hanna M, et al. Nonlinear compression in a rod-type fiber for high energy ultrashort pulse generation[J]. Optics Express, 2009, 17(13): 11155-11160.