

一种窄线宽的高重复频率窄脉宽主动调 Q 光纤激光器

张骥^{1,2}, 张东^{1,2}, 刘昊炜², 姚波², 毛庆和^{1,2*}

¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

²中国科学院安徽光学精密机械研究所光子器件与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 提出并演示了一种基于声光调制器(AOM)主动调 Q 的环形腔双包层光纤激光器获得窄线宽、窄脉宽和高重复频率激光脉冲的方法。通过在腔内采用以双包层增益光纤作为输入尾纤的泵浦剥离器来缩短腔长,可以降低增益光纤正向放大自发辐射(ASE)的反射,抑制其 ASE 的增益自饱和效应,使腔内有效增益增大,窄线宽调 Q 脉冲可在环形腔中快速建立,从而不仅可使调 Q 脉冲脉宽变窄,还允许其重复频率大幅提升。在 7 W 泵浦功率下,所提出的调 Q 光纤激光器获得了线宽和脉宽分别窄至 0.16 nm 和 10.4 ns、重复频率高达 150 kHz 的调 Q 激光脉冲。

关键词 激光器; 调 Q 脉冲; 窄线宽; 窄脉宽; 放大的自发辐射

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0101002

Actively Q-Switched Fiber Laser with Narrow Linewidth, Narrow Pulse Width, and High Repetition Rate

Zhang Ji^{1,2}, Zhang Dong^{1,2}, Liu Haowei², Yao Bo², Mao Qinghe^{1,2*}

¹School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract This paper proposes and demonstrates a method to produce narrow-linewidth, narrow-pulse-width, and high-repetition-rate pulses with actively Q-switched ring-cavity all-fiber lasers based on acoustic-optic modulators. We use a double-clad gain fiber as the cladding power stripper's input fiber in the ring cavity to shorten the cavity length and reduce reflections from the forward amplified spontaneous emission (ASE) at the output end of the gain fiber, which can efficiently suppress the ASE gain self-saturation so that the effective cavity gain can be enhanced. The narrow-linewidth Q-switched laser pulse can be established quickly, providing a narrow pulse width and high repetition rate for the pulses. Our experimental results demonstrate that the laser can produce 150-kHz Q-switched laser pulses with a narrow linewidth and pulse width of 0.16 nm and 10.4 ns, respectively, at a pump power of 7 W.

Key words lasers; Q-switched pulse; narrow linewidth; narrow pulse width; amplified spontaneous emission

OCIS codes 140.3510; 140.3540; 140.3615

1 引言

大能量纳秒激光脉冲在激光雷达^[1]、精密加工^[2]及非线性变频^[3]等领域具有极其重要的应用。

通常,这类脉冲可通过高品质纳秒脉冲种子光源后接功率放大器构成的 MOPA 系统获得^[4-5],而脉冲种子源主要有直接调制半导体激光器^[6-7]、调 Q 固体^[8-9]和光纤激光器^[10-11]。相比之下,调 Q 光纤激

收稿日期: 2019-07-26; 修回日期: 2019-08-27; 录用日期: 2019-09-16

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405100, 2017YFB0405200)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB21010300)、国家自然科学基金(61805258, 61377044)、脉冲功率激光技术国家重点实验室开放研究基金(SKL2017KF03)

* E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn

光器具有光束质量好、结构紧凑、转换效率高、受后续功率放大器反射影响小等优点,是大量能量纳秒激光脉冲的理想种子源。声光调制器(AOM)的调制波形与调制频率可控^[11],研究人员一直试图采用AOM构建出高性能的主动调Q光纤激光器。

研究人员利用单包层和双包层增益光纤,构建出了具有不同结构的基于AOM的主动调Q光纤激光器^[11-13]。但是,受限于可用掺杂粒子总数,单包层掺杂光纤的增益极易饱和^[14],既不利于调Q脉冲的快速建立,又不利于在单一腔循环圈内实现腔倒空,最终导致调Q脉冲的脉宽较宽、峰值功率较低^[12]。为此,研究人员改用双包层掺杂光纤作为增益光纤,利用其在高泵浦下增益高且不易饱和的特性^[15],构建出了多种基于AOM等空间分离器件的线形腔主动调Q光纤激光器。如,Bouillet等^[16]构建了调Q双包层光纤激光器,其在10 kHz重复频率下输出脉冲的脉宽可窄至12 ns,在190 kHz重复频率下的脉宽为32 ns。但是,这类基于分离器件的调Q光纤激光器的稳定性差,因此有必要发展全光纤化的主动调Q光纤激光器。但受限于尾纤型AOM的承受功率,全光纤化线形腔主动调Q光纤激光器不允许通过增大泵浦光功率来发挥双包层增益光纤饱和增益高的优势,导致全光纤调Q光纤激光器的重复频率、输出功率以及脉宽等指标依然不理想。特别是对于亚纳米窄线宽调Q光纤激光器来说,尽管其重复频率已达到50 kHz,但输出脉冲宽度却大于100 ns^[17-18]。为了获得窄脉宽的调Q窄脉冲,必须设法突破尾纤型AOM承受功率的限制,允许通过增大泵浦光功率来发挥双包层增益光纤饱和增益高的优势。为此,Lecourt等^[19]改用环形腔结构,通过插入光纤耦合器抽取出腔内脉冲能量,并巧妙地在光纤耦合器后端放置尾纤型AOM,从而使尾纤型AOM处在腔内功率较低的位置,允许通过大幅提升泵浦功率来提升双包层增益光纤的饱和增益;进而结合采用减小Q开关占空比来增加增益恢复时间的方法,获得了10 ns的调Q脉冲,其重复频率高于100 kHz^[19-20]。但是,文献[20]中调Q脉冲的线宽高达1 nm,若要获得更窄线宽的调Q脉冲,须选用亚纳米窄带滤波器,然而这样必然会减弱激光腔反馈,导致调Q脉冲建立时间延长,而且与通过减小占空比来增加增益恢复时间、获取高重复频率相矛盾。此外,光纤波导的结构特性导致增益光纤内任意位置处的自发辐射易被收集并形成导模进行传输,使得增益光纤在高功率泵浦下将产生

大量正反向放大的自发辐射(ASE),这些过量的ASE会导致增益光纤产生增益自饱和效应^[21-22],同样会影响经弱腔反馈的窄带种子ASE的放大效果,延长调Q脉冲建立的时间,不利于高重复频率调Q脉冲的获取。正因为如此,时至今日,基于AOM的主动调Q光纤激光器在获取窄线宽的高重复频率窄脉宽调Q脉冲上依然存在困难,虽然通过种子注入技术可以实现这一目标^[23],但却使激光系统极其复杂。因此,如何获得窄线宽、窄脉宽的高重复频率主动调Q脉冲依然有待深入研究。

本文提出并演示了一种产生窄线宽、窄脉宽和高重复频率纳秒脉冲的AOM主动调Q环形腔双包层光纤激光器方案。在激光器腔内加入特殊设计的以双包层增益光纤作为输入尾纤的泵浦剥离器(CPS),既有利于缩减腔长和脉冲建立时间,又有利于减小增益光纤正向ASE的反射,从而抑制ASE的增益自饱和效应,促使脉冲快速建立,最终不仅使得窄线宽调Q脉冲的脉宽变窄,还有效地提高了脉冲的重复频率。实验结果表明,在7 W泵浦功率下,激光器可产生线宽窄至0.16 nm、脉宽为10.4 ns、平均功率为瓦级、重复频率可高达150 kHz的调Q激光脉冲。

2 激光器结构

图1为基于AOM的主动调Q全光纤激光器结构示意图。所用增益光纤为双包层掺镱光纤(YDCF, LMA-YDF-10/130-M, Nufern),该光纤的纤芯和内包层数值孔径分别为0.08和0.46,波长975 nm处的吸收系数为4.2 dB/m。实验选取的YDCF的长度为3 m,它由带尾纤的975 nm多模激光二极管(LD)经 $(2+1) \times 1$ 泵浦合束器(MPC)泵浦,MPC匹配光纤为双包层无源光纤(LMA-GDF-10/130-M, Nufern),长度为0.2 m。通过在环形器(CIR)公共端接入一个中心波长为1064 nm、3 dB带宽为0.2 nm、反射率约为99%的光纤布拉格光栅(FBG),并将CIR输入、输出端接入主腔,构成窄带滤波器,这样可保证腔内光波顺时针传输。经YDCF放大后的腔内高功率激光经单模光纤耦合器(OC,尾纤类型为LMA-GSF-10/125-M, Nufern)抽取出80%后,进入单模光纤尾纤型AOM(T-M200-0.1C2G-3-F2S, Gooch & Housego),从而使AOM处在腔内功率较低处,以避免其出现光热损伤。该OC的输出耦合比既有利于减小腔损耗,进而利于脉冲建立,又有利于抽取腔内能量,进而获取窄线宽

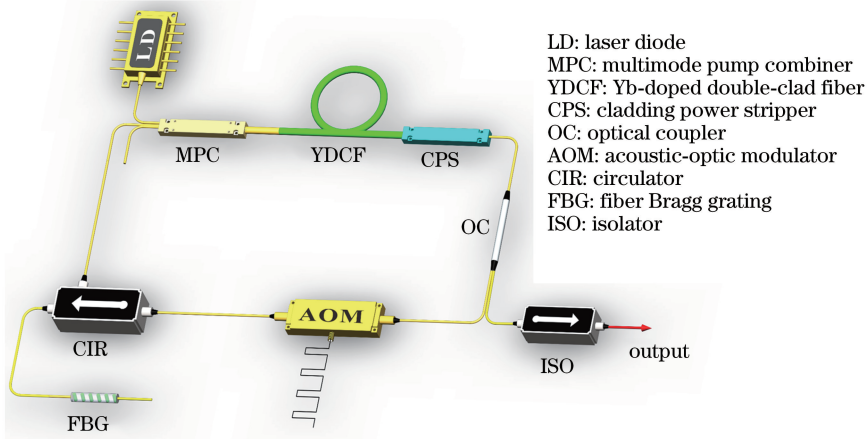


图 1 AOM 主动调 Q 双包层光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of actively Q-switched YDCF fiber laser with AOM

调 Q 脉冲。该 AOM 的驱动频率为 200 MHz, 其输出为一级上频移衍射光, 衍射效率为 85%, 实测插入损耗约为 3 dB。

考虑到 YDCF 输出端附近内包层中存在着大量剩余泵浦光和正向 ASE, 与单模光纤直接熔接时, 因熔接点难以完全消除不连续性, 不仅会导致熔接点发生光热损伤, 还会使包层中的正向 ASE 经微小反射后形成初始反向 ASE, 导致增益光纤因反向 ASE 过大而加重 ASE 的增益自饱和效应, 不利于窄线宽调 Q 脉冲的快速建立。为此, 本文专门设计了一种特殊的泵浦剥离器 (CPS), 直接以 YDCF 作为其输入光纤, 输出光纤型号与 OC 单模尾纤一致, 长度为 0.15 m。在该 CPS 中, 利用在 YDCF 末端内包层表面涂覆高折射率胶, 使内包层中传输的剩余泵浦光和正向 ASE 在到达熔接端面之前就被有效剥离掉, 从而使经 CPS 反射回到增益光纤的初始反向 ASE 减弱约一个量级, 进而缓解 ASE 造成的增益自饱和效应。

腔内 AOM、CIR、FBG 以及 MPC 信号端所用尾纤均为 HI 1060 型单模光纤。为了缩短腔长, 利于调 Q 脉冲的快速建立, 尽可能地减小这些器件的尾纤长度, 总腔长最终被控制额约 6 m, 总腔损耗约 12 dB。经光隔离器输出的调 Q 脉冲经由光功率计 (Vega7Z01560, Ophir)、光谱分析仪 (AQ6370D, Yokogawa) 以及 1.5 GHz 光电探测器后接入示波器 (MSO8064A, Agilent) 进行检测。

3 测试结果与讨论

首先以占空比为 1:1 的 10 kHz 方波信号调制 Q 开关, 研究调 Q 光纤激光器输出特性随泵浦光功率的变化。实验中发现, 当泵浦光功率增大到

0.6 W 时, 开始检测到脉冲输出; 当泵浦光功率进一步增大到超过 2 W 时, 脉冲呈现出明显的多峰结构。图 2(a) 为泵浦光功率分别为 3, 5, 7 W 时由示波器测得的输出脉冲波形, 可见: 随着泵浦功率增大, 输出脉冲多峰振荡结构趋于明显, 峰幅度之间的差别增大, 脉冲建立时间缩短。此外, 腔倒空所需的腔循环圈数也随泵浦功率的增大而减少, 由于相邻峰之间的时间间隔恰好等于 30 ns 的腔循环时间, 因此输出脉冲宽度也随泵浦光功率的增大而变窄。在 3, 5, 7 W 泵浦功率下, 相对于开关打开时刻的脉冲建立延迟时间 (其中, 示波器两测量通道已进行了时间同步校准) 分别为 280, 250, 220 ns, 腔倒空所需腔循环圈数分别为 5 圈、4 圈和 3 圈, 脉冲宽度分别为 80, 44, 37 ns。此外, 在 7 W 泵浦功率下, 由于需要 3 圈才能实现腔倒空, 而每一圈腔循环都会因 AOM 叠加 200 MHz 频移, 故所获得的 37 ns 输出调 Q 脉冲的相干性较差^[23]。

由图 2(a) 还可看出, 在 7 W 泵浦功率和 1:1 占空比的 10 kHz 方波调制下, 脉冲建立时间为 220 ns, 比 Q 开关打开持续时间 50 μ s 小约两个量级, 这意味着可通过减小占空比来提升增益光纤的粒子数反转度积累, 进而获取更窄的脉冲^[14]。图 2 (b) 为 7 W 泵浦光功率下调制方波占空比分别降至 1:2、1:5 和 1:10 时测得的输出调 Q 脉冲, 可见: 随着调制方波占空比减小, 脉冲建立时间缩短, 多峰数目减少, 导致脉冲宽度变窄、脉冲幅度提升, 这是掺杂光纤增益恢复时间延长带来的必然结果^[14]; 当占空比降至 1:10 时, 仅需一圈腔循环就可实现腔倒空, 对应的脉宽仅为 9.6 ns, 消除了 AOM 频移效应对输出脉冲相干性的影响。图 2(c) 给出了占空比为 1:10 时测得的输出脉冲光谱, 可见, 光谱宽度仅

为 0.18 nm, 信噪比高达 50 dB; 结合其时域波形展现的多峰振荡结构可以看出, 该输出脉冲为窄线宽窄脉宽调 Q 激光脉冲, 而不是调 Q 光纤激光器中常见的类 ASE 脉冲。值得指出的是, 实验中发现, 对

于图 2(b) 中 1:10 占空比下 9.6 ns 输出调 Q 脉冲前沿处的低幅度底座, 可通过稍稍增大 AOM 上升沿时间而消除, 这时的输出脉冲依然为单一腔循环输出, 仅脉宽变为 14 ns。

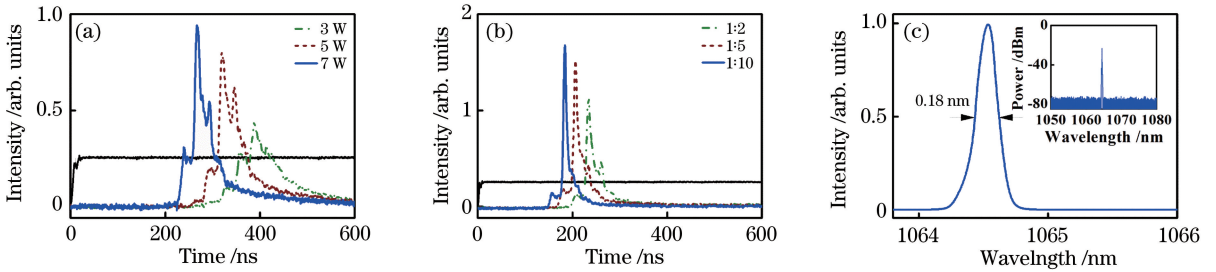


图 2 调 Q 光纤激光器的输出脉冲特性。(a) 调制方波频率为 10 kHz 以及占空比为 1:1 时测得的不同泵浦光功率下的输出脉冲波形; (b) 在 7 W 泵浦功率、不同占空比的 10 kHz 方波调制下的实测输出脉冲波形; (c) 在 7 W 泵浦功率、1:10 占空比的 10 kHz 方波调制下的输出脉冲光谱, 插图为对数坐标

Fig. 2 Output pulse characteristics of Q-switched fiber laser. (a) Output pulse waveforms at different pump powers with square wave modulation frequency of 10 kHz and duty cycle of 1:1; (b) measured output pulse waveforms at different duty cycles with square wave modulation frequency of 10 kHz and pump power of 7 W; (c) measured output pulse spectrum with square wave modulation frequency of 10 kHz, pump power of 7 W and duty cycle of 1:10, in where inset shows spectrum with logarithmic coordinate

减小占空比还有利于获得高重复频率的调 Q 脉冲。实验中发现, 在保持单一腔循环实现腔倒空获取窄脉宽的前提下, 对于 1:10 的占空比, 将调制频率提高到 120 kHz 时, 调 Q 脉冲开始出现脉冲缺失现象。其原因是, 随着调制频率提高, 分配给增益光纤的增益恢复时间缩短, 导致实际增益值降低。因此, 当前序调 Q 激光脉冲因激光振荡将腔内反转粒子数耗尽后, 在后续开关打开时间内调 Q 激光脉冲就难以建立。进一步减小占空比, 通过相对地增加增益恢复时间可以使单一腔循环结构实现规整的脉冲输出。在 7 W 泵浦功率下, 当占空比减小至 1:53 时, 可获得的最大的由单一腔循环构成的调 Q 脉冲重复频率高达 150 kHz, 对应脉宽依然窄至 10.4 ns, 如图 3(a) 所示。

若进一步减小占空比, 虽然仍可获得更高重复频率的规整输出脉冲, 但是, 输出脉冲的幅度大幅降低。图 3(b) 给出了方波调制频率为 155 kHz、占空比降至 1:64 时测得的输出脉冲波形, 可见, 脉冲幅度大幅下降, 脉冲宽度增大至 25 ns。这种现象可能是由 ASE 的增益自饱和效应导致的。为此, 本文在 MPC 闲置泵浦输入端尾纤处利用光谱分析仪分别测试了不同重复频率下的光谱。图 3(c) 为 150 kHz 和 155 kHz 方波调制频率下测得的光谱, 可见, 相比于 150 kHz 方波调制频率下的光谱, 当调制频率为 155 kHz 时, 光谱中的 ASE 背景已显著提高, 在

1030 nm 处存在 ASE 峰, 并且该 ASE 峰的幅度可与光纤不连续点反射的调 Q 脉冲光谱幅度相比拟。这表明, 对于 155 kHz 调制频率下的输出脉冲, 激光器反向 ASE 已导致掺杂光纤发生了严重的增益自饱和^[21], 使得产生的输出脉冲为无谐振特征的类 ASE 脉冲。此外, 从图 3(d) 所示的在 150 kHz 和 155 kHz 方波调制频率下测得的输出调 Q 脉冲光谱可见, 在 150 kHz 方波调制频率下建立起了激光振荡, 脉冲相干性提高, 输出脉冲的 3 dB 线宽仅为 0.16 nm, 而 155 kHz 方波调制频率下的类 ASE 脉冲的 3 dB 线宽可达 0.19 nm, 后者明显宽于前者, 由此表明这种类 ASE 脉冲因 ASE 增益自饱和和效应造成了有效腔增益过低, 导致在该给定腔循环圈数下无法形成有效的谐振增强, 进而导致输出脉冲的相干性变差, 线宽增大, 接近 FBG 带宽。因为这种类 ASE 脉冲峰值功率低, 不利后续功率的提升, 故通常不为研究人员所关注。

ASE 增益自饱和效应造成难以获得更高重复频率调 Q 激光脉冲的原因是: 为了获得窄线宽调 Q 脉冲要求而采用窄带 FBG 滤波器, 导致极弱的腔反馈, 使得 Q 开关打开后, 经 FBG 反馈的窄带 ASE 功率极低; 同时, 为获得高重复频率的无脉冲缺失的输出脉冲序列, 须减小调制信号的占空比, 以促进增益光纤粒子数反转度的恢复, 但因绝对增益恢复时间不可避免地缩短了, 而增益光纤粒

子数反转度依然随调制频率的增大而降低,故当 Q 开关打开后,经 FBG 反馈的初始窄带 ASE 功率随调制频率增大又进一步降低。但为了提高腔增益和饱和增益值,必须要求对增益光纤进行强泵浦,这时,增益光纤会产生大量的在纤芯和内包层传输的正反向 ASE,内包层中的反向 ASE 虽然可由 MPC 耗散掉(纤芯中的 ASE 则由环形器隔离),内包层中的正向 ASE 也可由 CPS 剥离,但由于 FBG 反馈的初始窄带 ASE 功率过低,加上腔内可能存在不可完全避免的不连续点反射,使得腔内

正反向 ASE 极大地消耗了双包层增益中积累的反转粒子,双包层增益光纤本身不断产生的过大正反向 ASE 造成增益光纤的增益自饱和。图 3(c) 所测光谱在 1030 nm 处的 ASE 峰就明晰地展现了这种效应。正是这种 ASE 增益自饱和效应使得在 Q 开关打开后不能对由 FBG 反馈的初始窄带 ASE 进行高效放大,导致该窄带 ASE 种子难以快速地通过腔循环振荡建立起调 Q 激光脉冲,从而最终导致调 Q 脉冲的重复频率难以通过减小调制信号占空比来提高。

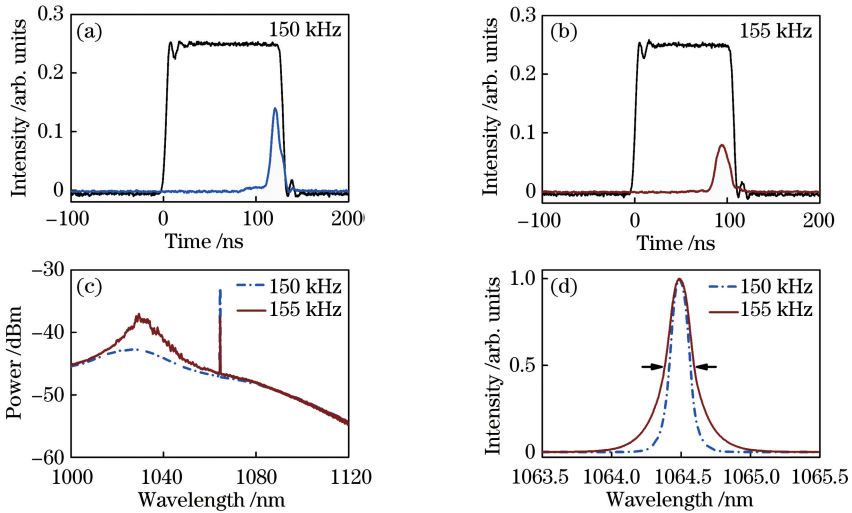


图 3 150 kHz 和 155 kHz 方波调制频率下的输出脉冲特性。(a) 在 7 W 泵浦功率、1:53 占空比、150 kHz 方波调制频率下测得的输出脉冲波形;(b) 在 7 W 泵浦功率、1:64 占空比、155 kHz 方波调制频率下测得的输出脉冲波形;(c) 150 kHz 和 155 kHz 方波调制频率下在 MPC 闲置泵浦端测得的反向光谱;(d) 150 kHz 和 155 kHz 方波调制频率下输出调 Q 脉冲的归一化线性坐标光谱

Fig. 3 Output pulse characteristics with the square wave modulation frequency of 150 kHz and 155 kHz. (a) Output pulse waveforms with the square wave modulation frequency of 150 kHz, the duty cycle of 1:53, and the pump power of 7 W; (b) output pulse waveforms with the square wave modulation frequency of 155 kHz, the duty cycle of 1:64, and the pump power of 7 W; (c) backward spectra measured at the idle pump port of MPC with square wave modulation frequencies of 150 kHz and 155 kHz, respectively; (d) normalized linear coordinate spectra of output Q-switched pulses with square wave modulation frequencies of 150 kHz and 155 kHz, respectively

ASE 增益自饱和效应是制约窄线宽调 Q 脉冲获取及其重复频率提升的关键。不仅如此,增益光纤的 ASE 增益自饱和效应还导致不能通过提高泵浦光功率来提升调 Q 脉冲的重复频率。实验中发现,在 155 kHz 方波调制频率下,若将泵浦光功率由 7 W 增大至 8 W,ASE 增益自饱和效应将促使 1030 nm 处的 ASE 峰附近产生自激振荡,造成腔内 MPC 等器件的损坏。而若采用 1 nm 带宽的 FBG,由于反馈的初始 ASE 功率大幅增加,ASE 的增益自饱和效应将得以有效抑制,故该 ASE 种子可快速地建立起调 Q 脉冲振荡,进而允许通过进一步减小

占空比、增大泵浦功率的方法来提高调 Q 脉冲的重复频率。图 4 分别为激光器采用 1 nm 带宽 FBG 时,在 7 W 泵浦光功率和 1:50 占空比下获得的脉宽为 9.9 ns 的调 Q 脉冲序列、脉冲波形与脉冲光谱,可见,激光器输出脉冲的重复频率已提升到 170 kHz,而输出脉冲线宽也随 FBG 带宽增大到 0.92 nm。实验中还发现,为获得高重复频率的窄线宽调 Q 脉冲,必须要尽可能地抑制腔内可能的不连续点反射,任何微小的反射均会加剧 ASE 的增益自饱和效应,而本文专门设计的双包层增益光纤尾纤的 MPC 无需再与普通匹配光纤熔接,不仅缩短了

腔长和脉冲建立时间,还大幅降低了增益光纤正向 ASE 的反射,抑制了 ASE 的增益自饱和效应。正

因如此,我们才获得了重复频率为 150 kHz、脉宽为 10.4 ns、线宽为 0.16 nm 调 Q 脉冲输出。

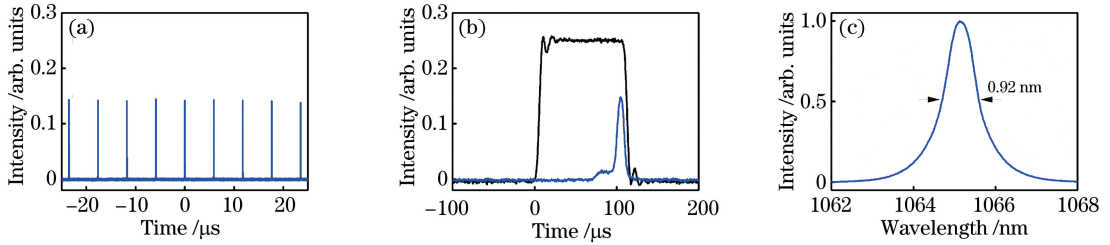


图 4 激光器采用 1 nm 带宽 FBG 时,在 7 W 泵浦功率、1:50 占空比、

170 kHz 方波调制频率下测得的输出脉冲特性。(a) 脉冲序列; (b) 脉冲波形; (c) 脉冲光谱

Fig. 4 Output pulse characteristics with the square wave modulation frequency of 170 kHz, the duty cycle of 1:50, and the pump power of 7 W by using a FBG with 1-nm bandwidth in the laser. (a) Pulse train; (b) pulse waveform; (c) pulse spectrum

图 5 为实验测得的图 1 所示光纤激光器输出调 Q 脉冲的脉宽、能量与重复频率之间的关系,其中,泵浦光功率保持为 7 W,而给定不同调制频率下的占空比则由 1:1 减小至恰好能消除脉冲缺失现象、且经单一腔循环就能基本实现腔倒空所对应的占空比。可见,调 Q 激光器的重复频率在 10~150 kHz 范围内可调,当重复频率较低时,输出脉冲能量较大,在 10 kHz 重复频率下,单脉冲能量可达 130 μJ,但在 10~150 kHz 重复频率范围内,输出平均功率均大于 1.3 W,并且脉宽处在 9.6~10.4 ns 之间,最窄脉宽为 9.6 ns,脉冲与脉冲间的强度波动小于 2%。此外,尽管随着调 Q 脉冲重复频率的降低,脉冲线宽会因光纤非线性而轻微展宽^[24],但在 10~150 kHz 范围内,调 Q 脉冲的 3 dB 线宽均小于 0.18 nm。

激光器方案。针对双包层掺杂光纤的 ASE 增益自饱和效应不能高效放大 Q 开关打开后腔反馈获得的窄带初始 ASE,导致窄线宽调 Q 脉冲难以快速建立,从而不能获得窄脉宽和高重复频率调 Q 脉冲的问题,本文在环形腔中采用了以 YDCF 作为输入光纤的低反射型 CPS,不仅减短了腔长,以便于缩短脉冲建立时间,还对正向 ASE 进行了剥离,减弱了 ASE 增益自饱和效应,确保了窄线宽调 Q 激光脉冲在腔内的快速建立,从而使调 Q 脉冲的脉宽变窄,且有效提高了调 Q 脉冲的重复频率。对以该方案构建的调 Q 光纤激光器进行测试,结果表明,该光纤激光器在高达 7 W 的泵浦功率下,获得了线宽可窄至 0.16 nm 的调 Q 脉冲,脉冲宽度为 10.4 ns,最高重复频率可达 150 kHz。

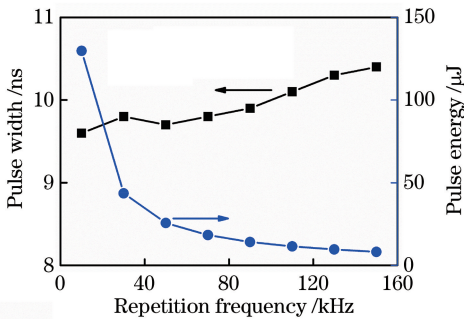


图 5 输出调 Q 脉冲的脉宽、能量与重复频率之间的关系

Fig. 5 Relationship among pulse width, output energy, and repetition rate of output Q-switched pulse

4 结 论

本文提出并演示了一种可以产生窄线宽、窄脉宽和高重复频率纳秒脉冲的 AOM 主动调 Q 光纤

参 考 文 献

- [1] Philippov V, Codemard C, Jeong Y, et al. High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications [J]. Optics Letters, 2004, 29 (22): 2590-2592.
- [2] O'Neill W, Li K. High-quality micromachining of silicon at 1064 nm using a high-brightness MOPA-based 20-W Yb fiber laser [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15 (2): 462-470.
- [3] Shi W, Leigh M, Zong J, et al. Single-frequency terahertz source pumped by Q-switched fiber lasers based on difference-frequency generation in GaSe crystal [J]. Optics Letters, 2007, 32(8): 949-951.
- [4] Siebold M, Hein J, Wandt C, et al. High-energy, diode-pumped, nanosecond Yb:YAG MOPA system [J]. Optics Express, 2008, 16(6): 3674-3679.
- [5] Zhang H W, Wang X L, Zhou P, et al. 6 mJ, high-

- average-power, all-fiberized Q-switched fiber master oscillator power amplifier with low repetition rate[J]. Applied Optics, 2012, 51(29): 6933-6936.
- [6] Meng K, Zhang H T, Liu M, et al. 670 kW nanosecond all-fiber super-irradiation pulsed amplifiers at high repetition rates [J]. Journal of Optics, 2014, 16(10): 105202.
- [7] Zhou G R, Shi H X, Jin D C, et al. Nanosecond-pulsed Yb-doped fiber laser at 978 nm based on diode laser modulation technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0801005.
周冠锐, 师红星, 金东臣, 等. 基于半导体激光器调制技术的 978 nm 纳秒脉冲掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0801005.
- [8] Ogawa T, Imai T, Onodera K, et al. Efficient pulse operation of Nd:GdVO₄ laser with AO Q-switch[J]. Applied Physics B, 2005, 81(4): 521-524.
- [9] Zhou D D, Yin X L, Wang Y, et al. High-efficiency electro-optical cavity-dumped Q-switched laser pumped by LD at 914 nm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0101014.
周丹丹, 尹兴良, 王煜, 等. 914 nm LD 抽运高效率腔倒空电光调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0101014.
- [10] 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.
- [11] Wang Y, Xu C Q. Actively Q-switched fiber lasers: switching dynamics and nonlinear processes [J]. Progress in Quantum Electronics, 2007, 31(3/4/5): 131-216.
- [12] Li W C, Liu H W, Zhang J, et al. Mode-hopping-free single-longitudinal-mode actively Q-switched ring cavity fiber laser with an injection seeding technique [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 1500607.
- [13] Swiderski J, Zajac A, Skorzczakowski M, et al. Q-switched Nd-doped double-clad fiber laser[J]. Opto-Electronics Review, 2005, 13(3): 187-191.
- [14] Desurvire E. Analysis of transient gain saturation and recovery in erbium-doped fiber amplifiers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1989, 1(8): 196-199.
- [15] Zenteno L. High-power double-clad fiber lasers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(9): 1435-1446.
- [16] Boulet J, Dubrasquet R, Médina C, et al. Millijoule-class Yb-doped pulsed fiber laser operating at 977 nm [J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1650-1652.
- [17] 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.
- [18] Feng Y T, Wang X F, Zhu C, et al. Experiment research of 100 W, all-fiber acousto-optic Q-switched fiber laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1444-1448.
冯宇彤, 王雄飞, 朱辰, 等. 100 W 全光纤声光调 Q 光纤激光器实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1444-1448.
- [19] Lecourt J B, Bertrand A, Hernandez Y, et al. Short pulse and high repetition rate actively Q-switched all-in-fiber laser[J]. Electronics Letters, 2010, 46(5): 365-367.
- [20] Lecourt J B, Bertrand A, Guillemet S, et al. High repetition rate, high energy, actively Q-switched all-in-fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7721: 772108.
- [21] Mahdi M A, Thirumeni S, Poopalan P, et al. Effects of self-saturation in an erbium-doped fiber amplifier [J]. Optical Fiber Technology, 2000, 6(3): 265-274.
- [22] Ko K Y, Demokan M S, Tam H Y. Transient analysis of erbium-doped fiber amplifiers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6(12): 1436-1438.
- [23] Li W C, Liu H W, Zhang J, et al. Q-switched fiber laser based on an acousto-optic modulator with injection seeding technique [J]. Applied Optics, 2016, 55(17): 4584-4588.
- [24] Pinault S C, Potasek M J. Frequency broadening by self-phase modulation in optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1985, 2(8): 1318-1319.