

Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 纳秒脉冲包层抽运 掺镜光纤激光器

刘佳 刘江 王璞

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 报道了 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为可饱和吸收体用于包层抽运掺镜光纤激光器被动调 Q 并得到稳定纳秒脉冲输出。采用环形腔和线形腔两种腔形,可有效抑制受激布里渊散射(SBS)的非线性效应,抑制自脉冲产生,从而得到稳定被动调 Q 脉冲输出。采用环形腔结构,得到稳定的 1 μs 脉冲输出,时间抖动和振幅抖动均方根(RMS)值小于 5%。线形腔中采用高反射率光纤布拉格光栅(FBG)作为输出腔镜,也实现稳定脉冲输出,重复频率 9.1~30.3 kHz 可调谐,最窄脉宽 156 ns,远远小于国内报道的微秒量级脉冲宽度。虽然平均输出功率只有几百毫瓦,因采用光纤输出,此类脉冲激光器可作为种子源,进而与光纤放大器相匹配,经光纤放大器放大输出功率可达到几十瓦,从而满足实际工业应用需求。

关键词 激光器;光纤激光器;被动调 Q;Cr⁴⁺:YAG 晶体;纳秒脉冲;时间抖动

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1102002

Cladding Pumped Nanosecond Passively Q-Switched Yb-Doped Fiber Laser with Cr⁴⁺:YAG as Saturable Absorber

Liu Jia Liu Jiang Wang Pu

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract A cladding pumped passively Q-switched Yb-doped fiber laser with Cr⁴⁺:YAG saturable absorber is reported and stable nanosecond pulse trains is gotten. Two laser configurations of linear cavity and ring cavity are set up, and both of them can effectively restrain the generation of stimulated Brillouin scattering (SBS) and the generation of self-pulse. A ring cavity with Cr⁴⁺:YAG inside the cavity to obtain stable 1 μs pulse trains is established. The amplitude fluctuation and timing jitter are below 5% (RMS). Further more, stable pulse trains by using a high reflective fiber Bragg grating (FBG) as a resonator mirror in a linear cavity is reached. The tunable pulse repetition rate is from 9.1 kHz to 30.3 kHz and the minimum pulse duration is 156 ns which is much less than microsecond pulses reported before. Although the average output power is only hundreds milli-watts now, it is convenient to boost the power with a stage of fiber amplifier because the laser uses a fiber coupler as the output of pulse trains. This kind of pulse laser can be used as a seed source and amplified to tens of watts for practical applications in the future.

Key words lasers; fiber laser; passively Q-switched; Cr⁴⁺:YAG crystal; nanosecond pulse; timing jitter

OCIS codes 140.3540; 140.3510; 140.3410; 140.3538

1 引言

1.0~1.1 μm 波段的纳秒脉冲调 Q 光纤激光器由于具有较好的光束质量、好的散热性能、较低的

使用成本以及结构紧凑和携带方便等优点,在军事、工业、生物医学、遥感等领域有着广阔的应用前景^[1~4]。与主动调 Q 技术相比,被动调 Q 技术具有

收稿日期: 2011-05-31; 收到修改稿日期: 2011-07-15

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(KZ2011100050011)资助课题。

作者简介: 刘佳(1986—),女,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: jiaerbest@sina.com

导师简介: 王璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

结构简单、系统紧凑、成本低廉等优点^[5,6],越来越受到关注。

目前,国内被动调 Q 光纤激光器的研究主要采用两种方式:第一种为基于受激布里渊散射(SBS)的调 Q 光纤激光器,2008 年黄琳等^[7]报道了基于 SBS 效应的自调 Q 光纤激光器系统,在单模光纤 1.5 m,抽运功率 45 mW 条件下,得到脉宽 2.6 ns,平均输出功率 7.35 mW 的脉冲输出,不足的是,平均输出功率过低。与其他被动调 Q 激光器相比,基于 SBS 的被动调 Q 光纤激光器的输出不够稳定,表现为振幅抖动和时间抖动较大。第二种为以增益光纤作为可饱和吸收体(SA)的调 Q 光纤激光器。2003 年苏红新等^[8]报道了掺镱双包层光纤激光器中的自脉冲现象,在抽运功率 248 mW 条件下,得到了脉宽 12 μ s 的脉冲输出;在国外以增益光纤作可饱和吸收体的被动调 Q 光纤激光器已被广泛研究,2005 年 A. Fotiadi 等^[9]用掺 Sm 光纤被动调 Q,在抽运功率 6 W 条件下,得到脉宽约 650 ns,平均输出功率 2.5 W 的脉冲输出;2003 年 P. Adel 等^[10]用 Tm³⁺-Yb³⁺ 共掺杂光纤被动调 Q,在抽运功率 2.4 W 条件下,得到脉宽 1.1 μ s 的脉冲输出。2003 年 T. Tordella 等^[11]用掺 Cr⁴⁺ 光纤被动调 Q,在抽运功率 200 mW 条件下,得到脉宽 3.0 μ s 和重复频率 84 kHz 的脉冲输出。从中可以看出,采用此种方式得到的脉冲宽度最小也有 650 ns,脉冲较宽,从而很难满足实际的工业应用。

为了解决目前被动调 Q 光纤激光器主要存在的时间抖动和振幅抖动较大,脉冲串不稳定,脉冲宽度较宽等优点,本文采用一种新的被动调 Q 方法:用 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为 SA 插入光纤激光器中进行被动调 Q。选用 Cr⁴⁺:YAG 晶体作 SA 的原因是它在 1.0~1.1 μ m 波段具有高的吸收截面、高的损伤阈值、好的导热性能、Cr⁴⁺ 离子在 YAG 晶体四能级系统中低的激发寿命等优点,并且 Cr⁴⁺:YAG 在固体激光器中作为调 Q 晶体的技术已经很成熟。

采用 Cr⁴⁺:YAG 晶体实现光纤激光器被动调 Q 脉冲输出已有少数报道,迄今所知的最窄脉宽为 2006 年 M. Laroche 等^[12]得到脉宽 2.7 ns 和平均输出功率 77 mW。2007 年台湾的 J. Y. Huang 等^[13]得到最窄脉宽 2.1 ns。但是上述两组结果都有 SBS 非线性影响因素和自锁模现象,并且具有非光纤输入/输出、脉冲串不稳定等缺点,与实际工业应用有很大的距离。为了解决上述问题,本文报道了一种高效的用 Cr⁴⁺:YAG 晶体作 SA 被动调 Q

的纳秒脉冲包层抽运掺镱光纤激光器,实验建立环形腔和线形腔两种腔形,可有效抑制 SBS 非线性效应,抑制自脉冲产生,无自锁模现象,时间抖动和振幅抖动均方根(RMS)小于 5%。

2 实验装置

实验用的 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 纳秒脉冲包层抽运掺镱光纤激光器主要包括环形腔和线形腔两种腔形。

第一种环形结构被动调 Q 光纤激光器通过保证激光的单向运转避免了烧孔效应,并有效减少 SBS 非线性影响,抑制自脉冲产生,能获得较窄的线宽和较高的输出功率,因其稳定性高、制作简便等优点而备受关注,实验装置如图 1 所示。它主要由抽运合束器(2+1) \times 1.6 m 长的掺镱双包层单模光纤(YDF)、光纤环形器、输出耦合比为 20:80 的光纤耦合器及包含 Cr⁴⁺:YAG SA 的外腔组成。

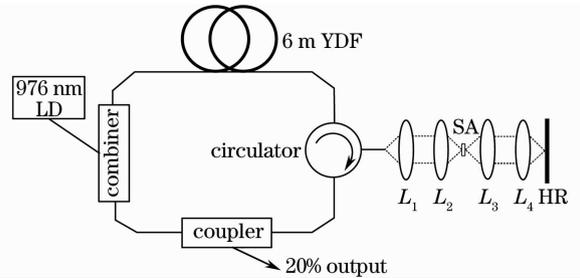


图 1 环形腔 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 纳秒脉冲包层抽运掺镱光纤激光器实验装置图

Fig.1 Schematic setup of ring cavity cladding pumped nanosecond passively Q-switched YDF laser with Cr⁴⁺:YAG as saturable absorber

实验采用中心波长 976 nm、最大输出功率 10 W、光纤输出的半导体二极管激光器进行包层抽运。抽运合束器(2+1) \times 1 抽运端光纤的芯径/内包层直径[数值孔径(NA)]为 105/125 μ m(0.22),抽运效率 92.4%,输出端光纤的芯径/内包层直径(NA)为 6/125 μ m(0.14/0.46),它把抽运光耦合进增益光纤。掺镱光纤作为增益介质,光纤的芯径/内包层直径(NA)为 6.5/128 μ m(0.16/0.46),在 976 nm 波段的吸收系数约 3.3 dB/m。激光进入光纤环形器并从它的第二端输出到达外腔并被反馈。外腔结构为:焦距为 11 mm 的准直镜 L₁、焦距为 11 mm 的聚焦镜 L₂ 把光斑聚焦在 Cr⁴⁺:YAG SA 上,焦距为 11 mm 的准直镜 L₃,焦距为 11 mm 的聚焦镜 L₄ 把光斑聚焦在反射率为 99% 的高反射镜(HR)上,HR 对激光进行正反馈。光纤耦合器

80% 的一端熔在腔内,以保证腔内更稳定的运转,20% 的一端进行激光输出。

用紫外固化胶把 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ SA 粘在热沉上面,热沉的中间是直径为 3 mm 的圆孔,以保证激光通过,无需其他水冷,用五维调整架调节 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ SA 的位置,当晶体光斑体积最小时调 Q 具有最低的损耗阈值。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体选用直径 ϕ 为 9.5 mm、厚度 d 为 1.14 mm、在 1064 nm 波段初始透射率 T_0 为 60% 的可饱和吸收体。

第二种线形结构被动调 Q 光纤激光器中引入高反射率光纤布拉格光栅(FBG),反射率 80%,以保证激光中心波长在 1064 nm 左右,抑制 SBS 非线性影响,抑制自脉冲产生。实验装置如图 2 所示。它主要由抽运合束器 $(2+1)\times 1$,3 m 长的掺镱双包层单模光纤,反射率 80%、中心波长 1064.3 nm、带宽 0.5 nm 的 FBG 以及包含 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ SA 的外腔组成。

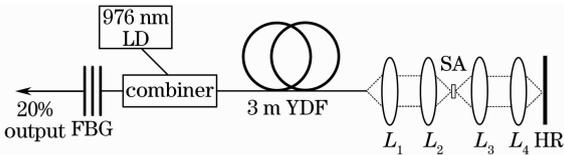


图 2 线形腔 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 纳秒脉冲包层抽运掺镱光纤激光器实验装置图

Fig. 2 Schematic setup of linear cavity cladding pumped nanosecond passively Q-switched YDF laser with $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ as saturable absorber

本装置同样采用中心波长 976 nm、最大输出功率 10 W、光纤输出的半导体二极管激光器进行包层抽运,抽运合束器 $(2+1)\times 1$ 把抽运光耦合进增益光纤。掺镱光纤作为增益介质,在 976 nm 波段的吸收损耗约 3.3 dB/m,芯径/内包层直径 NA 为 6.5/128 μm (0.16/0.46)。实验选用低 NA 的增益光纤从而保证了光纤激光器高的光束质量。增益激光进入外腔后并被反馈,外腔结构同样是:焦距为 11 mm 的准直镜 L_1 ,焦距为 11 mm 的聚焦镜 L_2 把光斑聚焦到 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ SA 上,焦距为 11 mm 的准直镜 L_3 ,焦距为 11 mm 的聚焦镜 L_4 把光斑聚焦到 HR 上从而形成反馈,HR 的反射率也是 99%。增益激光被外腔反馈后,到达反射率为 80% 的 FBG,FBG 使 80% 的激光在腔内运转,从而保证了稳定的激光器系统,另一端输出 20% 的激光脉冲。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体选用直径 ϕ 为 5.2 mm、厚度 d 为 0.8 mm、在 1064 nm 波段初始透射率 T_0 为 58.6% 的 SA。

上述两组实验的脉冲串、重复频率和脉冲宽度都采用安捷伦的采样速率 4 GS/s 和 1 GHz 带宽的数字示波器进行监测。并用功率计测量其输出功率。

3 实验结果及讨论

第一种环形结构被动调 Q 光纤激光器中,首先不放入 SA,用示波器和功率计都探测到有连续(CW)激光输出。为了得到被动调 Q 纳秒脉冲掺镱光纤激光器,把 SA 小心地放在透镜 L_2 和 L_3 之间,通过调节 SA 的位置,在抽运功率 1.238 W 不变的条件下,测得外腔的损耗最大,此刻 SA 恰巧在两个透镜 L_2 和 L_3 之间的焦点处,外腔反馈最大。通过优化外腔,其中主要优化 SA 和 HR 的位置,并把抽运功率逐渐增加到最大值 2.664 W,用示波器探测到了较稳定、时间抖动和振幅抖动(RMS)值都低于 5% 的脉冲串,如图 3(a)所示。

在给定的抽运功率的条件下,发现当调节 SA 恰巧在两透镜焦点处时,脉冲振幅最大,脉宽最窄。稍微把 SA 从焦点处移开,脉宽串的振幅降低,重复频率增加。进一步移开 SA,脉冲串变得越来越不稳定,逐渐变成准 CW,说明此时 SA 没有发生高效的漂白效应。随着抽运功率从 0 开始增加,激光器先发出连续光,当抽运功率增加到 1.238 W 时,出现了较稳定的脉冲串,此时即为调 Q 的阈值,随着抽运功率的进一步增加,脉冲串越来越稳定,时间抖动和振幅抖动都越来越小,脉冲宽度越来越窄,当抽运功率增大到 2.664 W 时,得到最窄脉宽 1 μs ,如图 3(b)所示。由于某些器件所承受的功率有限,没有继续增加抽运功率,如果继续增加抽运功率,可能得到更稳定的脉冲串。

图 3(c),(d)和(e)为激光器的输出特点示意图,从图 3(c)中可以看出,随着抽运功率从 0.739 W 增加到 2.664 W,平均输出功率从 16.92 mW 线性增加到 334 mW。在图 3(d)和(e)中,随着抽运功率从 1.238 W 增加到 2.664 W,重复频率从 8.9 kHz 逐渐增加到 29.7 kHz,脉冲宽度从 1.2 μs 逐渐缩窄到 1.0 μs 。

通过平均功率和重复频率,可以计算得到单脉冲能量,图 4(a)表示,随着抽运功率从 1.238 W 增加到 2.664 W,相应的单脉冲能量从 9.79 μJ 逐渐增加到 11.25 μJ 。图 4(b)中,利用单脉冲能量和脉冲宽度计算得到,随着抽运功率从 1.238 W 增加到 2.664 W,相应的峰值功率从 8.16 W 逐渐增加到 11.25 W。图 4(c)为环形腔输出激光的光谱图,其

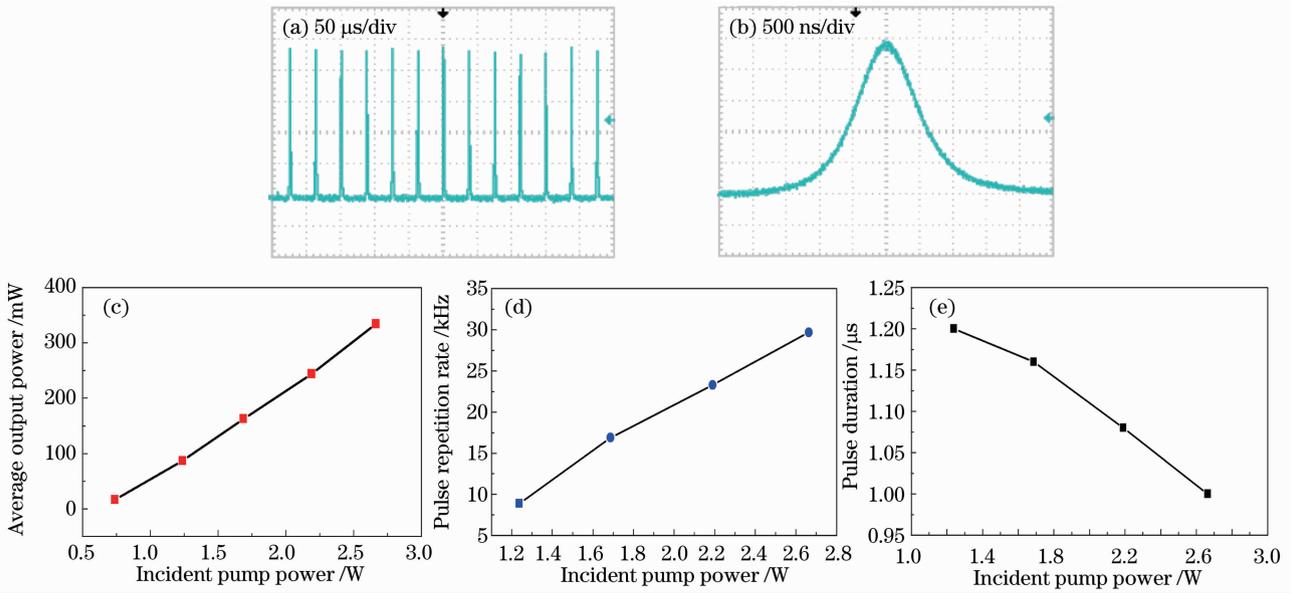


图 3 (a) 环形腔 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 纳秒脉冲包层抽运掺镱光纤激光器的主要输出特征; (b) 脉冲宽度 $1 \mu\text{s}$; (c) 平均输出功率随抽运功率的变化曲线; (d) 重复频率随抽运功率的变化曲线; (e) 脉冲宽度随抽运功率的变化曲线

Fig. 3 (a) Main output characteristics of the ring cavity cladding pumped nanosecond passively Q-switched YDF laser with $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ as saturable absorber; (b) pulse duration of $1 \mu\text{s}$; (c) average output power with the increase of incident pump power; (d) pulse repetition rate with the increase of incident pump power; (e) pulse duration with the increase of incident pump power

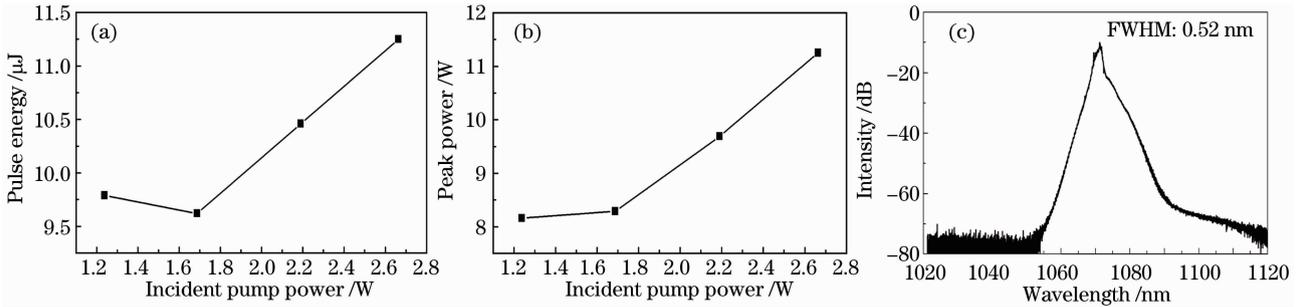


图 4 (a) 环形腔中单脉冲能量随抽运功率的变化曲线; (b) 峰值功率随抽运功率的变化曲线; (c) 纳秒脉冲串的光谱图

Fig. 4 (a) Pulse energy with the increase of incident pump power in ring cavity; (d) peak power with the increase of incident pump power; (c) optical spectrum of the nanosecond pulse train

中心波长为 1071.176 nm , 3 dB 半峰全宽 (FWHM) 为 0.52 nm 。

上述实验结果表明, 环形腔光纤激光器能有效地抑制 SBS 非线性效应, 抑制自脉冲产生, 从而得到很稳定的纳秒脉冲串, 并且重复频率 $8.9 \sim 29.7 \text{ kHz}$ 可调谐, 无自锁模现象, 最窄脉宽 $1 \mu\text{s}$, 低于国内被动调 Q 光纤激光器普遍得到的几微秒的脉宽。

第二种线形结构光纤激光器与环形结构的主要区别是掺镱光纤由 6 m 缩短到 3 m , 目的是缩窄脉宽, 另外还加入了高反射率 FBG, 反射率 80% , 作为输出腔镜, 高反射率的 FBG 能有效地抑制 SBS 非线性效应, 抑制自脉冲产生, 并且能定义激光的输出

波长在 1064 nm 左右。线形腔被动调 Q 光纤激光器的谐振腔由 FBG 和外腔内的 HR 组成。

首先, 外腔同样只由聚焦镜、准直镜和 HR 组成, 先不放入 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ SA, 使得光纤激光器输出 CW。其次, 同样把 SA 放入两个透镜 L_2 和 L_3 之间, HR 和 $\text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ SA 都由五维的调整架固定, 在抽运功率 1.238 W 不变的情况下, 通过优化 HR 和 SA 的位置, 使得外腔的损耗最大, 从 FBG 输出端测得损耗 1.06 dB , 用挡光板阻断外腔的光路, 测得损耗为 -16.86 dB , 计算得到此时外腔的反馈最大值约为 16 dB 。通过数字示波器监测到均匀的脉冲串。在抽运功率 3.581 W 时, 通过调节 SA 的位置, 使得脉冲的振幅最大, 脉宽最窄, 即为调 Q 的最

优时刻,脉冲串如图 5(a)所示。从 0 开始增加抽运功率,刚开始出连续光,没有发生调 Q 现象,随着抽运功率的增加,出现了不稳定的脉冲串,当抽运功率达到 1.687 W 时,脉冲串开始稳定,此刻即为调 Q 的阈值,伴随着抽运功率的进一步增加,发现脉冲串的时间抖动和振幅抖动都越来越小,系统越来越稳定,当最大抽运功率为 3.581 W 时,得到最窄脉宽 156 ns,如图 5(b)所示。用光谱仪测得此时纳秒脉冲激光的中心波长为 1063.9 nm。由于某些器件所

承受的功率有限,没有继续增加抽运功率,如果继续增加抽运功率,可能得到更稳定的脉冲串。

图 5(c)是随着抽运功率从 1.687 W 增加到 3.581 W,相应的平均输出功率从 13.17 mW 增加到 60.81 mW,相应的重复频率从 9.1 kHz 增加到 30.3 kHz。图 5(d)是随着抽运功率从 1.687 W 增加到 3.581 W,相应的脉冲宽度从 203 ns 逐渐减小到 156 ns。从中可以看出,抽运功率 3.581 W 时,得到最窄脉宽 156 ns。

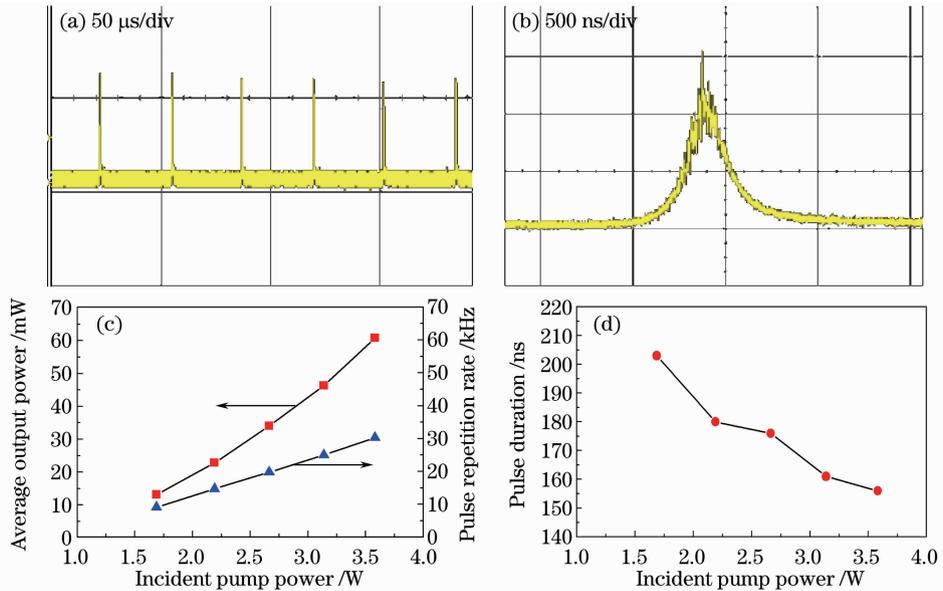


图 5 (a) 线形腔 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 光纤激光器的主要输出特征;(b)脉冲宽度 156 ns;(c)平均输出功率和重复频率随抽运功率的变化曲线;(d)脉冲宽度随抽运功率的变化曲线

Fig. 5 (a) Main output characteristics of the linear cavity cladding pumped nanosecond passively Q-switched Yb-doped fiber laser with $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ as saturable absorber; (b) pulse duration of 156 ns; (c) average output power and pulse repetition rate with the increase of incident pump power; (d) pulse duration with the increase of incident pump power

如图 6(a)所示,通过平均功率和重复频率,可以计算得到单脉冲能量随着抽运功率从 1.687 W 增加到 3.581 W,相应的单脉冲能量从 1.447 μJ 逐渐增加到 2.007 μJ 。图 6(b)中,利用单脉冲能量和

脉冲宽度计算得到,随着抽运功率从 1.687 W 增加到 3.581 W,相应的峰值功率从 7.128 W 逐渐增加到 12.865 W。图 6(c)为输出激光的光谱图,其中中心波长为 1064.6 nm,3 dB FWHM 为 0.61 nm。在

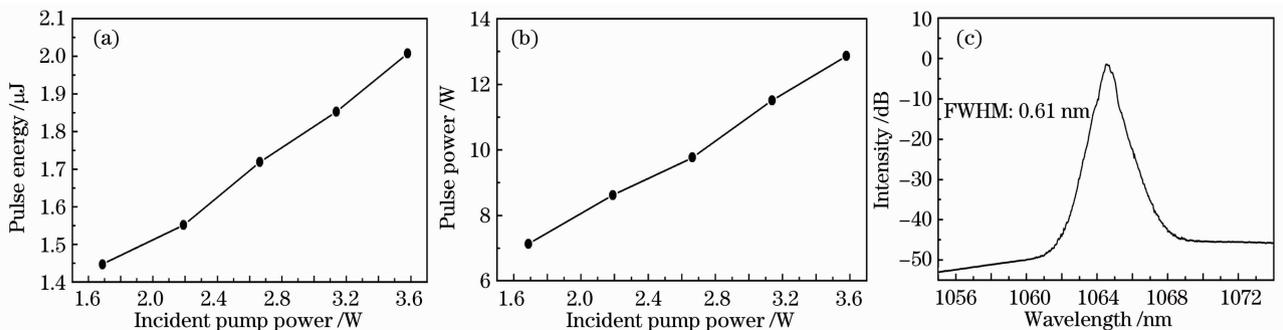


图 6 (a)线形腔中单脉冲能量随抽运功率的变化曲线;(b)峰值功率随抽运功率的变化曲线;(c)纳秒脉冲串的光谱图
Fig. 6 (a) Pulse energy with the increase of incident pump power in linear cavity; (b) peak power with the increase of incident pump power; (c) optical spectrum of the nanosecond pulse train

优化外腔的条件下,脉冲串的振幅抖动控制在5%以下,时间抖动在10%以内。从实验结果可以看出,线形腔结构光纤激光器能实现156 ns的窄脉宽,随着抽运功率从1.687增加到3.581 W,重复频率和脉冲宽度分别在9.1~30.3 kHz和203~156 ns范围内可调谐,但是时间抖动和振幅抖动都比环形腔结构大。

总之,本文报道的用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作为可饱和吸收体被动调Q的纳秒脉冲包层抽运掺镱光纤激光器,比较环形腔和线形腔发现环形的结构输出脉冲较宽但系统稳定性高,线形的结构更易得到窄脉冲输出。本实验最窄脉宽156 ns,无自锁模现象,远低于国内被动调Q光纤激光器普遍得到的几个微秒的脉冲宽度,并且平均输出功率、重复频率和脉冲宽度都可调谐,实验装置具有可重复性,能够进行恢复和量化,并且激光器长时间工作纳秒脉冲串都很稳定,因此具有广泛的应用前景和实用性。

4 结 论

实现了 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体作为SA被动调Q包层抽运掺镱光纤激光器,并得到稳定纳秒脉冲输出。采用环形腔和线形腔两种腔形,都有效地抑制了SBS非线性效应,抑制自脉冲产生,无自锁模现象。采用环形腔结构,得到脉宽1 μs ,时间抖动和振幅抖动RMS值都小于5%的光纤激光输出。线形腔结构选用高反射率的FBG作为输出腔镜,也实现了稳定脉冲输出,最窄脉宽156 ns,无自锁模现象,远低于国内被动调Q光纤激光器普遍得到的几个微秒的脉冲宽度。虽然平均输出功率只有几百毫瓦,但因采用光纤输出,可与下一步的光纤放大器相匹配,作为种子源经过光纤放大器放大输出功率能达到几十瓦,并且成本低、体积小,在激光加工和激光遥感等方面都有潜在的应用。

致谢 感谢北京市教委和北京工业大学的大力支持。

参 考 文 献

1 Gan Yu, Xiang Wanghua, Zhou Xiaofang *et al.*. Passive Q-

- switching and modelocking Yb^{3+} -doped fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1021~1024
- 甘雨, 向望华, 周晓芳等. 被动调Q锁模掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1021~1024
- 2 Feng Xiaoxing, Chen Bai, Zhu Yi *et al.*. Study of self modelocking in Q-switched and continuous working Yb-doped fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 873~877
- 冯小星, 陈柏, 朱毅等. 调Q及连续掺Yb光纤激光器中的自锁模研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 873~877
- 3 Ning Jiping, Zhang Weiyi, Zhou Lei *et al.*. All-fiber Q-switched ytterbium-doped double-clad laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 483~487
- 宁继平, 张伟毅, 周雷等. 掺镱包层光纤激光器的全光纤调Q技术[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 483~487
- 4 Chen Xiaodong, Sun Qing, Zhao Jiasheng *et al.*. Study on influences of amplified spontaneous emission on actively Q-switched ytterbium-doped fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1929~1933
- 陈晓东, 孙青, 赵佳生等. 主动调Q掺镱光纤激光器中放大自发辐射影响的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1929~1933
- 5 Lei Pan, Ilya Utkin, Robert Fedosejevs. Experiment and numerical modeling of high-power passively Q-switched ytterbium-doped double-clad fiber lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(1): 68~75
- 6 Lei Pan, Ilya Utkin, Ruijun Lan *et al.*. High-peak-power subnanosecond passively Q-switched ytterbium-doped fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(7): 895~897
- 7 Huang Lin, Liu Yongzhi, Dai Zhiyong. A self Q-switched fiber laser based on SBS phase conjugation[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2008, **29**(4): 737~743
- 黄琳, 刘永智, 代志勇. 基于光纤中SBS相位共轭的自调Q光纤激光器[J]. *发光学报*, 2008, **29**(4): 737~743
- 8 Su Hongxin, Lü Kecheng, Yan Peiguang *et al.*. Experimental study on the self-pulsation behavior of LD end-pumped Yb^{3+} -doped double clad fiber laser[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2003, **20**(4): 422~426
- 苏红新, 吕可诚, 闫培光等. LD端面抽运掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器自脉动行为的实验研究[J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(4): 422~426
- 9 A. Fotiadi, A. Kurkov, I. Razdobreev. All-fiber passively Q-switched ytterbium laser[C]. *CLEO/Europe-EQEC*, 2005, **39**(2000): 515
- 10 P. Adel, M. Auerbach, C. Fallnich *et al.*. Passive Q-switching by Tm^{3+} co-doping of a Yb^{3+} -fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(21): 2730~2735
- 11 T. Tordella, H. Djellout, B. Dussardier *et al.*. High repetition rate passively Q-switched $\text{Nd}^{3+}:\text{Cr}^{4+}$ all-fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(18): 1307~1308
- 12 M. Laroche, H. Gilles, S. Girard *et al.*. Nanosecond pulse generation in a passively Q-switched Yb-doped fiber laser by $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ saturable absorber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(6): 764~766
- 13 J. Y. Huang, H. C. Liang, K. W. Su *et al.*. High power passively Q-switched ytterbium fiber laser with $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ as a saturable absorber[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 473~479