

基于光纤可饱和吸收体的 1993 nm 纳秒 脉冲掺铥全光纤双腔激光器

刘伟, 金东臣, 孙若愚, 张倩, 侯玉斌, 沈默, 刘江, 王璞

北京工业大学激光工程研究院, 北京市激光应用技术工程技术研究中心, 北京 100124

摘要 报道了一种基于光纤可饱和吸收体的纳秒脉冲掺铥全光纤双腔激光器。该激光器采用线型双腔结构, 采用 1550 nm 连续光纤激光器作为抽运源, 以光纤布拉格光栅作为波长选择器件, 利用掺铥光纤的可饱和吸收特性, 同时结合双谐振腔间的相互作用, 获得稳定的纳秒脉冲输出。分别采用单包层铥共掺光纤和双包层掺铥光纤作为增益介质, 研究二者对激光输出性能的影响, 并进行优化对比, 最终实现平均功率为 256.3 mW, 最窄脉宽为 87 ns 的 1993 nm 激光输出, 脉冲重复频率在 20.0~33.3 kHz 范围内可调。

关键词 激光器; 光纤激光器; 纳秒脉冲; 双腔; 光纤可饱和吸收体

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0801006

1993 nm Nanosecond Pulse Generation from Tm-Doped All-Fiber Dual-Cavity Laser with Fiber-Based Saturable Absorber

Liu Wei, Jin Dongchen, Sun Ruoyu, Zhang Qian,

Hou Yubin, Shen Mo, Liu Jiang, Wang Pu

Beijing Research Center of Laser Application and Engineering, Institute of Laser Engineering,

Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract A nanosecond Tm-doped all-fiber dual-cavity laser with fiber-based saturable absorber is reported. The laser oscillator is constructed in a linear dual-cavity. The system uses a 1550 nm continuous-wave fiber laser as the pump source and fiber Bragg gratings as the wavelength-selective devices. Based on the saturable absorption characteristics of the Tm-doped fiber and the unique design of dual-cavity, the stable nanosecond operation is achieved. Meanwhile, the effect of the single-cladding Ho-Tm co-doped fiber and double-cladding Tm-doped fiber as the gain media on the laser output performance is studied. The maximum output power of the system is 256.3 mW, and the minimum pulse duration is 87 ns with the central wavelength of 1993 nm. The sequential nanosecond pulses can be obtained at the repetition rate of 20.0-33.3 kHz.

Key words lasers; fiber laser; nanosecond pulse; dual-cavity; fiber-based saturable absorber

OCIS codes 140.3510; 060.3735; 320.4240; 140.3540

1 引言

掺铥光纤具有较宽的增益带宽, 可实现 1.7~2.1 μm 波段范围的激光输出^[1]。在科学研究领域, 2 μm 波段高平均功率、高峰值功率的短脉冲掺铥光纤激光器可用于激发 He、Ne、Ar 等稀有气体, 产生高次谐波, 相对于近红外激光抽运, 可以获得更短的阿秒激光脉冲输出^[2]; 也可用于抽运光学参量振荡器以获得

收稿日期: 2016-12-27; 收到修改稿日期: 2017-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(61235010, 61307054)、国家自然科学基金重大仪器项目(61527822)

作者简介: 刘伟(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器及光纤放大器方面的研究。

E-mail: liuweiph@163.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、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。

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

3~5 μm 和 8~12 μm 波段的激光。在生物医疗领域,2 μm 波段包含了 1940 nm 附近的水吸收峰,高功率的纳秒脉冲掺铥光纤激光器可用于新一代激光手术刀,对组织穿透深度浅、创面小、止血性能好^[3-4]。此外,2 μm 波段纳秒脉冲掺铥光纤激光器在激光通信、光电对抗、材料加工等领域也有不可替代的重要应用^[5-7]。因此,研制 2 μm 波段高平均功率、高峰值功率的纳秒脉冲掺铥光纤激光器有着重要的应用价值。

目前纳秒脉冲掺铥光纤激光器主要通过主动调 Q、被动调 Q 和增益开关等技术实现。主动调 Q 是通过引入电光调制器(EOM)或声光调制器(AOM)等调制器件改变腔内 Q 值来产生激光脉冲,输出脉冲宽度在几十纳秒到几百纳秒量级可调。2003 年,El-Sherif 等^[8]报道了用 Nd:YAG 激光抽运的电光调 Q 掺铥光纤激光器,实现重复频率小于 100 Hz、脉宽为 320 ns、峰值功率为 3.3 kW 的脉冲输出。2007 年,Eichhorn 等^[9]采用声光调制技术实现脉宽为 41 ns 的掺铥脉冲光纤激光器,输出激光最大平均功率为 30 W,单脉冲能量为 270 nJ。同年,Jiang 等^[10]以 1.55 μm 掺铥光纤放大器作为抽运源,抽运掺铥光纤,首次实现基于增益开关技术的掺铥光纤激光器,输出脉宽为 10 ns。2011 年,Simakov 等^[11]以 1.55 μm 半导体激光器作为抽运源,抽运保偏掺铥光纤,实现线偏振输出的中心波长为 2.044 μm 的增益开关掺铥光纤激光器,脉冲宽度为 25 ns,重复频率为 300 kHz。主动调 Q 技术使用空间结构的元器件,价格昂贵、结构复杂、抗环境干扰能力欠佳;通过增益开关技术实现的脉冲激光输出一般功率较低,需进行多级放大,增加了系统复杂性,且成本较高;而采用被动调制技术具有成本低廉、结构紧凑等优点。对于传统可饱和吸收体,半导体可饱和吸收镜(SESAM)^[12]制作工艺复杂,生产成本低,可饱和吸收光谱范围相对较窄;碳纳米管(SWNT)^[13]和石墨烯成本低廉,可饱和吸收光谱范围宽,但是制作时具有参数不可控性,如 SWNT 的直径、石墨烯的层数均匀性等。而基于光纤可饱和吸收体的纳秒脉冲产生技术,无需额外的调制器件,降低了系统的复杂性,具有成本低廉、结构紧凑、易于集成的特点。

近年来,使用基于不同掺杂元素的光纤作为可饱和吸收体,进而实现脉冲输出的方式逐渐引起人们的关注^[14-18]。2003 年,Tordella 等^[19]运用掺铬光纤作为可饱和吸收体,研制出被动调 Q 掺铥全光纤激光器,输出最窄脉宽为 6.4 μs ,最大单脉冲能量为 15 μJ 。2005 年,Fotiadi 等^[20]报道了一种将掺钆光纤用于被动调 Q 的掺铥光纤激光器,输出最窄脉宽为 650 ns,相应单脉冲能量为 19 μJ 。2007 年,Jackson^[21]以掺铥光纤作为可饱和吸收体,以掺铥光纤作为增益介质实现脉冲激光输出,其最窄脉宽为 1 μs ,最大输出功率为 10 W(单脉冲能量为 90 μJ),但脉冲序列振幅稳定性差,呈现多峰结构。2009 年,Tsai 等^[22-24]提出基于光纤模场失配法的被动调 Q 技术,实现掺铥、掺铥和掺铥纳秒脉冲光纤激光器,但受限于单模抽运,平均输出功率较低,同时模场适配熔接导致熔点难以承受高功率。2013 年,Jin 等^[25-26]以掺铥光纤作为可饱和吸收体,结合新型的双谐振腔结构获得掺铥全光纤激光器,并将此方法应用于铥铥共掺光纤激光器中^[27]。

本文利用掺杂光纤的可饱和吸收特性,并结合双谐振腔结构的独特设计,获得 2 μm 波段的纳秒脉冲激光输出。采用的双谐振腔结构可实现被动调 Q、增益开关和功率放大三个过程,将振荡器、放大器同时包含在同一结构中,整个过程包含两次波长变换,转换效率高,输出激光稳定性好,可以承受较高功率。分别研究采用单包层铥铥共掺光纤和双包层掺铥光纤作为增益介质对激光输出性能的影响,通过优化对比实验,最终实现中心波长为 1993 nm、最窄脉宽为 87 ns 的稳定脉冲输出,其最大平均输出功率为 256.3 mW,脉冲重复频率在 20.0~33.3 kHz 范围内可调。相较于 Tsai 等^[24]基于光纤模场失配方法获得的脉宽为 160 ns,相应峰值功率为 75 W 的掺铥光纤激光器,该激光输出脉宽在百纳秒以内,激光峰值功率为 88.5 W,优于之前相关报道实验结果。

2 实验装置

基于掺杂光纤作为可饱和吸收体的掺铥全光纤纳秒脉冲双腔激光器如图 1 所示。其中 HR 表示高反射率,OC 表示输出耦合器。该实验装置采用纤芯抽运,抽运源采用自制的 1550 nm 连续光纤激光器。整个实验装置采用线型双腔结构,使用实验室自制光纤布拉格光栅(FBG)作为谐振腔的波长选择器件。外腔由中心波长为 1904 nm、带宽为 0.5 nm、反射率大于等于 99%的光纤布拉格光栅对组成。外腔增益介质为单包层铥铥共掺光纤(纤芯和包层直径分别为 9 μm 和 125 μm ,在 790 nm 波长处的吸收系数为 120 dB/m,在 1550 nm 波长处的吸收系数约为 12 dB/m,纤芯数值孔径为 0.16)或双包层掺铥光纤(SM-TDF-10P/130-HE,纤芯和包层直径分

别为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $130\ \mu\text{m}$, 在 $793\ \text{nm}$ 波长处的纤芯吸收系数为 $507\ \text{dB/m}$, 在 $1550\ \text{nm}$ 处的纤芯吸收系数约为 $106\ \text{dB/m}$, 纤芯数值孔径为 0.15)。内腔由中心波长为 $1993\ \text{nm}$ 、带宽为 $0.5\ \text{nm}$ 的光纤布拉格光栅对组成, 其中高反型光纤光栅反射率大于等于 99% , 低反型光纤光栅反射率约为 85% , 将其作为输出端。内腔增益介质为单包层铥铥共掺光纤(纤芯和包层直径分别为 $9\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$, 在 $790\ \text{nm}$ 波长处的吸收系数为 $120\ \text{dB/m}$, 在 $1550\ \text{nm}$ 波长处的吸收系数约为 $12\ \text{dB/m}$, 纤芯数值孔径为 0.16)。 $1550\ \text{nm}$ 连续光纤激光器作为抽运源经波分复用器(WDM)耦合进外腔增益光纤, 首先在外腔光栅对构成的谐振腔内往返振荡实现被动调 Q 产生 $1904\ \text{nm}$ 的激光, 然后 $1904\ \text{nm}$ 激光对 $1993\ \text{nm}$ 的谐振腔进行抽运, 产生 $1993\ \text{nm}$ 纳秒脉冲, 经外腔增益光纤放大后输出腔外。其中内腔光纤布拉格光栅的中心波长决定该激光器的输出波长。

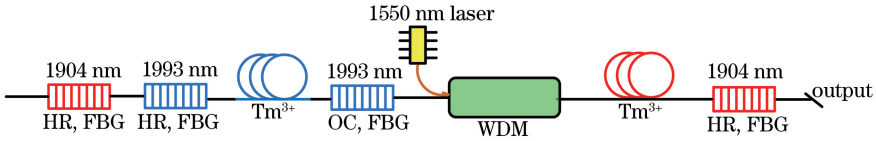


图 1 掺铥全光纤纳秒脉冲双腔激光器实验原理图

Fig. 1 Schematic of the nanosecond Tm-doped all-fiber dual-cavity laser

3 实验结果与分析

外腔增益光纤采用长度为 $2.5\ \text{m}$ 、纤芯和包层直径分别为 $9\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$ 的单包层铥铥共掺光纤, 内腔增益光纤采用长度为 $5.6\ \text{m}$ 、纤芯和包层直径分别为 $9\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$ 的单包层铥铥共掺光纤, 此为方案 1; 外腔增益光纤采用长度为 $0.3\ \text{m}$ 、纤芯和包层直径分别为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $130\ \mu\text{m}$ 的双包层掺铥光纤, 内腔增益光纤采用长度为 $3.5\ \text{m}$ 、纤芯和包层直径分别为 $9\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$ 的单包层铥铥共掺光纤, 此为方案 2。当采用方案 1 时, 外腔增益光纤所提供增益为 $30.0\ \text{dB}$, 在保证 $1904\ \text{nm}$ 激光输出的前提下, 对比不同长度内腔增益光纤所得出的实验现象, 调整内腔增益光纤长度为 $5.6\ \text{m}$ 时实现 $1993\ \text{nm}$ 脉冲激光输出。当采用方案 2 时, 外腔增益光纤所提供增益为 $31.8\ \text{dB}$, 相应地, 调整内腔增益光纤长度为 $3.5\ \text{m}$, 实现稳定脉冲输出。表 1 为不同类型增益光纤的吸收系数及实验参数设计。

表 1 不同类型增益光纤的吸收系数及实验参数设计

Table 1 Calculated initial absorption coefficient of different types of gain fibers and design of experimental parameters

Gain fiber	Absorption strength in core	Absorption strength in core	Fiber length / m	Initial absorption at $1550\ \text{nm}$ / dB
	at $793\ \text{nm}$ / $(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$	at $1550\ \text{nm}$ / $(\text{dB}\cdot\text{m}^{-1})$		
9/125 Ho-Tm doped fiber	120	12	2.5	30.0
SM-TDF-10P/130-HE	507	106	0.3	31.8

当采用方案 1 时, 激光器阈值为 $0.58\ \text{W}$ ($1550\ \text{nm}$ 抽运源最大输出功率为 $1.70\ \text{W}$), 此时在示波器上可观察到脉冲调制现象。当抽运功率增加至 $1.15\ \text{W}$, 输出稳定脉冲序列, 脉冲重复频率为 $63\ \text{kHz}$ 。继续增加抽运功率, 脉冲宽度随抽运功率的增加而减小, 脉冲重复频率和输出功率随抽运功率的增加而增加, 激光输出功率与抽运功率线性相关。最终得到平均功率为 $23\ \text{mW}$, 最窄脉宽为 $330\ \text{ns}$ 的激光输出, 脉冲重复频率在 $63\sim 80\ \text{kHz}$ 范围内可调。图 2 是 $350\ \text{MHz}$ 示波器记录的稳定脉冲序列。其中图 2(a) 为低抽运功率条件下, 重复频率为 $63\ \text{kHz}$ 时的脉冲序列; 图 2(b) 是抽运功率为 $1.7\ \text{W}$, 重复频率为 $80\ \text{kHz}$ 时的脉冲序列。

图 3 为重复频率为 $80\ \text{kHz}$ (抽运功率为 $1.7\ \text{W}$) 时激光器的输出光谱, 中心波长为 $1993.42\ \text{nm}$, $3\ \text{dB}$ 光谱带宽为 $0.13\ \text{nm}$, 信噪比约为 $50\ \text{dB}$ 。此外, 从输出光谱图中可以观察到强度较弱的 $1904\ \text{nm}$ 激光输出(中心波长为 $1904.71\ \text{nm}$), 与 $1993\ \text{nm}$ 的波长成分相差近 $26\ \text{dB}$, 输出波长仍以 $1993\ \text{nm}$ 为主, $1904\ \text{nm}$ 激光可以忽略。

为进一步提升激光器输出性能, 对比不同类型增益光纤对激光输出参数的影响, 将 $1550\ \text{nm}$ 抽运源输出功率提高至 $4.3\ \text{W}$ 。纤芯抽运条件下, 采用实验方案 2, 激光器阈值为 $2.7\ \text{W}$, 此时可观察到脉冲调制现象。当增加抽运功率至 $3.1\ \text{W}$ 时, 可以观察到稳定脉冲序列, 脉冲重复频率为 $20.0\ \text{kHz}$ 。随着抽运功率的增加, 脉冲重复频率和输出功率随之增加, 脉冲宽度随之减小。最终实现平均功率为 $256.3\ \text{mW}$ 、最窄脉宽

为 87 ns 的激光输出,脉冲重复频率在 20.0~33.3 kHz 范围内可调。图 4 是 350 MHz 示波器记录的稳定脉冲序列。其中图 4(a)为低抽运功率下,重复频率为 20.0 kHz 时的脉冲序列;图 4(b)是抽运功率为 4.3 W,重复频率为 33.3 kHz 时的脉冲序列。

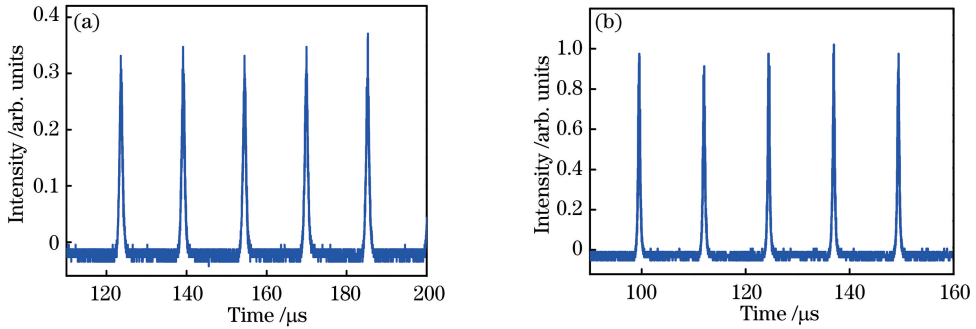


图 2 采用方案 1 时不同重复频率下的脉冲序列。(a)重复频率为 63 kHz;(b)重复频率为 80 kHz

Fig. 2 Pulse trains at different repetition rates under program 1. (a) Repetition rate of 63 kHz; (b) repetition rate of 80 kHz

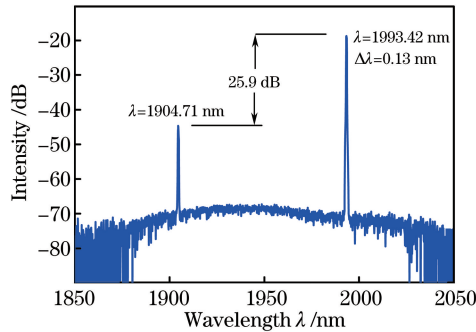


图 3 采用方案 1 时掺铥全光纤双腔激光器的输出光谱图

Fig. 3 Optical spectrum of the Tm-doped all-fiber dual-cavity laser under program 1

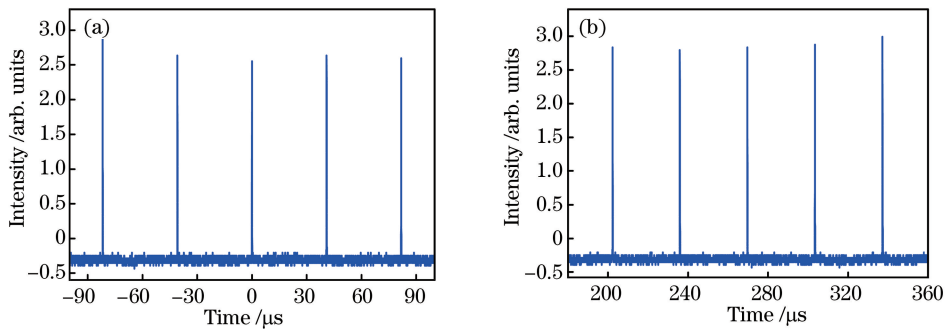


图 4 采用方案 2 时不同重复频率下的脉冲序列。(a)重复频率为 20.0 kHz;(b)重复频率为 33.3 kHz

Fig. 4 Pulse trains at different repetition rates under program 2. (a) Repetition rate of 20.0 kHz; (b) repetition rate of 33.3 kHz

当重复频率为 33.3 kHz(抽运功率为 4.3 W)时,激光器的输出光谱如图 5 所示。测得输出光谱中心波长为 1993.77 nm,3 dB 光谱带宽为 0.33 nm,信噪比约为 31 dB。与图 3 类似,依然可以观测到 1904 nm 波长成分(中心波长为 1903.77 nm),一部分原因是外腔采用的自制光纤光栅实际测量反射率不足 99%,另一部分原因是光纤光栅在高抽运功率下工作时,会导致部分 1904 nm 激光溢出腔外。从输出光谱图中可以看到,1904 nm 的光与 1993 nm 的光输出相差 7 dB,输出激光波长仍以 1993 nm 为主。

图 6 是分别采用方案 1 和方案 2 时激光器平均输出功率随抽运功率的变化曲线。图 6(a)是内、外腔增益光纤均采用单包层铥钬共掺光纤(纤芯和包层直径分别为 9 μm 和 125 μm)条件下的平均输出功率随抽运功率的变化图,图 6(b)是外腔增益光纤采用双包层掺铥光纤(纤芯和包层直径分别为 10 μm 和 130 μm),内

腔增益光纤采用单包层铽钛共掺光纤(纤芯和包层直径分别为 $9\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$)条件下的平均输出功率随抽运功率的变化图。从图中可以看出,平均输出功率与抽运功率线性相关。当外腔采用双包层增益光纤缩短腔长时,激光脉宽变窄,激光平均输出功率得到明显提升,最大输出功率为 $256.3\ \text{mW}$,相应抽运功率为 $4.3\ \text{W}$,输出拟合的斜效率为 5.8% 。后续研究中可以结合光纤模场适配,进一步提高输出效率。

当采用不同的实验方案时,激光器输出脉冲宽度和重复频率与抽运功率之间的关系如图 7 所示。图 7(a)是内、外腔增益光纤均采用单包层铽钛共掺光纤(纤芯和包层直径分别为 $9\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$)条件下的输出脉宽和重复频率的变化曲线,图 7(b)是外腔增益光纤采用双包层掺铽光纤(纤芯和包层直径分别为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $130\ \mu\text{m}$),内腔增益光纤采用单包层铽钛共掺光纤(纤芯和包层直径分别为 $9\ \mu\text{m}$ 和 $125\ \mu\text{m}$)条件下的输出脉宽和重复频率的变化曲线。

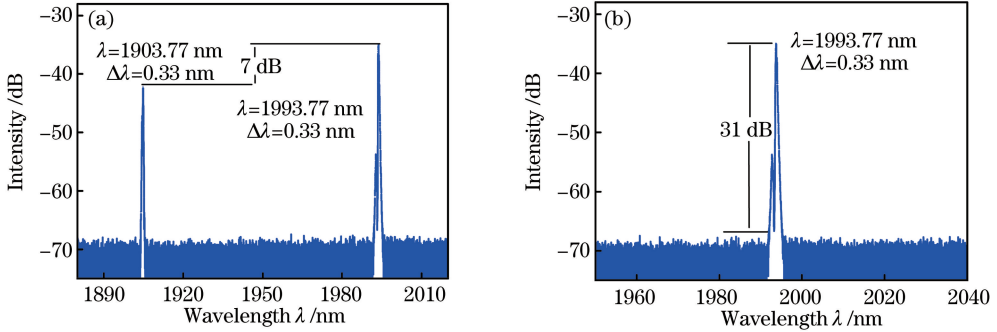


图 5 采用方案 2 时掺铽全光纤纳秒双腔激光器的输出光谱图。(a) 1904 nm 和 1993 nm 波长输出; (b) 1993 nm 波长输出
Fig. 5 Optical spectra of the nanosecond Tm-doped all-fiber dual-cavity laser under program 2.

(a) Output at 1904 nm and 1993 nm; (b) output at 1993 nm

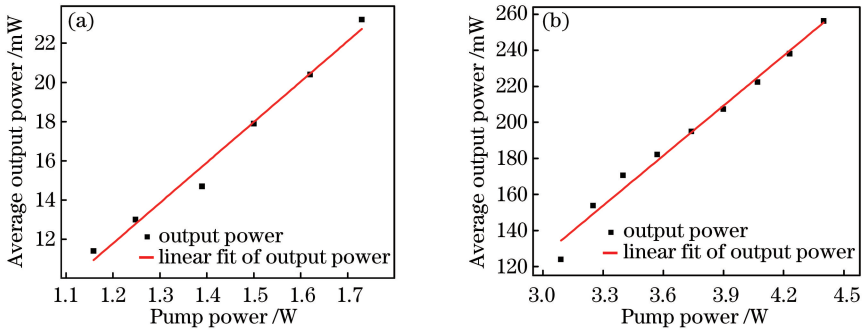


图 6 不同实验方案下平均输出功率与抽运功率之间的关系。(a) 方案 1; (b) 方案 2

Fig. 6 Relationship between average output power and pump power under different experimental programs.

(a) Program 1; (b) program 2

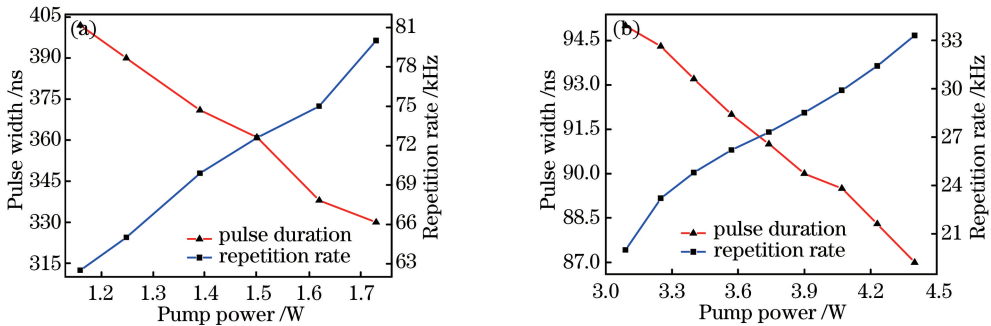


图 7 不同实验方案下重复频率和脉冲宽度与抽运功率之间的关系。(a) 方案 1; (b) 方案 2

Fig. 7 Relationship between repetition rate or pulse width and pump power under different experimental programs. (a) Program 1; (b) program 2

由图 7 可知,随着抽运功率的增加,激光器的输出脉冲宽度逐渐减小,脉冲重复频率逐渐增加,即以光纤作为可饱和吸收体的被动调 Q 与传统被动调 Q 机制下的脉冲演化过程基本一致。被动调 Q 激光器中谐振腔的损耗通过可饱和吸收体来调制,调 Q 脉冲可在谐振腔能量达到一定阈值后释放,该值由可饱和吸收体的饱和通量决定。饱和通量 $F_{\text{sat,A}}$ 表示为

$$F_{\text{sat,A}} = \frac{h\nu}{2\sigma_A}, \quad (1)$$

式中 $h\nu$ 为光子能量, σ_A 为吸收截面。

饱和光强 $I_{\text{sat,A}}$ 表示为

$$I_{\text{sat,A}} = \frac{h\nu}{2\sigma_A \tau_A} = \frac{F_{\text{sat,A}}}{\tau_A}, \quad (2)$$

式中 τ_A 为一个脉冲过后的吸收恢复时间。

可饱和吸收体的典型模型表示为

$$\alpha = \alpha_{\text{NS}} + \frac{\alpha_S}{1 + I/I_S}, \quad (3)$$

式中 I 为入射光强, I_S 为饱和光强, α_S 为饱和吸收系数, α_{NS} 为非饱和吸收系数。当光强很小 ($I \rightarrow 0$) 时,吸收系数为 $\alpha_S + \alpha_{\text{NS}}$; 当光强增大时,吸收系数逐渐减小,当 $I \gg I_S$ 时,吸收系数趋于 α_{NS} 。被动调 Q 激光器中,非饱和吸收系数要足够大,否则腔内未储存足够能量时可饱和吸收体就达到透明,输出脉冲能量会较小且脉冲较宽;若非饱和吸收系数过大则会导致抽运光过多损耗,输出脉冲能量也会较低。所以作为可饱和吸收体的内腔增益光纤的选取非常关键。实验中低抽运状态下,光强很弱,内腔增益光纤作为可饱和吸收体吸收系数较大,光的透过率很低,激光腔内 Q 值较低。随着抽运功率的提高,腔内反转粒子数持续积累,当光强接近饱和吸收光强时,可饱和吸收体的吸收系数减小。当光强达到一定数值时,增益光纤的可饱和吸收系数降到最低,激光谐振腔内 Q 值激增,输出调 Q 脉冲。

在方案 1 条件下,外腔采用单包层铽钛共掺光纤时,得到脉冲宽度为 330 ns 的脉冲输出。而当外腔采用双包层光纤时可以得到更窄的脉冲宽度,最窄输出脉宽为 87 ns。这是因为该类激光器的输出脉冲宽度不仅与抽运功率有关,还与外腔增益光纤所提供的增益强度有关。外腔所提供的增益越强,漂白内腔可饱和吸收光纤越容易,脉冲建立时间越短,可得到的脉宽也就越窄。传统被动调 Q 激光器的输出脉冲宽度还与整个激光谐振腔腔长有关。当谐振腔长度增加时,脉冲往返时间增加,将对脉冲窄化产生不利影响。本文采用两种不同外腔增益光纤所得出的实验结果与传统被动调 Q 脉冲变化规律一致。综上所述,脉冲宽度的窄化与抽运功率、激光器阈值、振荡腔腔长等多个因素密切相关。早期 Herda 等^[28]提出,在强抽运功率下,被动调 Q 激光器会因增益压缩效应发生脉冲窄化。在激光谐振腔损耗远大于可饱和损耗的条件下,脉冲宽度为

$$\tau = 7.04 T_r / \Delta g = \frac{3.52 T_r}{q_0 + A \sqrt{P/P_{\text{threshold}} - 1}}, \quad (4)$$

$$A = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{T_r}{\tau_g}} \cdot \sqrt{\log \frac{E_{\text{sat,g}}}{\tau_g P_0}} \cdot \sqrt{l + q_0}, \quad P_{\text{threshold}} = \frac{g_0}{l + q_0}, \quad (5)$$

式中 q_0 表示可饱和损耗, g_0 表示小信号增益, $E_{\text{sat,g}}$ 表示饱和能量, τ_g 表示可饱和吸收体的恢复时间, l 表示谐振腔损耗, T_r 表示往返时间且由腔长决定。当采用双包层光纤作为外腔增益光纤时,在增大外腔增益的同时缩短激光谐振腔腔长,在保证内腔增益光纤饱和吸收的情况下,获得的激光输出脉宽将会进一步减小。若采用掺杂浓度更高的增益光纤或缩短谐振腔内无源光纤的长度,输出脉宽将会更窄。

当外腔选择长度为 0.3 m 的双包层掺铽钛光纤(纤芯和包层直径分别为 10 μm 和 130 μm),内腔选择长度为 3.5 m 的铽钛共掺光纤时,激光器输出单脉冲能量和峰值功率与抽运功率之间的关系如图 8 所示。

由图 8 可知,抽运功率增加,激光输出单脉冲能量和峰值功率随之增加,激光输出的最大单脉冲能量为 7.7 μJ ,最高峰值功率为 88.5 W。根据该类激光器现有文献报道^[22-24],后续研究可通过优化实验方案,采用多级功率放大、包层抽运或更大芯径光纤配置等方法,进一步提高激光输出单脉冲能量和峰值功率。

当激光器工作在重复频率 80.0 kHz 和 33.3 kHz 时,利用示波器获得单个脉冲的输出如图 9 所示。

图 9(a)为重复频率为 80.0 kHz,输出脉宽为 330 ns 时的单个脉冲图;图 9(b)为重复频率为 33.3 kHz,输出脉宽为 87 ns 时的单个脉冲图。利用示波器分别对脉宽为 330 ns 和 87 ns 的单个脉冲进行 10 万次采样后,计算得到脉冲峰峰值抖动分别小于 5%和 3%;在激光器稳定工作数小时过程中,对单个脉冲进行 1000 次采样后,计算得到脉冲宽度波动幅度分别小于 10 ns 和 7 ns,且输出平均功率波动较小。在先前的研究中,以掺杂光纤作为可饱和吸收体的掺镱全光纤双腔激光器^[25]和铒镱共掺全光纤双腔激光器^[27]的脉冲峰峰值抖动亦小于 3%,很好地证明了该类双腔激光器的输出稳定性。

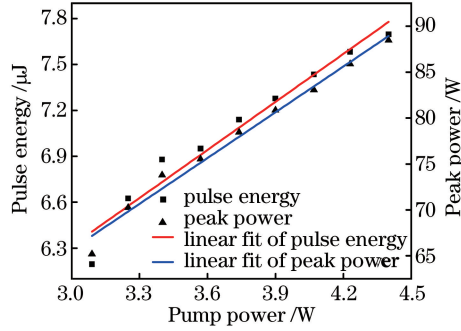


图 8 采用方案 2 时激光输出单脉冲能量和峰值功率与抽运功率之间的关系

Fig. 8 Relationship between pulse energy or peak power and pump power under program 2

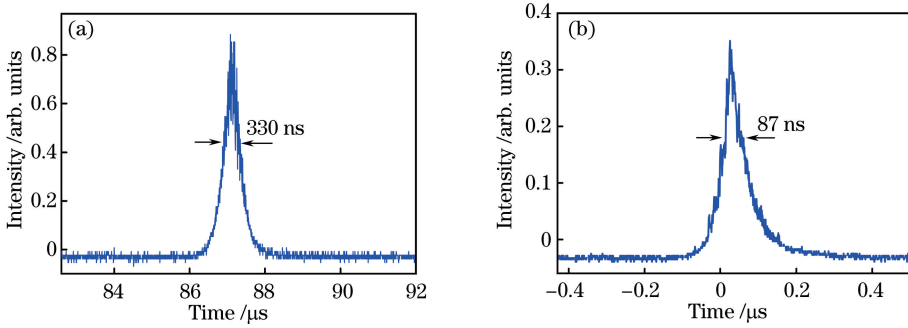


图 9 不同实验方案下的单个脉冲图。(a)方案 1;(b)方案 2

Fig. 9 Single pulse under different experimental programs. (a) Program 1; (b) program 2

4 结 论

报道了一种基于光纤可饱和吸收体的纳秒脉冲掺铒全光纤双腔激光器。该激光器利用掺铒光纤的可饱和吸收特性,采用独特的线型双腔结构,利用双谐振腔间的相互作用,获得稳定的 2 μm 波段纳秒脉冲输出。通过对比不同类型掺杂光纤作为增益介质对激光输出性能的影响,最终实现平均功率为 256.3 mW,最窄脉宽为 87 ns 的 1993 nm 激光输出。目前受限于抽运功率,激光输出功率较低。后续研究中可以通过多级功率放大、包层抽运或采用更大芯径光纤配置等方式,提高输出性能。

参 考 文 献

[1] Zhang Yan, Zhang Peng, Liu Peng, *et al.* Fiber light source at 1.7 μm waveband and its applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 090002.
张 岩, 张 鹏, 刘 鹏, 等. 1.7 μm 波段光纤光源研究进展及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(9): 090002.

[2] Popmintchev T, Chen M C, Arpin P, *et al.* The attosecond nonlinear optics of bright coherent X-ray generation[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(12): 822-832.

[3] Honea E, Savage-Leuchs M, Bowers M S, *et al.* Pulsed blue laser source based on frequency quadrupling of a thulium fiber laser[C]. *SPIE*, 2013, 8601: 860111.

[4] Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, *et al.* 2 μm laser sources and their possible applications[M]// *Frontiers in Guided*

- Wave Optics and Optoelectronics. Croatia: InTech, 2010.
- [5] Li Z, Heidt A M, Daniel J M O, *et al.* Thulium-doped fiber amplifier for optical communications at 2 μm [J]. Optics Express, 2013, 21(8): 9289-9297.
- [6] Cariou J P, Augere B, Valla M. Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology[J]. Comptes Rendus Physique, 2006, 7(2): 213-223.
- [7] Zhu Lei, Wang Lulu, Dong Xinyong, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation with highly germanium-doped silica fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0319001.
朱磊, 王鹿鹿, 董新永, 等. 基于高掺锗石英光纤的中红外超连续谱产生[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0319001.
- [8] El-Sherif A F, King T A. High-energy, high brightness Q-switched Tm^{3+} -doped fiber laser using an electro-optic modulator[J]. Optics Communications, 2003, 218(4/5/6): 337-344.
- [9] Eichhorn M, Jackson S D. High-pulse-energy actively Q-switched Tm^{3+} -doped silica 2 μm fiber laser pumped at 792 nm[J]. Optics Letters, 2007, 32(19): 2780-2782.
- [10] Jiang M, Tayebati P. Stable 10 ns, kilowatt peak-power pulse generation from a gain-switched Tm-doped fiber laser [J]. Optics Letters, 2007, 32(13): 1797- 1799.
- [11] Simakov N, Hemming A, Bennetts S, *et al.* Efficient, polarized, gain-switched operation of a Tm-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2011, 19(16): 14949-14954.
- [12] Spuhler G J, Paschotta R, Fluck R, *et al.* Experimentally confirmed design guidelines for passively Q-switched microchip lasers using semiconductor saturable absorbers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1999, 16 (3): 376-388.
- [13] Liu J, Wang Y G, Qu Z H, *et al.* 2 μm passive Q-switched mode-locked $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ laser with single-walled carbon nanotube absorber[J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(4): 960-962.
- [14] Jiang M, Ma H F, Ren Z Y, *et al.* A graphene Q-switched nanosecond Tm-doped fiber laser at 2 μm [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(5): 055103.
- [15] Moore S W, Soh D B S, Bisson S E, *et al.* 400 μJ 79 ns amplified pulses from a Q-switched fiber laser using an Yb^{3+} -doped fiber saturable absorber[J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23778-23789.
- [16] Lu Y, Gu X J. All-fiber passively Q-switched fiber laser with a Sm-doped fiber saturable absorber[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1997-2002.
- [17] Dvoyrin V V, Mashinsky V M, Dianov E M. Yb-Bi pulsed fiber lasers[J]. Optics Letters, 2007, 32(5): 451-453.
- [18] Soh D B S, Bisson S E, Patterson B D, *et al.* High-power all-fiber passively Q-switched laser using a doped fiber as a saturable absorber: numerical simulations[J]. Optics Letters, 2010, 36(13): 2536-2538.
- [19] Toredella L, Djellout H, Dussardier B, *et al.* High repetition rate passively Q-switched $\text{Nd}^{3+}:\text{Cr}^{4+}$ all-fibre laser[J]. Electronics Letters, 2003, 39(18): 1307-1308.
- [20] Fotiadi A A, Kurkov A S, Razdobreev I M. All-fiber passively Q-switched ytterbium laser[C]. 2005 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2005: 515.
- [21] Jackson S D. Passively Q-switched Tm^{3+} -doped silica fiber lasers[J]. Applied Optics, 2007, 46(16): 3311-3317.
- [22] Tsai T Y, Fang Y C, Lee Z C, *et al.* All-fiber passively Q-switched erbium laser using mismatch of mode field areas and a saturable-amplifier pump switch[J]. Optics Letters, 2009, 34(19): 2891-2893.
- [23] Tsai T Y, Fang Y C, Huang H M, *et al.* Saturable absorber Q- and gain-switched all- Yb^{3+} all-fiber laser at 976 and 1064 nm[J]. Optics Express, 2010, 18(23): 23523-23528.
- [24] Tsai T Y, Tsao H X, Huang C L, *et al.* 1590-nm-pumped passively Q-switched thulium all-fiber laser at 1900 nm[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 11205-11210.
- [25] Jin D C, Sun R Y, Shi H X, *et al.* Stable passively Q-switched and gain-switched Yb-doped all-fiber laser based on a dual-cavity with fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26027-26033.
- [26] Jin D C, Sun R Y, Wei S Y, *et al.* High pulse-energy generation from a monolithic Yb-doped all-fiber dual-cavity laser with fiber-based passive Q-switch[C]. Conference of Advanced Solid State Lasers, 2014: AM5A.40.
- [27] Jin Dongchen, Sun Ruoyu, Wei Shouyu, *et al.* 1570 nm nanosecond pulse generation from Er/Yb co-doped all-fiber dual-cavity laser with fiber-based passive Q-switched[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1002006.
金东臣, 孙若愚, 魏守宇, 等. 基于光纤被动调 Q 的 1570 nm 纳秒脉冲钕共掺全光纤双腔激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1002006.
- [28] Herda R, Kivistö S, Okhotnikov O G. Dynamic gain induced pulse shortening in Q-switched lasers[J]. Optics Letters, 2008, 33(8): 1011-1013.