

掺铥双包层光纤激光器研究

杜戈果 赵俊清 张灵聪 郭春雨 闫培光 阮双琛

(深圳大学电子科学与技术学院 深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要 掺铥光纤激光器所发射的 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光处于水分子吸收峰且对人眼安全, 并且被认为是 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 光参量振荡的有效抽运源, 因此具有巨大应用前景。围绕进口和国产掺铥双包层光纤展开了一系列研究, 实现了光纤激光器的连续运转、脉冲运转、可调谐输出等。对进口光纤的光谱特性进行了较全面的研究, 获得最大连续输出功率 $6\ \text{W}$ 、斜率效率 50% ; 采用国产掺铥双包层光纤, 获得最大连续输出功率 $5.1\ \text{W}$ 、斜率效率 41.9% ; 采用后向 Littrow 结构、以闪耀光栅作为选频元件, 获得了 $2\ \mu\text{m}$ 附近最大范围可达 $105\ \text{nm}$ 的可调谐激光输出, 且各调谐激光线宽均在 $2.2\ \text{nm}$ 左右。采用声光调制器 (AOM) 作为 Q 开关, 在调制频率为 $1\ \text{kHz}$ 时, 获得最高峰值功率 $4.2\ \text{kW}$ 、最大脉冲能量 $840\ \mu\text{J}$ 、脉宽 $200\ \text{ns}$ 的脉冲输出; 在 $3\ \text{kHz}$ 时获得了最短 $180\ \text{ns}$ 的脉冲输出。对双端抽运方式也进行了研究。分析了腔镜透射率和激光介质长度对激光输出功率的影响, 讨论了激光光谱的红移现象。

关键词 激光器; 光纤激光器; 掺铥双包层光纤; 连续运转; 脉冲运转; 可调谐; 双端抽运

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.020005

Studies on Tm-Doped Double-Clad Fiber Lasers

Du Geguo Zhao Junqing Zhang Lingcong Guo Chunyu
Yan Peiguang Ruan shuangchen

(Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology,
Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract Tm-doped fiber lasers have a huge applied prospect because of their emitting wavelength about $2\ \mu\text{m}$ in the absorption of water molecules, eye safety and being considered to be effective pump sources for $3\sim 5\ \mu\text{m}$ optical parametric oscillator. This paper launches a series of studies on continuous wave laser, pulsed laser and tunable laser with imported and domestic Tm-doped double-clad fibers. Spectral characteristics of imported fiber are studied, with the maximum output power of $6\ \text{W}$ and the slope efficiency of 50% for continuous-wave (CW) operation. For domestic fiber, the maximum output power is $5.1\ \text{W}$ and the slope efficiency is 41.9% . A back-Littrow configuration is adopted with a blazed grating as a frequency selecting component. The maximum tunable range reaches $105\ \text{nm}$, and the linewidth of each laser spectrum is about $2.2\ \text{nm}$ in the tunable range. A Q-switched fiber laser with an acousto-optic modulator (AOM) is also reported. The laser generates pulses of $200\ \text{ns}$ duration with $840\ \mu\text{J}$ pulse energy, corresponding to the peak power of $4.2\ \text{kW}$ when the repetition rate is $1\ \text{kHz}$. The shortest duration of $180\ \text{ns}$ is obtained with the repetition rate being $3\ \text{kHz}$. Laser diode (LD) double-end pumped Tm-doped fiber laser is also studied. The effect of fiber length and transmission of output mirror on output power is analyzed. A red shift in the wavelength of the output with the increase of the pump power is also discussed.

Key words lasers; fiber laser; Tm-doped double-clad fiber; continuous operation; pulsed operation; tunable; double-end pumping

OCIS codes 140.3510; 140.3480; 140.3600; 140.3540

1 引言

光纤激光器有效率高、光束质量好、可靠性高、结构紧凑和散热性好等优点。近年来, 由于包层抽运技术和半导体激光器的发展, 光纤激光器在输出功率方面取得了很大的提高, 并且已经在材料处理、医疗、目标指

收稿日期: 2011-07-20; **收到修改稿日期**: 2011-08-30; **网络出版日期**: 2011-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(61007054)和深圳市科技项目(200617)资助课题。

作者简介: 杜戈果(1971—), 女, 博士, 教授, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: dugueguo@szu.edu.cn

示、激光测距等很多领域获得了重要应用。其中掺铥(Tm^{3+})光纤激光器所发射的 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光处于水分子吸收峰且对人眼安全,因此在外科手术中具有巨大应用前景^[1~3]。 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光处于一个相对窄的大气传播窗口,如果适当地控制激光的波长以及线宽,激光在大气中的长距离传播将成为可能^[4~6]。此外, $2\ \mu\text{m}$ 波段掺铥光纤激光器被认为是 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 光参量振荡的有效抽运源^[7,8]。因此,掺铥光纤激光器已成为相关领域的研究热点。

本文介绍了深圳大学研究小组围绕进口和国产的掺铥双包层光纤开展的一系列研究,实现了光纤激光器的连续运转、脉冲运转、可调谐输出等。

2 实验研究

2.1 进口光纤的光谱特性及连续输出^[9,10]

采用内包层为 D 型的掺铥双包层石英光纤作为激光增益介质,其主要参数如下:掺 Tm^{3+} 离子的纤芯直径为 $20\ \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.17,内包层直径 $300\ \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.4,外包层直径 $350\ \mu\text{m}$,对 $790\ \text{nm}$ 波段的有效吸收系数为 $2.2\ \text{dB/m}$ 。

实验中,激光器谐振腔采用典型的法布里-珀罗(F-P)腔结构。为了减小损耗,在光纤的入射端面紧贴 1 个二色镜,它对 $780\sim 800\ \text{nm}$ 波段的抽运光高透,透射率为 95% ,对 $1.8\sim 2.1\ \mu\text{m}$ 的激光波高反,反射率大于 99% ;在光纤的输出端面与另 1 个二色镜(对抽运光高反、激光部分透过)紧贴在一起,构成对激光的反馈,与光纤入射端二色镜构成线性谐振腔。

激光器功率由 Spectra Physics 407 功率计测量,光谱分别由 WDG30 型光栅单色仪(配 $300\ \text{line/mm}$ 的闪耀光栅)、可见光谱仪、AV6361 型光谱仪和拉曼红外光谱仪等测量。

2.1.1 光谱特性

在不加二色镜的情况下,测量了掺铥光纤的荧光谱。用最大功率为 $5\ \text{W}$ 、波长为 $1064\ \text{nm}$ 的光纤激光器抽运 $3\ \text{m}$ 的掺铥光纤,用可见光谱仪测得上转换谱如图 1(a)所示。可以看出,光纤中有蓝光、红光和红外光的产生,而且在实验过程中也观察到有明亮的蓝光。荧光最强在 $815\ \text{nm}$ (${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$) 附近, $477\ \text{nm}$ (${}^1\text{G}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$) 较弱, $650\ \text{nm}$ (${}^1\text{G}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_4$) 最弱。图 2 为铥离子能级示意图。

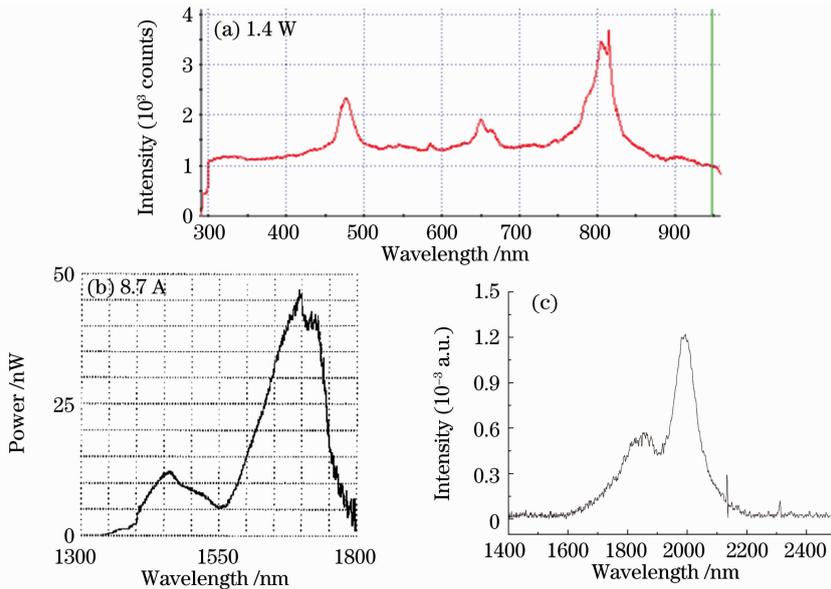


图 1 掺铥光纤光谱特性。(a)上转换谱;(b)用 AV6361 型光谱仪测得的近红外光谱;
(c)用拉曼红外光谱仪测得的近红外光谱

Fig. 1 Spectral characteristics of Tm-doped fiber. (a) Up-conversion spectrum; (b), (c) near-infrared spectra obtained by AV6361 spectrometer (b) and Raman infrared spectrometer (c), respectively

采用波长约为 790 nm 的激光二极管(LD)抽运长约 5 m 的掺铥石英光纤,用 AV6361 型光谱仪测量了近红外光谱,其光谱图如图 1(b)所示。由于光谱仪测量范围有限,实验中只能测量到 1.75 μm 。图中,波长约为 1.7 μm 处出现了一个峰值,对应铥离子能级结构中的 $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 跃迁;波长约为 1.47 μm 处出现了另一个峰值,对应铥离子能级结构中的 $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 跃迁。用拉曼红外光谱仪测量,得到光谱如图 1(c)所示。

2.1.2 激光输出

在 790 nm 的 LD 抽运下,实现激光连续输出。图 3(a)反映了两种不同腔镜透射率情况下激光输出功率随抽运电流的变化,光纤长度为 5 m。在光纤输出端未加腔镜时,利用光纤端面的 4%菲涅耳反射来形成激光反馈,因腔内损耗较大,阈值较高;加腔镜后,阈值降低,激光输出功率最大达到 6.0 W,斜率效率为 50%。

图 3(b)是分别对两种长度的光纤进行实验的结果。与长度为 5 m 的光纤相比,采用长度为 10 m 的光纤时,在同样的耦合状态下,输出功率和斜率效率都降低了。由于光纤变长了,其对信号光的吸收也增强了,使得抽运阈值功率提高,从而降低了激光器输出功率和斜率效率。

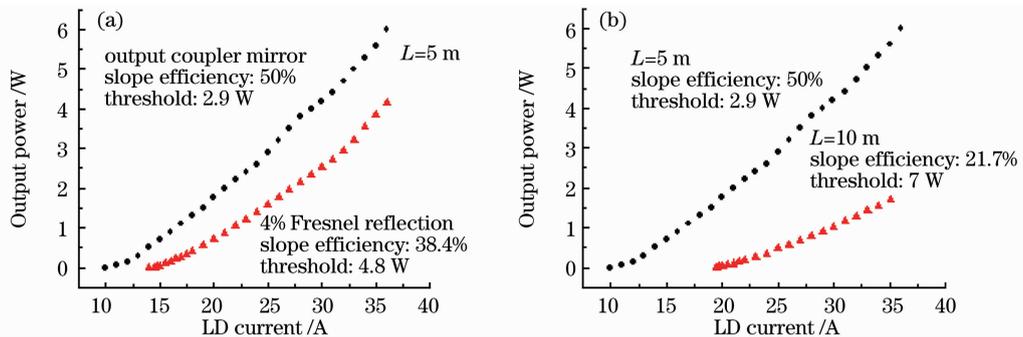


图 3 激光输出功率随 LD 抽运电流的变化情况。(a)不同输出镜;(b)不同长度

Fig. 3 Dependence of laser output power upon LD current with. (a) Different output mirrors; (b) different fiber lengths

图 4 所示为光纤长度为 5 m 时,在不同抽运功率下的激光输出光谱。当抽运功率增大时,激光输出光谱表现出红移现象。这是因为在抽运过程中,由于光纤纤芯产生的热量引起了基态能级玻尔兹曼粒子数的增加,降低了形成激光能级间的粒子数反转。同时,运行在高温下的石英光纤也会产生更多的能量声子,而能量声子促进了能量上转换率,能量上转换阻碍了能级间离子的交叉弛豫过程,并降低了激光器的效率。因此,在实验过程中,对激光器的工作物质进行适当的冷却是非常重要的。图 5 为激光器输出中心波长随抽运功率的变化情况,进一步验证了光谱的红移现象。

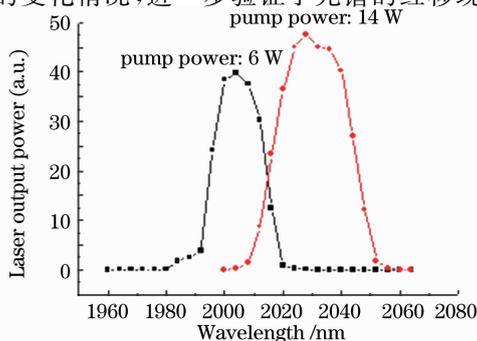


图 4 不同抽运功率下的激光输出光谱

Fig. 4 Laser spectra with different pump powers

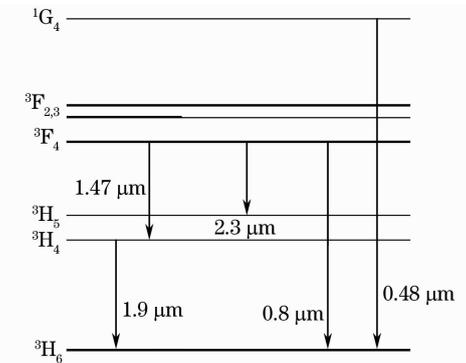


图 2 Tm^{3+} 能级简图

Fig. 2 Energy level diagram of Tm^{3+} ion

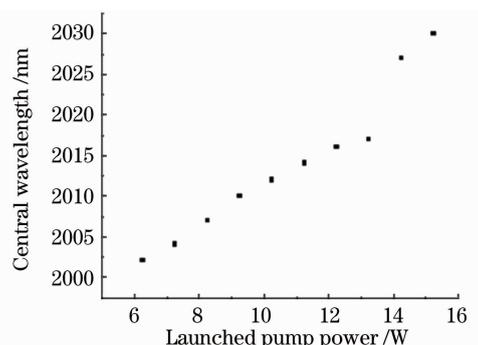


图 5 激光中心波长随抽运功率的变化

Fig. 5 Central wavelength varies with pump power

2.1.3 光束质量测量

选用 Spiricon 公司生产的热释电探测器 (Pyrocam III) 进行了光束质量的测量^[11]。光束照射在探测器上, 形成能量分布图, 通过软件对图形的分析, 可计算出光束直径的大小以及远场发散角。通过对若干组数据的处理, 最后得出, M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.16 和 1.22, 其拟合曲线如图 6 所示, 接近基模高斯光束。

2.2 国产光纤的连续输出^[12,13]

国产双包层掺 Tm^{3+} 光纤参数为: 纤芯直径 $27.5 \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.2, 内包层直径 $400 \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.46, 横截面为六边形, 光纤长度为 2.2 m, 对 790 nm 光的吸收系数为 5 dB/m。

同样, 在上转换谱的研究中, 观察到明亮的蓝光, 如图 7(a) 所示。荧光谱如图 7(b) 所示, 取两种长度的光纤进行了测量。

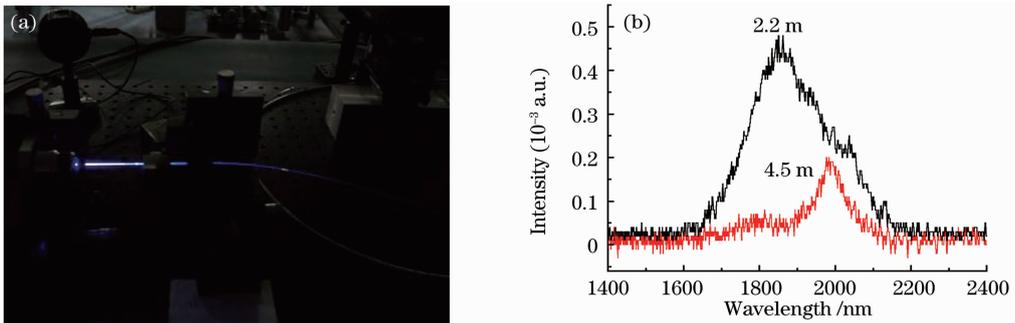


图 7 国产掺铥光纤的光谱特性。(a)上转换蓝光;(b)荧光谱

Fig. 7 Spectral characteristics of domestic Tm-doped fiber. (a) Up-conversion blue light; (b) fluorescence spectra

对三种方案进行了实验研究, 结果如表 1 所示, 反映了不同长度的光纤在三种输出腔镜的情况下激光器的工作情况。在实验条件下, 最大输出功率为 5.1 W, 此时斜率效率为 41.9%, 而最大斜率效率可达 47.3%, 接近进口光纤的数据。

表 1 不同光纤长度、不同输出耦合镜实验结果比较

Table 1 Experimental results with different fiber lengths and output mirrors

	Fiber length 4.5 m			Fiber length 2.2 m		
	Threshold /W	Output power /W	Slope efficiency /%	Threshold /W	Output power /W	Slope efficiency /%
M_1 ($T=50\%$)	7.5	1.1	14.6	3.1	5.1	41.9
M_2 ($T=65\%$)	7.2	1.0	12.7	4.0	4.7	42.2
M_3 ($T=95\%$)	10.6	1.3	24.8	5.9	4.5	47.3

2.3 可调谐光纤激光器^[13,14]

实验用光纤为前述进口光纤。光纤末端使用光纤研磨机磨出 8° 倾角以抑制光纤端面的菲涅耳反射。二色镜 DM_1 对 790 nm 光 45° 高透, 对 $1.8 \sim 2.2 \mu\text{m}$ 光 45° 高反; 二色镜 DM_2 对 790 nm 光高透, 对 $1.6 \sim 2.2 \mu\text{m}$ 透射率为 50%; 二色镜 DM_3 对 790 nm 光高反, 对 $1.6 \sim 2.1 \mu\text{m}$ 光透射率为 95%。闪耀光栅闪耀波长为 $2 \mu\text{m}$, 放在一个旋转平台上。靠近闪耀光栅的显微物镜起到对光纤输出光准直的作用。在双透镜耦合系统以及二色镜 DM_1 和 DM_2 存在的情况下, 整个系统耦合效率为 52%。实验装置如图 8 所示。

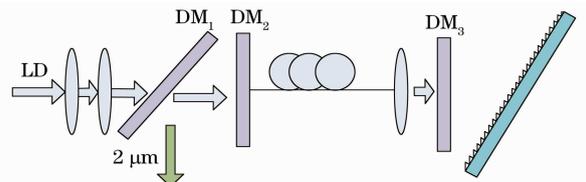


图 8 可调谐掺铥光纤激光器实验装置图
Fig. 8 Experimental configuration of tunable Tm-doped fiber laser

当入纤功率增大到 9.46 W 时获得调谐宽度为 105 nm 的可调谐激光输出,如图 9 所示。此时可调谐波长范围为 1938~2043 nm,最大输出功率为 252 mW,对应波长为 1984 nm。图 10 为该功率下的可调谐输出光谱图,各条谱线平均线宽为 2.2 nm。

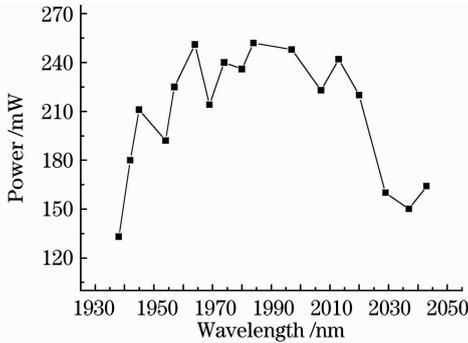


图 9 输出功率与可调谐波长关系

Fig. 9 Output power versus tunable wavelength

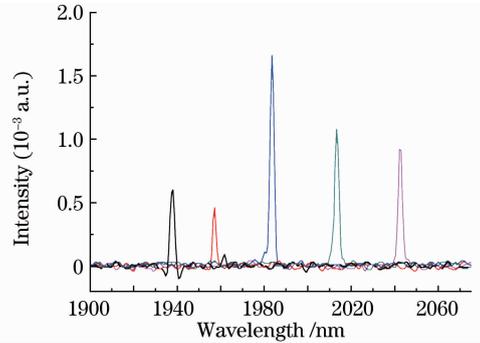


图 10 可调谐光谱图

Fig. 10 Tunable wavelength spectrum

2.4 脉冲光纤激光器^[13,15]

实验用光纤为国产光纤。实验装置如图 11 所示,其中 AOM 为声光调制器。使用透射率为 65% 的腔镜,激光器阈值功率为 4.9 W。

图 12 为激光器平均输出功率随入纤功率以及调制频率的变化曲线。从图中可以看出,随着入纤功率的增加,平均功率基本呈线性增加,且调制频率越大,平均功率也越大。当入纤功率增大到 7.74 W、调制频率增大到 50 kHz 时,获得了 1.27 W 的最大平均功率输出。此时光-光转换效率为 16.4%。

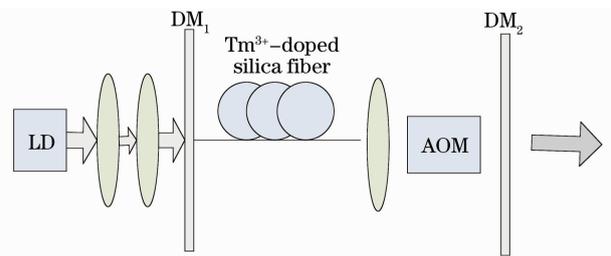


图 11 调 Q 掺铥光纤激光器实验装置图

Fig. 11 Experimental configuration of Q-switched Tm-doped fiber laser

图 13 为激光脉冲宽度随调制频率和入纤功率的变化曲线。由图可知,随着调制频率的增大,脉冲宽度相应增大。增大入纤功率,脉冲宽度反而会随之减小。当入纤功率为 7.74 W、调制频率为 3 kHz 时,获得了最短脉冲宽度为 180 ns 的脉冲激光输出;在 1 kHz 时,脉冲宽度为 200 ns,如图 14(a)所示,图 14(b)为典型的脉冲序列图。

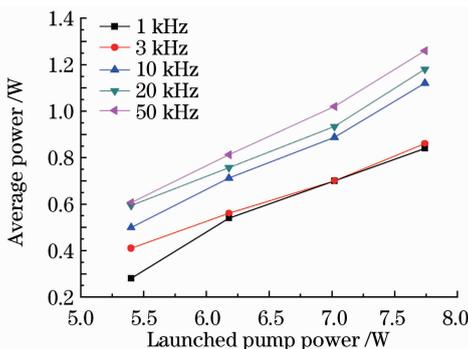


图 12 平均功率随入纤功率和调制频率的变化情况

Fig. 12 Measured average output power versus pump power at different AOM repetition rates

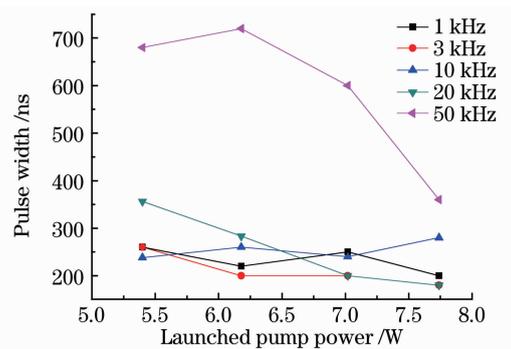


图 13 脉冲宽度随调制频率和入纤功率变化关系

Fig. 13 Pulse width as a function of pump power at different repetition rates

脉冲能量不仅与入纤功率有关,还受到调制频率的影响。图 15 为脉冲能量随入纤功率以及调制频率的变化情况。由图可知,入纤功率越大,脉冲能量相应越大。但调制频率的增加反而会使得脉冲能量下降。当入纤功率为 7.74 W、调制频率为 1 kHz 时,获得了 840 μ J 的最大单脉冲能量、4.2 kW 的最大峰值功率。

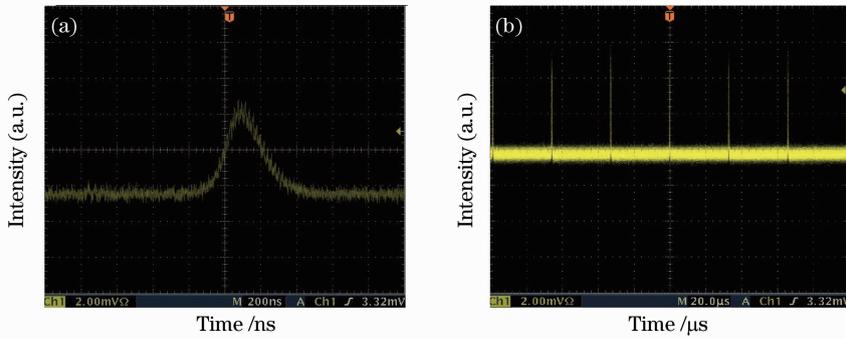


图 14 调制频率为 1 kHz 时的脉冲图。(a)脉宽为 200 ns 的单脉冲图;(b)脉冲序列

Fig. 14 Typical pulse train and pulse shape at a repetition rate of 1 kHz. (a) A single pulse; (b) a pulse train

2.5 双端抽运

所用光纤为进口光纤。实验装置如图 16 所示。在输出端未加额外反射镜,仅以光纤端面 4% 菲涅耳反射来形成激光反馈,增益光纤长 4.98 m。在正向、反向入纤抽运功率均达到最大的情况下,即正向入纤抽运功率为 11.48 W、反向入纤抽运功率为 8.74 W 时,得到最大激光输出功率 4.72 W^[16]。

3 结束语

本文较全面地介绍了深圳大学研究小组所开展的掺铥光纤激光器的实验研究。实现了光纤激光器的连续运转、脉冲运转和可调谐输出。采用进口光纤获得最大连续输出功率 6 W、斜率效率 50%。采用后向 Littrow 结构、以闪耀光栅作为选频元件,获得了 2 μm 附近最大调谐范围可达 105 nm 的可调谐激光输出,且各调谐激光线宽均在 2.2 nm 左右。采用声光调制器作为 Q 开关,在调制频率为 1 kHz 时,获得了最高峰值功率 4.2 kW、最大脉冲能量 840 μJ、脉宽 200 ns 的脉冲输出;在 3 kHz 时获得了最短 180 ns 的脉冲输出。在双端抽运条件下获得最大输出功率 4.72 W。

参 考 文 献

- 1 D. C. Hanna, R. M. Percival, R. G. Smart *et al.*, Efficient and tunable operation of a Tm-doped fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 1990, **75**(3-4): 283~286
- 2 R. A. Hayward, W. A. Clarkson, P. W. Turner *et al.*, Efficient cladding-pumped Tm-doped silica fibre laser with high power single-mode output at 2 μm[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(8): 711~712
- 3 W. A. Clarkson, N. P. Barnes, P. W. Turner *et al.*, High-power cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser with wavelength tuning from 1860 to 2090 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1989~1991
- 4 Zachary S. Sacks, Zeev Schiffer, Doron David. Long wavelength operation of double-clad Tm: silica fiber lasers[C]. *SPIE*, 2007, **6453**: 645320
- 5 Timothy McComb, Lawrence Shah, Robert A. Sims *et al.*, High power, tunable thulium fiber laser system for atmospheric propagation experiments[C]. *CLEO 2009*, 2009, CThR5

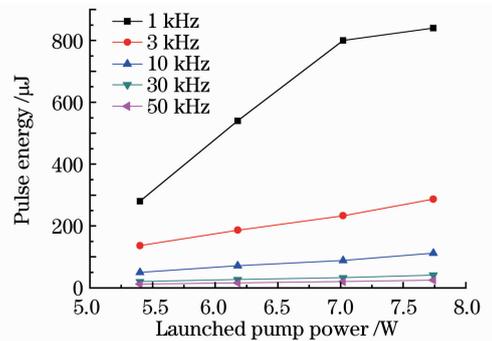


图 15 脉冲能量随入纤功率和调制频率的变化关系

Fig. 15 Variation of pulse energy with pump power at different repetition rates

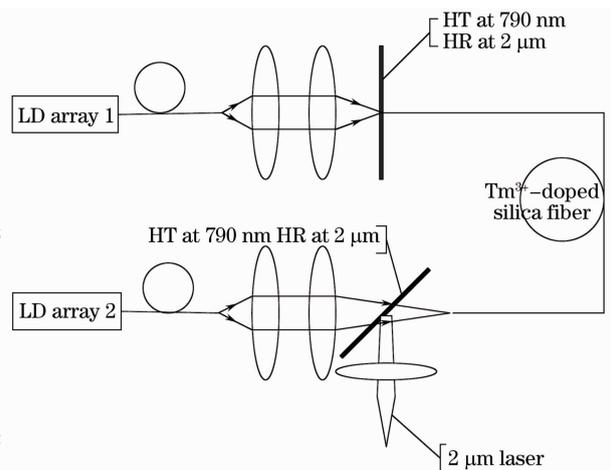


图 16 双端抽运掺铥光纤激光器实验装置图

Fig. 16 Experimental scheme of double-end pumped Tm-doped fiber laser

- 6 Vikas Sudesh, Timothy McComb, Robert Sims *et al.*. High power, tunable, CW, narrow line thulium fiber laser for ranging applications[C]. *Advanced Solid-State Photonics 2009*, 2009, WB1
- 7 N. P. Barnes, B. M. Walsh, D. J. Reichle *et al.*. Tm³⁺ fiber lasers for remote sensing[J]. *Opt. Mater.*, 2009, **31**(7): 1061~1064
- 8 D. Creeden, P. A. Ketteridge, P. A. Budni *et al.*. Mid-infrared ZnGeP₂ parametric oscillator directly pumped by a pulsed 2 μm Tm-doped fibre laser[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 315~317
- 9 Li Dajun. Experimental Research of Thulium-Doped Silica Double-Cladding Fiber Laser [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2007
黎大军. 掺铥双包层光纤激光器研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2007
- 10 Du Geguo, Li Dajun, Zhang Min *et al.*. LD-pumped 6W cw Tm³⁺-doped silica double-cladding fibre laser[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(3): 957~959
- 11 Xia Linzhong, Du Geguo, Su Hong *et al.*. The beam quality research of mid infrared Tm-doped fiber laser[J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2008, **25**(4): 409~412
夏林中, 杜戈果, 苏红等. 中红外掺铥光纤激光器光束特性研究[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2008, **25**(4): 409~412
- 12 Hu Hui, Du Geguo, Yan Peiguang *et al.*. Researches of the spectral characteristics on the domestic Tm-doped double cladding fiber[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(3): 478~482
胡辉, 杜戈果, 闫培光等. 国产掺铥双包层光纤光谱特性研究[J]. *应用光学*, 2010, **31**(3): 478~482
- 13 Hu Hui. Experimental Research of Tm³⁺-Doped Fiber Laser[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2011
胡辉. 掺铥光纤激光器实验研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2011
- 14 Du Geguo, Hu Hui, Yan Peiguang *et al.*. Experimental investigation of tunable thulium-doped double-cladding fiber laser [J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2011, **28**(2): 105~108
杜戈果, 胡辉, 闫培光等. 可调谐掺铥双包层光纤激光器实验研究[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2011, **28**(2): 105~108
- 15 Hu Hui, Du Geguo, Yan Peiguang *et al.*. Q-switched thulium-doped domestic silica fiber laser[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(4): 044206
- 16 Zhao Junqing, Du Geguo, Zhang Lingcong *et al.*. Experimental studies on double-end pumped thulium doped fiber laser[J]. *Applied Laser*, 2011, **31**(4): 332~337
赵俊清, 杜戈果, 张灵聪等. 双端泵浦掺铥光纤激光器的实验研究[J]. *应用激光*, 2011, **21**(4): 332~337