

# 全光纤声光调 Q 铷镜共掺双包层光纤激光器

王 蓓<sup>1</sup>, 王国政<sup>1</sup>, 刘 洋<sup>2</sup>, 秦 丽<sup>3</sup>, 王立军<sup>3</sup>

(1. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022 2 武汉军械士官学校 光电研究所, 湖北 武汉 430075

3 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 对 LD 抽运全光纤声光调 Q 铷镜共掺双包层光纤激光器进行了实验研究。采用两个半导体激光器作为抽运源, 利用带尾纤声光调制器作为 Q 开关, 以铷镜共掺双包层光纤作为增益介质, 以光纤布拉格光栅作为反馈器件, 在线形腔结构中, 获得了波长 1 549.47 nm, 谱线半峰全宽 0.499 nm 的稳定激光脉冲序列。脉冲重复频率 1~15 kHz 可调, 在重复频率 1 kHz 时, 得到最大单脉冲能量 209  $\mu$ J 平均输出功率 209 mW, 脉冲宽度约 100 ns 脉冲峰值功率 2 kW。在不同重复频率下, 测量了单脉冲能量和平均功率随入纤功率的变化。

**关键词:** 光纤激光器; 声光调 Q; 铷镜共掺双包层光纤

中图分类号: TN248.34

PACC: 4260R, 4260F

文献标识码: A

## 1 引言

基于包层抽运技术的双包层光纤激光器克服了低空间相干性强抽运光 (Laser Diode LD) 与单个空间模的激光波导之间耦合效率低的困难, 将大功率的 LD 抽运光耦合进双包层光纤的内包层, 抽运光在内包层中传输, 并不断激发纤芯中的掺杂物离子, 从而实现高功率激光输出。双包层光纤激光器具有散热性能好、转换效率高、抽运阈值低、输出功率高和光束质量极佳等优点而受到广泛的重视<sup>[1]</sup>。双包层光纤激光器于 20 世纪 80 年代后期发展的速度非常快, 目前光纤激光器已达到了传统的灯抽运和 LD 抽运固体激光器的功率水平, 并且大有替代它们的趋势<sup>[2-3]</sup>。由于包层抽运技术的引入, 使调 Q 光纤激光器脉冲峰值功率及单脉冲能量大大提高<sup>[4-5]</sup>。结构紧凑、高脉冲功率、高脉冲能量和高光-光转换效率的调 Q 光纤激光器, 在医学、工业加工、通信、军事、非线性频率转换、测距、遥感等许多应用领域中颇具优势。

## 2 实验

### 全光纤声光调 Q 铷镜共掺双包层光纤激

光器实验装置如图 1 所示, 从左至右依次为: 抽运源 1 和 2、6×1 光纤合束器、光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating 简称 FBG)、双包层铷镜共掺光纤 (Er/Yb Co-doped Fiber 简称 EYDF)、声光调制器 (Acousto-Optical Modulation 简称 AOM)。EYDF 的纤芯直径 7  $\mu$ m, 内包层直径 130  $\mu$ m, 长度 9 m, EYDF 尺寸与 6×1 光纤合束器输出光纤尺寸相匹配。声光调制器采用带尾纤型的, 从而实现全光纤结构, 工作波长 1 550 nm, 声光晶体的光透过率为 95%, 插入损耗为 2.5~3.5 dB, 尾纤为普通单模光纤。光纤光栅是我们自制的, 将普通单模光纤载氢增敏后写制而成, 中心波长为 1 550.02 nm, 反射半峰全宽 0.150 nm, 反射率约为 40%, 边模抑制比在 -23 dB 以上, 光纤尺寸与

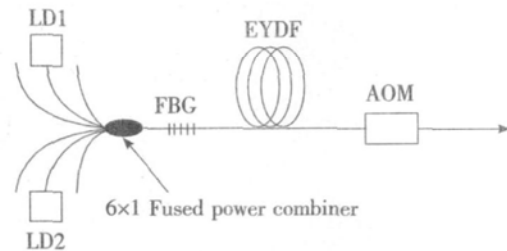


图 1 声光调 Q 光纤激光器的实验装置示意图

Fig 1 Scheme of experimental set-up for acousto-optical modulation fiber laser

收稿日期: 2008-05-25 修订日期: 2008-07-27

基金项目: 吉林省自然科学基金资助项目 (K04M092)

作者简介: 王蓓 (1978-), 女, 辽宁人, 博士, 讲师, 主要从事光纤激光器及放大器方面的研究。

Email: jijiw@163.com, Tel: (0431) 85582547-605

AOM 尾纤相匹配。光纤光栅具有较高反射率, 主要是考虑到系统损耗较大, 采用较大反射可以获得更大的增益。采用两个半导体激光器作为抽运源, 其中 LD1 的最大输出功率为 1 W, 中心波长为 978 nm, LD2 的最大输出功率为 8 W, 中心波长为 976 nm, 两个抽运源功率都达到最大值时, 测得入纤功率为 2.5 W。

使用 PN 硅光电二极管接收 1 550 nm 激光脉冲, 用示波器测量激光脉冲波形和重复频率, 用激光功率/能量计测量输出功率和能量, 用光谱分析仪观测输出激光的光谱特性。

### 3 结果与讨论

在 AOM 未运行的情况下, 抽运功率 5 W 时, 测得声光调 Q 铒镱共掺杂双包层光纤激光器的输出光谱如图 2 所示, 中心波长 1 549.47 nm, 谱线半峰全宽 0.499 nm。在重复频率 1 kHz, 入纤功率 2.5 W 时, 示波器显示输出脉冲波形如图 3 所示, 单脉冲能量 209 μJ, 平均输出功率 209 mW, 脉冲宽度约 100 ns, 峰值功率 2 kW。

脉冲重复频率从 1~15 kHz 可调, 图 4 为脉

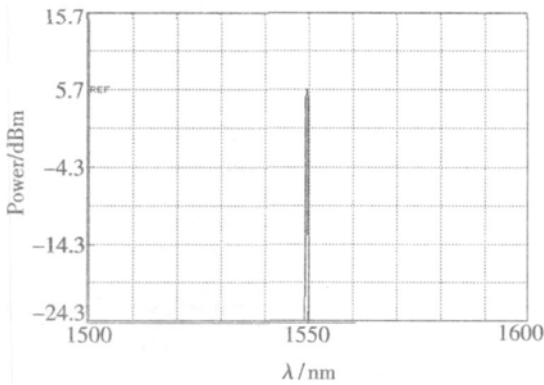


图 2 光纤激光器输出光谱

Fig 2 Output spectrum of fiber laser

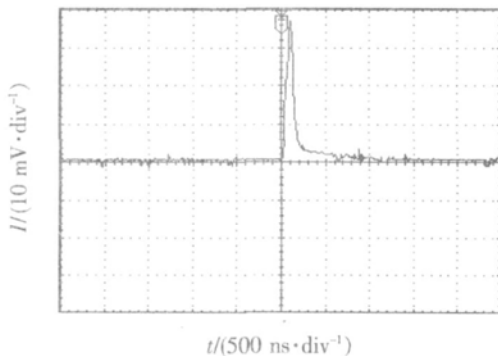


图 3 重复频率 1 kHz 时光纤激光器的输出脉冲波形

Fig 3 Pulse profile of fiber laser at repetition rate of 1 kHz

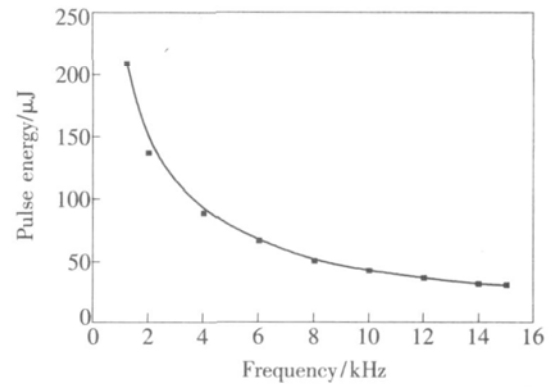


图 4 脉冲能量随重复频率变化

Fig 4 Energy versus repetition rate

冲能量随 Q 开关重复频率的变化, 可以看出脉冲能量随重复频率的增加而减小, 在重复频率 1 kHz 时得到最大脉冲能量为 209 μJ。对于连续抽运调 Q 光纤激光器, 其单脉冲最大输出能量可由下式给出<sup>[6]</sup>

$$E = hW\Delta V \quad (1)$$

式中  $h\nu$  为光纤激光器输出光子能量,  $V$  为激光器增益体积,  $\Delta V$  为高 Q 值与低 Q 值运转时的反转粒子数密度之差, 即  $\Delta V = (n_i - n_f)$ 。光纤激光器连续运转时输出功率可由下式给出<sup>[7]</sup>:

$$P_{\omega} = \frac{T}{T+L} \left| \frac{n_{\infty} - n_t}{\tau_f} \right| hW \quad (2)$$

式中  $T=0.6$  为输出反射镜透射率,  $L$  为包括散射、衍射和吸收等所有的随机损耗,  $n_{\infty}$  为总反转粒子数密度,  $n_t$  为阈值反转粒子数密度,  $\tau_f$  为  $\text{Er}^{3+}$  激光上能级寿命。对于铒镱共掺杂光纤,  $n_t$  可由下式给出<sup>[8]</sup>:

$$n_t = \frac{1}{2\sigma_e l} \ln \left[ \frac{1}{1-T} + L + \zeta \right] \quad (3)$$

式中  $\sigma_e$  为  $\text{Er}^{3+}$  激光上能级受激发射截面,  $l=9\text{ m}$  为增益光纤长度,  $\zeta$  为 Q 开关运转引起的腔损耗。可以作如下假设, 在此系统中忽略了自发发射的影响, 所以  $n_f$  可忽略不计, 则对于调 Q 激光器在重复频率为  $f$  时,  $\Delta V$  可写成:

$$\Delta V = n_{\infty} [1 - e^{-(1/\tau_f)f}] \quad (4)$$

将式 (2) 和式 (4) 代入式 (1) 得

$$E = (P_{\omega} \tau_f + hW n_t) [1 - e^{-(1/\tau_f)f}] \quad (5)$$

上式中各参量取值为: 输出激光波长 1 550 nm,  $L=0.1$ ,  $\zeta=0.6$  (AOM 的插入损耗取值 3 dB, AOM 尾纤尺寸与 EYDF 尺寸的差异导致的损耗约为 20%),  $\tau_f=11\text{ ns}$ ,  $n_{\infty}=4.5 \times 10^{25}\text{ ions/m}^3$ ,  $\text{Er}^{3+}$  激光上能级受激发射截面  $\sigma_e=3.395 \times 10^{-25}\text{ m}^2$ 。在

重复频率 1 kHz 时, 利用式 (2)、(3) 和式 (5) 计算得到的激光器单脉冲能量为 235.6  $\mu\text{J}$  与实验结果很相近。

在不同的重复频率下, 测量了脉冲能量随入纤功率的变化, 如图 5 所示, 在某一重复频率下, 入纤功率越大, 单脉冲能量越高, 当入纤功率一定时, 重复频率越低, 单脉冲能量越高。图 6 给出了激光器在连续运转和不同重复频率下的平均输出功率随入纤功率的变化关系。从图中可以看出, 在相同的入纤功率下, 重复频率越高, 平均输出功率也就越高, 在连续运转时, 输出功率最高。在某一重复频率下, 低抽运功率时, 平均输出功率与入纤功率近似线性关系; 当抽运功率达到一定值时, 平均输出功率增加变得缓慢, 与入纤功率不再是近似线性关系。

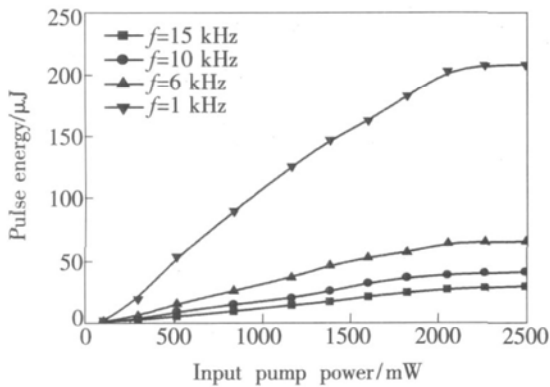


图 5 不同频率脉冲能量随入纤功率变化

Fig 5 Single pulse energy versus input pump power at different repetition rates

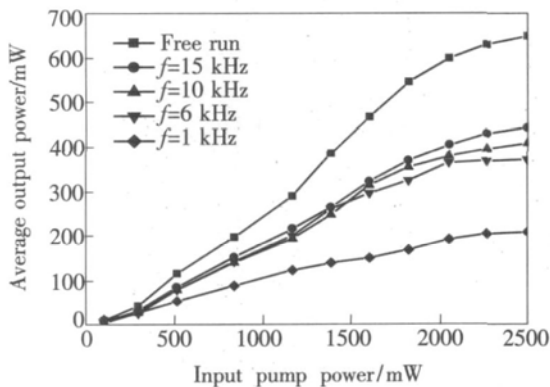


图 6 不同频率平均输出功率随入纤功率变化

Fig 6 Average output power versus input pump power at different repetition rates

重复频率 15 kHz 时, 入纤功率 105 mW, 在示波器上观测到了 3 倍于调制信号周期的脉冲序列, 入纤功率 153 mW, 观测到了 2 倍于调制信号

周期的脉冲序列, 如图 7 所示。入纤功率增加到 190 mW 后, 激光器输出脉冲周期与调制信号周期一致。分析出现 3 倍和 2 倍于调制信号周期的原因是激光器损耗较大, 低抽运功率时, 高  $Q$  状态下激光器储能少, 1 个周期内储能不足以达到激射, 只有储存了 3 倍或 2 倍于调制信号周期时间的能量, 激光器才达到激射条件, 因此在低抽运条件下观测到了 3 倍或 2 倍于  $Q$  开关周期的脉冲波形。

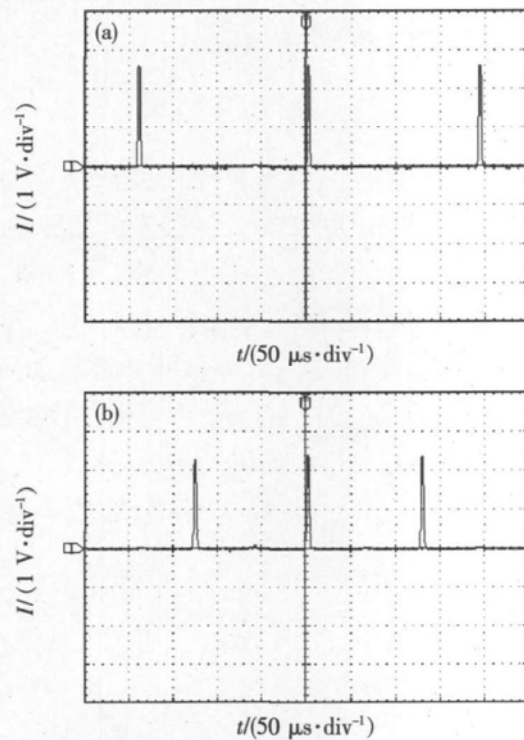


图 7 重复频率 15 kHz 时入纤功率 105 mW (a) 和 153 mW (b) 输出脉冲序列

Fig 7 15 kHz repetition rate pulse train at input pump power of 105 mW (a) and 153 mW (b).

## 4 结 论

用带尾纤的声光调制器作为  $Q$  开关, 铷镜共掺双包层光纤作为增益介质,  $6 \times 1$  光纤合束器耦合两个半导体激光器抽运源的输出, 利用简单的结构实现了全光纤声光调  $Q$  铷镜共掺双包层光纤激光器。该结构的优点在于, 实现了全光纤化调  $Q$  激光器, 调节容易, 通过增加抽运源的数目和功率这种简单的方法, 即可实现光纤激光器脉冲输出能量和功率的增加。

在重复频率 1 kHz 抽运功率 9 W 时, 激光器输出脉冲能量 209  $\mu\text{J}$  平均输出功率 209 mW, 脉冲宽度约 100 ns 峰值功率 2 kW, 激光波长

1 549.47 nm。在不同重复频率下, 测量了单脉冲能量和平均输出功率随入纤功率变化。对激光器

输出脉冲能量进行了计算, 计算结果与实验结果相符合。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Dong X Y, Yuan S Z, Kai G Y, *et al* All-fiber photonic integrated devices and system [ J ]. *Prog. Phys* (物理学进展), 2001, **21**( 3 ): 303-316 ( in Chinese ).
- [ 2 ] Pask H M, Archambault J L, Hanna D C, *et al* Operation of cladding-pumped Yb<sup>3+</sup>-doped silica fiber lasers in 1 μm region [ J ]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**( 11 ): 863-865
- [ 3 ] Dominic V, MacComack S, Waarts R, *et al* 110 W fiber laser [ J ]. *Electron. Lett.*, 2000, **35**( 14 ): 1158-1160
- [ 4 ] Alvarez Chavez J A, Vfferhaus H L, Niison J, *et al* High energy, high power ytterbium-doped Q-switched fiber laser [ J ]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**( 1 ): 37-39
- [ 5 ] Chen Z J, Grudin A B, Porta J, *et al* Enhanced Q switching in double-clad fiber lasers [ J ]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**( 6 ): 454-456
- [ 6 ] Renaud C C, Selvas-Aguilar R J, Nilsson J, *et al* Compact high-energy Q-switched cladding-pumped fiber laser with a tuning range over 40 nm [ J ]. *IEEE J. Photonics Technology Lett.*, 1999, **11**( 8 ): 976-978
- [ 7 ] Sun W en, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang. *Solid-State Laser Engineering* [ M ]. Beijing: Science Publishing Company, 2002, 417( in Chinese ).
- [ 8 ] John J Degnan. Theory of the optically coupled Q-switched laser [ J ]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **25**( 2 ): 214-220

## A ll-fiber Acousto-optic Q-switched Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> Co-doped Double-cladding Fiber Lasers

WANG Ji<sup>1</sup>, WANG Guo-zheng<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, QIN Li<sup>3</sup>, WANG Li-jun<sup>3</sup>

( 1 College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2 Opto-Electronics Facility, Wuhan Ordnance Non-Commissioned Officers Academy, Wuhan 430075, China;

3 Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract** Rare-earth doped fibers based on silica materials have been the subject of a tremendous research effort over a few decades for high power laser source applications. The main advantage of using a silica host is that it provides low propagation loss, high gain, large bandwidth and high chemical durability. It has been predicted that the fiber lasers have many advantages including very high conversion efficiency, immunity from thermal lensing effect due to large ratio of surface area to volume, no need of beam steering, simplicity of optical cavity construction, excellent beam quality, small volume and weight, low cost, and inherently fiber-coupled output. Thus fiber laser is now competing with conventional bulk solid-state lasers in applications such as micromachining, welding and other material processing. It has been predicted that the fiber lasers will show good application prospect in the field of communication, printing, marking, medicine, and so on.

A laser diode pumped all-fiber acousto-optic Q-switched Er/Yb co-doped double-cladding fiber laser was reported. The technical difficulties were resolved, including full fiber configuration, pump coupling, and enhance output power ulteriorly. Two laser diodes were employed as the pumping source, acousto-optical modulation with fiber was employed as Q-switched, Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped double-cladding fiber was employed as

gain medium, fiber Bragg grating was employed as feedback device in linear cavity the stable pulse train with wavelength of 1 549.47 nm and spectrum bandwidth of 0.499 nm was obtained. The repetition rate is adjustable from 1 kHz to 15 kHz. Single pulse energy up to 209  $\mu$ J, average output power of 209 mW, pulse width of 100 ns and peak power of 2 kW were obtained at the repetition rate of 1 kHz. Single pulse energy was calculated at repetition rate of 1 kHz theoretically. Single pulse energy and average output power were measured at different input pump power. At low pump power, pulse train with twice and thrice modulation period were observed.

**Key words** fiber lasers; acousto-optic Q-switched; erbium /ytterbium co-doped fiber

Received date 2008-05-25

## 欢迎订阅 欢迎投稿

### 《光学 精密工程》(自 2007 年改为月刊)

《光学 精密工程》是中国仪器仪表学会一级学术期刊,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办,科学出版社出版。由国内外著名科学家任顾问,陈星旦院士任编委会主任,国家科技部副部长曹健林博士担任主编。

《光学 精密工程》坚持学术品位,集中报道国内外现代应用光学、光学工程技术、光电工程和精密机械、光学材料、微纳科学与技术、医用光学、先进加工制造技术、信息与控制、计算机应用以及有关交叉学科等方面的最新理论研究、科研成果和创新技术。本刊自 2007 年起只刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省、部委基金项目资助的论文。《光学 精密工程》竭诚欢迎广大作者踊跃投稿。

本刊获奖:

中国科学技术协会择优支持期刊  
中国百种杰出学术期刊  
第一届北方优秀期刊  
吉林省双十佳期刊

国际检索源:

《美国工程索引》(EICampendex)  
《美国化学文摘》(CA)  
《英国 INSPEC》(SA)  
《俄罗斯文摘杂志》(PЖ)  
《美国剑桥科学文摘》(CSA)

国内检索源:

中国科技论文统计源期刊	中文核心期刊要目总览(北大)
中国学术期刊(光盘版)	中国学术期刊综合评价数据库
万方数据系统数字化期刊	中国光学与应用光学文摘
台湾华艺中文电子期刊网	中国科学期刊全文数据库
中国科学引文数据库	中国光学文献数据库
中国物理文献数据库	中国学术期刊文摘
中国期刊网	中国物理文摘

地 址: 长春市东南湖大路 16 号  
《光学 精密工程》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431) 86176855

传 真: (0431) 84613409

**E-mail** gxjng@cimp.ac.cn  
gxjng@sina.com

**http** //www.opc.nct.cn

国内邮发代号: 12-166

国外发行代号: 4803BM

定 价: 18.00 元 / 期

帐 户: 中国科学院长春光学  
精密机械与物理研究所

银 行: 中行吉林省分行营业部

帐 号: 220801471908091001