

文章编号: 0258-7025(2003)12-1057-04

# 包层抽运调 Q 光纤激光器的实验研究

吕福云, 樊亚仙, 王宏杰, 胡姝玲, 戴武涛, 徐之光, 吕可诚, 董孝义

(南开大学物理科学学院光电信息科学系, 天津 300071)

**摘要** 报道了几种不同结构的包层抽运调 Q 光纤激光器。用大功率多模 976 nm LD 抽运 D 形内包层掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤, 对激光器的自调 Q, 声光主动调 Q, 主被动混合调 Q 运转状态进行了一系列实验研究。观测分析了调 Q 光纤激光器的三种阈值情况, 对它们的输出脉冲特性进行了详细的实验研究。得到了纳秒量级, 峰值功率~200 kW, 重复频率为千赫兹的稳定脉冲序列。对实验结果进行了定性分析。

**关键词** 激光技术; 调 Q; 双包层光纤; 受激布里渊散射(SBS)

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

## Experimental Study of Cladding Pumped Q-switched Fiber Laser

LÜ Fu-yun, FAN Ya-xian, WANG Hong-jie, HU Shu-ling,  
DAI Wu-tao, XU Zhi-guang, LÜ Ke-cheng, DONG Xiao-yi

(Department of Optical-Electronic Information Science, Institute of Physics,  
Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** An experimental study of Yb-doped double-clad fiber laser in various optical configurations operating in self-Q-switched, AOM Q-switched and hybrid Q-switched conditions is presented. The fiber with a D-shaped inner cladding is pumped by a multi-mode laser diode with high power at 976 nm. Three thresholds of the Q-switched fiber laser are observed and analyzed. And the characteristics of the output pulses are studied experimentally in detail. Pulses with duration of ns, peak power of about 200 kW and the repetition rate of kHz are obtained. The results of the experiment are explained qualitatively.

**Key words** laser technique; Q-switched; double-clad fiber; stimulated Brillouin scattering (SBS)

## 1 引 言

包层抽运技术是在 20 世纪 80 年代后期出现的。这一技术的出现使光纤激光器的功率水平有了巨大的提高。目前连续激光功率最高已达 2 kW (IPG 公司)。采用包层抽运技术构成的光纤激光器, 其结构紧凑、效率高、不需要水冷或其他专门制冷, 可广泛应用于激光医学、激光测距、遥感技术、工业加工和参量振荡等, 特别是要求使用高功率光子源的许多领域, 近几年来倍受青睐<sup>[1~3]</sup>。

对于许多应用来说, 提高光源的能量和输出功率是重要的, Q 开关技术是获得高功率的有效

方法。其关键是增加腔内的能量贮存和压缩脉冲宽度。通常的调 Q 激光器, 光脉冲宽度与腔长成比例, 要获得较短脉冲, 需要减少光纤长度, 这势必降低了腔内能量的储存; 增加稀土离子的掺杂浓度, 原则上可以增大脉冲峰值功率, 但是这受到粒子数猝灭的限制。近期的研究表明<sup>[4~6]</sup>, 光纤中的背向受激布里渊散射(SBS)可使光纤激光器实现自调 Q 运转, 这种自调 Q 产生的激光脉冲宽度与腔内光子寿命无关, 而是依赖于 SBS 的动态特征。与常规的调 Q 光纤激光器相比, 基于 SBS 过程新机制的自调 Q 光纤激光器可将峰值功率提高一个量级, 脉宽从

收稿日期: 2002-04-04; 收到修改稿日期: 2002-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(No. 69977012)和国家自然科学基金重点项目(No. 60137010)资助课题。

作者简介: 吕福云(1945—), 女, 河北人, 南开大学物理科学学院光电信息科学系教授、博士生导师, 现从事光电子学与现代光通信领域的教学和科研工作。E-mail: lufy@nankai.edu.cn

70 ns 压缩到 2 ns。但是,自调 Q 运转稳定性欠佳。

本文用大功率多模 976 nm LD 抽运 D 形内包层掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤,对激光器的自调 Q,声光主动调 Q,主被动混合调 Q 运转状态进行了一系列实验研究。用光纤中的 SBS 效应调 Q 机理,在带有光纤干涉环的 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器中得到了脉宽 3.2 ns,峰值功率 134 kW 的脉冲序列。由于实验中采用了纤芯为多模的双包层光纤,使得光纤的增益体积大大增加;同时采用了较大功率的抽运源,从而使得增益介质中的反转粒子数密度大大提高了。这两个量决定了光纤激光器储存激光能量的能力。因此我们实验所得结果比国外用同类腔结构的调 Q 光纤激光器输出峰值功率高了一个量级<sup>[5]</sup>;在用声光开关和增益光纤中的 SBS 效应混合调 Q 实验中,得到了脉宽 2 ns,峰值功率 200 kW 稳定的脉冲序列。比 Southampton 大学的 Z. J. Chen 等<sup>[4]</sup>得到的峰值功率高出 53 倍。

## 2 实验装置及结果

包层抽运自调 Q 光纤激光器的结构如图 1 所示。抽运源的中心波长 976 nm,800  $\mu\text{m}$  尾纤输出,光纤数值孔径 0.22,最大输出功率 12 W。增益光纤为德国产 DCL 321-03 型掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤,纤芯直径 10.6  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 0.16,内包层为 400/340  $\mu\text{m}$  的 D 形,内包层的数值孔径为 0.38。通过光耦合系统将抽运光耦合到光纤中的最大功率为 3 W,把二色镜 ( $T_{976\text{nm}} = 89.9\%$ ,  $R_{1064\text{nm}} = 99.5\%$ ) 紧贴光纤输入端面放置,作为光纤激光器抽运端的腔镜,另一端接一段普通的单模光纤,利用单模光纤中的 SBS 效应产生调 Q 脉冲。实验中使用分光片分光,用光谱仪 (MS9001B1) 来观测输出激光的光谱特性,用 PIN 硅光电二极管和 500MHz 的示波器 (HP54616B) 观测激光输出的时域特性。同时用 LP-3C 型功率计测量激光输出功率。

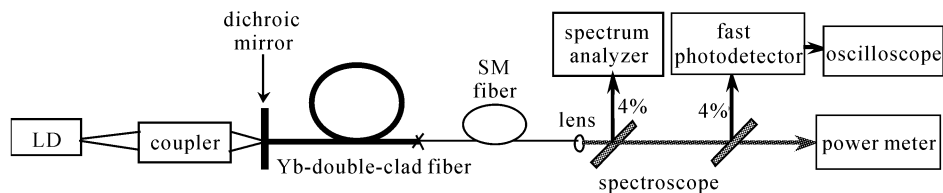


图 1 调 Q 掺 Yb 双包层光纤激光器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of the Q-switched Yb-doped double-clad fiber laser

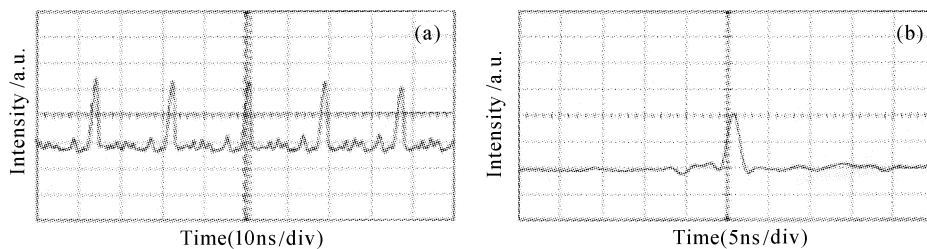


图 2 (a) 单模光纤长 2 km 时的激光输出脉冲;(b) 单模光纤长 15 m 时的激光输出脉冲

Fig. 2 (a) Output pulses of laser with SM fiber 2 km; (b) Output pulse with SM fiber 15 m

用连续抽运方式,首先选择单模光纤长度 2 km,其端面与光纤轴线垂直。仔细调节光耦合系统,使入纤功率处于最佳状态。在抽运功率为 521 mW 时,实现了光纤激光器较稳定脉冲工作,其输出脉宽 14 ns,重复频率  $\sim 5.5$  MHz,峰值功率 3.08 W,平均功率 237 mW,如图 2(a) 所示。将光纤剪短到 15 m,端面切成  $8^\circ$  斜角,并抛光,此时光纤激光器输出脉冲宽度为 1.6 ns,平均功率增加到 510 mW,但是重复频率抖动较大,实验结果如图 2(b) 所示。

为了增加光纤激光器输出脉冲的峰值功率并提

高其重复频率的稳定性,用透射/反射比为 90%/10% 的光纤环干涉仪代替图 1 中的单模光纤,构成带有光纤干涉环的 SBS 调 Q 光纤激光器,得到的典型实验结果如图 3 所示。在抽运功率为 3 W 时,获得了输出脉冲宽度 3.2 ns,重复频率约 800 Hz,峰值功率约 134 kW 的稳定光脉冲序列。

用光纤干涉环构成的 SBS 调 Q 光纤激光器输出脉冲重复频率一般不易调节。我们又进行了声光调制器 (AOM) 和 SBS 混合调 Q 光纤激光器的实验研究,用焦距为 5 mm 的微球透镜将 Yb 光纤激光

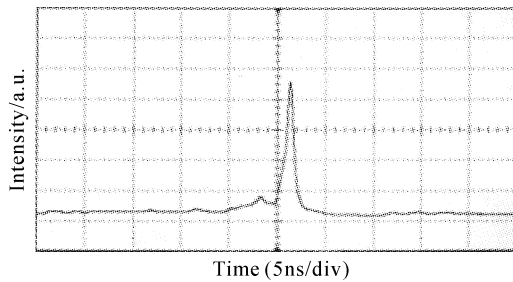


图 3 光纤干涉环构成的 SBS 调 Q 光纤激光器输出脉冲

Fig. 3 Output pulse of SBS Q-switched fiber laser in fiber ring configuration

准直,用闪耀波长为  $1.06 \mu\text{m}$  光栅作为后腔镜,声光 Q 开关插在两者之间,实验装置如图 4 所示。由

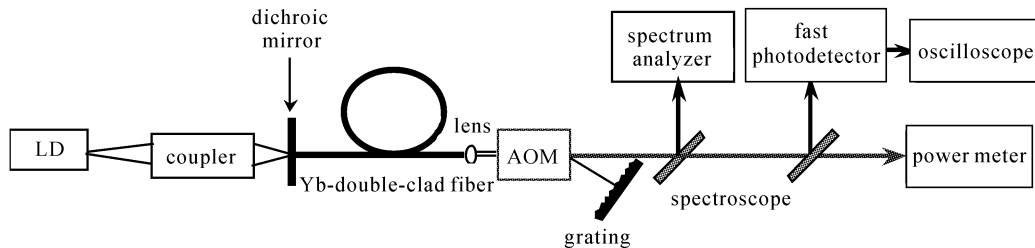


图 4 声光和 SBS 主被动调 Q 光纤激光器结构图

Fig. 4 Experimental setup of AOM and SBS Q-switched Yb-doped double-clad fiber laser

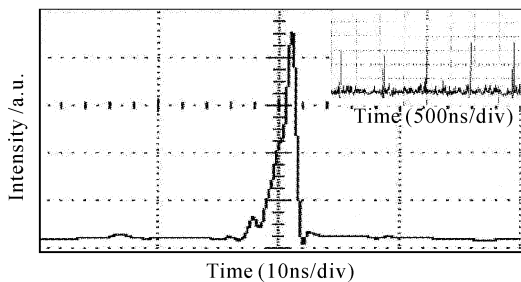


图 5 主被动调 Q 激光器输出脉冲

Fig. 5 Output pulse of hybrid Q-switched fiber laser

### 3 分析和讨论

1) 实验中发现以上几种结构的光纤激光器都存在三个阈值抽运功率:受激辐射阈值(激光阈值),SBS 阈值(激光调 Q 阈值)和受激拉曼散射(SRS)阈值(超连续辐射)。在激光阈值附近,激光呈现无规则弛豫振荡,这与普通固体激光器的情况相似;由于光纤的圆波导结构,在较高光功率密度情况下,出现了 SBS 和 SRS 效应。当纤芯中的功率密度超过 SBS 阈值以后,光纤中 SBS 效应提供的周期性瞬态

于  $\text{Yb}^{3+}$  增益光纤的后端面存在 4% 的非涅耳反射,当没有光栅外腔时,适当调节抽运源 LD 的注入电流,可使 Yb 光纤激光器处于准连续运转<sup>[7]</sup>。在图中 AOM 后面置一小孔光阑,调节光栅相对于入射激光光束的转角,使一级衍射光返回 Yb 光纤激光器谐振腔,零级光输出,构成 Littrow 结构形式。降低 LD 注入电流到 Yb 光纤激光器阈值附近(略低于阈值),仔细调节光栅转角,使激光器出光,接着增加 LD 注入电流,使激光器处于较高输出功率运转状态。注入射频功率使声光 Q 开关工作,射频频率在  $1\sim 10 \text{ kHz}$  范围可调,调节 AOM 的方位使其处于最佳衍射。这时可以观测到脉冲宽度  $2 \text{ ns}$ ,重复频率  $1.1 \text{ kHz}$  时,峰值功率约为  $200 \text{ kW}$  的主被动调 Q 稳定运转的脉冲序列。实验结果如图 5 所示。

反馈,使激光器工作在自调 Q 状态;激光脉冲峰值功率超过 SRS 阈值以后,受激辐射激发出多级 Stokes 谱线,实验中观测到激光发射谱可以从可见光延伸到中红外。

2)  $\text{Yb}^{3+}$  增益光纤是硅基光纤,当强激光在光纤中传播时,也会产生 SBS 和 SRS 效应。图 4 所示的主被动调 Q 激光器就是利用增益光纤的 SBS 效应和声光 Q 开关相结合实现调 Q 运转的。

3) 基于 SBS 效应的自调 Q 机制可以看作是光波电矢量和光纤纤芯材料作用,产生了电致伸缩。从而产生了光诱导超声波场,后续光波经过该波场时产生衍射。SBS 效应引起的周期性瞬态反馈使腔 Q 值在极短的时间内发生急剧变化,实现了光纤激光器的被动调 Q。这种调 Q 机制是基于光波在光纤中的 SBS 效应,也叫自调 Q。输出巨脉冲宽度由光致超声波场在光纤纤芯中传输所需要的时间决定,对于  $1060 \text{ nm}$  的单模光纤脉冲宽度约  $2 \text{ ns}$ 。实验中,观测到的脉冲宽度都大于理论预期值,这除了受测试系统响应时间影响外,估计还没有将激光器调整到最佳工作状态。

4) 在实现了调 Q 运转后,继续增加抽运功率,纤芯中的光功率密度很高,经常很容易超过 SRS 阈值,此时调 Q 光纤激光器处于超连续辐射运转状态,在很宽的谱范围内,输出激光脉冲为十几个纳秒乃至 3~5 ns。所以采用合适的滤波器,可以选出不同波长的纳秒脉冲。这必将进一步扩大调 Q 光纤激光器的应用领域。

本文报道了三种不同结构的包层抽运调 Q 光纤激光器。观测分析了调 Q 光纤激光器的三种阈值情况,对它们的输出脉冲特性进行了详细的实验研究,用这三种结构都获得了纳秒量级的调 Q 巨脉冲,其峰值功率超过了百瓦,最高可达百千瓦量级。

### 参 考 文 献

- 1 H. M. Pask, J. L. Archambault, D. C. Hanna *et al.*. Operation of cladding-pumped Yb<sup>3+</sup>-doped silica fibre lasers in 1  $\mu$ m region [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(11): 863~865
- 2 V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts *et al.*. 110 W fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **35**(14):1158~1160
- 3 H. L. Offerhaus, J. A. Alvarez-Chavez, J. Nilsson *et al.*. Multi-mJ, multi-Watt Q-switched fiber laser [C]. CLEO'99, Baltimore 23~28 May 1999, CPD10
- 4 Z. J. Chen, A. B. Grudinin, J. Porta *et al.*. Enhanced Q switching in double-clad fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(6):454~456
- 5 S. V. Chernikov, Y. Zhu, J. R. Taylor *et al.*. Supercontinuum self-Q-switched ytterbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(5):298~300
- 6 Lü Fuyun, Zhai Aiting, Fan Yaxian *et al.*. Study on self-Q-switched Er-doped fiber laser based on SBS [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(4):310~312 (in Chinese)
- 7 Ammar Hideur, Thierry Chartier, Cafer Özkul *et al.*. Dynamics and stabilization of a high power side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *Opt. Comm.*, 2000, **186**:311~317