

# 脉冲泵浦掺镱双包层光纤激光器的动力学研究\*

胡姝玲 谢春霞 吕福云 董法杰 王宏杰 张书敏 董孝义

(南开大学物理学院,天津 300071)

**摘要** 对脉冲泵浦的掺镱双包层光纤激光器进行了实验研究. 采用重复频率 1~10 kHz、脉宽 100 μs 的 976 nm LDs 泵浦, 实现了脉宽小于 10 ns 的稳定激光脉冲输出. 并对该激光器的动力学过程进行了分析, 首次提出了在脉冲泵浦光纤激光器中产生 ns 脉冲是瑞利散射和受激布里渊散射共同作用的结果.

**关键词** 光纤激光器; 脉冲泵浦; 掺镱双包层光纤; 瑞利散射; 受激布里渊散射

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

## 0 引言

高能量、短脉冲调 Q 激光器具有十分广泛的应用前景, 近年来受到广泛关注, 形成了研究的热点. Z. J. Chen 等人在掺铒双包层光纤激光器中得到了峰值功率 3.7 kW、脉宽 2 ns 的激光输出<sup>[1]</sup>; C. C. Renaud 等人在掺镱双包层光纤激光器中得到的光脉冲峰值功率达 2 kW, 单脉冲能量接近 170 μJ, 其波长调谐范围 40 nm<sup>[2]</sup>. H. L. Offerhaus 等人报道了采用 AOM 调 Q 技术, 在大模面积 (Large-mode-area) 掺镱双包层光纤激光器中得到了 2.3 mJ 的单脉冲能量, 输出平均功率为 5 W, 重复频率 500 Hz, 脉宽 100 ns<sup>[3]</sup>. 2003 年, 本实验室报道了采用 LDs 脉冲激光泵浦掺镱光纤激光器, 实现了脉宽 5 ns、单脉冲能量约 0.5 mJ、峰值功率高达几十 kW, 乃至 100 kW 的包层泵浦调 Q 光纤激光输出<sup>[4]</sup>.

其中脉冲泵浦双包层光纤激光器结构紧凑, 不需要在腔内插入其它调 Q 元件就可以实现稳定运转. 一般认为, 这种调 Q 光纤激光器的脉冲重复频率由泵浦 LDs 驱动电流脉冲决定, 脉冲宽度受增益光纤中的 SBS 效应限制. 为了进一步揭示脉冲泵浦掺镱双包层光纤激光器的动力学过程, 本文进行了较详细的实验研究. 通过改变泵浦光参数 (功率和重复频率), 实验观测光纤激光器输出激光的时域特性, 并对所得实验现象进行了具体分析, 提出了受激瑞利散射 (Rayleigh scattering-RS) 和受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering-SBS) 的共同作用是导致脉冲泵浦光纤激光器产生 ns 脉冲的根本原因.

## 1 实验装置

脉冲泵浦光纤激光器的实验装置如图 1. 泵浦源采用中心波长为 976 nm 的多模 LDs, 可以输出脉宽 100 μs ~ 1 ms、重复频率 1 Hz ~ 10 kHz 的脉冲; 泵浦光经过耦合器泵浦掺镱双包层光纤. 光纤长度约为 20 m, 内包层为 340 × 400 μm<sup>2</sup> 的 D 形、数值孔径 0.38; Yb<sup>3+</sup> 的掺杂浓度 0.65 mol% (Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 纤芯直径为 10.6 μm, 数值孔径 0.16; 用 976 nm/1064 nm 二相色镜 ( $T_{976\text{nm}} = 89.9\%$ ,  $R_{1064\text{nm}} = 99.5\%$ ) 和光纤直端面 (它提供 3.5% Frennel 反射, 作为另外一个腔镜) 形成谐振腔.

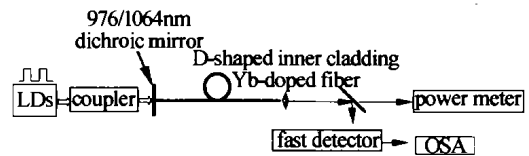


图 1 脉冲泵浦光纤激光器的实验装置  
Fig. 1 The setup of the pulse pumped Yb-doped double-clad fiber laser

实验中使用 PIN 硅快速光电探测器和 500 MHz 示波器 (HP54616B) 直接观测输出激光的时域特性, 同时用 LP-3A 型功率计监测输出功率, MS 9001B1 型光谱分析仪观测输出激光的频谱特性.

## 2 实验结果及其动力学过程分析

当泵光平均功率没有达到光纤激光器的阈值时, 实验观察到的只是未泵浦光, 见图 2, 示波器给

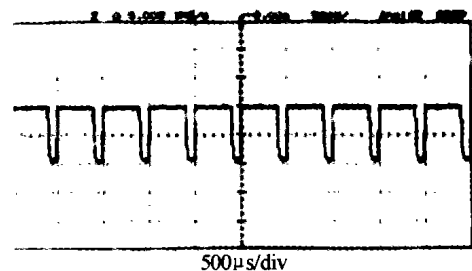


图 2 低于激光器阈值时观察到的未泵浦光  
Fig. 2 The un-pumped light observed when pump power is lower than laser threshold

\*天津市科技攻关项目 (No. 03183611)、国家重点基金项目基金 No. 60137010、国家自然科学基金 (No. 69977012)、天津市自然科学基金 (No. 99380101) 项目资助  
Email: husl116@sohu.com  
收稿日期: 2003-12-22

出的脉冲形状、宽度、周期反应了泵浦光脉冲的特性.

增加泵浦光功率达到激光器的阈值,就在激光器阈值附近观测到了与泵浦脉冲一一对应的  $\mu\text{s}$  脉冲,如图3. 采用较低重复频率的脉冲泵浦 ( $< 2\text{ kHz}$ ), 逐渐增加泵浦光功率到阈值以上, 在一个泵浦脉冲中可以得到几个光纤激光脉冲串, 脉宽为  $\mu\text{s}$  量级, 如图4, 脉冲的个数随泵浦功率的增加而增加. 光纤激光器是将光场限制在光纤波导内的“固体激光器”, 在激光阈值附近, 普通脉冲泵浦固体激光器的输出特性表现为弛豫振荡的尖峰脉冲<sup>[5]</sup>; 在双包层光纤激光器中, 由于泵源 LDs 输出激光的脉冲宽度、周期和功率非常稳定, 实验中观测到的“尖峰脉冲”也相当稳定.

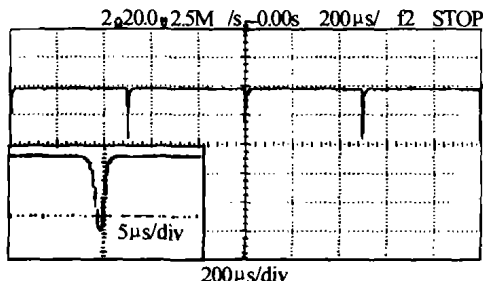


图3 激光器阈值附近观察到的输出特性  
Fig. 3 The output character near laser threshold

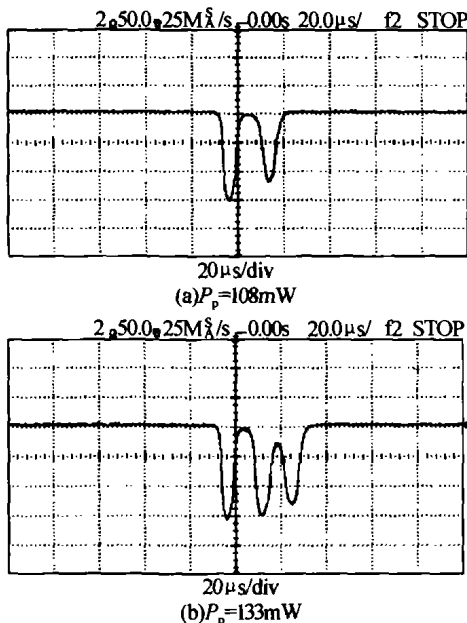


图4 继续增加泵浦功率, 重复频率均为  $1.33\text{ kHz}$  时, 脉冲泵浦的时闻特性

Fig. 4 With increasing of pump power, the  $\mu\text{s}$  pulse train at  $1.33\text{ kHz}$  repetition rate condition

利用重复频率  $5\text{ kHz}$  的脉冲泵浦时, 泵光平均功率增加至  $260\text{ mW}$ , 就达到了 SBS 的阈值,  $\mu\text{s}$  脉冲中开始出现周期  $200\text{ ns}$ 、宽度为  $\text{ns}$  量级的脉冲串儿, 继续增加泵浦功率, 脉冲宽度也随之减小, 见图5(a). SBS 脉冲串儿的周期是由谐振腔的长度决定的.

对这种  $\text{ns}$  脉冲的出现. 人们一直用 SBS 被动调  $Q$  机制解释, 即认为光纤中的背向 SBS 过程以  $\text{ns}$

量级弛豫振荡脉冲的形式为谐振腔提供一强反馈, 相当于谐振腔的  $Q$  值在极短的时间内得到增加, 从而可以产生  $\text{ns}$  量级的脉冲<sup>[6]</sup>. 这里我们从 SBS 效应的阈值入手分析  $\text{ns}$  脉冲的产生, 却得到了意想不到的结果.

首先讨论单模光纤并且没有反馈存在的情况. 根据产生 SBS 效应的阈值公式<sup>[6]</sup>

$$P_{\text{th}} \approx 21 \frac{A_{\text{eff}}}{g_{\text{B}} L_{\text{eff}}} \frac{\Delta\nu_{\text{B}} + \Delta\nu_{\text{P}}}{\Delta\nu_{\text{B}}} K \quad (1)$$

式中  $A_{\text{eff}}$  为光纤的有效纤芯面积,  $g_{\text{B}}$  为 Brillouin 增益系数, 在  $1100\text{ nm}$  处约为  $10 \times 10^{-11}\text{ m/W}$ ,  $L_{\text{eff}}$  为光纤的有效作用长度, 对于长度仅  $20\text{ m}$  的光纤, 可以忽略损耗, 有效长度即为光纤的长度.  $\Delta\nu_{\text{B}}$  为 Brillouin 增益线宽, 与波长平方成反比, 在  $1100\text{ nm}$  附近, 约为  $31\text{ MHz}$ .  $\Delta\nu_{\text{P}}$  为泵浦光的线宽, 对于我们所选用的多模泵浦 LDs 而言, 其线宽可取为  $5\text{ nm}$ .  $K$  为偏振因子, 在完全偏振相关时为 1, 而在完全偏振无关时增加  $50\%$ <sup>[9]</sup>, 我们取  $K = 1.5$ . 经过计算得到此时的 SBS 阈值约为  $55.5\text{ kW}$ . 在我们的实验条件下, 增益光纤纤芯的直径为  $10.6\ \mu\text{m}$ , 至少存在两个模式, 光纤模式特性的影响使增益光纤中 SBS 的阈值还会急剧增加.

在光纤激光器中, 由于腔反馈的存在 SBS 的阈值将降低. 对于线形腔, 根据实验条件以及参考文献<sup>[6]</sup>, 式(1)中的系数将降低. 光纤直端面  $\sim 4\%$  的非涅耳对应的系数为  $8.52$ , 在不同的反馈条件下,  $21$  从  $8.52$  变化至接近  $2$ . 因此根据我们的实验条件可以估计激光谐振腔中增益光纤的 SBS 阈值最多会降低一个数量级. 实验中用脉宽  $100\ \mu\text{s}$  的方波脉冲(波长  $976\text{ nm}$ ) 泵浦光纤激光器,  $260\text{ mW}$  的平均功率, 就达到了 SBS 阈值. 实现增益光纤 SBS 阈值的泵浦光(波长  $1100\text{ nm}$ ) 脉宽为  $3\ \mu\text{s}$  左右, 峰值功率几十  $\text{W}$ . 因此可以肯定光纤中必定还存在其他的效应, 在这个(或这些)效应的作用下导致了 SBS 的产生.

众所周知, 光纤瑞利散射的散射系数相当低, 但是因为 Yb 光纤增益已经足够大, 能够达到 RS 阈值, 因此在谐振腔中激光中心频率处形成瑞利散射是不可避免的. 瑞利散射一般发生在后向, 为谐振腔提供了附加反馈, 并使激光线宽被进一步的压窄<sup>[7]</sup>. RS 附加反馈进一步降低了 SBS 的阈值, 创造了产生 SBS 的条件, 形成 SBS  $\text{ns}$  脉冲串儿. 由于增益光纤在谐振腔中, 很容易形成双向 RS, 起到分布式干涉仪作用.

进一步增加泵浦平均功率  $P_{\text{p}}$  至  $367\text{ mW}$ , 同一泵光脉冲产生的  $\text{ns}$  激光脉冲的个数逐渐减少, 甚至

可以得到泵浦光对应的稳定的 ns 脉冲. 例如在泵浦平均功率为 420 mW 时, 最窄可以得到 5 ns 的脉冲, 如图 5 (b), 此时脉冲的峰值功率已经达到 12 kW. 这个阶段可以理解为: 双向 RS 形成的分布式干涉仪与 SBS 相互作用, 从而产生了稳定的 ns 脉冲. 具体地讲, 就是不仅泵浦光传输方向的斯托克斯场产生了 RS 效应, 并且随着泵浦平均功率的增加, 斯托克斯场的背向瑞利散射又产生新的 RS 背向散射, 形成了分布时的干涉仪, 与其所引发的 SBS 激光发射的共同作用, 使得输出脉冲的脉宽更窄, 这就从根本上改变了 SBS 的光谱和时间特性, 最终在双向 RS 与 SBS 相互作用下对应泵浦光的每个脉冲都会产生一个稳定的单个 ns 脉冲.

但是, 继续增加泵浦平均功率  $P_p$  至 420 mW 以上, 除了单个脉冲外还出现了脉宽为  $\mu\text{s}$  量级的次脉冲. 泵浦平均功率越高, 出现的次脉冲的数目越多,

而且次峰的强度较主峰低很多; 但是各个峰的强度基本不变, 只是宽度较前一个  $\mu\text{s}$  次脉冲的宽度稍变窄. 此时, 泵浦光脉冲的重复频率越高, 单个的 ns 脉冲就更容易实现, 并能够始终占主导地位, 见图 5 (c). 这是因为在存在一定反馈的情况下, 激光器纵模间隔  $\Delta\nu = c/2nL \approx 5 \text{ MHz}$ , 而 Brillouin 线宽为 31 MHz, 包含了六个纵模间隔, 而这些纵模中只有一个或两个满足振荡条件, 因此光纤中纵模的拍在时间范畴内不能完全消耗掉, 所以导致继续增加泵浦光脉冲功率, 除了单个的 ns 脉冲外, 还出现了形状不规则、强度相对稳定的  $\mu\text{s}$  量级的 Stokes 次脉冲<sup>[9]</sup>. 虽然次脉冲的数目随泵浦平均功率的增加而增多, 但是强度较单个的 ns 脉冲小几个数量级. 因此, 尽管  $\mu\text{s}$  脉冲占据了一部分能量, 在较大功率泵浦时, 仍能够得到峰值功率 100 kW 量级的脉冲.

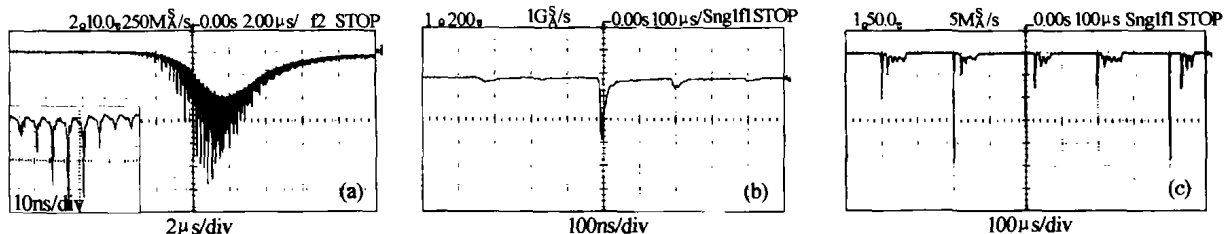


图 5 (a) 泵浦功率达到 SBS 阈值时开始出现的 ns 脉冲串; (b) 单个稳定的纳秒脉冲输出图; (c) 伴有微秒次脉冲的脉冲输出图  
Fig. 5 (a) The output ns pulses train when  $P_p$  above the SBS threshold; (b) The output single stable ns pulse; (c) The output with micron second sub-pulses

### 3 总结

本文利用脉宽 100  $\mu\text{s}$ 、重复频率 2 ~ 8 kHz 的 LDs 激光泵浦, 在掺镱双包层增益光纤中的双向 RS 和 SBS 效应的共同作用下, 实现了脉宽小于 10 ns, 与泵浦脉冲一一对应的单个脉冲稳定输出. 这种脉冲泵浦双包层光纤激光器不需要在腔内插入其它的调 Q 元件就可以实现稳定运转, 相对于其它调 Q 光纤激光器来讲是一个极大的进步, 也提出了一个解决光纤调 Q 激光器稳定性问题的新办法.

#### 参考文献

- 1 Chen Z J, Grudinin A B, Porta P, et al. Enhanced Q switching in double-clad fiber lasers. *Opt Lett*, 1998, 23 (6): 454 ~ 456
- 2 Renaud C C, Selvas-Aguilar R J, et al. Compact high-energy Q-switched cladding pumped fiber laser with a tuning range over 40 nm. *IEEE J Photonics Technol Lett*, 1999, 11 (8): 976 ~ 979
- 3 Offerhaus H L, Alvarez-Chavez J A, Nilsson J, et al. Multi-mJ, multi-Watt Q-switched fiber laser CLEO '99 Baltimore, 23-28 May 1999, CPD10
- 4 Fan Y X, Lu F Y, Hu S L, et al. 105 kW peak power double-

clad fiber laser. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15 (5): 652 ~ 654

- 5 Walter Koechner 著, 孙文, 江泽文, 程国祥译. 固体激光工程. 北京: 科学出版社, 2002. 98 ~ 99  
Walter Koechner, Solid-State Laser Engineering, translated by Sun Wen, Jiang Zewen and Cheng Guoxiang. Beijing: Science Press in China, 2002. 98 ~ 99
- 6 Govind P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, 3<sup>rd</sup> edition, Academic Press, 2001
- 7 Alexander L. Gaeta and Robert W. Boyd, Stimulated Brillouin scattering in the presence of external feedback. *International Journal of Nonlinear Optics Physics*, 1992, 1 (3): 581 ~ 594
- 8 激光的物理应用. 激光手册第 5 分册, 北京: 科学出版社, 《激光手册》翻译组翻译  
Edited by F T, Arecchi E O, Schulz-Dubois. The physical application of laser, the Handbook of Laser, No. 5 fascicule, Beijing: Science Press, translated by the translation group of the handbook of Laser
- 9 Kovalev V I, Harrison R G, Scott A M. The build-up of stimulated Brillouin scattering excited by pulsed pump radiation in a long optical fibre. *Optics Communications*, 2000, 185 (1-3): 185 ~ 189

## Analysis the Dynamics of Pulse Pumped Yb-doped Double-clad Fiber Laser

Hu Shuling, Xie Chunxia, Lu Fuyun, Dong Fajie, Wang Hongjie, Zhang Shumin, Dong Xiaoyi

*Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071*

Received date: 2003-12-22

**Abstract** In this paper the pulse pumped Yb-doped double-clad fiber laser is studied experimentally. Pumped by 100  $\mu$ s long pulses, which repetition rate ranged from 2 kHz to 8 kHz, the fiber laser outputs shorter than 10ns stable pulses. Further the dynamics of the output character of the fiber laser is analyzed. For the first time, the authors provide that the theory of the co-operation of Rayleigh scattering (RS) and stimulated Brillouin scattering (SBS), which results in ns pulses output from the pulse pumped fiber laser.

**Keywords** Fiber laser; Pulse pumped; Yb-doped double-clad fiber; Rayleigh scattering; Stimulated Brillouin scattering



**Hu Shuling** was born in 1971. She is not only an instructor of War Transportation College, but also a Ph. D. student of the Department of Optics Information Science, Institute of Physics, Nankai University. Her research interests include fiber optics, short pulse fiber lasers and amplifiers.