

掺 Yb 双包层光纤激光器的时域特性和光谱特性研究*

张书敏^{1,2} 吕福云¹ 谢春霞¹ 王宏杰¹

(1 南开大学物理科学学院, 天津 300071)

(2 河北师范大学物理学院, 石家庄 050016)

摘 要 实验观测了掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的时域特性和光谱特性. 研究了抽运功率、腔损耗对激光器工作特性的影响. 研究发现, 利用单镜腔结构的光纤激光器, 可产生自脉动、受激布里渊散射和受激喇曼散射等非线性效应; 而采用双镜腔结构可有效抑制自脉动特性, 提高激光器工作的稳定性, 并对实验现象进行了定性的分析.

关键词 掺 Yb 双包层光纤激光器; 时域特性; 光谱特性; 抽运功率; 腔损耗

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

用多模大功率 LD 抽运的双包层光纤激光器转换效率高, 不仅可作为光放大器和喇曼激光器的高功率泵浦源, 同时可应用于医学、光谱学等领域. Yb³⁺ 离子具有较宽的荧光发射谱; 能级结构简单, 不存在激发态吸收; 上能级荧光寿命较长, 具有高量子转换效率和无浓度淬灭等优点. 近年来, 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器备受青睐^[1-5]. 众所周知, 在双包层光纤激光器中, 因单模纤芯中的能量较高, 有利于产生受激布里渊散射 (SBS) 和受激喇曼散射 (SRS) 等非线性现象. 尽管这些非线性效应有许多特殊的应用^[6,7], 但它们同样可引起激光信号输出的不稳定性, 甚至可破坏光放大过程中脉冲的形状. 因而, 有必要研究双包层光纤激光器的输出特性. 本文实验观测了抽运功率、腔损耗对掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器时域特性和光谱特性的影响. 采用单镜腔结构, 当激光器工作在 SBS 阈值以下时, 输出激光表现出较强的自脉动行为, 脉宽为几个微秒; 当达到 SBS 阈值时, 激光器表现出稳定的、周期性较强的特性, 脉宽降为几十纳秒; 当超过 SBS 阈值后, 脉冲能量开始向单峰转移, 周期性被破坏, 脉宽进一步变窄; 若继续增大抽运功率, SRS 发生; 采用双镜腔结构, 发现可有效抑制自脉动、SBS 和 SRS, 提高激光器工作的稳定性.

1 实验装置

实验装置如图 1, 泵浦源为大功率的半导体激光器 (LD), 输出中心波长为 975 nm, 带有直径 800 μm

的输出尾纤, 数值孔径为 0.22. 通过光束比 2:1 的耦合器泵浦掺 Yb³⁺ 双包层单模光纤 (DCF), DCF 的横截面结构如图 1 中虚线框所示, 圆形纤芯的直径为 8 μm , 数值孔径为 0.11. 其中 Yb³⁺ 离子的掺杂浓度为 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. 内包层为 $125 \times 125 \mu\text{m}^2$ 的正方形结构, 数值孔径为 0.5, 具有较低的折射率 (1.33) 及很低的光学损耗 (0.0023 m^{-1}). 矩形结构的内包层不仅将单模的激光限制在纤芯内, 同时作为泵浦光的通道. 外包层为圆形结构, 直径为 185 μm . 激光谐振腔由紧贴光纤输入端面的二色镜和输出端光纤端面 4% 的非涅耳反射提供腔反馈. 同时选用具有不同反射率的输出腔镜进行实验. 在实验中使用 PIN 硅快速光电探测器和 500 MHz 示波器 (HP54616B) 直接观测激光的时域特性; 同时用 LP-3A 型功率计监测其功率, 用 MS9001B1 型光谱分析仪观测输出激光的光谱特性.

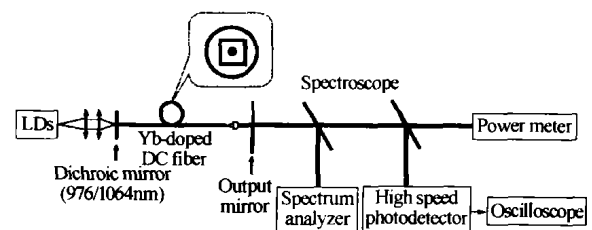


图 1 激光器实验装置
Fig. 1 Experimental setup

2 实验结果与分析

2.1 抽运功率对激光器输出特性的影响

实验中首先采用如图 1 所示的单镜腔结构, 即在光纤的输出端不加反射镜, 而是利用光纤直端面 4% 的非涅耳反射提供腔反馈. 我们观测了输出激光特性随抽运功率的变化情况, 发现当抽运功率为 400 mW 时, 达到了激光器的振荡阈值, 在阈值附近 ($P = 495 \text{ mW}$), 输出激光表现出自脉动现象 (图 2 (a)). 对此我们可以这样理解, 因掺 Yb³⁺ 石英光纤具有典型的二能级结构, 由于 Stark 效应的存在, 其

*天津市科技攻关项目 (No. 03183611)、国家自然科学基金重点项目 (No. 60137010)、国家自然科学基金重大项目 (No. 90101022)、国家自然科学基金 (No. 69977012) 和河北省教育厅科研计划课题 (2001241)

Tel: 022-23509856 Email: zhangsm_sd@eyou.com

收稿日期: 2003-12-22

吸收谱和发射谱存在很大的重叠区域. 当注入的抽运功率较小时, 远离输入端的一段 Yb^{3+} 光纤因抽运不足不能实现粒子集聚数翻转, 这段未泵浦的光纤即作为饱和吸收体对信号光子再吸收, 使激光输出为一不规则的脉冲串, 脉冲宽度为 μs 量级 (如图 2 (b)), 此时激光在时域上表现为自脉动现象.

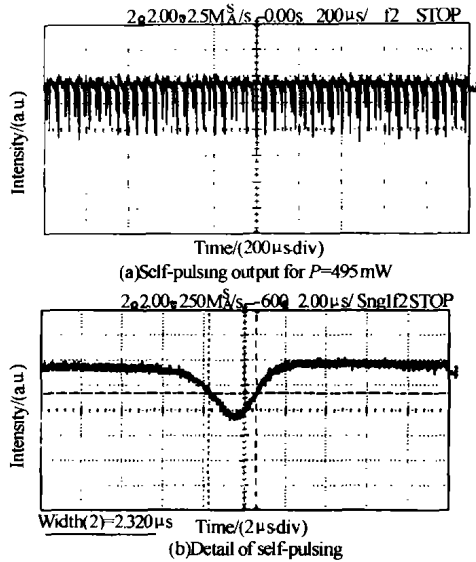


图 2 单镜腔中光脉冲的时域特性
Fig. 2 Output character of one-mirror cavity

当光纤抽运功率达到 786 mW 时, 激光信号变为较稳定的、周期性较强的光脉冲输出 (如图 3 (a)), 脉冲宽度变窄为十几纳秒 (如图 3 (b)). 这

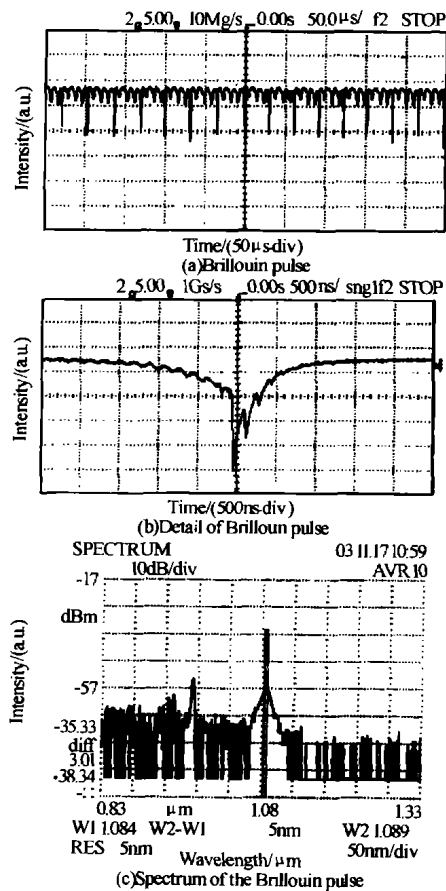


图 3 单镜腔中的布里渊散射效应
Fig. 3 Brillouin character of one-mirror cavity

种脉冲的出现是由于光纤中产生了 SBS. 对此我们可以这样解释, 因 Yb^{3+} 光纤的掺杂浓度较高, 光纤的增益较大, 光纤中极易形成瑞利散射效应 (RS). 一方面, 后向发生的 RS 为谐振腔提供的附加反馈使激光器的线宽有效地被压窄, 适于泵浦 SBS, 增加了光纤中产生 SBS 的可能性, 瑞利反馈及腔自身提供的弱反馈均使 SBS 阈值降低^[8,9]; 另一方面, 随着抽运功率的逐渐增大, 纤芯内光脉冲的能量逐渐增强, 当光脉冲的能量达到 SBS 阈值时, SBS 效应产生. 布里渊阈值一旦达到, SBS 即将绝大部分输入功率转移到后向斯托克斯波. 图 3 (c) 为与之相对应的光谱图. 理论上, 从斯托克斯频移关系式 $\Delta\nu_B = 2n\nu_A/\lambda_p$ (其中, $n = 1.45$ 为介质的折射率, $\nu_A = 5.96 \text{ km/s}$ 为声光速率, $\lambda_p = 1082.8 \text{ nm}$ 为 SBS 的泵浦波长) 可知, 此时应产生 $\Delta\lambda = 0.06 \text{ nm}$ 的频移, 因所用光谱仪的分辨率较低 (最高分辨率为 0.1 nm), 实验中并未观察到较清晰的频移现象.

继续增大抽运功率到 920 mW 时, 我们观察到激光信号再次变为无周期性的不规则脉冲串 (见图 4 (a)), 从图 4 (b) 可以看出, 在一串布里渊脉冲后出现了一峰值较大的喇曼脉冲. 图 4 (c) 给出了与之相应的谱图, 比较图 3 (c) 与图 4 (c) 可知, 在激光谱线 $\lambda = 1.086 \text{ nm}$ 的长波方向出现了一中心波长长

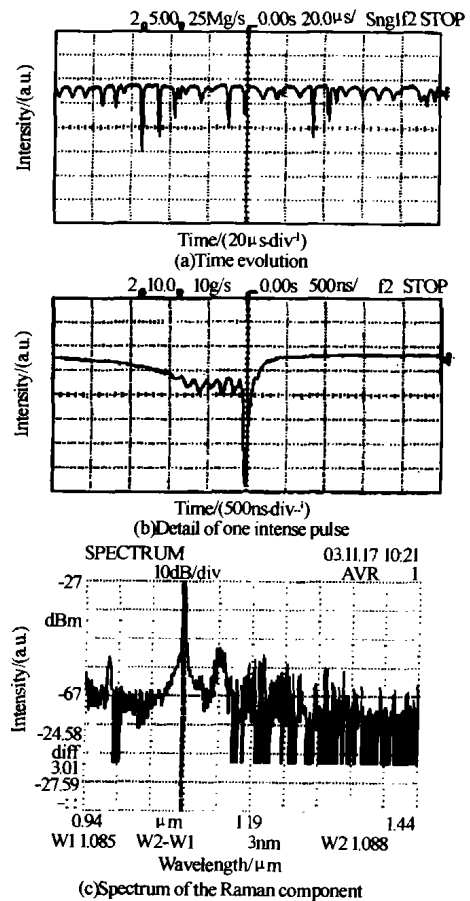


图 4 单镜腔中的喇曼散射效应
Fig. 4 Raman character of one-mirror cavity

约为 1.136 nm 的新谱线,两谱线的波长差为 50 nm,与在石英光纤中由受激喇曼散射效应引起的频移量一致^[10].产生喇曼频移的物理机制为,随着抽运功率的增加,背向布里渊散射效应相继增强,使能量集中在几个主峰上,且抽运功率越大,脉冲峰的个数越少,具有高峰值功率的单个光脉冲的能量逐渐增强,脉冲逐渐变窄,光脉冲的峰值功率逐渐增大,当该峰值功率达到喇曼增益阈值时,受激喇曼效应产生.

2.2 腔损耗对激光器输出特性的影响

为了研究腔损耗对激光器输出稳定性的影响,我们将实验装置 1 的输出端加一反射率为 70% 的输出镜,构成双镜腔结构.这样,由于反射率较高,腔损耗减小.实验发现,高反射率的输出耦合镜的引入,使激光器的阈值由原来的 400 mW 降低为 212 mW.进一步实验表明,当抽运功率刚刚大于激光器阈值时,自脉动效应产生,与未加输出耦合镜相比,此自脉动效应明显减弱(图 5(a)),这是因为随着腔损耗的降低,腔内光子寿命逐渐增长,理论计算表明,光子寿命越短,自脉动效应越强^[11].该实验结果与理论计算相符.

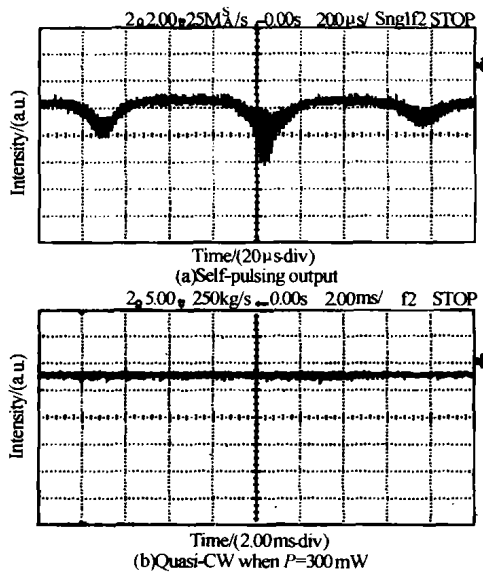


图 5 双镜腔中光脉冲的时域特性

Fig. 5 Output character of two-mirrors cavity

利用双镜腔的实验装置,继续增大抽运功率到 300 mW,发现随着抽运功率的逐渐增大,并未出现单镜腔结构中的受激布里渊效应及受激喇曼散射效应,而是出现了准连续的激光输出(图 5(b)),这是因为自脉动效应较弱,而较弱的自脉动中的单个光脉冲的峰值较低,并不能达到受激布里渊散射的阈值,相应的受激喇曼散射效应也被抑制.

3 结论

对掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器时域特性和光谱

特性进行了实验研究.发现抽运功率、腔损耗均对其工作特性有一定影响.在腔损耗较大的情况下,激光器在其阈值附近工作在似稳状态,随着抽运功率的增加,则会相继出现自脉动、受激布里渊散射和受激喇曼散射等非线性效应,这对于脉冲光纤激光器的研制和新型喇曼光子源的研究具有重要价值;而在腔损耗较小的情况下,自脉动效应得到抑制,只要适当选择抽运功率,即可实现掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的连续稳定运转.

参考文献

- Zellmer H, Willamowski U, Tunnermann A, et al. High-power CW neodymium-doped fiber laser operating at 9.2 W with high beam quality. *Opt Lett*, 1995, **20**(6): 578 ~ 580
- Auerbach M, Wandt D, Fallnich C, et al. High power tunable narrow line width ytterbium-doped double-clad fiber laser. *Opt Commun*, 2001, **195**(5 ~ 6): 437 ~ 441
- 武自录, 陈国夫, 王贤华, 等. 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的数值分析. *光子学报*, 2002, **31**(3): 332 ~ 336
Wu Z L, Chen G F, Wang X H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3): 332 ~ 336
- Salhi M, Hideur A, Chartier T, et al. Evidence of Brillouin scattering in an ytterbium-doped double-clad fiber laser. *Opt Lett*, 2002, **27**(15): 294 ~ 297
- 徐之光, 戴武涛, 樊亚仙, 等. 可调谐的 Q 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器. *光子学报*, 2003, **32**(5): 520 ~ 522
Xu Z G, Dai W T, Fan Y X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 520 ~ 522
- Hideur A, Chartier T, Brunel M, et al. Generation of high energy femtosecond pulses from a side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser. *Appl Phys Lett*, 2001, **79**(21): 3389 ~ 3391
- 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
- Chernikov S V, Zhu Y, Taylor J R, et al. Supercontinuum self-Q-switched ytterbium fiber laser. *Opt Lett*, 1997, **22**(5): 298 ~ 300
- 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
- Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*, Second Edition (Academic, Boston, Mass.) 1995, Chap. 8
- Sanchez F, Boudec P Le, Francois P Luc. Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers. *Phys Rev A*, 1993, **48**(3): 2220 ~ 2228

Temporal and Spectral Characteristic of a Yb-doped Double-clad Fiber Laser

Zhang Shumin^{1,2}, Lu Fuyun¹, Xie Chunxia¹, Wang Hongjie¹

¹ Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071

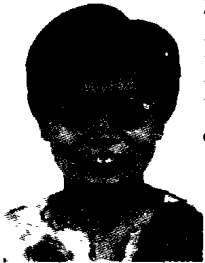
² Department of physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016

Received date: 2003-12-22

Abstract The temporal and spectral characteristic of a Yb-doped double-clad fiber laser has been studied. The influences of the pumped power and the cavity losses on the laser are investigated. It is found that the self-pulsing and the nonlinear phenomena such as Brillouin and Raman scatterings can be observed in a one-mirror cavity, and the system is stabilized in a two-mirrors cavity where Brillouin and Raman scatterings are efficiently suppressed. We also give a theoretical explanation about the phenomenon in our experiments.

Keywords Yb-doped double-clad fiber laser; Temporal and spectral characteristics; Pump power; Cavity losses

Zhang Shumin was born in 1965, She received her B. S. degree from Hebei Normal University in 1987 and M. S. degree from South China Normal University in 2000, respectively. Now, she is a Ph. D candidate on Institute of Physics, Nankai University. Her current research interests include optical pulse compression in fiber and fiber laser.



关键词选择

一、发表在《光子学报》上的学术论文,必须在摘要后列出不少于4个关键词。从技术角度考虑,没有关键词的论文应列入非学术论文类。

二、这些关键词按以下顺序选择:

第一个关键词列出该文章主要工作或内容所属三级学科名称。学科体系采用国家技术监督局发布的《学科分类与代码》(国标 GB/T 13745-92)。

第二个关键词列出该文研究得到的成果名称或文内若干个成果的总类别名称。

第三个关键词列出该文在得到上述成果或结论时采用的科学研究方法的具体名称。对于评述性学术论文等,此位置分别写“评述”等。对科学研究方法的研究论文,此处不写被研究的方法名称,而写所应用的方法名称。前者出现于第二个关键词的位置。

第四个关键词列出在前三个关键词没有出现的,但是被该文作为主要研究对象的事或物质的名称,或者在题目中出现的作者认为重要的名词。

如有需要,第五、第六个关键词等列出作者认为有利于检索和文献利用的其他关键词。

三、关键词是学术论文进入流通和引用的窗口,规范关键词选择有利于检索和引用。

希望广大作者在投稿时,参照此通知,规范选择关键词。

谢谢合作!