

文章编号: 0258-7025(2008)01-0006-05

包层抽运掺镱光纤激光器中受激拉曼散射和受激布里渊散射效应

胡姝玲^{1,2} 张春熹¹ 高春清² 刘惠兰¹ 欧攀¹ 吕福云³

(¹ 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083
² 北京理工大学光电工程系 431 教研室, 北京 100081; ³ 南开大学物理科学学院, 天津 300071)

摘要 高功率光纤激光器大多选用掺镱双包层光纤作为增益介质, 由于光纤尺寸较小, 极易在光纤谐振腔中产生受激布里渊散射、受激拉曼散射效应。包层掺镱双包层光纤激光器中一旦发生受激拉曼散射和受激布里渊散射效应, 其产生高强度信号成为高功率光纤激光器的主要噪声来源, 影响激光输出的特性和稳定性。对包层抽运掺镱光纤激光器中的受激布里渊散射和受激拉曼散射进行了实验研究, 在单模双包层光纤中观察到受激布里渊散射和受激拉曼散射。实验结果表明, 在光纤谐振腔中, 抽运方式、谐振腔输出镜损耗、受激瑞利散射对受激布里渊散射的影响较大, 尤其是受激瑞利散射为谐振腔提供了附加反馈, 不仅压窄激光信号的线宽, 而且使得受激布里渊散射的阈值迅速降低。

关键词 激光器; 光纤激光器; 受激拉曼散射; 受激布里渊散射; 受激瑞利散射

中图分类号 TN 248.1; O 436.2 **文献标识码** A

Stimulated Raman Scattering and Stimulated Brillouin Scattering Effects in Ytterbium Doped Double Clad Fiber Laser

Hu Shuling^{1,2} Zhang Chunxi¹ Gao Chunqing² Liu Huilan¹ Ou Pan¹ Lü Fuyun³

(¹ School of Instrumentation Science & Opto-Electronics Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China
² Opto-Electronics Department, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
³ Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract The double-clad ytterbium-doped fibers are the common gain material of high power fiber lasers. Because of the small core size, it is easy to arouse the stimulated Brillouin scattering and stimulated Raman scattering effects in the fiber resonator. Once the stimulated Brillouin scattering and stimulated Raman scattering are taking place, the high intensity signals become the major noise source and play an important role on the lasers output characters. Experimental study on them is reported in this paper. The results are shown that the pump way, the output mirror reflectivity and stimulated Rayleigh scattering play important roles to them in the fiber laser resonators, especially stimulated Rayleigh scattering. Stimulated Rayleigh scattering provides additional feedback to fiber resonators, not only narrow the laser linewidth, but also make the threshold of stimulated Brillouin scattering decrease rapidly.

Key words lasers; fiber laser; stimulated Raman scattering; stimulated Brillouin scattering; stimulated Rayleigh scattering

1 引言

高功率光纤激光器以其稳定性好、光束质量高、使用简单以及免维护功能等显著特点, 成为当前的研究热点之一^[1,2]。1999 年光纤激光器输出功率突破了百瓦量级^[3], 在 2004 年已经实现了单纤输出功

率达到千瓦量级以上^[4~6], 特别是 IPG 公司采用包层、多模、并行抽运技术制成的掺镱光纤激光器, 其最大输出功率已达到万瓦量级。高功率光纤激光器大多选用掺镱双包层光纤作为增益介质。掺镱双包层光纤与普通非掺杂光纤相似, 由于纤芯尺寸非常

收稿日期: 2007-03-28; 收到修改稿日期: 2007-08-06

作者简介: 胡姝玲(1971—), 女, 天津人, 讲师, 博士, 主要从事光电子器件以及光纤非线性的研究。E-mail: hulxi@tom.com

小,一般为几微米至几十微米量级,因此容易在光纤内部产生非线性效应,如受激布里渊散射^[7,8]、受激拉曼散射等。受激散射效应是具有极高能量转换效率的相干光产生过程,其强度可以达到与入射光强度相同的量级,甚至更高^[9]。在高功率光纤激光器谐振腔中,由于激光的高强度和相干性,使入射光在光纤中各类自发随机涨落的散射能够与后续入射光发生干涉,最终形成光强与入射光相当的散射光,即产生受激散射效应。在高功率光纤激光器中一旦产生受激散射效应,就会产生高强度的信号,成为高功率光纤激光器的主要噪声来源,影响激光器输出稳定性。此外,受激布里渊散射作用的结果是产生纳秒量级的弛豫振荡,峰值功率以及高平均功率脉冲还会对光纤材料起到破坏作用。研究高功率光纤激光器中的受激散射效应具有重要的实际应用价值。

表 1 实验中选用的不同光纤参数以及相应的谐振腔反馈

Table 1 Parameters of ytterbium-doped double-clad fibers and relative feedback of different fiber resonators

Fiber kinds	A	B	C	D
Inner cladding size and shape	125 $\mu\text{m} \times 125 \mu\text{m}$ rectangular	340 $\mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ D-shape	400 μm (diameter) eight square	
Inner cladding NA	0.38	0.37		0.46
Core diameter / μm	7	10.6	30.5	20
Core NA	0.17	0.17	0.17	0.06
Length / m	20	20	20	20
Mode	Single mode	Multimode	Multimode	Multimode
Resonator feedback	3.5%/70%/90%	3.5%/70%/90%	3.5%/70%/90%	3.5%/70%/90%

实验装置如图 1 所示,抽运源采用尾纤输出的激光二极管(LD),尾纤的纤芯直径400 μm ,数值孔径(NA)0.22。二向色镜(镀对1064 nm高反膜,对975 nm增透膜)作为高功率光纤激光器谐振腔的前腔镜,增益介质为掺镱双包层光纤,其直切端面作为输出腔镜。将输出激光光束准直后再进行测量。在实验中,使用 PIN 硅快速光电探测器和带宽500 MHz的示波器(HP54616B)观测激光器的时域特性;同时使用 LP-3C 型功率计监测其功率,用 MS9001B1 型光谱分析仪(OSA)观测输出激光的光谱特性。实验中选用光纤的具体参数同表 1。

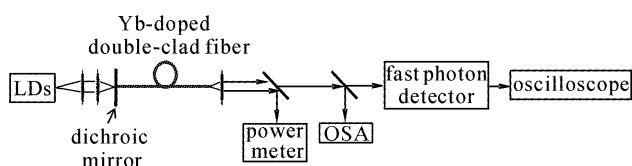


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup

本文对使用单模、多模、大模场面积掺镱双包层光纤的高功率光纤激光器的动态特性进行了研究,着重对可能产生的受激拉曼散射和受激布里渊散射进行了比较和分析,结果发现在高功率激光作用的情况下,掺镱光纤激光器中的受激散射效应不容忽视。

2 实验装置

在高功率光纤激光器中受激布里渊散射现象容易出现,而自聚焦效应由于阈值过高,一般情况下可以忽略。一般来说受激拉曼散射引起的拉曼效应主要发生在小纤芯、长光纤的激光器中,但是近年来的研究表明,在高功率光纤激光器中也能够产生受激拉曼散射效应。选用了四种不同的双包层增益光纤,具体参数见表 1。

3 结果与分析

为了获得较高的耦合效率,得到高亮度的激光输出,选用尾纤输出的抽运源。为提高激光输出功率,抽运源采用多模输出的激光二极管。

实验采用四种不同类型的光纤,改变输出耦合以及抽运方式,对高功率光纤激光器进行了研究,结果发现仅在连续抽运 A 光纤激光器中观测到了拉曼频移,说明产生了受激拉曼效应。光纤 A,B,C 中(抽运功率最大达到60 W)观测到了受激布里渊散射。在 D 光纤中由于实验采用的抽运源不同,此时的抽运入纤功率仅为13 W,因此除微秒量级的振荡外,未观测到受激布里渊散射和受激拉曼散射效应。

3.1 抽运方式的影响

对于 Yb 光纤激光器,一般认为激光器基本上是连续辐射,仅有小幅度的涨落。但是在抽运功率较高时,激光腔中振荡的激光场可以唯象地用两个相互正交的本征偏振模描述。此时由于激光腔的 Q 值很高,激光输出的时域特性呈现出自脉动的特性^[10]。采用光纤 A,B,C 的结果相似,只是自脉冲

的程度不同——从示波器屏幕上均可以观察到微秒量级的自脉冲现象。

以 A 光纤为例进行说明连续抽运与脉冲抽运方式的影响。

在保持其他条件不变的情况下,改变抽运源输出方式,即从连续抽运改变为脉冲抽运。比较图 2 和图 3,可以看到连续抽运时受激布里渊散射产生脉冲串中包含的脉冲数目多,能量比较分散;而脉冲抽运时则仅出现几个布里渊散射脉冲,脉冲能量相对集中。因此可以认为脉冲抽运对于受激布里渊散射自调 Q 脉冲输出具有稳定作用。

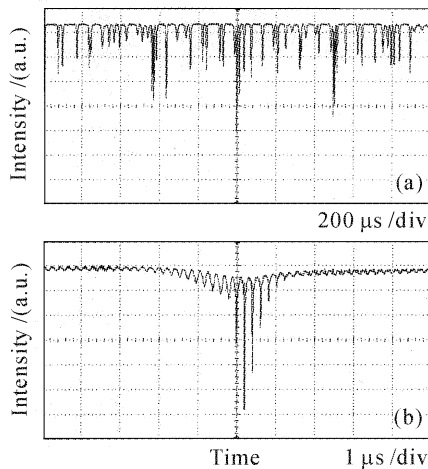


图 2 连续抽运时出现的受激布里渊散射脉冲串(a)及其展开图(b)

Fig. 2 Pulse trains generated by stimulated Brillouin scattering under continuous wave (CW) pumping condition (a) and details of one pulse train (b)

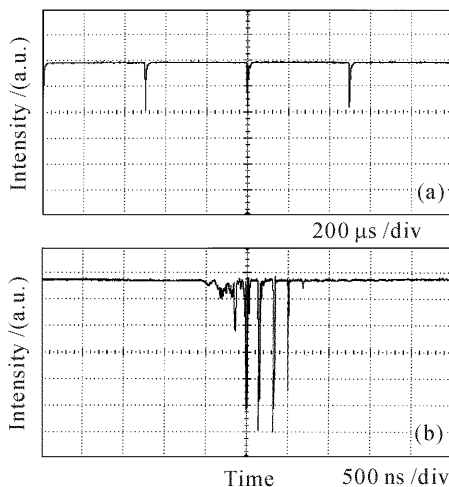


图 3 脉冲抽运时出现的受激布里渊散射脉冲串(a)及其展开图(b)

Fig. 3 Pulse trains generated by stimulated Brillouin scattering under pulse pumping condition (a) and details of one pulse train (b)

3.2 抽运功率对增益光纤中受激拉曼散射和受激布里渊散射的影响

当连续抽运功率增加到 400 mW 时,开始出现纳秒量级的脉冲串,并且随着抽运功率的增加,逐渐趋于稳定状态,如图 4(a),(b)所示,光谱特性如图 4(c)所示。根据受激布里渊散射的特性^[9,11],可以认为光纤激光器已经达到受激布里渊散射阈值。

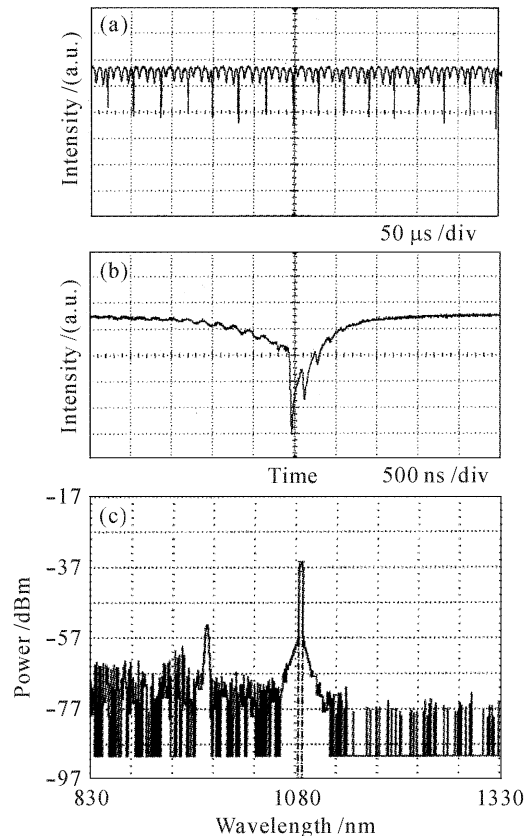


图 4 连续抽运功率 0.4 W 时单模双包层光纤输出激光的动态特性。(a) 时域特性整体图;(b) 单个脉冲展开图;(c) 光谱特性

Fig. 4 Dynamics of single mode double-clad laser output above 0.4 W CW pumping. (a) whole dynamic character; (b) expended single pulse; (c) spectral character

抽运功率接近 1 W 时,观察到激光信号再次变为无周期性的不规则脉冲串(见图 5(a)),展开可以得到如图 5(b)所示的激光输出。图 5(c)给出相应的光谱图,比较图 4(c)与图 5(c)可知,在激光谱线 $\lambda = 1086 \text{ nm}$ 的长波方向出现了一中心波长为 1136 nm 的新谱线,两谱线的波长差为 50 nm,与在石英光纤由受激拉曼散射效应引起的频移量一致,可以认定光纤中产生了受激拉曼效应。因此可以确定,图 5(b)是在一串布里渊散射脉冲后出现的峰值较高的拉曼散射脉冲。

对于一定长度的单模增益光纤,其受激布里渊

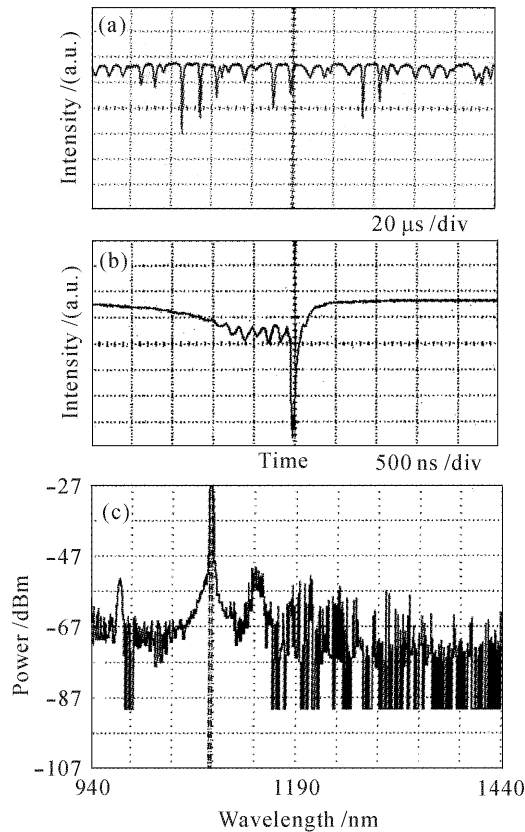


图5 连续抽运功率接近1 W时光纤激光输出的动态特性。(a) 时域特性整体图;(b) 单个脉冲展开图;(c) 光谱特性

Fig. 5 Dynamics of single mode double-clad laser output near 1 W CW pumping. (a) whole dynamic character; (b) expanded single pulse; (c) spectral character

散射的阈值相对较低,这与文献[12]的理论计算结论是一致的。根据实验现象,可以解释拉曼散射脉冲的产生:随着抽运功率的增加,背向布里渊散射效应得到加强,使激光能量更集中在受激布里渊散射作用而形成脉冲串的几个主峰上;抽运功率越大,脉冲峰的个数越少,单脉冲能量越高;脉冲能量的提高使得受激布里渊散射提供的反馈变大^[13],其结果有两个:一是随着反馈增大,使受激散射阈值变小;二是使腔内的功率密度更高,进而腔内光脉冲的峰值功率也随之逐渐增大。当该峰值功率达到受激拉曼散射阈值时,受激拉曼效应产生。

3.3 腔损耗的影响

在光纤的输出端分别加上反射率为70%和90%的输出镜,构成双镜腔。由于反射率较高,腔损耗减小,可以看到随谐振腔输出损耗的减小,受激拉曼散射、受激布里渊散射的阈值逐步降低。在实验中,外加70%,90%反馈的条件下,激光器受激布里渊散射的阈值由原来的400 mW降低为212 mW,与

理论计算结果的趋势是一致的。此外,受激布里渊散射产生附加反馈,谐振腔损耗降低。随着腔损耗降低,腔内光子寿命逐渐增长。文献[14]中理论计算的结果表明,光子寿命越长,自脉动效应越弱,激光器的动态特性相对更加稳定。

3.4 受激瑞利散射的影响

光在光纤内传播时,由于外在因素和内在因素的影响,存在菲涅耳反射光、瑞利背向散射光等与入射光反向传播的光。对于普通的光纤,因为反向传输光的功率太小,对于整个激光系统没有什么影响。但是对于高功率包层抽运掺镱光纤激光器来说,后向传输的光不可忽略。在光纤激光谐振腔中,由于强光的作用,电致伸缩效应会引发受激瑞利散射^[15]。光纤中受激布里渊散射与受激瑞利散射的产生机制相同,二者不同的是受激瑞利散射是一种弹性散射,而受激布里渊散射是一种非弹性散射。因此受激瑞利散射与受激布里渊散射是不可分开的,在光纤谐振腔中会同时产生受激瑞利散射和受激布里渊散射。在法布里-珀罗(F-P)光纤谐振腔中,受激瑞利散射的增益足够大,其不仅为光纤谐振腔提供了附加反馈,还使输出激光的线宽大幅度压窄^[16]。

光纤谐振腔中受激布里渊散射的阈值满足^[17]:

$$P_{th} = G_{eff}^{th} \cdot \frac{A_{eff}}{g_B L_{eff}}, \text{ 其中 } G_{eff}^{th} = 4\alpha L - 2\ln(r_1 r_2), A_{eff}$$

为有效纤芯面积, $L_{eff} = \frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)]$ 为有效

作用光纤长度, g_B 为受激布里渊散射增益,在 $1 \mu\text{m}$ 处约为 $10 \times 10^{-11} \text{ m/W}$, r_1, r_2 分别为谐振腔镜和后腔镜的反射率, α 为增益光纤对出射激光的吸收系数, L 为增益光纤的长度。此外还应该考虑模式的影响因子 $\frac{\Delta\nu_B + \Delta\nu_p}{\Delta\nu_B}$, $\Delta\nu_B$ 为受激布里渊散射线宽,在

$1.1 \mu\text{m}$ 附近约为 31 MHz, $\Delta\nu_p$ 为抽运光的线宽。由于受激瑞利散射提供了附加反馈 (10^{-4} 量级),保持其他条件不变的情况下, G_{eff}^{th} 由原来的 21 变为 0.1~1 之间^[12],同时使受激布里渊散射抽运光变窄,

$\frac{\Delta\nu_B + \Delta\nu_p}{\Delta\nu_B} \rightarrow 1$, 因此会使受激布里渊散射阈值急剧降低。

降低。

4 结 论

对四种不同的光纤激光谐振腔中的受激拉曼散射和受激布里渊散射效应进行了理论分析、数值模拟和实验研究,结果表明在光纤激光谐振腔中,不能

忽视抽运方式、抽运功率、谐振腔损耗以及受激瑞利散射的作用。脉冲抽运方式可以使能量集中,也能够起到稳定激光器输出的作用。随着抽运功率的增加,光纤激光器首先产生受激布里渊散射效应,激光能量集中在受激布里渊散射作用而形成脉冲串的几个主峰上;抽运功率越大,脉冲峰的个数越少,单脉冲能量越高。脉冲能量的提高使得受激布里渊散射提供的反馈增大,随着反馈增大,最终使受激散射阈值减小,腔内的功率密度增加,进而光脉冲的峰值功率也随之逐渐增大,这也间接表明了强损耗的影响。此外需要指出的是受激瑞利散射为谐振腔提供了附加反馈,不仅压窄了激光信号的线宽,而且使得受激布里渊散射的阈值迅速降低。

参 考 文 献

- Zhao Hong, Zhou Shouhuan, Zhu Chen *et al.*. Output power over 1.2 kW of high power fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1359
赵 鸿,周寿桓,朱 辰 等. 大功率光纤激光器输出功率超过 1.2 kW[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1359
- Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang *et al.*. A continuous-wave 714 W fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1119~1120
周 军,楼祺洪,朱健强 等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):1119~1120
- V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts *et al.*. 110 W fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14):1158~1160
- Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fibre laser with 1 kW of continuous-wave output power [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(8):470~471
- Y. Jeong, J. Sahu, D. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25):6088~6092
- Ken-ichi Ueda, Hiroshi Sekiguchi, Hirofumi Kan. 1 kW CW output from fiber-embedded disk lasers [C]. *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics* 2002, 2002. CPDC4-1~CPDC4-2
- Shuling Hu, Jing Yu, Chunqing Gao *et al.*. Dual-wavelength stable nanosecond pulses generation from cladding-pumped fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11):655~657
- Fan Yaxian, Hu Shuling, Lü Fuyun *et al.*. Dynamics characteristic of D-shape inner cladding Yb³⁺-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4):303~306
樊亚仙,胡姝玲,吕福云 等. D形内包层掺 Yb³⁺ 光纤激光器动态特性的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4):303~306
- Qian Shixiong, Wang Gongming. *Nonlinear Optics: Theory and Development* [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2001. 156~184
钱士雄,王恭明. *非线性光学:原理与进展*[M]. 上海:复旦大学出版社, 2001. 156~184
- P. Glas, M. Naumann, A. Schirrmacher *et al.*. Self pulsing versus self locking in a cw pumped neodymium doped double clad fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **161**(4-6):345~358
- Andrei A. Fotiadi, Roman Kiyan, Olivier Deparis *et al.*. Statistical properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode optical fibers above threshold [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(2):83~85
- Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3rd edition. Boston: Academic Press, 2001. 298~380
- N. N. Il'ichev. Reflection coefficient of a stimulated Brillouin scattering mirror [J]. *Quantum Electron.*, 1999, **29**(9):811~813
- François Sanchez, Patricē Le Boudec, Pierre-Luc Francois *et al.*. Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 1993, **48**(3):2220~2228
- Robert W. Boyd. *Nonlinear Optics* [M]. New York: Academic Press, 1992
- F. T. Arecchi, E. O. Schulz-Dubois. *The Physical Application of Laser, the Handbook of Laser, No. 5 Fascicule* [M]. Translated by the Translation Group of the Handbook of Laser. Beijing: Science Press, 1983. 3~10
F. T. Arecchi, E. O. Schulz-Dubois. *激光的物理应用,激光手册第 5 分册*[M]. 《激光手册》翻译组翻译. 北京:科学出版社, 1983. 3~10
- Alexander L. Gaeta, Robert W. Boyd. Stimulated Brillouin scattering in the presence of external feedback [J]. *International Journal of Nonlinear Optical Physics*, 1992, **1**(3):581~594