

文章编号: 1001-3806(2008)01-0044-03

基于受激布里渊散射的调 Q 光纤激光器研究

张 亮, 王智勇, 张 辉, 尧 舜, 曹银花, 左铁钊
(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022)

摘要: 为了获得窄脉宽和高功率的光纤激光脉冲, 对基于受激布里渊散射的脉冲抽运调 Q 光纤激光器进行了实验研究。设计了布喇格光纤光栅、掺 Yb^{3+} 双包层光纤和单模光纤作为线性谐振腔。采用锥形光纤连接抽运模块与掺 Yb^{3+} 双包层光纤实现了光纤激光器的全光纤化结构。通过脉冲抽运方式, 利用光纤中的非线性效应——背向受激布里渊散射对激光进行混合调 Q , 得到了纳秒量级的脉冲输出, 其脉宽为 400ns, 平均功率 2.53W, 重复频率 15kHz。结果表明, 通过脉冲抽运方式, 利用光纤中的受激布里渊散射能够有效地压缩输出脉冲的线宽, 实现高功率输出。

关键词: 激光器; 光纤光栅; 双包层光纤; 脉冲抽运; 受激布里渊散射

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Study on Q -switched fiber laser based on stimulated Brillouin scattering

ZHANG Liang, WANG Zhi-yong, ZHANG Hui, YAO Shun, CAO Ying-hua, ZUO Tie-chuan
(College of Laser Engineering Beijing University of Technology Beijing 100022, China)

Abstract For obtaining narrow pulse width and high power fiber laser a series of experiments were carried out stimulated Brillouin scattering pulse-pumped Q -switched fiber laser. The linear cavity, including Bragg fiber grating Yb^{3+} -doped double-clad fiber (Yb^{3+} -DCF) and SM fiber, were designed. Yb^{3+} -DCF and pump module were connected by taper fiber, achieving all-fiber laser. Nonlinearity of the fiber——stimulated Brillouin scattering Q -switched fiber laser through pulse-pump, 400ns pulse width, 2.53W average power, the repetition rate of 15kHz were achieved. The result shows that through pulse-pump stimulated Brillouin scattering can reduce pulse's linewidth and realize high power output.

Key words lasers; fiber grating; double-clad fiber; pulsed pump; stimulated Brillouin scattering

引 言

自上世纪 80 年代 ALCOCK 首次将调 Q 技术引入光纤激光器以来^[1], 调 Q 光纤激光器得到快速的发展, 这一方面得益于它具有结构紧凑、光束质量好、阈值低、效率高、脉宽窄、无需水冷等众多优点, 另一方面是光纤(如双包层光纤和大模面积光纤)技术的发展和调 Q 技术(如声光 Q 开关、电光 Q 开关等主动和被动调 Q 方式)的改进。在众多调 Q 光纤激光器中, 全光纤结构的基于背向受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)混合调 Q 光纤激光器倍受业界的青睐。这种基于光纤 SBS 的调 Q 光纤激光器是利用单模光纤中的非线性效应——背向受激布里渊散射效应实现自调 Q 运转的^[2-7], 当激光功率达到 SBS 阈值后, 单模光纤中产生背向 SBS 以极短的弛豫振荡脉冲形式给激光谐振腔提供一个瞬时强光反馈, 使腔内的

Q 值发生周期性地变化, 产生纳秒量级的短脉冲序列, 实现了周期性的改变谐振腔 Q 值的目。CHEN 等人在掺钕双包层光纤的声光调 Q 光纤激光器中, 利用单模光纤中的 SBS 效应进行混合调 Q ^[8] 得到重复频率稳定、纳秒级的巨脉冲激光, 同时有效地改善光束质量等。这表明基于 SBS 的调 Q 光纤激光器能够得到高脉冲能量^[9]、高峰值功率^[10-11]、纳秒量级甚至是皮秒量级^[4]的自调 Q 激光短脉冲。因此, 背向 SBS 脉冲激光压缩技术是一种具有潜在应用前景的新技术。

研究表明, 调 Q 光纤激光器在生物工程、医疗、测量技术、光学传感^[12]、航空航天、工业加工等领域有着广阔的应用前景, 并向全光纤、窄脉宽、高功率、高能量的方向发展。

作者对基于 SBS 的脉冲抽运调 Q 光纤激光器进行了实验研究。设计了利用布喇格光纤光栅、掺 Yb^{3+} 双包层光纤和单模光纤作为线性谐振腔, 采用锥形光纤连接抽运模块光源与掺 Yb^{3+} 双包层光纤, 实现了全光纤化的光纤激光器的结构。利用脉冲抽运和单模光纤中的 SBS 混合调 Q 的方法, 在平均入纤功率为 4W 时获得 2.53W 的平均输出功率, 输出光脉冲重复频率为 15kHz。

作者简介: 张 亮(1971-), 男, 讲师, 研究领域为光纤激光及半导体激光器。

E-mail: liangzhang@bjut.edu.cn

收稿日期: 2006-11-20 收到修改稿日期: 2006-12-30

脉冲宽度为 400 ns 并对实验结果进行了分析。

1 实验理论^[13-14]

基于光纤的受激反向布里渊散射的调 Q 光纤激光器是利用单模光纤中的背向 SBS 效应实现自调 Q 运转的。

SBS 是在单模光纤内发生的一种非线性过程。可以描述为抽运波、斯托克斯波通过声波进行的非线性相互作用,抽运功率一旦达到 SBS 的阈值, SBS 将绝大部分输入功率转化为后向斯托克斯波。若将频率为 ν_p 的抽运光耦合到光纤中,光波电矢量引起介质的电致伸缩,产生很强的感应声波,使介质中的自发超声波得到雪崩式的相干放大,引起光纤介质折射率的周期性的调制,产生了“折射率衍射光栅”的作用,后续光波通过这个“折射率衍射光栅”产生受激布里渊散射。这种由于后向 SBS 所引起的周期瞬间反馈使得谐振腔的 Q 值在瞬时发生变化的被动调 Q 的过程称为自调 Q。

依据量子力学的解释,在单模光纤中的 SBS 过程为背向布里渊散射过程,这个散射过程可以看成是一个抽运光子的湮灭,同时产生了一个斯托克斯光子和一个声频声子。由于在散射过程中能量和动量必须守恒,因此,3 个波之间的频率和波矢有以下关系:

$$\Omega_B = \omega_p - \omega_s \quad (1)$$

$$\vec{k}_B = \vec{k}_p - \vec{k}_s \quad (2)$$

式中, ω_p 和 ω_s 分别为抽运波和斯托克斯波的频率, \vec{k}_p 和 \vec{k}_s 是抽运波和斯托克斯波的波矢, \vec{k}_B 为布里渊频移波的波矢,而布里渊频移 Ω_B 为:

$$\Omega_B = 2k_p \sin \frac{\theta}{2} \cdot v_a = 2\omega_p n_p \sin \frac{\theta}{2} \cdot \frac{v_a}{c} \quad (3)$$

式中, θ 是入射抽运光与散射光波矢量之间的夹角, n_p 是介质相对于频率 ω_p 的等效折射率, c 是真空中光速, v_a 是声波在介质中的传播速度, k_p 为抽运光的波矢。

从上式可以看出,布里渊频移 Ω_B 主要取决于散射方向。当 $\theta=0^\circ$ 时, $\Omega_B=0$ 当 $\theta=180^\circ$ 时, Ω_B 最大:

$$\Omega_B = 2k_p \cdot v_a = 2\omega_p n_p \cdot \frac{v_a}{c} = \frac{4\pi n_p v_a}{\lambda_p} \quad (4)$$

式中, λ_p 为抽运波长。

在单模光纤中,只有前后向为相关方向。因此,在光纤中仅存在背向的 SBS。

对于抽运光子、斯托克斯波光子和声频声子参量相互作用的声子可以看成是声学声子,这个背向的 SBS 的形成过程中形成的超声衍射光栅,对激光起到调 Q 开关的作用。而这种超声衍射光栅比声光调 Q 开关的超声光栅声频率高出一个数量级,相当于激光腔

的 Q 值在极短时间增长了几个数量级,从而起到周期性改变腔 Q 值的目的。

对于光纤中背向 SBS 的阈值功率 P_{th} 为:

$$P_{th} = 21A_{eff}/g_B L_{eff} \quad (5)$$

式中, g_B 为 SBS 频移 Ω_B 的增益系数,它与抽运光波长 λ_p 无关。 L_{eff} 为单模光纤的有效作用长度, A_{eff} 为单模光纤的有效纤芯截面。

从 (5) 式可以看出, SBS 的阈值功率与单模光纤长度成反比,与单模光纤的有效面积成正比,即光纤越短、有效面积越大, SBS 阈值功率越高。当谐振腔中的激光功率达到并超过 SBS 的阈值时,即产生背向 SBS 过程。由于入射光子与声子的相互作用,入射光子湮灭,产生布喇格衍射的背向散射光波。当入射光波把绝大部分能量转换成衍射光波时,衍射光栅将消失,在腔内产生布里渊散射光的弛豫振荡脉冲,其脉冲半宽约为 1 ns 所以当腔参数选择合适时,会产生稳定的自调 Q 光脉冲输出。

2 实验方法及装置研究

实验装置如图 1 所示,抽运源采用大功率半导体

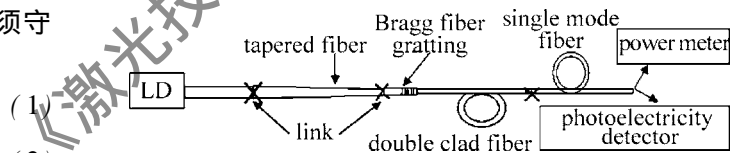


Fig 1 Experimental setup of the all fiber Q-switched fiber laser

激光器 (LD) 光纤耦合模块,其输出光纤直径是 400 μ m,数值孔径是 0.22 工作在 970nm,有连续和脉冲两种工作模式。该抽运模块通过 TTL 电平的矩形波脉冲进行调制实现脉冲输出。增益光纤为掺镱 (Yb^{3+}) 离子双包层光纤,其中外包层直径为 250 μ m,内包层的直径为 210 μ m,纤芯直径为 9 μ m,内包层与外包层之间的数值孔径为 0.45 纤芯与内包层之间的数值孔径小于 0.15 内包层为梅花瓣形结构,这种结构光纤与其它非对称内包层结构的光纤有着非常高的耦合效率;纤芯中掺杂的镱 (Yb^{3+}) 离子在 970nm 处的吸收系数为 0.2 dB/m;所用双包层光纤长度为 20m。线性谐振腔反射镜利用布喇格光纤光栅构成, Bragg 光纤光栅对抽运光 (970nm) 的透过率为 99%,对激光光 (1070nm) 反射率大于 90%,中心反射波长为 1070nm,半峰全宽 0.2nm。锥形光纤两端的直径为 400 μ m 和 200 μ m,数值孔径分别为 0.22 和 0.45 光纤锥形区长度为 2.5m,总计长为 3.5m,实验测定锥形光纤的传输效率为 90%。单模光纤为美国 CORNING 公司的 H11060 光纤,单模光纤长度为 10m,单模光纤另一端为输出端,输出端的端面与轴线垂直,在端面有 4% 的

菲涅耳反射。在实验中使用 PN 快速光电二极管 (PF 511 InGaAs) 进行探测, 用带宽为 100MHz 的高速示波器观察脉冲波形。用功率计测量激光输出功率。

3 实验结果与分析

利用光纤熔接机将 970nm 抽运模块输出光纤、锥形光纤、掺镱 (Yb^{3+}) 离子双包层光纤以及 H II060 单模光纤熔接起来形成全光纤型结构。利用脉冲发生器电路, 通过 TTL 电平的矩形波脉冲进行调制抽运模块, 使其实现脉冲输出。

为了使调 Q 光纤激光器得到重复频率稳定的脉冲输出, 采用脉冲抽运方式。其重复频率为 15kHz, 脉宽为 $28\mu\text{s}$ 。当脉冲抽运电流 (即平均抽运电流) 为 780mA 时, 激光器开始有脉冲输出。这说明激光器的阈值抽运电流为 0.78A。继续增大电流, 获得重复频率稳定的脉冲, 脉冲宽度为微秒量级, 重复频率和抽运源的重复频率完全相同, 如图 2 所示, 抽运电流为

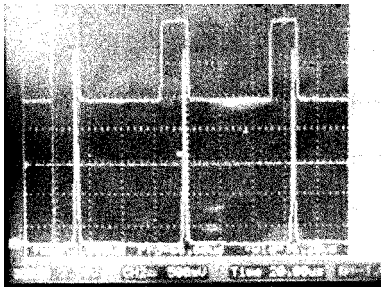


Fig 2 Laser spectral output pulse for current of 1.15A

1.15A 时, 得到的激光器输出时域图。图中上方矩形波为抽运源的输出波形, 下方尖脉冲为调 Q 光纤激光器输出光脉冲, 脉冲宽度为 $1.5\mu\text{s}$ 左右。继续增大电流, 脉冲幅度增大。当抽运电流为 1.17A 时, 在每个主脉冲的后面出现一个次脉冲, 次脉冲和主脉冲相隔 $20\mu\text{s}$ (见图 3)。这是由于抽运光的脉宽较宽, 抽运功

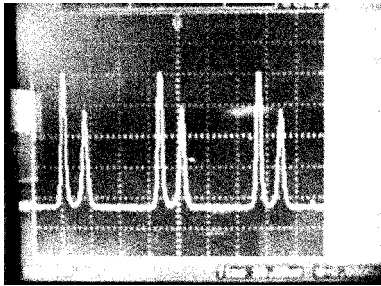


Fig 3 The second pulse appears after the first pulse

率较高, 导致反转的粒子数不能在单脉冲内全部消耗, 出现了次脉冲。当抽运电流继续增大, 次脉冲幅度减小, 在主脉冲处出现巨脉冲。这说明纤芯内的激光功率已经达到 SBS 的阈值功率。当抽运电流为 1.27A 时, 得到了纳秒级的脉冲, 典型的脉冲宽度为 400ns (见图 4)。但该脉冲不是十分稳定, 脉冲幅度大约有

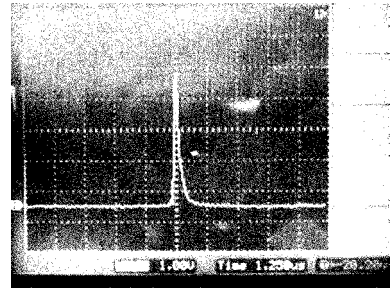


Fig 4 Typical pulse with pump current of 1.27A

10% 的变化, 测得激光输出平均功率为 2.53W。电流增大到最大 1.3A, 脉冲幅度增大, 但仍然幅度有波动。为得到脉冲抽运电流和入纤功率的对应关系, 在锥形光纤的末端熔接了约 10mm 的双包层光纤, 在双包层输出端监测输出功率, 得到图 5 所示的抽运电流和入

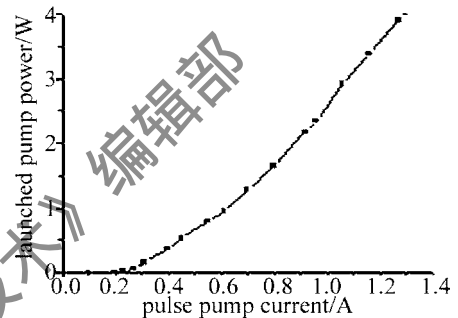


Fig 5 Launched pump power with pulse pump current

纤功率的对应曲线。通过该关系曲线, 得到上述实验中抽运电流所对应的平均入纤功率为 4W。

4 结论

设计了布喇格光纤光栅、掺 Yb^{3+} 双包层光纤和单模光纤组成线性谐振腔, 采用锥形光纤实现了抽运模块与掺 Yb^{3+} 双包层光纤之间的低损耗连接, 实现了调 Q 光纤激光器的全光纤化结构。利用脉冲发生电路调制抽运模块, 实现抽运源的脉冲输出。在脉冲抽运方式下, 利用单模光纤中的非线性效应——背向受激布里渊散射进行混合调 Q, 实现了脉冲光纤激光器, 得到了纳秒量级的脉冲输出, 其脉宽为 400ns, 在平均入纤功率为 4W 时获得 2.53W 的平均输出功率, 输出光脉冲重复频率为 15kHz, 该激光器为全光纤结构, 结构紧凑。这为脉冲光纤激光器的实用化, 提供了一个新思路。

参考文献

- [1] ALCOCK I P, TROPPER A C, FERGUSON A I *et al* Q-switched operation of a neodymium-doped monomode fiber laser [J]. Electron Lett 1986 22(2): 84-85.
- [2] SAIH I M, HIDEUR A, CHARTIER T, *et al* Evidence of Brillouin scattering in an ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. Opt Lett 2002 27(27): 1294-1296.
- [3] ORTAC B H, HIDEUR A, CHARTIER T, *et al* Influence of cavity losses on stimulated Brillouin scattering in a self-pulsing side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser [J]. Opt Commun, 2003 215: 389-395.

(下转第 49 页)

3.2 误差分析

实验测试的误差主要来自两个方面,一个是材料双折射率的测量误差^[7-8],另一个是多极片的厚度误差^[9-10]。

首先,对于双折射率的测量,现在已经有了很精密的测量技术,但仍存在一定的误差,目前测量水平只能精确到 0.01。

其次,器件本身的制造中就存在一定的误差,现在的工艺水平能达到 2% 的误差范围内已经很不错了,而实际测试器件的研磨工艺精度也只能达到 2'。

通过实验数据与理论值的对比得到的总的误差范围在 3% 以内(见图 3)。所以,得到的测量值与理论值有一定的误差,但在允许范围之内。因此,可见本文中的理论推导是正确的。

4 结 论

经过上面的讨论可知,这种简单组合的 $\lambda/4$ 波片调整简单、使用方便。在其它一些文章中曾提到了对这种复合式消色差 $\lambda/4$ 波片的优化设计,但效果都不甚理想,而且很难应用于现实。而这种简单的复合式消色差 $\lambda/4$ 波片虽然消色差范围不是很大,但组合方便,更容易控制。经研究,其消色差范围并不像想象的那么大,只是在中心波长附近有较好的消色性,以中心波长为 600nm 时为例,偏差在 2% 以内的光谱范围

大约只有 540nm ~ 680nm,在一些精度要求不是很苛刻的领域更有其现实的应用价值。

参 考 文 献

- [1] DRICOLL W G, VAUGHAN W. Handbook of optics [M]. New York: McGraw-Hill Book, 1978: 10-104.
- [2] YUN M J, LIG H. Three-in-one composite achromatic $\lambda/4$ wave-plate [J]. Journal of Optoelectronics* Laser, 2001, 12(6): 562-564 (in Chinese).
- [3] XUE D, LIG H, ZHENG Ch H, *et al*. Theoretical analysis of the fast axis' equivalence principle of composite wave-plate [J]. Lasers Technology, 2004, 28(1): 111-112 (in Chinese).
- [4] LI H, SONG L K, LIG H. Orientation effect on phase retardation of compound binary zero-order wave-plate [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(12): 1438-1441 (in Chinese).
- [5] LI J Zh. Handbook of optics [M]. Jinan: Shandong Science Technology Press, 1986: 582 (in Chinese).
- [6] DRG S, THEODOR S K. Liquid crystal phase retarder with broad spectral range [J]. Opt Commun, 2000, 176: 313-317.
- [7] ZHENG Ch H, SONG L K. Optimizational design scheme for three-in-one composite achromatic $\lambda/4$ wave-plate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(6): 662-664 (in Chinese).
- [8] WANG N, LIG H. A simple way of detemining the phase delay angle of wave-plate [J]. Journal of Qufu Normal University, 2001, 27(6): 47-49 (in Chinese).
- [9] SONG L K, LIG H. Design of the three-element combination achromatic retarder made of mica and quartz [J]. Journal of Optoelectronics* Laser, 2000, 11(1): 51-53 (in Chinese).
- [10] YUN M J, LIG H, WANG M. Design of three-in-one composite compensator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, A28(9): 14-15 (in Chinese).
- [11] WIDERSKI J S, ZAJAC A, KONIECZNY P, *et al*. Q-switched Nd-doped double-clad fiber laser [J]. Opto-Electronics Review, 2005, 13(3): 187-191.
- [12] CHERNKOV S V, ZHU Y, TAYLOR J R, *et al*. Supercontinuum self-Q-switched Ytterbium fiber laser [J]. Opt Lett, 1997, 22(5): 298-300.
- [13] ZENG H F, XIAO F H. The development of Yb-doped double-clad fiber laser and its application [J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 438-442 (in Chinese).
- [14] MA H Q, ZHAO W, ZHANG W, *et al*. Wavelength-tunable passively mode-locked fiber lasers [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 289-291 (in Chinese).
- [15] CHEN Z J, GRUDNIN A B, PORTA J *et al*. Enhanced Q-Switching in double-clad fiber lasers [J]. Opt Lett, 1998, 23(6): 454-456.
- [16] ALVAREZ-CHANE JA, OFFERHAUS L, NILSSON J *et al*. High-energy high-power ytterbium-doped Q-switched fiber laser [J]. Opt Lett, 2000, 25(1): 37-39.
- [17] CHEN Z J, GRUDNIN A B, PORTA J *et al*. Enhanced Q-switching in double-clad fiber lasers [J]. Opt Lett, 1998, 23(6): 454-456.
- [18] LIU F Y, FAN Y X, WANG H J *et al*. Experimental study of cladding pumped Q-switched fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(12): 1057-1060 (in Chinese).
- [19] ZHANG Z X, FENG H G, YU X D, *et al*. Distributed optical fiber Raman photonic sensor system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 1999, 2(20): 83-85 (in Chinese).
- [20] XIE Ch X, LIU F Y, ZHANG Sh M, *et al*. Self-Q-switched and self-mode-locked erbium/Ytterbium co-doped fiber laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(4): 485-488 (in Chinese).
- [21] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics third edition & applications of nonlinear fiber optics [M]. Beijing: Publishing House of Electrical Industry, 2002: 223-237 (in Chinese).

(上接第 46 页)