

文章编号: 0258-7025(2001)04-0310-03

# 基于 SBS 过程自调 $Q$ 掺铒光纤激光器的研究<sup>\*</sup>

吕福云<sup>1</sup> 翟爱亭<sup>1</sup> 樊亚仙<sup>1</sup> 郭曙光<sup>1</sup> 吕可诚<sup>1</sup> 柳贺良<sup>2</sup> 马宁<sup>2</sup> 张颖<sup>2</sup> 丁镭<sup>2</sup> 袁树忠<sup>2</sup>

(南开大学<sup>1</sup> 物理科学学院; 现代光学研究所 天津 300071)

**提要** 利用单模光纤的非线性效应——背向受激布里渊散射(BSBS)和光纤光栅的选频特性,用掺铒单模光纤作增益介质,采用半导体激光器连续抽运方式,研究了自调  $Q$  光纤激光器的运转情况,得到了稳定的光脉冲输出。脉冲宽度(FWHM)约为 2.2 ns,重复频率为 64.5 MHz。

**关键词** 光纤激光器,受激布里渊散射,自调  $Q$

中图分类号 TN 248.1; O 437.2 文献标识码 A

## Study on Self- $Q$ -switched Er-doped Fiber Laser Based on SBS

LÜ Fu-yun<sup>1</sup> ZHAI Ai-ting<sup>1</sup> FAN Ya-xian<sup>1</sup> GUO Shu-guang<sup>1</sup> LÜ Ke-cheng<sup>1</sup>

LIU He-liang<sup>2</sup> MA Ning<sup>2</sup> ZHANG Ying<sup>2</sup> DING Lei<sup>2</sup> YUAN Shu-zhong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Physics, <sup>2</sup>Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

**Abstract** Self- $Q$ -switched Er-doped fiber laser has been studied in this paper. Er-doped fiber is applied as gain medium, which is pumped by CW 980 nm LD. A fiber grating is used as the wavelength selector and cavity reflector. The stable self- $Q$ -switched laser output is realized based on the nonlinearity of SM fiber—stimulated Brillouin scattering. The repetition rate about 64.5 MHz, and the full width at half maximum(FWHM) about 2.2 ns are obtained.

**Key words** fiber laser, stimulated Brillouin backscattering, self- $Q$ -switched

光纤激光器效率高、阈值低、线宽窄、可调谐、便于集成,因此受到普遍关注。光纤脉冲激光器作为新型光源在激光测距、光通讯及光传感等领域有广阔的应用前景。声光  $Q$  开关、电光  $Q$  开关、光纤马赫-陈德尔干涉仪等主动方式实现调  $Q$  激光运转以及各种被动调  $Q$  的方案已有文献报道,光脉冲宽度可从几微秒到几十纳秒,重复频率从几赫到几兆赫。理论和实验证明,光脉冲宽度与腔内光子寿命有关,脉宽与腔长成正比。因此,要想压窄脉宽就应该减少增益光纤长度,但是,这势必降低腔内储存的能量,从而降低脉冲峰值功率;如果用增加铒离子掺杂浓度来补救,就可能带来因粒子数聚集而造成寿命猝灭的问题。

最近,国外报道<sup>[1,2]</sup>了一种新的调  $Q$  机制,用光纤的背向受激布里渊散射(BSBS),在掺铒光纤激光器中偶尔可以观察到不稳定的纳秒量级的自调  $Q$

光脉冲。本文报道用 980 nm 连续输出激光二极管(LD)抽运掺铒光纤,光纤光栅作为波长选择器,利用一段普通单模通信光纤的 BSBS,未加任何主动器件即可实现自调  $Q$  光纤激光运转。该激光器可以稳定输出序列脉冲,重复频率 64.5 MHz。重复频率随腔长不同略有改变,脉冲宽度可达 2.2 ns,平均功率达 20.2 mW。

## 1 实验装置

实验装置如图 1 所示。激光器由 LD 抽运源 980/1550 波分复用器(WDM),掺铒光纤和一段单模光纤组成。用作抽运源的 980 nm 半导体激光器,尾纤最大输出功率为 88.0 mW,经 WDM 耦合到掺铒光纤中。掺铒光纤的数值孔径为 0.21。考虑到掺铒光纤的增益特性与光纤的长度、掺杂浓度、抽运光功率以及输出耦合比等因素,本实验选用了长度为 2.80 m 的掺铒光纤。光纤光栅的中心反射波长为 1548 nm,反射率为 90%,半宽度为 0.2 nm。实验中所用单模光纤是普通的通讯光纤,单模光纤另一端为输出端,输出端的端面与轴线垂直,所以端面有

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(No. 69977012)和天津市自然科学基金(No. 99380101)资助项目。

收稿日期 2000-01-17; 收到修改稿日期 2000-02-28

4% 的菲涅耳反射。用带宽 2.0 GHz 的快速 HTP75 InGaAs 光电探测器和带宽为 500 MHz 的示波器

(HP54616B) 观测脉冲输出。

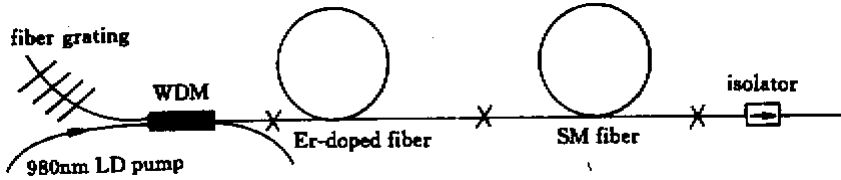


图 1 自调 Q 掺铒光纤激光器示意图

Fig.1 Experimental setup of the self-Q-switched Er-doped fiber laser

## 2 实验原理

图 1 实验装置中,产生光脉冲的机理是利用单模光纤中的 SBS。对于 SBS 过程,可以经典地描述为抽运波、斯托克斯波和声波之间的参量相互作用。常温下,光纤介质中由于大量质点的统计热运动,将产生频率为  $\nu_A$  的非常微弱的自发弹性超声波。若将频率为  $\nu_p$  的激光入射到光纤中,光波电矢量引起介质的电致伸缩,使介质中的自发超声波得到雪崩式的相干放大,即产生很强的感应声波,引起光纤介质折射率的周期性调制,起到了“折射率衍射光栅”的作用。当光波通过“折射率衍射光栅”时,产生布拉格衍射散射光即受激布里渊散射。

可以证明<sup>[3]</sup>单模光纤中的 SBS 过程为 BSBS 过程。从量子力学观点出发,SBS 过程可以看作是一个抽运光子的湮灭,同时产生一个斯托克斯光子和一个声频声子。多普勒位移与声速  $V_A$  有关,由于在散射过程中能量和动量必须守恒,散射光产生的频率下移满足

$$\begin{cases} \omega_A = \omega_p - \omega_s \\ \vec{K}_A = \vec{K}_p - \vec{K}_s \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\omega_A$ ,  $\omega_p$ ,  $\omega_s$  分别为超声波、抽运波、衍射波(斯托克斯波)的角频率; $\vec{K}_A$ ,  $\vec{K}_p$ ,  $\vec{K}_s$  分别为相应的波矢量。设  $\theta$  为  $\vec{K}_p$  和  $\vec{K}_s$  之间的夹角,可以证明,声波角频率

$$\omega_A = |\vec{K}_A| V_A = 2V_A |\vec{K}_p| \sin(\theta/2) \quad (2)$$

显然  $\theta = 0$  时,  $\omega_A$  的值为 0;  $\theta = \pi$  时,  $\omega_A$  的值最大。所以光纤中仅存在背向 SBS,基本上不存在前向 SBS。并且,布里渊频移可以由下式确定

$$f_B = \omega_A/2\pi = 2nV_A/\lambda_p \quad (3)$$

式中  $\lambda_p$  为抽运波长。一般  $f_B$  为十几个吉赫。例如,设石英光纤中的声速  $V_A = 5.95$  km/s,  $n = 1.45$ ,对于 1550 nm 的抽运光波,  $f_B = 11.1$  GHz。所以,抽运光子、散射光子和超声声子参量相互作用的声子可以

看成是声学声子。这种 BSBS 过程中形成的超声光栅比声光 Q 开关的超声光栅声频率至少高出一个数量级。

在连续光抽运下,SBS 的阈值可以表示为<sup>[3]</sup>

$$P_{th} = 21A_{eff}/g_B L_{eff} \quad (4)$$

式中  $g_B$  为布里渊散射增益系数,几乎与抽运波长无关,  $L_{eff}$  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。当将单模光纤置于谐振腔内时,由于谐振腔提供了反馈,布里渊散射的阈值可以大大降低。根据不同耦合情况(4)式中的系数可以降低为 0.1 ~ 1<sup>[3]</sup>。在图 1 所示的装置中,用连续 980 nm 半导体激光抽运,将铒离子的基态粒子抽运到激光上能级上,产生粒子数反转分布,由光纤光栅和光纤焊点间的反射构成谐振腔,使 SBS 阈值大大降低。一旦 1550 nm 的光波强度超过 SBS 的阈值,就会产生 BSBS 过程。由于入射光子与声子的相互作用,入射光子湮灭,产生布拉格衍射的背向散射光波。这种衍射光栅是由入射光波电矢量建立起来的。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,所以会在腔内产生布里渊散射光的弛豫振荡脉冲,脉冲半宽约为 1 ns。当腔参数合适时,会产生稳定的自调 Q 光脉冲输出。

## 3 实验结果及分析

实验中,固定抽运功率为 88.0 mW(经 WDM 后的进纤功率为 75.0 mW)。改变单模光纤长度,观测输出激光特性。发现当单模光纤分别为 5 m, 10 m, 40 m 时,随着光纤增长,输出平均功率增大,但是一直为连续激光输出。只有加上微扰时,在示波器上才可看到无规则的随机脉动,宽度为纳秒量级。当光纤长度增大到 4 km 乃至 25 km 时,连续输出功率减小,也未观察到脉冲输出。

当单模光纤长度为 1.56 m 时,观察到稳定的自调 Q 脉冲输出,脉宽(FWHM)为 2.2 ns,重复频率为

64.5 MHz,平均功率为20.2 mW,如图2所示。这种情况下,用MS9001B1光谱仪测量到的激光谱宽为0.3 nm,如图3所示。减短单模光纤长度至1.36 m时,光脉冲主峰稍有降低,次峰增大,出现了明显的双峰脉冲,如图4(a)所示。当单模光纤长度继续减至1.26 m时,脉冲周期几乎减小到原脉冲周期的三分之一,如图4(b)所示。这些不同频率(或周期)的脉冲相当稳定。在以上三种情况下,激光器都可稳定工作。特别是单模光纤长度为1.56 m时,激光器连续工作4 h以上,不作任何调整,光脉冲宽度及幅度未观察到明显变化,并且重复性极好。以上实验结果表明当抽运功率一定时,单模光纤长度是形成自调Q脉冲的关键因素之一。

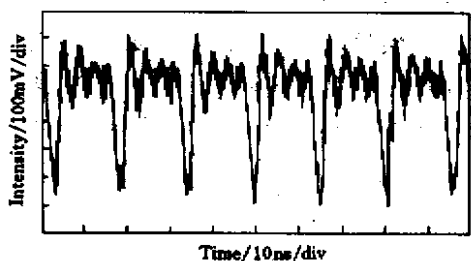


图2 单模光纤长为1.56 m时的脉冲输出

Fig.2 Output pulse train with the SM fiber of 1.56 m

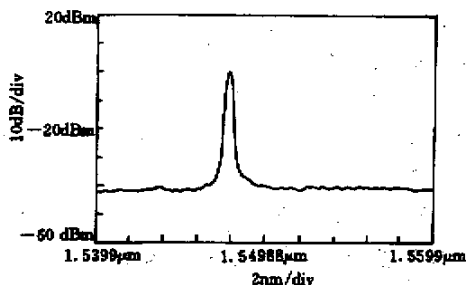


图3 单模光纤长为1.56 m时的激光光谱

Fig.3 Laser spectrum with the SM fiber of 1.56 m

实验中,由于光纤焊点具有反射,光纤光栅的峰值反射率为90%,并且选频特性好,故存在F-P腔。腔内随机光脉冲可以得到有效的受激放大,并实现振荡。因此,很容易超过单模光纤SBS阈值。布里渊散射产生的斯托克斯线在腔内可以多次通过增益介质,被受激放大。当单模光纤选用1.56 m时(铒光纤2.80 m),受激增益放大的布里渊散射光波相干叠加形成了稳定的自调Q脉冲,脉冲宽度由SBS机理决定。

当单模光纤长度减少时,实际上改变了腔内的

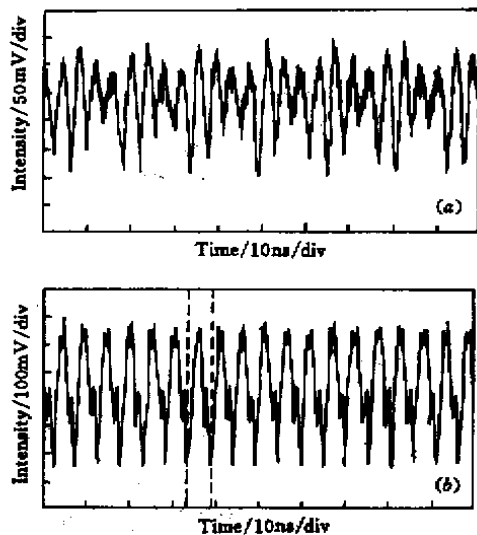


图4 单模光纤的脉冲输出

Fig.4 Output pulse train with the SM fiber  
(a) 1.36 m;(b) 1.26 m

两个正交偏振模的光子寿命,使图2中光脉冲的次峰增大到可以与主峰相比拟,因此得到倍频光脉冲输出。用光子寿命可变的正交偏振激光耦合模理论可以很好地解释掺铒光纤激光器的自脉冲行为,适当调控两个正交偏振模可以得到稳定的微秒量级的1倍周期和2倍周期的光脉冲输出。利用SBS机理,在腔内不加任何主动器件情况下,得到稳定的纳秒量级光脉冲输出还未见报道。我们认为这是在SBS过程中的自脉动行为造成的,也可以用正交偏振的耦合模理论得到合理解释<sup>[4,5]</sup>。

当单模光纤的长度为几十米甚至几千米长时,由于光纤太长,SBS中的斯托克斯线之间无固定的相位关系,不能形成相干叠加,故得不到SBS的脉冲输出。

#### 参 考 文 献

- 1 S. V. Chernikov, Y. Zhu, J. R. Taylor *et al.*. Supercontinuum self-Q-switched ytterbium fiber laser. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(5) 298~300
- 2 Z. J. Chen, A. B. Grudinin, J. Porta *et al.*. Enhanced Q-switching in double-clad fiber lasers. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(6) 454~456
- 3 G. P. Agrawal, Translated by Hu Guojiang *et al.*. Nonlinear Fiber Optics. Translated and reprinted by Tianjin University Press, 1991 (in Chinese)
- 4 Huang Zhijian, Sunjunqiang, Huang Dexiu. Study on self-pulsing behavior of erbium-doped fiber laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(6) 767~772 (in Chinese)
- 5 Sun Junqiang, Huang Zhijian, Huang Dexiu. Optical modulators using semiconductor waveguide in fiber ring lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(1) 56~61 (in Chinese)