

文章编号: 0258-7025(2010)08-1929-05

主动调 Q 掺镱光纤激光器中放大自发辐射影响的研究

陈晓东^{1,2} 孙青^{1,3} 赵佳生¹ 冯素娟¹ 毛庆和¹

¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031
² 解放军电子工程学院光电系脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037
³ 中国计量科学研究院光学与激光计量研究所, 北京 100013

摘要 实验研究了主动调 Q 掺镱光纤激光器(YDFL)中放大自发辐射(ASE)对调 Q 脉冲形成和演化的影响。结果表明,尾纤型声光调制器(AOM)打开过快和掺镱光纤(YDF)增益瞬态特性间的综合相互作用结果,使得注入至腔内的初始宽带 ASE 形成功率波动,并在腔内循环放大,导致输出脉冲呈多峰结构;而注入的宽带 ASE 因功率过高会导致 YDF 的增益自饱和效应,制约高增益的获取,使激光器难以获得调 Q 激光脉冲,输出脉冲主要为调 Q 的 ASE 脉冲;通过引入光纤布拉格光栅(FBG),可以有效抑制 YDF 中因 ASE 产生的增益饱和效应,YDF 工作在高增益状态,有利于获得低阈值、窄脉宽和高峰值功率的调 Q 激光脉冲。引入 FBG 后,在 160 mW 抽运时,实验测得的调 Q 激光脉冲峰值功率和脉宽分别为 40.7 W 和 30 ns。

关键词 激光器;掺镱光纤;主动调 Q;放大自发辐射;线形腔

中图分类号 TN253;TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.1929

Study on Influences of Amplified Spontaneous Emission on Actively Q-Switched Ytterbium-Doped Fiber Laser

Chen Xiaodong^{1,2} Sun Qing^{1,3} Zhao Jiasheng¹ Feng Sujuan¹ Mao Qinghe¹

¹ Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials,
Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Optoelectronics Department,
Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China
³ Division of Metrology in Optics and Laser, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

Abstract The influences of amplified spontaneous emission (ASE) on the formation and evolution of pulses in actively Q-switched ytterbium-doped fiber laser (YDFL) are investigated experimentally. The experimental results show that the combined effect between the short switching time and the gain transient property of ytterbium-doped fiber (YDF) causes the initial ASE power fluctuation, which then forms the multi-peak structure in the output pulse after having been circulated and amplified in the cavity. Meanwhile, the high-level broadband ASE may give rise to the gain self-saturation effect in the YDF, making it difficult to form Q-switched laser pulses for the fiber laser. The output pulses may be eventually Q-switched ASE pulses, giving lower peak-power and larger pulse duration. By using fiber Bragg grating (FBG) to suppress the gain self-saturation effect, the gain supplied by the YDF can be greatly enhanced, making it easy for the laser to achieve the Q-switched laser pulse with low threshold, small duration, and high peak-power. When the YDFL with FBG is pumped with 160 mW, the Q-switched laser pulses with the peak power of 40.7 W and the duration of 30 ns are achieved.

Key words lasers; ytterbium-doped fiber; active Q-switch; amplified spontaneous emission; linear cavity

收稿日期: 2009-11-09; 收到修改稿日期: 2010-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(60677050)和国家 973 计划(2007CB936603)资助课题。

作者简介: 陈晓东(1979—),男,博士研究生,讲师,主要从事光纤激光器和空芯光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: fiber_optics@aiofm.ac.cn

导师简介: 毛庆和(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事纤维光学、激光物理与激光器件等方面的研究。

E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

调 Q 激光脉冲具有峰值功率高、单脉冲能量大和线宽窄等优点,在激光测距、加工、医疗和非线性光学等领域应用广泛^[1~3]。随着光调制器插入损耗的降低,主动调 Q 光纤激光器近年来发展迅速,已实现了双包层和单模光纤激光器的调 Q 运转^[4~8]。迄今为止的研究结果表明,调 Q 光纤激光器输出脉冲常呈现多峰分裂结构^[8,9],其成因源于 Q 开关打开过快,导致注入至腔内的放大自发辐射(ASE)因掺杂光纤的动态增益特性形成初始瞬态尖峰,该尖峰在腔内循环过程中,不断地快速耗尽反转粒子,使得输出脉冲呈现多峰结构^[10~12]。事实上,由于玻璃基质的强烈斯塔克效应,稀土掺杂光纤具有比晶体宽得多的吸收和发射带;同时,由于光纤的优良波导特性,掺杂光纤内部任意一点产生的处于光纤数值孔径之内的自发辐射都可沿掺杂光纤低损耗传输,形成大量正反向传输的宽带 ASE。对于调 Q 光纤激光器,这种宽带 ASE 不仅会导致输出脉冲存在多峰结构,而且会消耗大量的反转粒子,特别是会引起掺杂光纤的增益饱和效应^[13],从而影响调 Q 激光脉冲的形成和演化。因此,宽带 ASE 对调 Q 光纤激光器的影响依然值得深入研究。

本文实验研究了 ASE 对掺镱光纤激光器(YDFL)调 Q 脉冲形成过程及输出特性的影响。分别研究了在宽带 ASE,高抽运光功率和在激光腔内引入光纤布拉格光栅(FBG)的情况下,输出调 Q 激光脉冲的特性。

2 实 验

图 1 为实验所用的主动调 Q 掺镱光纤激光器的结构示意图。掺镱光纤(YDF)在 976 nm 处的吸收系数为 528 dB/m,长度为 1.8 m。YDF 由最大输出功率 300 mW,中心波长 975 nm 的激光二极管(LD)抽运,抽运光经波分复用器(WDM)耦合进 YDF,WDM 插入损耗为 0.4 dB。实验所用尾纤型声光调制器(AOM)的中心工作波长为 1064 nm,消

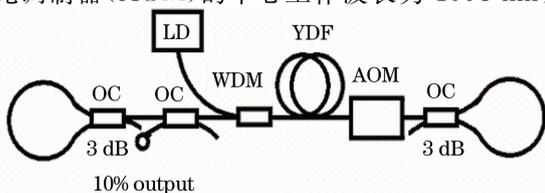


图 1 主动调 Q YDFL 结构示意图

Fig. 1 Configuration of actively Q-switched YDFL.

光比大于 30 dB,插入损耗约 1.5 dB,调制频率和上升沿时间分别在 5~80 kHz 和 10~200 ns 范围内可调,开关打开的持续时间约为 1400 ns。光纤激光器的腔镜为宽带反射镜,由基于 3 dB 耦合器的光纤环镜构成^[14],反射率约为 95%;一个 10:90 的光纤耦合器(OC)10% 端口用于激光输出。采用光谱分析仪(Agilent 86140B)测量激光器的输出光谱,脉冲波形则由高速光电探测器(UltraFast20 SM)后接数字示波器(Agilent MSO8064A)进行探测。

3 结果与讨论

将 AOM 的调制频率和上升沿时间分别设定为 5 kHz 和 10 ns,实验研究了不同抽运光功率下调 Q 的 YDFL 输出行为。图 2(a)为抽运光功率 $P=50$ mW 时示波器上显示的输出脉冲波形,图中横坐标 $t=0$ 为 AOM 打开时刻。由图可见,脉冲建立时间约 750 ns,且输出脉冲的幅度呈现微小波动。当抽运光功率由 50 mW 增加到 100 mW 后,输出脉冲如图 2(b)所示,这时,脉冲建立时间缩短为 250 ns,输出脉冲的幅度微小波动演化为明显的多峰结构,峰与峰之间的间隔为 100 ns,恰好与光在谐振腔内往返一次所需的时间相对应(腔长约为 10 m)。正如文献^[10~12]所述,这种多峰结构调 Q 脉冲的形成与演化过程是,当 AOM 打开时,宽带 ASE 经 AOM 重新注入至 YDF 中,由于 AOM 上升沿时间仅为 10 ns,远小于 YDF 上能级粒子恢复时间,约为微秒量级^[15],所注入的宽带 ASE 引起了 YDF 的增益瞬态响应,在 AOM 打开的瞬间形成一初始 ASE 功率波动(尖峰),该 ASE 尖峰在腔内经多次循环放大后,逐渐演化为等间隔的多峰结构输出脉冲。但是,抽运光功率为 100 mW 时激光器平均输出功率并不高,仅约 320 μ W,且输出光谱[如图 2(b)中插图]与抽运光功率为 50 mW 时的情形类似,没有展现出激光振荡特征,表明 YDFL 并未形成真正的激光振荡。

图 2(c)为抽运光功率增加至 160 mW 时测得的调 Q 脉冲波形。这时,脉冲波形多峰结构更趋明显,脉冲建立时间缩短为 90 ns。比较图 2(a),(b)和(c)可以明显看出,脉冲建立时间随着抽运光功率的增加而缩短。这是因为,随着抽运光功率的增加,YDF 粒子反转度提高,导致腔内循环的 ASE 由 YDF 获得的增益增大;尽管抽运光功率的增加也会使初始注入 ASE 功率提高,但抽运光功率较高时,因 ASE 的自饱和效应^[13],初始 ASE 功率基本不

变,这样,增加抽运光功率提高 YDF 粒子反转度的结果是,初始注入的 ASE 经腔内循环放大达到足以消耗 YDF 反转粒子所需的次数随抽运光功率的增加而减少,即脉冲建立时间随抽运光功率增加而缩短。由图 2(a),(b)和(c)还可以看出,随着抽运光功率的增加,脉冲前沿的尖峰个数减少且幅度迅速增加,而脉冲后沿尖峰个数较多,且与抽运光功率大小无关。原因在于随着抽运光功率的增加,YDF 能提供更高的增益,导致脉冲前沿尖峰个数减少,而因

YDF 对宽带 ASE 的再吸收过程^[16],上能级粒子数减少速度缓慢,导致脉冲后沿尖峰个数较多。图 2(c)中插图给出了抽运光功率为 160 mW 时激光器输出光谱,图中依然没有展现出激光振荡特征。考虑到激光器的腔损耗仅约 4.5 dB,没有出现激光振荡的原因是,初始注入的宽带 ASE 功率过高,导致 YDF 处于深度饱和和工作状态,增益极低,不能补偿腔损耗,限制了调 Q 激光脉冲的形成,输出脉冲为调 Q 的 ASE 脉冲。

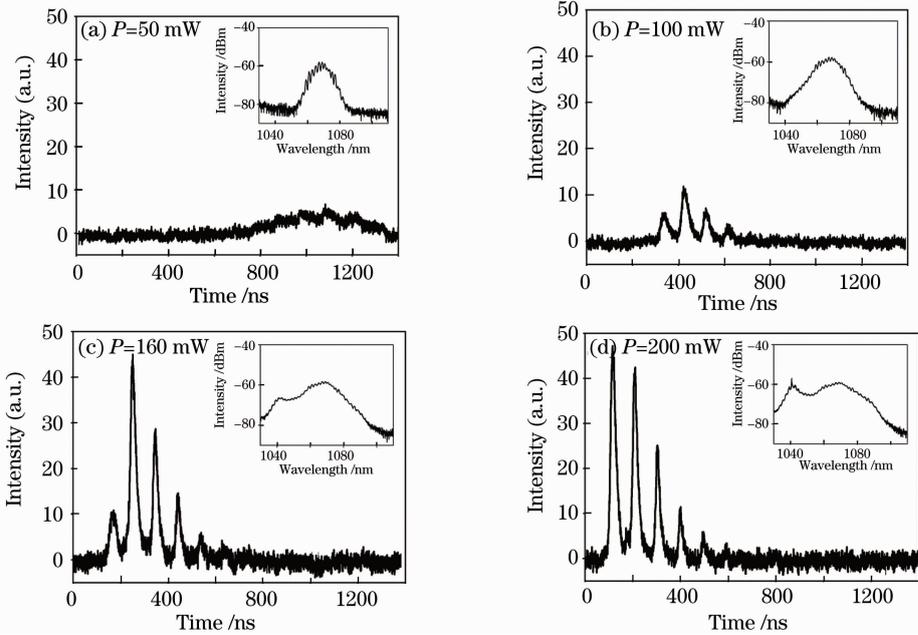


图 2 抽运光功率不同时调 Q YDFL 的输出脉冲,AOM 上升沿为 10 ns。 $t=0$ 为 AOM 打开时刻,插图为激光器输出光谱
Fig. 2 Measured output pulse shape with AOM rise-time of 10 ns at different pump powers. $t=0$ is the moment when the AOM starts to open. Insets are measured output spectra

图 2(d)为抽运光功率进一步增加至 200 mW 时实验测得的调 Q 脉冲波形和输出光谱。正如预期,脉冲建立时间进一步缩短为 30 ns,并且,由于 YDF 提供给初始注入的宽带 ASE 的增益更高,脉冲多峰结构的调制深度相比于图 2(a),(b)和(c)更大。不仅如此,由测得的输出光谱可见,在 1038 nm 处出现了振荡峰,表明 YDF 提供的增益已足以补偿腔损耗,形成了激光振荡。但是,在输出光谱中,振荡峰叠加在较高的 ASE 背景上,表明输出脉冲包含了大量的 ASE 成分,正因为如此,激光器输出功率依然难以提高。实验测得,200 mW 抽运时,平均输出功率仅为 870 μ W,并且继续增加抽运光功率,激光器输出功率并未随之线性增大。

ASE 功率过高导致了 YDF 的增益饱和,使得激光器难以获得调 Q 激光振荡,输出脉冲为调 Q 的 ASE 脉冲。为消除这种宽带 ASE 对调 Q 光纤激光器的不利影响,将图 1 所示的谐振腔右侧 Sagnac 光纤环镜替换为 FBG(见图 3),实验中所用 FBG 的中心波长、半峰全宽和反射率分别为 1068.0 nm,0.25 nm 和 90%。由于该 FBG 带宽窄,故可起到对宽带 ASE 的滤波作用。并且在掺镜光纤长度不变、抽运光功率相同情况下,为更好地比较两种结构中掺镜

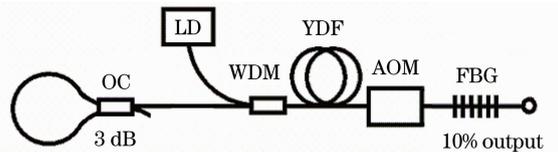


图 3 引入 FBG 后主动调 Q YDFL 结构示意图
Fig. 3 Configuration of actively Q-switched YDFL with FBG

实验结果表明,AOM 上升沿时间短与 YDF 瞬态增益特性间综合相互作用的结果造成了输出脉冲的多峰结构,Q 开关打开后注入至 YDF 的初始宽带

光纤的增益自饱和效应,移去了用作激光输出的 OC,使得两种结构的腔损耗更接近,调 Q 脉冲则由 FBG 另一端直接输出。

图 4(a),(b)为引入 FBG 后激光器在不同抽运光功率 P 下实验测得的脉冲波形。与腔内无 FBG 相比,输出脉冲也存在多峰结构,但是,抽运光功率为 100 mW 和 160 mW 时,脉冲建立时间分别由无 FBG 时的 250 ns 和 90 ns 增加至 450 ns 和 190 ns。

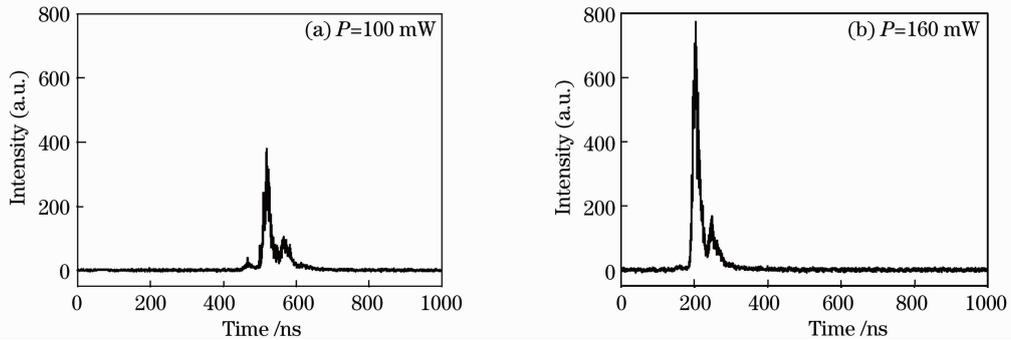


图 4 引入 FBG 后激光器的输出脉冲,AOM 上升沿为 10 ns

Fig. 4 Measured output pulse shape for the laser with FBG, and AOM rise-time is 10 ns

顺便指出,引入 FBG 并移去 OC 后,激光器的抽运方式由原来的反向抽运变为同向抽运,抽运方式的改变对激光器的输出特性有影响,如激光器振荡阈值等,但是,当抽运光功率为 100 mW 和 160 mW 时,激光器已实现激光振荡,由于 YDF 的均匀加宽特性导致增益钳制,抽运方式的不同对输出脉冲波形的影响没有本质差别。另外,输出脉冲的多峰结构可通过调节 AOM 上升沿时间消除,图 5(a)为抽运光功率 200 mW,AOM 上升沿 200 ns 时,未引入 FBG 的激光

这是由于引入 FBG 后,只有 FBG 反射带宽内的 ASE 才能输入至腔内并循环,尽管此时 YDF 能够提供高增益,但因初始 ASE 功率过低,需经多次循环放大后才能达到建立输出脉冲的水平,使得引入 FBG 后脉冲建立时间变长。不仅如此,因 YDF 提供的增益高,脉冲一旦开始建立,上能级粒子很快被耗尽,导致输出脉冲宽度变窄。

器输出脉冲,图 5(b)为抽运光功率 160 mW,AOM 上升沿 200 ns 时,引入 FBG 后激光器的输出脉冲。由图可见,输出脉冲中并无多峰结构,引入 FBG 后脉冲宽度约为 30 ns,远小于腔内无 FBG 时的 126 ns。但是,增加 AOM 上升沿时间导致了 Q 开关打开过程延长,激光器腔损耗下降的速度变缓,限制了初始注入的 ASE 功率的增加速度,脉冲建立时间分别由上升沿时间 10 ns 时的 30 ns 和 190 ns 增加到上升沿时间 200 ns 时的 170 ns 和 400 ns。

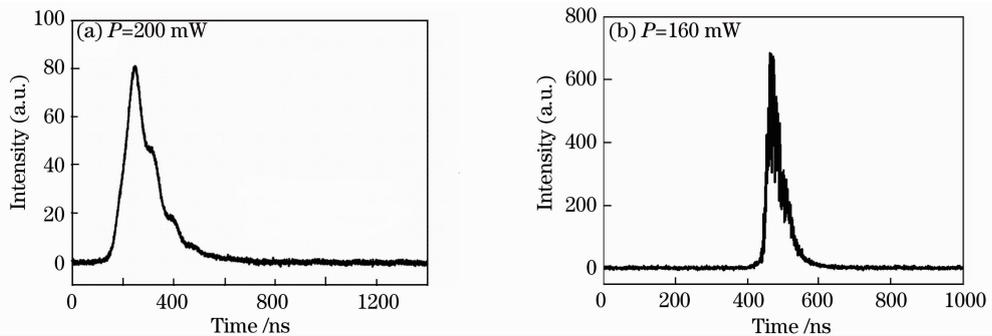


图 5 AOM 上升沿为 200 ns 时激光器的输出脉冲。(a)未引入 FBG;(b)引入 FBG

Fig. 5 Measured output pulse shape for the laser with AOM rise-time of 200 ns (a) without FBG; (b) with FBG

图 6 给出了调 Q 光纤激光器平均输出功率随抽运光功率的变化关系。由图可见,激光器振荡阈值为 35 mW,远低于腔内无 FBG 时的 200 mW,随着抽运光功率的增加,输出功率呈近似线性增大;当抽运光功率为 160 mW 时,平均输出功率、峰值功率和单脉

冲能量分别达到 6.1 mW,40.7 W 和 1.22 μ J,输出信噪比(见插图)达 50 dB。这表明,激光器输出已为调 Q 激光脉冲。

值得指出的是,在图 3 中采用不同中心波长的 FBG 进行实验比较,发现激光器输出特性并无明显

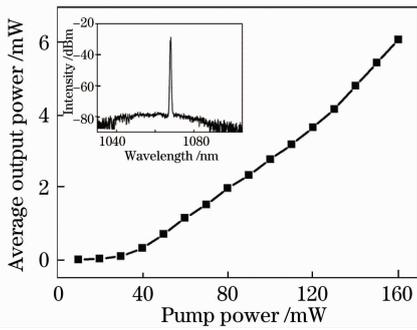


图 6 引入 FBG 后, 激光器平均输出功率与抽运光功率之间的关系。插图为抽运光功率 160 mW 时激光器的输出光谱

Fig. 6 Measured average output power as a function of the pump power for the laser with FBG. Inset is output spectrum for the pump power of 160 mW

变化; 此外, 保留图 1 结构中的 OC, 而将其右侧 Sagnac 光纤环境替换为反射率 99% 的 FBG 进行实验时发现, 虽然激光器输出功率发生变化, 但其输出特性与图 3 结构下的结果基本相近, 由此可见, 在腔内引入 FBG 可抑制 YDF 因宽带 ASE 造成的增益自饱和效应, 从而改善调 Q 激光器的阈值、脉宽及输出功率等特性。

4 结 论

实验研究了主动调 Q 掺镱光纤激光器的输出特性, 结果表明, AOM 打开过快和 YDF 增益瞬态特性间的综合相互作用, 导致初始注入 ASE 形成初始瞬态尖峰, 该尖峰在腔内循环并不断快速耗尽反转粒子, 使得输出脉冲呈现多峰结构, 并且脉冲建立时间随抽运光功率的增加而缩短。不仅如此, 大量的宽带 ASE 在 AOM 打开时作为输入信号重新注入至 YDF 中, 导致 YDF 因 ASE 过高产生的增益自饱和效应, 使激光器难以获得调 Q 激光脉冲, 输出脉冲为峰值功率低、脉宽大的调 Q ASE 脉冲; 在高抽运光功率情况下, 尽管可获得激光振荡, 但输出脉冲依然包含大量宽带 ASE 成分。在激光腔内引入 FBG 后, 有效抑制了 ASE 的增益自饱和效应, 使得 YDF 能提供高增益, 激光器输出为低阈值、窄脉宽和高峰值功率的调 Q 激光脉冲。实验测得 160 mW 抽运时, 激光器平均输出功率为 6.1 mW, 脉冲宽度为 30 ns, 相应的脉冲峰值功率和单脉冲能量分别为 40.7 W 和 1.22 μ J。

参 考 文 献

- 1 C. C. Renaud, R. J. Selvas-Aguilar, C. J. Nilsson *et al.*. Compact high-energy Q-switched cladding-pumped fiber laser with a tuning range over 40 nm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8): 976~978
- 2 J. A. Alvarez-Chavez, H. L. Offerhaus, C. J. Nilsson *et al.*. High-energy, high power ytterbium-doped Q-switched fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 37~39
- 3 C. C. Renaud, H. L. Offerhaus, J. A. Alvarez-Chavez *et al.*. Characteristics of Q-switched cladding-pumped ytterbium-doped fiber laser with different high energy fiber designs [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(2): 199~206
- 4 H. M. Zhao, Q. H. Lou, J. Zhou *et al.*. High-repetition-rate MHz acousto-optic switched fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(12): 1009~1012
- 5 Xing Lei, Feng Xue, Zhang Lei *et al.*. Stimulated Brillouin scattering hybrid Q-switched Er-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 338~342
邢磊, 冯雪, 张磊等. 受激布里渊散射被动混合调 Q 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 338~342
- 6 Gao Cunxiao, Zhao Wei, Wang Yishan *et al.*. Actively Q-switched Yb³⁺-doped all fiber ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 651~654
高存孝, 赵卫, 王屹山等. 掺 Yb³⁺ 全光纤环形腔主动调 Q 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 651~654
- 7 Bo Peng, Qiang Liu, Mali Gong *et al.*. Acousto-optic Q-switched cladding-pumped ytterbium-doped fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 415~417
- 8 S. Adachi, Y. Koyamada. Analysis and design of Q-switched erbium-doped fiber lasers and their application to OTDR [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(8): 1506~1511
- 9 P. Myslinski, J. Chrostowski, J. A. K. Koningstein *et al.*. Self-mode locking in a Q-switched erbium-doped fiber laser [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(3): 286~290
- 10 Y. Wang, C. Q. Xu. Understanding multipeak phenomena in actively Q-switched fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(10): 1060~1062
- 11 Y. Wang, C. Q. Xu. Switching-induced perturbation and influence on actively Q-switched fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(11): 1583~1596
- 12 Y. Wang, A. Martinez-Rios, Hong Po. Analysis of a Q-switched ytterbium-doped double-clad fiber laser with simultaneous mode locking [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **224**(1-3): 113~123
- 13 E. Desurvire, D. Bayart, B. Desthieux *et al.*. Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Devices and System Developments [M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 2002
- 14 Feng Sujuan, Shang Liang, Mao Qinghe. Continuously adjusting the reflectivity of fiber loop mirror using a polarization controller [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(8): 4677~4685
冯素娟, 尚亮, 毛庆和. 利用偏振控制器连续调节光纤环镜的反射率[J]. *物理学报*, 2007, **56**(8): 4677~4685
- 15 C. R. Giles, E. Desurvire, J. R. Simpson. Transient gain and cross talk in erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(16): 880~882
- 16 Qinghe Mao, John W. Y. Lit. Optical bistability in an L-band dual-wavelength erbium-doped fiber laser with overlapping cavities [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(9): 1252~1254