

文章编号: 0258-7025(2009)06-1347-05

# 双波长环形腔掺铒光纤激光器输出的稳定性

徐 攀 胡正良\* 马丽娜 孟 洲 胡永明

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 使用掺铒光纤平均反转粒子数模型推导了双波长激光器平衡振荡需满足的条件,并据此设计实验系统,对抽运功率、模式损耗以及波长间隔对输出功率的影响进行了实验研究。结果表明,可通过调节腔内损耗谱实现掺铒光纤环形腔内多波长激光输出,双模平衡振荡条件在远离阈值点情况下成立;可变衰减器的稳定性对双波长平衡的影响极大,允许的偏离值小于 0.4 dB;而起振波长的偏离对双波长平衡的影响较小,大于 1 nm 的波长偏离才会导致平衡破坏;掺铒光纤的非均匀加宽效应允许平衡时损耗在一定范围内波动,这有助于提高激光器的输出稳定性,30 min 内 1546 nm 和 1556 nm 双波长的功率波动小于 0.5 dB。

**关键词** 激光器;掺铒光纤激光器;模式竞争;双波长;可变光衰减器

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1347

## Output Power Stability of Dual-Wavelength Erbium-Doped Fiber Ring Laser

Xu Pan Hu Zhengliang Ma Lina Meng Zhou Hu Yongming

(School of Optoelectronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** The condition for equilibrium oscillation of dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser is derived from the average inversion level model. According to this condition, a novel experiment setup is built to measure the influence of pump power, mode losses and wavelength interval on the output power. Experiment results show that the multi-wavelength oscillation in erbium-doped fiber ring laser can be achieved by adjusting the loss spectrum of laser cavity, and the condition for equilibrium oscillation is valid when pump power is far away from the threshold point. The stability of variable optical attenuator has so great influence on the balance of dual-wavelength whose acceptable loss bias is less than 0.4 dB. However the stability of central wavelength of fiber Bragg grating (FBG) has little influence on the balance of dual-wavelength which won't be broken by the wavelength bias less than 1 nm. Inhomogeneous effect of erbium-doped fiber allows tiny perturbation of the loss in state of equilibrium, which is helpful to improve the stability of the laser output power, and the power fluctuation of 1546 nm and 1556 nm over 30 minutes is less than 0.5 dB.

**Key words** lasers; erbium-doped fiber laser; mode competition; dual-wavelength; variable optical attenuator

## 1 引 言

多波长掺铒光纤激光器在密集波分复用、光传感、光谱测量及微波产生等领域已获得了广泛应用<sup>[1~9]</sup>。掺铒光纤在室温下具有较宽的均匀增益加宽线宽,导致了严重的模式竞争效应,限制了多波长

掺铒光纤激光器在室温下的稳定工作。利用频移反馈<sup>[2]</sup>、四波混频<sup>[3, 4]</sup>、偏振烧孔<sup>[5, 6]</sup>、空间烧孔<sup>[7]</sup>、增益均衡<sup>[8, 9]</sup>等方法抑制模式竞争成为近年来研究的热点。其中,使用增益均衡方式既不需要引入移频器,也不需要引入空间烧孔、偏振烧孔以及非线性效

收稿日期: 2008-08-25; 收到修改稿日期: 2008-10-08

基金项目: 新世纪优秀人才(NCET-06-0925)资助项目。

作者简介: 徐 攀(1984-),男,硕士研究生,主要从事多波长光纤激光器的研究。E-mail: hbpanpan@gmail.com

导师简介: 胡永明(1960-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤水听器方面的研究。E-mail: sdss@21cn.com

\* 通信联系人。E-mail: zheng\_liang\_hu@163.com

应等复杂机制,可在普通环形腔中低成本地实现室温稳定的多波长激光<sup>[1~8,9]</sup>。L. Talaverano 等<sup>[9]</sup>使用调节各波长通道损耗的办法实现了 4 波长出射,但结构较复杂;Y. Liu 等<sup>[8]</sup>使用控制腔内总损耗精细调节增益曲线的办法实现了 2 波长及 3 波长出射,波长间隔为 1.28 nm 时功率波动小于 0.1 dB,结构简单,但腔内总损耗较高,且无法独立控制每个波长的损耗。他们都没有对普通环形腔中出射多波长的机理进行进一步的理论解释,也未对掺铒光纤均匀加宽模式竞争特性做进一步研究。

本文从理论上推导了双波长激光器稳定振荡需满足的条件。据此设计可实现掺铒光纤增益带宽内任意两个波长出射的系统,而无需保持腔内高的总损耗。对波长间隔、损耗差异对输出功率的影响进行了实验研究,实验结果可帮助进一步理解掺铒光纤模式竞争机制,对确定可调光衰减器(VOA)和光纤布拉格光栅(FBG)的指标也具有参考价值。

## 2 理 论

已有多种模型描述掺铒光纤的增益特性,经典的 Giles 模型可处理放大自发辐射(ASE),被广泛应用于掺铒光纤放大器与激光器的分析中<sup>[10]</sup>。利用 Giles 模型对双波长环形腔激光器进行了建模,并对双波长的模式竞争过程进行了仿真。结果表明,在铒纤的均匀加宽特性下,当起振信号的功率增加时,会导致整个频谱的增益曲线随之下降<sup>[11]</sup>。为实现双波长的同时振荡,它们的损耗需满足一定的关系,本文不考虑 ASE 光及激发态吸收(ESA)的影响,使用平均反转粒子数模型进行分析<sup>[12]</sup>。

相对平均反转粒子数浓度  $\bar{N}_2$  定义为

$$\bar{N}_2 = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{\bar{n}_2(z)}{\bar{n}_1(z)} dz, \quad (1)$$

式中  $\bar{n}_i$  ( $i = 1, 2, t$ ) 分别为上下能级及总掺杂离子线密度。

将铒纤中传输的光在频域上离散化为一系列带宽为  $\Delta\nu_i$ , 中心波长为  $\lambda_i = \frac{c}{\nu_i}$  的窄带波束,则每个波束的铒纤增益系数及增益分别为

$$\bar{g}_k = (\alpha_k + g_k^*) \bar{N}_2 - \alpha_k; \quad (2)$$

$$G_k = (10 \lg e) \bar{g}_k L, \quad (3)$$

式中,  $g_k^*$  和  $\alpha_k$  分别为铒纤的增益谱和吸收谱。

设激光腔内在振荡的两个波长处的损耗分别为  $l_1$  和  $l_2$ , 当两个模式均满足振荡条件时,有

$$G_1 = l_1, G_2 = l_2. \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式,消去  $\bar{N}_2(P_1, P_2)$ , 可得

$$l_2 = l_1 \frac{\alpha_2 + g_2^*}{\alpha_1 + g_1^*} + (10 \lg e) \frac{\alpha_2 + g_2^*}{\alpha_1 + g_1^*} \alpha_1 L - (10 \lg e) \alpha_2 L. \quad (5)$$

(5)式即为双波长平衡振荡时  $l_1$  和  $l_2$  需满足的方程,只和出射波长以及铒纤参数(长度、吸收系数与发射系数)有关。固定模式 1 为 1542.96 nm, 改变模式 2 的波长,画出两个模式损耗与波长间隔的关系如图 1 所示。由图可知,当模式 2 对应 C 波段的任意一个波长时,  $l_1$  和  $l_2$  满足一定的关系就可获得双波长的同时起振。而要使 1540 nm 到 1560 nm 范围内的增益平坦,需要较高的腔内总损耗才能实现。

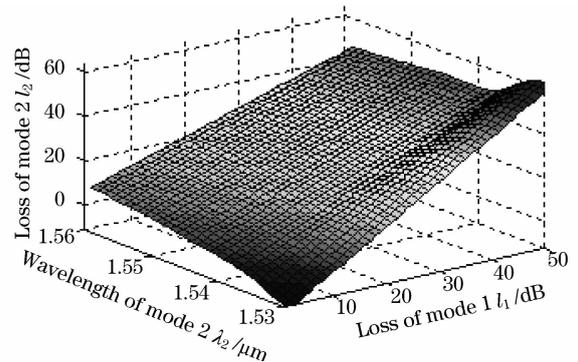


图 1 模式 1 为 1542.96 nm, 平衡振荡时双模损耗与模式 2 波长的关系曲线

Fig. 1 Loss of mode 2 varies with wavelength of mode 2 and loss of mode 1 when wavelength of mode 1 is 1542.96 nm, in state of equilibrium

## 3 实验结果与讨论

激光器由 980 nm 抽运源、波分复用器(WDM)、掺铒光纤(EDF)、环形器、定向耦合器、光纤布拉格光栅(FBG)、电调可变光衰减器(EVOA)、手动可调滤波器(SOTMTF)组成,如图 2 所示。环形器的 2 端口连接分束比为 50 : 50 的光纤定向耦合器的 2 端口,耦合器的 3 端口串联一个 VOA 和波长为 1542.96 nm 的光纤光栅(FBG1),耦合器的 4 端口串接一个 EVOA 和 SOTMTF。SOTMTF 的工作波长为 1530~1570 nm, 3 dB 带宽为 0.288 nm, 插入损耗为 0.94 dB。环形器还可保证激光器的单向运行。EVOA 精度为 0.08 dB, 损耗波动小于 0.1 dB。输出耦合器将环形腔内 50% 的能量向外输出, 剩余能量通过环形腔反馈回铒纤输入端。

调节抽运功率、可变衰减器及手动可调滤波器,

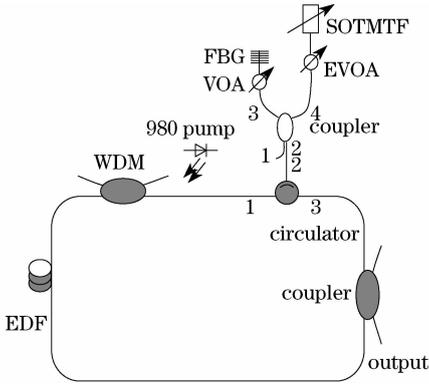


图 2 双波长掺铒环形激光器结构图

Fig. 2 Setup of dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser

使双波长输出稳定均衡,观察在 1540~1560 nm 范围内激光器的输出光谱,结果如图 3 所示。可以看出,双波长激光输出功率比较均衡,功率值相差在 1 dB 以内,边模抑制比大于 55 dB。

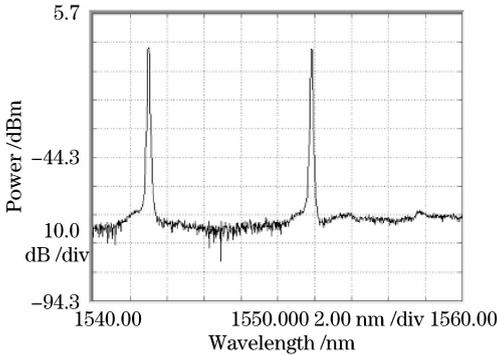


图 3 双波长激光输出光谱

Fig. 3 Output spectrum of dual-wavelength laser

### 3.1 抽运功率对双模功率的影响

定义相对输出功率为

$$\tilde{P}_i = \frac{P_i}{\sum_i P_i}, \quad i = 1, 2, \quad (6)$$

即两个模式输出功率占输出总功率的百分比。

当抽运功率为 75 mW 时,固定两个通道的波长为 1542.96 nm 和 1546.1 nm,调节 EVOA 使双模输出功率均衡。记录双模输出功率随抽运功率变化的情况,结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,1542.96 nm 波长和 1546.1 nm 波长的阈值分别为 32 mW 和 35 mW。当抽运功率远离阈值时,两个波长能稳定振荡。两个波长阈值的差异主要由掺铒光纤的增益特性决定。

由第 2 节得到的双模平衡条件可知,抽运功率对稳态条件并无影响。此结论仅在增益介质处于饱

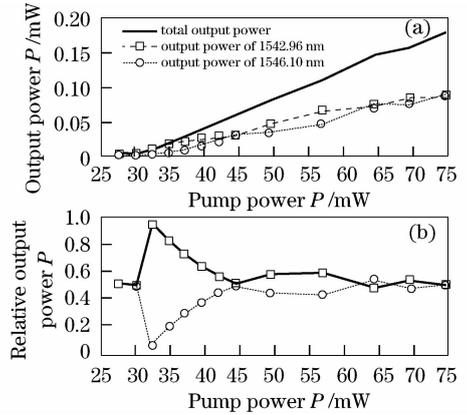


图 4 稳态时双模输出功率随抽运功率的变化

Fig. 4 Dual-wavelength output power against pump power in state of equilibrium

和区时成立。而在阈值点附近,因信号光微弱,增益介质工作在小信号区,此时短波长的净增益要大于长波长,这导致了短波长的阈值也要小于长波长,从而先于长波长起振。

利用远离阈值点时双模平衡条件与抽运功率无关的特性,以下实验均不考虑抽运功率的影响。

### 3.2 通道损耗、波长间隔对双模功率的影响

固定抽运功率为 70.13 mW,调整可调滤波器获得模式 2 的波长为 1546.1 nm,调节 EVOA,测量通道 2 损耗与双模输出功率关系。得到的结果用相对输出功率表示,如图 5(a)所示。调整可调滤波器改变模式 2 的波长为 1555.76 nm,测得在 1555.76 nm 下通道 2 损耗与双模输出功率的关系,如图 5(b)所示。图中数据点为原始数据,线条为平均值。

由图 5 可见,两种情况下双模输出功率均对损耗变化敏感,0.4~0.6 dB 的损耗偏离都会破坏稳定振荡条件,导致其中的一个模式完全抑制另一个模式。大的波长间隔对损耗偏离的敏感程度要小于波长间隔较小时的情况,因此功率分配的波动也小于波长间隔较小的情况。

双模波长间隔也对双模功率有重要影响。从图 1 可知,对任意通道损耗固定的结构,即  $l_1, l_2$  一定,总能在曲面上找到一点对应模式 2 的波长。由此可固定通道损耗,改变通道 2 波长以使输出激光达到均衡。固定抽运功率为 91 mW,调节 SOTMTF 以改变双模波长间隔,在不同的平衡波长处测量波长变化对双模输出功率的影响,结果如图 6 所示。图 6(a)中,平衡时波长间隔为 9 nm,可容忍的波长偏移量为 1 nm;图 6(b)中,平衡时波长间隔为 13.5 nm,可容忍的波长偏移量为 2 nm;随着波长间隔的继续增大,双模还能返回平衡状态,而不再受损耗关系的限制。

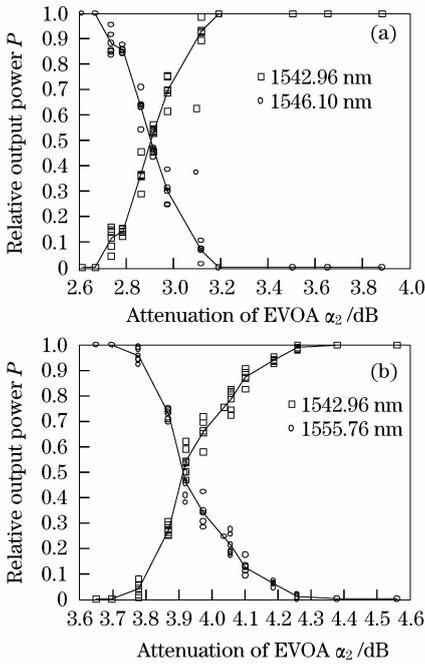


图 5 双模相对输出功率随 EVOA 插入损耗的变化曲线  
(a) 模式 2 波长为 1546.1 nm; (b) 模式 2 波长为 1555.76 nm

Fig. 5 Dual-wavelength relative output power against EVOA insertion loss. (a) wavelength of mode 2 is 1546.1 nm; (b) wavelength of mode 2 is 1555.76 nm

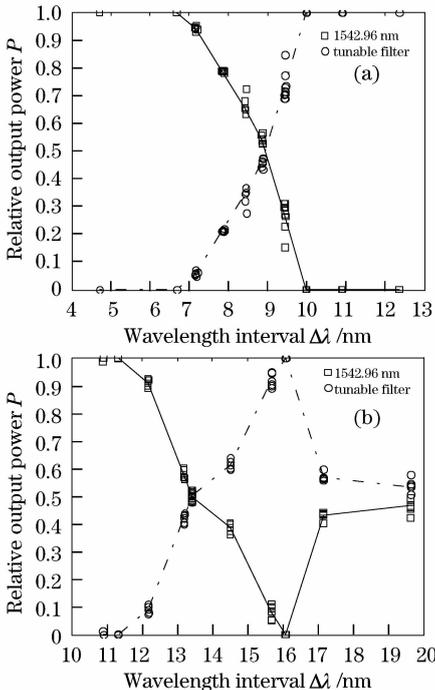


图 6 不同波长间隔下双模功率占输出总功率的百分比  
Fig. 6 Dual-wavelength relative output power against wavelength interval

### 3.3 稳定性测试

由图 5 可知, 0.4~0.6 dB 左右的损耗偏离即可导致双波长平衡状态的破坏。欲实现室温下普通环形腔内的双波长稳定出射, 在不引入模式竞争抑制机制的情况下, 需严格控制腔内各模式的相对损耗波动。将腔内的普通单模光纤更换为抗弯曲损耗的单模光纤, 同时将光纤缠绕在固体上以固定弯曲程度, 可有效提高激光器的长期稳定性。设置抽运功率为 85 mW, 开机稳定后双波长的功率波动范围小于 0.5 dB, 且长波长的稳定性优于短波长, 如图 7 所示。若能采取进一步减少双波长相对损耗波动的措施, 还可继续提高稳定性。文献[8]采用采样光栅作为选频器件, 实现了双波长功率波动范围小于 0.1 dB。

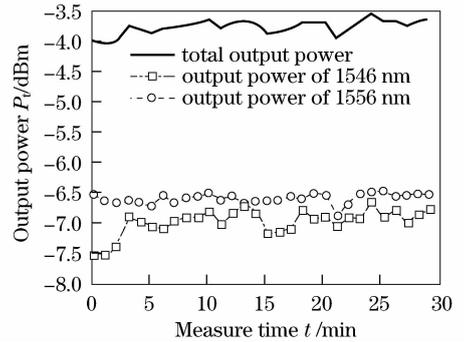


图 7 双波长激光器输出功率随时间的变化  
Fig. 7 Power of dual-wavelength against time

以上实验结果有助于对掺铒光纤激光器的模式竞争特性的进一步理解。其一, 双波长平衡出射时损耗与波长的依赖关系源自掺铒光纤的均匀加宽特性。无论是仿真结果<sup>[11]</sup>还是实验结果都表明掺铒光纤的均匀加宽特性导致了双模之间强烈的交叉增益饱和。因此, 即使依靠损耗控制与增益均衡技术实现了双波长的同时出射, 该平衡状态也容易被损耗的偏离和波动所破坏。正如实验结果所表明的, 0.4~0.6 dB 的损耗偏离导致一个模式抑制另一个模式。其二, 随着信号功率的提高, 非均匀加宽效应逐渐显著。非均匀加宽特性使得平衡状态双模的损耗存在一定的许可范围。根据 Desurvire 等的研究<sup>[13]</sup>, 非均匀加宽的影响有以下几个方面: 1) 随着信号功率的增加, 距离饱和信号较远的波长处, 增益下降要小于均匀加宽模型的结果; 2) 非均匀加宽模型中在饱和信号附近增益曲线下落区的频谱宽度小于均匀加宽模型的结果。这表明非均匀加宽效应使得交叉增益饱和随波长间隔增加而减弱, 图 5 中随波长间隔增加允许的损耗偏离值增大和强度波动减

小体现了这一效应。

图 6 中随波长间隔增加双模平衡对损耗的要求降低的趋势更加明显。在仿真中得到损耗允许的偏离值小于 0.05 dB,远小于实验的结果。这是由于在仿真中使用的掺铒光纤 Giles 模型是均匀加宽模型<sup>[10]</sup>,无法体现非均匀加宽效应,仿真中极微小的损耗偏离都会导致平衡的破坏。这一对比表明掺铒光纤的非均匀加宽效应降低了激光器的交叉增益饱和系数,有助于提高平衡时双波长的输出功率稳定性。

因此,掺铒光纤激光器要在普通环形腔中实现双波长的出射,首先应当满足双波长的振荡条件。另一方面,非均匀加宽效应使得双模的增益变化不再严格同步,在总的同步趋势下相对具有一定的独立性,这有助于提高双波长激光器的稳定性。

## 4 结 论

得到双波长激光器稳定振荡需满足的条件,并据此建立实验系统,对抽运功率、双模损耗以及波长间隔对模式竞争的影响进行了定量研究。实验结果显示,当抽运功率远离阈值点时,双波长平衡条件与其无关。可使用损耗控制及增益均衡方法实现多波长激光器,30 min 内 1546 nm 和 1556 nm 双波长的功率波动小于 0.5 dB;此方法对 VOA 的精度及稳定性要求较高,允许的偏离值小于 0.4 dB;对起振波长的稳定性要求较低,1 nm 左右的波长偏离才会导致平衡破坏。掺铒光纤的均匀加宽特性导致了双模之间强烈的交叉增益饱和;而非均匀加宽效应允许损耗存在一定的波动,这有助于提高双波长激光器的稳定性。

## 参 考 文 献

1 Liu Yan'ge, Feng Xinhuan, Dong Xiaoyi. Progress in room-temperature stable multi-wavelength fiber laser technologies[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 883~894

- 刘艳格,冯新焕,董孝义. 室温稳定多波长光纤激光器技术的研究新进展[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 883~894
- 2 A. Bellemare. Room temperature multifrequency erbium-doped fiber lasers anchored on the ITU frequency grid [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(6): 291~302
- 3 Xueming Liu, C. Lu. Self-stabilizing effect of four-wave mixing and its applications on multiwavelength erbium-doped fiber lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2541~2543
- 4 Young-Geun Han, S. B. Lee. Room-temperature tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser based on degenerate four-wave mixing effect in dispersion-shifted fiber [C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2005
- 5 Y. W. Lee, B. Lee. Wavelength-switchable erbium-doped fiber ring laser using spectral polarization-dependent loss element [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(6): 795~797
- 6 Z. Liu, Y. Liu, J. Du *et al.*. Switchable triple-wavelength erbium-doped fiber laser using a single fiber Bragg grating in polarization-maintaining fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **279**(1): 168~172
- 7 G. Das, J. W. Y. Lit. Wavelength switching of a fiber laser with a sagnac loop reflector [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 60~62
- 8 Y. Liu, X. Dong, P. Shum *et al.*. Stable room-temperature multi-wavelength lasing realization in ordinary erbium-doped fiber loop lasers [J]. *Opt. Express.*, 2006, **14**(20): 9293~9298
- 9 L. Talaverano, S. Abad, S. Jarabo *et al.*. Multiwavelength fiber laser sources with Bragg-grating sensor multiplexing capability [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(4): 553~558
- 10 C. Randy Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 271~283
- 11 Xu Pan, Hu Zhengliang, Ma Lina *et al.*. Modeling of dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser and simulation on mode competition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 74~78
- 徐攀,胡正良,马丽娜等. 双波长环形腔掺铒光纤激光器建模及模式竞争的仿真[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1): 74~78
- 12 Y. Sun, J. L. Zyskind, A. K. Srivastava. Average inversion level, modeling, and physics of erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electron.*, 1997, **3**(4): 991~1007
- 13 E. Desurvire, J. L. Zyskind, J. R. Simpson. Study of spectral dependence of gain saturation and effect of inhomogeneous broadening in erbium-doped aluminosilicate fiber amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(9): 653~655