

# 双波长环形腔掺铒光纤激光器建模及模式竞争的仿真

徐 攀 胡正良\* 马丽娜 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** 利用 Giles 模型建立双波长环形腔掺铒光纤激光器模型, 根据增益损耗匹配条件对 1550 nm 与 1555 nm 双波长的模式竞争进行了仿真。结果表明, 在均匀增益加宽模型下, 损耗谱的微小变化对激光的模式竞争过程有较大影响。当两模式各自的损耗与增益相匹配时, 它们的输出功率相当; 但 0.1 dB 的随机损耗波动将导致两个模式输出功率的相对波动幅度分别达到 9.59% 和 9.52%。当损耗长时间偏离匹配状态 0.05 dB 时, 一个模式将逐渐减弱并最终湮灭, 另一个模式得到增强。

**关键词** 激光技术; 双波长光纤激光器; 数值仿真; 模式竞争

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0074

## Modeling of Dual-Wavelength Erbium-Doped Fiber Ring Laser and Simulation of Mode Competition

Xu Pan Hu Zhengliang Ma Lina Hu Yongming

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

**Abstract** A numerical model of a dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser is presented based on the Giles' model. According to the gain and loss match condition, the mode competition of dual-wavelength of 1550 nm and 1555 nm is analyzed. Numerical results show that even tiny changes in loss spectrum have great impact on the process of mode competition. Output powers of dual wavelength are equal when loss matches gain. However, random loss perturbation of 0.1 dB will result in the relative output power fluctuations of 1550 nm and 1555 nm up to 9.59% and 9.52%, respectively. One mode is enhanced and the other is eliminated when a long-term loss bias is larger than 0.05 dB.

**Key word** laser technology; dual-wavelength fiber laser; numerical simulation; mode competition

### 1 引 言

多波长光纤激光器在光通信、光传感、光学测量及微波产生等领域已获得广泛应用, 其高稳定性、高调谐性及高性价比的实现方式成为近两年的研究热点<sup>[1]</sup>。限制多波长掺铒光纤激光器在室温下稳定工作的主要因素是铒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。研究主要集中在利用频移反馈<sup>[2]</sup>、增益均衡<sup>[3]</sup>、四波混频<sup>[4]</sup>、偏振烧孔<sup>[5, 6, 7]</sup>和空间烧孔<sup>[8]</sup>等方法抑制模式竞争, 较少见到直接研究掺铒光纤激光器模式竞争现象的报道。由于实验条件的限制, 很难直接观察和测量

掺铒光纤激光器运行过程中快速的模式竞争现象; 利用数值仿真技术有助于克服实验技术的局限, 得到任意时刻在铒纤不同位置的传输功率谱, 从而可直观深入地研究模式竞争现象<sup>[9, 10]</sup>。

本文利用掺铒光纤 Giles 模型, 以放大自发辐射光(ASE)作为种子光源, 建立了双波长环形腔掺铒光纤激光器模型。在此基础上对 1550 nm 和 1555 nm 双波长激光的模式竞争过程进行了研究。

### 2 理 论

激光器模型由抽运源、增益单元、损耗单元、选频

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方面的研究。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

单元、反馈及输出单元组成,如图 1 所示。980 nm 抽运源将铒离子从<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>能级抽运到<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>,实现粒子数反转,使增益介质起到提供种子源和放大信号的作用。光纤器件、连接与输出耦合导致的传输损耗由损耗单元表示。输出部分按照耦合系数一方面向外界输出腔内的光能量,另一方面将剩下的光反馈回谐振腔中。在谐振腔内加入如法布里-珀罗腔、光纤光栅等选频元件,产生光谱上的损耗差异,决定输出激光的波长。

Giles 模型不仅能对 ASE 光等多种参量进行全面的分析,还为多波长信号在铒纤中传输提供了全频谱解决方案,因此采用 Giles 简化模型能在一定范围

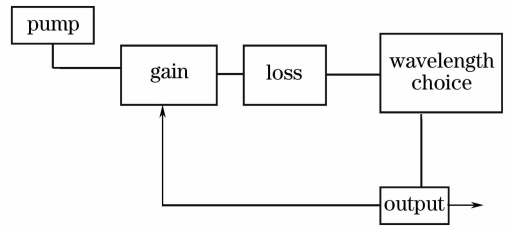


图 1 激光器仿真模型

Fig. 1 Simulation model of laser

内准确地分析双波长激光器中的模式竞争效应。

将光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  $\lambda_i = c/\nu_i$  的窄带波束,各个波束的功率传输方程如下<sup>[11]</sup>

$$\begin{cases} \frac{dP_k^s}{dz} = u_k \left[ (g_k^* + \alpha_k) \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_l} - (\alpha_k + \alpha) \right] P_k^s(z), \\ \frac{dP_l^{ASE}}{dz} = u_l \left[ (g_l^* + \alpha_l) \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_l} - (\alpha_l + \alpha) \right] P_l^{ASE}(z) + mu_l g_l^* \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_l} h \nu_l \Delta \nu_l, \\ \frac{dP_j^p}{dz} = -u_j \alpha_j^p \left( 1 - \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_l} \right) P_j^p(z) - u_j \alpha P_j^p, \end{cases} \quad (1)$$

式中  $P_k^s, P_l^{ASE}, P_j^p$  代表信号光、ASE 光及抽运光功率,下标  $j, k, l$  分别代表抽运光,信号光和 ASE 光的波束序号。 $g_{k,l}^*$  和  $\alpha_{j,k,l}$  分别为铒纤的增益谱和吸收谱。 $\alpha$  为光纤的衰减系数,一般铒纤较短,可将此项略去。 $h$  为普朗克常量,  $\bar{n}_l$  为铒离子平均总掺杂浓度,  $\bar{n}_2$  为平均上能级粒子数浓度。 $u_{j,k,l} = 1$  表示正向传输,  $u_{j,k,l} = -1$  表示为反向传输。 $m$  表示在光纤中传输光的偏振模数目。

相对稳态反转粒子数分布  $\bar{n}_2/\bar{n}_l$  为

$$\frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_l} = \frac{\sum_j \frac{P_j^p}{P_j^{th}} + \sum_k \frac{\alpha_k P_k^s}{(\alpha_k + g_k^*) P_k^{sat}} + \sum_l \frac{\alpha_l P_l^{ASE}}{(\alpha_l + g_l^*) P_l^{sat}}}{1 + \sum_j \frac{P_j^p}{P_j^{th}} + \sum_k \frac{P_k^s}{P_k^{sat}} + \sum_l \frac{P_l^{ASE}}{P_l^{sat}}}, \quad (2)$$

其中  $P_j^{th} = \frac{h\nu_j \pi b_{eff}^2 \bar{n}_l}{\alpha_j \tau}$ ,  $P_{k,l}^{sat} = \frac{h\nu_{k,l} \pi b_{eff}^2 \bar{n}_l}{(\alpha_k + g_k^*) \tau}$ , 式中  $b_{eff}$  为铒离子有效掺杂半径,  $\tau$  为亚稳态粒子寿命。

将铒纤加入激光器中,添加相应的边界条件和循环条件,通过求解(1)式、(2)式组成的非线性微分方程组,即可获得信号光和抽运光通过铒纤的功率、增益以及 ASE 光的功率<sup>[12]</sup>。

抽运光和信号光在循环开始和循环中的边界条件为:

$$\begin{cases} P_n^p(z=0) = P^p, \\ P_n^s(z=0, \nu) = P_{n-1}^{ASE}(z=L, \nu) \alpha_n F(\nu), \quad n=2 \\ P_n^s(z=0, \nu) = [P_{n-1}^{ASE}(z=L, \nu) + P_{n-1}^s(z=L, \nu)] \alpha_n F(\nu), \quad n>2 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $n$  表示循环次数,  $\alpha$  代表腔内背景传输损耗,包括光纤的传输损耗、器件损耗、连接损耗及输出损耗。 $F(\nu)$  为选频元件的频谱传输特性。

模型的仿真过程如下<sup>[9,10]</sup>:

首先在抽运光的作用下,铒纤将产生 ASE 信号,此时铒纤无输入信号;

当循环次数  $n=2$  时,第一步中产生的 ASE 信号经谐振腔返回作为铒纤输入信号;

当循环次数  $n>2$  时,第  $n$  步循环中铒纤的信号光由两部分组成,一部分是第  $n-2$  次循环的信号输出光经  $n-1$  次循环放大之后得到,另一部分为第  $n-1$  次循环过程中产生的 ASE 光,两部分叠加作为第  $n$  次循环的信号输入。

在每次循环中,逐个波束比较本次循环与上一次循环得到的输出功率,当各波束输出功率变化量的最大值小于给定的收敛因子时,循环结束。

为了讨论模式竞争过程中全频谱的增益演变情况,允许所有波束的信号光进入下一轮循环。当信号光净增益为负时,在循环的过程中会逐步损耗直至湮没。

### 3 结果与讨论

仿真所用激光器为如图 2 所示的  $\sigma$  结构,980 nm 抽运源通过波分复用器(WDM)耦合进环形腔。环形器上串接两个光纤布拉格光栅(FBG)用作双波长的选频器件,其中的可变衰减器(VOA)用来动态调节 FBG2 所反射波长的损耗。环形器还可保证激光器为单向运行,因此仿真中不考虑后向信号光及后向 ASE 光。输出耦合器将环形腔内的部分能量向外输出,另一部分能量通过环形腔反馈回钕纤输入端。

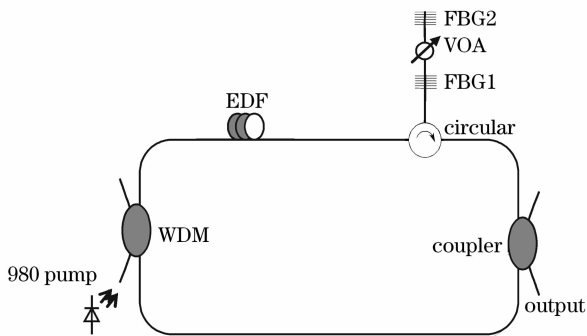


图 2 双波长掺钕环形激光器结构图

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

仿真所用的参量如表 1 所示,在仿真时,忽略偏振态、激发态吸收(ESA)效应及激光线宽等参量的影响。

表 1 仿真参量表

Table 1 Parameters in simulation

Peak absorption @ 980 nm / (dB/m)	12.0
Erbium radius / $\mu\text{m}$	2.2
Metastable lifetime / ms	10
Erbium concentration / (ions/ $\text{m}^3$ )	$1.5 \times 10^{25}$
Erbium-doped fiber length / m	4
Fiber length interval / mm	40
Pump wavelength / nm	980
Pump Power / mW	78
Wavelength range / nm	1500~1600
Wavelength interval / nm	1
FBG wavelength / nm	FBG1:1550 FBG2:1555
Total loss @1550 nm/ dB	4.7

#### 3.1 增益曲线

按照表 1 设定各项仿真参量,同时设 1555 nm 波长处的腔内损耗为 4.7 dB,进行仿真。图 3 为对

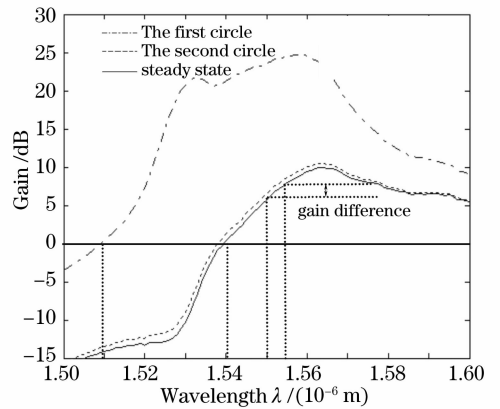


图 3 增益谱随信号放大的变化

Fig. 3 Gain spectra of erbium-doped fiber in different circulation

1550 nm 与 1555 nm 两个模式进行仿真得到的增益谱。随着信号在环形腔内不断循环,信号功率增加,钕纤中反转粒子数不断减小,增益逐渐降低。由于钕纤在室温下具有均匀加宽特性<sup>[11]</sup>,当起振模式的增益下降时,导致整个频谱的增益曲线随之下降,而不出现增益烧孔效应。因此两个模式的增益不能独立地等于损耗,只有两个模式的损耗满足如下条件时,才能形成稳定的双波长振荡:

$$\begin{aligned} \alpha_{\lambda_2} - \alpha_{\lambda_1} &= G_{\lambda_2} - G_{\lambda_1}, \\ \alpha_{\lambda_1} &= G_{\lambda_1}, \quad \alpha_{\lambda_2} = G_{\lambda_2}, \end{aligned} \quad (4)$$

此时有

$$\alpha_{\lambda_2} = \alpha_{\lambda_1} + G_{\lambda_2} - G_{\lambda_1} = \alpha_{\lambda_1} + \Delta G_{\lambda_1 \lambda_2}. \quad (5)$$

仿真表明,在进入循环的两三次之后, $\Delta G_{\lambda_1 \lambda_2}$  的变化量在  $10^{-4}$  量级,基本保持稳定。因此在仿真时,只需保持损耗与稳态增益匹配即可。

#### 3.2 增益与损耗满足匹配条件

按表 1 设置各项仿真参量,调节 1555 nm 波长的损耗,使两波长的损耗满足(5)式,对激光器的功率传输特性进行仿真,结果如图 4。由图 4(a)可见,虽然 1555 nm 波长处的增益大于 1550 nm 波长处的增益,但由于进行了损耗控制,两个模式的输出功率相当。图 4(b)表明在双波长增益损耗均衡的条件下,只需要 9 个周期即可使两个模式均达到稳定振荡条件,激光器输出两个稳定的模式。

#### 3.3 增益损耗非匹配情况

当两个波长处的损耗不满足匹配条件时,激光器不能同时满足两个模式的稳定振荡条件。此时始终有一个模式的增益占优,该模式将抑制另一个模式的振荡。图 5 为调整 1555 nm 波长的损耗得到不同损耗偏差情况下的两波长稳态输出功率。

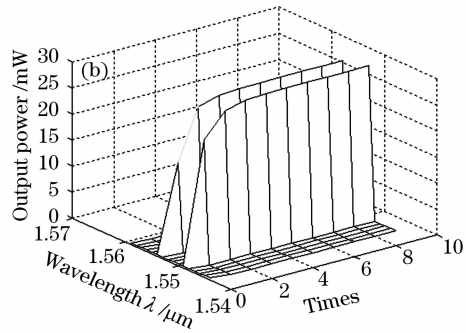
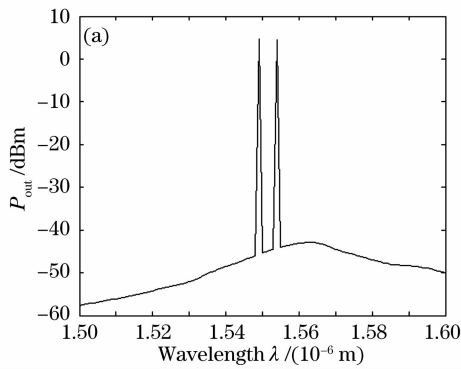


图4 两波长增益损耗匹配时输出功率频谱。(a)稳定的输出功率谱,(b)输出功率谱演化图

Fig. 4 Dual-wavelength output power when loss spectrum matches gain spectrum. (a) Steady output power spectrum, (b) development of output power spectrum against circulation times

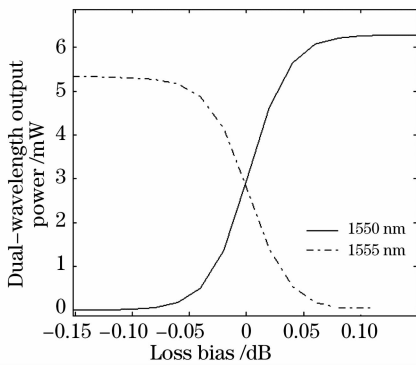


图5 两波长输出功率随损耗偏离的变化

Fig. 5 Dual-wavelength output powers against loss bias

由图5可见,各模式输出功率对损耗的变化十分敏感。当损耗偏差为0 dB,即满足损耗增益匹配条件时,两个模式的输出功率相等。增加1555 nm波长的损耗,则该模式被抑制,输出功率减小;反之则该模式竞争占优,1550 nm波长的输出功率减小。当损耗偏差达到0.05 dB时,一个模式基本上抑制了另一个模式,激光器只输出一个模式。

### 3.4 外加随机扰动情况

事实上,实际的环形腔光纤激光器极易受到外界压力、温度变化的干扰,导致腔长和损耗发生随机的变化;VOA的损耗也并非严格的稳定,而是在一定的精度范围内波动。鉴于双波长的模式稳定性对损耗变化的极端敏感,对模式竞争随损耗扰动的变化进行仿真同样具有实际意义。在激光的循环过程中,对两个波长的损耗分别叠加一个随机的变化量,观察双波长的演化情况,即  $\alpha_n = \alpha_{no} - \Delta\alpha_i (1/2 - \text{rand})$ 。式中  $\alpha_n$  为第  $n$  次循环的损耗,  $\alpha_{no}$  为平均背景损耗,  $\Delta\alpha_i$  为损耗波动范围,  $\text{rand}$  代表一个在  $[0, 1]$  区间内的随机量。

图6为增益损耗匹配时0.1 dB的外界随机扰动幅度对输出功率的影响。图6(a)为整个频谱范围内的光功率随循环次数的变化,图6(b)为两个激振模式输出功率的波动情况。当  $\Delta\alpha_i = 0.1$  dB时,对应的1550 nm与1555 nm激光功率相对波动幅度分别为9.59%和9.52%;

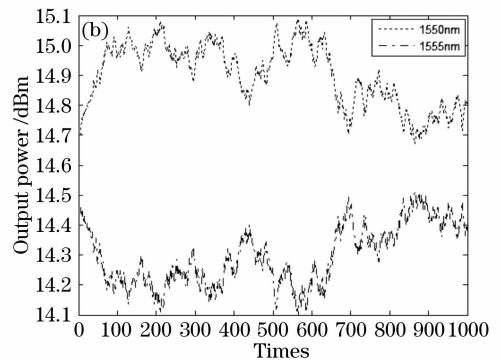
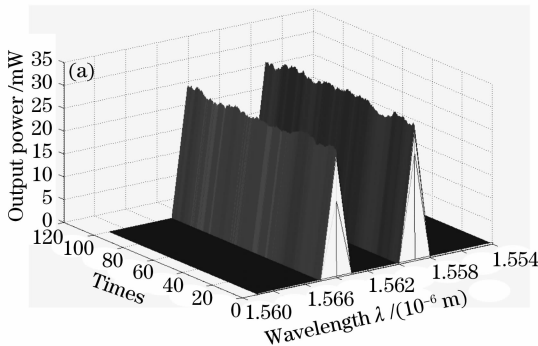


图6 两波长增益损耗匹配时外加随机扰动情况下的输出激光功率。(a)输出功率谱随循环次数变化,(b)两个波长输出功率随循环次数变化

Fig. 6 Dual-wavelength output powers vary with random loss when loss spectrum matches gain spectrum. (a) Output power spectrum against circulation times, (b) dual-wavelength output powers against circulation times

以上仿真结果表明铒纤的均匀加宽特性是导致室温下多波长掺铒光纤激光器面临严重模式竞争的最主要原因,环形腔内损耗谱与增益谱是否匹配是能否形成稳定的多波长出射的关键因素。

掺铝铒纤在室温下的均匀加宽线宽为 10 nm 左右<sup>[13]</sup>,而 Giles 模型并未考虑均匀加宽线宽效应。因此本模型适用于两个模式在铒纤均匀加宽线宽内的情况。对实际的铒纤而言,间隔大于 10 nm 的波长其增益的独立程度比模型要高,也就能近似独立地满足稳定振荡条件。实验表明,当波长间隔较远时能比较容易地实现多波长的出射,文献[3]采用损耗控制技术实现了 4 个波长的稳定出射。

## 4 结 论

根据掺铒光纤 Giles 模型建立了双波长环形腔光纤激光器模型,利用此模型对 1550 nm 与 1555 nm 双波长激光器运行时的模式竞争现象进行了仿真。得到均匀增益加宽模型下掺铒光纤增益曲线变化规律,根据此规律提出双波长稳定振荡的增益损耗匹配条件。仿真在匹配与非匹配条件下以及加入外界扰动的情况下,激光器的输出功率随时间的变化。结果表明,在均匀增益加宽模型下,损耗谱的微小变化对激光的模式竞争过程具有强烈影响。当两模式各自的损耗与增益相匹配时,它们的输出功率相当;但 0.1 dB 的损耗波动将导致两个模式输出功率的相对波动幅度分别达到 9.59% 和 9.52%。当损耗长时间偏离匹配状态 0.05 dB 时,一个模式将逐渐减弱并最终湮灭,另一个模式得到增强。

## 参 考 文 献

1 Liu Yan'ge, Feng Xinghuan, Dong Xiaoyi. Progress in room-temperature stable multi-wavelength fiber laser technologies[J].

*Chin. 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, M. Karasek, M. Rochette *et al.*. Room temperature multifrequency erbium-doped fiber lasers anchored on the ITU frequency grid[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(6): 825~831

3 Talaverano, L. Abad, S. Jarabo *et al.*. Multiwavelength fiber laser sources with Bragg-grating sensor multiplexing capability [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(4): 553~558

4 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

5 Yong Wook 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 Zhanyuan Liu, Yan'ge Liu, Jiangbing 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 Feng Xinhuan, Sun Lei, Liu Yange *et al.*. Switchable and spacing tunable dual-wavelength erbium-doped fiber laser using a PM fiber Bragg grating [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(2): 145~148

冯新焕,孙磊,刘艳格等. 基于保偏光纤光栅的双波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 145~148

8 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

9 A. Cucinotta, S. Dallargine, S. Selleri *et al.*. Modeling of erbium doped fiber ring laser [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **141**(15): 21~24

10 S. Selvakennedy *et al.*. Design optimisation of erbium-doped fibre ring laser through numerical simulation [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **170**(9): 247~253

11 C. Randy Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 271~283

12 Yu Qian, Cui Jingcui, Wang Sihai *et al.*. A new method for the numerical simulation of erbium doped fiber amplifiers [J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **26**(7): 585~588

俞谦,崔景翠,王四海等. 数值模拟掺铒光纤放大器的新方法 [J]. *中国激光*, 1999, **26**(7): 585~588

13 E. Desurvire, J. L. Zyskind, J. R. Simpson. Spectral gain hole-burning at 1.53  $\mu\text{m}$  in erbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **2**(4): 246~248