

# 镱钕共掺光纤放大器真空下温度对增益的影响

李伢琴, 单欣, 鄢建平, 艾勇  
(武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**理论分析了光纤放大器的增益与掺杂光纤发射截面和吸收截面的关系,真空环境下的光纤放大器的散热性能。实验表明,真空环境下,输入光信号为1550 nm的情况下,增益以0.0076 dB/°C变化,真空55 °C工作5 min,散热措施能使镱钕共掺光纤温度从106 °C下降至76 °C,输出功率在波动小于10 mW。

**关键词:**高功率光纤放大器;增益;热真空

**中图分类号:**TN253 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.12.010

## Effect of temperature on the gain in Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> co-doped optical fiber amplifier under vacuum environment

LI Ya-qin, SHAN Xin, YUN Jian-ping, AI Yong  
(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:**The relation of the fiber amplifier gain and emission cross section and absorption cross section of doped fiber, the thermal performance of the optical fiber amplifier under vacuum environment are theoretically analyzed. Experimental results show that the gain change is 0.0076 dB/°C under vacuum environment when the input optical signal is at 1550 nm. When the fiber amplifier works 5 minutes at 55 °C under vacuum environment, Er/Yb co-doped fiber temperature drops to 76 °C from 106 °C, the output power fluctuation is less than 10 mW.

**Key words:**high power fiber amplifier; gain; thermal vacuum environment

### 1 引言

大功率光纤放大器是卫星光通信中的重要器件,镱钕共掺光纤放大器具有高增益,噪声小等优点<sup>[1]</sup>,适合在光通信中使用。国内外对镱钕共掺光纤放大器已经有很多的研究,特别是在 Snitzer 提出基于双包层光纤的包层泵浦技术之后<sup>[2]</sup>,多种镱钕光纤放大器方案的相继提出<sup>[3-4]</sup>,使大功率光纤放大器得到飞速的发展,并最终在卫星光通信系统中使用<sup>[5]</sup>。

卫星平台所处的太空环境复杂,如真空、温度交变、辐射等<sup>[1]</sup>,这些环境因素会影响光线放大的性能和使用,因此需要对光纤放大器在特殊环境下的工作状态进行实验。其中热真空实验是空间环境模拟实验中非常重要的一项实验,航天机构对航天产品的验收,热真空实验是必做的实验项目<sup>[6]</sup>。大功

率镱钕共掺光纤放大器产生的大量热量,在真空中不容易传导出去,大量热量的累计会使掺钕光纤、镱钕共掺光纤、泵浦激光器的温度急剧上升,严重影响放大器的增益,严重时还存在器件烧毁的危险。因此,大功率光纤放大器作为卫星光通信的重要器件,对其在热真空环境下的特性研究尤其具有重要的意义。空间环境中的高能质子辐射会对光纤的造成辐射损耗,降低光纤放大器的增益<sup>[7-8]</sup>,因此需要对光纤放大器增加辐射保护措施。国内外对光纤放大器在大气常压下的温度特性研究较多<sup>[1]</sup>,对真空环境下的温度与增益的关系国内研究较少。

本文主要研究 980 nm 和 940 nm 泵浦下光纤放

**作者简介:**李伢琴(1988-),男,硕士研究生,主要从事自由空间光通信及光器件的研究。E-mail:duanmengyun1206@163.com

**收稿日期:**2014-04-25

大器在热真空下光纤放大器增益与温度的关系。首先理论分析了真空中热量累积特性、光纤放大器的增益与温度的变化的特性;然后模拟太空热真空环境,通过遥测数据,监控放大器输出功率、光纤温度的变化,验证了光放大器温度与增益的关系;提出了大功率光纤放大器在真空环境下温度控制工艺,通过实验验证该工艺具有明显的稳定放大器增益的效果。

## 2 理论分析

### 2.1 真空下热效应分析

光纤放大器的功耗小部分以光能的形式输出,其余能量大部分以热耗形式散发在器件当中。在常压情况下,热传导、热对流使热量迅速散发出去,因此器件温度能够稳定在一定的范围内,保持长时间的正常工作。在真空的环境下,热传导受到了限制,热对流也可以忽略不计,只能依靠热辐射传递能量<sup>[9]</sup>。热辐射常用辐射力( $E$ )来衡量,根据 Planck 定律和 Stefan - Boltzmann 定律<sup>[10-11]</sup>,热辐射能力可表示为:

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda = \sigma T^4 \quad (1)$$

其中, $\lambda$  为波长,单位为 m; $T$  为黑体温度,单位为 K; $c_1$  为第一辐射常数,其值为  $3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ;  $c_2$  为第二辐射常数,其值为  $1.4388 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{K}$ ;  $\sigma$  为 Stefan - Boltzmann 常数,其值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

由于 Stefan-Boltzmann 常数数值非常小,依靠热辐射散发的热量是很少的。因此,真空环境中,光纤放大器的温度会快速升高,温度的升高将影响光纤放大器的各项性能。作为光纤放大器的核心放大部件,光纤的主要成分为二氧化硅,熔融二氧化硅的损伤阈值为  $50 \text{ J}/\text{cm}^2$ <sup>[12]</sup>,高温导致的过大热量会造成二氧化硅的物理损伤,这种损伤是不可逆转的。这就要求一方面我们要增大有效纤芯面积,一方面提高 EDFA 散热性能。

### 2.2 温度与增益的理论分析

本实验的大功率光纤放大器采用两级放大结构,输出光功率为 2 W。图 1 为实验所使用的光纤放大器结构示意图,第一级由 980 nm 泵浦源和单模掺铒光纤组成,提高输入后级光纤放大器的信号功率,输出功率为 50 mW 左右,使后级放大器工作在深度饱和状态,降低放大器的噪声系数;第二级由两个双包层 940 nm 泵浦源和多模 Er/Yb 共掺光纤组成,为主要的放大部分,得到 2 W 的输出功率。

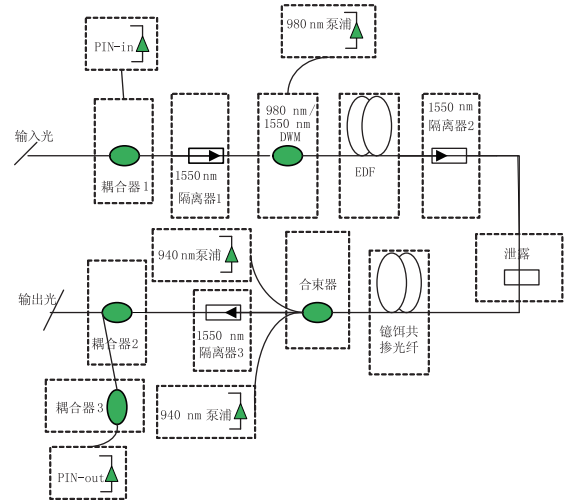


图 1 光纤放大器结构图

第一级掺铒光纤的增益为<sup>[13]</sup>:

$$G(\lambda_s) = \Gamma \int_0^L [N_2(z)\sigma_e^s - N_1(z)\sigma_a^s] dz \quad (2)$$

其中, $\sigma_e^s$ 、 $\sigma_a^s$  分别是波长  $\lambda_s$  处的发射截面和吸收截面; $N_1$ 、 $N_2$  分别是基态和激发态上的  $\text{Er}^{3+}$  离子浓度; $\Gamma$  是光纤纤芯中信号光场径向分布与  $\text{Er}^{3+}$  径向分布的重叠积分。在粒子达到反转饱和时(假定掺铒光纤是均匀掺杂的),式(2)可以表达为<sup>[14]</sup>:

$$G_{sat}(\lambda_s) = \Gamma \rho \sigma_a^s \{ \eta_{sat} (\sigma_a^s + \sigma_e^s) / \sigma_a^s - 1 \} \quad (3)$$

其中, $\rho$  是  $\text{Er}^{3+}$  的总粒子浓度; $\eta_{sat} = N_2/(N_1 + N_2)$ ,  $n_{sat}$  与温度值有关系,当采用 980 nm 时,  $n_{sat}$  的值随温度的变化不大<sup>[4]</sup>,因此仅仅分析温度对吸收截面  $\sigma_a^s$  和发射截面  $\sigma_e^s$  的影响。由 McCumber 理论,吸收截面和发射截面的关系为<sup>[1]</sup>:

$$\sigma_e^s = \sigma_a^s(\lambda) \exp\left(\frac{\varepsilon - h\nu}{kT}\right) \quad (4)$$

其中, $h$  为普朗克常数; $\varepsilon$  为  $\text{Er}^{3+}$  的亚稳态能级到基态能级的平均跃迁能量; $\nu$  为光子频率; $k$  为玻尔兹曼常数; $T$  为温度。根据 McCumber 理论可知,吸收截面可由吸收光谱计算得到,而掺铒光纤的吸收谱也会受温度的响应产生漂移。

第二级铥钇共掺光纤的增益为<sup>[15]</sup>:

$$G_{max} = \exp(N_{Er} \sigma_e L) \quad (5)$$

其中, $N_{Er}$  是掺杂粒子浓度; $\sigma_e$  是发射截面积; $L$  为光纤长度。

图 2 为  $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Yb}^{3+}$  的发射截面和吸收截面随波长的变化示意图。第二级铥钇共掺光纤  $\text{Yb}^{3+}$  是影响吸收截面主要离子, $\text{Yb}^{3+}$  吸收谱宽,在 940 nm 波段附近有平稳的吸收系数,因此使用 940 nm 泵浦源能够有效地抑制泵浦源波长的漂移带来的吸收截面的变化。同时,温度还会改变泵浦的输出波长,波长

的变化同样会引起吸收截面和发射截面的变化<sup>[17]</sup>, 从而影响增益的变化。

由式(3)、(4)、(5)可知, 温度和光纤放大器的增益成负相关。要稳定光纤放大器的输出, 需要控制光纤放大器中掺钕光纤和镱钕共掺光纤的温度以及泵浦源的温度。水冷和添加散热片是常用的被动散热方式, 但是这种散热方案实现起来比较笨重, 不利于放大器结构的紧凑化、轻量化。制冷片和风冷是常用的主动散热方式, 但是这种散热方式不利于放大器的低功耗。太空环境中使用的光纤放大器, 一方面考虑机构的紧凑化、重量轻、低功耗的散热措施, 另一方面要提高光纤的温度容限。光功率放大能力集中在第二级镱钕共掺光纤中, 因此镱钕共掺光纤产生的热量也是比较多的, 本实验中使用的为双包层多模镱钕共掺光纤, 有较大的温度容限。

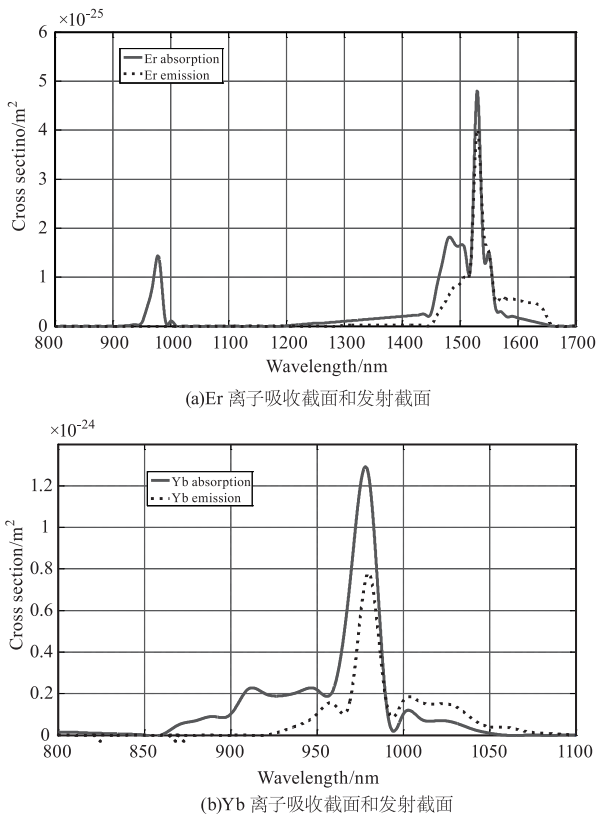


图2 Er<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup>的吸收截面和发射截面随波长的变化示意图

### 3 光纤放大器真空温度实验与分析

卫星平台舱内的环境温度可以控制在 -10 ~ 40 °C, 在地面模拟热真空时考虑一定的温度冗余, 因此实验环境设置为 -25 ~ 55 °C。图3为真空温度实验装置图, 光纤放大器放在真空罐中。由于真空罐无法对光纤穿窗处理, 不能直接监控输入和输

出的光功率, 因此要通过光电转换, 遥测相应的电压值可以间接测得输入和输出的光功率, 温度的可通过测得的热敏电阻电压值得到。为验证不同的散热处理工艺, 进行了多次热真空实验。

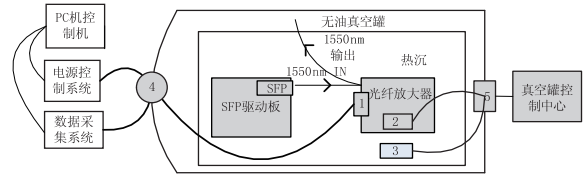


图3 光纤放大器热真空实验图

图3中, “1”为光纤放大器电源以及监控接口, “2”为光纤放大器盒体温度探测器, “3”热沉铝板的温度探测器, “4”为真空罐中实验器材电缆监控接口, “5”为真空罐控制接口。实验中的 SFP 为光源输出模块, 已经通过真空实验, 可以在真空 -45 ~ 85 °C 条件下工作, 为光纤放大器提供 1550 nm 的输入光。实验条件如表1所示。

表1 实验条件

温度变化范围	-25 ~ +55 °C
环境压力	不大于 $1.3 \times 10^{-3}$ Pa
平均变温率	不低于 1 °C/min; 变温率至少应 >0.5 °C/min
循环次数	3.5 次
实验允许温差	低温为 0 ~ -4 °C, 高温为 4 ~ -0 °C。
稳定测温点	每隔 5 °C 为稳定温度点, 测试并记录每个温度点的监测值。

当光纤放大器未做散热处理时, 在 55 °C 的真空环境中工作 5 min 的温度变化曲线如图4所示。由图可以看出, 在真空中, 镱钕共掺光纤的温度迅速升高。由于真空中光纤放大器散热性能差, 内部的热量不能及时传导出来, 当进行到第3个循环的高温时, 镱钕共掺光纤被烧毁。

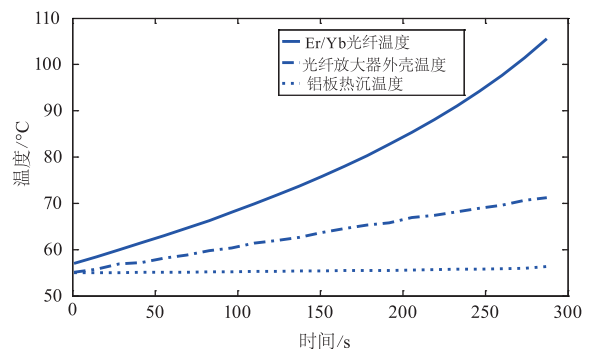


图4 55 °C真空环境中工作5 min 各点温度

在镱钕共掺光纤烧毁前的第一个热循环, 每隔 5 °C 测量一次光纤放大器增益(瞬时增益和稳定增益), 如图5所示。结果显示, 在低温区, 光纤

放大器的瞬时增益低于稳定增益;而随着温度的增高,两者间的差值逐渐减小。这一现象是由泵浦源的工作温度阈值引起的。在低温时,泵浦需要通过加热电流使其到达阈值工作温度,此时才能输出正常的泵浦功率,从而使光纤放大器达到正常增益。而在高温时则不存在这种情况。因此需要增加自动温度控制(ATC),保持泵浦的温度基本恒定<sup>[16]</sup>。因此在卫星激光通信中,在背光低温的时候需要提前1~2 min开启光纤放大器,才能进行正常的通信。

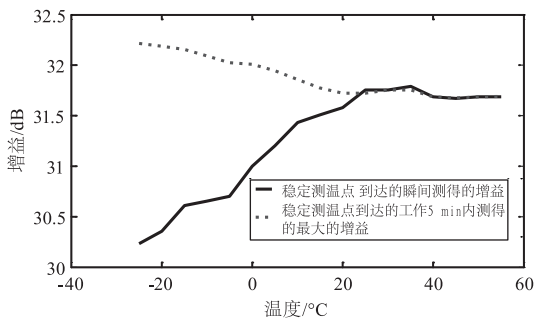


图5 真空中掺杂光纤温度与增益的关系

在第一次实验的时候,累积的热量造成了镱钕共掺光纤温度过高烧毁。光纤放大器结构中光纤盘绕过于集中(考虑到辐照),光纤由于受到挤压自身的热量不能很好的散发出去。与此同时,光纤盘绕的转弯处由于转弯半径过小,导致热量积聚相对较多。对光纤放大器工作的时候进行热成像后,也发现光纤放大器镱钕共掺纤的温度明显高于其他地方,尤其是转弯处的温度更高。通过改进结构,将光纤用导热胶固定,在真空情况下能将光纤表面的热量传导到结构体上。经过散热处理工艺后,多次实验均未出现烧毁的现象。

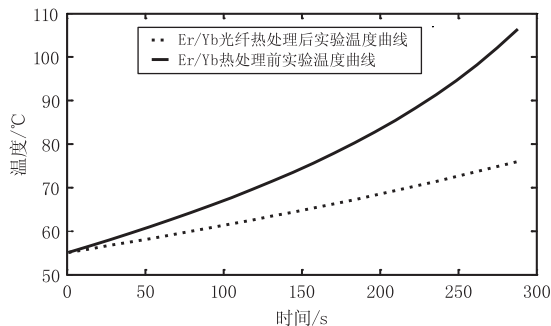
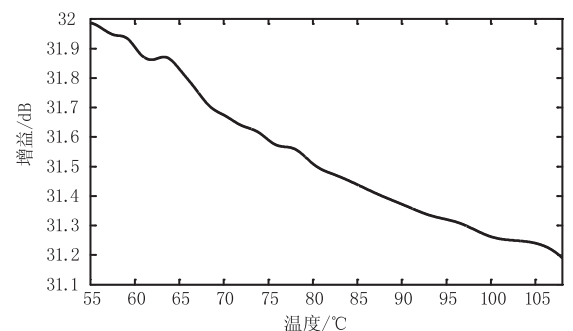


图6 真空中55 °C时间与温度的关系

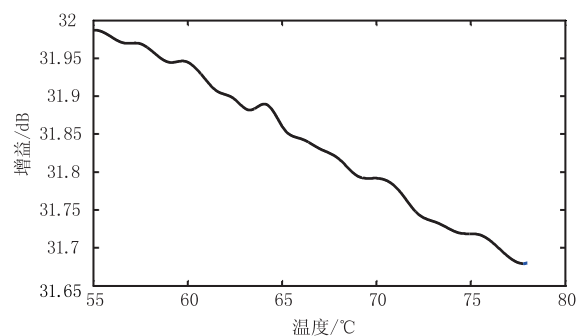
由图6可以看出,在进行散热处理后,同样在真空的55 °C下工作5 min,镱钕共掺的温度为78 °C,温度要比未做热处理前低40 °C,掺钕光纤的温度基本与光纤放大器的外壳的温度增长一致,可以看出热处理有效地增加了光纤放大器的

热传导能力(光纤放大器外壳与热沉铝板之间也均匀涂抹上了一层导热系数高的导热硅脂,外壳的温度可以传到到热沉铝板上),在实际安装在卫星载荷上,应该在光纤放大器与载荷之间均匀涂抹上导热硅脂。

实验进一步研究了光纤放大器在热真空高温时温度与增益关系。光纤放大器在环境温度(热沉温度,且温度稳定半小时)55 °C工作5 min。图7(a)所示是未做散热处理的情况,第一个热循环时,光纤放大器的增益与温度的关系。由图可以看出,增益从31.98 dB下降到31.19 dB,下降了0.79 dB。图7(b)所示是热处理改进后的温度与增益之间的关系,光纤放大器的增益下降0.30 dB,输出功率波动小于10 mW。



(a)未做散热处理



(b)做散热处理后

图7 热真空下光纤放大器在热处理前后温度与增益的关系

#### 4 结论

本文通过实验测得了在真空环境下(气压小于 $1.3 \times 10^{-3}$  Pa),环境温度-25~55 °C,镱钕共掺光纤温度-25~106 °C,光纤放大器增益变化情况,增益从32.2 dB下降到31.19 dB;输入光为1550 nm,增益以0.0076 dB/°C变化。提出了在光纤放大器光纤放大器的在真空中的散热处理措施,实验表明该办法能够有效的增加光纤放大器的散热性能,稳定了输出功率的波动,经过散热处理后的Er/Yb共掺光纤放大器可以适合太空的热真空环境。

## 参考文献:

- [1] WANG Chuancai. Experimental study of electronic radiation and temperature on the gain of erbium - doped fiber amplifier [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. ( in Chinese )  
王传才. 电子辐照和温变环境对掺钕光纤放大器增益影响实验研究 [ D ]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [2] E Snitzer, H Po, F Hakimi, et al. Double-clad, offset core ND fiber laser [ C ]. Digest of Conference on Optical Fiber Sensors, Washington DC: Optical Society of America, 1988, 2: PD5.
- [3] Y Jeong, J K Sahu, D B S, et al, High-power tunable single-frequency single-mode erbium; ytterbium codoped large-core fiber master-oscillator power amplifier source [ J ]. Opt. Lett., 2005, 30(22): 2997 - 2999.
- [4] Di Teodoro, F. Savage-Leuchs, M. Norsen. High-power pulsed fiber source at 1567 nm [ C ]. Proc. SPIE, 2005, 5709(359): 359 - 362.
- [5] Wolfgang Pitz, David Miller. The TerraSAR - X Satellite [ J ]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 615 - 622.
- [6] COSTIND. GJB1027A - 2005. Test Requirements for Launch, Upper-Stage, and Space Vehicles [ S ]. Beijing: CSTIND Military Standard Press, 2006. ( in Chinese )  
国防科学技术工业委员会. GJB1027A - 2005. 运载器、上面级和航天器试验要求 [ S ]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2006.
- [7] A Gusarov, Marco Van Uffelen, M Hotoleanu. Radiation sensitivity of EDFAs based on highly Er-Doped fibers [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(11): 1540 - 1545.
- [8] MA Jing, LI Mi, TAN Liying, et al. Analysis of the space radiation effect on EDFA for inter-satellite optical communication [ J ]. Journal of Astronautics, 2009, 30(1): 250 - 254. ( in Chinese )  
马晶, 李密, 谭立英, 等. 卫星光通信中空间辐射对 EDFA 性能的影响分析 [ J ]. 宇航学报, 2009, 30(1): 250 - 254.
- [9] GAO Guangbo, LI Xuexin. Reliability physics of semiconductor devices [ M ]. Beijing: Science Press, 1987: 106 - 108. ( in Chinese )  
高光渤, 李学信. 半导体器件可靠性物理 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1987: 106 - 108.
- [10] M Planck. On the law of distribution of energy in the normal spectrum [ J ]. Annalen der physik, 1901, 4: 553.
- [11] ZHANG Zhenjiu. The modern theory of relativity and black hole physics [ M ]. Wuhan: Huazhong Normal University Press, 1986: 362. ( in Chinese )  
张镇九. 现代相对论及其黑洞物理学 [ M ]. 武汉: 华中师范大学出版社, 1986: 362.
- [12] Mingyuan Cheng, Yuchung Chang, Almantas galvanauskas, et al. High-energy and high-peak-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200 $\mu$ m core highly multimode Yb - doped fiber amplifiers [ J ]. Opt. Lett., 2005, 30(4): 358 - 360.
- [13] Liang Quanting. Temperature dependence of the gain in Er-doped fiber amplifiers [ J ]. Acta optica sinica, 1995, 15(8): 1115 - 1118. ( in Chinese )  
梁铨廷. 掺钕光纤放大器增益的温度依赖关系 [ J ]. 光学学报, 1995, 15(8): 1115 - 1118.
- [14] Nobuyuki Kagi, Akira Oyobe, Kazunori Nakamura. Temperature Dependence of the Gain in Erbium-Doped Fibers [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(2): 261 - 265.
- [15] ZHANG Panpan. Performance Optimization of Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> Co-doped Double-cladding Optical Fiber [ D ]. Xi'an: Xidian University, 2011. ( in Chinese )  
张盼盼. 镱/钕共掺光纤放大器的性能优化 [ D ]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [16] GAN Yujun, TAN Xinquan. Manufacture of 980 nm pump Laser for EDFA [ J ]. Laser & Infrared, 2001, 31(4): 219 - 221. ( in Chinese )  
干煜军, 谈新权. EDFA 用 980nm 泵浦源的研制 [ J ]. 激光与红外, 2001, 31(4): 219 - 221.