

## 铒镱共掺光纤放大器的高温老化输出功率

任康宇<sup>1,2</sup>, 史伟<sup>1,2</sup>, 张雅婷<sup>1,2\*</sup>, 姚建铨<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072;<sup>2</sup>光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 对 1550 nm 铒镱共掺光纤放大器不同温度下的输出功率以及经过高温老化后的输出功率和光谱进行了实验研究。通过对比高温和常温下铒镱共掺光纤放大器的输出功率随泵浦功率的变化曲线, 得出铒镱共掺光纤放大器在高温环境工作可提高输出功率, 且不同长度的增益光纤对温度的敏感性不同的结论。以 Arrhenius 模型为加速老化模型对增益光纤进行温度为 85 °C、时间为 876 h 的加速老化实验, 结果表明在常温环境工作 5 y 后铒镱共掺光纤放大器的输出功率将降低 11.24%, 放大的自发辐射噪声将增加 4.1 dB, 根据指数模型预测得到该放大器的使用寿命为 7.57 y, 这些结果为改善光纤放大器的输出性能和寿命预测提供了理论基础和实验依据。

**关键词** 光通信; 光纤放大器; 铒镱共掺光纤; 温度特性; 加速老化; 功率

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0406002

## Output Power of Erbium-Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier After High Temperature Aging

Ren Kangyu<sup>1,2</sup>, Shi Wei<sup>1,2</sup>, Zhang Yating<sup>1,2\*</sup>, Yao Jianquan<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>*Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*<sup>2</sup>*Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China*

**Abstract** The output power of a 1550 nm erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier at different temperatures and the output power and spectra after high-temperature aging are experimentally studied. By comparing the output power of the amplifier varying with the pump power at high temperatures and normal temperatures, we verified that when the erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier works in a high temperature environment, the output power can be increased. The sensitivity of gain fibers of different lengths to temperature is different. Using the Arrhenius model as the accelerated aging model, the accelerated aging experiment was performed on the gain fiber at a temperature of 85 °C for 876 h. The results show that the output power of the erbium-ytterbium co-doped fiber amplifier will be reduced by 11.24% after working in a normal temperature environment for 5 years. The amplified spontaneous emission noise will increase by 4.1 dB, and the service life of the amplifier is predicted to be 7.57 years according to the exponential model, which provides the theoretical basis and experimental basis for improving the output performance and life prediction of fiber amplifiers.

**Key words** optical communication; fiber amplifier; erbium-ytterbium co-doped fiber; temperature characteristics; accelerated aging; power

收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2021-08-13; 录用日期: 2021-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(91838301, 61675147, 61735010)、国家重点研发计划(2017YFA0700202)

通信作者: \*yating@tju.edu.cn; \*\*jqyao@tju.edu.cn

## 1 引言

铒镱共掺光纤放大器(EYDFA)是应用于光纤通信线路中实现信号放大的关键器件,其工作波长位于 1550 nm 波段,是光纤通信的低损耗窗口,同时具有“人眼安全”的特性,能够实现大增益、宽频带、低噪声的光信号放大,因此在波分复用(WDM)、密集波分复用(DWDM)、有线电视(CATV)等系统得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。随着工作时间的增加,铒镱共掺光纤放大器逐渐老化,其输出功率、噪声、增益谱线等性能将在温度、压力、辐照等应力的影响下发生变化,为在较短时间内研究光纤放大器长期工作后由老化导致的性能变化,需要在不改变失效机理的前提下对增益光纤施加应力,进行加速老化实验。在加速老化实验中,通过增加温度增加应力是最常见的做法,因为高温能加快产品内部的化学反应,促使产品提前失效<sup>[4]</sup>。在对增益光纤进行高温老化实验之前,首先要研究温度对光纤放大器性能的影响。1990, Yamada 等<sup>[5]</sup>研究了掺铒光纤放大器(EDFA)增益与温度的相关性,结果表明不同长度的掺铒光纤对温度的敏感性不同。2008年, Goktas 等<sup>[6]</sup>分析了 EDFA 增益与温度的相关性,结果表明在不同的温度下,可通过调整适合的光纤长度获得最大的增益。2013年, Chen 等<sup>[7]</sup>通过求解纤芯径向热传导方程,研究了温度对铒镱共掺光纤放大器输出性能的影响,结果表明在高温中工作能使 EYDFA 获得更高的输出功率。2015年王海艳等<sup>[8]</sup>研究了掺铒光纤放大自发辐射光源的高温老化情况,验证了光散粒噪声随着光纤的老化而增加,且光谱发生了不可恢复的形变。2018年, Tang 等<sup>[9]</sup>研究了高功率辅助腔泵浦铒镱共掺光纤放大器的热效应,结果表明高功率情况下纤芯温度的升高将会对输出功率产生重要影响,需要着重注意热管理以保持辅助腔泵浦 EYDFA 的输出性能。目前研究人员对温度对光纤放大器输出性能的影响的报道较为完善,然而关于以增加温度的方式增加应力进而加速光纤放大器的老化过程中器件性能变化和工作寿命方面的报道尚未出现。

为了研究铒镱共掺光纤放大器长期工作后的输出功率变化,本文首先通过对比铒镱共掺光纤放大器分别在 85 °C 和 25 °C 环境下的输出功率与泵浦功率的关系曲线,研究了温度对其输出功率的影响,然后以增加温度来增加应力的方式对增

益光纤进行 876 h(36.5 d)的加速老化实验,研究其输出功率的衰减情况、恢复情况和光谱变化,研究成果为评估光纤放大器的工作寿命提供了实验参考,也为延长光纤放大器的使用寿命提供了理论依据。

## 2 理论分析

### 2.1 高温老化对铒镱共掺光纤放大器输出功率的影响

铒镱共掺光纤放大器在稳定工作时,泵浦光和信号光功率沿光纤轴向的分布可以通过求解功率传输方程得出,分布在光纤末端的信号光功率值即为输出功率值。在不考虑放大的自发辐射时,由速率方程推导出的简化功率传输方程<sup>[10]</sup>为

$$\pm \frac{\partial P_p^\pm}{\partial z} = [\Gamma_p \sigma_{65}(\lambda_p) N_6 - \Gamma_p \sigma_{56}(\lambda_p) N_5 - \Gamma_p \sigma_{13}(\lambda_p) N_1 - \alpha_p] P_p^\pm, \quad (1)$$

$$\pm \frac{\partial P_s^\pm}{\partial z} = [\Gamma_s \sigma_{21}(\lambda_s) N_2 - \Gamma_s \sigma_{12}(\lambda_s) N_1 - \alpha_s] P_s^\pm, \quad (2)$$

式中:  $P_p^\pm$  和  $P_s^\pm$  分别代表正向(+)及反向(-)的泵浦光和信号光功率;  $z$  代表光纤的轴向坐标;  $\Gamma_p$  和  $\Gamma_s$  分别代表泵浦光和信号光与纤芯的重叠因子;  $\sigma_{65}(\lambda_p)$ 、 $\sigma_{21}(\lambda_s)$  为发射截面谱;  $\sigma_{56}(\lambda_p)$ 、 $\sigma_{12}(\lambda_s)$  为吸收截面谱;  $\lambda_p$  和  $\lambda_s$  分别代表泵浦光和信号光波长;  $N_1$  和  $N_2$  分别代表铒离子分布在下能级与上能级的粒子数密度;  $N_5$  和  $N_6$  分别代表镱离子分布在下能级与上能级的粒子数密度;  $\alpha_p$  和  $\alpha_s$  分别代表泵浦光和信号光的散射损耗。求解该方程需要将长度为  $L$  的增益光纤分为若干小段,在每一小段上求解常微分方程的初值问题,因此不同长度的增益光纤会有不同的功率分布和输出功率,温度敏感性也不同。在高温老化实验过程中,温度会影响铒离子与镱离子各能级的粒子数分布,进而影响泵浦光和信号光的发射截面谱  $\sigma_{65}(\lambda_p)$ 、 $\sigma_{21}(\lambda_s)$  与吸收截面谱  $\sigma_{56}(\lambda_p)$ 、 $\sigma_{12}(\lambda_s)$ , 高温会加速光纤裂纹的生成,进而影响泵浦光和信号光在光纤中传输时的散射损耗  $\alpha_p$ 、 $\alpha_s$ 。两种机制共同作用,影响着铒镱共掺光纤放大器的输出功率。

### 2.2 温度对发射截面和吸收截面的影响

增益光纤中的掺杂离子在各能级的分布决定了增益光纤的放大能力,分布在激光上能级的粒子数越多,形成的反转粒子数密度越高,受激辐射就越强。热平衡状态下的各能级粒子数密度分布服从玻

尔兹曼分布<sup>[11]</sup>:

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right), \quad (3)$$

式中:  $E_1$  和  $E_2$  表示两能级的能量;  $T$  是热力学温度;  $k_B$  是玻尔兹曼常数。由(3)式可以看出, 增益光纤温度的变化会导致掺杂离子各能级的粒子数分布发生变化, 这会影响掺杂离子各能级粒子跃迁的概率, 在光谱上表现为掺杂离子受激发射和吸收截面谱的改变。当光纤纤芯温度为  $T$  时, 发射截面谱  $\sigma_e(T, \lambda)$  与在室温  $T_{\text{air}}$  下的发射截面谱  $\sigma_e(T_{\text{air}}, \lambda)$  存在如下关系<sup>[12]</sup>:

$$\sigma_e(T, \lambda) = \sigma_e(T_{\text{air}}, \lambda) \frac{Z_u(T_{\text{air}})}{Z_u(T)}, \quad (4)$$

式中:  $Z_u(T)$  表示温度为  $T$  时上能级的配分函数, 其表达式为

$$Z_u(T) = \sum_i \left(-\frac{\Delta E_i}{k_B T}\right), \quad (5)$$

式中:  $\Delta E_i$  表示某一主能级中第  $i$  个斯塔克能级的能量与第一个斯塔克能级能量的差值。根据 McCumber 理论<sup>[13]</sup>, 纤芯温度为  $T$  时对应的吸收截面谱  $\sigma_a(T, \lambda)$  为

$$\sigma_a(T, \lambda) = \sigma_e(T, \lambda) \frac{Z_u}{Z_l} \exp\left(\frac{E_{Z_l} - h\nu}{k_B T}\right), \quad (6)$$

式中:  $E_{Z_l} = 10256 \text{ cm}^{-1}$  是零级能线;  $Z_l$  是温度为  $T$  时下能级的配分函数;  $h\nu$  为光子能量。由上所述, 纤芯温度的变化将会导致发射截面谱和吸收截面谱的变化, 进而影响增益光纤末端的输出信号功率。

### 2.3 老化时间对散射损耗的影响

在常温环境下, 长时间的工作会使增益光纤发生不可避免的老化, 光纤纤芯的材料主要是二氧化硅, 其晶体微观结构存在缺陷, 当受到机械或热应力时, 缺陷处会产生应力集中现象, 导致裂纹增加, 光纤中的散射损耗增大, 从而造成输出功率的降低和噪声的增加, 该过程不可逆, 是影响光纤寿命的主要因素。实践证明, 温度升高会加快材料的物理与化学反应, 加速其老化失效的过程, 一般用 Arrhenius 反应方程式去解释这一过程, 它由瑞典物理化学家 Svandte Arrhenius 于 1889 年提出, 是目前加速寿命实验中最常使用的加速寿命模型, 广泛应用于当加速应力是热应力的情况下, 该方程式<sup>[4]</sup>为

$$\frac{\partial M}{\partial t} = A_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right), \quad (7)$$

式中:  $\partial M/\partial t$  表示温度为  $T$  时某产品性能的退化速率;  $A_0$  是实验常数;  $E_a$  表示特定反应的活化能,

在失效机理不变的情况下  $E_a$  是常数。产品在反应前处于正常状态, 其向退化状态转变过程中需要克服一定的能量势垒, 这个能量势垒就是活化能, 表示产品失效的难易程度<sup>[14]</sup>。在常温下, 工作时间的增加引起散射损耗的增加, 这符合指数模型:

$$\Delta\alpha_s(t_{\text{air}}) = a \exp(bt_{\text{air}}), \quad (8)$$

式中:  $\Delta\alpha_s(t_{\text{air}})$  为散射损耗的增量, 单位为  $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$ ;  $t_{\text{air}}$  代表常温下 EYDFA 的工作时间;  $a$  和  $b$  是拟合常数, 通常由实验测定。在温度为  $T$  的环境下, 经过实际工作时间  $t$  后的散射损耗变化相当于在常温  $T_{\text{air}}$  下工作  $t_{\text{air}}$  后的散射损耗变化, Arrhenius 模型的加速因子  $\tau$ <sup>[15]</sup> 可表示为

$$\tau = \frac{t_{\text{air}}}{t} = \exp\left[\frac{-E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{air}}}\right)\right], \quad (9)$$

加速因子可定义为在常温下发生反应的时间与在提高温度下发生反应的时间之比, 根据(8)和(9)式, 在某一温度  $T$  下工作一段时间, 散射损耗会增加, 其增加的快慢程度由该温度对应的加速因子决定, 将(8)和(9)式代入功率传输方程, 可通过老化实验计算出常数  $a$  和  $b$  的值, 并依据指数模型预测铒镱共掺光纤放大器的使用寿命。

## 3 实验研究

### 3.1 实验系统

高温老化过程中存在两个机制的共同作用, 一个是高温对发射截面和吸收截面的影响, 另一个是老化时间对散射损耗的影响。因此实验分为两步: 1) 进行温度特性实验, 研究在高温与常温下铒镱共掺光纤放大器的性能差异; 2) 进行高温老化实验, 使放大器在高温环境持续工作一段时间以推测其常温下长期工作后的性能变化。不同长度的增益光纤具有不同的泵浦光吸收程度和粒子能级转换效率, 导致其具有不同的信号光增益以及温度敏感性, 因此搭建 3 条 EYDFA 光路, 3 条光路只有铒镱共掺光纤的长度不同, 在输入端和输出端对光功率和光谱进行监测, 系统结构如图 1 所示。

放大系统中, 由波长为 1550 nm 的单模半导体激光器产生信号光, 隔离器 (ISO) 用于防止放大过程中产生的反向放大的自发辐射光 (ASE) 损坏信号源, 信号光经过耦合器分成三束信号, 分别输入三条 EYDFA 光纤通路, 每条通路的输入信号光功率为 1 mW。信号光首先经过以掺铒光纤为增益光纤的一级放大器 (EDFA), 然后经过以铒镱共掺光纤为增益光纤的二级放大器, 三条通路的铒镱共掺光纤

采用 Nufern 公司的 SM-EYDF-6/125-HE 双包层光纤, 光纤长度  $L$  分别为 5, 7.5, 10 m。泵浦源采用波长为 980 nm 的多模半导体激光器, 功率在 0~10 W 之间可调, 用后向泵浦的方式将光信号通过波分复用器 (WDM) 耦合进放大通路, 以获得更高的斜率效率。

测试系统中, 输出信号光由于功率较高, 超出功

率计和光谱仪所能测量的功率上限, 需要使用衰减器 (ATT) 将功率减小, 然后用耦合器将该输出信号分为 2 束, 一束输入到光功率计 (OPM) 用于测量功率, 另一束输入到光谱仪 (OSA) 用于测量光谱。为保证系统中除铒镱共掺光纤以外的其他器件不受温度应力的影响, 将铒镱共掺光纤单独固定在可调温控板上, 待温度稳定后监测输出功率和光谱。

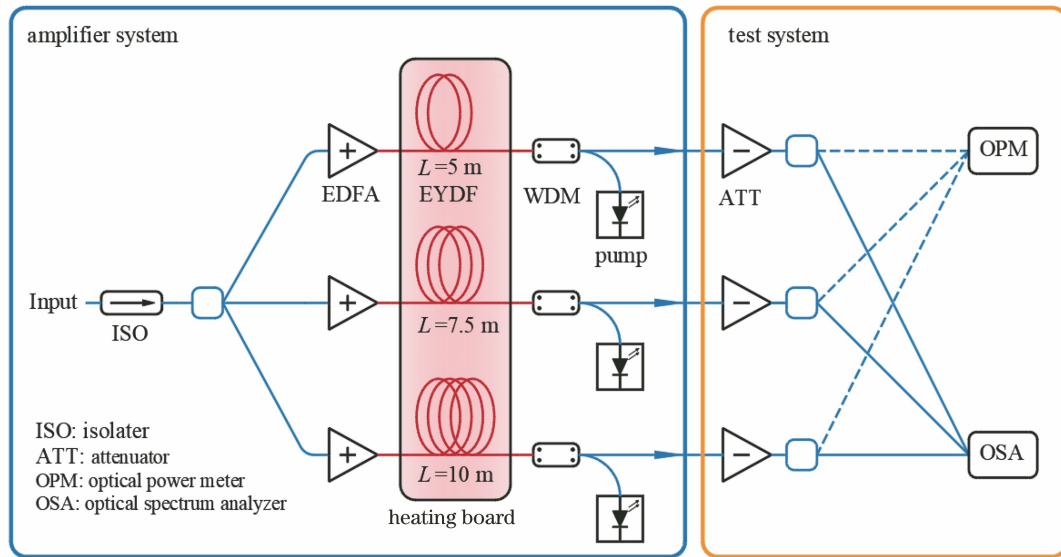


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

### 3.2 温度特性实验

首先进行温度特性实验, 当铒镱共掺光纤在室温下工作时, 将泵浦功率从 0 W 逐渐上升至 5.5 W, 记录输出功率随泵浦功率的变化。当泵浦功率较低时, 较少的铒离子和镱离子被激发至上能级, 不足以形成能够发生受激辐射的反转粒子数密度, 这导致放大器没有增益, 在泵浦功率达到某一阈值时才能检测到放大的输出信号。提高温控板的温度, 使铒镱共掺光纤工作在高温环境中, 电子器件能够正常工作的温度上限在 85 °C 左右, 因此设定温度为 85 °C, 待温度稳定后再次将泵浦功率从 0 W 逐渐上升至 5.5 W, 记录输出功率随泵浦功率的变化并与室温下的输出功率进行对比。三条不同长度的光纤通路分别在 25 °C 和 85 °C 时的输出功率与泵浦功率的关系曲线如图 2 所示。

当泵浦功率较低时, 长度为 5 m 的增益光纤在高温环境下的输出功率略低于在常温环境下的输出功率, 如图 2(a) 所示。长度为 7.5 m 和 10 m 的增益光纤的高温输出功率与低温输出功率基本持平, 如图 2(b)、(c) 所示。在 5 m 光纤的泵浦功率达到 4.02 W、7.5 m 光纤的泵浦功率达到 2.19 W、10 m

光纤的泵浦功率达到 1.52 W 时, 放大器在高温环境与常温环境下的输出功率相等, 称该泵浦功率点为温度不敏感点, 对比图 2(a)~(c) 发现增益光纤长度越长, 温度不敏感点所在的泵浦功率越低。随着泵浦功率继续升高, 三条光纤通路在高温环境下的输出功率要高于常温环境下的输出功率, 斜率效率逐渐提高, 根据温度对发射截面和吸收截面的影响理论, 可知出现上述现象的原因是: 当温度上升时, 铒离子的吸收效率提高, 同时镱离子的吸收截面增加, 促进镱离子通过交叉弛豫作用向铒离子转移泵浦能量, 这提高了铒离子波段的放大效率<sup>[16]</sup>。当泵浦功率达到 5.5 W 时, 5 m 光纤在高温环境下的输出功率为 0.439 W, 比常温环境下的输出功率 0.426 W 高 3.05%, 7.5 m 光纤在高温环境下的输出功率为 0.481 W, 比常温环境下的输出功率 0.456 W 高约 5.48%, 10 m 光纤在高温环境下的输出功率为 0.529 W, 比常温环境下的输出功率 0.507 W 高约 4.34%。实验结果证明, 在功率较高时, 使增益光纤处于较高的温度可以提高 EYDFA 的斜率效率, 进而提高输出功率; 使用长度较长的光纤能获得更高的输出功率, 但是其温度不敏感点所

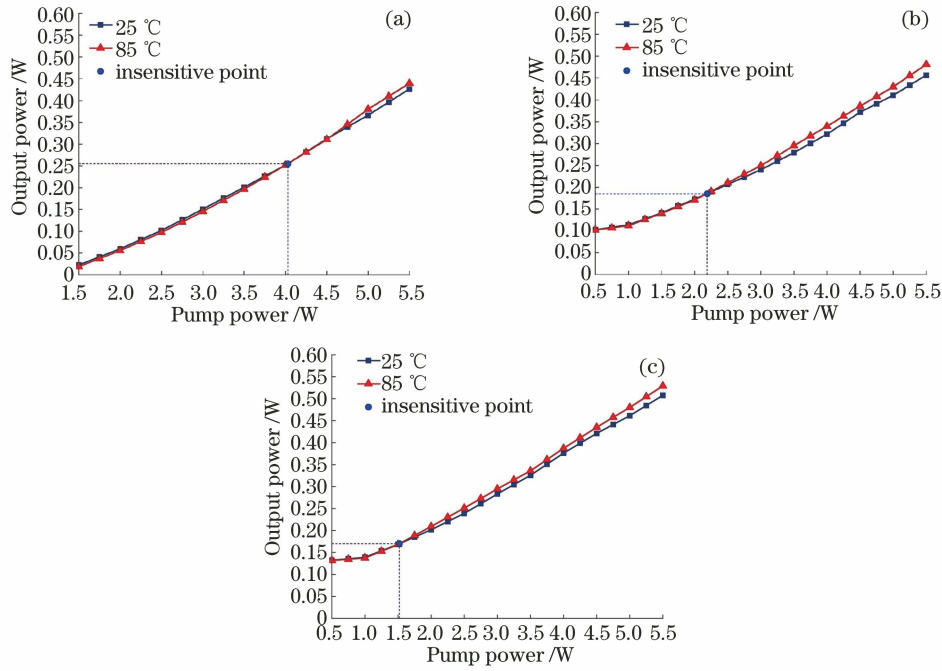


图 2 不同温度下的输出功率与泵浦功率的关系曲线。(a)  $L=5\text{ m}$ ; (b)  $L=7.5\text{ m}$ ; (c)  $L=10\text{ m}$

Fig. 2 Relationship between output power and pump power at different temperatures.

(a)  $L=5\text{ m}$ ; (b)  $L=7.5\text{ m}$ ; (c)  $L=10\text{ m}$

在的功率更低,这意味着在大功率输出时长光纤对环境温度的变化更敏感,使其无法进行长期稳定工作。

### 3.3 高温老化实验对输出功率的影响

根据 Arrhenius 加速模型的加速因子的表达式 [(9)式],当  $T=358\text{ K}$  时,加速因子  $\tau = t_{\text{air}}/t = 50.0192$ ,即铒镱共掺光纤放大器在  $358\text{ K}$  ( $85\text{ }^\circ\text{C}$ ) 温度下工作  $1\text{ h}$  的性能退化程度相当于在常温下工作  $50\text{ h}$ 。若要观察在常温环境工作  $5\text{ y}$  后的 EYDFA 性能变化,则需要在  $358\text{ K}$  的环境工作

$876\text{ h}$  ( $36.5\text{ d}$ )。保持输入信号功率为  $1\text{ mW}$ 、泵浦功率为  $10\text{ W}$ 、温控板温度为  $85\text{ }^\circ\text{C}$  不变,使铒镱共掺光纤放大器连续工作  $876\text{ h}$ ,记录输出功率和光谱随时间的变化。 $876\text{ h}$  后将加热板移除,使其在常温环境下再工作  $48\text{ h}$ ,记录输出功率和光谱的恢复情况。在高温老化过程中,三条铒镱共掺光纤放大器通路的输出功率均随着老化时间的增加而降低,以  $7.5\text{ m}$  光纤为例,其老化过程和恢复过程的输出功率随时间的变化曲线如图 3 所示。

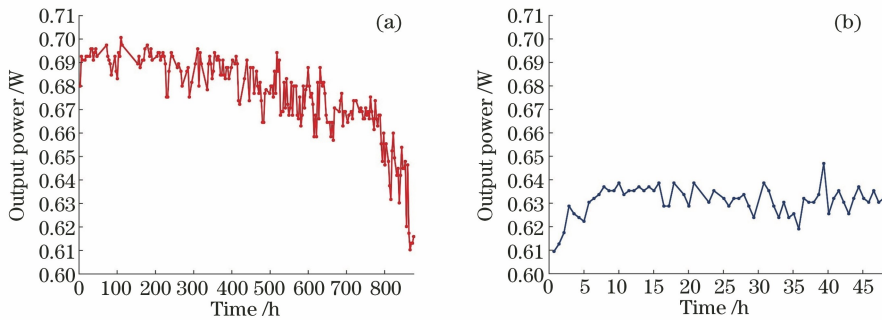


图 3 增益光纤长度为  $7.5\text{ m}$  的 EYDFA 的输出功率随时间的变化。(a) 老化过程; (b) 恢复过程

Fig. 3 Variation of output power with time of EYDFA for gain fiber length  $L$  of  $7.5\text{ m}$ .

(a) Aging process; (b) recovery process

如图 3(a)所示,随着老化时间的增加,输出信号光功率逐渐降低,且衰减速度逐渐增加,在  $85\text{ }^\circ\text{C}$  环境下持续工作  $876\text{ h}$  后,长度为  $7.5\text{ m}$  的增益光纤的输出功率降低至  $0.616\text{ W}$ ,比老化前的

$0.694\text{ W}$  降低了  $0.078\text{ W}$ ,降低了约  $11.24\%$ 。根据 Arrhenius 加速模型,该功率的降低效果相当于该 EYDFA 在常温下持续工作  $5\text{ y}$  后输出功率降低  $11.24\%$ 。在高温老化实验结束后,将工作环境调整

为室温,继续工作 48 h,进行恢复实验,恢复曲线如图 3(b)所示。随着恢复时间的增加,EYDFA 的输出功率逐渐上升,在功率恢复 15 h 以后输出功率不再上升,稳定在 0.633 W 左右,只恢复了因老化而减少的功率的 21.79%。这是由于在老化过程中,持续通光和热应力的作用导致了光纤裂纹的生成<sup>[17]</sup>,该过程不可逆,使散射损耗增大,输出功率永久性降低,从而减少 EYDFA 的使用寿命。

### 3.4 散射损耗模型的拟合和寿命预测

在输出功率随老化时间变化的数据中,按照均匀的时间间隔采样 19 个功率值,通过求解功率传输方程式[(1)、(2)式]得出信号光散射损耗的增量  $\Delta\alpha_s$ ,根据 Arrhenius 模型的加速因子[(9)式]求得常温下对应的工作时间  $t_{air}$ ,绘制散射损耗增量与常温工作时间的关系曲线,并根据指数模型[(8)式]进行曲线拟合,如图 4 所示。

通过拟合得出常数  $a=3.501\times 10^{-4}$  dB·m<sup>-1</sup>,  $b=0.7613$ ,拟合的和方差为  $2.543\times 10^{-5}$ ,接近于 0,确定系数为 0.9342,接近于 1,这证明拟合的准确性较高,验证了指数模型对于钕镱共掺光纤放大器的散射损耗增量随时间变化的适用性。为了进一步了解 EYDFA 的使用寿命以确定维护成本,通过指

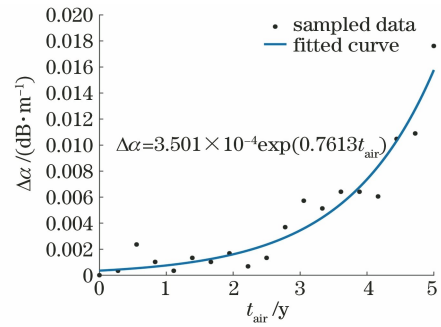


图 4 散射损耗增量随常温工作时间的变化

Fig. 4 Increase of scattering loss varies with working time at room temperature

数模型对其寿命进行预测。在老化前放大器的输出功率为 0.694 W,以增益下降 3 dB 为标准来判断该放大器是否已损坏,当放大器的输出功率下降到 0.347 W 时判断为损坏。将常数  $a$ 、 $b$  的拟合值代入(8)式,通过联立功率传输方程式[(1)、(2)式]预测出该光纤放大器的工作寿命为 7.57 y。

### 3.5 老化前后光谱的变化

为研究钕镱共掺光纤放大器持续工作 5 y 后的光谱变化,在高温老化过程中通过光谱仪监测各长度增益光纤的输出光谱,如图 5 所示,光谱测量范围为 1546~1552 nm。

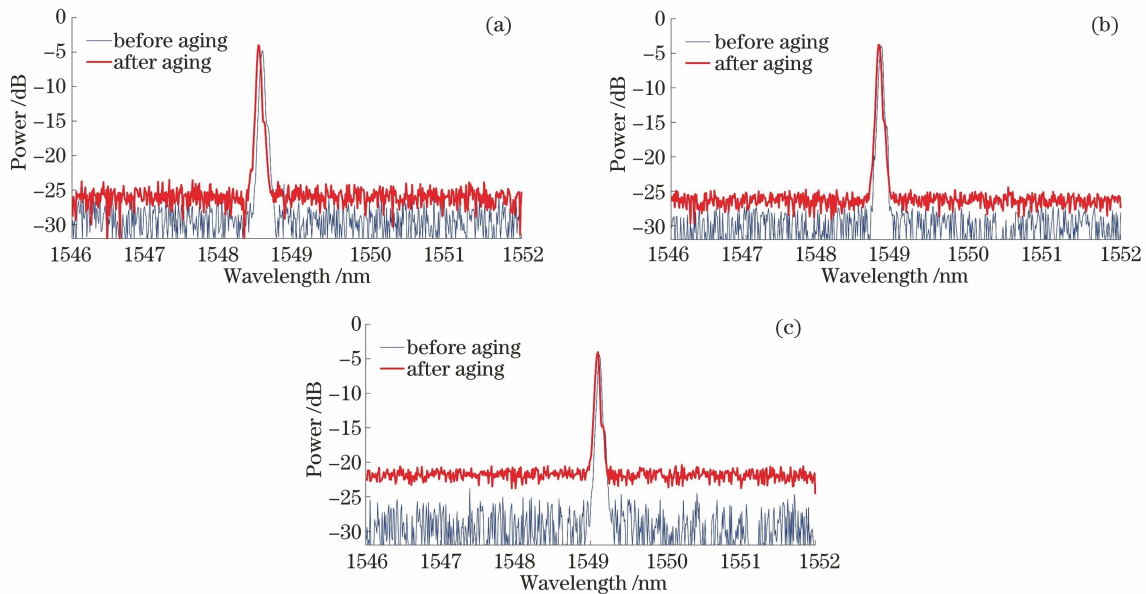


图 5 高温老化实验前后的输出光谱。(a)  $L=5$  m;(b)  $L=7.5$  m;(c)  $L=10$  m

Fig. 5 Output spectra before and after high temperature aging experiment. (a)  $L=5$  m; (b)  $L=7.5$  m; (c)  $L=10$  m

通过对比图 5(a)~(c),发现增益光纤长度越长,光谱的中心波长越长,老化前 5 m 光纤的输出光谱波峰在 1548.5 nm,7.5 m 光纤的输出光谱波峰在 1548.8 nm,10 m 光纤的输出光谱波峰在 1549.2 nm。经过 876 h 的高温老化,输出光的中心

波长均发生轻微蓝移,5 m 光纤的输出光谱波峰移动至 1548.4 nm,7.5 m 光纤的输出光谱波峰移动至 1548.7 nm,10 m 光纤的输出光谱波峰移动至 1549.1 nm。老化后,在 1546~1552 nm 波段放大的 ASE 也有所增加,5 m 光纤的 ASE 噪声增加了

3.7 dB, 7.5 m 光纤的 ASE 噪声增加了 4.1 dB, 10 m 光纤的 ASE 噪声增加了 7.8 dB。根据 Arrhenius 加速模型, EYDFA 在常温环境持续工作 5 y 后, 输出光的中心波长将发生 0.1 nm 左右的蓝移, ASE 噪声增加较多, 且增益光纤长度越长, ASE 噪声增加越多。

## 4 结 论

对铒镱共掺光纤放大器的输出功率在不同温度下的特性以及经过高温老化后的特性进行了实验研究。实验结果表明, 不同长度增益光纤的 EYDFA 的输出功率对温度的敏感性不同, 增益光纤长度越长, 对温度越敏感。当功率足够高时, 高温环境能够提高铒离子的吸收效率并增大镱离子的吸收截面, 从而提高输出功率。在 85 °C 温度下经过 876 h 的老化, 输出功率从 0.694 W 下降到 0.616 W, 即 EYDFA 在常温下工作 5 y 后输出功率将下降 11.24%, 输出光的中心波长发生轻微蓝移, ASE 噪声增加 4.1 dB, 由光纤裂纹导致的散射损耗的增大和输出功率的下降不可恢复。根据老化模型预测出铒镱共掺光纤放大器的使用寿命约为 7.57 y, 这验证了指数模型和 Arrhenius 加速老化模型在光纤放大器的老化研究方面的适用性。对于本文列举的三种铒镱共掺光纤长度, 为了在输出功率足够高的同时保证增益光纤的温度敏感性较低, 增益光纤的长度为 7.5 m 时最为合适, 为确保光纤放大器的使用寿命, 需要利用散热模块使增益光纤的工作温度维持在 25 °C。虽然高温环境工作会提高 EYDFA 的输出功率, 但高温同时会加速 EYDFA 的老化, 造成其使用寿命的缩短, 因此在实际的光纤通信系统中应用光纤放大器时应根据所需输出功率选取合适的增益光纤长度, 使其工作在该长度光纤的温度不敏感点, 同时进行精确的温度管理, 以降低温度对光纤放大器输出性能的影响并延长其使用寿命。

## 参 考 文 献

- [1] Xu S H, Yang Z M, Liu T, et al. An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at 1.5 microm[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1249-1254.
- [2] Bonfrate G, Vaninetti F, Negrisolo F. Single-frequency MOPA Er<sup>3+</sup> DBR fiber laser for WDM digital telecommunication systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(8): 1109-1111.

- [3] Poulsen C V, Varming P, Pedersen J E, et al. Applications of single frequency fiber lasers[C]//2003 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO/Europe 2003) (IEEE Cat. No.03TH8666), June 22-27, 2003, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2003: 617.
- [4] Lin Z, Jiang T M, Cheng Y S, et al. Study on Arrhenius relationship [J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2005, 23(6): 12-14.  
林震, 姜同敏, 程永生, 等. 阿伦尼斯模型研究[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2005, 23(6): 12-14.
- [5] Yamada M, Shimizu M, Okayasu M, et al. Temperature insensitive Er<sup>3+</sup>-doped optical fibre amplifiers[J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(20): 1649-1650.
- [6] Goktas H H, Yucel M. A fuzzy logic based device for the determination of temperature dependence of EDFAs [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, 50(9): 2331-2334.
- [7] Chen W T, Sha J J, Wang Y, et al. Investigation of temperature influence on output performances of high-power cladding-pumped Er, Yb co-doped fiber laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8601: 86012A.
- [8] Wang H Y, Zhang Y T, Jin L F, et al. Acceleration aging study of amplified spontaneous emission broadband source [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0405003.  
王海艳, 张雅婷, 金露凡, 等. 放大自发辐射光噪声的加速老化研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0405003.
- [9] Tang X Y, Han Q, Song H L, et al. Numerical investigation of the thermal effect on Yb-cavity-copumped Er/Yb codoped fiber amplifiers [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7): 1541-1547.
- [10] Yahel E, Hardy A. Modeling high-power Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> codoped fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(9): 2044-2052.
- [11] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, et al. Principle of laser[M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.  
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. *激光原理*[M]. 6 版. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [12] Canat G, Mollier J C, Jaouën Y, et al. Evidence of thermal effects in a high-power Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(22): 3030-3032.
- [13] McCumber D E. Theory of phonon-terminated optical masers[J]. *Physical Review*, 1964, 134(2A): A299-A306.
- [14] Zhou Y P, Zhao Y J, Zhang Y J. Arrhenius equation

- and activation energy [J]. Journal of Shihezi University, 1995(4): 76-80.
- 周遗品, 赵永金, 张延金. Arrhenius 公式与活化能 [J]. 石河子大学学报, 1995(4): 76-80.
- [15] Bayle F, Mettas A. Temperature acceleration models in reliability predictions: justification & improvements [C] // 2010 Proceedings-Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), January 25-28, 2010, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [16] Bai X L, Sheng Q, Zhang H W, et al. Influence of seed power and gain fiber temperature on output linewidth in single-frequency EYDFA [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 109-114.
- 白晓磊, 盛泉, 张海伟, 等. 单频 EYDFA 中种子光功率和增益光纤温度对输出线宽的影响 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 109-114.
- [17] Chen L M, Liu C, Hou J Y, et al. Mechanical reliability and life evaluation of optical fiber [J]. Study on Optical Communications, 2016(4): 22-24, 44.
- 陈黎明, 刘骋, 侯继勇, 等. 光纤的机械可靠性及寿命评估 [J]. 光通信研究, 2016(4): 22-24, 44.