

基于分布式传感的全光纤放大器增益光纤 纤芯温度测量

周子超, 王小林*, 张汉伟, 粟荣涛, 韩凯, 周朴, 许晓军

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

摘要 在高功率光纤激光器中,增益光纤的热效应是限制激光功率提高的重要因素之一。传统的温度测量方法只能测量到增益光纤的表面温度,无法得到增益光纤内部不同位置的温度。采用分布式光频域反射(OFDR)技术测量全光纤放大器中增益光纤纤芯的温度。对采用OFDR技术得到的温度测量结果进行了标定,验证了OFDR测量工作状态下放大器内增益光纤温度的准确性。测量了输出功率为6 W的全光纤放大器内增益光纤纤芯的温度分布,测量结果与理论相吻合。这种测温方法为未来高功率光纤激光器的温度监测提供参考。

关键词 激光光学; 光纤激光器; 光频域反射法; 温度测量; 非线性效应

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201013

Temperature Measurement for Gain Fiber Core in All-Fiber Amplifier Based on Distributed Sensing

Zhou Zichao, Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, Su Rongtao, Han Kai, Zhou Pu, Xu Xiaojun

*College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract Thermal effect of the gain fiber is one of the main factors limiting the power improvement of high power fiber amplifiers. Using traditional temperature measurement methods, we can only obtain the surface temperature of fiber while the core temperature cannot be detected. In this paper, the temperature of the gain fiber core in an all-fiber amplifier is measured by optical frequency domain reflectometry (OFDR). Firstly, the temperature measurement results by OFDR are calibrated and the measuring accuracy of the gain fiber temperature is verified when the amplifier is in operation. Then, the temperature distribution of the gain fiber core in the all-fiber amplifier is measured when the output power is 6 W and the results agree with the current theoretical results. The temperature measurement method proposed can provide a reference for the temperature monitoring in high power fiber lasers in the future.

Key words laser optics; fiber lasers; optical frequency domain reflectometry; temperature measurement; nonlinear effect

OCIS codes 140.6810; 290.5870; 060.2320; 060.2370

1 引言

近年来,随着高亮度半导体抽运技术、双包层增益光纤技术、功率合束器等技术的进步,高功率光纤激光器迅猛发展^[1-4]。目前,单模激光器的输出功率已经达到了20 kW^[5]。由于激光器增益光纤中存在背景损耗

收稿日期: 2016-09-13; 收到修改稿日期: 2016-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(61505260,61605245)、科技部重点研发计划(2016YFB0402200)

作者简介: 周子超(1992—),男,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: zhouzichao@nudt.edu.cn

导师简介: 许晓军(1973—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事气动光学、自适应光学和光纤/固体激光器相干合成等方面的研究。E-mail: xuxj@21cn.com

* 通信联系人。E-mail: chinawxllin@163.com

与量子亏损效应,光纤激光器输出功率的提高会导致增益光纤温度的升高。普通增益光纤涂覆层保持稳定的许可温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[6],为了实现长时间的稳定工作,必须严格控制光纤激光器增益光纤的温度。此外,光纤中的温度分布影响高功率光纤激光器的性能^[3,7]。增益光纤中过高的温度会使高功率光纤激光器的稳定性下降,并导致激光器中光束质量的退化及模式不稳定(MI)现象^[8-9]。光纤中过高的温度分布会影响其他非线性效应,从而影响光纤激光器的输出特性^[10-11]。因此,为了避免高功率激光器中增益光纤的热损伤,探究光纤激光器中一些非线性效应的产生机理并对增益光纤中的温度分布进行监测与控制是非常有必要的。

通常利用热像仪^[12]、光纤布拉格光栅(FBG)测量光纤温度。热像仪只能测量裸露在空气中的光纤温度,不能探测光纤纤芯的温度。FBG可以实时快速地获知光纤的温度信息,但需要剥除光纤涂覆层,这会引引起工作状态下激光器中温度的升高,不能准确获得分布式的光纤温度信息。光频域反射(OFDR)技术是一种快速精确的分布式光纤测温方法^[13-14],其基于后向瑞利散射进行传感,能够探测到光纤的损伤与熔点等反射信息,且空间分辨率较高,适用于光纤激光器中增益光纤的温度测量。2015年,Beier等^[15-16]利用OFDR技术对全光纤放大器(AMP)中增益光纤的温度进行了测量。结果显示,随着放大器输出激光功率的提高,增益光纤的温度不断升高。采用空间结构搭建全光纤放大器时,抽运光需通过空间耦合进入待测光纤,实验环境振动等因素会影响耦合注入功率的大小,从而对OFDR温度的测量造成一定的影响。此外,没有定标验证OFDR技术测量增益光纤温度的准确性,光纤中某些点的温度会随着抽运功率的提高而急剧升高,远高于光纤中的平均温度,这与实际经验不符。因此,利用OFDR技术测量全光纤放大器中增益光纤的温度分布有待进一步的研究。

本文介绍了利用OFDR技术测量光纤温度的基本原理,设计了基于主振荡功率放大(MOPA)结构的全光纤放大器,并利用OFDR技术测量了放大器内增益光纤中的温度分布。对OFDR温度测量仪的测温结果进行了标定,验证了OFDR技术测量工作状态下增益光纤温度分布的准确性,并测量了放大器输出激光功率为 6 W 时增益光纤中的温度分布。结果显示,增益光纤温度沿光纤纵向呈现一定的梯度分布,与理论结果相符,为未来高功率光纤激光器中的温度测量提供了参考。

2 实验原理

2.1 OFDR 技术的基本原理

OFDR技术最初是由Eickhoff等^[17]于1981年提出的,其基本原理如图1所示。线性扫频光源输出的连续光被光纤耦合器分为两路。一路光波注入到待测光纤中,该路激光在光纤中传播时会不断产生后向瑞利散射光,这些后向瑞利散射光通过光纤耦合器耦合到光电探测器中;另一路光束经固定反射镜反射后作为参考光返回至耦合器,同样被耦合到光电探测器中。将光电探测器中待测后向瑞利散射光和参考光的混频信号输入到频谱仪中进行频谱测量。OFDR技术中的激光光源为线性扫频光源,光纤上不同位置处的后向瑞利散射光的光频不同,即通过检测探测器上的光频可以得到光纤上的位置信息。返回的瑞利散射光的振幅与光纤的局部散射因子以及振幅衰减因子成正比。通过在频谱分析仪中进行傅里叶变换,可以同时得到光纤中所有位置的后向瑞利散射光信息,这些信息和频谱分析仪中的频率 Ω 直接对应。

利用OFDR技术测量温度时,将待测光纤看作一种连续分布的弱随机周期的布拉格光栅。外界温度的

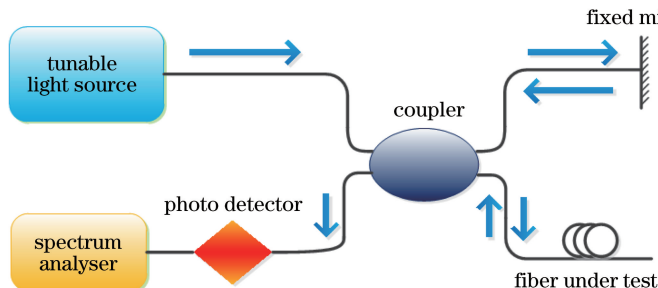


图1 OFDR技术的基本原理示意图

Fig. 1 Basic principle diagram of OFDR technology

变化会引起布拉格光栅光谱的移动及待测光纤中瑞利散射光谱的移动。瑞利散射光谱的移动量反映了光纤中温度的大小,从而实现了利用 OFDR 技术对光纤温度的测量。通过计算待测瑞利散射光谱(外界施加温度)与本地参考光谱(外界未施加温度)的互相关的峰值位置,可以得到瑞利散射光谱的移动量。在没有光纤应变等因素影响的情况下,OFDR 技术探测到的频移量与温度变化的关系为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{\Delta\nu}{\nu} = K_T \Delta T, \quad (1)$$

式中 λ 为探测光波长, $\Delta\lambda$ 为波长的移动量, ν 为探测光频率, $\Delta\nu$ 为光波频移量, K_T 为温度灵敏度系数, ΔT 为光纤温度的变化量。

由(1)式可以看出,利用 OFDR 技术只能测量光纤温度的变化量,而不能测量光纤温度的绝对值。利用 OFDR 技术对光纤进行测温时,需要两次测量光纤中的瑞利散射光:1) 在已知光纤温度的情况下,探测光纤中的瑞利散射光;2) 线性扫频光源发出探测光,再一次测量光纤中的瑞利散射光。通过比较两次瑞利散射光的频移,计算出不同位置处光纤的温度。

2.2 增益光纤温度测量实验结构

搭建了基于 MOPA 结构的两级全光纤放大器,实验结构如图 2 所示。种子光发出功率为 30 mW 的单频激光,将其输入到一级放大器中并将功率放大至约 300 mW。利用 Tapper 和波分复用器(WDM)对信号光进行二级放大。Tapper 用来监测二级放大器中产生的后向瑞利散射光,以便及时发现全光纤放大器中的受激布里渊散射效应。WDM 将波长为 1064 nm 的信号光和波长为 1550 nm 的探测光耦合到待测光纤中,传输 1550 nm 探测光的光纤型号为 SMF-28,其他臂的光纤型号为 HI-1060。二级放大器中所采用的增益光纤的型号为 PLMA-YDF-10/125-VIII,抽运光的波长为 976 nm,吸收系数为 4.8 dB/m,纤芯包层直径为 10 μm /125 μm ,光纤长度为 3 m。增益光纤末端切 14°斜角输出激光,以减弱光纤端面对探测光和信号光的反射强度。OFDR 温度测量仪发出波长为 1.5 μm 的扫频光,扫频光经 WDM 进入待测光纤,在待测光纤中返回瑞利散射光,通过测量瑞利散射光可以得到待测光纤的温度信息。

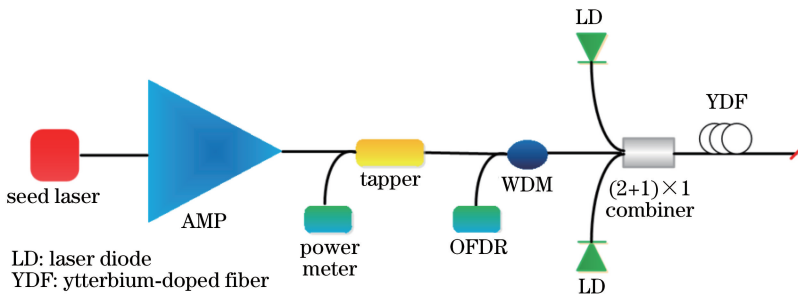


图 2 基于 OFDR 技术测量增益光纤温度的实验结构图

Fig. 2 Experimental structure to measure temperature of gain fiber based on OFDR

3 实验结果与分析

为了证明实验中 OFDR 技术测温的准确性,首先对 OFDR 技术测温结果进行了标定,而后验证了工作状态下利用 OFDR 技术测量全光纤放大器中光纤温度的准确性,最后利用 OFDR 技术测量了全光纤放大器中增益光纤的温度分布。

3.1 OFDR 技术测温结果的标定

图 2 中被测光纤部分的起始位置为熔接到 OFDR 温度测量仪的光纤点,(2+1) \times 1 合束器与掺杂光纤的熔接点位置在 3.92 m 处。在标定测温结果时,首先将掺杂光纤的一部分置于光纤加热盘中,使光纤与加热盘紧密接触,保证光纤被加热部分的纤芯、包层、涂覆层与加热盘具有相同的温度。将位置为 3.78~4.08 m 的光纤放置在加热盘中,分别调节加热盘的温度至 35,40,45,50,55,60,65,70 $^{\circ}\text{C}$,使用 OFDR 温度测量仪测量被加热部分的光纤温度,并用热电偶测量加热盘的温度。热电偶的测温结果显示,加热盘的设定温度与加热盘的实际温度相同。由于光纤与加热盘之间充分的热交换,可认为加热盘设定温度与实际光纤

温度相同。OFDR 温度测量仪的测量结果如图 3(a)所示。可以看出,随着光纤温度的升高,OFDR 温度测量仪测得的光纤温度也逐渐升高。3.92 m 处的光纤温度低于两侧被加热光纤的温度,出现这种现象的原因是光纤的熔接点处光纤涂覆层被剥除,光纤与加热盘接触不充分。

选取图 3(a)中 3.85 m 和 4.00 m 处的测量温度作为测得的光纤温度,则光纤测量温度随光纤实际温度的变化曲线如图 3(b)所示。对图中两条曲线的均值进行线性拟合,则测量到的光纤温度随光纤实际温度的变化关系为

$$T_m = 0.94T_r, \quad (2)$$

式中 T_m 为测量到的光纤温度, T_r 为光纤的实际温度。由(2)式和图 3 可以看出,OFDR 温度测量仪测得的光纤温度略低于光纤的实际温度,但测量到的温度与光纤实际温度呈线性关系,因此可以利用(2)式对 OFDR 温度测量仪测得的温度值进行校正,从而根据 OFDR 测温仪的测量值计算光纤的实际温度。

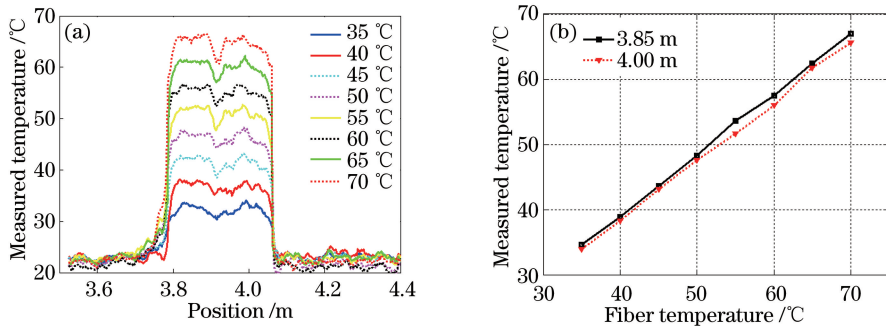


图 3 放大器无激光输出时利用 OFDR 技术测得的光纤温度。(a)不同加热盘温度下光纤位置为 3.78~4.08 m 处的温度;
(b)光纤位置为 3.85 m 和 4.00 m 处的测量温度随光纤实际温度的变化

Fig. 3 Measured fiber temperature by OFDR technology in amplifier without output laser.
(a) Fiber temperature from 3.78 m to 4.08 m under different heating plate temperatures;
(b) relationship between measured temperature and real fiber temperature at 3.85 m and 4.00 m positions

3.2 放大器内测温结果准确性验证

传统 OFDR 技术一般利用单模被动光纤来感知外界环境温度变化。全光纤放大器中的增益光纤与传统 OFDR 技术中的单模被动光纤相比,增加了许多温度测量的干扰因素,如信号光、抽运光的后向散射等。信号光、抽运光的后向散射可能会导致温度测量的不准确或无法测到温度信息;若其后向散射强度过强,会在光电探测器上产生过高的噪声,淹没了探测信号。同时,非线性效应有可能使放大器中产生与探测光相同波长的激光,从而产生新的相干效应,使光纤的温度信息测量不准确。因此,OFDR 温度测量仪对放大器中增益光纤温度测量的准确性和适用性有待进一步的实验验证。本节在放大器工作状态下测量了不同加热盘温度下的光纤温度,从而验证了实验中全光纤放大器增益光纤温度测量的准确性。

全光纤放大器输出功率为 2 W 时,将位置为 4.50~4.90 m 处的光纤放置在加热盘中,将加热盘的温度分别调节至 35,40,45,50,55,60,65,70 °C,利用 OFDR 温度测量仪测量被加热部分的光纤温度,并利用(2)式对其测量值进行校正,最终得到光纤温度的分布如图 4(a)所示。可以看出,随着加热盘温度的升高,测得的光纤温度也逐渐升高。将 4.60,4.70,4.80 m 处的温度值作为测得的光纤温度,光纤测量温度随光纤实际温度的变化曲线如图 4(b)所示。由于外界环境及光纤应力等因素的干扰,测量到的光纤温度与实际光纤温度有一定差别,这是由于在 OFDR 技术中,光纤不同位置后向瑞利散射光的频移量与光纤温度和应力都成正比,因此无法区分频移量的变化是由温度变化引起的还是由应力变化引起的。为了避免应力变化对温度测量的干扰,将测量中的光纤都放置在同一状态下,但外界环境及温度仍会不可避免地影响光纤应力的变化,从而造成温度测量误差。由图 4(a)、(b)可知,当全光纤放大器的输出功率为 2 W 时,在误差允许的范围,OFDR 温度测量仪测得的光纤温度值与光纤实际温度基本相同,故可以认为全光纤放大器的干扰因素对 OFDR 的测温基本无影响,OFDR 温度测量仪能够准确测量工作状态下增益光纤内的温度分布。

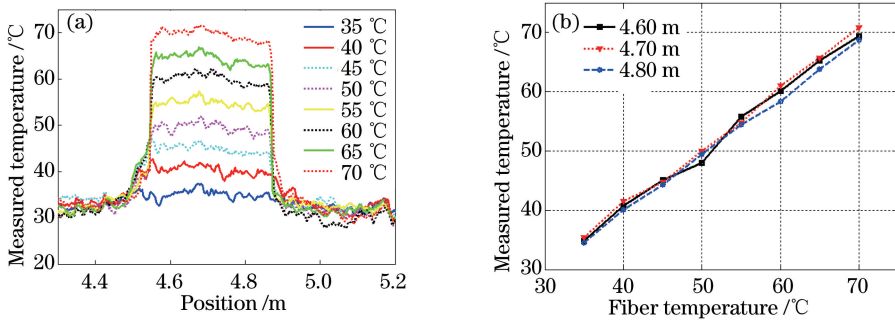


图 4 输出激光功率为 2 W 时利用 OFDR 技术测得的光纤温度。(a)不同加热盘温度下光纤位置为 4.50~4.90 m 处的温度；
(b)光纤位置为 4.60,4.70,4.80 m 处的测量温度随光纤实际温度的变化

Fig. 4 Measured fiber temperature by OFDR technology when laser power is 2 W. (a) Fiber temperature from 4.50 m to 4.90 m under different heating plate temperatures; (b) relationship between measured temperature and real fiber temperature at positions of 4.60, 4.70, 4.80 m

3.3 放大器温度测量结果

利用 OFDR 温度测量仪分别测量了放大器无输出激光、输出激光功率为 2.77 W 和 6.12 W 时增益光纤中的温度分布,并利用(2)式将测量数据转换为光纤的实际温度,结果如图 5 所示。图 5 中 3.92~6.60 m 处为增益光纤,随着激光输出功率的增加,增益光纤的整体温度也随之升高。熔接点的熔接损耗使光纤熔点处的温度最高。由于实验搭建的全光纤放大器采用前向抽运,熔点处之后增益光纤的温度沿光纤纵向逐渐减小,温度测量结果与现有理论结果相符。

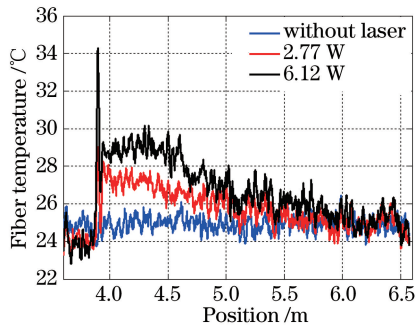


图 5 放大器不同输出功率下利用 OFDR 技术测得的增益光纤内部温度分布

Fig. 5 Internal temperature distribution of gain fiber measured by OFDR technology under different output powers of amplifier

4 结 论

利用 OFDR 技术测量了全光纤放大器内增益光纤的温度,对测温结果进行了标定,实验验证了利用 OFDR 技术测量放大器内增益光纤温度分布的准确性,为测量高功率光纤激光器内增益光纤的温度分布提供了参考。后续对高功率光纤激光器中大模场增益光纤纤芯的温度测量,还需要考虑光纤的多模特性、非线性效应及抽运光特性对 OFDR 技术温度测量的影响,从而实现高功率光纤激光器内部温度的准确测量。

参 考 文 献

- [1] Wang Xiaolin, Leng Jinyong, Du Wenbo, *et al.* 275 W MOPA all fiber narrow linewidth ytterbium doped fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0308001.
王小林, 冷进勇, 杜文博, 等. 275 W MOPA 结构全光纤窄线宽掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0308001.
- [2] 王小林, 龚智群, 周 朴, 等. 国产全光纤激光器实现 525 W 高功率输出[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0408007.
- [3] Wang Xiaolin, Tao Rumao, Zhang Hanwei, *et al.* 1 kilowatt single-end pumped all-fiber laser oscillator with good

- beam quality and high stability [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105001.
- 王小林, 陶汝茂, 张汉伟, 等. 1 kW 单端抽运、高光束质量、高稳定性全光纤激光振荡器 [J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105001.
- [4] Wang Xiaolin, Zhang Hanwei, Tao Rumao, *et al.* Laser diode pumped 4.1 kW all-fiber laser with master oscillator power amplification configuration [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0502002.
- 王小林, 张汉伟, 陶汝茂, 等. LD 抽运主振荡功率放大结构 4.1 kW 全光纤激光器 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0502002.
- [5] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 0904123.
- [6] Fan Y Y, He B, Zhou J, *et al.* Thermal effects in kilowatt all-fiber MOPA [J]. Optics Express, 2011, 19(16): 15162-15172.
- [7] Wang Xiaolin, Zhou Pu, Xiao Hu, *et al.* Narrow linewidth all-fiber laser with 666 W power output [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1261-1262.
- 王小林, 周 朴, 肖 虎, 等. 窄线宽全光纤激光器实现 666 W 高功率输出 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1261-1262.
- [8] Ward B, Robin C, Dajani I. Origin of thermal modal instabilities in large mode area fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2012, 20(10): 11407-11422.
- [9] Brar K, Savage-Leuchs M, Henrie J, *et al.* Threshold power and fiber degradation induced modal instabilities in high power fiber amplifiers based on large mode area fibers [C]. SPIE, 2014, 8961: 89611R.
- [10] Wang X L, Zhou P, Leng J Y, *et al.* A 330-W single-frequency retrievable multi-tone monolithic fiber amplifier [J]. Chinese Physics B, 2013, 22(4): 044205.
- [11] Wang X, Leng J, Zhou P, *et al.* 1.8-kW simultaneous spectral and coherent combining of three-tone nine-channel all-fiber amplifier array [J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2012, 107(3): 785-790.
- [12] Wang X L, Zhou P, Xiao H, *et al.* 310 W single-frequency all-fiber laser in master oscillator power amplification configuration [J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(8): 591-595.
- [13] Froggatt M E, Gifford D K, Kreger S, *et al.* Characterization of polarization-maintaining fiber using high-sensitivity optical-frequency-domain reflectometry [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(11): 4149-4154.
- [14] Zhou Zichao, Wang Xiaolin, Su Rongtao, *et al.* Application of distributed fiber sensing in fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080006.
- 周子超, 王小林, 粟荣涛, 等. 分布式光纤传感在光纤激光中的应用研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080006.
- [15] Beier F, Heinzig M, Haarlammert N, *et al.* *In situ* temperature measurement in high power fiber amplifiers [C]. ECLEO-EQEC, 2015: CJ-10-6.
- [16] Beier F, Heinzig M, Walbaum T, *et al.* Determination of thermal load from core temperature measurements in single mode ytterbium-doped fiber amplifiers [C]. ECLEO-EQEC, 2015: AT h2A.23
- [17] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber [J]. Applied Physics Letter, 1981, 39(9): 693-695.