

# $\gamma$ 射线导致的光子暗化对掺镱光纤激光器效率的影响

张汉伟<sup>1,2\*</sup>, 王小林<sup>2</sup>, 唐峰<sup>1</sup>, 刘文广<sup>2</sup>, 刘鹏宇<sup>1</sup>, 许晓军<sup>2</sup>, 肖余之<sup>1</sup>, 陈金宝<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海航天技术研究院宇航系统工程研究所, 上海 201108;

<sup>2</sup>国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

**摘要**  $\gamma$  射线等高能射线会使掺镱光纤产生暗化效应, 降低掺镱光纤激光器长时间运行的可靠性。测量了  $\gamma$  射线辐照总剂量对大模场掺镱光纤的损耗特性, 结果表明, 待测光纤损耗随辐照总剂量线性增大。基于辐照导致的损耗的测量结果和速率方程模型, 研究了辐照损耗产生后具有不同结构参数的激光器的效率变化。结果显示, 仅考虑辐照损耗效应时, 976 nm 泵浦的光纤放大器对辐照附加损耗的敏感性最低; 待测光纤最优信号光的中心波长为 1070 nm, 但是在 1060~1100 nm 范围内最小与最大效率仅相差 2%。本研究从掺镱光纤激光器系统层面开展探索研究, 为后续激光器的设计和实际应用提供了参考。

**关键词** 激光器; 掺镱光纤;  $\gamma$  射线; 光子暗化; 激光器效率

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.011406

## Influence of $\gamma$ Ray Induced Photo Darkening on Efficiency of Ytterbium-Doped Fiber Laser

Zhang Hanwei<sup>1,2\*</sup>, Wang Xiaolin<sup>2</sup>, Tang Feng<sup>1</sup>, Liu Wenguang<sup>2</sup>, Liu Pengyu<sup>1</sup>,  
Xu Xiaojun<sup>2</sup>, Xiao Yuzhi<sup>1</sup>, Chen Jinbao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Aerospace System Engineering, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201108, China;*

<sup>2</sup>*College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China*

**Abstract** High energy radiation such as  $\gamma$  ray induces a darkening effect on Yb-doped fiber (YDF), adversely affecting the reliability of Yb-doped fiber laser (YDFL). In this study, we assess the influence of the total dose of  $\gamma$  ray on the loss of large mode area YDF. The results show that the radiation induced loss (RIL) of the tested fiber linearly increases with the total dose. The optical efficiency of YDFL with different structural parameters after the generation of RIL is then investigated based on the measured value of RIL and rate equation model. The amplifier scheme pumped with 976-nm laser diodes exhibits the least sensitivity to the total dose of  $\gamma$  ray. The optimized central wavelength used herein is 1070 nm for the YDF; however, the efficiency difference is only 2% for wavelengths from 1060 nm to 1100 nm. This paper performs the research based on the YDFL system, providing a reference for further YDFL design and applications.

**Key words** lasers; ytterbium doped fiber;  $\gamma$  ray; photo darkening; laser efficiency

**OCIS codes** 140.3615; 140.3510

收稿日期: 2019-07-03; 修回日期: 2019-07-05; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 中国博士后科学基金(2017M621435)

\* E-mail: zhanghanwei100@163.com

# 1 引言

光纤激光器具有效率高、结构紧凑、环境适应性好等优点,已在工业加工、生物医疗和传感等领域得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。然而,随着光纤激光器连续工作时间的逐步延长,稀土掺杂光纤的输出功率和效率会因光子暗化效应而下降,从而影响了光纤激光器的长期稳定性。研究表明, $\gamma$ 射线等高能射线是导致掺稀土离子光纤产生光子暗化的原因之一,从而限制了光纤激光器在空间激光雷达、核辐射区域探测等特殊环境中的应用。目前,关于 $\gamma$ 射线对光纤激光器影响的研究主要集中在通信波段,即基于掺铒(或者铒镱共掺)、掺铥光纤的激光器<sup>[3-8]</sup>从系统层面针对掺镱光纤激光的实验研究几乎为空白,有关 $\gamma$ 射线对掺镱光纤影响的研究也相对较少<sup>[9-15]</sup>。

1996年,麻省理工学院林肯实验室根据美国国家航空航天局(NASA)标准,对掺铒光纤放大器(EDFA)中的掺铒光纤、隔离器和耦合器进行了高能射线辐照实验<sup>[16]</sup>,该实验采用电子辐射源,测试工作波长为1550 nm的EDFA在辐射速率为40 rad/s以及总剂量为100 krad辐照下的性能变化情况。该研究小组认为,EDFA系统中的辐射对掺铒光纤的影响最大,其他组件由辐射引起的性能变化对EDFA的影响可以忽略。该结果说明激光器系统研究的重点应为掺杂光纤的损耗特性。1998年,Naval实验室的Williams等<sup>[17]</sup>采用<sup>60</sup>Co作为辐射源对EDFA的光子暗化特性进行了研究,他们采用的是后向泵浦结构的EDFA,信号光源采用可调谐激光器,研究了信号波长对损耗的敏感性。实验结果表明,光纤由辐射效应引起的附加损耗与辐射剂量呈线性关系,这与早期单波长实验结果相同,而且由辐射引起的掺铒光纤的损耗在长波段比短波段表现得更明显,说明在激光器信号波长选择方面具有一定的优化空间。随后,研究人员采用不同的泵浦波长进行了测试,结果发现,对于掺铒光纤,与采用980 nm激光泵浦相比,采用1500 nm激光泵浦时光纤具有更强的抗辐射性能<sup>[18-19]</sup>。

对掺镱光纤辐照特性进行研究的最具代表性的团队是美国亚利桑那大学的Fox团队<sup>[10-12]</sup>,该团队通过测量光纤在不同辐照剂量(或速率)下的透射光谱,研究了光纤的抗光子暗化性能。结果表明,在相同的辐照情况下,波长越长,辐照导致的损耗越小,且辐照损耗与剂量、辐照速率都有关,剂量越大或者辐照速率越大,损耗越明显。2014年,研究人员通

过对比有泵浦光和辐射时光纤损耗的变化,分析了光子和辐射对光纤损耗的影响。结果表明,无论是在光子还是在辐照(单独或者共同)作用下,光纤损耗都会趋于稳定,存在976 nm的泵浦光时,辐照产生的损耗可在一定程度上得到抑制,即比单独辐照且未通光时产生的损耗更低<sup>[13]</sup>。

国内对光纤 $\gamma$ 射线辐照特性进行公开报道的研究单位主要有哈尔滨工业大学<sup>[20]</sup>、北京航空航天大学<sup>[6]</sup>、华中科技大学<sup>[21]</sup>、中国科学院上海光学精密机械研究所<sup>[15]</sup>等,研究内容主要集中在 $\gamma$ 射线对掺铒光纤或者掺铥光纤的影响上。目前,国内少有掺镱光纤 $\gamma$ 射线辐照特性的研究报道<sup>[15]</sup>,本文基于 $\gamma$ 射线对掺镱光纤辐照特性的实验结果,建立了考虑辐照损耗的掺镱光纤激光系统理论模型,研究了 $\gamma$ 射线辐照下不同激光器结构和系统参数对激光器效率的影响,期望能为设计和优化激光系统提供一定的理论指导。

## 2 $\gamma$ 射线辐照对掺镱光纤损耗特性的影响

在掺镱光纤激光器的众多器件中, $\gamma$ 射线主要影响增益光纤。 $\gamma$ 射线辐照的掺镱光纤产生了光子暗化,背景损耗增大,从而导致激光器的效率下降。为了得到辐照总剂量与掺镱光纤损耗之间的关系,先将掺镱光纤放置在存放<sup>60</sup>Co的控制室内,然后以20 rad/s的剂量率对光纤进行辐照,达到一定总剂量后取出光纤再进行损耗测量。测量系统示意图如图1所示。采用截断法测量光纤损耗,首先将白光光源利用透镜组耦合到20  $\mu\text{m}$ /400  $\mu\text{m}$ 传能光纤中,然后将传能光纤与待测掺镱光纤进行熔接,在输出端利用光谱仪测量白光光源的透过光谱,记为 $S_1$ ;然后在熔点后1 cm处截断待测光纤,再次测量输出光谱,记为 $S_2$ ;最后根据待测光纤长度 $L$ ,采用多次测量取平均的方法即可计算得到待测光纤的损耗,即 $\alpha(\lambda) = (S_2 - S_1)/L$ (单位为dB/m)。本次测试的待测光纤为20  $\mu\text{m}$ /400  $\mu\text{m}$ 掺镱光纤,915 nm附近的内包层吸收系数为0.5 dB/m。

图2所示为采用截断法测得的待测光纤经过总剂量为30 krad的 $\gamma$ 射线辐照前后的损耗曲线,可以看出,对于该光纤,短波长的背景损耗较长波长更大,两者相差甚至可以达到8倍以上,这与文献<sup>[11]</sup>报道的结果相符,即掺镱光纤背景损耗在1~1.1  $\mu\text{m}$ 范围内随波长增大而减少。另外, $\gamma$ 射线辐照前后的结果显示,辐照后由于光子暗化的产生,光

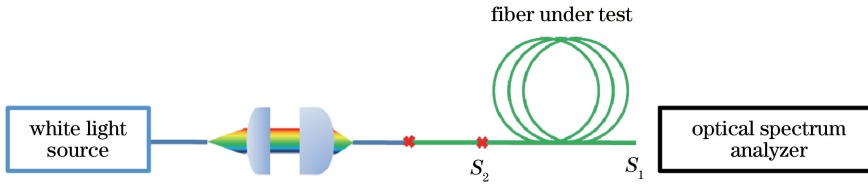


图 1 截断法测试光纤损耗示意图

Fig. 1 Schematic of fiber loss measurement by truncation method

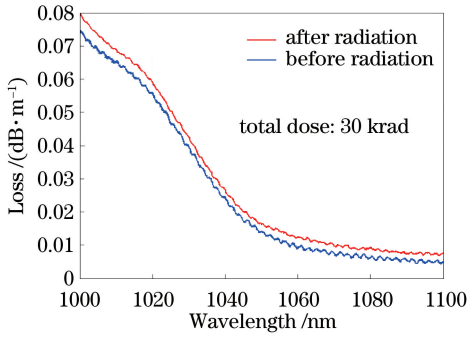


图 2 辐照前后 20 μm/400 μm 掺镱光纤的损耗曲线

Fig. 2 Loss curves of 20 μm/400 μm Yb-doped fiber before and after radiation

纤损耗增大。从损耗增加量来看,1000~1100 nm 波长范围内的损耗增量相近,但是短波长未辐照前的损耗较大,因此损耗增加的百分比相对长波而言较小。

为了验证截断法测试结果的准确性,利用在线测量法对光纤损耗进行实时测量。即将 10 mW 的 1064 nm 单模激光耦合到 80 cm 长的待测 20 μm/400 μm 掺镱光纤中,并将待测光纤置于辐照环境中,在输出端利用功率计实时监测辐照过程中的功率。图 3 所示为利用透过功率计算得到的待测光纤的损耗与辐照总剂量的关系,可以看出,随着辐照总剂量增加,光纤损耗呈线性增加,当总剂量为

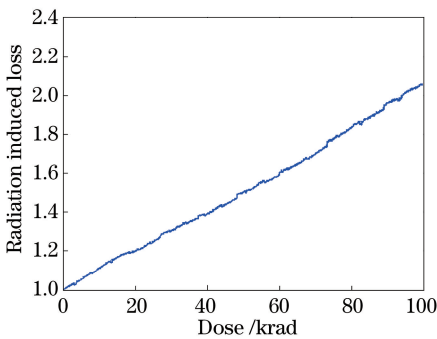


图 3 在线测量得到的待测掺镱光纤损耗与 γ 射线辐照总剂量的关系

Fig. 3 Variation in radiation induced loss of Yb-doped fiber with total dose of γ ray irradiation obtained by online measurement

94 krad时,光纤损耗增加了 1 倍;当总剂量为 30 krad时,待测光纤的损耗为初始情况的 1.3 倍。由图 2 可以看出,在 30 krad 辐照前后,1064 nm 波长处的损耗分别为 0.0085 dB/m 和 0.011 dB/m,后者约为前者的 1.29 倍。可见,两种测量方法的结果一致,这为后续的仿真分析提供了可靠的输入条件。

### 3 理论模型和数值仿真

速率方程模型可以很好地评估掺镱光纤激光器的输出功率<sup>[22]</sup>。为了定量分析辐照导致的损耗对光纤振荡器性能的影响,将实测的背景损耗结果代入速率方程的损耗项中,计算辐照对激光器效率的影响,计算过程中假设辐照后其他参数不变。表 1 给出了待测光纤的部分参数。首先,分别计算待测光纤搭建的光纤振荡器在辐照前后输出功率的变化,为了方便计算效率且不失一般性,假设振荡器的泵浦功率为 100 W,输出功率的数值即为振荡器的光光转换效率,泵浦波长为 976 nm,信号光中心波长为 1064 nm,掺镱光纤长度为 13.5 m,高反和低反光栅的反射率分别为 99% 和 10%,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,振荡器输出功率由辐照前的 71 W 减小为辐照后的 65.5 W(降为辐照前的 92.3%),说明在以上结构的激光器中,掺镱光纤损

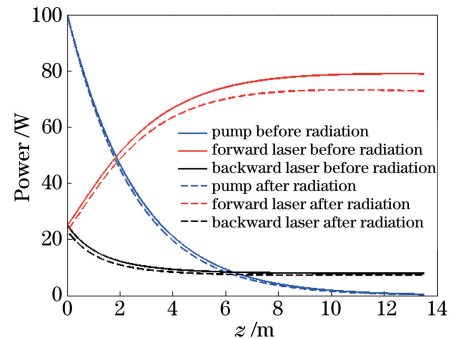


图 4 总剂量为 30 krad 的 γ 射线辐照前后光纤振荡器的功率分布

Fig. 4 Power distribution of Yb-doped fiber oscillator before and after γ-ray radiation with total dose of 30 krad

表1 速率方程中用到的待测光纤的部分参数

Table 1 Partial parameters of tested fiber used in rate equation

Parameter	Value	Unit	Parameter	Value	Unit
Core diameter	20	$\mu\text{m}$	Inner cladding diameter	400	$\mu\text{m}$
Absorption cross section @976 nm	$4.37 \times 10^{-24}$	$\text{m}^2$	Emission cross section @976 nm	$4.42 \times 10^{-24}$	$\text{m}^2$
Absorption cross section @1064 nm	$5.04 \times 10^{-27}$	$\text{m}^2$	Emission cross section @1064 nm	$3.27 \times 10^{-25}$	$\text{m}^2$
Cladding absorption coefficient @976 nm	1.5	$\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$	Cladding absorption coefficient @915 nm	0.5	$\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$

耗增加了 30%，效率下降不到 8%，具有较好的抗辐照能力。

为了进一步比较不同泵浦波长和信号波长下的激光器的效率，分别计算了采用 915 nm 和 976 nm 激光泵浦时，振荡器在信号波长为 1060~1100 nm 时的输出功率，背景损耗系数为图 2 中辐照后的损耗系数。泵浦功率保持为 100 W，为了保证相同的包层泵浦吸收系数（约 20 dB），采用 915 nm 和 976 nm 激光泵浦时的掺镱光纤长度分别为 40 m 和 13.5 m。从图 5 可以看出，不论是采用 915 nm 激光泵浦，还是采用 976 nm 激光泵浦，输出信号光波

长在 1070 nm 附近时，振荡器的效率最高。结合图 2 可以看出，对于振荡器而言，并不是波长损耗系数越小，激光器的效率越高。但总体而言，对于 1060~1100 nm 波段的激光，激光器的效率变化不大，最大值与最小值相差不到 2%。同时，对比图 5(a)、(b) 可以发现，采用 915 nm 激光泵浦时振荡器的效率非常低，仅为 976 nm 激光泵浦时的 60%。这主要是因为采用 915 nm 激光泵浦时，增益光纤的长度较长，激光损耗较大，所以在相同的辐照损耗下，采用 976 nm 激光泵浦时振荡器具有更高的抗光子暗化能力。

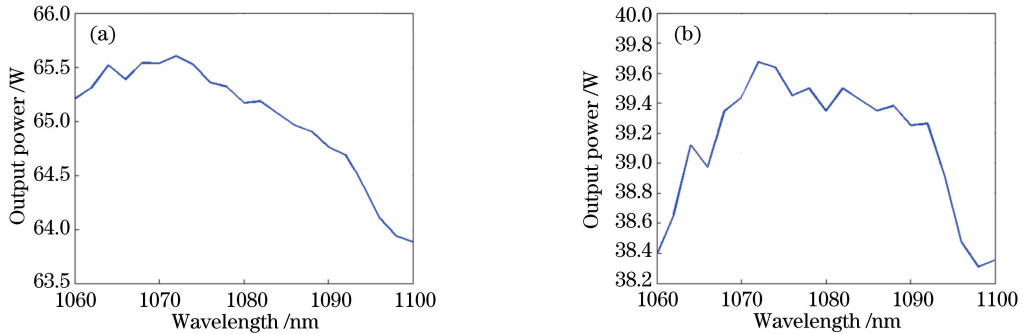


图5 采用两种波长的激光泵浦时，光纤振荡器在不同信号波长下的输出功率。(a) 976 nm；(b) 915 nm

Fig. 5 Output powers of fiber oscillator at different wavelengths pumped by laser at two wavelengths.

(a) 976 nm; (b) 915 nm

高功率光纤激光器有振荡器和放大器两种实现方案，图 6 所示为相同泵浦功率（100 W）下振荡器和放大器的功率分布情况。振荡器的计算参数与图 4 中的相同，损耗系数采用图 2 中辐照后的结果，放大器的种子功率为 5 W，中心波长为 1064 nm，其他参数与振荡器相同。从图 6 可以看出，放大器的输出功率为 90.6 W，泵浦光的光光转换效率为 85.6%（除去种子功率），比振荡器的效率（65.5%）约高 20 个百分点。这是因为相比于放大器，激光在振荡器中经历的有效长度更长，由此产生的损耗更大，在不

考虑辐照对种子影响的情况下，放大器对光子暗化的敏感度比振荡器对光子暗化的敏感度更低。图 7 所示为掺镱光纤热交换系数为  $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  时振荡器和放大器纤芯的温度分布（具体计算方法见文献[23]）。从图 7 可以看出，由于振荡器的效率较低，较多的激光能量在纤芯中转换为热，故其最高温度比放大器的最高温度高  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ，这不利于大功率情况下的激光器运转。因此，若只考虑辐照的影响，在高功率光纤激光器的设计中可以优先选择放大器方案。

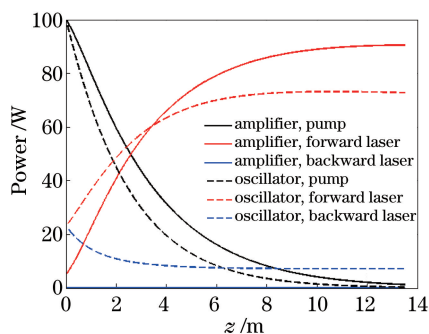


图 6 相同泵浦功率下振荡器和放大器功率沿光纤的分布

Fig. 6 Power distributions of oscillator and amplifier along fiber under same pump power

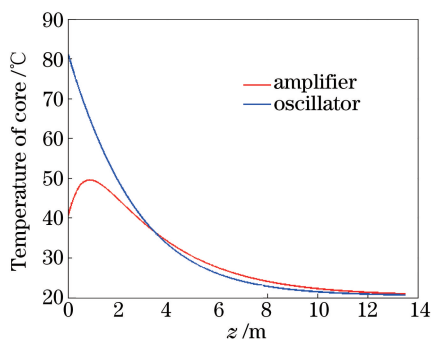


图 7 相同泵浦功率下振荡器和放大器纤芯的温度分布

Fig. 7 Temperature distributions of fiber cores of oscillator and amplifier under same pump power

## 4 结 论

本文详细测量了掺镱光纤在  $\gamma$  射线辐照下的损耗系数,对比研究了截断法测量和在线实时监测的结果,二者具有一致性。基于速率方程模型和测量得到的损耗特性,分析了激光器结构参数对输出激光效率的影响,结果表明:采用 976 nm 泵浦光纤放大器方案有利于降低辐照损耗的影响,系统中心波长为 1070 nm 时,激光器的效率最大。该结果为光纤激光器在含有  $\gamma$  射线的环境中进行传感和远距离探测等提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited] [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [2] Cariou J P, Augere B, Valla M. Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology[J]. Comptes Rendus Physique, 2006, 7(2): 213-223.
- [3] Rose T S, Gunn D, Valley G C. Gamma and proton

radiation effects in erbium-doped fiber amplifiers: active and passive measurements [J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(12): 1918-1923.

- [4] Lee J, Lee K, Jang Y S, et al. Testing of a femtosecond pulse laser in outer space[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5134.
- [5] Girard S, Laurent A, Pinsard E, et al. Radiation-hard erbium optical fiber and fiber amplifier for both low- and high-dose space missions [J]. Optics Letters, 2014, 39(9): 2541-2543.
- [6] Jin J, Hou Y X, Liu C J. Effects of color centers absorption on the spectrum of the temperature-dependent radiation-induced attenuation in fiber[J]. Applied Optics, 2015, 54(4): 940-945.
- [7] Xing Y B, Liu Y Z, Zhao N, et al. Radical passive bleaching of Tm-doped silica fiber with deuterium [J]. Optics Letters, 2018, 43(5): 1075-1078.
- [8] Henschel H, Köhn O, Schmidt H U, et al. Radiation-induced loss of rare earth doped silica fibres [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45(3): 1552-1557.
- [9] Taylor E W, Liu J. Ytterbium-doped fiber laser behavior in a gamma-ray environment [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5897: 58970E.
- [10] Fox B P, Simmons-Potter K, Thomes W J, Jr, et al. Gamma radiation effects in Yb-doped optical fiber [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6453: 645328.
- [11] Fox B P, Simmons-Potter K, Thomes W J, Jr, et al. Temperature and dose-rate effects in gamma irradiated rare-earth doped fibers[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7095: 70950B.
- [12] Fox B P, Simmons-Potter K, Thomes W J, Jr, et al. Gamma-radiation-induced photodarkening in unpumped optical fibers doped with rare-earth constituents [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(3): 1618-1625.
- [13] Duchez J B, Mady F, Mebrouk Y, et al. Interplay between photo- and radiation-induced darkening in ytterbium-doped fibers[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5969-5972.
- [14] Singleton B, Petrosky J, Pochet M, et al. Gamma-radiation-induced degradation of actively pumped single-mode ytterbium-doped optical fibers [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8982: 89820S.
- [15] Xie F H, Shao C Y, Wang M, et al. Research on photo-radiation darkening performance of ytterbium-doped silica fibers for space applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(4): 1091-1097.

- [16] Goltsov W C. Radiation-induced loss studies in Er-doped fiber amplifier systems [J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2699: 304-309.
- [17] Williams G M, Friebele E J. Space radiation effects on erbium-doped fiber devices: sources, amplifiers, and passive measurements[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45(3): 1531-1536.
- [18] Taylor E W, McKinney S J, Sanchez A D, et al. Gamma-ray induced effects in erbium-doped fiber optic amplifiers [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3440: 16-23.
- [19] Girard S, Morana A, Ladaci A, et al. Recent advances in radiation-hardened fiber-based technologies for space applications [J]. Journal of Optics, 2018, 20(9): 093001.
- [20] Li M, Ma J, Zhang X P, et al. Investigation of black box model for erbium-doped fiber amplifiers in space radiation environment [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(23): 3667-3671.
- [21] Xing Y B, Zhao N, Liao L, et al. Active radiation hardening of Tm-doped silica fiber based on pump bleaching[J]. Optics Express, 2015, 23(19): 24236-24245.
- [22] Yu H L, Zhang H W, Lü H, et al. 3.15 kW direct diode-pumped near diffraction-limited all-fiber-integrated fiber laser[J]. Applied Optics, 2015, 54(14): 4556-4560.
- [23] Zhang H W, Zhou P, Xiao H, et al. Toward high-power nonlinear fiber amplifier [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6: e51.