

光纤激光器辐照性能实验研究

池俊杰, 姜诗琦, 张琳, 于淼, 王军龙*

北京航天控制仪器研究所, 北京 100094

摘要 针对高功率光纤激光器的空间应用,采用 976 nm 和 915 nm 两种波段作为抽运源的光纤激光器进行辐照实验,采用的有源光纤均为 20/400 μm 掺镱光纤,输出功率分别为 32.68 W 和 32.04 W。辐照源为 Co^{60} 源 γ 射线,总辐照剂量为 12.4 krad,辐照后 976 nm 和 915 nm 抽运光纤激光器输出功率分别降至 20.09 W 和 5.63 W。研究表明,976 nm 抽运光纤激光器抗辐照性能优于 915 nm 抽运光纤激光器。另外,采用无源器件,如光纤合束器和包层光剥离器进行辐照实验,结果发现辐照后光纤合束器耦合效率降低,包层光剥离器的剥离度增大,故辐照对无源器件也有影响。

关键词 激光器; 光纤激光器; γ 射线; 辐致损耗; 光纤色心

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061406

Experimental Study on Radiation Performance of Fiber Lasers

Chi Junjie, Jiang Shiqi, Zhang Lin, Yu Miao, Wang Junlong

Beijing Aerospace Control Instrument Research Institute, Beijing 100094, China

Abstract For the space applications of high-power fiber lasers, we experimentally investigate the radiation performance of fiber lasers in radiation environment. The two fiber lasers, pumped at different wavelengths of 976 nm and 915 nm, are used with a same kind of 20/400 μm Yb-doped gain fiber in the experiment. After 12.4-krad irradiation by the γ ray produced by Co^{60} , the laser output powers of the 976-nm-pumped and 915-nm-pumped fiber lasers decay from 32.68 W and 32.04 W to 20.09 W and 5.63 W, respectively. The results show that the 976-nm-pumped fiber lasers are more radiation-resistant than the 915-nm-pumped fiber lasers. In addition, passive fiber devices, such as fiber combiners and cladding strippers, are used for irradiation experiments. After the irradiation, the coupling efficiency of fiber combiner is reduced, and the stripping degree of cladding stripper is increased. It is shown that irradiation has an effect on passive fiber devices.

Key words lasers; fiber lasers; γ -ray; irradiation loss; fiber color-center

OCIS codes 140.3510; 140.3615; 060.3510; 140.5560; 350.5610

1 引言

光纤激光器因其光束质量高、转换效率高、稳定性高、热控性良好、结构简单及体积小等优点,被广泛应用于科学研究、工业加工、医疗美容和军事等领域^[1-3]。随着光纤技术与宇航技术的不断发展,光纤激光器在空间中的应用也逐渐受到广泛关注,如微型卫星激光微推进技术^[4]、空间碎片激光清理技术^[5]、空间远距离激光充电技术和神秘的天基激

光武器等^[6]。空间环境包括真空、冷黑与低温、带电粒子辐射、太阳能辐射、中性大气、磁场、等离子体、电离层、空间碎片与微流星体和诱发污染的环境等,其中空间辐射是空间应用必须考虑的主要因素之一^[7],研究激光器的辐照性能是将激光器应用于空间工作的第一步。空间辐射会对光纤激光器和光无源器件产生很大影响,具体表现为:在光纤上会出现光子暗化效应、辐致发射效应、光致密效应和辐致光色心效应等^[8];在各功能单元上会出现抽运源的损

收稿日期: 2017-11-24; 收到修改稿日期: 2017-12-19

作者简介: 池俊杰(1987—),男,博士,工程师,主要从事高功率光纤激光器研发方面的研究。

E-mail: 18810925933@189.cn

* 通信联系人。E-mail: wjl_case@126.com

耗、驱动电源的损坏和激光器功率衰减等现象;在激光器核心光无源器件,会影响光纤光栅折射率带宽、光纤合束器耦合性能和包层光剥离器工作性能等^[9-10]。这些都会直接导致激光器载荷功能衰退,极大地影响设备的正常工作,甚至造成工作任务失败。

本文研究了光纤激光器及其核心光无源器件的辐照性能,对 976 nm 和 915 nm 抽运的两种光纤激光器、光纤合束器和包层光剥离器进行辐照,并比较分析辐照结果,为光纤激光器进入空间工作提供一定的理论基础和实验数据。

2 辐照对光纤激光器影响的理论分析

光纤激光器中的主要器件包括光纤光栅、光纤合束器、包层光剥离器、有源光纤、无源光纤和抽运源,以上器件中光纤材料占比高达 90%,因此可以认为光纤对光纤激光器辐照性能的影响最大。研究表明,光纤中色心的形成是导致辐致衰减的主要原因^[11-12]。光纤在研制生产中不可避免地会产生缺陷,如悬挂键、过氧基及其他微小杂质的缺陷,在接受高能辐射如空间中的电子束、中子束、离子束和 γ 射线辐射时,光纤中的缺陷结构捕获电子或空穴后会形成新的点缺陷结构,在光纤中形成新的波长吸收中心,即色心^[13-14]。每个色心的特征吸收带会吸收特定波段激光,进而改变光纤对不同激光的透过率^[15],造成输出激光功率损耗。

辐照导致光纤的损耗为辐致损耗^[16],相关研究表明,光纤辐致损耗可以表示为

$$L(R, D) \propto R^{1-f} D^f, \quad (1)$$

式中: R 为辐照剂量率; D 为辐照总剂量; f 为中间系数, $f = 1 - kT/E_0$, k 为玻耳兹曼常数, T 为温度, $E_0 = kT \ln(vt)$ 为空陷阱和充盈陷阱之间的分界能量, v 为粒子逃离陷阱的临界速度。所以辐致损耗表示为

$$L \propto (1 + t/t_0)^f - (t/t_0)^f, \quad (2)$$

式中: t_0 为光致褪色起作用的总辐照时间; t 为辐照总时间。理论分析表明,随着辐照总剂量的增加,辐致损耗逐渐减小,同时随着辐照时间的增加,辐致损耗将趋于常值。

辐致损耗源于光纤中色心的形成,相关研究表明,光纤辐照前的缺陷是辐照后色心形成的先决条件,缺陷的先质浓度^[17]可表示为

$$\frac{dn}{dt} = -k_1 n + k_2 (n_0 - n), \quad (3)$$

式中: n_0 和 n 分别为光纤缺陷的先质浓度和瞬时浓度; k_1 和 k_2 分别为色心产生率和退火率; $k_1 \cdot n$ 为先质缺陷转变为色心导致先质缺陷浓度的下降; $k_2 \cdot (n_0 - n)$ 为色心的退火。根据(3)式可得产生色心浓度 n_c 为

$$n_c = \frac{k_1 n_0}{k_1 + k_2} \{1 - \exp[-(k_1 + k_2)t]\}. \quad (4)$$

从(4)式可见,随着辐照时间的增加,色心浓度逐渐达到饱和,最终饱和值由色心产生率和退火率决定。未经辐照的光纤材料中,先质缺陷对光纤吸收谱的影响很小,光纤中自由电子及空穴非常稀少,先质缺陷俘获相应电子或空穴的几率极小,光纤透射率约为 1;辐照后的光纤,价带中的电子被激发到导带成为自由电子,并在价带位留下空穴,阳空位俘获电子形成色心,导致材料透射率下降,理论分析表明,随着辐照量的逐渐增加,光纤材料中所有阳空位都转变为色心时,色心达到饱和。

3 辐照对光纤激光器影响的实验研究

辐照实验中采用 Co^{60} 辐照源,图 1 为辐照实验具体方案示意图,辐照总剂量为 12.4 krad,剂量率约为 0.1 rad/s,分别进行 4 次连续辐照,每次辐照间隔时间不超过 0.5 h,第 1 次辐照剂量为 0.9 krad,辐照时长为 2.5 h;第 2 次辐照剂量为 4 krad,辐照时长为 11.1 h;第 3 次辐照剂量为 2.9 krad,辐照时长为 8.1 h;第 4 次辐照剂量为 4.6 krad,辐照时长为 12.8 h。

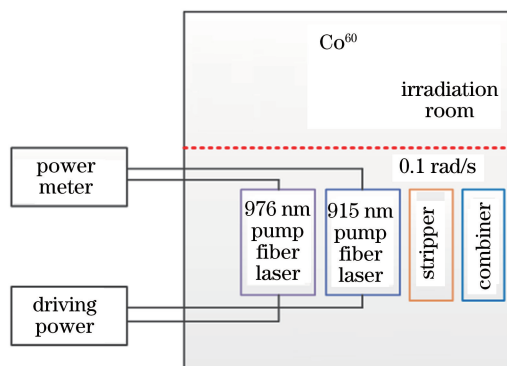


图 1 光纤激光器辐照性能实验示意图
Fig. 1 Schematic diagram of irradiation performance experiment of fiber lasers

选取两种常用抽运源,设计了同时辐照两款光纤激光器进行辐照对比的实验。图 2 为激光器光路示意图,光纤激光器为连续光输出方式,采用直线腔结构,在腔内接入 $(6+1) \times 1$ 的光纤合束器,将抽运

光耦合进增益光纤中,两种光纤激光器除抽运源不一样外,其他保持一致。976 nm 抽运的光纤激光器采用 6 支抽运 LD,每支 LD 最高输出功率为 20 W;915 nm 抽运的光纤激光器采用 5 支抽运 LD,每支 LD 最高输出功率为 30 W。增益光纤采用的是 20/

400 μm 掺镱光纤,在 976 nm 抽运光下吸收系数为 1.2 dB/m,使用的光纤长度约为 7 m;在 915 nm 抽运光下吸收系数为 0.4 dB/m,使用的光纤长度约为 24 m。采用高反光纤光栅(HR-FG)和 10% 反射的低反光栅(10%R-HG)构成激光谐振腔。

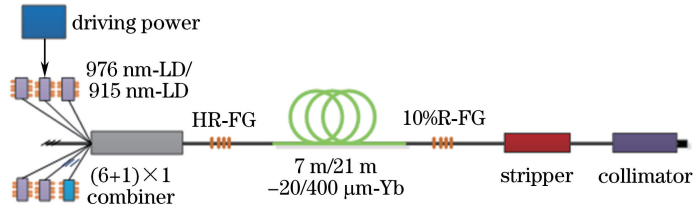


图 2 976 nm 和 915 nm 抽运的光纤激光器光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 976 nm and 915-nm-pumped fiber lasers

总辐照剂量为 12.4 krad 时,辐照后 976 nm 和 915 nm 抽运的光纤激光器输出功率分别由 32.68 W 和 32.04 W 降至 20.09 W 和 5.63 W。同时,对比分析了不同剂量辐照后两种抽运光纤激光器输出功率,并绘制了功率输出曲线,如图 3(a)所示,总辐照剂量分别为 0.9,4.9,7.8,12.4 krad 时,915 nm 抽运激光器输出功率损耗分别为 976 nm 抽运激光器的 8.1 倍、4.7 倍、4.4 倍和 3.8 倍。可见,相同辐照剂量下,915 nm 抽运激光器输出功率损耗大于 976 nm

抽运激光器。单位有源光纤长度在不同总辐照剂量下的激光器输出功率辐致损耗如图 3(b)所示,不同辐照剂量下,对于单位长度有源光纤,915 nm 抽运激光器与 976 nm 抽运激光器的功率辐致损耗几乎一致,从放大的插图可见,损耗差值低于 0.05 dB。计算可知,对于 20/400 μm 有源光纤(976 nm@1.2 dB/m),单位长度有源光纤在单位辐射剂量下对于光纤激光器输出功率的辐致损耗约为 0.025 dB。

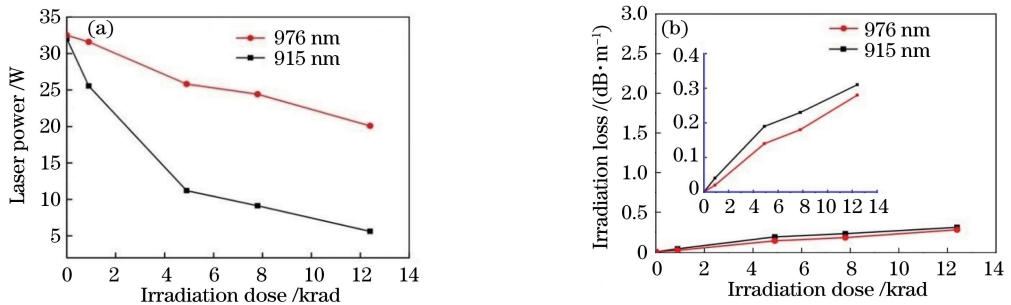


图 3 (a)辐照后 915 nm 与 976 nm 抽运光纤激光器输出功率对比;(b)单位长度有源光纤下的激光器功率辐致损耗,

插图为主图放大图

Fig. 3 (a) Comparison of 915 nm and 976 nm-pumped fiber lasers output power after irradiation;

(b) fiber laser irradiation loss in unit active fiber length, the illustration is an enlarged view

图 4(a)为两种抽运源辐照前后输出功率,可见辐照后两种抽运源的输出抽运功率与辐照前抽运源电流功率曲线基本重合,说明辐照对 915 nm 和 976 nm 抽运源的输出功率基本无影响。图 4(b)为激光器输出激光的波长,可知激光波长为 1080 nm,无放大自发辐射(ASE)、受激拉曼(SRS)和荧光现象,说明辐照对光纤激光器输出波长特性基本无影响。

因此可以认为,光纤中色心的形成是导致激光器在辐照中功率衰减的主要原因,激光器辐照后,输出功率下降主要是有源光纤中色心的产生造成的,

增加有源光纤长度会加大色心产生几率,同时辐致损耗增大。两种激光器输出功率一致的情况下(辐照前输出功率均约为 32 W),915 nm 抽运激光器采用的有源光纤长度是 976 nm 抽运的 3 倍左右,故相同辐照剂量下其功率损耗最大(辐照后 976 nm 和 915 nm 抽运光纤激光器输出功率分别降至 20.09 W 和 5.63 W)。可以推断,976 nm 抽运光纤激光器在空间工作时具有较强的抗辐照性能;同时可以看出,随着辐照总剂量的增加,辐致损耗逐渐下降并减缓,这与理论研究中的“色心饱和”和“辐致衰减”结果吻合。

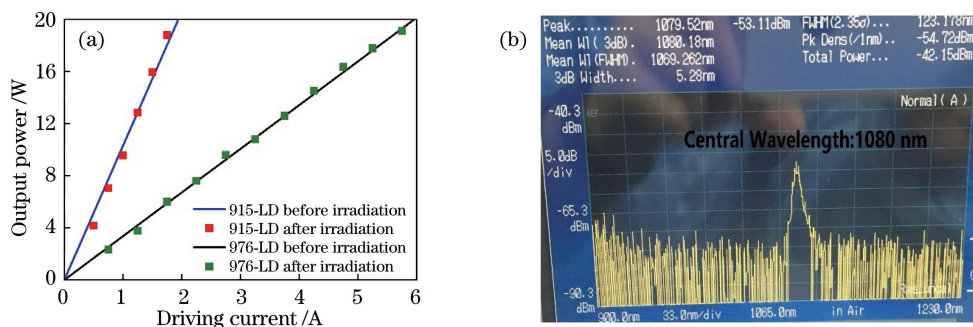


图 4 (a)辐照前后 915 nm 与 976 nm 抽运源输出抽运功率对比数据; (b)光纤激光器输出波长监测数据

Fig. 4 (a) Comparison of output powers before and after irradiation; (b) output spectral data of the fiber laser

4 辐照对光无源器件影响的实验研究

辐照对光纤合束器和包层光剥离器(CPS)两种光无源器件影响的实验示意图如图 1 所示。同时辐照光无源器件和光纤激光器,辐照总剂量为 12 krad,辐照前后采用相同抽运源测试光纤合束器每个抽运臂的通光耦合效率,如图 5(a)所示,辐照前抽运纤 1 和 2 的耦合效率分别为 97.8% 和 97.7%,辐照后分别为 90.2% 和 89.3%。可见光纤合束器抽运纤 1 和 2 的耦合效率分别衰减了 7.6% 和 8.4%;同时测试了包层光剥离器的剥离度,如图 5(b)所示,辐照前剥离度为 16.4 dB,辐照后为

17.5 dB,辐照后剥离度增大了 1.1 dB。

研究表明:1) 辐照对光无源器件也会产生影响,降低光纤器件的通光率,在合束器上表现为耦合效率下降,在剥离器上表现为剥离度增大;2) 光无源器件的主要成分是无源光纤,即辐照对光纤器件的影响主要是对无源光纤的影响,这是由于无源光纤辐照后产生了色心,既包括光纤纤芯色心,又包括光纤包层色心,二者均会降低无源光纤对激光的透过率,进而影响器件性能;3) 同等辐照剂量下,辐照对有源光纤的影响远大于无源光纤,这是由于有源光纤中掺入的离子极大增加了其产生缺陷的几率,所以有源光纤相比无源光纤更容易产生色心。

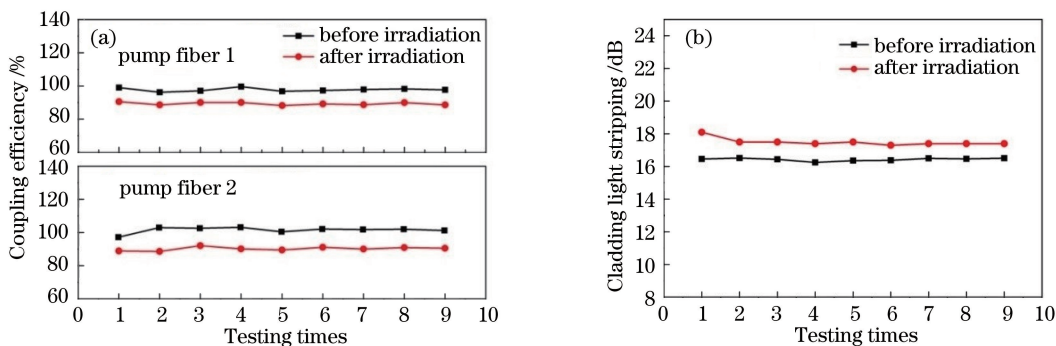


图 5 (a)辐照前后光纤合束器耦合效率对比; (b)辐照前后包层光剥离器剥离度对比

Fig. 5 (a) Comparison of coupling efficiency of fiber combiner before and after irradiation;

(b) comparison of cladding light stripping of fiber stripper before and after irradiation

5 结论

本文对光纤激光器及其核心光无源器件进行了辐照性能研究,实验对象包括 915 nm-LD 抽运光纤激光器、976 nm-LD 抽运光纤激光器、光纤合束器和包层光剥离器。实验结果表明,两种光纤激光器接受辐照后,输出功率均有不同程度降低,976 nm-LD 抽运光纤激光器相比 915 nm-LD 抽运光纤激光器,功率下降速度缓慢,且下降程度较小,抗辐照性

能优越;光纤合束器和包层光剥离器接受辐照后,也产生相关的辐致损耗,光纤合束器表现为耦合效率降低,包层光剥离器表现为剥离度增大;辐致损耗对 20/400 μm 有源光纤的影响可导致激光器输出功率衰减,单位长度光纤在单位辐射剂量下对光纤激光器输出功率的辐致损耗约为 0.025 dB。

参考文献

[1] Lu L B, Wang H P, Guan Y C, *et al.* Laser

- microfabrication of biomedical devices [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0102005.
- 卢立斌, 王海鹏, 管迎春, 等. 激光微加工技术制备生物医用器械的现状与进展 [J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0102005.
- [2] Gan Q J, Jiang B X, Zhang P D, *et al.* Research progress of high average power solid-state lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 010003.
- 甘啟俊, 姜本学, 张攀德, 等. 高平均功率固体激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 010003.
- [3] Jiang M, Ma P F, Zhou P, *et al.* Performance of laser beam combination system based on brightness [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0714001.
- 姜曼, 马鹏飞, 周朴, 等. 基于亮度的激光光束合成系统性能 [J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0714001.
- [4] Ye J F, Hong Y J, Wang G Y, *et al.* Research progress in micro-laser plasma propulsion [J]. Chinese Optics, 2011, 4(4): 319-326.
- 叶继飞, 洪延姬, 王广宇, 等. 激光等离子体微推进技术的研究进展 [J]. 中国光学, 2011, 4(4): 319-326.
- [5] Zhu M Z, Chen Y, Tan C Y, *et al.* Development of foreign spaceborne laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3241-3248.
- 朱孟真, 程勇, 谭朝勇, 等. 国外空间激光的发展现状 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3241-3248.
- [6] Cheng Y, Guo Y L, Tang H, *et al.* Development trend of tactical laser weapons [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 110004.
- 程勇, 郭延龙, 唐璜, 等. 战术激光武器的发展动向 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 110004.
- [7] Shen Z C, Yan D K. Present status and prospects of space radiation environmental engineering [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(3): 229-240.
- 沈自才, 闫德葵. 空间辐射环境工程的现状及发展趋势 [J]. 航天器环境工程, 2014, 31(3): 229-240.
- [8] Gilbert R M. Photobleaching of radiation-induced color centers in a germania-doped glass fiber [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1982, 29(6): 1484-1488.
- [9] Berghmans F, Brichard B, Fernandez A F, *et al.* An introduction to radiation effects on optical components and fiber optic sensors [M] // Bock W J, Gannot I, Tanev S. Optical Waveguide Sensing and Imaging, Dordrecht: Springer, 2008: 127-165.
- [10] Brichard B, Borgermans P, Fernandez A F, *et al.* Radiation effect in silica optical fiber exposed to intense mixed neutron-gamma radiation field [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(6): 2069-2073.
- [11] Huang H Q, Zhao N, Chen G, *et al.* Effects of γ -radiation on Yb-doped fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(20): 200201.
- 黄宏琪, 赵南, 陈瑰, 等. γ 射线辐照对掺 Yb 光纤材料性能的影响 [J]. 物理学报, 2014, 63(20): 200201.
- [12] Wang W, Wang X F, Li J, *et al.* Experiment on performance of erbium-doped fiber source for high performance fiber-optic gyroscope in a space irradiation environment [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1826-1830.
- 王巍, 王学峰, 李晶, 等. 高精度光纤陀螺用掺铒光纤光源辐照性能试验 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1826-1830.
- [13] Griscom D L. Self-trapped holes in pure silica glass: a history of their discovery and characterization and an example of their critical significance to industry [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2006, 352(23/24/25): 2601-2617.
- [14] Griscom D L. Trapped-electron centers in pure and doped glassy silica: a review and synthesis [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2011, 357(8): 1945-1962.
- [15] Jin J, Xu R M, Liu J X, *et al.* Effect of radiation dose on radiation-induced attenuation and temperature dependence in optical fiber [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(11): 1272-1276.
- 金靖, 徐娆美, 刘纪勋, 等. 辐射剂量对光纤辐射致衰减及温度依赖性的影响 [J]. 光子学报, 2013, 42(11): 1272-1276.
- [16] Williams G M, Wright B M, Mack W D, *et al.* Projecting the performance of erbium-doped devices in a space irradiation environment [C]. SPIE, 1999, 3848: 271-280.
- [17] Gusarov A I, Doyle D B. Modeling of gamma-radiation impact on transmission characteristics of optical glasses [C]. SPIE, 2002, 4547: 78-85.