

光纤放大器辐照损伤光致退火实验研究

蔡岳丰¹, 刘海峰^{1,2*}, 刘波^{1,2}, 乔元哲³, 闫宝罗¹, 孟森森¹

(1. 南开大学 现代光学研究所, 天津 300350;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000; 3. 北京遥感设备研究所, 北京 100094)

摘要: 针对辐照环境下光纤放大器输出性能的退化问题, 对光纤放大器进行了辐照损伤后的光致退火实验研究。首先, 介绍了辐射对光纤放大器的影响, 在总辐照剂量约为 280 krad 时进行了辐照实验, 获知辐射会引起输出功率、光信噪比分别下降 7 dB、18 dB; 然后, 根据光致退火机理, 进行了光纤放大器光致退火实验。实验结果表明: 光致退火降低了光纤放大器的辐照损耗, 与退火之前相比, 放大器的输出功率恢复了 5.2 dB, 输出 OSNR 恢复了 13 dB。

关键词: 光纤放大器; 输出功率; 光致退火; 辐照环境; 辐照损耗

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)09-0028-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.09.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental study of optical annealing induced by irradiation damage of optical fiber amplifier

CAI Yuefeng¹, LIU Haifeng^{1,2*}, LIU Bo^{1,2}, QIAO Yuanzhe³, YAN Baoluo¹, MENG Sensen¹

(1. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Southern Ocean Science and Engineering Guangdong

Laboratory (Zhuhai), Zhuhai Guangdong 519000, China; 3. Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming at the degradation of the output performance of optical fiber amplifier in irradiation environment, the photoannealing experiment of optical fiber amplifier after irradiation damage is carried out. Firstly, the influence of radiation on optical fiber amplifier is introduced. The irradiation experiment is carried out when the total irradiation dose is about 280 krad. It is known that the radiation will reduce the output power and optical signal-to-noise ratio by 7 dB and 18 dB respectively. Then, according to the mechanism of photoannealing, the photoannealing experiment of fiber amplifier is carried out. The experimental results show that the radiation-induced loss of the fiber amplifier is reduced by optical annealing. Compared with that before annealing, the output power of the amplifier is restored by 5.2 dB and the output OSNR is restored by 13 dB.

Key words: optical fiber amplifier; output power; optical annealing; irradiation environment; radiation-induced loss

0 引言

随着通信技术的不断发展, 空间光通信功耗低、性价比高的优势正逐步体现。星载光纤放大器作为卫星光通信中的核心光器件, 对空间辐射非常敏感^[1]。

收稿日期: 2021-02-06。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1802302)资助; 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61727815)资助; 天津市高层次创新创业团队项目资助; 天津市科技计划项目-青年基金项目(20JCQN-JC01480)资助; 天津市科技计划项目-技术创新引导专项(20YDT-PJC00760)资助。

作者简介: 蔡岳丰(1997—), 男, 硕士研究生, 2019 年于大连理工大学获得理学学士学位, 现就读于南开大学电子信息与光学工程学院光学工程专业, 主要从事自由光通信系统设计及关键技术方面的研究工作。参与了国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重大科研仪器研制项目等各类工程项目共 6 项。

* 通信作者: 刘海峰(1986—), 男, 实验师, 主要研究方向为光纤激光放大技术和光电子技术。



通常情况下, 当掺铒光纤和铒镱共掺光纤受到的辐照剂量达到几十 krad 量级时, 其性能会受到较大影响^[2]。于是, 有人提出了用光致退火技术来恢复光纤性能^[3], 即当光纤被辐照时, 通过导入大功率激光的方式来抑制光纤内色心的形成, 最终起到加快恢复进程的作用^[4]。

目前, 已有较多学者研究了光致退火技术对光纤放大器抗辐照性能的提升情况。2010 年, PENG T S 等人^[5]采用了 976 nm 的激光进行退火, 在室温下将辐射产生的功率损耗由 25 dB 降低至 8 dB。2012 年, GIRARD S 等人^[6]在 90 krad 的辐照剂量下采用 2 种方法进行光纤放大器的抗辐照性能测试, 最终测得铈元素掺杂下的放大器输出功率下降了 1.5 dB, 继续进行预载氢处理后, 能将辐照损耗降至 0.2 dB。2018 年, AYOUB L 等人^[7]研究了一种抗辐照光纤放大器, 在 100 krad 的总辐照剂量下, 放大器的输出功率损耗低于 0.2 dB。但以上的研究工作都是基于光致退火作用来提升正处在

辐照环境下的光纤放大器的抗辐照性能, 本文则研究光致退火对光纤放大器辐照损伤的恢复作用。

1 空间辐射环境对光纤放大器的影响分析

1.1 辐射对光纤放大器的影响

光纤放大器内的增益光纤采用双包层结构, 其中的含氟聚合物在 γ 射线的诱导下极易出现较大程度的损伤, 这会直接导致整个增益光纤的色心平衡点升高, 进而造成光纤放大器的放大性能大幅度降低。此外, 光纤放大器在制造过程中会掺杂铝、镧等元素, 这些元素与光纤中点缺陷的产生有很大关系, 使得光纤放大器对辐照射线的敏感度较高。

1.2 光纤放大器辐照实验

辐照实验采用的辐射源为 ^{60}Co , 辐照剂量率为 0.59755 krad/min , 实验环境温度常温, 辐照时间共进行 465 min , 总辐照剂量约为 280 krad 。通过测定光纤放大器的输出功率和输出光信噪比 (OSNR) 的变化可以分析辐照对放大器输出性能的影响, 辐照实验结果如图 1 所示。可以看出, 光纤放大器输出功率和输出 OSNR 都随着辐照剂量的增加而下降; 相较于初始状态, 辐射引起的输出功率、OSNR 损耗分别为 7 dB 、 18 dB 。这证明了空间辐射对光纤放大器的输出性能会产生影响, 且随着辐照总剂量的增加, 辐射对放大器的影响程度也相应增大。

2 光纤放大器光致退火实验

2.1 光致退火机理

光纤放大器在辐射环境下会在芯层和包层的位置形成电子空穴对, 被自身缺陷和杂质俘获后产生缺陷中心 (即色心效应), 这种色心效应是影响其输出性能的主要原因。但高能量辐射在光纤中产生的缺陷会在晶格中不断运动, 辐射对放大器的损伤可以随着缺陷的运动而减轻。

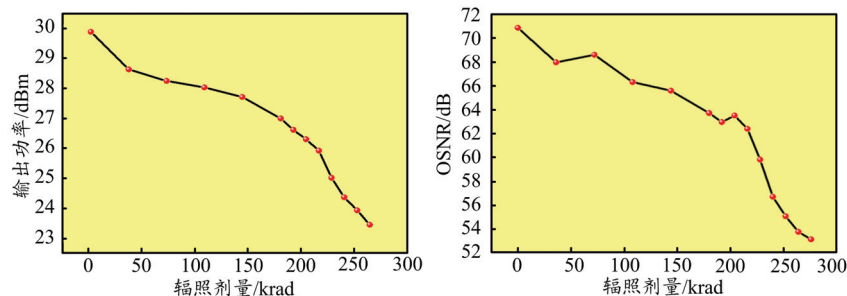
在光致退火过程中, 高功率的退火光为晶格中运

动的缺陷提供了更多的动能, 加速了晶格的恢复速度。同时, 增益光纤中的稀土离子可以吸收退火光来产生更多的热量, 引起光纤纤芯位置温度的升高, 导致材料中的粒子发生更加剧烈的热运动, 最终实现载流子复合速率的提升, 使晶格中的辐致损耗更容易得到恢复。一般地, 光致退火时, 光功率的增加或者退火光波长的变短都会提高晶格内缺陷获得的总动能, 因而光致退火的效果相应变得更加明显。

2.2 光致退火实验设计

退火实验中光纤放大器的内部结构如图 2 所示。本次辐照实验采用的光纤放大器为铒镱共掺光纤放大器, 含有两级放大系统, 其中第一级放大系统的增益光纤为 15 m 长的掺铒光纤, 第二级放大系统的增益光纤为 8 m 长的双包层铒镱共掺光纤。处于正常工作状态时, 输入的信号光经过隔离器 1 进入 WDM1 后与一级泵浦 980 nm 的泵浦光通过前向泵浦的方式合束至掺铒光纤中, 放大后的信号光经过隔离器 2 和滤波器后进入第二级放大系统。考虑到需要的输出光强度较高, 第二级放大系统采用 940 nm 、 915 nm 波长后向泵浦的方式, 即泵浦光通过合束器后反向耦合至铒镱共掺光纤中。放大器内的电路部分负责将供电电流转化为泵浦光能量实现信号光的放大, 两级泵浦的工作电压、电流均可调。放大器外壁添加了金属防护外壳, 用于改善光纤放大器的抗辐照性能。

本次实验将第二级放大系统中的 940 nm 、 915 nm 波长后向泵浦光作为退火光, 通过调整二级泵浦的工作电压、电流即可设定退火光的光功率。实验中设置二级泵浦的工作电流为 7 A , 对应于 940 nm 、 915 nm 波长退火光的功率分别为 6.2 W 和 6.0 W 。在该退火条件下进行一段时间的通光后, 将二级泵浦的工作电流还原为 3 A (辐照时), 待输出功率稳定后利用光功率计进行读数并记录通光时间, 比较相同工作条件下的输出功率即可分析光致退火对光纤放大器输出性能的恢复程度。



(a) 光纤放大器输出功率变化情况

(b) 光纤放大器输出 OSNR 变化情况

图 1 辐照实验结果

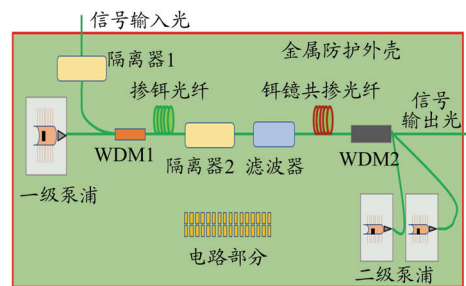


图 2 光致退火实验的光放大器原理图

2.3 退火实验结果及分析

本文进行了 44 d 的退火实验, 其中用于光致退火的通强光时间约为 80 h, 其它时间为非工作状态下的自然退火时间。在退火期间内, 光纤放大器输出功率在光致退火条件下的变化情况如图 3 所示。

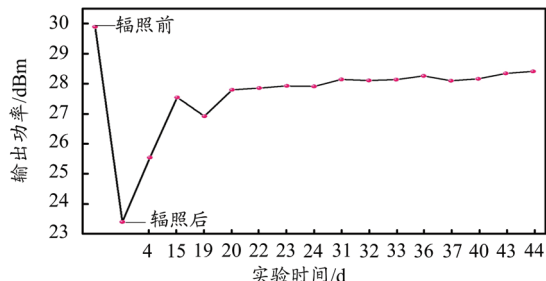
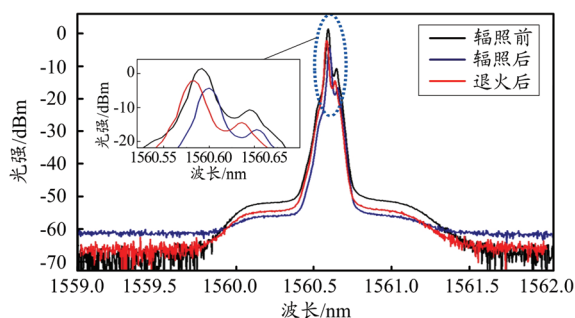
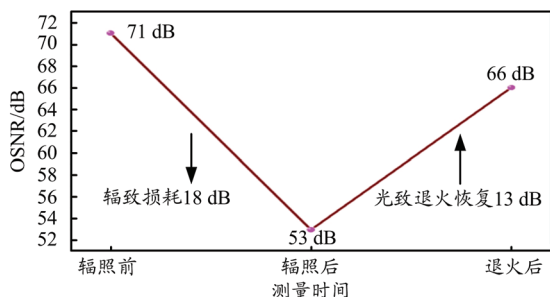


图3 光致退火条件下光纤放大器输出功率的变化情况

从图 3 可知, 光致退火过程使放大器的输出功率由辐照后的 23.3 dBm 恢复至 28.5 dBm, 恢复了 5.2 dB, 比辐照前的输出功率下降了约 1.5 dB。光致退火期间光纤放大器的输出功率整体保持增长趋势, 但增长速度逐渐趋缓。辐照后的 15 d 内光纤放大器的输出功率恢复了约 4 dB, 之后的 29 d 共恢复了 1 dB。这是由于退火效应的恢复效果与光纤中的色心数量有关, 即辐照后的光纤放大器内色心数较多, 光致退火的效果较好。但随着退火的进行, 光纤内的色心数不断降低, 因而退火效应的恢复速度逐渐趋缓。辐照前后与退火后的光纤放大器输出光谱及输出 OSNR 变化如图 4 所示。



(a) 光纤放大器输出光谱变化情况



(b) 光纤放大器输出 OSNR 变化情况

图4 光纤放大器在辐照前后与退火后的输出光谱、OSNR 变化情况

从图 4(a) 可以看出, 辐照后的输出光谱噪声功率上升较大, 而中心波长处的光强出现了较大下降, 但通过光致退火过程后, 中心波长处的光强得到了一定程度的恢复, 噪声也被抑制到与辐照前的噪声功率相近的程度。从图 4(b) 输出 OSNR 变化情况可以看出, 光致退火过程使输出 OSNR 由退火前的 53 dB 恢复至退火后的 66 dB, 即光纤放大器在退火后的输出 OSNR 恢复了 13 dB, 与辐照前的输出 OSNR 相差 5 dB。该结果表明: 光致退火可以有效地改善光纤放大器在辐照后的输出性能, 降低光纤放大器的辐照损伤程度。

3 结束语

光纤放大器在空间辐射环境中的输出性能会发生退化, 采用针对辐照损伤的光致退火技术作为一种恢复光纤中晶格缺陷的手段能降低光纤放大器的辐照损耗。本文通过辐照实验验证了辐射对光纤放大器输出性能的影响, 并进行了辐照损伤光致退火实验, 在光致退火过程后, 光纤放大器的输出光功率恢复了 5.2 dB, 输出 OSNR 恢复了 13 dB。对于星载光放大器, 光致退火技术能利用设备的已有光源进行光致退火, 且无需添加其它光退火器件, 整个退火过程也不会损伤光纤的结构。因此, 这项技术在加快星载光纤放大器辐照损伤恢复速度方面具备较大的应用潜力。

参考文献:

- [1] 王岩, 李洪祚, 郝子强. 空间光通信中 EDFA 的抗辐射技术的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 17-25.
- [2] WANG Q, TIAN C P, WANG Y Y, et al. Review of radiation hardening techniques for EDFAs in space environment [C]// SPIE. Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering. Bellingham: SPIE, 2015: 95211D-1-95211D-6.
- [3] LADACI A, GIRARD S, MESCIA L, et al. Optimized radiation-hardened erbium doped fiber amplifiers for long space missions [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(16): 588-596.
- [4] 刘业辉. 基于退火效应的光纤放大器抗辐射技术 [J]. 光通信技术, 2014, 38(8): 39-41.
- [5] PENG T S, HUANG Y W, WANG L A, et al. Photo-annealing effects on gamma radiation induced attenuation in erbium doped fibers and the sources using 532 nm and 976 nm lasers [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(4): 2327-2331.
- [6] GIRARD S, VIVONA M, LAURENT A, et al. Radiation hardening techniques for Er/Yb doped optical fibers and amplifiers for space application [J]. Optics Express, 2012, 20(8): 8457-8465.
- [7] AYOUB L, SYLVAIN G, LUCIANO M, et al. Radiation hardened high-power $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -codoped fiber amplifiers for free-space optical communications[J]. Optics Letters, 2018, 43(13): 3049-3052.