

小型化抗辐照 EDFA 研究

江 镭,郭 跃,刘 静,金操帆

(中国电子科技集团公司 第二十三研究所,上海 201900)

摘要:为了研制面向卫星激光通信的小型化抗辐照掺铒光纤放大器(EDFA),介绍了掺铒光纤(EDF)在辐照环境下的失效机理,研究了不同掺铒浓度 EDF 的辐照性能,对比了不同材料复合屏蔽结构的抗辐照性能,最终实现了一种尺寸为 60 mm×60 mm×15 mm、输出功率超过 23 dBm 和在 20 krad(SI)辐照剂量下输出功率波动幅度低于 0.1 dB 的高性能小型化抗辐照 EDFA。

关键词:抗辐照;掺铒光纤放大器;小型化;卫星光通信

中图分类号:TN929.1 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2023)01-0077-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.01.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on miniaturized anti-irradiation EDFA

JIANG Lei, GUO Yue, LIU JING, JIN Caofan

(The 23th Research Institute of CETC, Shanghai 201900, China)

Abstract: In order to develop a miniaturized anti-irradiation erbium-doped fiber amplifier(EDFA) for satellite laser communication, the failure mechanism of erbium-doped fiber(EDF) in the irradiation environment is introduced, the irradiation performance of different erbium-doped concentrations EDF is studied, and the anti-irradiation performance of different material composite shielding structures is compared. Finally, a high-performance miniaturized anti-irradiation EDFA with a size of 60 mm×60 mm×15 mm, an output power of more than 23 dBm and an output power fluctuation of less than 0.1 dB at 20 krad(SI) irradiation dose is realized.

Key words: anti-irradiation, erbium-doped fiber amplifier, miniaturization, intersatellite laser communication

0 引言

随着光纤通信的快速发展,掺铒光纤放大器(EDFA)凭借优异的光学性能已被广泛地应用于陆地和海底通信系统。目前,卫星激光通信需求日益增长,迫切需要使用 EDFA 提高空间系统远距离通信能力^[1-3]。然而,EDFA 易受空间辐射环境的影响,随着辐射强度的增加其增益会显著下降,严重影响传输性能。因此,开展抗辐照 EDFA 的研究显得尤为重要,抗辐照 EDFA 已成为研究热点^[4-7]。2010 年,马晶团队^[4]首次通过实验分析了 EDFA 输出功率、中心波长等性能参数在星

间光通信应用中受辐照环境的影响,明确了 EDFA 在低轨应用的可行性。2013 年,长春理工大学团队^[5]提出通过退色心、预辐射和载氢等抗辐照技术来提高 EDFA 的抗辐照能力,最终降低了掺铒光纤(EDF)的辐射衰减量。2017 年,胡宗华等人^[6]基于一种新型 EDF 搭建了 EDFA 实验系统,EDFA 在 70 krad(SI)的辐照剂量下的增益下降了 0.35 dB。同年,LADACI A 等人^[7]通过优化模型仿真和实验对比了 EDFA 的抗辐照性能,发现优化光纤长度和泵浦方案对降低 EDFA 辐照敏感性具有重要意义。

上述文献虽然开展了 EDFA 的抗辐照研究,但主要侧重于 EDF 而非 EDFA,尤其未涉及 EDFA 的小型化研究。为此,本文开展小型化抗辐照 EDFA 研究。

1 空间环境 EDFA 失效机理

地球轨道空间环境主要存在 3 种辐射源:银河宇宙辐射、地磁捕获辐射和太阳质子事件,成份主要为

收稿日期:2022-05-03。

作者简介:江镭(1988—),男,湖北黄冈人,硕士,工程师,主要从事光通信传输系统的核心光电器件的应用研究工作,包括微弱光信号低噪声放大、大功率激光放大、长寿命高可靠性等,先后完成国家及相关部委科研项目 7 项,获中国电子科技集团公司科技进步二等奖 1 项。



高能粒子(如质子、电子)或伽马射线。这些空间辐射对宇航光电子系统造成的损伤主要有电离辐射总剂量(TID)、单粒子效应(SEE)和位移损伤(DD)^[8-9]。理论研究和试验发现,EDFA 在空间环境下的失效主要来源于其核心器件——EDF 的辐照损伤。这种辐照损伤是由 TID 效应造成的。当电离辐射穿过 EDF 时会产生大量的电子空穴对,随着辐射的积累,这些带电粒子积累到一定程度将会改变 EDF 光学性能,其程度取决于 EDF 吸收的 TID。TID 效应引起 EDF 光学性能的显著变化,直接表象是光纤材料中色心的产生^[10]。色心形成后,EDF 对光谱中紫外波段表现出强烈的吸收特性,几乎呈不透明状态;虽然在红外波段的吸收相对较小,但光的传输效率降低,且损耗系数增加^[11]。

在 高能粒子辐照条件下,光纤产生的色心浓度与辐照剂量的关系近似表示为

$$N(D) = \frac{k_c k_p N_c}{k_c + k_p} D \quad (1)$$

其中, $N(D)$ 为色心浓度, D 为辐照剂量, N_c 为二氧化硅疲劳键浓度, k_c 为二氧化硅网格中疲劳键和氧位移形成色心的概率, k_p 为点缺陷形成色心的概率。

根据式(1)可知,色心浓度与辐照剂量呈近似线性关系,即 EDF 在辐照环境下产生色心引起的传输损耗与辐照剂量呈近似线性关系,使得 EDFA 增益或输出功率呈线性下降趋势。

2 实验与分析

2.1 实验系统

本文自主搭建的实验系统如图 1 所示,主要分为 2 个区域:监控区和辐射区。光源、EDFA 驱动模块(无 EDF)、电源和功率计等监测设备位于监控区,不受辐射影响。辐射源采用 Co-60 源,仅将待辐照的 EDF 放置于辐射区内,这样可以有效避免其它器件受辐照的影响,降低实验结果的准确性。调整待辐照样品的 EDF

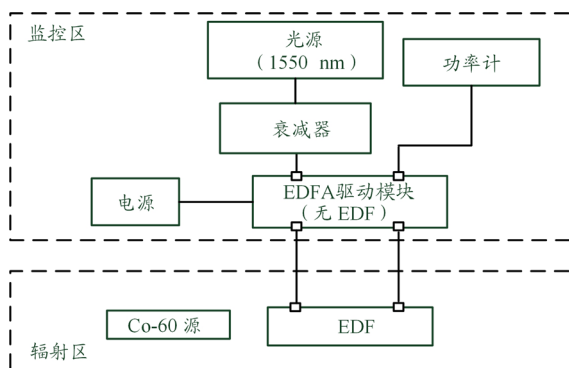


图 1 辐照实验系统示意图

距离辐射源的中心位置,可以获得不同的辐照剂量率。

2.2 EDF 的辐照性能

作为 EDFA 核心器件,EDF 的辐照性能很大程度上决定着 EDFA 的辐照性能。为了进一步验证 EDF 的辐照失效模式并确保实验的可靠性,本文选择相同掺杂工艺、不同掺铒浓度的 3 种光纤进行对比实验。实验辐照剂量率为 1 rad(SI)/s,累积辐照剂量为 20 krad(SI),泵浦源为半导体激光器(波长为 974 nm),光源为分布式反馈激光器(波长为 1550 nm)。当输入光功率为 0 dBm 时,本文采用相同的泵浦功率对 3 种不同吸收峰值系数的 EDF (EDF₁、EDF₂ 和 EDF₃ 的吸收峰值系数分别为 7 dB/m、22 dB/m 和 36 dB/m) 进行泵浦,表征 EDF 掺铒浓度的高低(吸收峰值系数越大,EDF 的掺铒浓度越高;吸收峰值系数越小,EDF 的掺铒浓度越低)。3 种 EDF 输出功率随辐照剂量的变化情况如图 2 所示,可以看出,3 种 EDF 在辐照情况下输出功率与辐照剂量均呈近似线性关系,这与理论分析保持一致。但是,相同的辐照剂量引起 3 种 EDF 的功率下降程度差异显著,对于掺铒浓度越高的 EDF(EDF₃),辐照引起的功率下降越小,EDFA 抗辐照能力越强;反之,对于掺铒浓度越低的 EDF(EDF₁),辐照引起的功率下降越大,EDFA 抗辐照能力越差。

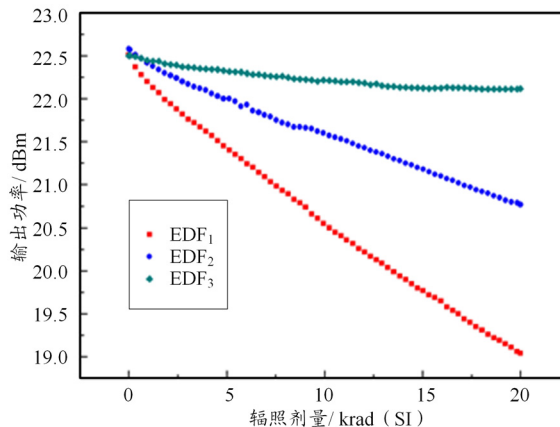


图 2 不同 EDF 辐照性能对比

小型化是 EDFA 宇航应用的一个重要指标。使用掺杂浓度越高的 EDF 可以有效减少掺杂纤的使用长度,有利于 EDFA 的小型化制作。但是,不可一味地提高 EDF 的掺杂浓度,否则,将导致 EDFA 的噪声系数恶化。因此,设计小型化抗辐照 EDFA,需在不恶化 EDFA 噪声系数的前提下,尽可能选择掺铒浓度较高的 EDF,减少掺杂光纤的使用长度。

上述实验表明,辐照必然会引起 EDFA 输出功率或增益的降低,导致无法满足传输要求。

2.3 抗辐照屏蔽结构

抗辐照屏蔽结构设计是提升 EDFA 抗辐照性能的有效手段,小型化 EDFA 设计更是如此。常用屏蔽材料有硬铝、钨合金和铅玻璃等,考虑到 EDFA 本身的发热情况和工程应用,本文选择硬铝和钨合金 2 种材料进行辐照对比实验,同时对比了不同厚度硬铝的屏蔽效果。实验采用的 3 种屏蔽结构外形尺寸均为 60 mm×60 mm×15 mm,材料分别为 2 mm 厚钨合金、2 mm 厚硬铝和 3 mm 厚硬铝。3 组 EDF 具有相同的掺杂浓度和长度,EDF 在 2 mm 厚钨合金、2 mm 厚硬铝和 3 mm 厚硬铝 3 种屏蔽结构下的辐射衰减系数分别为 0.617 dB/krad、0.372 dB/krad 和 0.288 dB/krad,抗辐照性能对比情况如图 3 所示。可以看出,相同材料、不同厚度的硬铝辐照屏蔽效果差异较大。根据上述辐射衰减系数可计算得出 3 mm 厚硬铝比 2 mm 厚硬铝屏蔽效果提高约 29%;密度更高的钨合金屏蔽 EDF 的效果不如硬铝好,其原因有待进一步研究。为了提高 EDFA 抗辐照性能,小型化 EDFA 设计时可以适当增加屏蔽结构厚度,但需平衡航天发射成本,因为厚度增加到一定程度时,屏蔽效果相对不明显而重量显著增加,增加了航天发射成本。

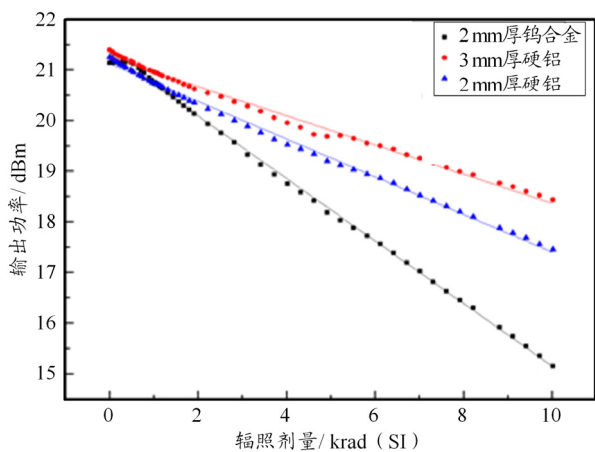


图3 不同材料屏蔽结构抗辐照性能对比

2.4 小型化 EDFA 性能

首先,本文在研制小型化 EDFA 时选择了高掺杂浓度的 EDF,同时对 EDF 进行了抗辐照预处理,进一步提升 EDF 本身的抗辐照性能,EDF 长度最终被控制在 3 m 以内。

然后,按照等效铝厚度对 EDFA 的屏蔽结构进行了优化设计,采用多种材料复合的形式提高屏蔽效果。EDFA 结构主体材料采用硬铝作为外屏蔽层,内部采用薄铅作为二次屏蔽层。

本文确定复合外壳材料后,依照等效铝厚度分析整体屏蔽性能。辐照屏蔽等效铝厚度分析可以采用以下公式进行计算。

$$\rho = M/S \quad (2)$$

$$H = \rho / 0.27 \quad (3)$$

其中, ρ 为材料的质量面密度, M 为材料大面积部分的质量(需扣除材料中质量过度集中部分的质量,如蜂窝板中的预埋件质量), S 为材料的实际面积(需扣除材料中挖空部分的面积,如开孔), H 为材料的等效铝厚度。

按式(2)、式(3)可计算出 1 mm 铅辐照屏蔽等效铝厚度约为 4 mm。以 EDFA 整体重量为边界综合考虑,外屏蔽层硬铝厚度设计为 2 mm,二次屏蔽层铅厚度设计为 0.5 mm,这样小型化 EDFA 屏蔽等效铝厚度约达到 4 mm。

最后,在电学设计上采用纯模拟电路构建 EDFA 泵浦激光器的高稳定性电流驱动和半导体制冷器(TEC)控制电路,并利用末级输出功率采样构建输出-检测-再输出的闭环比例积分微分(PID)控制算法。图4为自主研制的小型化 EDFA 实物照片,EDFA 尺寸仅为 60 mm×60 mm×15 mm。在 EDFA 如此小的情况下,其抗辐照性能图如图5所示。可以看出,EDFA 输出功率超过 23 dBm,在 20 krad(SI)辐照剂量下,输出功率基本保持不变,整个辐照过程中输出功率稳定,波动幅度不超过 0.1 dB。

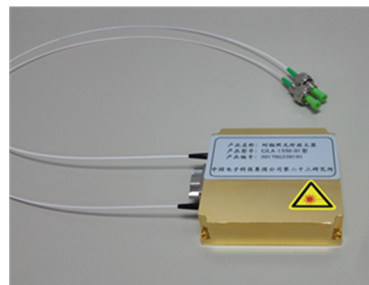


图4 小型化抗辐照 EDFA 实物图

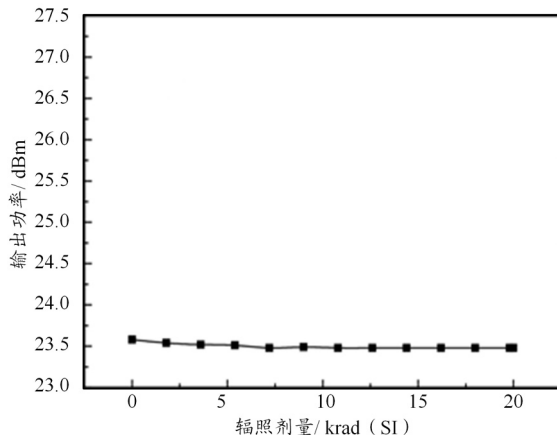


图5 小型化 EDFA 抗辐照性能图

3 结束语

本文开展了面向卫星光通信应用的小型化抗辐照 EDFA 研究,理论分析了 EDF 失效机理,分别对比了不同掺铒浓度 EDF 的抗辐照性能,钨合金和硬铝 2 种常用屏蔽材料的辐照屏蔽性能,以及不同厚度硬铝结构的辐照屏蔽性能差异,研制了高性能小型化抗辐照 EDFA,尺寸仅为 60 mm×60 mm×15 mm,输出功率超过 23 dBm,20 krad(SI)辐照剂量下输出功率波动幅度低于 0.1 dB,在卫星光通信中具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 马晶,韩琦琦,谭立英,等. 卫星光通信技术发展及其影响因素分析[J]. 光通信技术,2004,28(10):45-47.
- [2] SODNIK Z, FURCH B, LUTZ H. Optical intersatellite communication[J]. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 2010, 16(5): 1051-1057.
- [3] 赵尚弘,吴继礼,李勇军,等. 卫星激光通信现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展,2011,48(9):25-39.
- [4] MA J, LI M, TAN L Y, et al. Space radiation effect on EDFA for inter-satellite optical communication[J]. Optik, 2010, 121(6): 535-538.
- [5] 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):13-21.
- [6] 胡宗华,刘波,刘海峰,等. 基于一种新型掺铒光纤的抗辐照 EDFA 研究[J]. 光通信技术,2017,41(8):5-8.
- [7] 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): 163104-1-163104-10.
- [8] 王同权,沈永平,王尚武,等. 空间辐射环境中的辐射效应[J]. 国防科技大学学报,1999,21(4):36-39.
- [9] 侯睿,赵尚弘,李勇军,等. 空间环境对卫星光通信系统的影响因素分析[J]. 光通信技术,2008,32(4):61-64.
- [10] GIRARD S, KUHNHENN J, GUSAROV A, et al. Radiation effects on silica-based optical fibers: Recent advances and future challenges [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(3): 2015-2036.
- [11] 宋镜明,郭建华,王学勤,等. 光纤辐射致衰减效应[J]. 激光与光电子学进展,2012,49(8):58-64.