

引用格式: WEN Xuan, YANG Shengsheng, GAO Xin, et al. Effect of La Doping on the Radiation Damage Effect of Er<sup>3+</sup>-Doped Silica Fibers for Space Laser Communication[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(2):0206003  
文轩, 杨生胜, 高欣, 等. La 掺杂对用于空间激光通信的掺铒光纤辐射损伤效应的影响[J]. 光子学报, 2023, 52(2):0206003

# La 掺杂对用于空间激光通信的掺铒光纤辐射损伤效应的影响

文轩<sup>1</sup>, 杨生胜<sup>1</sup>, 高欣<sup>1</sup>, 折胜飞<sup>2,3</sup>, 王根成<sup>2,3</sup>, 冯展祖<sup>1</sup>, 王俊<sup>1</sup>, 银鸿<sup>1</sup>,  
侯超奇<sup>2,3</sup>, 张剑锋<sup>1</sup>

(1 兰州空间技术物理研究所 空间环境材料行为及评价技术国防科技重点实验室, 兰州 730000)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(3 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

**摘要:**为验证 La 掺杂对于掺铒光纤抗辐照性能的影响, 采用 La 掺杂光纤与无 La 掺杂光纤进行光纤辐照实验。使用 <sup>60</sup>Co 辐照源在常温下对光纤进行累积剂量 100 krad, 剂量率 6.17 rad/s 的辐照实验。结果发现, La 掺杂光纤在 1 200 nm 处损耗为 0.030 67 dB(km·krad), 相比于无 La 掺杂光纤 0.039 53 dB(km·krad) 更低, 且 La 掺杂光纤在辐照环境下的增益变化更小。通过光纤吸收谱和 EPR 谱辐照前后的对比, 确定了 Al-OHC 缺陷为影响光纤辐致损耗的关键因素。La 掺杂可以在一定程度上代替 Al 作为 Er 离子的分散剂从而增强光纤的抗辐照能力, 且 La 掺杂对光纤的增益性能不会产生负面影响。该研究可为后续特种光纤在空间应用中的抗辐射加固设计提供参考。

**关键词:**激光通信; 掺铒光纤; 辐射效应;  $\gamma$  辐照; 镧掺杂

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235202.0206003

## 0 引言

空间激光通信具有传输带宽大、传输速率高、抗干扰能力强等突出优点, 是未来通信技术的重要发展方向<sup>[1]</sup>。目前的空间激光通信终端需要通过调制器保证高调制速率, 同时需要放大器在发射端实现较大的光功率输出<sup>[2]</sup>。掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)工作在 1 550 nm 通信窗口, 采用掺铒光纤(Erbium-Doped Fiber, EDF)作为光增益组件, 通过石英光纤中铒(Er)离子的三能级结构实现 1 550 nm 光信号的放大<sup>[3-4]</sup>, 具有增益能力强, 增益带宽大, 工作性能稳定等优点<sup>[5]</sup>。然而, 在空间辐射环境下, 空间中的高能粒子会对掺铒光纤造成冲击, 使光纤中产生大量载流子, 载流子与光纤中原有缺陷相结合形成新的色心缺陷, 色心缺陷在可见光波段的高损耗引起的拖尾效应会导致光纤工作波段损耗急剧上升, 进一步导致掺铒光纤增益性能下降<sup>[6]</sup>。为解决这些问题, 国内外科研工作者针对掺铒光纤抗辐照加固技术开展了大量的研究工作。

目前掺铒光纤中一般选用 Al、Ge 作为共掺组分, 这是由于 Al 可以分散 EDF 中的 Er 离子, 抑制荧光淬灭效应, 提高 Er 最大掺杂浓度<sup>[7]</sup>。Ge 由于其较高的折射率, 可以调控光纤纤芯折射率, 控制光纤数值孔径。根据国内外的研究, EDF 的辐射诱发的衰减(Radiation Induced Attenuation, RIA)的产生主要与 Al 相关的缺陷有关, 辐照过程中载流子会与 Al 形成 Al-OHC 和 Al-E' 缺陷, 这两种缺陷对光纤工作波段的损耗上升贡献最大<sup>[8]</sup>。为了减小 RIA, 研究人员提出了几种方法: 通过少掺杂 Al 组分以减小辐照后 Al 相关缺陷; 通过 Ge 等

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(No. 6142910210210), 航天科技集团自主研发项目

第一作者: 文轩, wenxuandyx@163.com

通讯作者: 杨生胜, 2syang@sina.com

收稿日期: 2022-09-27; 录用日期: 2022-11-10

<http://www.photon.ac.cn>

元素的掺杂实现对于辐照后 Al 相关缺陷抑制;通过改善掺杂手段实现无 Al 组分光纤制备。由于 Er 在石英网络结构中自发聚集的特性<sup>[9]</sup>,减小 Al 组分含量会导致最大 Er 掺杂浓度的下降,不利于高性能耐辐照掺铒光纤的制备<sup>[10]</sup>。而 Ge/Al 组分调控对光纤中 Al-OHC 缺陷的抑制能力有限,且 Ge 大量掺杂会影响光纤纤芯的折射率。为同时达到分散 Er 离子和降低 Al 使用量的目的,需要一种既能起到分散 Er 离子作用,又不会在辐照前后影响光纤增益性能的耐辐照处理方法。镧(La)作为稀土元素,与 Er 一样存在于石英网络结构的间隙位置,可以与 Er 离子竞争附着位点,起到分散 Er 离子的作用<sup>[11]</sup>,可以在不影响最大 Er 离子掺杂量的前提下实现 Al 的低剂量掺杂。目前针对镧掺杂的掺铒光纤辐射效应研究很少,进一步了解 La 掺杂掺铒光纤的辐射诱导吸收产生机制对于保持掺铒光纤在恶劣辐照环境中的性能至关重要。

本文选用镧掺杂掺铒光纤与非掺镧掺铒光纤作为试验样品,利用<sup>60</sup>Co 辐照源对两种光纤开展在线与离线辐照测试,通过光纤吸收系数、损耗、电子探针、拉曼光谱、电子顺磁共振等测试手段对光纤宏观性能以及微观缺陷开展研究,分析镧掺杂对掺铒光纤的抗辐照性能影响机理,该研究结果可以为后续掺铒光纤的空间抗辐照加固技术以及空间应用提供参考。

## 1 理论分析

辐射对掺铒光纤的性能影响与光纤组分、辐照参数等因素相关,开展镧掺杂掺铒光纤的辐照损伤研究,有必要从光纤的掺镧机理以及光纤辐照过程中出现的缺陷类型进行研究。

掺铒光纤中  $\text{Er}^{3+}$  浓度的提高,能够在一定程度上增大光纤吸收系数,有效减少光纤达到相同增益强度下的使用长度,提升光纤的增益性能表现<sup>[12]</sup>,但是由于  $\text{Er}^{3+}$  在  $\text{SiO}_2$  中的溶解度极低,且  $\text{Er}^{3+}$  的掺杂浓度稍高就会发生  $\text{Er}^{3+}$  之间的能量转移,即荧光淬灭,使得光纤转换效率、增益能力下降,在掺铒的  $\text{SiO}_2$  中加入  $\text{Al}_2\text{O}_3$  可以提高光纤中非桥氧键浓度,实现 Er 离子的分散,进而提高  $\text{Er}^{3+}$  的最大掺杂浓度,但与此同时,  $\text{Al}^{3+}$  在辐照情况下生成的色心会造成光纤的损耗迅速增大,导致光纤的增益性能衰退<sup>[8,13]</sup>。

含有 Al 的掺杂光纤在高速粒子辐照下,内部会形成 Al 相关的色心缺陷,  $[\text{AlO}_{4/2}]^-$  和  $[\text{AlO}_{3/2}]^0$  基团分别是 Al-OHC 和 Al-E' 的前身;在辐照过程中石英网络结构会因核外电子电离过程产生大量的载流子,  $[\text{AlO}_{4/2}]^-$  基团通过俘获空穴而成为 Al-OHC 色心(图 1),而  $[\text{AlO}_{3/2}]^0$  基团通过俘获电子而成为 Al-E' 色心(图 2)<sup>[7]</sup>。辐射诱发的 Al-OHC 和 Al-E' 色心缺陷是造成空间辐射环境中应用的掺铒光纤性能衰退的主要损伤机制。

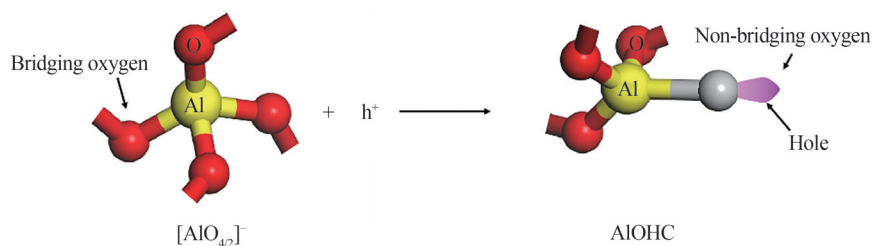


图 1  $[\text{AlO}_{4/2}]^-$  基团俘获空穴而成为 Al-OHC 色心示意图

Fig.1 Schematic diagram of the  $[\text{AlO}_{4/2}]^-$  defects trapping a hole and becoming Al-OHC color center

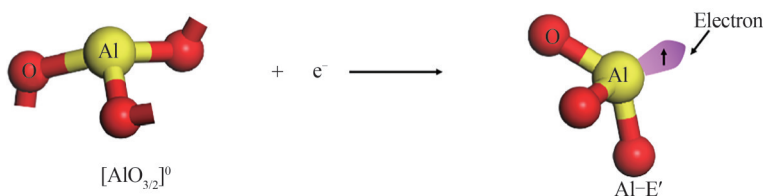


图 2  $[\text{AlO}_{3/2}]^0$  基团通过俘获电子成为 Al-E' 色心示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the  $[\text{AlO}_{3/2}]^0$  group becoming Al-E' color center by capturing electrons





镧作为稀土元素,可以通过与Er离子竞争石英网络结构中的间隙位点,起到阻止Er离子团簇的作用(图3)。同时La在Er<sup>3+</sup>工作波段不存在吸收,Er<sup>3+</sup>也不能借助La实现能量传递,减少了Er<sup>3+</sup>与Er<sup>3+</sup>间因能量传递而导致上转换的几率<sup>[14]</sup>,从而抑制了因团簇而导致的荧光淬灭效应<sup>[11]</sup>。因此La掺杂既可以降低Er<sup>3+</sup>团簇效应,提高Er<sup>3+</sup>的最大掺杂浓度,又可以降低光纤组分对Al的需求,提高掺铒光纤的抗辐射能力。

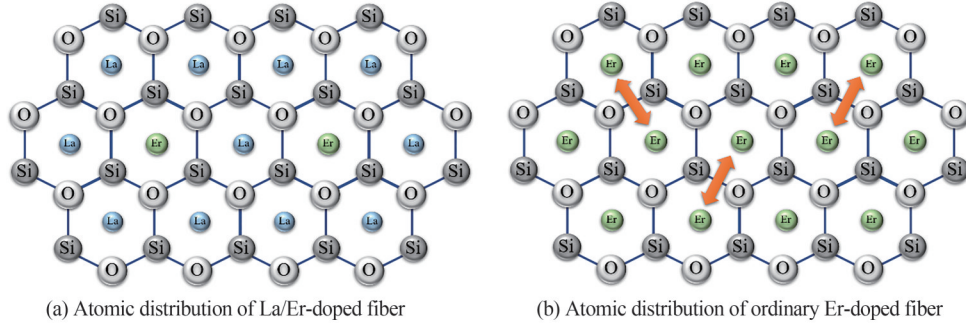


图3 La掺杂掺Er光纤及普通掺Er光纤的原子分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the atomic distribution of La-Er-doped fiber and normal Er-doped fiber

## 2 实验

### 2.1 样品参数及测试条件

试验中选取两种掺铒光纤,其中镧掺杂掺铒光纤为S1,非掺镧掺铒光纤为S2。两种光纤的长度均为50 m。为了阐明光纤中的各物质组分,利用电子探针(Electron Probe Micro-Analyzer, EPMA)对光纤的化学成分进行了表征(表1)。其中电子探针测试使用JXA-8230设备,点扫描使用电流为10 nA。

表1 电子探针测试的两种光纤的组分表

Table 1 Components of the two optical fibers tested by the EPMA

Components	S1/(wt%)	S2/(wt%)
F	0.049 5	0.069 4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.081	13.367 4
SiO <sub>2</sub>	85.978	86.050 2
GeO <sub>2</sub>	0.049 5	0.047 6
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.035	0.023 8
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.303	0.212
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.196	0.329 6
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.248	0

光纤损耗在线辐照损伤测试中,选取JDSU的MAP-200系列的光源,使用Thorlabs公司的PM100D功率计与S144C探测器作为接收器,实现对光纤在843/983/1 314/1 550/1 659 nm波长下的实时功率数据测试,并进一步计算获得对应的损耗数据;

拉曼(Raman)光谱测试,选取HORIBA公司的HR Evolution设备,激光波长选用753 nm以规避Er<sup>3+</sup>主要的吸收波段,防止出现强的荧光信号对结果产生影响。测试范围为200~1 200 cm<sup>-1</sup>。

离线损耗谱测试,选取光纤综合参数测试仪(Photonic Kenetics 2500),测试中选取辐照前后的适宜光纤长度,利用截断法实现对光纤损耗谱和吸收谱的测试。

电子顺磁共振波谱(Electron Paramagnetic Resonance, EPR)测试,选用BRUKER公司的ELEXSYS-II E500设备,测试中选用辐照前后10 cm样品光纤,剥去涂覆层,将纤芯研磨成粉,装入顺磁管中,在100 K温度下对光纤纤芯材料开展EPR测试,磁场范围为3 200~3 600 Gauss。

增益性能测试,使用的信号光为1 550 nm,功率为-20 dBm,泵浦光波长为980 nm,泵浦功率为50~

600 mW。测试中使用的光纤长度S1为3 m,S2为3.5 m。测试系统示意图见图4。

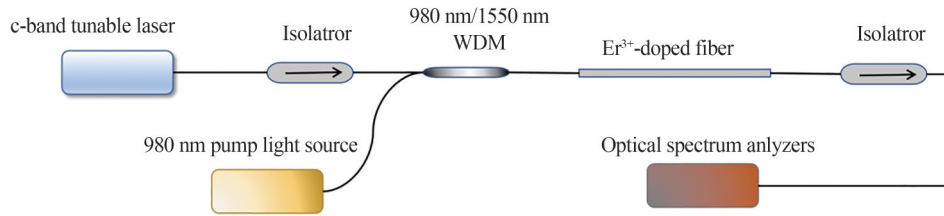


图4 掺铒光纤增益测试系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the gain test system of erbium-doped fiber

## 2.2 辐照试验

在辐射剂量学中,1 rad是指1 g受照射物质吸收100 erg(尔格)辐射能时的剂量,1 rad= $10^{-2}$  Gy= $10^{-2}$  J/kg。本文选用 $^{60}\text{Co}$ 辐照源, $^{60}\text{Co}$ 是金属元素钴的放射性同位素之一,它会通过 $\beta$ 衰变放出能量高达315 keV的高速电子衰变成镍-60,同时会放出伽马( $\gamma$ )射线,伽马射线具有高能量、穿透能力极强等特点, $\gamma$ 射线通过物质并与原子相互作用时会产生光电效应、康普顿效应和正负电子对三种效应。根据中科院SEREAT软件预测,地球同步轨道,在10 mm铝球屏蔽下,空间辐射环境在硅中产生的剂量每年不大于10 krad<sup>[15]</sup>,作为航天器内部辐照剂量的参考,对两种光纤开展0~100 krad辐照损伤测试,剂量率为6.17 rad/s,辐照时间为4.5 h。

## 3 结果与讨论

### 3.1 在线损耗测试结果

光纤样品在线辐照试验过程中,实时记录辐照剂量和光电探测器测量的光功率数据,计算获得不同辐照剂量下不同波长的光纤损耗数据,测试结果如图5所示。

图5(a)、(c)为S1、S2在843/983/1314/1550/1659 nm波长下的损耗随着辐照剂量而变化的关系,从

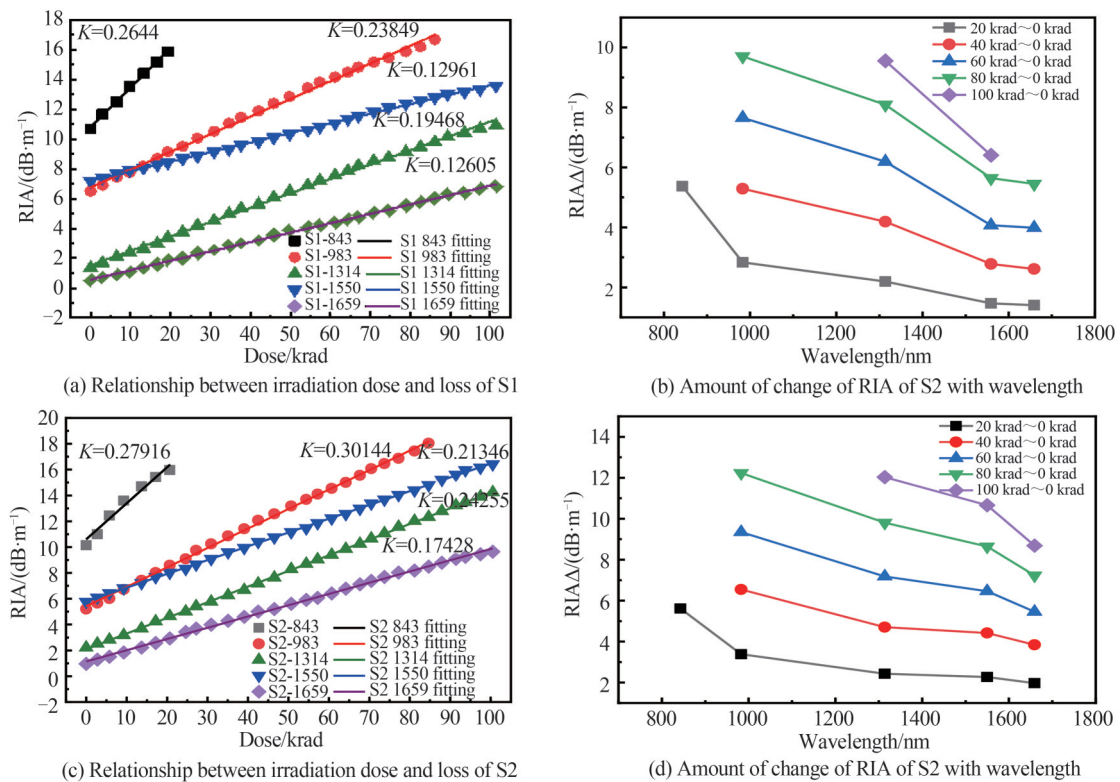


图5 S1与S2的在线测试结果  
Fig. 5 Online test results of S1 and S2



图中可以看出随着辐照剂量从0~100 krad变化的过程中,光纤的损耗呈增大趋势;图中K值的含义是对应波长损耗与辐照总剂量的线性拟合关系,S1与S2损耗变化均表现出 $K_{843} > K_{983} > K_{1314} > K_{1550} > K_{1659}$ 的现象,说明在843/983/1314/1550/1659 nm波长点处,光纤的损耗的变化量随着波长的增大而逐渐减小;对比S1与S2在对应波长的K值,发现S1对应波长的K值均大于S2的K值,这说明S1的辐致损耗相对较低,受辐照的影响相对较小,可以推断S1的耐辐照性能要优于S2。

图5(b)、(d)为S1、S2在20/40/60/80/100 krad剂量下的光纤波长与光纤损耗变化量的关系。可以看到843/983/1314/1550/1659 nm处光纤在辐照后,其损耗曲线呈现短波长损耗高,长波长损耗低的情况。结合上文提到的色心理论,可以推断光纤在980 nm和1550 nm工作波段的损耗是由于在843 nm之前的色心吸收峰引起的<sup>[1]</sup>,这个强度极大的色心吸收峰的拖尾造成了光纤在843~1659 nm波段的损耗上升。

### 3.2 离线损耗与吸收测试结果

对S1、S2特定波长点的在线损耗测试,发现在843~1659 nm范围内存在光纤的损耗沿波长方向降低的现象。然而5个固定波长处的损耗情况不足以完全表达光纤各个波段损耗在辐照环境下的准确情况。为准确获得光纤各波段损耗在辐照环境下的变化情况,利用截断法对辐照前后的S1、S2光纤在700~1600 nm波长范围内的吸收、损耗谱开展了离线测试。

图6为S1、S2的吸收系数测试结果,可以看出两种光纤的吸收谱形基本相同,吸收峰均在800 nm,980 nm,1530 nm位置附近。这三个吸收峰分别对应 $\text{Er}^{3+}$ 核外电子吸收能量,从 $^4I_{15/2}$ 能级跃迁到 $^4I_{13/2}$ , $^4I_{11/2}$ , $^4I_{9/2}$ 能级的过程,如图6表格所示,分别列出了两种光纤在800 nm,980 nm,1530 nm波长点处的吸收系数,其中S1的吸收系数要高于S2。辐照前的吸收谱体现出了两种掺铒光纤的高吸收特性,且在1200 nm和1380 nm没有氢气和水的吸收峰,表明光纤质量较好,由S1和S2光纤的吸收峰强度可以定性的得出S1光纤中 $\text{Er}^{3+}$ 的含量较高,这一结论与电子探针的结果吻合。

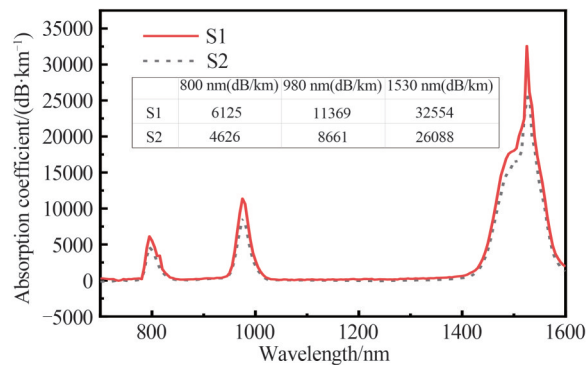


图6 S1与S2的吸收谱

Fig. 6 Absorption spectra of S1 and S2

图7(a)、(b)给出了100 krad辐照前后S1、S2两种光纤在1100 nm~1350 nm的损耗变化情况,可以看出,随着波长的增大,光纤的损耗增加量逐渐减小,这一趋势与在线测试结果相同;其中S1辐照前后增量为3019 dB/km,S2辐照前后增量为3922 dB/km,S2在辐照后的损耗增量明显大于S1辐照后的损耗增量。

可以看到辐致损耗在短波长的方向上影响更大,推测两种光纤在工作波段的损耗变化是由于其在可见光波段或紫外波段的Al-OHC色心缺陷产生的强吸收峰导致的<sup>[7]</sup>。内部有Al掺杂的光纤,其氧空位缺陷的吸收峰中心在400~600 nm波段,由于Al-OHC缺陷吸收峰强度大,中心波长位置距离Er离子工作波段较接近,其吸收峰拖尾对980 nm波段的影响极大,从而对掺铒光纤在辐照环境下的损耗变化起到决定性的作用。而没有Al的光纤其工作波段损耗增加主要来自Ge与Si在辐照环境下产生的缺陷的特征吸收峰,以及Si的网格结构被打破形成的断键,这些缺陷对应的吸收峰峰位主要存在于紫外波段,对Er的工作波段的影响较小。

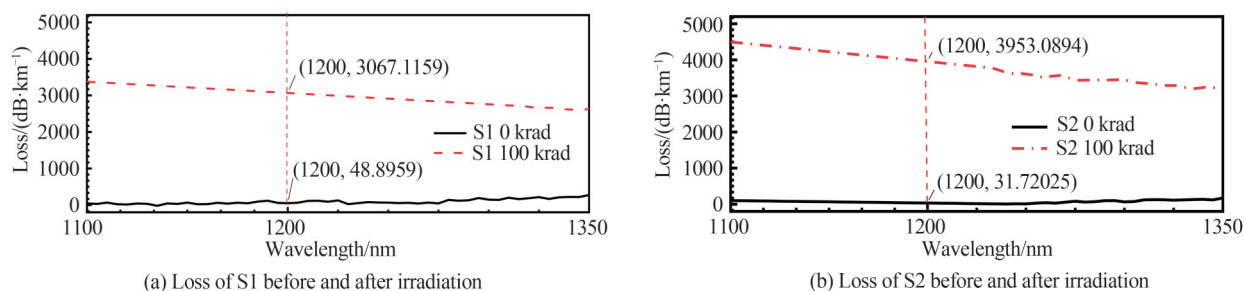


图7 S1与S2的辐照前后损耗谱  
Fig. 7 Loss of S1 and S2 before and after irradiation

### 3.3 拉曼光谱测试结果

拉曼光谱(Raman spectra)可以用于对物质结构变化的分析,利用拉曼光谱对两种光纤辐照前后的分子结构进行测试,测试结果如图8所示。

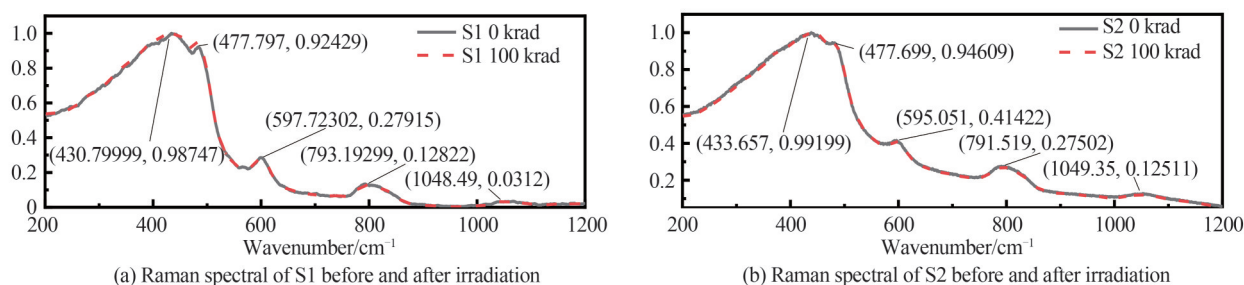


图8 S1与S2的辐照前后拉曼光谱  
Fig. 8 Raman spectra of S1 and S2 before and after radiation irradiation

图8为S1、S2辐照前后的拉曼光谱测试结果,两种光纤的拉曼光谱基本类似,两种光纤的峰值对应点均为430/477/595/791/1049( $\text{cm}^{-1}$ ),且辐照后峰值强度及对应的波数均未发生变化。表明在100 krad剂量的辐照下,光纤的基质材料 $\text{SiO}_2$ 的分子结构基本未发生变化。拉曼光谱测试结果中,位于200~550  $\text{cm}^{-1}$ 之间的主要拉曼带通常与Si-O-Si的网格振动有关,涉及氧原子沿Si-O-Si角 $\theta$ 的平分线方向的振动。在Si-O-Si结构中的 $\theta$ 取值范围很宽,因此形成以435  $\text{cm}^{-1}$ 为中心波数的很宽谱带。在492~604  $\text{cm}^{-1}$ 处峰,分别与四元和三元二氧化硅环中氧原子的振动有关;位于800  $\text{cm}^{-1}$ 附近的不对称带,除了与玻璃体网络中氧的弯曲运动之外,还涉及大量的硅的运动。Si运动是由于与角度 $\theta$ 的变化相关的不平衡力。1050~1200  $\text{cm}^{-1}$ 处峰被归因于TO-LO(横向光学模式-纵向光学模式)分裂<sup>[16]</sup>。由于拉曼光谱测试光纤纤芯基质材料在辐照后的性能基本没有变化,对于Al含量对光纤辐照性能的影响进一步利用电子顺磁共振波谱对光纤的顺磁缺陷进行了分析。

### 3.4 电子顺磁共振测试结果

电子顺磁共振是由不配对电子的磁矩发源的一种磁共振技术,可用于由于辐照引起的电离损伤的顺磁缺陷的测试,当磁场发生微小变化时,都将改变微波的频率,以顺磁共振吸收谱线的峰形展示对应缺陷的信号强度,试验测试结果如图9所示。

图9为S1、S2纤芯的EPR测试谱,可以看出在3370 Gauss和3330 Gauss内均出现了特征的顺磁信号峰,其中3370 Gauss处两种光纤辐照后的峰值基本相同,而3330 Gauss如图中细节图所示,出现了峰值差。

在3370 Gauss处,两种光纤辐照后的峰值差距较小的现象与电子探针测试结果中两种样品Ge/Si含量差距较小的情况基本吻合,即,两种光纤样品中的Ge与Si对应色心缺陷浓度差异不大。3370 Gauss处对应的缺陷可能包括Ge(1), Ge(2), Ge-E'和Si-E',其中Ge(1)与Ge(2)是由 $\text{GeO}_{4/2}$ 缺陷捕获电子形成的,而Ge-E'缺陷主要是由Ge-ODC缺陷捕获空穴产生的<sup>[1]</sup>。这些缺陷对应的吸收峰主要集中在紫外波段,因此对Er离子工作波段的辐照损耗影响较小。辐照后样品在3330 Gauss处峰值的差异主要是由于样品中Al含量的不同引起的。S2样品Al含量更高,其在辐照环境下生成的Al-OHC缺陷数量也更多,对应的

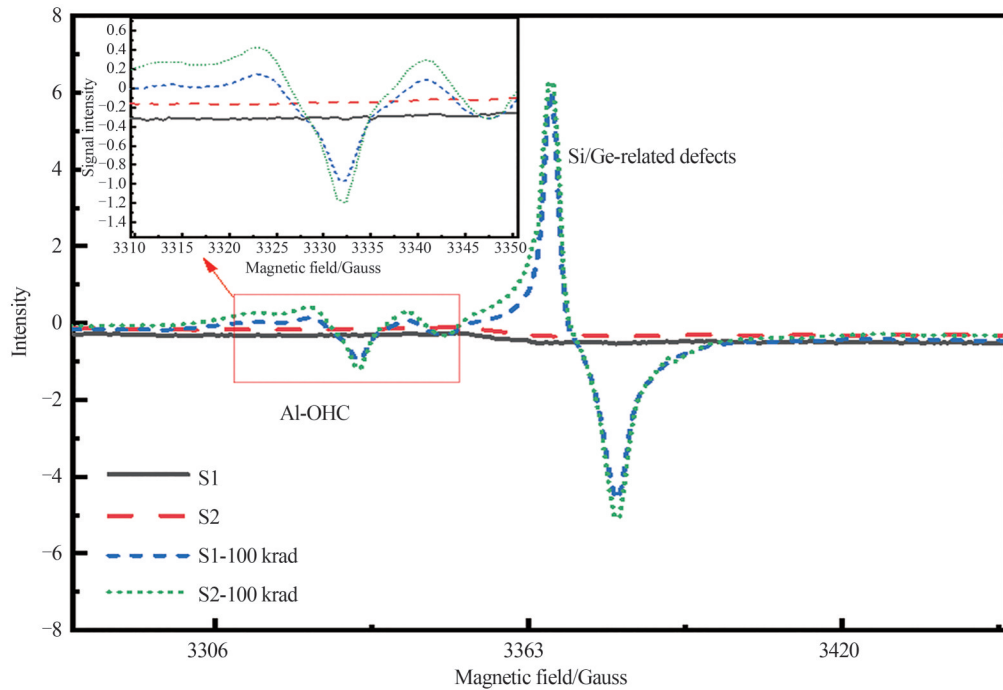


图9 S1与S2的辐照前后纤芯EPR测试结果  
Fig. 9 EPR spectrum of S1 and S2 before and after irradiation

EPR信号更强。S2中Al-OHC缺陷更多的现象与吸收谱测试中S2辐照后损耗更高的结果相吻合。结合电子探针与EPR测试结果,表明Al相关缺陷浓度与光纤中Al组分的含量密切相关,辐照后Al组分较少的光纤纤芯内部的色心缺陷浓度较少,因此在辐照后表现出更好的增益性能。试验结果表明La元素的掺杂分散了光纤中 $Er^{3+}$ ,降低了Al的使用量,提高了光纤的抗辐照性能,同时La元素的掺杂并未造成光纤中顺磁缺陷的增多。

### 3.5 增益性能测试

前文确认了La掺杂光纤由于降低了Al的使用量,在几乎没有改变石英的玻璃网络结构情况下使得光纤在辐照后的损耗更低。然而在实际使用过程中,光纤的核心指标是其增益能力。故有必要对两种光纤在辐照前后的实际增益能力进行表征。

从图10中可以看出,辐照后S1和S2光纤的增益均呈现出减小趋势,而在不同泵浦功率下S1的增益均高于S2;在相同泵浦功率下,S1光纤的增益下降量为3.2 dBm,而S2光纤的下降量为3.6 dBm,表明S1光纤的抗辐照能力优于S2光纤,且La掺杂并没有对光纤的增益能力造成负面影响。随着泵浦功率的增大,光纤的增益增长速率逐渐减小,这是由于增益逐渐趋于饱和。研究结果验证了La作为共掺元素可以有效地替代

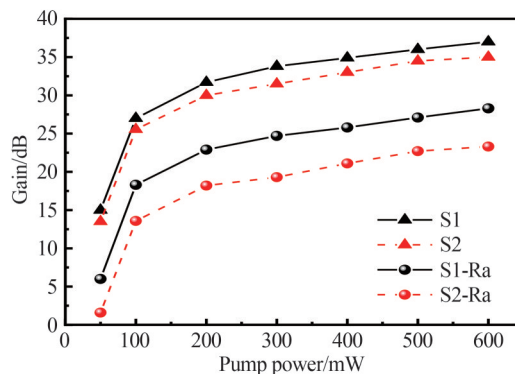


图10 S1与S2的辐照前后增益测试结果  
Fig. 10 Gain performance of S1 and S2 before and after irradiation

部分 Al 对于 Er 的分散功能,从而使得掺铒光纤的抗辐照能力得到加强,La 掺杂掺铒光纤具有更强的空间适应性。

## 4 结论

La 掺杂可以替代掺铒光纤中部分 Al 元素,起到分散 Er 离子,抑制荧光淬灭的作用。因此本文选取掺镧和非掺镧两种掺铒光纤,从光纤宏观增益性能和微观组织结构变化两方面开展了两种光纤辐射损伤研究,通过电子探针测试以及辐照前后的损耗谱测试,推测 La 掺杂的光纤可以通过减少 Al 含量进而抑制光纤在辐照环境下引起的附加损耗。通过吸收谱测试表明 La 掺杂并不会引起光纤中 Er 离子的性能变化。通过拉曼测试,我们确认了 La 掺杂也不会导致光纤的玻璃网络结构发生改变。通过 EPR 测试,分析辐照前后光纤的 Al 相关顺磁缺陷的变化情况,结果表明 Al 的含量减少会降低辐照后 Al-OHC 缺陷的数量。进一步通过测试两种光纤在辐照前后的增益性能,发现 La 掺杂光纤的增益性能变化更小。验证了镧掺杂掺铒光纤辐照后损耗变化与增益变化的程度更小,这表明镧掺杂可以提高光纤抗辐照性能。该研究结果可以为后续掺铒光纤的空间抗辐照加固技术以及空间应用提供参考。

### 参考文献

- [1] SHAO Chongyun, YU Chunlei, HU Lili. Radiation-resistant active optical fibers for space applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5):0500014.  
邵冲云, 于春雷, 胡丽丽. 面向空间应用耐辐照有源光纤研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5):0500014.
- [2] LI Mi. Study on the effect of space radiation environment on erbium-doped fiber amplifier in satellite optical communication [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.  
李密. 卫星光通信中空间辐射环境对掺铒光纤放大器影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [3] SHE Shengfei, MEI Lin, ZHOU Zhenyu, et al. Progress in radiation-resistant erbium-doped and erbium-ytterbium co-doped fibers for space optical communication[J]. Journal of Applied Sciences, 2020, 38(4): 579-594.  
折胜飞, 梅林, 周振宇, 等. 空间光通信耐辐照掺铒/铒镱共掺光纤研究进展[J]. 应用科学学报, 2020, 38(4): 579-594.
- [4] CHEN Yang, ZHU Yingbo, DAI Nengli, et al. Fabrication of erbium-ytterbium co-doped fiber and fiber laser performance study [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7):41-47.  
陈阳, 褚应波, 戴能利, 等. 铒镱共掺光纤制备及其激光性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(7):41-47.
- [5] WANG Bo, CAO Chi, XING Yingbin, et al. Research status on radiation performance and radiation resistance technology of rare-earth-doped fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(15):150-169.  
王博, 曹驰, 邢颖滨, 等. 稀土掺杂光纤辐照性能及抗辐照技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(15): 150-169.
- [6] MA Chengqi, ZHANG Yating, JIN Lufan, et al. Investigation on low frequency noise characteristics of fiber amplifier influenced by gamma-ray irradiated gain fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(1): 0106002.  
马承启, 张雅婷, 金露凡, 等. 伽马射线辐照增益光纤对光纤放大器低频噪声特性的影响[J]. 光子学报, 2021, 50(1): 0106002.
- [7] LEÓN M, LANCRY M, OLLIER N, et al. A Ge- and Al-related point defects generated by Gamma irradiation in nanostructured Erbium-doped optical fiber preforms[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51 (22): 10245-10261.
- [8] JIAO Y, YANG Q, ZHU Y, et al. Improved radiation resistance of an Er-doped silica fiber by a preform pretreatment method[J]. Optics Express, 2022, 30(4): 6236-6247.
- [9] CHANG Deyuan. Development of high concentration erbium-doped optical fiber[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.  
常德远. 高浓度掺铒光纤的研制[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [10] LAGOMACINI J C, BRAVO D, MARTÍN A, et al. Growth kinetics of AlOHC defects in  $\gamma$ -irradiated silica glasses [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2014, 403:5-8.
- [11] JIANG Zuowen, LI Jinyan, LIU Xuejun, et al. Studies on characteristics of er-la co-doped fiber [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2004, 15(9):1038-1041.  
蒋作文, 李进延, 刘学军, 等. Er-La 共掺杂光纤特性的研究[J]. 光电子激光, 2004, 15(9):1038-1041.
- [12] GU Zhimu, ZHU Yingbo, HU Xiongwei, et al. High-absorption, high-efficiency, low-cluster erbium-doped fiber and its amplification performance[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(7):185-186.  
辜之木, 褚应波, 胡雄伟, 等. 高吸收、高效率、低团簇掺铒光纤及其放大性能研究[J]. 中国激光, 2022, 49(7):185-186.
- [13] OTT M N, JIN X L, CHUSKA R, et al. Space flight requirements for fiber optic components: qualification testing and lessons learned [C]. The Second ESA-NASA Working Meeting on Optoelectronics: Qualification of Technologies and



- Lessons Learned from Satellite LIDAR and Altimeter Missions, International Society for Optics and Photonics, 2006.
- [14] JIAO Y, YANG Q, GUO M, et al. Effect of the GeO<sub>2</sub> content on the radiation resistance of Er<sup>3+</sup>-doped silica glasses and fibers[J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(7): 1885-1897.
- [15] CHEN Shanqiang, LIU Siqing, SHI Liqin, et al. Software for space radiation effects assessment [J]. *Journal of Astronautics*, 2017, 38 (3): 317-322.  
陈善强, 刘四清, 师立勤, 等. 用于空间辐射效应评估的软件[J]. *宇航学报*, 2017, 38 (3): 317-322.
- [16] HAMZAOUI H E, BOUAZAOUI M, CAPOEN B. Raman investigation of germanium- and phosphorus-doping effects on the structure of Sol - Gel silica-based optical fiber preforms[J]. *Journal of Molecular Structure* 2015, 1099: 77-82.

## Effect of La Doping on the Radiation Damage Effect of Er<sup>3+</sup>-Doped Silica Fibers for Space Laser Communication

WEN Xuan<sup>1</sup>, YANG Shengsheng<sup>1</sup>, GAO Xin<sup>1</sup>, SHE Shengfei<sup>2,3</sup>, WANG Gencheng<sup>2,3</sup>,  
FENG Zhanzu<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, YIN Hong<sup>1</sup>, HOU Chaoqi<sup>2,3</sup>, ZHANG Jianfeng<sup>1</sup>

(1 *National Defense Science and Technology Key Lab for Space Materials Behavior and Evaluation, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China*)

(2 *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(3 *China Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Space laser communication has the outstanding advantages of large transmission bandwidth, high transmission rate, and strong anti-interference ability, which is an important development direction of future communication technology. Since relay amplification cannot be realized in space laser communication links, a large transmission optical power is required in addition to ensuring a high modulation rate. Erbium-doped fiber amplifier achieves the amplification of 1.55 μm optical signal through the three-layer structure of erbium ions. The erbium-doped fiber is the core component of the erbium-doped fiber amplifier, and the erbium-doped fiber is a silicon fiber doped with a small number of erbium ions. In the space irradiation environment, high-energy particles impact the erbium-doped fiber, the core component of the erbium-doped fiber amplifier, resulting in a large number of carriers in the fiber, which combines with the original defects in the fiber to form new color-centered defects. The core defect leads to a dramatic increase in the loss of the fiber in the operating band, as well as a decrease in the gain performance of the erbium-doped fiber. As a rare earth element, La, like Er, is present in the interstitial positions of the quartz lattice structure. It can compete with Er ions for the interstitial positions and act as a dispersion of Er ions. It can achieve Al without affecting the maximum amount of Er ion doping. Low dose doping. La doping can disperse Er ions and suppress fluorescence quenching. There are few studies on the radiation effects of lanthanum-doped erbium-doped fibers. It is important to further understand the radiation-induced absorption mechanism of erbium-doped fibers to improve the performance of erbium-doped fibers in harsh environments. To verify the effect of La doping on the radiation resistance of erbium-doped fibers, two types of erbium-doped fibers, lanthanum-doped and non-lanthanum-doped, are selected in this paper, and the macroscopic radiation gain resistance performance and microstructural changes of the fibers are investigated. Radiation damage test study. The optical fiber was irradiated with a 60Co irradiation source at room temperature at a cumulative dose of 100 krad and a dose rate of 6.17 rad/s. The loss of the fiber was found to decrease along the wavelength direction in the range of 843~1 659 nm by electron probe tests and loss spectroscopy tests before and after irradiation, as well as online loss tests at specific wavelength points. However, the five fixed wavelength tests are not sufficient to fully express the loss variation of the fiber in each wavelength band under an irradiation environment. Offline loss tests were performed on both fibers before and after irradiation. The results showed that the increment before and after irradiation was 3 019 dB/km for S1 and 3 922 dB/km for S2. The loss increment of S2 after irradiation was significantly larger than that of S1 after irradiation. It was speculated that Al-OHC mainly caused the radiation-induced absorption. Absorption spectroscopy tests showed that La doping did not cause any change in the

performance of Er ions in the fiber. the loss of the La-doped fiber at 1 200 nm was 0.030 67 dB/(km·krad), which was lower than 0.039 53 dB/(km·krad), and the gain of the La-doped fiber changed very little in the irradiated environment. The properties of the core matrix material did not change after irradiation by Raman testing, which proves that La doping does not cause changes in the glass lattice structure of the fiber. The paramagnetic defects of the fibers were further tested by electron paramagnetic resonance spectroscopy. The EPR signal intensities of the color-centered defects corresponding to Ge and Si did not differ much between the two types of light at 3 370 Gauss by fiber absorption spectroscopy and EPR tests. the peak at 3 330 Gauss is mainly due to the difference in Al content. the higher Al content in S2 produces a higher number of Al-OHC defects in the irradiated environment, and the corresponding EPR signal is stronger. the higher number of Al-OHC defects in S2 leads to a larger radiation-induced absorption in the 700~1 600 nm band, and the conclusion that the higher number of Al-OHC defects in S2 is consistent with the results of absorption spectroscopy tests before and after previous irradiation. The changes of Al-related paramagnetic defects in the fiber before and after irradiation were analyzed, indicating that the increase of Al content leads to more Al-OHC defects after irradiation, which in turn affects the gain performance of the fiber after irradiation. Further, by testing the gain performance of the two fibers before and after irradiation, it was found that the gain performance of the La-doped fiber changed less. It was verified that the loss and gain changes of the lanthanum- and erbium-doped fibers are smaller after irradiation, which indicates that lanthanum doping can improve the radiation resistance of the fibers. The doping of La can replace Al as the dispersant of Er ion to improve the radiation resistance of the fiber to a certain extent, and the doping of La does not negatively affect the gain performance of the fiber. This study can provide a reference for the radiation-hardening design of special optical fibers for subsequent space applications.

**Key words:** Laser communication; Erbium-doped fiber; Radiation effects; Gamma irradiation; Lanthanum doping

**OCIS Codes:** 060.2310; 060.2290; 060.2270