

Ce 掺杂对空间激光通信掺铒光纤的耐辐照影响研究

文 轩¹, 王根成^{2,3}, 高 欣¹, 冯展祖¹, 安 恒¹, 银 鸿¹, 王 俊¹, 折胜飞^{2,3}, 侯超奇^{2,3}, 杨生胜^{1*}

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, 甘肃 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, 陕西 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: 辐照环境下掺铒光纤性能下降严重影响了其在空间环境中的应用, 而 Ce 可以凭借其变价能力抑制光纤的辐致损伤效应。利用螯合物气相沉积法制备了不同 Ce 掺杂量的掺铒光纤, 在常温下使用⁶⁰Co 辐照源对光纤进行了累积剂量 100 krad、剂量率 6.17 rad/s 的辐照实验。通过吸收损耗谱的测试发现 Ce 掺杂含量高的光纤在辐照后损耗为 419.185 dB/km@1200 nm, 且荧光寿命变化量减小了 0.578 ms。通过切片芯层透过率及电子顺磁共振测试发现 Ce 掺杂可以有效降低光纤中 Al 和 Ge 相关的色心缺陷数量。最后通过增益测试验证了 Ce 掺杂对掺铒光纤抗辐照能力的改善, 辐照后高 Ce 掺杂的光纤比未掺杂 Ce 光纤的增益高出 4.15 dB。实验结果表明, Ce 掺杂可以有效增强掺铒光纤抗辐照性能, 这一结论对掺铒光纤在太空中的应用具有重要意义, 该研究结果能够为后续掺铒光纤的耐辐照加固及其在空间中的应用提供参考。

关键词: 辐射效应; 抗辐射加固; 掺铒光纤表征测试; 空间激光通信

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220871

0 引 言

空间激光通信具有传输速度快、带宽大、保密性好等优点, 是未来星间通讯的重点发展方向之一, 激光通信需要足够快的传输速率以及足够高的传输功率, 以掺铒光纤为核心组件的掺铒光纤放大器在空间激光通信的发射端和接收端作为信号放大器得到广泛的应用^[1-2], 掺铒光纤能够凭借自身特有的三能级结构实现对 1550 nm 波段光信号的放大。但是, 掺铒光纤在空间中不可避免会受到空间粒子的辐照影响, 空间粒子会导致掺铒光纤内部产生大量的色心缺陷, 引起器件增益能力和斜率效率的急剧下降, 进而影响空间激光通信任务的顺利开展。为解决这些问题, 科研工作者针对提升掺铒光纤的耐辐照性能的方法开展了研究^[2]。

在空间辐照环境下, 掺铒光纤受到高能粒子冲击而产生电离效应, 光纤中产生大量载流子与原有缺陷以及辐致缺陷结合生成具有强吸收峰的色心缺陷^[3], 其中部分色心缺陷的吸收峰在掺铒光纤 (Erbium-Doped Fiber, EDF) 工作波段产生辐射诱导吸收 (Radiation Induced Attenuation, RIA)。辐射诱导吸收会导致光纤在工作波段损耗大幅上升, 增益性能下降^[4]。光纤 RIA 的产生主要与光纤中 Al 相关的缺陷有关^[5]。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 相关缺陷数量; 通过加大 Ge 共掺量实现对于辐照后 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。然而减小 Al 组分含量会导致最大 Er 掺杂量的下降, 不利于高性能耐辐照掺铒光纤的制备^[6-7], 而 Ge 大量掺杂会影

收稿日期: 2022-12-05; 修订日期: 2023-01-05

基金项目: 国防科技重点实验室基金; 航天科技集团自主研发项目; 国家自然科学基金 (62105358); 陕西省重点研发计划 (2022GY-098); 陕西省自然科学基金 (2022JQ-587)

作者简介: 文轩, 男, 工程师, 博士生, 主要从事空间环境辐射效应方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 杨生胜, 男, 研究员, 博士, 主要从事空间环境辐射效应方面的研究。

响光纤纤芯的折射率。铈 (Ce) 掺杂被认为是抑制光纤辐致损耗的一个更好的选择, Ce 可以很容易地与 Al 一起掺入 SiO₂ 玻璃, 同时 Ce 可以通过捕获载流子的方式来抑制光纤中色心缺陷的形成^[8]。目前, 国内针对 Ce 掺杂对掺铒光纤辐射效应影响的研究较少, 故进一步了解 Ce 掺杂掺铒光纤的辐射诱导吸收机制以及提升光纤在辐照环境中的增益性能对发展空间激光通信至关重要。

文中的目的是研究 Ce 掺杂对掺铒光纤在 100 krad 伽玛射线照射下的性能影响。通过不同浓度的 Ce 掺杂的掺铒光纤及普通无 Ce 掺杂掺铒光纤开展辐照损伤研究, 利用⁶⁰Co 辐照源进行辐照实验。对三种光纤辐照前后的吸收系数、损耗、电子顺磁共振波谱 (Electron Paramagnetic Resonance, EPR) 测试、荧光寿命, 以及增益系数开展表征测试, 分析 Ce 掺杂对掺铒光纤的辐照损伤影响, 该研究结果可以为后续掺铒光纤的耐辐照加固技术以及空间应用提供参考。

1 原理分析

1.1 辐照环境掺铒光纤工作机理

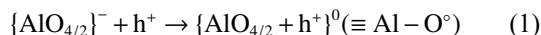
掺铒光纤通过强的泵浦光将 Er 的基态电子 (⁴I_{15/2}) 激发至激发态 (⁴I_{11/2}), 然后快速下落至亚稳态 ⁴I_{13/2} 能级。由于受激辐射的原理, ⁴I_{13/2} 能级上的电子可以为 1550 nm 光进行增益^[9]。在掺铒光纤中, 过短的光纤长度会使得泵浦光吸收不充分, 光的转化率较低。而过长的光纤长度会使得泵浦光能量在光纤的后半段不足以实现粒子数反转, 不能实现放大作用。由于 Er 离子自身在 1550 nm 的吸收作用, 光纤中的 1550 nm 信号光会在掺铒光纤后半段被快速吸收, 造成光纤输出功率下降的情况。在辐照前后光纤使用长度基本相同的情况下, 辐照后光纤单位长度内 980 nm 处的吸收系数急剧增大, 这会导致辐照后光纤在较短的光纤长度上完成泵浦光的吸收, 使得光纤在一定长度内只进行信号光的吸收而不具备光信号放大的作用。

1.2 掺铒光纤辐射损伤机理

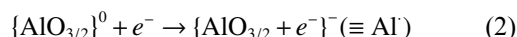
1.2.1 Al 相关缺陷的形成机制

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, 在辐照过程中石英网格结构内部会因核外电子电离过程产生大量的载流子。

[AlO_{4/2}]⁻和 [AlO_{3/2}]⁰ 基团分别是 Al-OHC 和 Al-E' 的前身, [AlO_{4/2}]⁻基团通过俘获空穴而成为 Al-OHC 色心, 而 [AlO_{3/2}]⁰ 基团通过俘获电子而成为 Al-E' 色心。辐射诱发的 Al-OHC 和 Al-E' 色心缺陷是造成空间辐照环境中应用的掺铒光纤性能衰退的主要损伤机制。Al-OHC 的形成如公式 (1) 所示^[10]:

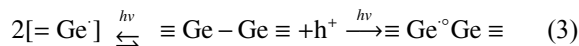


为了补偿 Al-OHC 的电荷, 需要形成受困电子中心 (电子型缺陷)。对于单掺 Al 的二氧化硅玻璃, Al-E' ($\equiv Al^\cdot$) 中心作为捕获电子的色心缺陷, 它们的形成过程如公式 (2) 所示:



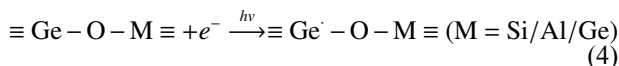
1.2.2 Ge 相关缺陷的形成机制

Ge 的原有缺陷有两种类型, 分别为 Ge-ODC(I) 和 Ge-ODC(II), 在辐照下, 预先存在的 Ge-ODC(I) 和 Ge-ODC(II) 通过结合空穴成为 Ge-E' 色心, 转化过程如公式 (3) 所示^[11]:



式中: 2[=Ge[·]]为 (Ge-ODC(II)); $\equiv Ge-Ge \equiv$ 为 (Ge-ODC(I)); $\equiv Ge^\circ Ge \equiv$ 为 (Ge-E')。

[GeO_{4/2}]⁰ 基团是 Ge(1) 和 Ge(2) 的前驱体缺陷, 在辐照下, [GeO_{4/2}]⁰ 基团通过捕获电子成为 Ge(1)、Ge(2), 转化过程如公式 (4) 所示:



式中: $\equiv Ge-O-M \equiv$ 为 ([GeO_{4/2}]⁰); Ge[·]-O-M 为 Ge(1) 或 Ge(2)。

1.2.3 Ce 对掺铒光纤辐致缺陷的抑制机制

对于 Al/Ge/Ce 共掺杂的光纤, 被困的空穴中心 (Al-OHC) 和被困的电子中心 (Si-E'/Al[·]E') 都减少。这是由于色心缺陷的形成需要载流子的参与, 而 Ce 掺杂可以有效降低辐照环境下光纤中的载流子数量。Ce³⁺通过与捕获的空穴结合来抑制 Al-OHC、Ge-E' 的形成。Ce⁴⁺通过与被困的电子中心结合来抑制 Si-E'/Al[·]E'、Ge(1)、Ge(2) 的形成^[12]。



因此, 色心的产生可以被 Ce^{3+/4+} 的价态变化有效抑制, 在辐照过程中, Ce^{3+/4+} 的价态诱导的相反变化倾

向于保持玻璃中 Ce^{3+} 和 Ce^{4+} 离子的比例平衡^[1, 12], 辐射诱导的色心缺陷的吸收可以通过 Ce 掺杂得到抑制。

2 实验

2.1 材料与设备

实验所用的光纤预制棒及掺铒光纤均采用螯合物 MCVD 沉积法制备, 纤芯直径 3.5 μm , 内包层直径 125 μm 。光纤预制棒样品的厚度为 3 mm, 选取三种掺铒光纤, 其中高掺 Ce 掺铒光纤为, 低掺 Ce 掺铒光纤为 LCe, 非掺 Ce 掺铒光纤为 NCe, 对应的预制棒切片编号为-g, LCe-g, NCe-g, 样品名-ra 代表辐照后的样品。为了阐明光纤中的各物质组分, 利用电子探针测试对光纤的组分进行了表征。其中电子探针测试使用西安地质科技创新中心的 JXA-8230 设备, 点扫描使用电流 10 nA。表 1 为三种光纤的电子探针测试结果。

损耗吸收谱测试, 使用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的测试, 在光纤综合参数测试仪上实现对光纤吸收及损耗值的读取。光谱范围为 90~1 600 nm, 步进为 5 nm。

透过率测试, 使用 Jasco V5750 紫外-可见-红外透过率测试仪测试了 200~850 nm 波段的预制棒切片纤芯透过率, 测试步进为 1 nm。

表 1 三种光纤电子探针测试的组分表

Tab.1 Component table for electronic probe testing of three optical fibers

Components	HCe	LCe	NCe
Al_2O_3	1.89 wt%	1.93 wt%	1.98 wt%
SiO_2	85.7 wt%	83.876 wt%	84.376 wt%
GeO_2	12.303 wt%	14.12 wt%	13.6 wt%
Ce_2O_3	0.055 wt%	0.027 wt%	0 wt%
Er_2O_3	0.052 wt%	0.047 wt%	0.044 wt%

荧光寿命测试, 使用 MDL-III 激光器产生 980 nm 连续光, 通过调制器将光调制为脉冲光, 对预制棒切片进行测试, 使用光谱仪和示波器测试荧光的强度与时间的对应关系。脉冲光频率为 10 Hz, 占空比为 0.05%。

电子顺磁共振波谱测试, 使用 BRUKER 公司的 ELEXSYS-II E500 设备, 测试中将预制棒切片芯层研磨成粉, 装入测试样品用的顺磁管中, 在 100 K 下对光纤的纤芯材料开展 EPR 测试。微波功率 20 mW, 磁场范围为 3 200~3 600 Gauss。

增益性能测试示意图如图 1 所示, 使用的信号光为 1550 nm, 功率为 -20 dBm, 泵浦光波长为 980 nm, 功率为 100 mW。测试中使用的光纤长度为 10 m。光纤长度从 10 m 开始裁剪, 每次裁剪长度为 0.5 m。

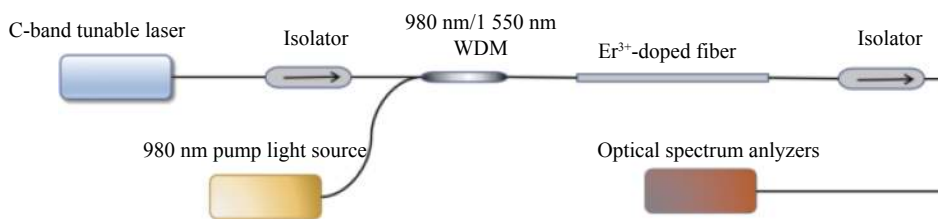


图 1 掺铒光纤增益测试系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of erbium-doped fiber gain test system

2.2 辐照试验

利用甘肃兰州天辰辐照站的 ^{60}Co 辐照源对光纤及预制棒开展离线辐照试验, 在辐照前、后分别对光纤的性能参数开展测试。根据空间辐射效应评估软件 SEREAT 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^[13], 可以作为航天器内部辐照剂量的参考; 辐

射剂量率决定了单位时间辐射到光纤的能量, 在相同总剂量条件下, 辐照剂量率越低, 色心缺陷越少, 辐致增益衰减越小^[14], 随着剂量率的增大, 对应的辐致缺陷数量对应增多^[15]。文中主要研究 Ce 掺杂对辐照光纤内部缺陷的影响, 选用较高的剂量率有助于光纤内部色心缺陷的产生与测试分析。因此, 结合实际试验条件选取的辐照累积剂量为 100 krad, 剂量率为 6.17 rad/s,

辐照时间为 4.5 h。

3 结果

3.1 损耗谱测试

测试了 LCe/NCe 三种光纤在辐照前后的损耗谱, 光纤损耗值能够反映光在光纤中传播时能量衰减的速度。

HCe/LCe/NCe 光纤辐照前后在 1 100~1 300 nm 范围的损耗谱测试结果如图 2 所示。辐照前三种光

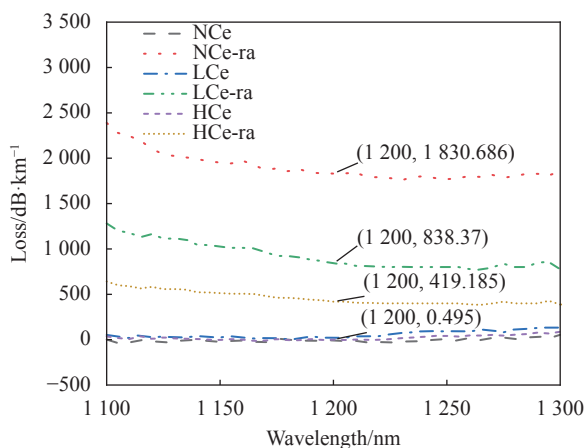


图 2 HCe/LCe/NCe 的辐照前后损耗谱

Fig.2 Loss spectra of HCe/LCe/NCe before and after irradiation

纤的损耗谱曲线基本重合, 辐照后三种光纤的损耗谱出现了不同程度的上移动, 其中 NCe 的损耗值为 1 830.686 dB/km@1 200 nm, LCe 为 838.37 dB/km@1 200 nm, 为 419.185 dB/km@1 200 nm, 辐照后三种光纤的损耗值均随着波长的增大而逐渐减小。

光纤在相同辐照剂量辐照下损耗变化的情况反映了光纤的耐辐照性能。光纤的辐致损耗越小, 表明其耐辐照能力越强, 判断三种光纤耐辐照性能为 HCe>LCe>NCe, 损耗值与光纤中 Ce 的含量成反比, 推断 Ce 掺杂可以提高光纤耐辐照能力; 辐照后光纤损耗曲线整体表现出波长短、损耗高的趋势, 推测在短于 1 100 nm 的波段内存在更高的光纤损耗时, 辐照后光纤的损耗值随着波长的增大而逐渐减小, 三种光纤在工作波段的损耗变化是由于其在可见光波段甚至紫外波段的色心缺陷产生的强吸收峰导致的^[4]。

3.2 吸收谱测试

测试了 HCe/LCe/NCe 三种光纤在辐照前后的吸收光谱, 可以通过吸收谱测试获得更广范围内光纤损耗随波长变化的情况。

HCe/LCe/NCe 三种光纤的辐照前后吸收谱测试结果如图 3 所示。辐照前三种光纤在 980 nm 和

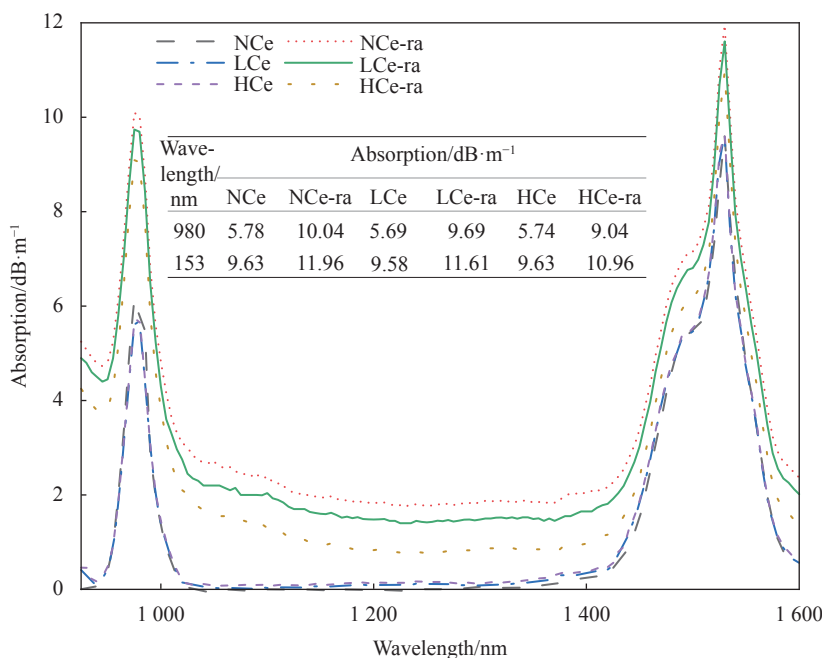


图 3 HCe/LCe/NCe 的辐照前后吸收谱

Fig.3 Absorption spectra of HCe/LCe/NCe before and after irradiation

1530 nm 的吸收系数非常接近,这与电子探针测试结果三种光纤的 Er 离子掺杂量相符。辐照后三种光纤均在 980 nm 和 1530 nm 处出现了吸收峰,且吸收曲线均发生了上移,其中 NCe 的上浮动量最大,LCe 其次,HCe 最小。

通过吸收谱可以看到,三种光纤在 900~1600 nm 范围内损耗变化表现出波长短、损耗高的特征,说明 900 nm 之前可能存在更高的吸收峰,根据先前研究,900 nm 之前的强吸收峰主要可能是由于 Al 相关的缺陷引起的^[7]。三种光纤辐照后损耗强度差别较大,但谱形变化不大,说明三种光纤辐照后损耗变化可能存在相似的机理但程度不同。辐照后 Ce 掺杂量越高的光纤其损耗越低,推测 Ce 掺杂对掺铒光纤的辐致损耗有抑制效果。

3.3 透过率测试

光纤在 900 nm 波段之前的辐致损耗过高,采用截断法测试辐致损耗时信号较弱,测试误差大。使用预制棒切片进行透过率测试时样品仅有 3 mm 左右的厚度,可以保证接收端光功率的强度。而同样长度的光纤难以裁剪和熔接。因此,选择使用预制棒切片进行 200~900 nm 的透过率测试,用于推断光纤在 200~900 nm 存在的色心缺陷。

从图 4 中可以看到 HCe/LCe/NCe 掺杂样品在辐照后的 RIA 情况。在 200~900 nm 范围内,NCe 掺杂光纤的 RIA 水平更高,且在 248 nm 后 NCe 掺杂的切片由于损耗过高导致数据难以测量。在 248~900 nm 范围内,HCe 与 LCe 趋势相同,NCe 三种组分切片的损耗测试结果表现出相似的趋势。切片辐致损耗在 248~900 nm 范围内变化的情况验证了光纤工作波段的 RIA 主要是由于 900 nm 之前的特征吸收峰引起的这一推断。

为了进一步研究光纤在 980/1530 nm 损耗产生的原因,对辐照后 HCe 掺杂的损耗谱进行了分峰处理。图 4 中,5.1 eV 代表了 Ge(1) 缺陷,5.7 eV 的吸收峰代表了 Ge/Si/Ce 相关其他缺陷的吸收峰累积,2.4 eV、3.5 eV 和 4.6 eV 的吸收峰分别代表了 Al-OHC 和 Al-E' 缺陷^[11]。推断 Ce 的掺杂,对辐照后光纤中 Al/Ge/Si 相关的色线缺陷的吸收峰形成起到了抑制作用,尤其 Al-OHC 是造成掺铒光纤工作波段辐致损耗的主要原

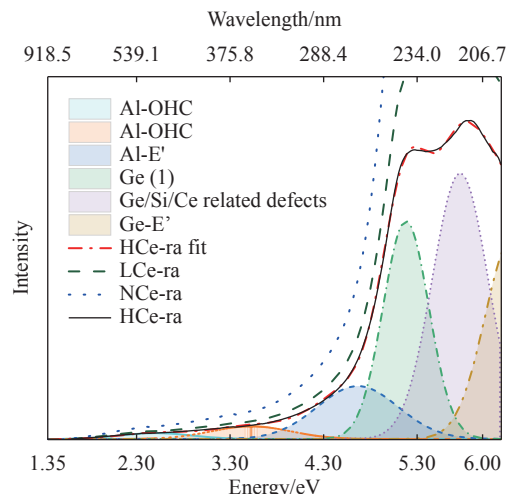


图 4 HCe/LCe/NCe 的辐照后吸收谱及分峰

Fig.4 Absorption spectra and peak splitting after irradiation of HCe/LCe/NCe

因,Ce 能够抑制 Al-OHC 缺陷的生成。

3.4 电子顺磁共振波谱

电子顺磁共振技术的高灵敏度适合于表征顺磁性物种的小含量变化,结合吸收谱测试结果,测试光纤辐照前后的顺磁缺陷进行测试分析。

如图 5 所示,三种光纤在辐照前的 EPR 测试结果基本相同,说明光纤中辐照前顺磁型缺陷数量及类型基本相同。辐照后光纤 EPR 谱形明显变化,表明光纤中出现了较多的顺磁性缺陷,其中 g 因子强度在 2.00~2.04 和 1.99~2.00 范围辐照前后的光纤样品 EPR 谱强度出现了明显的差异,且峰值强度依次为 NCe>LCe>HCe,这表明辐照后光纤 EPR 峰值处对应的顺磁缺陷数量依次为 NCe>LCe>HCe。

其中,2.00~2.04 范围为 Al-OHC 顺磁缺陷的特征能量范围,1.99~2.00 范围为 Ge(1) 和 Ge(2) 相关缺陷的特征能量范围^[4]。结合吸收谱测试分析,造成光纤工作波段辐致损耗增大的原因是由于 Al-OHC 缺陷的大量形成,结合理论分析,Ce³⁺与空穴相结合,有效降低了辐照后光纤的 Al-OHC 的数量^[16],Ce⁴⁺与电子相结合,有效降低了 Ge 相关缺陷的数量。在辐照过程中,Ce^{3+/4+}的价态诱导的相反变化倾向于保持玻璃中 Ce³⁺和 Ce⁴⁺离子的比例平衡,辐射诱导的色心缺陷的吸收得到抑制。

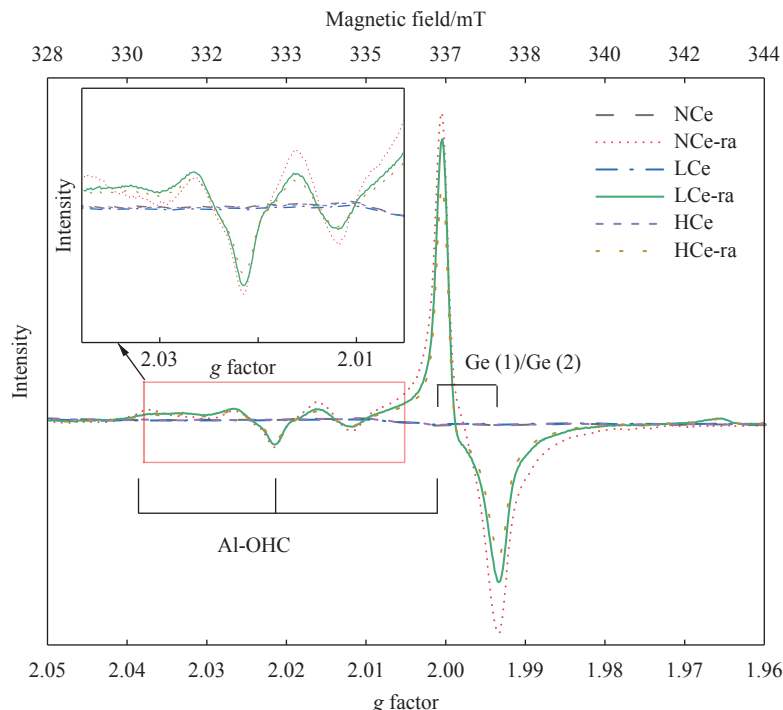


图 5 HCe/LCe/NCe 的辐照前后 EPR 测试结果

Fig.5 EPR test results before and after irradiation of HCe/LCe/NCe

3.5 荧光寿命测试

荧光寿命是当某种物质被一束激光激发后,该物质的分子吸收能量后从基态跃迁到某一激发态上,再以辐射跃迁的形式发出荧光回到基态,当去掉激发光后,分子的荧光强度降到激发时的荧光最大强度 I_0 的 $1/e$ 所需要的时间,用 τ 表示。

如图 6 所示,分别对 NCe/LCe/HCe 三种光纤辐照前后的荧光寿命进行了测试,其中后缀 fit 曲线为拟合后曲线,三种光纤在辐照前的荧光寿命基本相同,辐照后出现了不同程度的减小。其中, τ_{NCe} 减小了 1.099 ms, τ_{LCe} 减小了 0.872 ms, τ_{HCe} 减小了 0.578 ms。

预制棒切片在辐照后,980 nm 泵浦光能量被 Er^{3+} 吸收,一部分激发态电子将能量转移到缺陷中心,这使得辐照后切片的 Er^{3+} 激发态的寿命缩短,由于光纤在受到严重辐射后其内部会产生较多的色心缺陷,从而缩短 Er^{3+} 的 $^4I_{13/2}$ 能级的荧光寿命^[5]。因此,荧光寿命变化较小的样品其耐辐照性能更强,验证了 Ce 掺杂能够有效地提升掺铒光纤的耐辐照性能。

3.6 增益性能测试

掺铒光纤的核心指标是其增益能力,有必要对光纤在辐照前后的实际增益能力进行表征。

如图 7 所示,辐照前三种光纤最佳增益均为 25 dB,辐照后 NCe-ra 为 13.9 dB, LCe-ra 为 16.05 dB, HCe-ra 为 18.11 dB,依次下降了 11.1 dB, 8.95 dB 和 6.89 dB, HCe-ra 比 NCe-ra 的增益高出 4.15 dB,随着 Ce 掺杂量的升高,光纤在辐照后保持增益性能的能力不断增强。这是由于 Ce 掺杂减少了光纤在辐照后的色心缺陷数量,减小了 980 nm 和 1530 nm 的辐致损耗,而辐致损耗的下降使得泵浦光在光纤中更多地被 Er 离子吸收,用于 1550 nm 光信号的放大,表明 Ce 掺对光纤辐照后的增益保持有显著提升效果。辐照前三种光纤最佳增益长度均为 5 m,辐照后 NCe-ra 为 3 m, LCe-ra 为 3.5 m, HCe-ra 为 4 m,同时辐照前后对应 5 m 长度,NCe 增益下降了 23.5 dB, LCe 增益下降了 10.4 dB, HCe 增益下降了 8.4 dB。Ce 掺杂量高的光纤其辐照前后最佳增益对应的长度变化量也更小, HCe 最佳增益长度仅缩短 1 m。结合理论部分分析,这主要是由于高 Ce 掺杂光纤在 980 nm 波段损

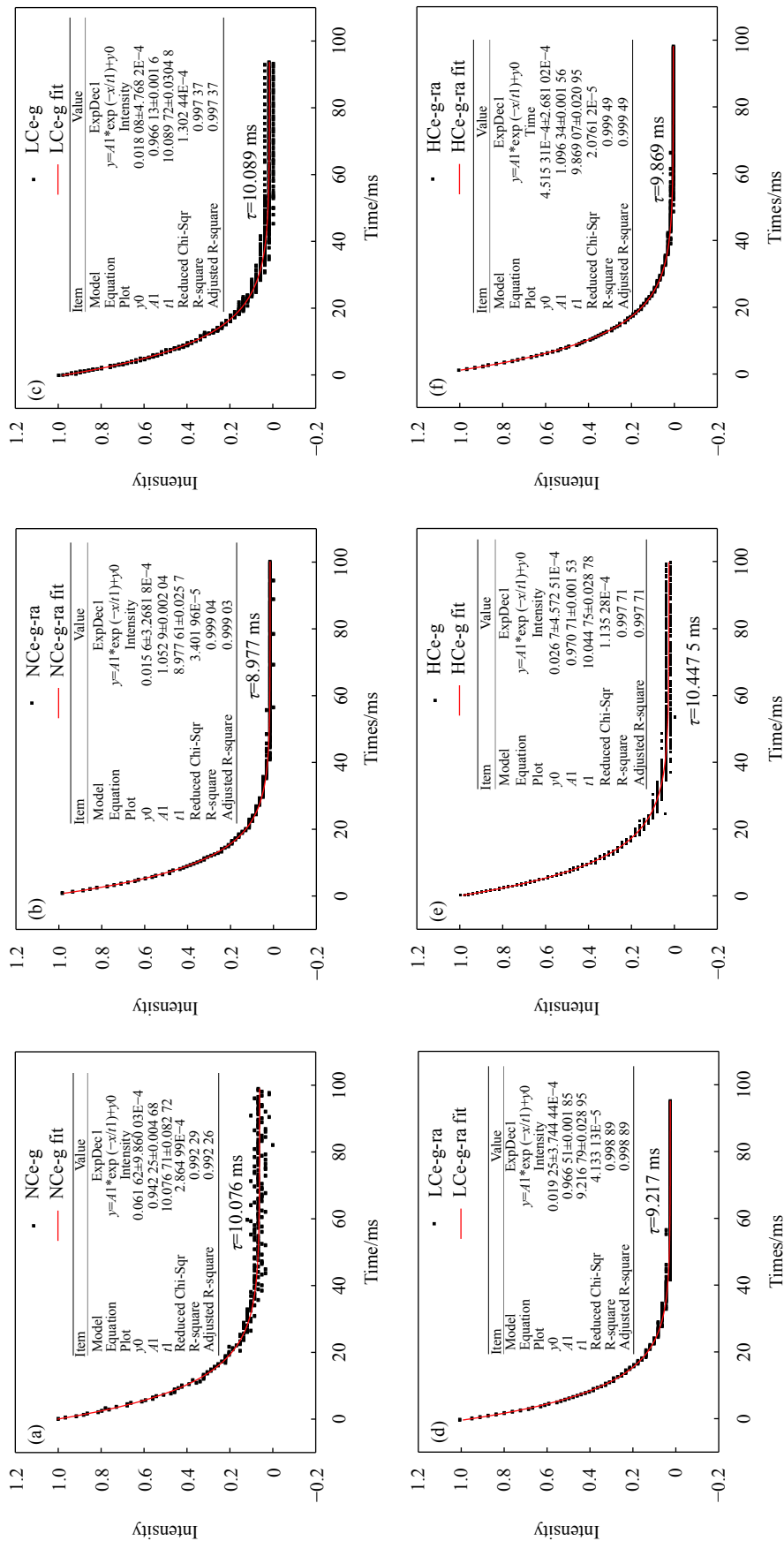


图 6 (a) NCe-g, (b) NCe-g-ra, (c) LCe-g, (d) LCe-g-ra, (e) HCe-g, (f) HCe-g-ra 辐照前后的荧光寿命测试结果
Fig.6 Fluorescence lifetime test results of (a) NCe-g, (b) NCe-g-ra, (c) LCe-g, (d) LCe-g-ra, (e) HCe-g, (f) HCe-g-ra before and after irradiation

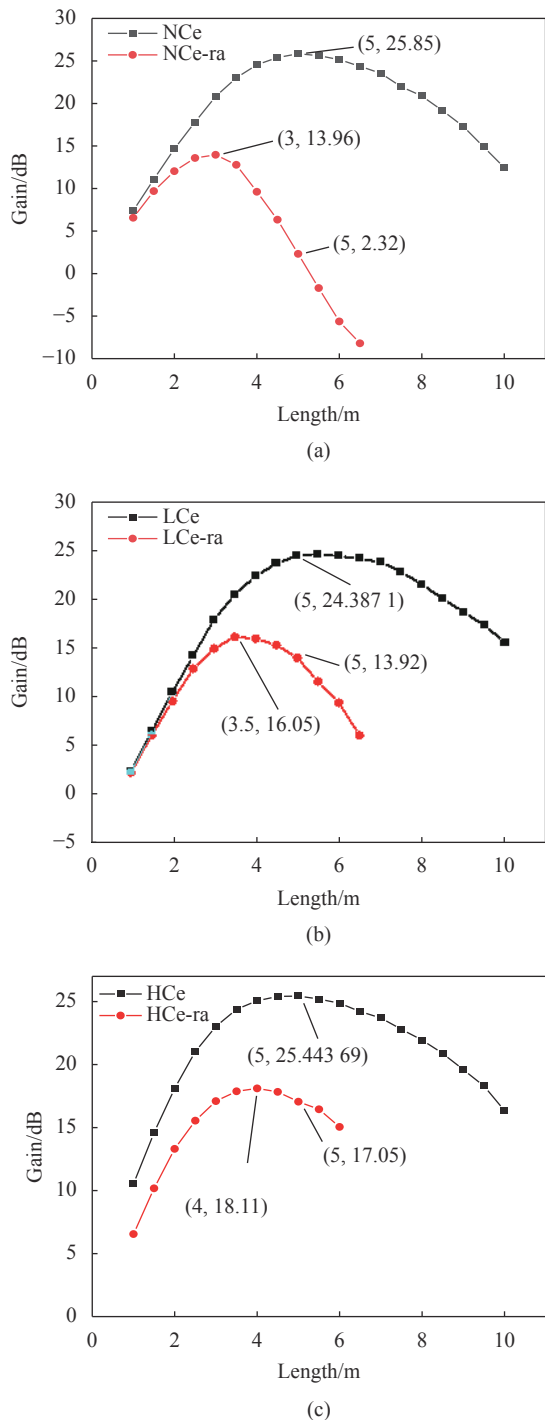


图 7 (a) NCe、(b) LCe、(c) HCe 的辐照前后增益测试结果

Fig.7 Gain test results before and after irradiation of (a) NCe, (b) LCe, (c) Hce

耗变化小, 光纤在辐照前后完成泵浦光吸收所需长度变化更小。

辐照后三种增益值均呈现减小趋势, 是由色心缺陷吸收产生非辐射跃迁而导致的。Ce 掺杂降

低了 AL-OHC 缺陷, 降低了光纤工作波段的辐致损耗, 使光纤的泵浦光更多地被稀土离子吸收而不是被色心缺陷吸收, 提升了泵浦光利用率, 提高了光纤增益, 减小了最佳增益长度变化量。因此, Ce 掺杂能够有效减少光纤中由于辐致损耗而引起的缺陷数量, 同时对光纤的增益性能实现提升, 这验证了 Ce 掺杂掺铒光纤在空间激光通信中的重大潜力, 在未来的空间激光通信中具有很强的空间适应性。

4 结 论

Ce 掺杂可以减少光纤辐照过程中的载流子数量, 进而抑制光纤辐照过程中的色心缺陷形成。因此, 选取高掺 Ce、低掺 Ce 和非掺 Ce 三种掺铒光纤, 从光纤宏观增益性能和微观组织结构变化两方面开展了辐射损伤研究。通过辐照前后的损耗谱和吸收谱测试, 推测引起光纤辐致损耗的主要原因是 900 nm 之前的色心吸收峰在红外波段的拖尾。通过透过谱测试, 分析出现的顺磁缺陷主要为 Al-OHC、Ge(1)、Ge(2) 以及其他 Ge/Si 相关缺陷, 通过 EPR 测试, 验证了光纤工作波段出现辐致损耗主要是由于 Al-OHC 的出现, Ce^{3+}/Ce^{4+} 可以有效降低 Al-OHC 以及 Ge(1)/Ge(2) 相关缺陷的数量。光纤辐照前后的荧光寿命测试表明, 荧光寿命变化较小的样品其耐辐照性能更强, Ce 掺杂能够抑制掺铒光纤荧光寿命的缩短。通过光纤辐照前后增益性能的测试, 验证了 Ce 掺杂能够有效减少光纤中由于辐照而引起的色心缺陷数量, 实现辐照后光纤的增益性能提升。表明 Ce 掺杂能够有效提高光纤耐辐照性能, 该研究结果可以为后续掺铒光纤的空间耐辐照加固技术以及空间应用提供参考。

参考文献:

[1] Xing R X, Sheng Y B, Liu Z J, et al. Investigation on radiation resistance of Er/Ce co-doped silicate glasses under 5kGy gamma-ray irradiation [J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(10): 1329.

[2] Wang Hongbo, Li Qin. Radiation effects and protection technology for optical components of fiber optic gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 682-687. (in

- Chinese)
- [3] Liu Fuhua, Wang Ping, Feng Gang, et al. Influence of Gamma-ray radiation on optical fiber dispersion [J]. *Infraed and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0118001. (in Chinese)
- [4] Shao Chongyun, Yu Chunlei, Hu Lili. Radiation-resistant active fibers for space applications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500014. (in Chinese)
- [5] Dardaillon R, Lancry M, Myara M, et al. Radiation-induced absorption and photobleaching in erbium Al-Ge-codoped optical fiber [J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(29): 14326-14335.
- [6] 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.
- [7] León M, Lancry M, Ollier N, et al. 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] Cao C, Gu Z, Qiu Q, et al. Radiation-resistant Er-doped fiber based on Ge-Ce Co-doping [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(4): 1-5.
- [9] Cao Chi, Wang Bo, Zhu Yingbo, et al. Domestic high quality radiation-resistant erbium-doped fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 2015001. (in Chinese)
- [10] Lagomacini J C, Bravo D, Martín A, et al. Growth kinetics of ALOHC defects in γ -irradiated silica glasses [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2014, 403: 5-8.
- [11] Essid M, Albert J, Brebner J L, et al. Correlation between oxygen-deficient center concentration and KrF excimer laser induced defects in thermally annealed Ge-doped optical fiber preforms [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1999, 246(1-2): 39-45.
- [12] Singh G P, Kaur P, Kaur S, et al. Conversion of Ce^{3+} to Ce^{4+} ions after Gamma ray irradiation on CeO_2 - PbO - B_2O_3 glasses [J]. *Physica B Condensed Matter*, 2013, 408: 115-118.
- [13] Chen Shanqiang, Liu Siqing, Shi Liqin, et al. A software for space radiation effects assessment [J]. *Journal of Astronautics*, 2017, 38(3): 317-322. (in Chinese)
- [14] Song Jingming, Guo Jianhua, Wang Xueqin. Radiation induced attenuation effect for optical fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080008. (in Chinese)
- [15] Feng Wei. Study on irradiation damage mechanism of Yb doped quartz glass [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optical & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences (University of Chinese Academy of Sciences), 2020. (in Chinese)
- [16] Shao Chongyun, Xu Wenbin, Ollier N, et al. Suppression mechanism of radiation-induced darkening by Ce doping in Al/Yb/Ce-doped silica glasses: Evidence from optical spectroscopy, EPR and XPS analyses [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(15): 153101.

Effect of Ce doping on radiation resistance of erbium-doped fiber for space laser communication

Wen Xuan¹, Wang Gencheng^{2,3}, Gao Xin¹, Feng Zhanzu¹, An Heng¹, Yin Hong¹,
Wang Jun¹, She Shengfei^{2,3}, Hou Chaoqi^{2,3}, Yang Shengsheng^{1*}

(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:

Objective Space laser communication has the advantages of fast transmission speed, large bandwidth and good confidentiality, and is one of the key development directions of future interplanetary communication. Laser communication requires fast enough transmission rate and high enough transmission power, and erbium-doped

fiber amplifier with erbium-doped fiber as the core device is widely used as a signal amplifier in the transmitter and receiver of space laser communication. However, erbium-doped fibers are inevitably affected by the irradiation of space particles in space, which can cause a large number of color-centered defects inside the erbium-doped fiber, resulting in a dramatic decrease in the gain capability and slope efficiency of the device, and then affect the smooth implementation of space laser communication missions. Cerium (Ce) doping is considered as an option to suppress the irradiation loss in optical fibers. Ce can be easily doped into SiO₂ glass together with Al, and Ce can suppress the formation of color-centered defects in optical fibers by trapping carriers. Further understanding of the radiation-induced absorption mechanism of Ce doped erbium-doped fibers and enhancing the gain performance of fibers in irradiated environments is essential for the development of space laser communications.

Methods Three kinds of erbium-doped optical fibers, namely, high Ce doped(HCe), low Ce doped(LCe) and non-Ce doped(NCe) fibers were prepared by chelate vapor deposition. The fibers were irradiated at a cumulative dose of 100 krad and a dose rate of 6.17 rad/s using a ⁶⁰Co irradiation source at room temperature. The effect of Ce doping on the performance of the erbium-doped fibers under 100 krad gamma irradiation was investigated. The changes of the fiber color center defects were analyzed by absorption coefficient, loss, and Electron Paramagnetic Resonance (EPR) spectra before and after irradiation of the fiber. By testing the fluorescence lifetime and gain coefficient of the fiber, verification of Ce doping enhances the irradiation resistance of erbium-doped fibers.

Results and Discussions The fiber loss and absorption spectra were tested and found that the loss values of all three fibers decreased gradually with the increase of wavelength after irradiation, and the loss changes in the range of 900-1600 nm showed the characteristics of short wavelength and high loss, and it was speculated that there might be higher absorption peaks before 900 nm. Through the EPR test, The paramagnetic defects are mainly Al-OHC, Ge(1), Ge(2) and other Ge/Si related defects, and the EPR test verified that the irradiation loss in the operating band of the fiber is mainly due to Al-OHC, and Ce³⁺/Ce⁴⁺ can effectively reduce the number of Al-OHC and Ge(1)/Ge(2) related defects number. Thus making the absorption of radiation-induced color-centered defects suppressed. The fluorescence lifetime and gain performance tests showed that the fluorescence lifetime was reduced by 1.099 ms for the NCe and 0.578 ms for the HCe, and the gain of the HCe was 4.15 dB higher than that of the NCe after irradiation. This is due to the fact that Ce doping reduces the AL-OHC defects, decreases the irradiation loss in the working band of the fiber, makes the pump light of the fiber more absorbed by rare-earth ions rather than by color-center defects, and improves the irradiation resistance of the erbium-doped fiber.

Conclusions Ce doping can reduce the number of carriers during fiber irradiation and thus suppress the formation of color-centered defects during fiber irradiation. Three types of erbium-doped fibers containing different ratios of Ce ions were selected to study the radiation damage from both macroscopic gain performance and microstructural changes. The loss spectra and absorption spectra before and after irradiation were tested, and it was assumed that the main cause of irradiation loss was the trailing of the color-centered absorption peak before 900 nm in the infrared band. Through the EPR test, it was found that the irradiation loss of fibers with high Ce content is smaller and less color-centered defects appear. The analysis is due to the opposite change induced by the valence state of Ce^{3+/4+} which tends to keep the balance of the ratio of Ce³⁺ and Ce⁴⁺ ions in the glass, The fluorescence lifetime test before and after fiber irradiation shows that the samples with less change in fluorescence lifetime have

stronger irradiation resistance, and Ce doping can suppress the shortening of fluorescence lifetime of erbium-doped fibers, which verifies that Ce doping can effectively improve the irradiation resistance of erbium-doped fibers. The gain performance of the fiber before and after irradiation shows that Ce doping can effectively reduce the number of color center defects in the fiber due to irradiation, which can improve the gain performance of the fiber after irradiation. The results of this study can be used as a reference for the subsequent spatially irradiation-resistant reinforcement technology and space applications of erbium-doped fibers.

Key words: radiation effects; radiation-resistant reinforcement; erbium-doped fiber characterization tests; space laser communications

Funding projects: National Defense Science and Technology Key Laboratory Fund; CASC Self-developed Projects; National Natural Science Foundation of China (62105358); Key Research and Development Program of Shaanxi (2022GY-098); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (2022JQ-587)