

中子辐照对掺镱光纤材料光学特性的影响

李奋飞 周晓燕 张魁宝 石兆华 陈进湛 叶鑫 吴卫东 李波

Effects of neutron irradiation on optical characteristics of Yb-doped fiber materials

Li Fen-Fei Zhou Xiao-Yan Zhang Kui-Bao Shi Zhao-Hua Chen Jin-Zhan Ye Xin Wu Wei-Dong Li Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 190201 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210083

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210083>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单模热致超大模场掺镱光纤放大器的数值研究

Modeling the single-mode thermally guiding very-large-mode-area Yb-doped fiber amplifier

物理学报. 2017, 66(6): 064201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.064201>

数值孔径对掺镱光纤振荡器模式不稳定阈值影响的实验研究

Experimental study on influence of fiber numerical aperture on mode instability threshold of ytterbium fiber oscillator

物理学报. 2019, 68(11): 114206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182257>

掺Be硼团簇BeB ($n = 10-15$)的基态结构和性质

Ground state structures and properties of Be atom doped boron clusters BeB(15)

物理学报. 2020, 69(19): 193101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200756>

飞秒脉冲抽运掺镱微结构光纤产生超连续谱的实验研究

Experimental study of supercontinuum generation in Yb³⁺-doped microstructure fiber pumped by femtosecond pulses

物理学报. 2019, 68(13): 134206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182051>

级联掺Yb增益光纤提高拍频信号信噪比的实验研究

Experimental study on increasing signal-to-noise ratio of a beat note by cascading an Yb-doped fiber in an Er-fiber comb

物理学报. 2017, 66(2): 024206 <https://doi.org/10.7498/aps.66.024206>

Nd³⁺/Yb³⁺共掺磷酸盐玻璃光纤的发光与激光特性研究

Stimulated emission and laser behaviors of Nd³⁺/Yb³⁺ Co-doped phosphate glass fiber

物理学报. 2017, 66(16): 164204 <https://doi.org/10.7498/aps.66.164204>

中子辐照对掺镱光纤材料光学特性的影响*

李奋飞¹⁾²⁾ 周晓燕^{2)†} 张魁宝^{1)‡} 石兆华²⁾
陈进湛²⁾ 叶鑫²⁾ 吴卫东²⁾ 李波²⁾

1) (西南科技大学, 环境友好能源材料国家重点实验室, 绵阳 621010)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2021年1月13日收到; 2021年5月16日收到修改稿)

采用改进型化学气相沉积法结合稀土螯合物掺杂制备了系列掺镱光纤预制棒及光纤, 并测试了光纤(预制棒)辐照、退火前后的光学性能. 结果表明: 中子辐照后掺镱光纤材料中与 Al 相关的缺陷浓度增多, 导致光纤材料在可见光区域吸收损耗增加. Ce 离子的掺杂可减缓铝氧空位中心 (Al-OHC) 等色心缺陷的增加, 从而有效抑制掺镱光纤的辐致暗化效应. 热退火可降低中子辐致色心缺陷的浓度从而降低光纤材料的吸收, 在一定程度上消除暗化效应.

关键词: 掺镱光纤, 辐照, 光谱, 热退火

PACS: 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc

DOI: 10.7498/aps.70.20210083

1 引言

光纤材料是光纤激光、光纤通信、光纤传感等领域中的重要材料. 以掺镱光纤作为增益介质的光纤激光器, 凭借其效率高、可靠性强、光束质量好、重量轻及体积小等突出优势, 成为高功率激光器产业中的理想器件^[1,2]. 目前, 掺镱光纤激光器不仅在工业、医学、探测等多个领域有广泛的应用, 并且逐渐扩展到了太空环境、加速器和核设施等辐照环境中. 例如, 我国量子通信卫星和空间站的建设都需要掺镱光纤激光器进行空间激光通信^[3,4]. 然而在这些辐照环境中, 光纤材料会受到各种射线、中子、质子等重粒子的辐照, 从而导致光纤性能显著下降, 严重时甚至没有激光输出, 因此有必要对掺镱光纤材料在辐照环境下的性能进行深入研究^[5-8].

国内外众多研究机构对掺镱光纤的辐照特性进行了广泛研究, 然而关于掺镱光纤在中子辐照条件下对性能的影响及暗化影响因素研究较少. 中子是不带电粒子, 研究发现, 中子辐照可以使光纤材料发生原子位移损伤. 并且在中子辐照过程中当位移原子带有较高能量时, 原子核会将能量传递给束缚电子, 使电子激发由低能级跃迁到高能级, 当电子获得的能量足够大时, 它便能脱离原子核的束缚成为自由电子, 产生原子电离效应. 高能中子辐照还能与原子发生核反应生成次级辐射粒子, 与光纤进行次级相互作用^[9]. 辐致暗化效应与掺镱光纤中掺杂离子 (Al, P, Ce 等) 的关系已经被很多研究机构关注并进行了研究^[10-12]. 掺杂 Al 或 P 离子可以减少稀土离子团簇^[13], 但 Al 离子浓度过高可能会产生 Al-OHC, 导致暗化现象^[14]; P 离子掺杂可能会与 Al 结合生成 AlPO_4 , 从而降低光纤的折射率^[15]. 目前这些掺杂离子在辐照中起到的作用仍

* 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金 (批准号: U1830203) 和国家自然科学基金 (批准号: 51672228) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhouxy@caep.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhangkuiobao@swust.edu.cn

不清楚,但是研究表明,这些掺杂离子是辐照后造成光纤输出损耗的主要原因之一^[16,17].掺杂变价离子可以提高掺镱光纤的抗辐照性能,变价离子的抗辐照性能与其氧化还原性有关.辐照过程中,由于变价离子可先跟电离电子进行价态转换,能够给光纤的辐照反应提供缓冲空间,从而提高其抗辐照性能.其中铈(Ce)掺杂对光纤的抗辐照能力有增强作用^[18].光纤的后处理技术中光退火和热退火已经证明对光纤暗化有漂白作用^[19,20].对光纤采取热退火,能有效抑制辐照暗化效应,且在一定的温度范围内,温度越高、退火时间越长,消除暗化的效果越好.不过目前对中子辐照掺镱光纤的热退火研究及机理相关报告较少.

本文通过测试分析掺镱光纤材料中子辐照前后的吸收光谱,研究掺杂离子(Al/Ce)对辐照前后掺镱光纤材料光学特性的影响.之后对辐照后的掺镱光纤预制棒进行热退火处理,测试分析热退火对辐照后掺镱光纤预制棒光学性能的影响.

2 实验

2.1 样品参数及实验条件

实验所用的光纤预制棒及掺镱光纤均采用改进型化学气相沉积法结合稀土螯合物气相掺杂法制备^[21,22].光纤为双包层掺镱光纤,纤芯直径20 μm,内包层直径400 μm.光纤预制棒样品的厚度为2 mm,双面抛光.光纤及预制棒的中子辐照均用中国工程物理研究院快中子辐照装置,中子能量1 MeV,装置运行功率300 W.辐照的注量率为 $4.5 \times 10^{10} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,光纤的中子辐照注量为 $6.5 \times 10^{14} \text{ n}/\text{cm}^2$,预制棒辐照注量为 $8.5 \times 10^{14} \text{ n}/\text{cm}^2$.掺镱光纤(1#和2#)和预制棒(S1和S2)均采用EPMA(电子探针显微分析)对掺杂元素进行了分析.元素分析结果如表1所列.两种光纤中Yb,

Al的掺杂浓度和比例较一致,2#光纤的掺杂元素中有Ce离子.两种预制棒中Yb的掺杂浓度相似,S2中Yb/Al掺杂比例为S1的0.5倍,且掺杂了Ce离子.

表1 光纤及预制棒的EPMA元素分析

Table 1. Electron probe microanalysis (EPMA) of optical fibers and optical fiber preforms.

No.	Doping concentration/mol%		
	Yb	Al	Ce
1#	0.06	0.51	0
2#	0.05	0.53	0.02
S1	0.13	0.78	0
S2	0.11	1.56	0.02

预制棒样品在辐照后进行了热退火实验.使用管式退火炉在空气氛围条件下进行退火,升温速度为100 °C/h,在500 °C恒温3 h.降温到室温后进行光学测试.

2.2 测试方法

掺镱光纤吸收谱测试系统如图1所示,光谱仪测试范围350—1100 nm.光纤吸收使用截断法测试,即测量同一根光纤在不同长度下的光功率,计算表达式为

$$\alpha(\lambda) = -\frac{10}{L} \lg \left[\frac{I_1(\lambda)}{I_0(\lambda)} \right], \quad (1)$$

式中, $\alpha(\lambda)$ 表示波长 λ 处待测光纤纤芯的吸收系数,单位dB/m; $I_1(\lambda)$ 为通过较长光纤样品的光功率, $I_0(\lambda)$ 为通过较短光纤样品的光功率, L 为两段掺镱光纤长度差,单位m.

掺镱光纤预制棒样品的吸收光谱使用Lambda950吸收分光光度系统测试,测试波长范围200—1500 nm,测试步长为1 nm.预制棒荧光寿命测试采用FLS-980型荧光光谱仪测试,使用激发波长为916 nm的LD(半导体激光器)脉冲光源.

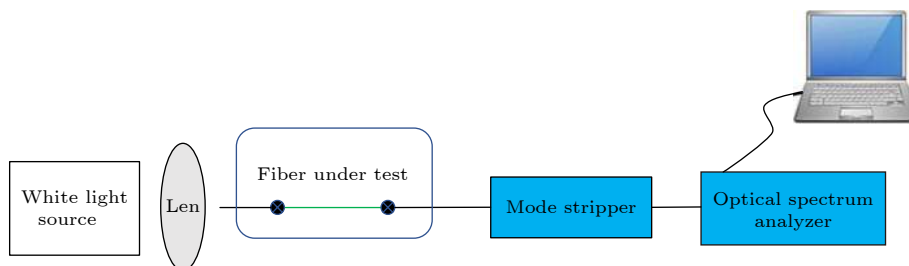


图1 光纤吸收谱测试系统

Fig. 1. The absorption spectra of optical fibers measurement configuration.

3 实验结果及讨论

3.1 中子辐照对掺镜光纤材料吸收的影响

首先测试了掺镜光纤预制棒辐照前后的吸收光谱(图2). 辐照后, 光纤预制棒 S1 的芯棒在 200—800 nm 区域内吸收强度明显增加, 且颜色由无色变为棕黑色(图2(a)). 掺杂 Ce 离子的预制棒 S2 的芯棒在 200—400 nm 有较强的吸收峰, 且辐照后吸收强度有一定的增强, 400—800 nm 处的吸收在辐照后吸收略有增强, 芯棒由无色变成棕色(图2(b)). 从图2可以看出, 中子辐照会使掺镜光纤材料中产生大量色心缺陷, 使其在可见光区域产生明显吸收. Ce 离子的掺杂可一定程度地抑制辐照缺陷的产生, 从而使掺镜光纤材料在可见光波段的吸收不发生明显的变化[23]. 从图2中可以看出, 掺镜光纤材料经过中子辐照后, Yb³⁺本身的吸收峰峰位、半高宽和吸收系数在辐照前后基本没有发生变化, 说明镜离子的周围配位场环境未受到明显影响[4,14].

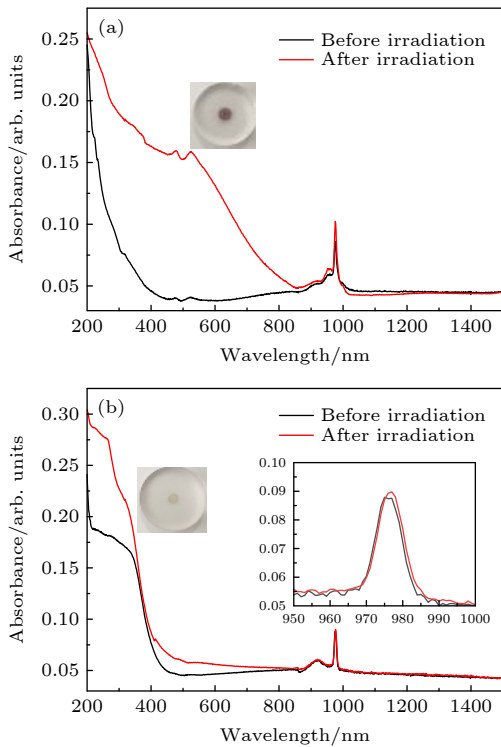


图2 辐照前后 (a) 掺镜光纤预制棒 S1 吸收光谱和 (b) 掺镜光纤预制棒 S2 吸收光谱, 图 (b) 中的插图给出了 980 nm 附近的放大图

Fig. 2. Absorption spectra of (a) optical fiber preform S1 and (b) optical fiber preform S2 before and after irradiation, the insets of panel (b) show the enlarged views near 980 nm.

为进一步研究辐照缺陷的产生过程以及 Ce 离子对中子辐照缺陷的影响, 对辐照后的预制棒 S1 和 S2 吸收光谱进行了高斯拟合(图3、图4). 从图3可看出, 光纤预制棒 S1 芯棒经辐照后产生的辐照缺陷主要为 302 nm 的 Al-E' 缺陷[24] 和 Al-OHC 缺陷(417, 579 nm)[25,26]. 预制棒 S2 辐照后在 200—400 nm 的吸收是 Ce³⁺ (211, 318 nm) 的吸收峰(图4)[18], 可见光区域的吸收为 Al-OHC (477, 579 nm) 缺陷的吸收峰. 掺杂 Ce 离子的预制棒 S2 在辐照后虽有 Al-OHC 缺陷的特征吸收峰, 不过峰强远低于光纤预制棒 S1, 说明 Ce 离子的掺杂可有效缓解 Al-OHC 等色心缺陷的增加, 可在一定程度上抑制中子辐照致暗化效应.

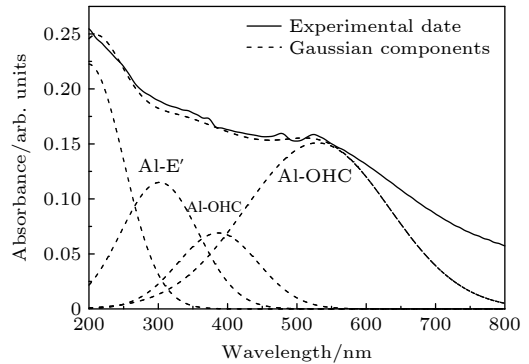


图3 S1 光纤预制棒辐照后实验数据及高斯拟合

Fig. 3. Experimental date and decomposition with Gaussian of S1 optical fiber preform after irradiation.

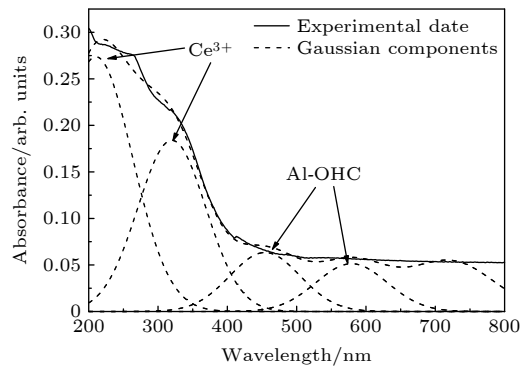
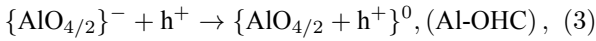
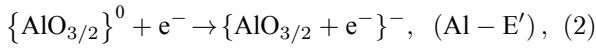


图4 S2 光纤预制棒辐照后实验数据及高斯拟合

Fig. 4. Experimental date and decomposition with Gaussian of S2 optical fiber preform after irradiation.

Al-OHC 等色心缺陷的产生可以用辐照致色心缺陷转变模型解释[27,28]. 如图5所示, 中子辐照过程中光纤材料首先发生原子位移损伤, 然后进一步发生电离效应产生一系列电子和空穴. 而光纤材料在制备过程中本身存在一定的杂质或初始缺陷,

这些缺陷可能是位于导带与电子相关的缺陷或是位于价带与空穴相关的缺陷. 电离产生的电子、空穴对会俘获价带中空穴的缺陷形成了与空穴相关的色心缺陷, 或者俘获导带中电子的缺陷形成了与电子相关的色心缺陷. 辐照后这些新色心缺陷造成掺镱光纤材料在可见光区域的吸收增强^[29]. 掺镱光纤材料中辐致色心缺陷形成过程如下:



Ce 离子的掺杂可使辐致色心缺陷减少, 主要是因为 Ce 离子的变价性, 可以快一步捕获辐照中子电离效应产生的电子、空穴对. Ce⁴⁺能够俘获电子形成 Ce³⁺, 而 Ce³⁺可以俘获空穴, 使光纤中空穴与缺陷结合形成的色心消失而形成 Ce⁴⁺, 这在一定程度上抑制了辐致缺陷的增长^[30]. 过程如下:

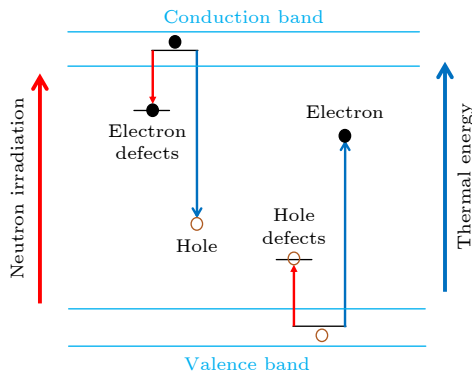
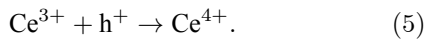
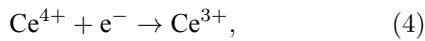


图 5 辐致色心缺陷转变模型

Fig. 5. Model of radiation darkening color center defects transfer.

为进一步确定中子辐照对光纤应用性能的影响, 利用光纤吸收测试平台测试了掺镱光纤辐照前后的吸收谱(图 6). 辐照前后的吸收谱和预制棒的吸收光谱变化较类似, 光纤 1#在辐照前其可见光区域没有明显吸收峰, 中子辐照后在 350—800 nm 范围内吸收强度明显增加. 光纤 2#在辐照前有约 380 nm 的 Ce 离子吸收峰, 辐照后在 400 nm 左右出现较强的吸收峰, 应是 Ce 离子和色心缺陷的共同吸收峰. 在波长 500—800 nm 区域范围吸收峰强增加较小. 光纤 1#和 2#辐照前后的吸收强度变化说明, 辐照过程中 Ce 离子参与并减缓了光纤

色心缺陷的产生, 从而在一定程度上减少了辐照后光纤中存在的色心缺陷. 通过掺镱光纤及预制棒辐照前后吸收光谱的变化特性比较可以看出, 吸收光谱变化特性较类似, 因此可通过研究光纤预制棒辐照及退火的光谱特性来推论中子辐照影响光纤应用性能的关键因素.

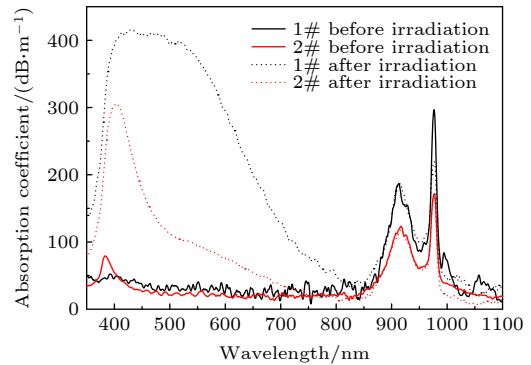


图 6 中子辐照前后光纤的吸收谱

Fig. 6. Absorption spectrum of optical fibers before and after neutron irradiation.

3.2 热退火对掺镱光纤材料中子辐致吸收的影响

中子辐照掺镱光纤材料产生的大部分色心缺陷不会在自然条件下消退^[31]. 由于缺乏相关文献对中子辐照后光纤材料退火的研究. 我们自主设计了热退火参数条件, 并且在文中列出的退火条件下, 测试了光纤预制棒芯棒热退火后的吸收光谱(图 7). 对比退火前后的吸收特性可以看出, 预制棒 S1 在可见光的吸收峰强较退火前明显下降, 芯棒颜色由棕黑色变成浅棕色. 预制棒 S2 退火后, 可见光区域的吸收强度基本和辐照前一致, 芯棒颜色由棕色变透明. 热退火后预制棒 S2 在 200—400 nm 的吸收强度大幅降低, 说明 Ce 离子参与了捕获热退火产生的电子、空穴对, 从而使热退火后 S2 中的 Ce 离子的吸收强度降低. 预制棒 S2 与 S1 相比, 由于 Ce 离子的抑制作用, 辐照后产生的 Al-OHC 等色心缺陷浓度较低, 在相同热退火条件下, 预制棒 S2 热退火后基本完全恢复到了辐照前的光学特性.

3.3 中子辐照及退火对掺镱光纤材料中 Yb³⁺光学特性的影响

表 2 列出了掺镱光纤预制棒辐照前后及热退火后 Yb³⁺的荧光寿命, τ_1 为辐照前荧光寿命,

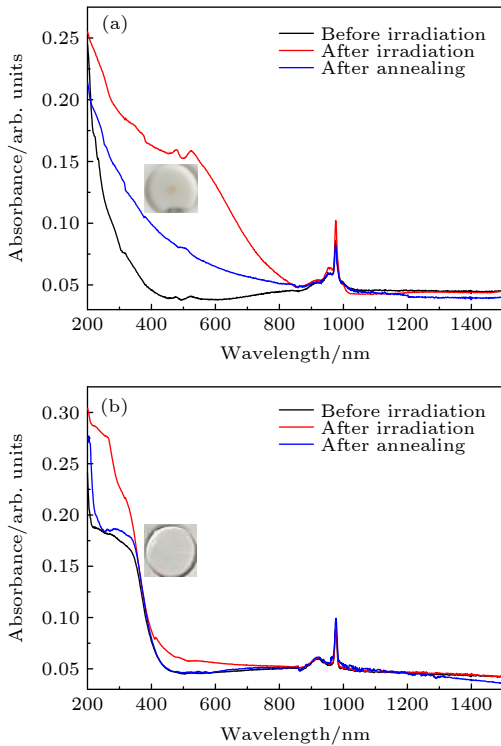


图 7 中子辐照前后及热退火后 (a) 掺镱光纤预制棒 S1 吸收光谱和 (b) 掺镱光纤预制棒 S2 吸收光谱

Fig. 7. Absorption spectra of (a) optical fiber preform S1 and (b) optical fiber preform S2 before and after irradiation and after annealing.

τ_2 为辐照后荧光寿命, τ_3 为热退火后的荧光寿命. 中子辐照后两种预制棒中 Yb^{3+} 荧光寿命均明显下降. 光纤预制棒 S1 辐照后 Yb^{3+} 荧光寿命下降主要是 Yb^{3+} 离子只有两个能级, 辐照后能量可从上级转移给辐照后产生的 Al-OHC 色心缺陷, 再经后者通过辐射跃迁或无辐射跃迁释放出来, 这种能量传递最终导致辐照后掺镱光纤预制棒中 Yb^{3+} 荧光寿命下降^[14]. 而掺杂 Ce 离子的 S2 光纤预制棒辐照后也有少量 Al-OHC 色心缺陷, 因此两种预制棒辐照后 Yb^{3+} 荧光寿命下降幅度基本一样. 退火后, 两个预制棒中 Yb^{3+} 荧光寿命基本恢复到辐照前的水平, 说明热退火可在一定程度上降低 Al 相关的结构缺陷, 从而降低中子辐照暗化效应, 是一种较为有效的手段.

表 2 辐照前后及热退火后 Yb^{3+} 的荧光寿命
Table 2. Fluorescence lifetime of Yb^{3+} before and after irradiation and after annealing.

No.	t/ms		
	τ_1	τ_2	τ_3
S1	0.948	0.749	0.929
S2	0.939	0.747	0.907

在我们前期工作及文献调研中^[4,14], 可看出中子辐照和射线辐照对掺镱光纤材料光学性能的影响较相似. 主要原因是射线和中子辐照均会发生电子电离效应产生自由电子、空穴对, 然后与材料中原有缺陷结合生成色心缺陷, 因此在光谱分析中, 两者的辐致色心缺陷的吸收拟合结果较类似. 然而射线辐照后的光纤材料在常温下很快会发生退火效应, 因此一般光学性能测试均在辐照 2 h 内完成. 中子辐照后则没有这种现象. 主要原因是射线辐照能量较低时, 原子不会发生位移损伤, 辐致缺陷并不是很稳定, 因此常温退火效应明显. 而中子辐照会发生原子位移损伤^[9], 因此只有热退火时才会一定程度上降低其缺陷浓度. 射线及中子辐照过程中的辐致损伤机理应该不完全一致, 仅用光谱进行分峰拟合的手段并不能深入分析其辐致机理, 因此需要对结构缺陷进行进一步分析, 这部分工作将会是以后工作的重点.

4 结 论

本文对掺镱光纤及光纤预制棒中子辐照前后的光学性能进行了分析, 发现在中子辐照后掺镱光纤在可见光区域吸收损耗明显增加, 主要与中子辐照后掺镱光纤材料中 Al 相关缺陷浓度的增加有关. 光纤中掺杂 Ce 离子可通过变价俘获电子、空穴对, 有效抑制掺镱光纤材料中色心缺陷的增加. 通过热退火可以使光纤材料中无法自然恢复的色心缺陷消失, 并使掺镱光纤材料光学性能恢复.

参考文献

- [1] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, Hanna D C 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 1049
- [2] Lu K, Dutta N K 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 576
- [3] Yan P, Wang X J, Li D, Huang Y S, Sun J Y, Xiao Q R, Gong M L 2017 *Opt. Lett.* **42** 1193
- [4] Huang H Q, Zhao N, Chen G, Liao L, Liu Z J, Peng J G, Dai N L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 200201 (in Chinese) [黄宏琪, 赵楠, 陈瑰, 胡姝玲, 廖雷, 刘自军, 彭景刚, 戴能利 2014 *物理学报* **63** 200201]
- [5] Lezius M, Predehl K, Stower W, Turler A, Greiter M, Hoischen C, Thirof P, Assmann W, Habs D, Prokofiev A, Ekstrom C, Hansch T W, Holzwarth R 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 425
- [6] Girard S, Vivona M, Laurent A, Cadier B, Marcandella C, Robin T, Pinsard E, Boukenter A, Ouerdane Y 2012 *Opt. Express* **20** 8457
- [7] Girard S, Ouerdane Y, Origlio G, Marcandella C, Boukenter A, Richard N, Baggio J, Paillet P, Cannas M, Bisutti J,

- Meunier J P, Boscaino R 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 3473
- [8] Fox B P, Simmons-Potter K, Simmons J H, Thomes Jr W J, Bambha R P, Kliner D A V 2008 *Proc. SPIE Fiber Lasers V: Technol. Syst. Appl.* **6873** 68731F
- [9] Song J M, Guo J H, Wang X Q, Hu Z L 2012 *Laser Optoelectron. Prog.* **49** 58 (in Chinese) [宋镜明, 郭建华, 王学勤, 胡姝玲 2012 激光与光电子学进展 **49** 58]
- [10] Jetschke S, Unger S, Schwuchow A, Leich M, Kirchhof J 2008 *Opt. Express* **16** 15540
- [11] Deschamps T, Ollier N, Vezin H, Gonnet C 2012 *J. Chem. Phys.* **136** 014503
- [12] Jetschke S, Unger S, Schwuchow A, Leich M, Jager M 2016 *Opt. Express* **24** 13009
- [13] Arai K, Namikawa H, Kumata K, Honda T 1986 *J. Appl. Phys.* **59** 3430
- [14] Li F F, Zhou X Y, Zhang K B, Chen J Z, Gao C, Zhang L H, Shi Z H, Xia H D, Ye X, Wu W D, Li B 2020 *High Power Laser Part. Beams* **32** 081003 (in Chinese) [李奋飞, 周晓燕, 张魁宝, 陈进湛, 高聪, 张立华, 石兆华, 夏汉定, 叶鑫, 吴卫东, 李波 2020 强激光与粒子束 **32** 081003]
- [15] Wang F, Shao C Y, Yu C L, Wang S K, Zhang L, Gao G J, Hu L L 2019 *J. Appl. Phys.* **125** 173104
- [16] Origlio G, Messina F, Girard S, Cannas M, Boukenter A, Ouerdane Y 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 123103
- [17] Shao C Y, Ren J J, Wang F, Ollier N, Xie F H, Zhang X Y, Zhang L, Yu C L, Hu L L 2018 *J. Phys. Chem. B* **122** 2809
- [18] Engholm M, Jelger P, Laurell F, Norin L 2009 *Opt. Lett.* **34** 1285
- [19] Montiel i Ponsoda J J, Söderlund M J, Koplow J P, Koponen J J, Honkanen S 2010 *Appl. Opt.* **49** 4139
- [20] Zhao N, Xing Y B, Li J M, Liao L, Wang Y B, Peng J G, Yang L Y, Dai N L, Li H Q, Li J Y 2015 *Opt. Express* **23** 25272
- [21] Peng K, Wang Z, Zhan H, Ni L, Gao C, Wang, X L, Wang Y Y, Wang J J, Jing F, Lin A X 2016 *Electron. Lett.* **52** 1942
- [22] Liu S, Zhan H, Peng K, Sun S H, Li Y W, Jiang J L, Ni L, Wang X L, Yu J, Zhu R H, Wang J J, Jing F, Lin A X 2018 *Opt. Fiber Technol.* **46** 297
- [23] Feng W, She S F, Wang P F, Liu Y S, Chang C, Hou C Q, Li W N 2020 *J. Non-Cryst. Solids* **528** 119540
- [24] Mady F, Guttilla F, Benabdesselam M, Blanc F 2019 *Opt. Mater. Express* **9** 2466
- [25] Deschamps T, Vezin H, Gonnet C, Ollier N 2013 *Opt. Express* **21** 8382
- [26] Shao C Y, Xu W B, Ollier N, Guzik M, Boulon G, Yu L, Zhang L, Yu C L, Wang S K, Hu L L 2016 *J. Appl. Phys.* **120** 153101
- [27] Chen X D, Heng X B, Tang G W, Zhu T T, Sun M, Shan X J, Wen X, Guo J Y, Qian Q, Yang Z M 2016 *Opt. Express* **24** 9149
- [28] Mady F, Duchez J B, Mebrouk Y, Benabdesselam M 2014 *AIP Conf. Proc.* **1624** 87
- [29] Arai T, Ichii K, Tanigawa S, Fujimaki M 2011 *Proc. SPIE Fiber Lasers V: Technol. Syst. Appl.* **7914** 79140k
- [30] Stroud J S 1965 *J. Chem. Phys.* **43** 2442
- [31] Söderlund M J, Montiel i Ponsoda J J, Koplow J P, Honkanen S 2009 *Opt. Express* **17** 9940

Effects of neutron irradiation on optical characteristics of Yb-doped fiber materials*

Li Fen-Fei¹⁾²⁾ Zhou Xiao-Yan^{2)†} Zhang Kui-Bao^{1)‡} Shi Zhao-Hua²⁾
Chen Jin-Zhan²⁾ Ye Xin²⁾ Wu Wei-Dong²⁾ Li Bo²⁾

1) (*State Key Laboratory of Environment-friendly Energy Materials, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China*)

2) (*Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 13 January 2021; revised manuscript received 16 May 2021)

Abstract

Yb-doped fiber laser is a very appealing technology to implement space communication, laser radar and nuclear facilities due to its reduced weight, size, high efficiency, high peak power combined with good beam quality. However, Yb-doped fiber materials will suffer a harsh ionizing radiation (such as neutron, proton and electron) under the condition of irradiation. The radiation-induced darkening effect can lead the fiber loss to increase obviously, the laser slope efficiency to decrease drastically, and even no laser output to be observed in severe cases. Therefore, it is necessary to conduct in-depth research on the performance changes of Yb-doped fiber materials subjected to the irradiation. In this paper, a series of Yb-doped optical fibers and optical fibers is prepared by the improved chemical vapor deposition method combined with rare-earth chelate-doped. And the optical properties of the optical fiber before and after being irradiated and annealed are tested. We mainly investigate the absorption spectrum of Yb-doped fiber material. The results show that the concentration of Al-related defects in the Yb-doped fiber material increases after neutron irradiation, and the absorption loss in the visible region increases. And the color center defects produced by the irradiation will significantly reduce the Yb ion fluorescence lifetime. The doping of Ce ions can reduce the Al-oxygen hole center (Al-OHC) color center defects, and can suppress the radiation-induced darkening effect of Yb-doped fiber to a certain extent. Thermal annealing can reduce the absorption of fiber material by reducing the concentration of neutron radiation-induced color center defects, and thus eliminating the darkening effect to a certain extent. Finally, with our previous research, we find that neutron irradiation and ray irradiation have similar effects on the optical properties of Yb-doped fiber materials. The main reason is that the electron ionization effects occur due to both ray irradiation and neutron irradiation to generate free electron and hole pairs, which then combine with the original defects in the material to turn into color center defects. However, the color center defects caused by neutron irradiation are more stable and require thermal annealing to be eliminated. And the results obtained in this study provide theoretical basis and solution for developing the Yb-doped fibers with high laser performance and high radiation resistance.

Keywords: Yb-doped fiber, radiation, spectra, thermal annealing

PACS: 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc

DOI: 10.7498/aps.70.20210083

* Project supported by the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China and the China Academy of Engineering Physics (Grant No. U1830203) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51672228).

† Corresponding author. E-mail: zhouxy@caep.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhangkuihao@swust.edu.cn