

## 掺铈多组分硅酸盐玻璃电子辐照着色研究

傅鑫杰, 宋力昕, 李家成

(中国科学院 上海硅酸盐研究所, 特种无机涂层重点实验室, 上海 200050)

**摘 要:** 采用吸收光谱、电子顺磁共振谱和光致发光谱对掺 Ce 多组分硅酸盐玻璃 K509 在 10 MeV 电子辐照下的色心动力学进行了研究。结果表明, 电子辐照引起 K509 玻璃可见光透过率降低的色心类型为非桥氧空穴色心 HC1 和 HC2。在剂量率一定的情况下, 色心浓度随总剂量的增大呈指数函数增大; 在总剂量一定的情况下, 色心浓度随剂量率增大呈指数函数减小。 $\text{Ce}^{3+}$  荧光强度的变化表明辐照过程中  $\text{Ce}^{3+}$  浓度与辐照总剂量负相关, 与辐照剂量率正相关, 验证了掺 Ce 玻璃耐辐照机理:  $\text{Ce}^{3+}$  吸收辐照产生的空穴从而抑制空穴色心 HC1 和 HC2 的形成, 且不引入额外的可见光波段吸收。通过对  $\text{Ce}^{3+}$  宽带荧光峰进行高斯拟合, 得到了 K509 中  $\text{Ce}^{3+}$  能级结构图。

**关 键 词:** 耐辐照玻璃; 铈离子; 电子辐照; 色心; 动力学

中图分类号: TB321 文献标识码: A

## Coloration of Ce-doped Multicomponent Silicate Glasses by Electron Irradiation

FU Xin-Jie, SONG Li-Xin, LI Jia-Cheng

(Key Laboratory of Inorganic Coating Materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** The coloration of Ce-doped multicomponent silicate glass (type K509) irradiated by 10 MeV electrons was investigated by absorption spectra, electron paramagnetic resonance and photoluminescence spectra. The results show that non-bridging oxygen hole centers (HC1 and HC2) are induced in K509 glasses after electron irradiation, leading to significant degradation of visible transmission. The concentration of color center grows in an exponential law with the increase of radiation dose at the same dose rate, and decreases in exponential decay law with radiation dose rate at the same total dose. According to photoluminescence spectra, the concentration of  $\text{Ce}^{3+}$  ions has a negative correlation with radiation dose, and has a positive correlation with dose rate, which proves the mechanism of radiation-hardness in cerium-doped glasses.  $\text{Ce}^{3+}$  ions capturing holes induced by electron irradiation to form  $\text{Ce}^{4+}$  inhibits the formation of hole trapped color centers, HC1 and HC2, which avoids additional absorption in visible light range. The energy level diagram of  $\text{Ce}^{3+}$  in K509 glasses is also obtained by Gaussian resolution of the broad asymmetric emission spectra of  $\text{Ce}^{3+}$ .

**Key words:** radiation-hard glass; cerium ions; electron irradiation; color center; kinetics

舷窗玻璃是航天员观察航天器外部空间环境的重要窗口材料<sup>[1]</sup>, 需要同时满足高透过率、高强度和低膨胀系数等综合要求, 目前主要采用多组分硅酸

盐玻璃<sup>[2-3]</sup>。空间环境中存在大量粒子, 如电子、质子和紫外线等, 对玻璃会造成辐照着色<sup>[4-9]</sup>。随着辐照剂量的增加玻璃光透过率下降, 这会严重威胁航

收稿日期: 2014-01-08; 收到修改稿日期: 2014-03-23

作者简介: 傅鑫杰(1988-), 男, 硕士研究生. E-mail: fuxinjie@student.sic.ac.cn

通讯作者: 李家成, 副研究员. E-mail: jchli2012@mail.sic.ac.cn

天器的正常运行。随着航天技术的发展, 航天器在轨时间大幅延长, 玻璃辐照着色已经成为空间舷窗玻璃长期服役必须克服的材料科学问题。

掺杂抗辐照稳定剂是提高多组分硅酸盐玻璃耐辐照性能的主要途径。 $\text{Ce}$  通过  $\text{Ce}^{3+}$  和  $\text{Ce}^{4+}$  的相互转化可以有效吸收辐照过程产生的电子和空穴<sup>[10]</sup>, 抑制色心的形成, 且  $\text{Ce}^{3+}$  和  $\text{Ce}^{4+}$  本征吸收在紫外区域,  $\text{Ce}$  离子间的转化不引入额外的可见光吸收<sup>[11-12]</sup>, 成为最有效的抗辐照稳定剂。研究发现  $\text{Ce}$  掺杂浓度以及  $\text{Ce}^{3+}$  和  $\text{Ce}^{4+}$  的比例对掺铈多组分硅酸盐玻璃的耐辐照性能有很大影响<sup>[8, 13-14]</sup>, 但相关机理的研究还比较缺乏, 尤其是  $\text{Ce}$  离子在辐照过程中的微观转变需要更加深入的研究。

地面耐辐照考核是对空间玻璃服役性能的有效评估, 由于空间粒子环境复杂, 总剂量和剂量率连续, 而地面考核往往采用固定的总剂量和剂量率, 因此深入而全面地研究辐照着色色心动力学将有助于增强地面考核的科学性和准确性<sup>[15]</sup>。本工作通过吸收光谱、电子顺磁共振(EPR)谱和光致发光(PL)谱对掺  $\text{Ce}$  多组分硅酸盐玻璃电子辐照着色进行研究, 得到色心浓度与总剂量、剂量率的动力学关系, 在此基础上, 分析了辐照过程  $\text{Ce}$  离子的微观转变机理。

## 1 实验方法

### 1.1 实验样品

样品为掺  $\text{Ce}$  多组分硅酸盐玻璃 K509, 由成都光明光电股份有限公司生产, 样品尺寸  $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ , 双面抛光。采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)分析得到的样品化学组成为(wt%):  $77.58\text{SiO}_2 \cdot 10.67\text{Na}_2\text{O} \cdot 9.11\text{K}_2\text{O} \cdot 1.86\text{BaO} \cdot 0.13\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0.2\text{ZnO} \cdot 0.011\text{CaO} \cdot 0.002\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 0.43\text{CeO}_2$ 。

### 1.2 电子辐照

电子辐照采用上海市农业科学院的 ESS-010-03 型电子加速器, 电子能量为  $10\text{ MeV}$ , 总剂量效应实验的剂量率为  $1\text{ kGy/s}$ , 总剂量分别为  $200$ 、 $400$ 、 $600$ 、 $800$ 、 $1000\text{ kGy}$ ; 剂量率效应实验的总剂量为  $1000\text{ kGy}$ , 剂量率分别为  $1$ 、 $2$ 、 $3$ 、 $4$ 、 $5\text{ kGy/s}$ 。电子束垂直入射玻璃样品, 辐照环境温度为室温, 每一剂量辐照过程连续, 样品辐照完立即放入液氮中保存以抑制色心漂白。

### 1.3 吸收谱测试

采用 Varian Cary 500 分光光度计测试样品辐照前后可见光波段  $380\sim 780\text{ nm}$  光学吸收谱。

## 1.4 光致发光(PL)谱测试

采用 Edinburgh Instruments 公司的 FLS920 稳态瞬态荧光光谱仪测试样品的 UV-Vis 光致发光(PL)谱, 测试发射谱时激发波长为  $342\text{ nm}$ , 测试激发光谱时监控波长为  $412\text{ nm}$ , 光谱测试均在室温下进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 总剂量效应

剂量率为  $1\text{ kGy/s}$ , 不同总剂量下 K509 玻璃可见区域吸收的变化如图 1 所示。从图 1 可以看出, 随着电子辐照剂量的增加, 可见区域吸收增大, 曲线间距逐渐减小,  $600\sim 1000\text{ kGy}$  曲线接近重叠, 表明  $600\text{ kGy}$  之后玻璃可见区域色心浓度趋于饱和。随着辐照总剂量的增加, K509 玻璃颜色也逐渐由无色变为黄褐色。

根据 Smakula 公式<sup>[16]</sup>, 色心浓度正比于色心吸收峰面积, 因此对可见光波段吸收峰进行面积积分, 得到可见吸收带积分面积随辐照总剂量的变化关系, 如图 2 所示。色心浓度随总剂量增加呈指数函数增

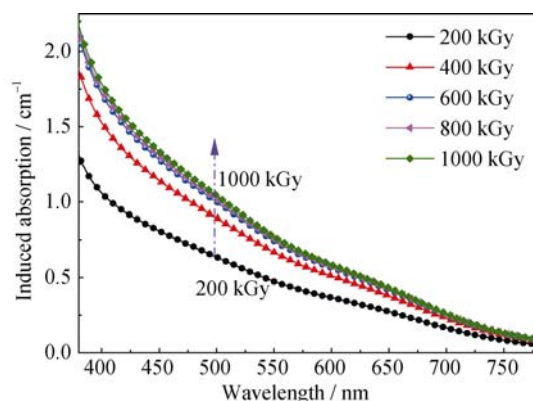


图 1 不同剂量电子辐照后 K509 吸收变化(剂量率:  $1\text{ kGy/s}$ )  
Fig. 1 Induced absorption spectra of K509 glass after being irradiated with different doses (dose rate:  $1\text{ kGy/s}$ )

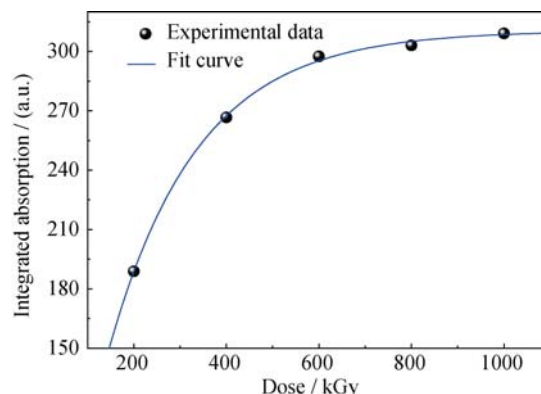


图 2 可见吸收带积分面积与剂量的关系(剂量率:  $1\text{ kGy/s}$ )  
Fig. 2 Integrated absorption area in visible band as a function of dose (dose rate:  $1\text{ kGy/s}$ )

长, 可用拟合函数  $N(D)=N_{\infty}(1-\exp(-\sigma D))$  进行描述, 其中  $N$  为色心浓度,  $N_{\infty}$  为饱和色心浓度,  $\sigma$  为电离激发截面,  $D$  为辐照剂量。  $N_{\infty}$  值为 312.8,  $\sigma$  值为 0.0047。色心呈饱和指数增长的动力学规律说明简单体系硅酸盐玻璃的辐照色心增长模型<sup>[10]</sup>在多组分硅酸玻璃中同样适用, 动力学常数  $N_{\infty}$  和  $\sigma$  与简单体系玻璃的差异主要由混合碱效应<sup>[17]</sup>引起。

为确定辐照后样品产生的色心类型, 采用电子顺磁共振(EPR)对自旋色心进行分析。图 3 为一阶微分 EPR 谱, 辐照后 K509 样品有较强的  $g=2.0065$  的信号, 在  $H=325$  mT 附近有谱线重叠。根据 Zatsepin 的谱线模拟结果,  $g=2.0065$  为 HC1 色心和 HC2 色心的重叠信号<sup>[17]</sup>。HC1 和 HC2 均为非桥氧空穴色心, 其中 HC1 的结构为  $(\equiv\text{Si}-\text{O}^{\cdot-}+\text{h}^{\cdot})$ , 而 HC2 的结构为  $(\text{h}^{\cdot}+\text{O}-\text{Si}-\text{O}^{\cdot-}+\text{h}^{\cdot})$ <sup>[18-19]</sup>。HC1 色心主要引起 400 nm 附近的光学吸收, HC2 色心引起 630 nm 附近的光学吸收<sup>[10]</sup>。由于 HC1 和 HC2 均为俘获空穴色心, 且吸收带在可见光波段, 因此可见光波段色心的形成与空穴密切相关, 而抑制空穴色心的过程则与 Ce 的行为密切相关<sup>[14]</sup>。

Ce 在多组分硅酸盐中主要以  $\text{Ce}^{4+}$  和  $\text{Ce}^{3+}$  两种形式存在<sup>[13]</sup>, 且两者的比例主要取决于玻璃熔制过程的氧化还原环境。Stroud 等<sup>[10]</sup>认为两种价态的 Ce 在辐照过程中相互转化,  $\text{Ce}^{4+}$  吸收辐照过程产生的电子,  $\text{Ce}^{3+}$  吸收辐照过程产生的空穴, 即  $\text{Ce}^{4+}+\text{e}^{-}\rightarrow\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Ce}^{3+}+\text{h}^{\cdot}\rightarrow\text{Ce}^{4+}$ , 通过这一过程抑制色心的形成。由于  $\text{Ce}^{4+}$  为  $4f^0$  结构, 无光致发光; 而  $\text{Ce}^{3+}$  为  $4f^1$  结构, 存在  $4f$  组态内跃迁( ${}^2F_{7/2}\rightarrow{}^2F_{5/2}$ ) 及  $5d\rightarrow 4f$  组态间的电子跃迁<sup>[12-13, 20]</sup>。因此  $\text{Ce}^{3+}$  的变化可以通过 PL 谱进行表征。图 4 为不同剂量辐照后 K509 玻璃的激发谱和发射谱, 从图中可以看出, K509 玻璃激发波长范围较宽(275~375 nm), 且峰值激发波长位

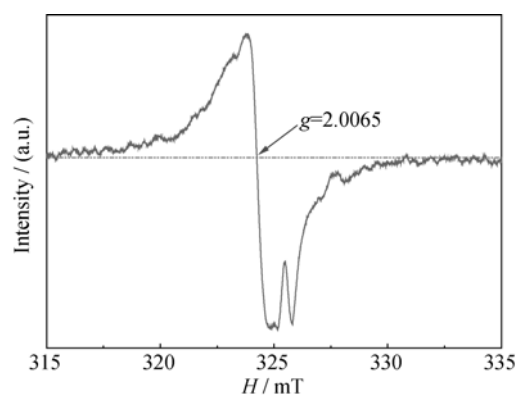


图 3 K509 玻璃辐照后 EPR 谱(总剂量: 1000 kGy)

Fig. 3 EPR spectra of K509 glass after being irradiated by electron radiation (dose: 1000 kGy)

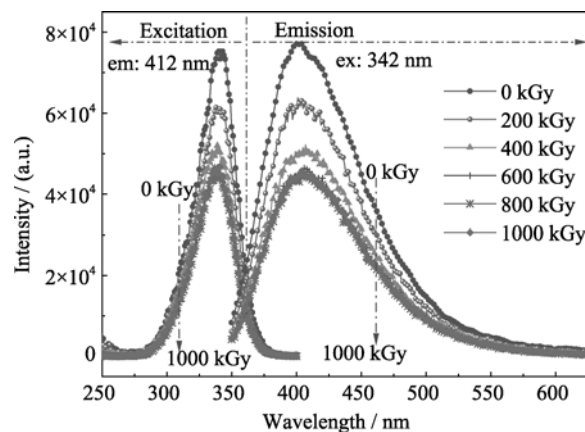


图 4 不同剂量辐照后 K509 激发谱和发射谱(剂量率: 1 kGy/s)  
Fig. 4 Excitation and emission spectra of K509 glasses after being irradiated with different doses (dose rate: 1 kGy/s)

于 342 nm; 发射谱主要位于 350~600 nm, 峰值波长 412 nm, 与 Baccaro 等<sup>[9]</sup>的结果接近。随着辐照剂量的增大, 激发谱强度和发射谱强度均减小。由于电子束能量和剂量率固定, 基质传递给  $\text{Ce}^{3+}$  能量也固定, 因此荧光强度的减小只能是由样品中  $\text{Ce}^{3+}$  浓度的减小引起的。即  $\text{Ce}^{3+}$  浓度随着辐照总剂量的增大而减少, 呈负相关, 这与 Morono 等<sup>[12]</sup>的结果一致, 这也间接验证了  $\text{Ce}^{3+}+\text{h}^{\cdot}\rightarrow\text{Ce}^{4+}$  的耐辐照机理。

为确定掺铈 K509 中  $\text{Ce}^{3+}$  的能级结构和跃迁过程, 对图 4 中 1000 kGy 辐照后的发射谱(ex:342 nm)进行了高斯拟合。如图 5 所示, 在 342 nm 激发波长下, 峰值位于 412 nm 的发射峰可以分解为峰值分别位于 400 和 440 nm 的高斯峰。由于  $\text{Ce}^{3+}4f$  轨道的一个电子自旋耦合分裂为  ${}^2F_{5/2}$  和  ${}^2F_{7/2}$  两个能级<sup>[20]</sup>, 且被  $5s5p$  轨道有效屏蔽, 因此这两个能级受晶格场影响较小, 两者的能量差在晶体材料中为  $2200\text{ cm}^{-1}$ <sup>[21-23]</sup>, 与图 5 得到的高斯拟合峰 400 和 440 nm 的能量差( $2272\text{ cm}^{-1}$ )接近。5d 轨道位于基态之上  $40000\text{ cm}^{-1}$  附近<sup>[13]</sup>, 在晶体(如 YAG)中分裂为 5 个能级。由于处于轨道外层, 5d 轨道受晶格场影响较大, 且玻璃结构的无序性使得  $\text{Ce}^{3+}$  在玻璃中存在多种格位, 各格位基质晶体场的大小不同而使  $\text{Ce}^{3+}5d$  能级展宽, 甚至变为连续。K509 玻璃中只有 Ce 是发光中心, 不存在与其他发光中心的能量传递, 因此根据高斯分峰结果以及  $\text{Ce}^{3+}$  的能级特征, 峰值为 412 nm 的  $\text{Ce}^{3+}$  宽带荧光发射机理为: 5d 轨道最低能级分别跃迁至  ${}^2F_{5/2}$  和  ${}^2F_{7/2}$ , 形成峰值为 400 和 440 nm 的两个发射峰, 两者叠加表现为峰值为 412 nm 的宽带发射。根据以上分析结果, 得到 K509 玻璃中  $\text{Ce}^{3+}$  的能级结构如图 6 所示。

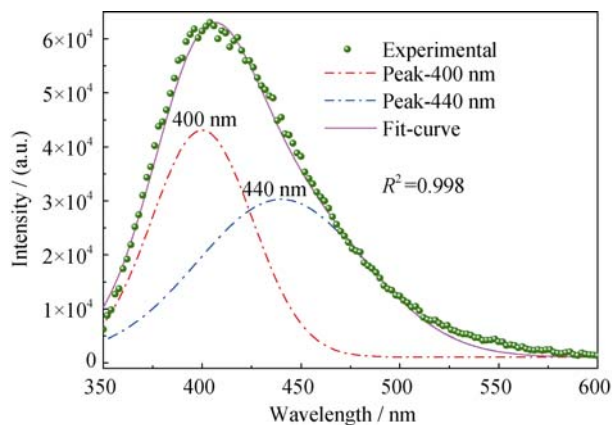


图 5 K509 玻璃发射谱高斯拟合 (总剂量: 1000 kGy)

Fig. 5 Gaussian fitting of emission spectra of K509 glasses (dose: 1000 kGy)

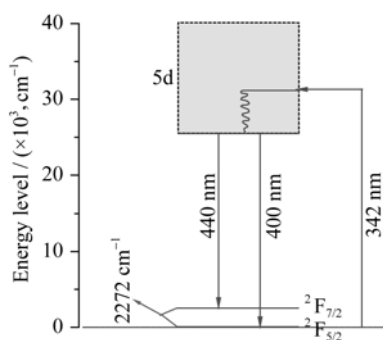
图 6 K509 玻璃  $\text{Ce}^{3+}$  的能级图

Fig. 6 Energy level diagram of  $\text{Ce}^{3+}$  in K509 glass

## 2.2 剂量率效应

为了研究剂量率对玻璃辐照着色的影响, 将总剂量固定为 1000 kGy, 进行了一系列剂量率的辐照, 如图 7 所示, 在相同总剂量下, 随着辐照剂量率的增大, K509 玻璃在可见光波段吸收逐渐减小, 呈现与总剂量效应相反的规律。样品颜色由黄褐色逐渐转为浅黄色, 这说明随着辐照剂量率的增大, 玻璃着色程度逐渐降低。同样以可见光波段吸收积分面积作为相对色心浓度, 得到色心浓度与剂量率的关系, 如图 8 所示。随着剂量率的增大, 色心浓度呈指数关系减小, 可以用拟合函数  $N(\dot{D}) = N_0 + \alpha \cdot \exp(-\dot{D}/\beta)$  进行描述,  $N$  为色心浓度,  $\dot{D}$  为剂量率,  $N_0$ ,  $\alpha$  和  $\beta$  为拟合参数, 数值分别为 -31.9、540.7 和 2.21, 其中  $\beta$  为剂量率常数, 反映色心浓度与剂量率的依赖程度。

不同剂量率辐照后样品的激发谱和发射谱如图 9 所示, 从图中可以看出, 342 nm 激发峰强度(em: 412 nm)和 412 nm 发射峰强度(ex: 342 nm)均随剂量率的增大而增强, 说明随着辐照剂量率的增大, 玻璃中  $\text{Ce}^{3+}$  浓度增大, 两者呈正相关。增加的  $\text{Ce}^{3+}$  可捕获更多的辐照过程产生的空穴, 从而使空穴色心

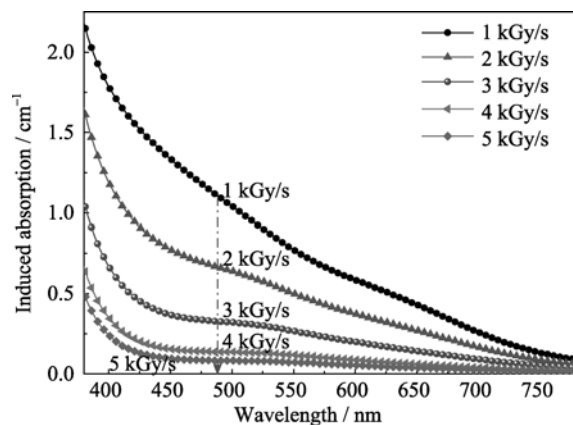


图 7 不同剂量率辐照后 K509 吸收变化(总剂量: 1000 kGy)

Fig. 7 Induced absorption spectra of K509 glasses after being irradiated at different dose rates (dose: 1000 kGy)

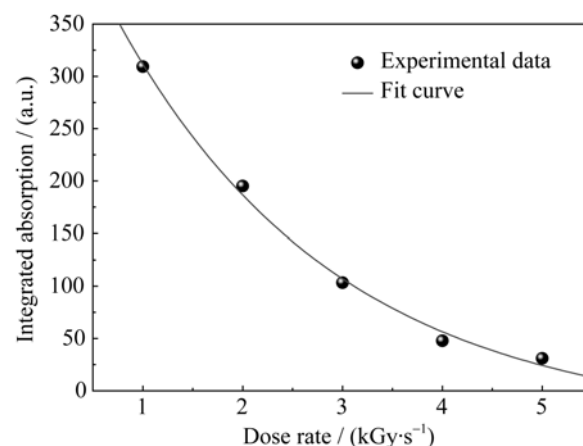


图 8 可见吸收带积分面积与辐照剂量率的关系(总剂量: 1000 kGy)

Fig. 8 Integrated absorption area in visible band as a function of dose rate (dose: 1000 kGy)

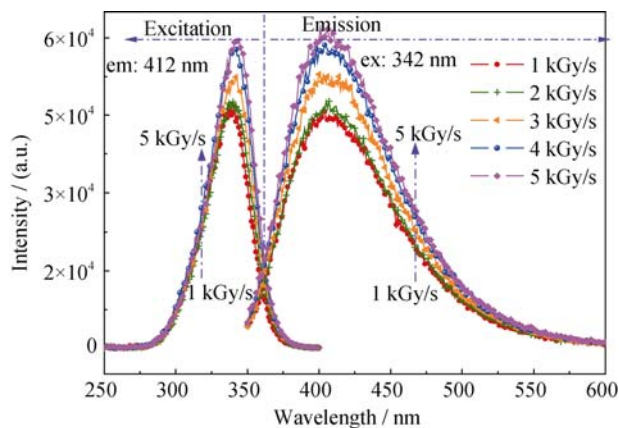


图 9 不同剂量率辐照后 K509 激发光谱和发射光谱(总剂量: 1000 kGy)

Fig. 9 Excitation and emission spectra of K509 glasses after being irradiated at different dose rates (dose: 1000 kGy)

HC1 和 HC2 浓度减小, 玻璃着色程度降低, 与吸收谱的结果一致。

### 3 结论

1) 掺铈 K509 玻璃电子辐照产生的可见光波段色心类型为非桥氧空穴色心 HC1 和 HC2, 色心浓度随总剂量的增加呈指数函数增大, 总剂量效应模型为  $N(D)=N_{\infty}(1-\exp(-\sigma D))$ ; 色心浓度随剂量率的增加呈指数函数减小, 剂量率效应模型为  $N(\dot{D})=N_0+\alpha\cdot\exp(-\dot{D}/\beta)$ ;

2)  $\text{Ce}^{3+}$  通过  $\text{Ce}^{3+}+\text{h}\cdot\rightarrow\text{Ce}^{4+}$  抑制空穴色心 HC1 和 HC2 的形成, 且  $\text{Ce}^{3+}$  浓度与总剂量负相关, 与剂量率正相关;

3) K509 玻璃中  $\text{Ce}^{3+}5d$  轨道最低能级与  $4f$  的  $^2F_{5/2}$  及  $^2F_{7/2}$  能级的跃迁分别产生以 400 和 440 nm 为中心的发射带(ex: 342 nm), 且  $^2F_{5/2}$  和  $^2F_{7/2}$  能级带隙为  $2272\text{ cm}^{-1}$ 。

### 参考文献:

- [1] DU J S, WU J H, ZHAO L L, *et al.* Coloration of glasses induced by space ionizing radiation. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, **27**(4): 411–416.
- [2] DU J S, WU J H, ZHAO L L, *et al.* Color centers of a borosilicate glass induced by 10 MeV proton, 1.85 MeV electron and Co60- $\gamma$  ray. *Radiation Physics and Chemistry*, 2013, **86**: 59–63.
- [3] DU J S, ZHANG T, ZHAO L L, *et al.* Study on dynamic of space ionizing radiation induced coloration in glasses. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, **27**(11): 1197–1204.
- [4] MEJRI A, FARAH K, ELEUCH H, *et al.* Application of commercial glass in  $\gamma$  radiation processing. *Radiation Measurements*, 2008, **43**(8): 1372–1376.
- [5] MOHAPATRA M, KADAM R M, MISHRA R K, *et al.* Electron beam irradiation effects in Trombay nuclear waste glass. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2011, **269**(19): 2057–2062.
- [6] WANG Q Y, ZHANG Z H, GENG H B, *et al.* Radiation-induced damage and recovery effects in GG17 glass irradiated by 1 MeV electrons. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2012, **281**: 1–7.
- [7] MARSHALL C D, SPETH J A, PAYNE S A. Induced optical absorption in  $\gamma$ , neutron and ultraviolet irradiated fused quartz and silica. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1997, **212**(1): 59–73.
- [8] KREIDL N J, HENSLER J R. Formation of color centers in glasses exposed to  $\gamma$  radiation. *Journal of the American Ceramic Society*, 1955, **38**(12): 423–432.
- [9] BACCARO S, CECILIA A, CHEN G, *et al.* Effect of gamma irradiation on optical properties of  $\text{Ce}^{3+}$ -doped phosphate and silicate scintillating glasses. *Radiation Physics and Chemistry*, 2002, **63**(3–6): 231–234.
- [10] STROUD J S. Color-center kinetics in cerium-containing glass. *Journal of Chemical Physics*, 1965, **43**(7): 2442–2450.
- [11] BRANDILY-ANNE M L, LUMEAU J, GLEBOVA L, *et al.* Specific absorption spectra of cerium in multicomponent silicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2010, **356**(44–49): 2337–2343.
- [12] MORONO A, MARTIN P, GUSAROV A, *et al.* Radiation induced absorption and luminescence of selected alternative radiation resistant glasses. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, **386–88**: 1030–1033.
- [13] PAUL A, MULHOLLAND M, ZAMAN M S. Ultraviolet absorption of cerium(III) and cerium(IV) in some simple glasses. *Journal of Materials Science*, 1976, **11**(11): 2082–2086.
- [14] STROUD J S. Color centers in a cerium-containing silicate glass. *Journal of Chemical Physics*, 1962, **37**(4): 836–840.
- [15] GILARD O, CAUSSANEL M, DUVAL H, *et al.* New model for assessing dose, dose rate, and temperature sensitivity of radiation-induced absorption in glasses. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**(9): 1–5.
- [16] ZHU Z, JUNG P, LANGENSCHIEDT E. Optical absorption in proton-irradiated vitreous silica and its dependence on irradiation conditions and annealing. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1997, **217**(2/3): 173–181.
- [17] ZATSEPIN A F, GUSEVA V B, VAZHENIN V A, *et al.* Paramagnetic defects in  $\gamma$ -irradiated Na/K-silicate glasses. *Physics of the Solid State*, 2012, **54**(9): 1776–1784.
- [18] SCHREURS J W. Study of some trapped hole centers in X-irradiated alkali silicate glasses. *Journal of Chemical Physics*, 1967, **47**(2): 818–830.
- [19] KORDAS G, CAMARA B, OEL H J. Electron-spin resonance studies of radiation-damage in silicate-glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1982, **50**(1): 79–95.
- [20] BAHADUR A, DWIVEDI Y, RAI S B. Optical properties of cerium doped oxyfluoroborate glass. *Spectrochimica Acta Part a-Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2013, **110**: 400–403.
- [21] DONG Y J, ZHOU G Q, XU J, *et al.* Luminescence studies of Ce: YAG using vacuum ultraviolet synchrotron radiation. *Materials Research Bulletin*, 2006, **41**(10): 1959–1963.
- [22] LI Q, GAO L, YAN D S. The crystal structure and spectra of nano-scale YAG:  $\text{Ce}^{3+}$ . *Materials Chemistry and Physics*, 2000, **64**(1): 41–44.
- [23] YOU F T, BOS A J J, SHI Q F, *et al.* Electron transfer process between  $\text{Ce}^{3+}$  donor and  $\text{Yb}^{3+}$  acceptor levels in the bandgap of  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (YAG). *Journal of Physics-Condensed Matter*, 2011, **23**(21): 1–6.