

# ZnO 白漆的质子辐照损伤与光学性能退化机理

## Proton Radiation Damage in ZnO-pigmented White Paints and Optical Degradation Mechanisms

王旭东<sup>1</sup>, 易 忠<sup>2</sup>, 沈自才<sup>2</sup>, 顾鹏飞<sup>1</sup>

(1 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083;

2 可靠性与环境工程技术重点实验室, 北京 100094)

WANG Xu-dong<sup>1</sup>, YI Zhong<sup>2</sup>, SHEN Zi-cai<sup>2</sup>, GU Peng-fei<sup>1</sup>

(1 Institute of Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2 Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing 100094, China)

**摘要:**为进一步阐明 ZnO 白漆的辐照损伤与光学性能退化机理,在模拟的空间环境下对 S781 白漆进行了 150keV 质子辐照实验。质子辐照后,在原位条件下测试了光谱反射系数和太阳吸收比的退化规律,并利用模拟仿真和光致荧光光谱研究了 ZnO 白漆与质子间的微观交互作用和辐照诱发缺陷。结果表明,质子辐照下 ZnO 颜料发生电离生成 -1 价锌空位,是 S781 白漆出现 b 带吸收和光学性能退化的主要原因。此外,本工作支持了 ZnO 绿带荧光源于锌空位的第一原理计算结果。

**关键词:** 空间环境;氧化锌白漆;质子辐照;锌空位

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.05.001

**中图分类号:** V524.3;TB303 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)05-0001-05

**Abstract:** S781 white paints were irradiated with 150-keV protons in a simulated space environment, in order to elucidate more definitely the irradiation damage and optical degradation mechanisms for ZnO-pigmented white paints. After proton irradiations, the degradation in spectral reflectance and solar absorptance was measured *in situ*. The interaction between the protons and S781 white paints, and the irradiation-induced defects, were also studied through simulations and photoluminescence. The results show that the zinc vacancies in the 1- charge state are due to the ionization of the ZnO pigments, and are responsible for the b band absorption and optical degradation. Furthermore, this work also supports the first-principles results of considering zinc vacancies as the defects responsible for the green luminescence band from ZnO.

**Key words:** space environment; ZnO-pigmented white paint; proton irradiation; zinc vacancy

ZnO 白漆是航天器广泛使用的一类热控涂层材料,主要通过反射太阳电磁辐射以及向外空间辐射舱载设备仪器产生的热量,实现航天器的热控制。在轨运行期间,暴露于外空间环境下的 ZnO 白漆将发生光学性能退化,光谱反射系数( $\rho_\lambda$ )下降和太阳吸收比( $\alpha_s$ )升高<sup>[1-10]</sup>。其中,质子是外空间中导致 ZnO 白漆光学性能退化的主要环境因素,尤其是对于中地球轨道和地球同步轨道的航天器。

伴随着 ZnO 白漆的应用历史,国内外深入研究了空间质子辐照下 ZnO 白漆光谱反射系数<sup>[1-7]</sup>、太阳吸

收比<sup>[1,8-10]</sup>等性能的演化规律,并使用 X 射线光电子能谱<sup>[6-9]</sup>、傅里叶变换红外光谱<sup>[5,7]</sup>、扫描电子显微镜<sup>[8,9]</sup>、光致荧光光谱<sup>[2,4]</sup>等微观分析手段研究了质子辐照下 ZnO 白漆的光学退化机理。这些研究表明,ZnO 白漆中的 ZnO 颜料和黏结剂在质子辐照下皆有损伤。质子辐照下,ZnO 颜料产生单电离氧空位( $V_O^+$ )<sup>[2,4]</sup>,黏结剂中的硅树脂发生降解<sup>[5-9]</sup>,并由此导致光学性能退化。但第一原理计算结果表明,ZnO 的  $V_O^+$  具有典型的一  $U$  特性<sup>[11,12]</sup>,相比于未电离氧空位( $V_O^0$ )和双电离氧空位( $V_O^{2+}$ ),它在热力学上是不

稳定的,常态下不容易存在,实验中只能在高能粒子辐照(MeV)并有光激发的条件下才可能出现<sup>[13,14]</sup>。显然这些第一原理计算结果否定了长期以来人们关于质子辐照下 ZnO 白漆产生  $V_o^+$  并由此导致光学性能退化的推断。

为进一步阐明空间质子辐照下 ZnO 白漆的辐照损伤和光学性能退化机理,本工作在模拟的空间环境下对 S781 白漆进行了 150keV 质子辐照实验,在原位条件下测试了光谱反射系数和太阳吸收比的退化规律,并利用计算机模拟仿真和光致荧光光谱研究了 ZnO 白漆与质子间的微观交互作用、辐照诱发缺陷和光学性能退化机理。

## 1 实验方法

实验选用我国航天器广泛使用的 S781 白漆进行。S781 白漆以 ZnO 为颜料、有机硅树脂为黏结剂,漆膜厚度  $150 \sim 170 \mu\text{m}$ ,试样基体为 LY-12 铝合金板材。质子辐照实验采用哈尔滨工业大学空间材料与环境工程实验室的空间环境综合模拟器进行,质子能量为 150keV,质子通量为  $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,质子注量分别为  $5 \times 10^{14}$ ,  $1 \times 10^{15}$ ,  $5 \times 10^{15}$ ,  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ,辐照过程中真空度为  $10^{-4} \text{ Pa}$ 。辐照前后,分别使用空间环境综合模拟器的原位测试系统原位( $10^{-4} \text{ Pa}$ )测试试样的光谱反射系数。使用 SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) 软件,计算 150keV 质子辐照下 S781 白漆及其 ZnO 颜料、黏结剂的核阻止本领、电子阻止本领、电离损失和位移损失。辐照实验后,使用 F-4500 型荧光光谱仪在室温环境下对质子辐照试样进行光致荧光光谱分析,激发波长为 280nm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 原位光学性能退化

图 1 给出了 150keV 质子辐照后 S781 白漆原位光谱反射系数的变化。光谱反射系数变化( $\Delta\rho_\lambda$ )的计算方法见文献[3]。可见,质子辐照后, $\Delta\rho_\lambda < 0$ ,原位光谱反射系数下降。在可见光区,光谱反射系数明显下降,在 420nm 附近形成一个显著的吸收峰;在近红外区,光谱反射系数略有下降。并且,质子辐照后光谱反射系数变化与质子注量相关,随着质子注量的增加而愈加显著。与 150keV 质子辐照后 S781 白漆的非原位数据<sup>[7]</sup>相比,原位条件下测得的光谱反射系数退化更为显著,150keV,  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  质子辐照后,原位和非原位条件下 420nm 处的  $\Delta\rho_\lambda$  ( $\Delta\rho_{420\text{nm}}$ ) 分别约为

-92.9% 和 -69.0%。

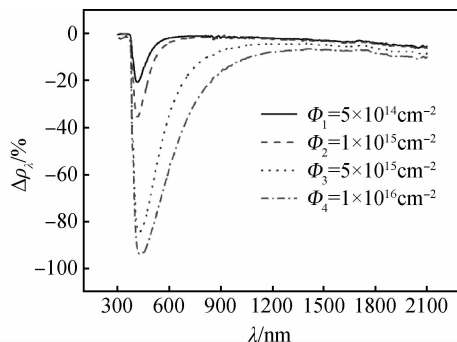


图 1 150keV 质子辐照后原位光谱反射系数的变化

Fig. 1 In situ spectral reflectance change after 150-keV proton irradiations

图 2 给出了质子辐照后太阳吸收比变化随质子注量的变化关系。太阳吸收比变化( $\Delta\alpha_s$ )的计算方法见文献[3]。可见,质子辐照后, $\Delta\alpha_s > 0$ ,太阳吸收比升高,并随着质子注量的增加而增大;在  $5 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  的质子注量范围内,未出现  $\Delta\alpha_s$  随着质子注量的增加而趋于饱和的迹象。图 2 中  $\Delta\alpha_s$  随质子注量变化关系的拟合曲线表明, $\Delta\alpha_s$  与质子注量呈幂函数规律变化,拟合结果满足公式(1):

$$\Delta\alpha_s = \alpha \cdot \Phi^\beta \quad (1)$$

式中: $\alpha, \beta$  为拟合公式中的参数; $\Phi$  为质子注量,  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。与 150keV 质子辐照后 S781 白漆的非原位数据<sup>[7]</sup>相比,由原位光谱反射系数得出的太阳吸收比变化更为显著,150keV,  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  质子辐照后,由原位和非原位光谱反射系数得出的  $\Delta\alpha_s$  分别约为 0.38 和 0.21。

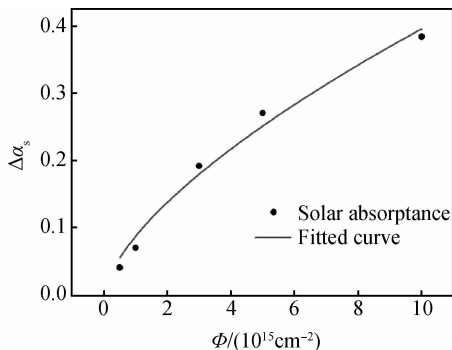


图 2 太阳吸收比变化随质子注量的变化关系

Fig. 2 Solar absorptance change as a function of proton fluence

### 2.2 微观交互作用模拟仿真

S781 白漆是由 ZnO 颜料和有机硅树脂黏结剂组成的非均质体系。150keV 质子辐照中,S781 白漆与质子间的微观交互作用涉及质子与颜料、与黏结剂、与

颜料/黏结剂界面互不相同的交互作用过程。为此,建立 S781 白漆的结构模型,使用 SRIM 软件模拟了 S781 白漆与 150keV 质子的微观交互作用过程。

表 1 给出了 150keV 质子辐照下 S781 白漆的核阻止本领、电子阻止本领、电离损失和位移损失。质子辐照,实质上是入射质子与路径上的 S781 白漆进行能量传递,质子因损失能量而慢化、直至停止被 S781 白漆吸收,S781 白漆因获取能量而发生电离和/或位移损伤的过程。核阻止本领反映了质子与 S781 白漆原子核碰撞时引发的弹性能量损失,电子阻止本领反映了质子与 S781 白漆核外电子碰撞时引发的非弹性能量损失。

由表 1 可见,150keV 质子辐照下,S781 白漆的电子阻止本领远大于核阻止本领,说明辐照过程中质子主要通过非弹性碰撞将能量传递给 S781 白漆的核外电子。150keV 质子辐照下,S781 白漆的电离损失和位移损失分别为 99.22% 和 0.01%,说明辐照过程中几乎全部的质子能量损失用于诱发 S781 白漆电离。此外,就 ZnO 颜料和有机硅树脂黏结剂这两种白漆组分而言,质子与它们的交互作用是有所区别的。因此,同时建立了 ZnO 颜料和有机硅树脂黏结剂的结构模型,分别模拟了 ZnO 颜料和黏结剂的质子辐照过程。ZnO 颜料和有机硅树脂黏结剂的电子阻止本领分别为 165,66.4eV·nm<sup>-1</sup>,说明质子与 S781 白漆间的非弹性碰撞和能量传递更多地发生于 ZnO 颜料的核外电子,主要诱发 ZnO 颜料电离。

表 1 S781 白漆的核阻止本领、电子阻止本领、电离损失和位移损失

Table 1 Nucleus stopping power, electron stopping power, ionization-related energy loss and displacements-related energy loss of S781 white paint

Nucleus stopping power/ (eV·nm <sup>-1</sup> )	Electron stopping power/ (eV·nm <sup>-1</sup> )	Displacements-related energy loss/%	Ionization-related energy loss/%
0.13	85.50	0.01	99.22

2.3 光致荧光光谱分析

图 3(a)给出了 150keV 质子辐照前后 S781 白漆的光致荧光光谱。质子辐照前,S781 白漆的光致荧光光谱呈现了 ZnO 典型的近带边发射(峰值位置 382nm,3.2eV)和无定形的绿带荧光带(峰值位置 502nm,2.5eV)。质子辐照后,近带边发射和绿带荧光都明显减弱,质子辐照诱发的近带边发射和绿带荧光的下降如图 3(b)所示。对于 ZnO 的近带边发射,人们的认识较为统一,将其归属为施主束缚激子以及

施主/受主对复合的发射过程<sup>[15]</sup>。而对于 ZnO 无定形的绿带荧光带,其绿带荧光机制一直都是一个备受争议的话题。尽管目前人们更倾向于认为其与 ZnO 中固有的点缺陷相关,但对于发光中心的分歧却很大。在不同的报道中,无定形绿带荧光的发光中心被分别归属为锌空位(V<sub>Zn</sub>)受主、含有间隙锌(Zn<sub>i</sub>)的复合缺陷、锌位氧(O<sub>Zn</sub>)和氧空位(V<sub>O</sub>)<sup>[16]</sup>。近年来,Anderson Janotti 等<sup>[11]</sup>和 A. F. Kohan 等<sup>[12]</sup>的第一原理计算结果表明,V<sub>Zn</sub><sup>-</sup>与 V<sub>Zn</sub><sup>2-</sup>的转变能级 ε(1-/2-)位于 ZnO 价带顶以上约 0.87eV,并由此认为 ZnO 导带(或者是浅施主)与 V<sub>Zn</sub>受主能级间的电子跃迁导致了 2.5eV 的绿带荧光。Anderson Janotti 和 A. F. Kohan 等提出的 ZnO 绿带荧光机制与 GaN 的黄带荧光源于镓空位(V<sub>Ga</sub>)的荧光机制相似<sup>[17]</sup>,但缺乏实验证据。

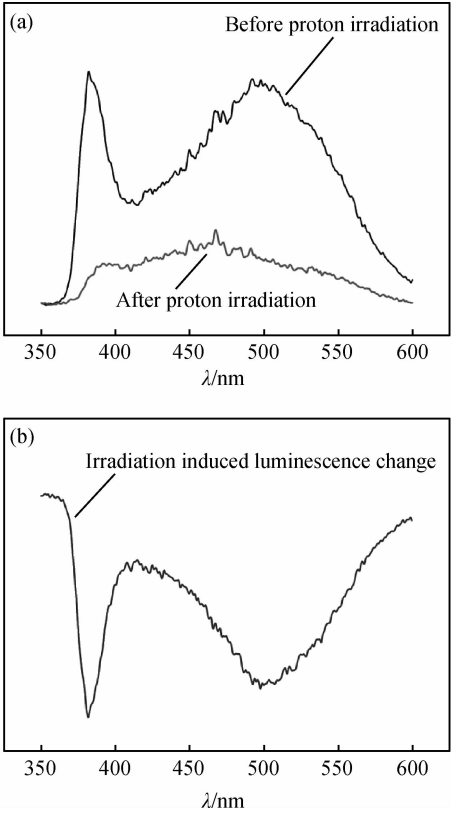


图 3 150keV 质子辐照前后的光致荧光光谱 (a)光致荧光光谱;(b)辐照诱发的荧光变化  
Fig. 3 Photoluminescence spectra before and after 150-keV proton irradiations (a)photoluminescence spectra;(b)irradiation induced luminescence change

2.4 讨论

Anderson Janotti 和 A. F. Kohan 等由第一原理计算提出的 ZnO 绿带荧光机制,与本工作是互为支

持、相符的。理论上,  $\text{ZnO}$  中的  $V_{\text{Zn}}$  可以  $V_{\text{Zn}}^0$ ,  $V_{\text{Zn}}^-$  和  $V_{\text{Zn}}^{2-}$  三种不同的价态存在。但作为一种受主型缺陷, 由于  $V_{\text{Zn}}^0$  和  $V_{\text{Zn}}^-$  的形成能很高, 因此在  $n$  型  $\text{ZnO}$  中绝大多数  $V_{\text{Zn}}$  是以  $-2$  价存在<sup>[11]</sup>。质子辐照前, S781 白漆  $\text{ZnO}$  颜料中固有的  $V_{\text{Zn}}$  为  $V_{\text{Zn}}^{2-}$ 。  $V_{\text{Zn}}^-$  与  $V_{\text{Zn}}^{2-}$  的转变能级  $\epsilon(1-2-)$  位于  $\text{ZnO}$  价带顶以上约  $0.87\text{eV}$ , 从  $\text{ZnO}$  导带(或浅施主)到弛豫的  $V_{\text{Zn}}^-$  能级间的电子跃迁产生了 S781 白漆的绿带荧光, 峰值位置  $502\text{nm}$ 。

由表 1 中 S781 白漆的电离损失、位移损失及  $\text{ZnO}$  颜料和有机硅树脂黏结剂的电子阻止本领可见,

$150\text{keV}$  质子辐照主要诱发  $\text{ZnO}$  颜料电离, 即质子辐照下  $\text{ZnO}$  颜料中固有的  $V_{\text{Zn}}^{2-}$  发生电离,  $V_{\text{Zn}}^{2-}$  转化为  $V_{\text{Zn}}^-$ 。光致荧光过程中, 与  $V_{\text{Zn}}^-$  相关的电子跃迁将在  $\text{ZnO}$  导带(或浅施主)与弛豫的  $V_{\text{Zn}}^0$  能级 ( $\epsilon(0/1-)$  转变能级)间进行, 进而使质子辐照后的绿带荧光明显减弱。图 4 描述了质子辐照前后 S781 白漆的绿带荧光机制。综上所述,  $150\text{keV}$  质子辐照下,  $\text{ZnO}$  颜料固有的  $V_{\text{Zn}}^{2-}$  电离生成  $V_{\text{Zn}}^-$ , 并使 S781 白漆的绿带荧光减弱。此外, 质子带正电, 辐照过程中正负电荷的中和效应使  $\text{ZnO}$  颜料中的施主数量减少, 导致质子辐照后近带边发射减弱。

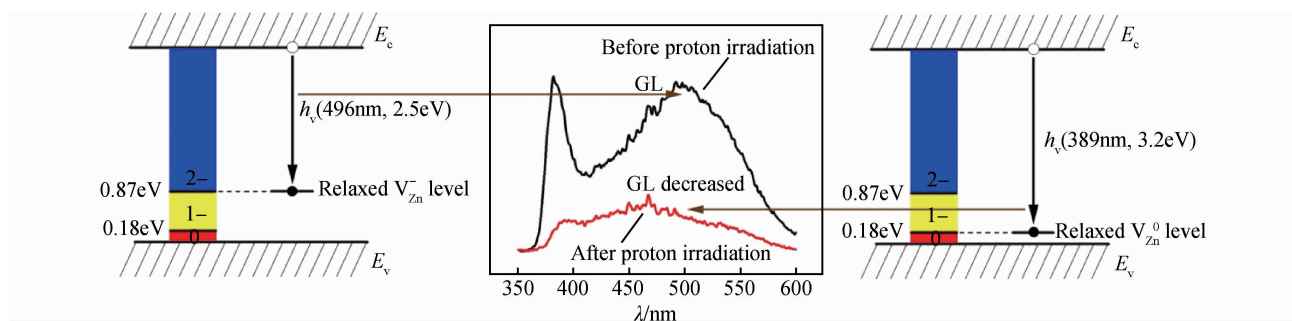


图 4 质子辐照前后 S781 白漆的绿带荧光机制

Fig. 4 Green luminescence (GL) mechanisms for S781 white paint

before and after proton irradiations

S781 白漆是由  $\text{ZnO}$  颜料和有机硅树脂黏结剂组成。从电子阻止本领计算结果来看,  $150\text{keV}$  质子辐照下  $\text{ZnO}$  颜料和有机硅树脂黏结剂皆有损伤, 但主要是  $\text{ZnO}$  颜料的电离损伤。文献[5-9]讨论了 S781 白漆有机硅树脂黏结剂的质子辐照损伤及与之相关的光学性能退化, 本工作将集中讨论 S781 白漆中因  $\text{ZnO}$  颜料辐照损伤而引起的光学性能退化。  $150\text{keV}$  质子辐照下, 辐照诱发的主要光吸收在  $420\text{nm}$  附近。这种近带边的光吸收被定义为“ $b$  带吸收 ( $b$  band absorption)”<sup>[18]</sup>。尽管在电子辐照<sup>[13,14,18]</sup>、热化学还原<sup>[19]</sup>和力学作用<sup>[20]</sup>下都观察到了  $\text{ZnO}$  的  $b$  带吸收现象, 但导致  $b$  带吸收的损伤机制尚不明确, 不同的文献报道分别认为是  $\text{Zn}_i$ <sup>[18]</sup>,  $\text{V}_\text{O}^{+}$ <sup>[13]</sup> 或  $\text{V}_\text{O}^0$ <sup>[14,19]</sup> 导致了  $\text{ZnO}$  的  $b$  带吸收。

根据本工作的模拟仿真和光致荧光光谱分析结果, 认为质子辐照下电离生成的  $V_{\text{Zn}}^-$  与辐照诱发的  $420\text{nm}$  处的光吸收相关, 并由此推断  $V_{\text{Zn}}^-$  的基态能级位于  $\text{ZnO}$  价带顶以上  $0.45\text{eV}$ 。  $V_{\text{Zn}}^{2-}$  的形成能很低, 是各类  $n$  型  $\text{ZnO}$  主要的固有缺陷。因此, 除本工作的质子辐照外, 电子辐照、热化学还原和力学作用下, 都亦可能发生  $V_{\text{Zn}}^{2-}$  向  $V_{\text{Zn}}^-$  的转化, 导致  $\text{ZnO}$  的  $b$  带吸收。质子辐照后, S781 白漆光谱反射系数和太阳吸收

比的变化随着质子注量的增加而愈加显著, 是  $V_{\text{Zn}}^-$  随着质子注量的增加而增多的结果。与  $150\text{keV}$  质子辐照后 S781 白漆的非原位数据<sup>[7]</sup>相比, 本工作原位条件下测得的光谱反射系数和太阳吸收比的变化更为显著, 其主要原因在于非原位条件下空气中的氧在 S781 质子辐照试样表面的吸附。非原位测试在空气中进行, 空气中的氧是一种电子受主型分子, 当质子辐照试样与空气接触后, 将发生氧的化学吸附, 使  $\text{ZnO}$  颜料表面区域的能带向上弯曲, 改变了  $V_{\text{Zn}}^-$ 、导带能级与费米能级的相对位置, 由此降低了  $V_{\text{Zn}}^-$  能级中电子的占有率, 导致空气暴露后质子辐照试样的光学性能退化发生恢复。

### 3 结论

(1)  $150\text{keV}$  质子辐照后, S781 白漆原位光谱反射系数下降, 太阳吸收比升高, 光学性能退化随着质子注量的增加而愈加显著; 与非原位数据相比, 原位条件下测得的光学性能退化更为显著。

(2)  $150\text{keV}$  质子辐照下, S781 白漆的电子阻止本领与电离损失远大于核阻止本领和位移损失, 质子主要通过非弹性碰撞将能量传递给 S781 白漆的核外电

子;与有机硅树脂黏结剂相比,质子更多地将能量传递给 ZnO 颜料的核外电子,诱发 ZnO 颜料电离。

(3) 150keV 质子辐照下, ZnO 颜料中固有的  $V_{Zn}^{2-}$  发生电离,  $V_{Zn}^{2-}$  转化为  $V_{Zn}^{-}$ ;这是质子辐照后 S781 白漆出现 b 带吸收、光学性能退化和绿带荧光下降的主要原因。

### 参考文献

- [1] FOGDALL L B, LEET S J, WILKINSON M C, et al. Effects of electrons, protons and ultraviolet radiation on spacecraft thermal control materials[A]. AIAA Paper[R]. Seattle, WA: American Institute of Aeronautics & Astronautics, 1999. No. 99-3678: 1—9.
- [2] TONON C, DUVIGNACQ C, TEYSSEDRE G, et al. Degradation of the optical properties of ZnO-based thermal control coatings in simulated space environment[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(1): 124—130.
- [3] 王旭东,顾鹏飞,李春东,等. ZnO 白漆空间性能退化的地面恢复与保护研究[J]. 材料工程, 2011, (1): 7—10.  
WANG Xu-dong, GU Peng-fei, LI Chun-dong, et al. Ground recovery and conservation of property degradation of ZnO-pigmented white paints in space[J]. Journal of Materials Engineering, 2011, (1): 7—10.
- [4] 肖海英,李春东,杨德庄,等. 低能质子辐照对 ZnO 白漆光学性能退化的影响[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1369—1372.  
XIAO Hai-ying, LI Chun-dong, YANG De-zhuang, et al. Effects of low energy protons on optical degradation of ZnO white paint [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(8): 1369—1372.
- [5] 肖海英,李春东,杨德庄,等. 低能质子辐照 ZnO/silicone 白漆产生微观损伤的红外光谱研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(7): 1215—1219.  
XIAO Hai-ying, LI Chun-dong, YANG De-zhuang, et al. Study on damage effects of low energy protons on ZnO/silicone white paint using infrared spectrum[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(7): 1215—1219.
- [6] XIAO H Y, LI C D, SUN M R, et al. An analysis on optical degradation of ZnO/silicone white paint under proton exposure [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2008, 266(1): 86—92.
- [7] XIAO H Y, LI C D, YANG D Z, et al. Optical degradation of silicone in ZnO/silicone white paint irradiated by <200keV protons[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2008, 266(1): 3375—3380.
- [8] 刘宇明,冯伟泉,丁义刚,等. S781 白漆在空间辐照环境下物性变化分析[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(4): 235—238.  
LIU Yu-ming, FENG Wei-quan, DING Yi-gang, et al. Study on the space radiation effects on S781 coatings[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2007, 24(4): 235—238.
- [9] 冯伟泉,王荣,丁义刚,等. 低能质子对卫星热控涂层太阳吸收率的影响[J]. 中国空间科学技术, 2007, (6): 42—47.  
FENG Wei-quan, WANG Rong, DING Yi-gang, et al. Low energy proton effects on solar absorptance of thermal control coatings[J]. Chinese Space Science and Technology, 2007, (6): 42—47.
- [10] 冯伟泉,丁义刚,闫德葵,等. 空间电子、质子和紫外综合辐照模拟试验研究[J]. 航天器环境工程, 2005, 22(2): 69—72.  
FENG Wei-quan, DING Yi-gang, YAN De-kui, et al. Study on space electron, proton and ultraviolet combined irradiation simulation test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(2): 69—72.
- [11] JANOTTI A, WALLE Van de C G. Native point defects in ZnO [J]. Physical Review B, 2007, 76(16): 165202—165223.
- [12] KOHAN A F, CEDER G, MORGAN D, et al. First-principles study of native point defects in ZnO[J]. Physical Review B, 2000, 61(22): 15019—15027.
- [13] SMITH J M, VEHSE W E. ESR of electron irradiated ZnO confirmation of the  $F^+$  center[J]. Physics Letters A, 1970, 31(3): 147—148.
- [14] EVANS S M, GILES N C, HALLIBURTON L E, et al. Further characterization of oxygen vacancies and zinc vacancies in electron-irradiated ZnO[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(4): 043710—043716.
- [15] TEKE A, ÖZGÜRÜ, DOĞAN S, et al. Excitonic fine structure and recombination dynamics in single-crystalline ZnO[J]. Physical Review B, 2004, 70(19): 195207—195216.
- [16] ÖZGÜRÜ, MORKOC H. Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures[M]. Oxford: Elsevier, 2006.
- [17] NEUGEBAUER J, WALLE Van de C G. Gallium vacancies and the yellow luminescence in GaN[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(4): 503—505.
- [18] VEHSE W E, SIBLEY W A, KELLER F J. Radiation damage in ZnO single crystals[J]. Physical Review, 1968, 167(3): 828—836.
- [19] SELIM F A, WEBER M H, SOLODOVNIKOV D, et al. Nature of native defects in ZnO[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(8): 085502—085505.
- [20] MOOKHERJI T. Electron spin resonance of ultraviolet radiation induced defects in ZnO thermal control coating pigment [J]. Physica Status Solidi A, 1972, 13(1): 293—301.

基金项目:可靠性与环境工程技术重点实验室开放基金(2011);国家自然科学基金资助项目(50502006);北京市科技新星计划资助项目(2008A029);北京市腐蚀、磨蚀与表面技术重点实验室和北京市教委共建项目(SYS100080419)

收稿日期:2012-11-01;修订日期:2013-03-06

作者简介:王旭东(1974—),男,工学博士,副教授,主要从事空间材料的辐照损伤和腐蚀与防护研究,联系地址:北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学腐蚀与防护中心(100083),E-mail:xdwang@ustb.edu.cn