

带电粒子辐照下石英玻璃和镀铝膜 反射镜光学性能研究^{*}

周忠祥^{1)†} 王宏利¹⁾ 申艳青¹⁾ 刘大军¹⁾

刘 海²⁾ 何世禹²⁾ 杨德庄²⁾

1) 哈尔滨工业大学物理系 哈尔滨 150001)

2) 哈尔滨工业大学空间材料与环境工程实验室 哈尔滨 150001)

(2007 年 3 月 9 日收到 2007 年 5 月 25 日收到修改稿)

提出低能带电粒子辐照下石英玻璃非弹性电离损伤的物理模型和速率方程,给出了电离效应产生带电离子、电子浓度的解析表达式.讨论了光密度与吸收剂量之间的变化关系,并与实验结果进行了比较.还给出光学反射镜反射率表达式及数学模拟结果.利用所建立的模型,可以定量描述低能带电粒子辐照特别是综合辐照时石英玻璃和镀金属膜反射镜光学性能随辐照剂量的变化情况.

关键词:电离损伤,综合辐照,石英玻璃,光密度

PACC: 7890, 6180, 8120Q

1. 引 言

在地球同步轨道、中高轨道、太阳同步轨道上运行的航天器要受到地球辐射带能量范围极宽的质子和电子的辐照作用,光学元件或材料长期在这种环境下使用会导致性能退化^[1-3].石英玻璃具有一系列优异的光学、机械、热物理、电学等性能和良好的抗辐照稳定性,成为空间高稳定光学系统最为合适的光学材料之一,被广泛应用于光学窗口和光学镜片材料等^[4].

带电粒子辐照将在石英玻璃中形成色心.辐照着色的机理主要是通过电离效应产生电子-空穴对,再经过一系列复杂的过程,演变为色心和其他辐照缺陷^[5].

高能辐照损伤理论模拟研究到目前为止,主要有两种方法,即分子动力学方法(molecular dynamics simulation, MD)和两体碰撞近似方法(binary collision approximation, BCA).MD 方法适用于低能粒子(几百电子伏特)辐照损伤模拟,所需计算机内存大,计算量大.BCA 方法适用于 MeV 量级粒子辐照损伤模

拟^[6,7].迄今为止,由于高能带电粒子会对航天材料产生明显的损伤,一直受到人们的广泛关注,研究主要集中在辐射能量在 1 MeV 以上.实际上,带电粒子能量越低,在材料表面沉积的越多,对材料表面影响越为明显.由于能量小于 200 keV 的质子和电子在材料中的射程较小,短期效应表现并不明显,长期效应则可能是严重的^[8].

带电粒子辐照作用使石英玻璃中在 200—800 nm 谱段产生一系列的吸收带,每个吸收带对应着一种色心^[9],吸收的强度和辐照剂量或吸收剂量密切相关.在 60—200 keV 范围内,寻找石英玻璃光学吸收与辐照时间或辐照剂量之间的解析关系,具有理论和实践双重意义.很多理论工作者在这方面做过尝试,并且都试图给出一个通用的解析模型,以解决一般经验模型的不足.然而由于实际过程的复杂性和数学上的难度,到目前为止还没有一个这样普遍的模型.在文献[4]中,给出低能质子辐照下石英玻璃色心演化的动力学模型,该模型在某些辐照能量段与实验曲线符合得不好.本文提出一种新的物理模型,研究石英玻璃低能带电粒子辐照损伤状况.应用该模型对已有实验数据进行数值模拟,并将该模

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号 61343)资助的课题.

[†] E-mail: zhouzx@hit.edu.cn

型的模拟结果与文献[4]中模型的模拟结果进行比较。

2. 物理模型

带电粒子对光学材料的辐射损伤作用,主要有电离作用和原子的位移作用两种作用方式。

1) 电离作用

当带电粒子在核外束缚电子附近掠过时,由于库仑作用,束缚电子获得了足够高的能量便可以摆脱原子核的束缚成为自由电子,这样就产生了一个自由电子和一个正离子,这一过程称为电离。如果束缚电子获得的能量还不足以使其成为自由电子,而只能跳到较高能级的原子轨道上去,这种过程称为激发。由于原子的激发是不稳定的,因此激发过程常常伴随着由于退激发而导致的特征 X 射线的发射。

入射带电粒子与靶物质原子的核外电子之间的非弹性碰撞所引起的能量损失,是带电粒子穿过物质时损失能量的主要方式,该碰撞过程导致靶原子的电离或激发,从而引起被辐照物质材料的物理化学变化。电离辐射与物质相互作用的结果必然导致辐照损伤,高能质子和电子大都产生这种电离作用。

2) 原子的位移作用

在辐照损伤理论中认为,如果入射粒子将传递超过某一阈值的动能 T ,那么固体中的原子从其晶格的平衡位置移开,形成弗伦克尔(Frenkel)缺陷。对于大部分物质,能量 T 值接近于 25 eV。设 M_2 为点阵中被撞原子的质量,并且初速度为零(热运动可以忽略不计)。

对于电子,由于其质量很小,处理电子与点阵原子的离位撞击,就应该考虑到相对论效应。对于质量为 m 电子极限能量 E_c 可以由下面公式给出^[10]:

$$E_c = \left[(mc^2)^2 + \frac{M_2^2 c^2 T}{2} \right]^{1/2} - mc^2,$$

此处 $mc^2 = 0.511$ MeV——电子的静止能量。对于阈能为 25 eV 的材料,电子 E_c 值相应地为 175 keV。因此,对于能量在 60 keV—175 keV 的电子辐照只有电离效应。而在文献[11]中提到,质子在二氧化硅中用于电离的能量沉积远大于用于位移的能量沉积,两者相差近 3 个数量级,说明质子在二氧化硅中的能量沉积主要用于电离。

因此,本文在只考虑带电粒子辐照电离效应的情况下,建立理论模型。即对于光学材料,在带电粒

子辐照下,材料的损伤效应以非弹性电离效应为主,带电粒子与材料中原子的核外电子之间非弹性相互作用使原子核外电子电离。

辐照着色的机理主要是通过电离效应产生电子和带电离子,再经过一系列复杂的过程,演变为色心和其他辐照缺陷^[3,8,12]。电离效应产生的电子和带电离子在辐照过程中存在产生和复合两个过程。

2.1. 带电粒子辐照电离损伤效应动力学

设光学材料中原子数密度为 N_D ,电离效应产生的电子浓度为 n ,电离产生的带电离子浓度为 N_D^+ ,满足的速率方程为

$$\frac{\partial N_D^+}{\partial t} = (\sigma J + \beta)(N_D - N_D^+) - \gamma N_D^+ n, \quad (1)$$

其中 σ 为原子电离激发截面;辐照能量注量(单位时间内辐照在材料表面单位面积上的粒子总能量,用 J 表示,单位为 keV/cm^2) $J = kE\varphi$, φ 是辐照通量($\text{part}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$,单位时间辐照在材料表面单位面积上的粒子数)材料的吸收剂量(D , rad)与辐照粒子能量(E , keV)辐照剂量(Φ , part/cm^2)粒子在材料中的射程(R , cm)及材料的密度(ρ , g/cm^3)有如下关系^[11]:

$$D = 1.6 \times 10^{-8} E\Phi/R\rho, \quad (2)$$

$$\Phi = \varphi t, \quad (3)$$

β 为热激发速率; γ 为电子与电离产生的带电离子的复合系数。

由于带电粒子数远小于电离效应产生的电子数,电离效应产生电子的浓度为 n 和带电离子浓度 N_D^+ 相等,即

$$n = N_D^+. \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式并整理得

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_D^+}{\partial t} = & -\gamma(N_D^+)^2 - (\sigma J + \beta)N_D^+ \\ & + (\sigma J + \beta)N_D, \end{aligned} \quad (5)$$

整理并求解出

$$N_D^+ = \left(1 - \frac{2}{1 + ce^{2\theta\gamma}} \right) \theta - \frac{\sigma J + \beta}{2\gamma}, \quad (6)$$

其中

$$\theta = \left[\left(\frac{\sigma J + \beta}{2\gamma} + N_D \right)^2 - N_D^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

或

$$\theta = N_D \left[\left(\frac{\sigma J + \beta}{2\gamma N_D} + 1 \right)^2 - 1 \right]^{1/2}. \quad (7')$$

假设初始时刻($t=0$), $N_{D0}^+ = 0$ 求出常数 c ,

$$c = \frac{2\gamma\theta + (\sigma J + \beta)}{2\gamma\theta - (\sigma J + \beta)}.$$

(8)

由于辐照能量注量 J 表示单位时间内辐照在材料表面单位面积上的粒子总能量, $J = kE\varphi$. 因此, 当辐照源粒子能量、辐照通量及辐照材料确定时, σ, β, γ, J 为常量, 即 $\frac{\sigma J + \beta}{2\gamma}$ 为一常量. 而常量只是使数学模拟结果曲线产生平移, 而不影响曲线的变化趋势. 结合方程 (2) (3) 和 (6) 并略去 $\frac{\sigma J + \beta}{2\gamma}$ 项, 有

$$N_D^+ = \left(1 - \frac{2}{1 + ce^{aD}}\right)\theta,$$

(9)

或

$$N_D^+ = \left(1 - \frac{2}{1 + ce^{aD}}\right)\theta.$$

(9')

由 (9) 或 (9') 式可以计算不同辐照条件下, 不同时刻电离效应产生的带电离子浓度, 也可以计算出缺陷和色心的浓度.

2.2. 模型的工程应用形式

辐照导致的光吸收是由色心引起的, 在辐照 t 时刻, 色心浓度正比于辐照过程中电离效应产生的电子或带电离子浓度. 由吸收系数与光密度的关系, 用光密度 A 来表示光学材料对光线的吸收, 认为辐照引起的光密度的变化与色心浓度成正比关系. 即有

$$\Delta A = dk\theta\left(1 - \frac{2}{1 + ce^{aD}}\right),$$

(10)

可以写成,

$$\Delta A = \Delta A_\infty\left(1 - \frac{2}{1 + ce^{aD}}\right),$$

(11)

其中 $\Delta A_\infty = \frac{dk}{2\gamma}[(\sigma J + \beta)^2 + 4\gamma N_D(\sigma J + \beta)]^{1/2}$. ΔA_∞ 相当于辐照时间或者辐照剂量趋近于无穷大时光学材料的极限光密度变化. 从 ΔA_∞ 表达式可以看出, ΔA_∞ 是与材料特性、试样厚度、辐照剂量及辐照源性质有关的参数.

2.3. 试验结果和数学模拟

2.3.1. 试验材料及条件

试验材料为国产 JCS3 光学石英玻璃, 杂质量小于 5×10^{-5} , 经过除 OH 团处理. 试样尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$.

在光学石英玻璃 JCS1 基片上, 采用真空蒸镀的方法 (真空度为 $5 \times 10^{-4}\text{ Pa}$), 先镀制一层厚度约为

500 nm 的 Al 膜 (Al 的纯度为 99.99%) 后, 立即在 Al 膜上再镀一层厚度约为 100 nm 的 SiO_2 膜, 制成铝膜反射镜.

低能带电粒子辐照试验是在专门的空间综合辐照模拟设备上进行的. 本文的辐照试验中, 粒子的辐照能量范围为 60—160 keV, 辐照通量均为 $1.25 \times 10^{12}\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 辐照剂量范围最高达 $1 \times 10^{17}\text{ cm}^{-2}$.

2.3.2 单一粒子(质子或电子)辐照下不同吸收带的数学模拟

质子或电子辐照下不同吸收带的模拟模型: 文献 [4] 给出的 $\Delta A = \Delta A_\infty(1 - e^{-\beta D})$ 记为模型 1; 本文给出的 (11) 式 $\Delta A = \Delta A_\infty\left(1 - \frac{2}{1 + ce^{aD}}\right)$ 记为模型 2. 模型中参量的确定对唯象模型的应用有重大影响, 如果对它赋值偏差较大, 可能导致最终计算结果的错误. 因在 ΔA_∞ 的表达式中有多个未知量, 不可能用计算的方法得到该值, 只有用试验的方法来确定. 表 1、表 2 中分别给出了模型 1、模型 2 在质子、电子辐照下相应参量的试验模拟数值.

表 1 质子或电子辐照下不同吸收带的模型 1 的模拟参量

辐照类型	辐照粒子能量 E/keV	吸收带/ nm	ΔA_∞	β
质子	140	209	0.20373	5.1933×10^{-11}
	140	300	0.12403	2.2169×10^{-11}
	100	450	0.08664	1.3286×10^{-11}
电子	140	203	0.83676	2.493×10^{-8}
	140	300	0.20951	2.338×10^{-9}
	100	540	0.03699	6.4121×10^{-9}

表 2 质子或电子辐照下不同吸收带的模型 2 的模拟参数

辐照类型	辐照粒子能量 E/keV	吸收带/ nm	ΔA_∞	c	a
质子	140	209	0.2083	1.69125	4.338×10^{-11}
	140	300	0.13348	1.34592	2.0823×10^{-11}
	100	450	0.09094	1.21945	1.4575×10^{-11}
电子	140	203	0.84751	2.57022	1.3271×10^{-8}
	140	300	0.20234	1.02383	3.6419×10^{-9}
	100	540	0.03678	0.85513	1.1166×10^{-8}

在图 1 中, 分别给出了 140 keV 质子辐照下 209 nm 和 300 nm 吸收带光密度变化与吸收剂量的关系. 在图 2 中, 分别给出了 140 keV 电子辐照下 203 nm 和 300 nm 吸收带光密度变化与吸收剂量的关

系.图 3 中给出了 100 keV 质子辐照下 450 nm 吸收带光密度变化与吸收剂量的关系.对于某一吸收带,石英玻璃光密度的变化随吸收剂量的增加而增加,最终趋于饱和,是因为色心的产生和复合随着吸收剂量的增加趋于平衡.从图中可以看出模型 2 给出的模拟结果与试验结果符合得很好.

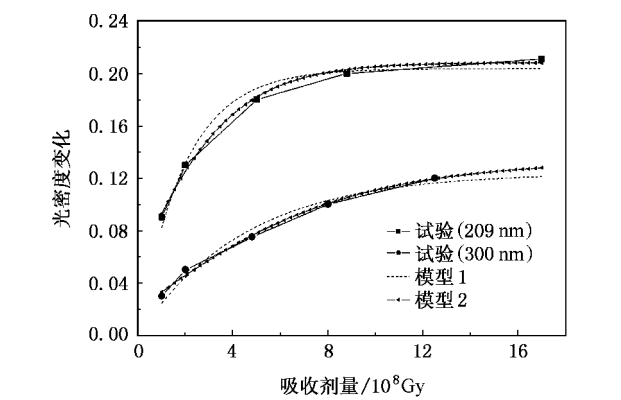


图 1 140 keV 质子辐照下 209 nm 和 300 nm 吸收带光密度变化与吸收剂量的关系

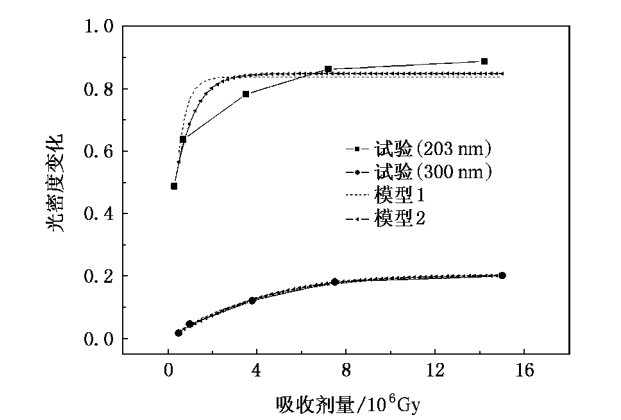


图 2 140 keV 电子辐照下 203 nm 和 300 nm 吸收带光密度变化与吸收剂量的关系

2.3.3. 质子和电子综合辐照下不同吸收带的数值模拟

质子和电子综合辐照下会产生新的效应,比单一因素辐照时情况复杂,但是,从试验结果分析,综合辐照下光密度的变化与单因素辐照时有着类似的规律,因此可以不必考虑模型的推导过程,而判定模型仍然适用.根据辐照剂量 Φ 与材料吸收剂量 D 的关系将模型中的变量改为辐照剂量 Φ ,方程(11)式变为 $\Delta A = \Delta A_{\infty} \left(1 - \frac{2}{1 + ce^{b\Phi}} \right)$.综合辐照时采用质子和电子的辐照剂量近似相等.

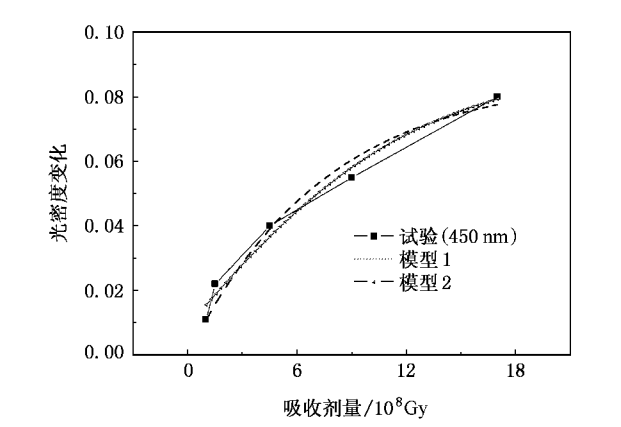


图 3 100 keV 质子辐照下 450 nm 吸收带光密度变化与吸收剂量的关系

我们记 模型 1 为 $\Delta A = \Delta A_{\infty} (1 - e^{-\beta D})$;模型 2 为 $\Delta A = \Delta A_{\infty} \left(1 - \frac{2}{1 + ce^{bD}} \right)$.表 3、表 4 中分别给出了模型 1、模型 2 在质子和电子综合辐照下相应参数的试验模拟数值.

表 3 质子和电子综合辐照下不同吸收带的模型 1 的模拟参量

辐照类型	辐照粒子 能量 E/keV	吸收带 /nm	ΔA_{∞}	β
综合辐照 (质子 + 电子)	140	215	0.1926	6.0108×10^{-16}
	100	300	0.08557	5.9423×10^{-16}
	100	540	0.07761	3.7612×10^{-16}

表 4 质子和电子综合辐照下不同吸收带的模型 2 的模拟参量

辐照类型	辐照粒子 能量 E/keV	吸收带/ nm	ΔA_{∞}	c	b
综合辐照 (质子 + 电子)	140	215	0.21659	3.27426	1.0926×10^{-16}
	100	300	0.09078	3.02425	1.919×10^{-16}
	100	540	0.07978	2.67234	2.1617×10^{-16}

在图 4 中,分别给出了 140 keV 质子和电子综合辐照下 215 nm 吸收带光密度变化与辐照剂量的关系.在图 5 中,分别给出 100 keV 质子和电子综合辐照下 300 nm 和 540 nm 吸收带光密度变化与辐照剂量的关系.从图 4、图 5 中可以看出模型 2 给出的模拟结果与实验结果符合很好.对于不同的吸收带,石英玻璃光密度的变化随吸收剂量的增加而增加,最终趋于饱和.实际上,质子和电子综合辐照更接近于空间真实的辐射环境,因此研究石英玻璃综合辐照效应将更具有现实意义.

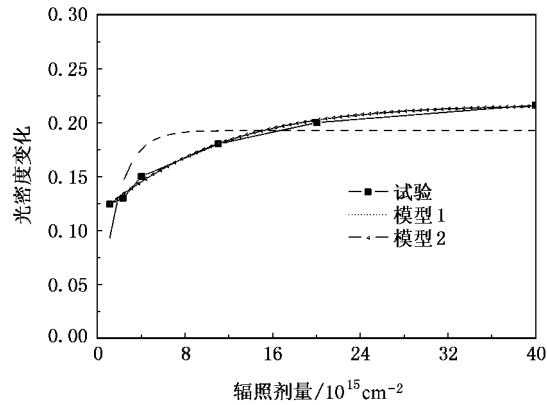


图 4 140 keV 质子和电子综合辐照下 215 nm 吸收带光密度变化与辐照剂量的关系

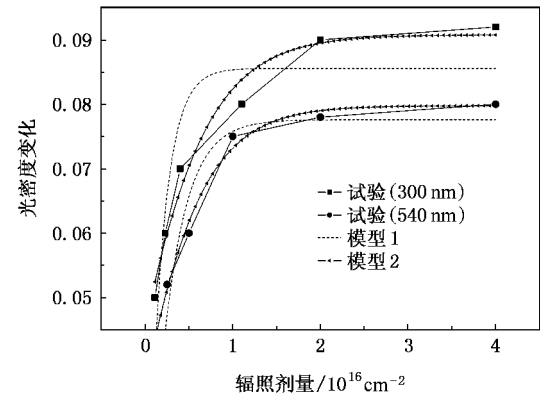


图 5 100 keV 质子和电子综合辐照下 300 nm 和 540 nm 吸收带光密度变化与辐照剂量的关系

3. 模型在光学反射镜中的应用

光学反射镜样品为多层的膜系结构,不同能量的带电粒子在反射镜中的射程不同,辐照作用尤其是质子辐照后,光学反射镜各膜层结构均出现了不同的变化^[3],主要包括表面粗糙度的增加、色心结构的形成、金属膜晶格畸变等.辐照作用对反射镜的损伤是多方面因素共同作用的结果.

3.1. 粗糙度对光学性能的影响

薄膜表面粗糙度与光散射通常以积分散射 TIS 来表征.TIS 被定义为散射光线与总反射光线的比,表达形式如下^[13]:

$$\text{TIS} = R_s/R_o \approx \left(\frac{4\pi\delta\cos\vartheta}{\lambda} \right)^2,$$

式中 δ 为表面均方根粗糙度 (nm); λ 为入射光波长

(nm); ϑ 为入射光的入射角; R_s 是漫散射反射率; R_o 总反射率.由上式可见,表面粗糙度的增加将会引起光散射增加,最终导致镜面反射率下降.

假设辐照前表面光滑,则辐照前反射率即为总反射率

$$R_o = E_r/E.$$

漫散射光所消耗能量可表达

$$\begin{aligned} E_s &= R_s \cdot E \\ &\approx R_o \cdot \left(\frac{4\pi\delta\cos\vartheta}{\lambda} \right)^2 \cdot E \\ &= \frac{E_r}{E} \left(\frac{4\pi\delta\cos\vartheta}{\lambda} \right)^2 \cdot E \\ &= E_r \left(\frac{4\pi\delta\cos\vartheta}{\lambda} \right)^2. \end{aligned} \tag{12}$$

3.2. 反射镜表面 SiO₂ 保护膜和石英玻璃基底着色

辐照作用后 SiO₂ 薄膜中可形成色心结构.色心是指 SiO₂ 薄膜中呈带电状态的点缺陷,是辐照过程中某些特定的先驱缺陷俘获电子和空穴形成.每种色心具有自己的能带结构,不同色心表现出不同的光吸收.SiO₂ 薄膜中的主要色心为 E' 类型心^[14-16]、非桥氧空穴^[17]和杂质色心等.在文献^[18]中给出了玻璃材料中的 E' 色心模型, E' 色心是由失去一个桥氧的硅原子的 sp³ 杂化轨道俘获一个电子构成.随着辐照剂量的增加, SiO₂ 薄膜所形成的色心结构数量越来越多,对一定波谱光线产生较大的吸收,着色的影响也越来越明显.因此, SiO₂ 保护膜着色在一定程度上降低了反射镜的反射性能.

由于吸收峰值的吸收系数与色心浓度成正比^[19],辐照导致的光吸收是由色心引起的,在辐照 t 时刻,色心浓度正比于辐照过程中电离效应产生的电子或带电离子浓度,即 $\alpha = \xi n$,其中 $n = N_D^+ = \left(1 - \frac{2}{1 + c_1 e^{a_1 D}} \right) \theta$, ξ 为常数.

因此,色心吸收所造成的光波能量损失可表达为

$$\begin{aligned} E_e &= E \cdot \alpha = E \cdot \xi \cdot n \\ &= E \cdot \xi \cdot \left(1 - \frac{2}{1 + c_1 e^{a_1 D}} \right) \theta. \end{aligned} \tag{13}$$

3.3. 金属膜晶格畸变

注入质子的填充作用将引起金属膜晶格畸变,改变了金属膜中电子密度^[20].质子辐照后,弱束缚电子跃迁相对增强,紫外至可见能量较高的波段可

引起弱束缚电子能级的带间激发跃迁,同时相应的光波能量被吸收,使相应谱段的反射率下降,最终导致金属反射膜光学性能的改变.仿照以上在光学材料中电离效应产生的带电离子浓度的模型建立过程,可以建立弱束缚电子结构浓度 I 与吸收剂量 D 的关系,如下:

$$I = \left(1 - \frac{2}{1 + c_2 e^{a_2 D}}\right) \varphi.$$

吸收系数与入射质子填充产生的弱束缚电子结构浓度成正比^[14],即 $\alpha = \zeta I$ 其中 ζ 为比例系数.

因此,弱束缚电子结构激发产生的光波能量损失可表达为

$$E_d = E \cdot \alpha = E \cdot \zeta \cdot \left(1 - \frac{2}{1 + c_2 e^{a_2 D}}\right) \varphi. \quad (14)$$

3.4. 金属膜反射镜反射率模型的建立

根据以上各膜层内光波能量的分析,可得辐照后反射镜反射率的唯象模型的表达式为

$$\begin{aligned} R &= \frac{E_r - \chi(E_s + E_e + E_d)}{E} \\ &= R_0 - \chi R_0 \cdot \left(\frac{4\pi\delta\cos\vartheta}{\lambda}\right)^2 \\ &\quad - \chi\zeta \cdot \left(1 - \frac{2}{1 + c_1 e^{a_1 D}}\right)\theta \\ &\quad - \chi\zeta \cdot \left(1 - \frac{2}{1 + c_2 e^{a_2 D}}\right)\varphi, \quad (15) \end{aligned}$$

其中 χ 为一个与辐照能量 E_p 有关的量.通过整理(15)式,得到质子辐照作用下,金属膜反射镜反射率与辐照剂量之间的变化关系可由如下函数形式描述:

$$R_f = p_0 + p_1 \frac{2}{1 + a e^{a_1 D}} + p_2 \frac{2}{1 + b e^{\beta D}}, \quad (16)$$

式中 $p_0, a, b, p_1, p_2, \alpha_1, \beta$ 为模型参量, D 为吸收剂量.

根据材料的吸收剂量 D 与辐照剂量 Φ 之间的关系,同时为了简化假设参量 a, b 的取值均为 1,得到金属膜反射镜反射率的简化形式为

$$R_f = p_0 + p_1 \frac{2}{1 + e^{\alpha_1 \Phi}} + p_2 \frac{2}{1 + e^{\beta \Phi}}, \quad (17)$$

式中 $p_0, p_1, p_2, \alpha_1, \beta$ 为模型参量, Φ 为辐照剂量.表 5 中分别给出了不同能量辐照积分反射率(波长为 200 nm—2500 nm 的积分反射率)性能演化模型数学模拟参量数值.

表 5 不同能量辐照积分反射率性能演化数值模拟参量

能量 E/keV	60	100	130	160
P_0	-1.54154	-0.10506	-0.3327	-0.26355
p_1	2.43681	1.01348	1.23457	1.16272
p_2	0.05379	0.03539	0.04462	0.04953
α_1	1.1193×10^{-18}	1.9914×10^{-18}	9.2305×10^{-19}	4.3704×10^{-19}
β	2.2337×10^{-15}	2.2109×10^{-15}	2.3136×10^{-15}	1.9459×10^{-15}

下面给出不同能量质子辐照下,光学反射镜反射率性能演化的数值模拟(图 6)及试验结果(图 7).从图 6 和图 7 可以看出,在同一辐照剂量下,辐照质子的能量越高,反射镜的反射率越低,说明粒子的辐照能量对反射镜的反射率有影响.同时,对于同一质子辐照能量情况下,反射镜的反射率随辐照剂量的增加而降低.但是,从图中可以看出,在某一辐照剂量后曲线下降趋势变缓,其原因是随着辐照的进行,色心的产生和复合趋于平衡.本文给出的金属膜反射镜反射率随吸收剂量的变化与实验结果符合很好.

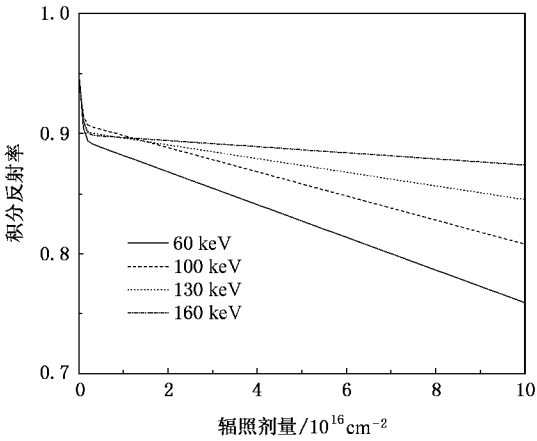


图 6 质子辐照下反射镜积分反射率演化拟合曲线

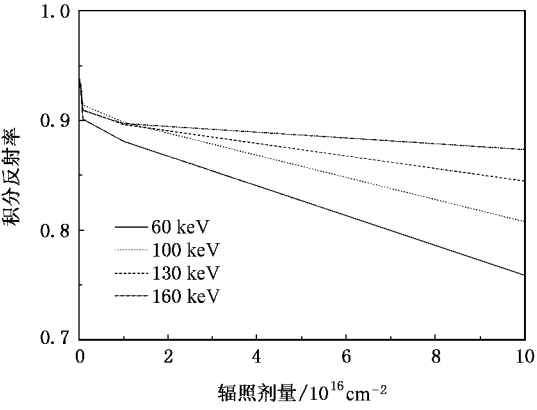


图 7 质子辐照下反射镜积分反射率演化试验曲线

4. 结 论

从带电粒子与物质相互作用的最基本理论出发,研究带电粒子辐照对材料的影响.对于光学材料,在带电粒子辐照下,材料的辐照损伤效应以非弹性电离效应为主.在此理论的基础上,提出石英玻璃低能带电粒子辐照损伤的物理模型,并给出光密度

改变量与吸收剂量之间的变化关系,其工程应用形式为 $\Delta A = \Delta A_{\infty} \left(1 - \frac{2}{1 + ce^{ad}} \right)$. 同时给出了光学反

射镜反射率的表达式为 $R_f = p_0 + p_1 \frac{2}{1 + e^{\Phi_{\text{ex}}}} + p_2 \frac{2}{1 + e^{\Phi_{\text{p}}}}$. 利用其模拟了质子、电子及综合辐照情况下的试验结果,模拟结果与实验结果符合很好.

-
- [1] Liu H, He S Y, Wei Q, Yang D Z, Wang H Y 2003 *Acta Opt. Sin.* **23** 366 (in Chinese) [刘 海、何世禹、魏 强、杨德庄、王怀义 2003 光学学报 **23** 366]
- [2] Wei Q, Liu H, He S Y, Hao X P, Wei L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5525 (in Chinese) [魏 强、刘 海、何世禹、郝小鹏、魏龙 2006 物理学报 **55** 5525]
- [3] Wang J P, Xu N J, Zhang Y Q, Tang H L, Liu J L, Liu C X, Yao Y J, Peng H L, He B P, Zhang Z X 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1331 (in Chinese) [王剑屏、徐娜军、张廷庆、汤华莲、刘家璐、刘传洋、姚育娟、彭宏论、何宝平、张正选 2000 物理学报 **49** 1331]
- [4] Wei Q, He S Y, Liu H, Yang D Z 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 83 (in Chinese) [魏 强、何世禹、刘 海、杨德庄 2005 光学学报 **25** 83]
- [5] Kabler M N, Williams R T 1978 *Phys. Rev. B* **18** 1948
- [6] Nordlund K 1995 *Comp. Mat. Sci.* **3** 448
- [7] Wang T Q 2003 *The Research on the Radiation Effects Induced by High-energy Proton* (Changsha : National University of Defense Technology) [王同权 2003 高能质子辐射效应研究 (长沙 : 国防科学技术大学)]
- [8] Liu H, He S Y 2002 *Spacecraft Recovery & Remote Sensing* **23** 13 (in Chinese) [刘 海、何世禹 2002 航天返回与遥感 **23** 13]
- [9] Christopher D M, Joel A S, Stephen A P 1997 *J. Non-Cryst. Solids* **212** 59
- [10] Feng D 1986 *Metal Physics I* (Peking : Science Press) p229 [冯端 1986 金属物理学 I (北京 : 科学出版社) 第 229 页]
- [11] He B P, Chen W, Wang G Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3546 (in Chinese) [何宝平、陈 伟、王桂珍 2006 物理学报 **55** 3546]
- [12] Liu H, He S Y, Liu J C, Wang H Y 2002 *Optical Technique* **28** 43 (in Chinese) [刘 海、何世禹、刘金城、王怀义 2002 光学技术 **28** 43]
- [13] Kylner C, Mattsson L 1999 *Thin Solid Film* **348** 222
- [14] Weeks R A 1994 *J. Non-Cryst. Solids* **179** 1
- [15] Griscom D L 1980 *Phys. Rev. B* **22** 4192
- [16] Xiao Z Y, Luo W Y, Wang T Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2731 (in Chinese) [肖中银、罗文芸、王廷云 2007 物理学报 **56** 2731]
- [17] Gulamova R R *et al* 1997 *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* **127/128** 497
- [18] Griscom D L 1980 *J. Non-Cryst. Solids* **40** 211
- [19] Zhang Q R 1989 *Color Center Physics of Crystal* (Shanghai : Shanghai Jiaotong University Press) p61, 123, 36—38 [张启仁 1989 晶体色心物理学 (上海交通大学出版社) p61, 123, 36—38]
- [20] Chen C L 1998 *Solid State Physics* (Lanzhou : Northwestern Poly Technical University Press) p142—145 (in Chinese) [陈长乐 1998 固体物理学 (兰州 : 西北工业大学出版社) 第 142—145 页]

Study on the optical property of quartz glass and Al film reflector under charged particles irradiation *

Zhou Zhong-Xiang^{1)†} Wang Hong-Li¹⁾ Shen Yan-Qing¹⁾ Liu Da-Jun¹⁾

Liu Hai²⁾ He Shi-Yu²⁾ Yang De-Zhuang²⁾

¹⁾ (*Department of Physics , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China*)

²⁾ (*Space Materials and Environment Engineering Laboratory , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China*)

(Received 9 March 2007 ; revised manuscript received 25 May 2007)

Abstract

The damage model and the rate equation of quartz glass were set up under charged particles irradiation , and the concentration of ions and electrons produced by ionization were also given. The mathematical fitted results of the change in optical density are in accordance with the experimental results. The model was also applied to optical Al film reflector , and the mathematical fitted results of the integral reflectance of Al film reflector were given. The proposed damage model can be used to describe quantitatively the change in optical property of quartz glass with increasing absorption dose under charged particles irradiation.

Keywords : ionization damage , complex radiation , quartz glass , optical density

PACC : 7890 , 6180 , 8120Q

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No.61343).

† E-mail : zhouzx@hit.edu.cn