

高功率脉冲电子束辐照 SiO₂ 的光学和激光损伤性能

钟勉 杨亮 任玮 向霞 刘翔 练友运 徐世珍 郭德成 郑万国 袁晓东

Optical properties and laser damage performance of SiO₂ irradiated by high-power pulsed electron beam

Zhong Mian Yang Liang Ren Wei Xiang Xia Liu Xiang Lian You-Yun Xu Shi-Zhen
Guo De-Cheng Zheng Wan-Guo Yuan Xiao-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 63, 246103 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.246103

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.246103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

栅控横向 PNP 双极晶体管基极电流峰值展宽效应及电荷分离研究

The base current broadening effect and charge separation method of gate-controlled lateral PNP bipolar transistors

物理学报.2014, 63(11): 116101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.116101>

氦离子低温预辐照对不锈钢中氦泡生长抑制作用的 Monte Carlo 模拟研究

Inhibition effect of low-temperature pre-irradiation of helium ions on the growth of helium bubble in stainless steel: a Monte Carlo simulation

物理学报.2014, 63(10): 106102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.106102>

300 eV--1 GeV 质子在硅中非电离能损的计算

Numerical investigation of non-ionizing energy loss of proton at an energy range of 300 eV to 1 GeV in silicon

物理学报.2014, 63(6): 066102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.066102>

双极电压比较器电离辐射损伤及剂量率效应分析

Analyses of ionization radiation damage and dose rate effect of bipolar voltage comparator

物理学报.2014, 63(2): 026101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.026101>

强流脉冲电子束辐照诱发纯钼表面的损伤效应及结构缺陷

Damage and structural defects in the surface layer of pure molybdenum induced by high-current pulsed electron beam

物理学报.2013, 62(23): 236103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.236103>

高功率脉冲电子束辐照SiO₂的 光学和激光损伤性能*

钟勉¹⁾ 杨亮¹⁾ 任玮¹⁾ 向霞^{1)†} 刘翔²⁾ 练友运²⁾
徐世珍¹⁾ 郭德成¹⁾ 郑万国³⁾ 袁晓东³⁾

1) (电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

2) (核工业西南物理研究院, 成都 610041)

3) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2014年5月18日收到; 2014年7月8日收到修改稿)

研究了不同剂量的60 kW高功率脉冲电子束辐照对高纯熔石英玻璃的微观结构、光学性能和激光损伤特性的影响规律. 光学显微图像表明, 辐照后熔石英样品由于热效应导致表面破裂, 裂纹密度和尺寸随辐照剂量增加而增大, 采用原子力显微镜分析表面裂纹的微观形貌, 裂纹宽度约1 μm, 同时样品表面分布着大量尺寸约0.1—1 μm的碎片颗粒. 吸收光谱测试表明, 所有样品均在394 nm处出现微弱的吸收峰, 吸收强度随着电子束辐照剂量增大呈现先增加后减小的趋势. 荧光光谱测试发现辐照前后样品均有3个荧光带, 分别位于460, 494和520 nm, 荧光强度随辐照剂量的变化趋势与吸收光谱一致. 利用355 nm激光研究了不同剂量电子束辐照对熔石英激光损伤阈值的影响, 结果表明熔石英的损伤阈值随着辐照剂量的增加而降低. 在剂量较低时, 导致熔石英激光损伤阈值下降的原因主要是色心缺陷; 剂量较高时, 导致损伤阈值降低的原因主要是样品表面产生的大量微裂纹和碎片颗粒对激光的调制和吸收.

关键词: 熔石英, 电子束辐照, 色心, 激光损伤阈值

PACS: 61.80.Fe, 61.43.Fs, 61.72.jn

DOI: 10.7498/aps.63.246103

1 引言

熔石英(SiO₂)作为一种宽禁带(8.9 eV)绝缘体, 在紫外-可见光区具有优良的透过率, 常被用于制作光学窗口材料, 尤其是一些极端条件下的大型光学系统中作为光学组件, 如, 熔石英在国际热核实验反应堆(ITER)诊断与远程处理系统中作为光学组件(窗口、透镜、光纤)的首选材料之一^[1-3]; 在高功率固体激光驱动惯性约束聚变(ICF)系统中, 熔石英也是应用最普遍的光学材料, 用于制作光栅、透镜、屏蔽片等^[4]. 在这些核聚变系统中, 光学材料将受到多种强瞬发辐射源的照射, 包括离子

束^[5-7]、中子束^[8,9]、X射线^[10]、γ射线^[11-13]、电子束^[14-16]以及激光束^[17-20]. 因此, 光学材料的辐照损伤不可避免, 其微观结构、光学、力学性能均会发生不同程度的变化. 研究光学材料的辐照损伤及性能演变对于材料的运行环境和安全使用具有重要的指导意义.

SiO₂的辐照研究主要集中在缺陷以及与缺陷相关的结构、色心和光谱, Skuja等^[21]和Griscom^[22]分别进行了综述. 关于电子束辐照氧化硅的光学性能变化也有相关研究^[14-16,23], 如, Fitting等^[14]通过研究发现, 在电子束剂量范围为0.01—0.1 C·cm⁻² (0.625—6.25 × 10¹⁷ e·cm⁻²)时, 中心位于520 nm (2.4 eV)和460 nm (2.7 eV)的阴

* 国家自然科学基金(批准号: 61178018)和中央高校基本科研业务费(批准号: ZYGX2012J057)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xiexiang@uestc.edu.cn

极发光带在 90 K 条件下会随着辐照剂量的增加而减小并趋于饱和, 而位于 645 nm (1.9 eV) 的阴极发光带在室温条件下随着辐照剂量的增加而增加逐渐趋于饱和. Amico 等^[15]通过对比研究合成氧化硅和不同剂量电子束辐照氧化硅的氧空位缺陷 ([Si-ODC(II)]) 发光, 结果表明, 随着辐照剂量的增加, 发光谱带呈现非均匀加宽. Nuccio 等^[16]利用 γ 射线和电子束辐照研究了不同类型的熔石英辐照产生的氧空位缺陷, 该缺陷发光中心位于 4.4 eV 处, 产生缺陷的效率与辐照剂量和剂量率有关, 而与辐照种类无关. Sergeev 等^[18,19]对 KrF (5.0 eV) 和 ArF (6.4 eV) 的准分子激光器辐照不同类型的高纯 SiO₂ 的光学吸收光谱进行了报道. 目前虽然对 SiO₂ 的电子束辐照和激光辐照效应报道较多, 但是有关电子束辐照对 SiO₂ 的激光损伤特性的影响尚未见报道. 本文研究了不同剂量的电子束辐照对 SiO₂ 样品的光学性能和激光损伤特性的影响, 采用紫外-可见分光光度计 (UV-vis)、荧光分光光度计 (PL)、原子力显微镜 (AFM)、光学显微镜 (OM) 等对辐照前后的样品进行表征, 研究其微观结构、光学性质和激光损伤特性的变化规律.

2 实验

选择高纯度、双面抛光的石英玻璃作为实验材料. 实验样品的尺寸为 30 mm × 30 mm × 4 mm. 该电子束辐照实验是在核工业西南物理研究院的 EMS-60 型电子束装置上完成^[24]. 实验采用扫描方式进行电子束辐照, 电子束能量为 120 keV, 最大功率密度为 $2 \times 10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, 脉冲频率为 10 kHz, 扫描速度约为 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 束斑半径约为 1 mm, 辐照区域尺寸为 10 mm × 10 mm. 为了研究不同辐照剂量对实验的影响, 将实验样品分为 5 组, 1# 是作为参比的原始样品, 2#—5# 样品的名义辐照剂量分别为 5×10^{15} , 1×10^{16} , 1×10^{17} 和 $1.6 \times 10^{17} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$. 辐照过程中 4# 和 5# 样品表面观察到明显的电火花现象, 辐照后的 4# 和 5# 样品表面可以清晰地观察到有微裂纹出现. 当 5# 样品的辐照剂量增加至 $1.6 \times 10^{17} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时伴随有比 4# 样品更加强烈的电火花出现, 为避免样品过度损坏而无法分析, 因此不再增加辐照剂量. 根据计算得出电子束入射深度大约为 0.1 mm.

采用 Nikon ECLIPSE-E600 型光学显微镜观察辐照前后样品表面形貌的变化情况; PSIA XE-100 型原子力显微镜测量辐照后样品表面产生的微裂纹形貌和尺寸; SHIMADZU UV-2550 型紫外可见分光光度计和 RF-5310PC 型荧光分光光度计分别测试样品的吸收光谱和光致发光谱. 采用 Nd:YAG 脉冲激光器对辐照前后的样品进行激光损伤阈值测试, 所用激光波长为 355 nm, 脉冲宽度为 6.3 ns. 采用 Spiricon 光斑品质分析仪测得 $1/e^2$ 光斑面积为 0.3 mm^2 , 束斑为高斯分布. 损伤测试方法采用 $R:1$ (即等比例增加的激光能量脉冲以相同的时间间隔在测试元件同一点上辐照多次)^[25], 每个样品测试 20 个损伤点, 去除偏差较大的 5 个点, 剩余的 15 个点作为计算损伤阈值平均值的样本点.

3 结果与讨论

3.1 光学显微镜表征结果

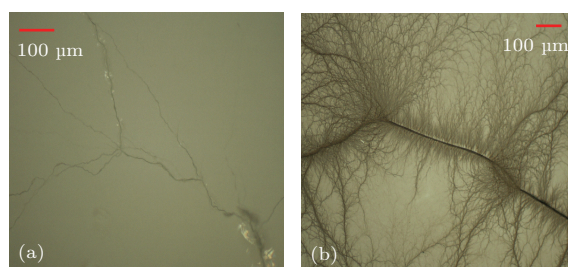


图1 (网刊彩色) 不同剂量的电子束辐照 SiO₂ 的光学显微镜图像 (a) 4# 样品的辐照剂量为 $1 \times 10^{17} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$; (b) 5# 样品的辐照剂量为 $1.6 \times 10^{17} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$

为了解样品表面的损伤裂纹随电子束辐照剂量的演变过程, 对辐照前后的样品进行光学显微表征. 实验结果表明, 当辐照剂量较小时, $5 \times 10^{15} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$ (2#) 和 $1 \times 10^{16} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$ (3#) 的样品表面与参比样品 (1#) 比较没有明显的变化, 但随着辐照剂量增加, 样品表面开始出现裂纹. 图 1 是 SiO₂ 经过剂量为 $1 \times 10^{17} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$ (4#) 和 $1.6 \times 10^{17} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$ (5#) 的电子束辐照后的光学显微镜图. 从图 1 (a) 中可以清晰地看到, 经过电子束辐照后 SiO₂ 表面呈现出微小损伤裂痕, 图 1 (b) 表明高剂量电子束辐照后的 SiO₂ 表面产生的裂痕宽度和深度增大, 同时四周伴随有大量的根须状微裂纹. 实验结果表明, 当电子束辐照剂量超过一定值后, 熔石英样品表面将产生损伤裂纹, 随着剂量的

增加, 裂纹的密度和尺寸增加. 这说明电子束辐照导致样品表面温度剧增, 因样品厚度为 4 mm, 而电子束入射深度仅为 0.1 mm, 由此产生的温差导致样品表面破裂. 这是因为当电子束辐照熔石英表面时, 发生能量和电荷沉积, 而该电子束的功率密度非常高(可达 $2 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}$), 因此可以在极短的时间内与熔石英表面作用, 并在表面一定深度范围内产生很高的压力梯度和温度梯度, 在表面层中形成很高的热应力, 从而导致微裂纹的出现. Wang 等^[26]也观察到脉冲强电流电子束辐照钠钙玻璃(soda lime glass)后表面产生了大量的裂纹, 他们认为辐照引起的键断裂和热应力导致了表面辐照层中裂纹的出现, 而另一些裂纹是由于电子能量损失引起的键断裂或热应力而导致的裂纹前缘和表面缺陷相互作用的结果.

3.2 原子力显微镜表征结果

根据光学显微镜结果, 利用原子力显微镜观察了辐照后样品表面裂纹的微观结构. 图 2 是剂量为 $1 \times 10^{17} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的电子束辐照 SiO_2 原子力显微镜图像. 从图中可以清晰地看到 SiO_2 表面的微裂纹形貌, 裂纹呈交叉网络状, 宽度约 $1 \mu\text{m}$, 表面均方根粗糙度 (Rq) 高达 152.6 nm, 同时样品表面出现了大量尺寸不等的颗粒物, 尺寸范围为 $0.1\text{--}1 \mu\text{m}$, 这是样品表面破裂时喷溅到表面的裂纹碎片. 此外, 实验过程中观察到在高剂量 ($\geq 1 \times 10^{17} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$) 电子束辐照条件下有明显的电火花现象, 表明了高剂量电子束辐照后的熔石英表面因电荷积累过多而产生放电, 能量沉积在熔石英表面区域致使辐照区域温度骤升, 辐照表层和样品其他区域之间形成极大的温差, 产生较大热应力, 因此导致微裂纹的出现; 同时裂纹破裂时碎片喷溅到了表面, 而裂纹和碎片的出现使得表面的粗糙度大大增加.

3.3 紫外-可见光谱

为了研究辐照前后样品的光学性能的变化情况, 对样品进行吸收和荧光光谱测试. 图 3 是经过不同剂量的电子束辐照前后的吸收光谱. 从图中可以观察到吸收中心位于 394 nm (3.15 eV) 处的微弱的蓝色吸收带. 该吸收带的产生来源于 SiO_2 材料的 $S_0 \rightarrow T_1$ 跃迁过程^[27,28]: 氧空位缺陷 (= $\text{Si}\bullet\bullet$ 或

$\text{ODC}(\text{II})$) 从基态 (S_0) 跃迁到激发态 (T_1). 在 Ge 和 Sn 掺杂的 SiO_2 中也观察到了相同的吸收带^[28], 该吸收带是由一系列具有相似光学性能、同结构的等电子缺陷组成. 实验结果表明, 经过电子束辐照后的 SiO_2 最初随着辐照剂量的增加, 394 nm 处的吸收逐渐增强, 但剂量进一步增加, 吸收反而减弱. 这是由于经过电子束辐照后的 SiO_2 产生大量的色心, 随着剂量的增加, 产生的色心越多, 从而使 SiO_2 的吸收增强. 但是随着辐照剂量(辐照时间)增加样品温度逐渐升高, 而色心缺陷一般对温度较为敏感, 在较高温度下会发生色心消失或转型, 从而影响光谱性能. 温度升高相当于对 SiO_2 样品进行了退火处理, 色心的产生和湮灭两个过程相互竞争, 从而使吸收强度降低. 该实验中当电子束辐照剂量增加到 $1.6 \times 10^{17} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 色心产生速率和湮灭速率相当, 因此样品的吸收曲线恢复到原始样品. 由于惯性约束聚变装置中熔石英材料通常被用作三倍频元件, 因此辐照样品对于三倍频激光的透过率非常重要. 插图中给出了辐照前后样品在 355 nm 的透过率数据, 电子束辐照后 SiO_2 样品的透过率随剂量增加, 呈现出先减小后增加的趋势.

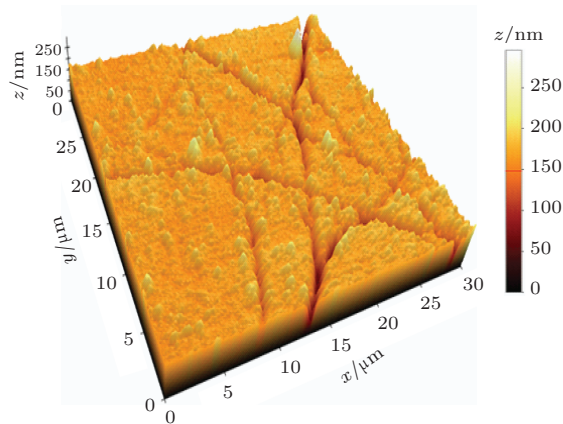


图 2 (网刊彩色) 剂量为 $1 \times 10^{17} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的电子束辐照 SiO_2 原子力显微镜图像

3.4 荧光光谱

通过比较不同剂量电子束辐照前后样品的荧光光谱来探究电子束辐照对熔石英材料微观缺陷的影响. 图 4 是不同剂量电子束辐照前后 SiO_2 的光致发光谱, 激发波长为 390 nm . 从图中可以清晰地观察到所有样品均有 3 个发光带, 它们的发光中心分别位于 460 nm (2.7 eV), 494 nm (2.5 eV) 和 520 nm (2.4 eV). 其中, 460 nm 的发光

带来源于 SiO₂ 材料中的氧空位缺陷 (ODC (II)), 这与图 3 的吸收峰 394 nm 相对应, 都是硅悬挂键所导致, 即由 T₁ → S₀ 的释光过程产生的 [29-31]. Fitting 等 [14] 在 SiO₂ 的电子束辐照效应研究中也观察到 460 和 520 nm 的阴极发光. 目前对 494 nm 荧光峰的产生机理还不清楚, 有研究者认为 494 nm 荧光峰可能与氧空位缺陷有关 [32]. 而 520 nm 的发光带与 SiO₂ 材料中杂质氢系列 (≡Si—H 和 ≡Si—OH) 有关 [33]. 这是由于 SiO₂ 材料中除了含有大量的结构缺陷外, 同时还含有一定量的 —OH, 杂质氢半径小, 极易与结构缺陷结合形成与氢相关的缺陷, 从而导致 520 nm 的绿光带. 综合图 4 和图 3 的结果可以看到, 电子束辐照并未在熔石英样品中产生新的缺陷, 辐照前后样品的吸收曲线和发光曲线类似, 不同剂量辐照导致的差别仅仅是强度变化. 图 4 中的荧光峰强度呈现先增加后减小的规律, 该趋势与图 3 的吸收光谱一致, 同样是由于色心缺陷的产生和湮灭过程相互竞争导致的强度变化.

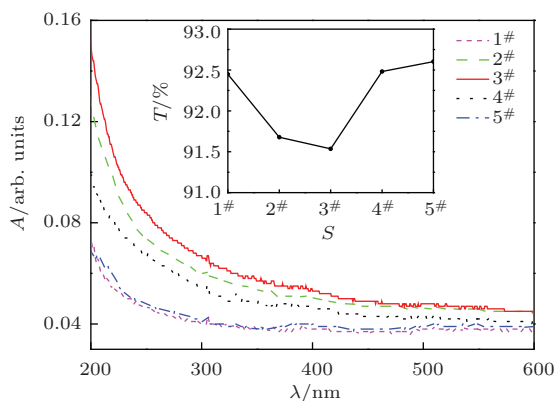


图 3 (网刊彩色) 不同剂量电子束辐照 SiO₂ 的吸收光谱, 其中 λ, A, T 和 S 分别代表波长、吸收率、透射率和样品编号

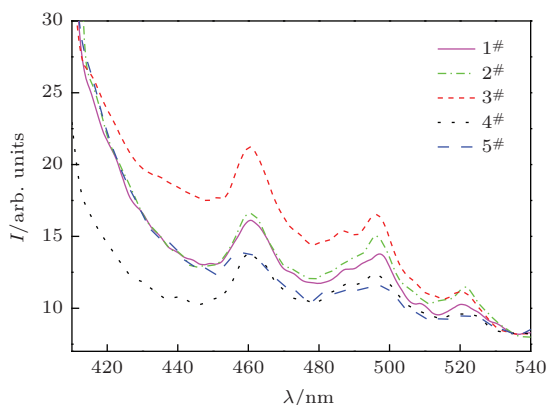


图 4 (网刊彩色) 不同剂量电子束辐照 SiO₂ 的光致发光谱, 其中 λ 和 I 分别代表波长和强度

3.5 激光损伤

为了研究 SiO₂ 经电子束辐照后激光损伤特性的变化情况, 采用波长为 355 nm 的 Nd : YAG 激光器对不同剂量电子束辐照后的熔石英样品进行激光损伤测试实验. 激光损伤阈值 (LIDT) 测试采用 R-on-1 的方式, 最后换算成 1 ns 时对应的值. 设定 A 为损伤前的最大能量密度, B 为刚好损伤时的能量密度, 则激光损伤阈值被定义为 $LIDT = (A + B)/2$, 误差被定义为 $Error = (B - A)/2$, 其中误差的损伤概率不超过 5%. 图 5 是不同剂量电子束辐照前后 SiO₂ 的激光损伤阈值分布. 从图中可以得出, 当剂量较小时, 如图 5 (a) 所示, 辐照前后的阈值相差不太大; 当剂量逐渐增加, 如图 5 (b) 所示, 阈值的差值开始出现; 当剂量继续增加时, 如图 5 (c) 和图 5 (d) 所示, 阈值的差值逐渐增大. 为更清楚地了解激光损伤阈值的变化趋势, 我们计算了每组样品的 LIDT 平均值, 1#—5# 样品依次为 3.55, 3.50, 2.97, 2.65 和 2.15 J·cm⁻². 图 6 是电子束辐照剂量与 LIDT 平均值之间的关系. 结果表明, 熔石英的激光损伤阈值随着电子束辐照剂量的增加而降低, 降低幅度分别为 1.41%, 16.34%, 25.32% 和 39.44%.

综合上述研究结果, 我们对激光损伤阈值的变化和损伤机制进行分析. 从图 3 和图 4 可知, 在两个较低剂量辐照时, 样品内部色心浓度增加, 导致样品对 355 nm 激光的吸收逐渐增强, 因此, 熔石英样品的三倍频激光损伤阈值逐渐下降, 但此时下降比例较小; 在两个较高剂量辐照时, 虽然此时表面温升对样品进行了退火处理, 使得色心浓度减少, 样品对 355 nm 激光的吸收减弱, 但是过高的表面温升导致样品表面产生微裂纹, 并且随剂量增加, 裂纹密度和尺寸明显增大, 如图 1 所示. 这是因为当电子束辐照熔石英表面后, 能量沉积在熔石英表面区域致使辐照区域温度骤升, 辐照表层和样品其他区域之间形成极大的温差, 产生较大热应力, 因此导致微裂纹的出现. 熔石英亚表面裂纹和缺陷对于入射激光, 尤其是对 355 nm 紫外激光的调制是导致光学材料损伤阈值降低的主要因素. 前期研究表明, 裂纹的中心区域聚集着很高的能量, 在激光辐照过程中容易损伤, 而裂纹的深度越深, 对入射光场的调制作用越明显 [34]. 此外, 电子束辐照样品表面含有大量的碎片颗粒, 如图 2 所示, 这些

颗粒物对于 355 nm 紫外激光有很强的吸收, 对激光的调制很强 [35], 极易导致激光损伤 [36]. 因此, 此时影响熔石英样品激光损伤阈值的主要因素不是色心缺陷, 而是元件表面的破损裂纹和大量的碎片

颗粒, 这两种因素对于激光损伤阈值的影响远远高于色心缺陷, 因而, 此时样品的激光损伤阈值大幅降低.

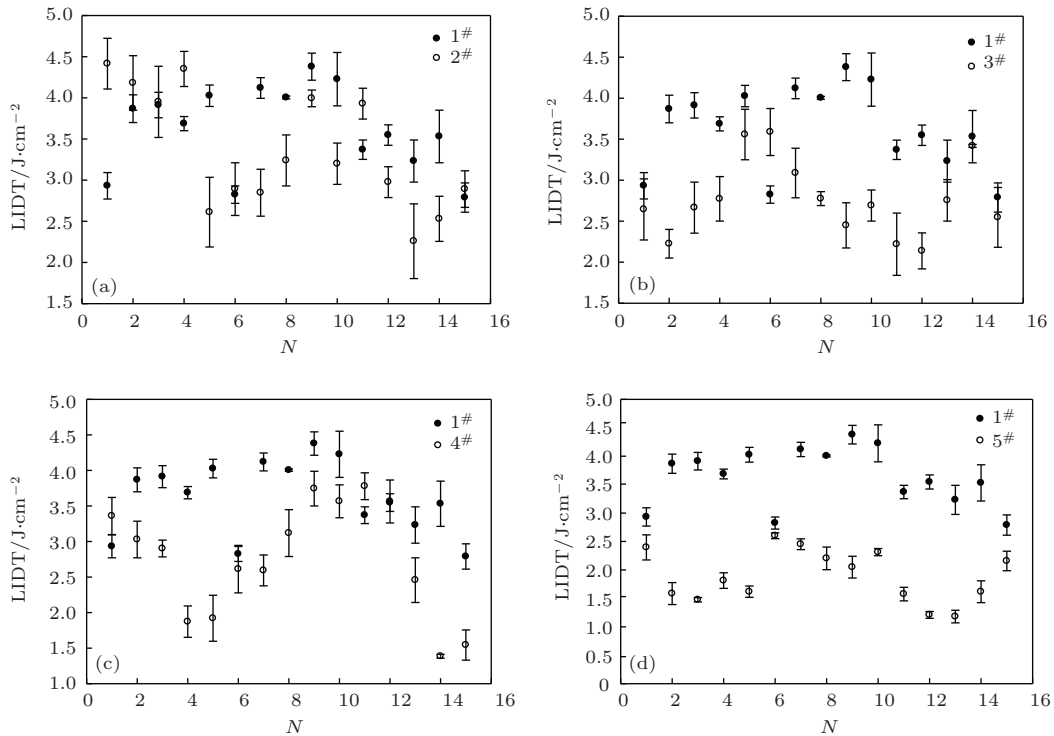


图5 不同剂量电子束辐照前后 SiO₂ 的激光损伤阈值分布, 其中 LIDT 和 N 分别代表激光损伤阈值和测试点序号 (a) $5 \times 10^{15} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$; (b) $1 \times 10^{16} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$; (c) $1 \times 10^{17} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$; (d) $1.6 \times 10^{17} \text{ e}\cdot\text{cm}^{-2}$

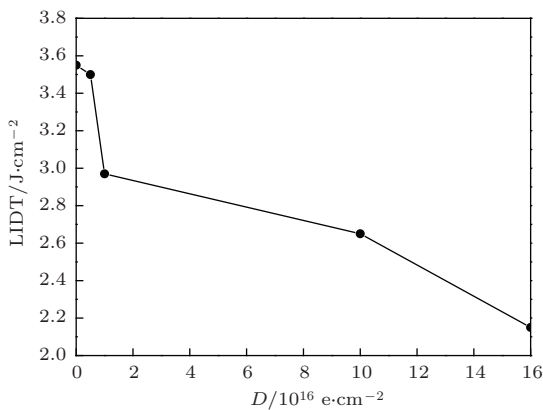


图6 电子束辐照剂量与激光损伤阈值平均值之间的关系, 其中 LIDT 和 D 分别代表激光损伤阈值和辐照剂量

4 结 论

不同剂量电子束辐照 SiO₂ 实验结果表明: 1) 当辐照剂量较小时, 样品表面的形貌无明显变化, 但随着辐照剂量的增加, SiO₂ 的吸收逐渐增强, 而激光损伤阈值逐渐减小, 这是由于经过电子束辐照后的 SiO₂ 产生大量的色心, 随着剂量的增

加, 色心浓度增大, 从而导致 SiO₂ 的吸收增强和激光损伤阈值降低, 但降低幅度较小; 2) 当辐照剂量较大时, 样品表面将产生大量损伤裂纹, 且裂纹的密度和尺寸随着辐照剂量的增加而增加, 而 SiO₂ 的吸收强度和激光损伤阈值随着剂量的增加而降低, 吸收强度的降低是由于表面温升对样品进行了退火处理, 使得色心浓度减少, 此时激光损伤阈值的降低主要是由于样品表面因辐照产生的大量微裂纹和碎片颗粒对激光的调制和吸收.

参考文献

- [1] Holtkamp N 2007 *Fusion Eng. Des.* **82** 427
- [2] Ibarra A, Hodgson E R 2004 *Nucl. Instrum. Meth. B* **218** 29
- [3] Yamamoto S, Shikama T, Belyakov V, Farnum E, Hodgson E, Nishitani T, Costley A, de Kock L, Walker C, Janeschitz G, 2000 *J. Nucl. Mater.* **283** 60
- [4] Campbell J H, Hawley-Fedder R A, Stolz C J, Menapace J A, Borden M R, Whitman P K, Yu J, Runkel M

- J, Riley M O, Feit M D 2004 *Proc. SPIE 5341* San Jose, USA, January 24–29, 2004 p84
- [5] Devine R A 1993 *J. Non-Cryst. Solids* **152** 50
- [6] Manzano J, Morono A, Hodgson E R 2009 *Fusion Eng. Des.* **84** 1245
- [7] González S, Morono A, Hodgson E R 2005 *Fusion Eng. Des.* **74** 831
- [8] León M, Martín P, Bravo D, López F, Ibarra A, Rascón A, Mota F 2008 *J. Nucl. Mater.* **374** 386
- [9] León M, Martín P, Vila R, Molla J, Ibarra A 2009 *Fusion Eng. Des.* **84** 1174
- [10] Galeener F L, Kerwin D B, Miller A J, Mikkelsen J C 1993 *Phys. Rev. B* **47** 7760
- [11] N uritdinov I, Masharipov K Y, Doniev M 2003 *Glass Phys. Chem.* **29** 11
- [12] Cannas M, Agnello S, Gelardi F, Boscaino R, Trukhin A, Liblik P, Lushchik C, Kink M, Maksimov Y, Kink R 2004 *J. Phys.: Condens. Matter* **16** 7931
- [13] Martín P, León M, Ibarra A, Hodgson E R 2011 *J. Nucl. Mater.* **417** 818
- [14] Fitting H J, Barfels T, Von Czarnowski A, Trukhin A N 2000 *Mater. Sci. Eng. B* **71** 109
- [15] D' Amico M, Messina F, Cannas M, Leone M, Boscaino R 2009 *Phys. Rev. B* **79** 064203
- [16] Nuccio L, Agnello S, Boscaino R, Boizot B, Parlato A 2007 *J. Non-Cryst. Solids* **353** 581
- [17] Zoubir A, Rivero C, Grodsky R, Richardson K, Richardson M, Cardinal T, Couzi M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 224117
- [18] Sergeev P B, Sergeev A P, Zvorykin V D 2007 *Quantum Electron.* **37** 711
- [19] Sergeev P B, Sergeev A P 2010 *Quantum Electron.* **40** 804
- [20] Guizard S, Martin P, Petite G, D'Oliveira P, Meynadier P 1996 *J. Phys.: Condens. Matter* **8** 1281
- [21] Skuja L, Hirano M, Hosono H, Kajihara K 2005 *Phys. Stat. Sol.* **2** 15
- [22] Griscom D L 1991 *J. Ceram. Soc. Jpn.* **99** 923
- [23] Chen L, Wang T S, Zhang G F, Yang K J, Peng H B, Zhang L M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 126101
- [24] Lian Y Y, Liu X, Xu Z Y, Song J P, Yu Y 2013 *Fusion Eng. Des.* **88** 1694
- [25] Chen X Q, Zu X T, Zheng W G, Jiang X D, Lü H B, Ren H, Zhang Y Z, Liu C M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1201 (in Chinese) [陈习权, 祖小涛, 郑万国, 蒋晓东, 吕海兵, 任寰, 张艳珍, 刘春明 2006 物理学报 **55** 1201]
- [26] Wang P W, Kimberlin K R, Chengyu W, Ying T, Lin G Q, Aimin W, Jun X J 2005 *Mater. Chem. Phys.* **94** 252
- [27] Skuja L 1994 *J. Non-Cryst. Solids* **167** 229
- [28] Skuja L 1998 *J. Non-Cryst. Solids* **239** 16
- [29] Skuja L, Streletsky A, Pakovich A 1984 *Solid State Commun.* **50** 1069
- [30] Sakurai Y 2006 *J. Non-Cryst. Solids* **352** 2917
- [31] Sakurai Y, Nagasawa K 2001 *J. Non-Cryst. Solids* **291** 86
- [32] Wang F, Qin X F, Ren S H, Yang L X, Meng Y F, Ming Y F 2013 *Mater. Res. Bull.* **48** 3640
- [33] Lin J, Huang Y, Zhang J, Gao J M, Ding X X, Huang Z X, Tang C C, Hu L, Chen D F 2007 *Chem. Mater.* **19** 2585
- [34] Hua J R, Zu X T, Li L, Xiang X, Chen M, Jiang X D, Yuan X D, Zheng W G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2519 (in Chinese) [花金荣, 祖小涛, 李莉, 向霞, 陈猛, 蒋晓东, 袁晓东, 郑万国 2010 物理学报 **59** 2519]
- [35] Hua J R, Li L, Xiang X, Zu X T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 044206 (in Chinese) [花金荣, 李莉, 向霞, 祖小涛 2011 物理学报 **60** 044206]
- [36] Jiang Y 2012 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [蒋勇 2012 博士学位论文 (成都: 电子科技大学)]

Optical properties and laser damage performance of SiO₂ irradiated by high-power pulsed electron beam*

Zhong Mian¹⁾ Yang Liang¹⁾ Ren Wei¹⁾ Xiang Xia^{1)†} Liu Xiang²⁾ Lian You-Yun²⁾
Xu Shi-Zhen¹⁾ Guo De-Cheng¹⁾ Zheng Wan-Guo³⁾ Yuan Xiao-Dong³⁾

1) (School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

2) (Center for Fusion Science of Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

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

(Received 18 May 2014; revised manuscript received 8 July 2014)

Abstract

A 60 kW electron beam is used to study the microstructure and optical property evolutions as well as laser induced damage threshold of fused silica after irradiation at room temperature. Optical microscopic results indicate that cracks appear at the surface of SiO₂ after electron beam irradiation, owing to the thermal effect, and that the crack density and size increase with increasing radiation dose. The morphology of the surface cracks is analyzed by using atomic force microscope and the width of crack is about 1 μm. In addition, there are a large number of debris particles with sizes of 0.1–1 μm on the surface. From the optical absorption spectrum of each of all samples, a weak absorption peak at 394 nm is observed and the absorbance increases at the beginning then decreases with increasing electron-radiation dose. Before and after irradiation, three absorption bands at 460 nm, 496 nm and 520 nm are clearly observed and their intensities first increase and then decrease, which is consistent with the results of absorption spectra. The effect of electron dose on the laser induced damage threshold (LIDT) at 355 nm is investigated and the results indicate that the LIDT decreases with increasing dose. At the lower electron doses, the color centers are responsible for the decrease of LIDT. However, at the higher electron doses, the decrease of LIDT is due to the light modulation and absorption induced by microscale cracks and debris particles at the surface of irradiated fused silica.

Keywords: fused silica, electron beam irradiation, color center, laser induced damage threshold

PACS: 61.80.Fe, 61.43.Fs, 61.72.jn

DOI: 10.7498/aps.63.246103

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178018) and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. ZYGX2012J057).

† Corresponding author. E-mail: xiangxia@uestc.edu.cn