

# 不同粒径 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C 晶态粉体热释光和光释光特性\*

胡克艳<sup>1)2)</sup> 李红军<sup>2)</sup> 徐军<sup>2)†</sup> 杨秋红<sup>1)</sup> 苏良碧<sup>2)</sup> 唐强<sup>3)</sup>

1) (上海大学电子信息材料系, 上海 201800)

2) (中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201800)

3) (中山大学物理系, 广州 510275)

(2011年10月12日收到; 2012年1月8日收到修改稿)

本文探讨了  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C 晶态粉体的辐照剂量效应, 使用 RisøTL/OSL-DA-15 型热释光和光释光仪研究其热释光和光释光特性, 结果发现, 相同粒径的  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C 晶态粉体具有单一热释光峰, 且随着辐照剂量的增加热释光强度不断增加, 但热释光峰位置保持不变, 符合一级动力学模型; 而在相同的辐照剂量和测试条件下, 随着  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C 晶态粉体粒径的减小, 其热释光强度先增强后减弱, 热释光峰却逐渐增加至趋于稳定, 表明粒度为 40—60  $\mu\text{m}$  的  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C 晶态粉体具有最佳的热释光效应. 同时  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C 晶态粉体的光释光特性的研究发现, 其光释光曲线具有典型的指数衰减特征, 粒径对其光释光强度和衰减速率的影响符合浅电子陷阱能级理论.

**关键词:**  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C 晶态粉体, 粒径, 热释光, 光释光

**PACS:** 78.60.K, 76.30.M

## 1 引言

材料在受到电离辐射后, 其材料内部缺陷或者缺陷复合体以某种方式记录下所受辐照剂量, 当在外界通过适当的温度或者光照等条件激活后, 能确定出其原来所受辐照剂量的大小, 这种具有热释光或光释光效应的材料具有重要的实际应用价值. 20 世纪 50 年代, 美国威斯康星大学的 Daniels 首次将材料的热释光特性用于辐射剂量的测量. 最初使用的 LiF 热释光材料, 虽然具有很高的灵敏度, 但是其热释光性能很不稳定. 而 20 世纪 90 年代, Akselrod 等人<sup>[1]</sup> 以碎粒  $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体为基质材料研制出  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C 单晶, 其热释光灵敏度是 LiF: Mg, Ti 的 40—60 倍, 因此,  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C 成为极具潜质的辐照剂量计材料<sup>[2]</sup>. 近年来  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C 已经

越来越受到人们的关注, 主要是因为  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C 具有相当很强的灵敏性和相对简单的发光曲线和机理, 尤其是 450 K<sup>[3]</sup> 附近的热释光峰的剂量测试性能.

我们知道采用  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C 块体单晶作为辐照剂量计材料具有诸多缺点, 比如, 碳在晶体中难以掺杂均匀, 辐照剂量性能稳定性不足, 蓝宝石基质材料硬度高, 形状不易加工, 片状晶体剂量计自身本底高, 而且容易变形<sup>[4]</sup>, 不利于其产业化发展. 然而如采用粉体作为剂量计材料, 可以有效解决单晶块体作为剂量计的多种难题: 1) 制备方面, 粉体具有更加多种和灵活的制备方法; 2) 性能方面, 粉体具有退火处理透彻, 灵敏度高, 碳(氧空位)分布更加均匀等特点, 其使用重复性能好, 剂量学性能稳定; 3) 加工方面, 粉体更是可以灵活加工成各种器件, 比如薄膜剂量计, 复杂几何形状剂量计等. 如

\* 上海市科学技术委员会 (批准号: 10ZR1434200), 国家自然科学基金 (批准号: 61177037, 10505033) 和中山大学高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2010300003161457) 资助的课题.

† E-mail: xujun@mail.shcnc.ac.cn

石英粉体剂量计材料; LiF(Mg, Cu, P) 热释光粉末材料等。

本文研究了  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的辐照剂量效应, 针对不同粒径  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的热释光和光释光特性作出了全面的研究与讨论, 为  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体作为剂量计材料的应用提供了一定的理论和实验参考。

## 2 实验方法

### 2.1 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ 单晶的制备

本实验  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  单晶由中科院上海硅酸盐研究所人工晶体中心的温度梯度法技术生长,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶体生长以高纯  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (99.999%) 和石墨粉 (99.99%) 为原料。将 5000 ppm 石墨粉掺入一定量的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  粉体中, 在行星球磨机上混合研磨 24 h, 取出后在 250 MPa 下冷干压成型。将  $r$  [01  $\bar{1}2$ ] 方向优质白宝石籽晶置于锥形钼坩埚底部籽晶槽内, 掺碳  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  压块装入坩埚内, 调整坩埚、发热体和保温筒三者之间的距离, 保证坩埚、发热体和保温筒的中心重合。坩埚处于垂直位置, 在高温生长过程中不能倾斜, 以免与石墨发热体接触导致钼坩埚熔化, 发热体和保温筒应保持一定距离, 以免接触后导致保温筒打火。在保温筒上加盖钼片, 封闭炉体, 将炉内真空抽至  $1 \times 10^{-3}$  Pa 以上, 待炉内气压平衡后, 持续升温到 2350 K, 将原料全部熔化, 恒温 1—2 h。待温场稳定后, 以 3 K/h 的速率开始降温, 即进行晶体生长, 固-液界面从籽晶部位自下向上缓慢推进, 直至全部熔体结晶完毕。待温度降至室温, 从坩埚中取出晶体。

### 2.2 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ 晶态粉体的制备

本文研究的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体是由所生长的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  单晶破碎和研磨后采用筛分技术制备的。将温梯法制备的完整  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  单晶经切割, 粗碎至尺寸为  $\phi 2$  mm 颗粒, 再采用氧化铝研钵细磨至 100  $\mu\text{m}$  以下, 筛选为 20—40  $\mu\text{m}$ , 40—60  $\mu\text{m}$ , 60—80  $\mu\text{m}$  三种不同粒度的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体, 采用 BT-9300ST 型号的激光粒度分析仪器对三种粉体做了相应的粒度分布测试, 其测试结果如图 1(a) 所示, 采用 D/max 2550 V 型号的 X 射线衍射仪对粉体做 X 射线衍射物相分析, 其结果如

图 1(b) 所示。测试结果可见,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  粉体其粒度分布相对均匀, 其中位径 ( $d_{50}$ ) 分别为 31.525  $\mu\text{m}$ , 51.248  $\mu\text{m}$  和 69.857  $\mu\text{m}$ , 且经研磨后的粉体保持良好的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  晶态。

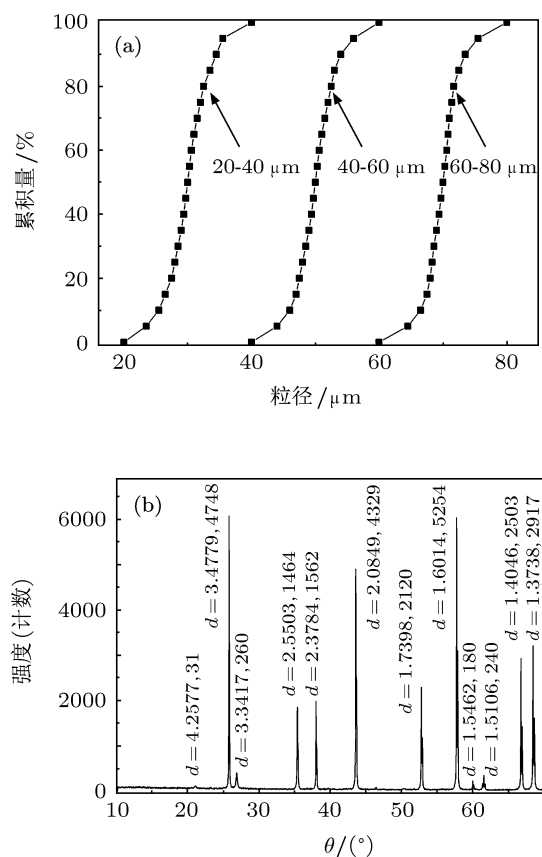


图 1 (a)  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的粒径分布; (b) 粉体 XRD 谱

### 2.3 热释光和光释光性能测试

$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的热释光和光释光特性采用丹麦进口的 Risø TL/OSL-DA-15 型热释光和光释光仪测量, 辐射源为仪器自带的  $^{90}\text{Sr}\beta$  射线, 样品辐照一定剂量后, 立刻以 2 K/s 的升温速率加热至 780 K<sup>[5]</sup>, 用 U340 型滤光片和光电倍增管获得热释光信号。样品辐照后使用蓝色发光二极管阵列波长  $470 \pm 30$  nm 光激发样品, 得到光释光衰减曲线。Risø TL/OSL-DA-15 样品盘一次可以放置 48 个样品, 样品的退火温度及时间、辐照剂量、冷却时间、升温速率、激发光源、TL 和 OSL 测试可以通过编制程序来完成, 全部过程完全实现自动化控制。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ 晶态粉体的热释光特性

##### 3.1.1 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ 晶态粉体热释光曲线和动力学特性

图 2 是粒径为 60—80  $\mu\text{m}$  ( $d_{50} = 69.857 \mu\text{m}$ ) 的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体热释光曲线, 在 2 K/s 加热速率下, 可以发现: 不同剂量的  $^{90}\text{Sr}\beta$  射线辐照下, 粉体具有单一的热释光峰, 其热释光发射特征峰均位于 491 K. 相比  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  单晶的热释光峰 450 K<sup>[3]</sup>,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的热释光峰温偏高, 其原因下节将作进一步讨论; 同时,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的热释光强度随着  $^{90}\text{Sr}\beta$  射线辐照剂量的增加而逐渐增强.

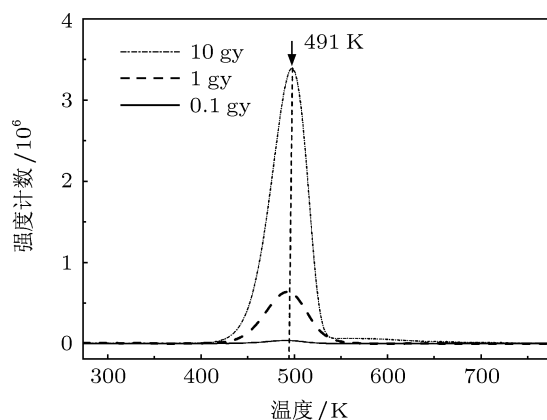


图 2 60—80 $\mu\text{m}$  粒径  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体在不同辐照剂量下热释光特征 (2 K/s 加热速率)

热释光动力学理论得到的形状因子可表示为<sup>[6]</sup>

$$\mu_g = (T_2 - T_m)/(T_2 - T_1). \quad (1)$$

其中  $T_m$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  分别为热释光特征峰温和半峰高对应的低温和高温. 若  $\mu_g = 0.42$  则该热释光峰为一级动力学峰, 若  $\mu_g = 0.52$ , 则该热释光峰为二级动力学峰. 在低剂量辐照下, 一级动力学发光峰温不随辐照剂量的改变而改变, 二级动力学发光峰温却对辐照剂量有依赖关系. 根据 (1) 式计算可得  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体在不同辐照剂量下的热释光形状因子, 如表 1 所示, 形状因子大致为 0.42, 表明  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体热释光为一级动力学峰, 其热释光峰温不随辐照剂量改变而改变, 与  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  单

晶一致.

表 1 60—80 $\mu\text{m}$  粒径  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体在不同辐照剂量下热释光曲线的  $T_1$ ,  $T_2$  和  $\mu_g$  值

辐照剂量 /Gy	$T_1$ /K	$T_2$ /K	$\mu_g$
0.1	459.7	513.2	0.415
1.0	456.7	516.7	0.428
10	458.7	515.6	0.432

##### 3.1.2 不同粒径 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ 晶态粉体热释光性能特征

为了研究不同粒径  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的热释光特性, 我们设计了三种不同大小粒度分布均匀的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体: 分别为 20—40  $\mu\text{m}$ , 40—60  $\mu\text{m}$ , 60—80  $\mu\text{m}$  三种规格, 其中位径 ( $d_{50}$ ) 分别为 31.525  $\mu\text{m}$ , 51.248  $\mu\text{m}$  和 69.857  $\mu\text{m}$ . 在相同条件下, 实验采用 10 Gy  $^{90}\text{Sr}\beta$  射线辐照剂量分别对三种试样辐照处理, 以 2 K/s 加热速率测得各个样品的热释光曲线, 如图 3(a). 很明显发现, 随着  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体粒径的改变, 其热释光强度和热释光峰温均发生变化.

根据图 3(a) 热释光曲线的对比, 可以得出以下规律 (如图 3(b)): 在稳定的 10 Gy  $^{90}\text{Sr}\beta$  射线辐照剂量和 2 K/s 加热速率下, 随着  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体粒度的减小, 热释光强度先增加后急剧下降, 当中位径为 51.248  $\mu\text{m}$  (40—60  $\mu\text{m}$ ) 时,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体具有最高的热释光强度, 而当 中位径  $d_{50} = 31.525 \mu\text{m}$  (20—40  $\mu\text{m}$ ) 的晶态粉体其热释光强度均急剧下降. 相同辐照条件下,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的热释光强度跟各种因数相关, 比如  $\beta$  射线在  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  中的穿透能力、晶态粉体的表面积大小、晶态粉体表面同时对  $\beta$  射线的散射能力. 由于  $\beta$  射线的穿透能力很强, 其在粒径小于 80  $\mu\text{m}$  的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体中均可以穿透, 而粉体粒径越小其表面积越大, 接受到的  $\beta$  射线辐照越多, 其热释光强度越强. 故粒径为 40—60  $\mu\text{m}$  ( $d_{50} = 51.248 \mu\text{m}$ ) 的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体热释光强度比 60—80  $\mu\text{m}$  ( $d_{50} = 69.857 \mu\text{m}$ ) 更强. 但同时一个因素不能忽略, 粒径越小表面积越大其对  $\beta$  射线的散射也越大, 这是一个相互牵制的内在关联, 故不是粒径越小热释光强度越强. 综合我们可以得出,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体作为辐照剂量材料最佳的颗粒度应选择粒径为 40—60  $\mu\text{m}$  ( $d_{50} = 51.248 \mu\text{m}$ )

的粉体.

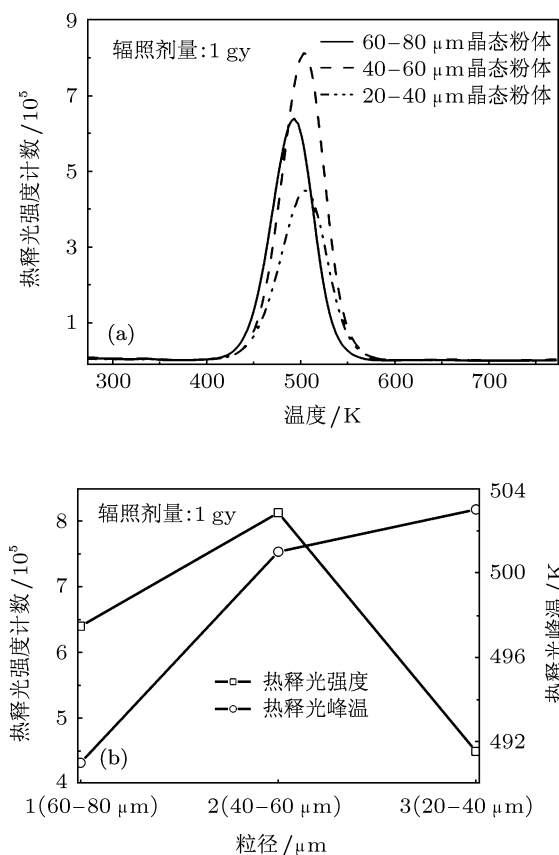


图3 不同粒径  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体在相同辐照剂量下热释光特征 (2 K/s 加热速率) (a) 不同粒径  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体热释光曲线的对比; (b) 不同粒径热释光变化特征

同时我们可以发现, 在稳定的 10 Gy  $^{90}\text{Sr}\beta$  射线辐照剂量和 2K/s 加热速率下,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的热释光峰温随粉体粒径的减少而不断提高, 由  $d_{50} = 69.857 \mu\text{m}$  (60—80  $\mu\text{m}$ ) 粒径峰温的 491 K 一直上升到  $d_{50} = 31.525 \mu\text{m}$  (20—40  $\mu\text{m}$ ) 峰温的 503 K, 之后趋于稳定.  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的粒径对热释光峰温的影响, 其原因可能是粒径大小与  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体热释光发光机理相关联, 根据深电子陷阱机理 [7-9],  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体在 491 K 附近的发光峰并不是单一电子陷阱能级所致, 而是一个多级陷阱能级重叠的复合峰, 只是低温 (主剂量) 热释光峰的陷阱能级起决定作用 [10]. 随着晶态粉体粒径的减小, 深电子陷阱被热激发出电荷与复合中心发光的概率逐渐提高, 导致热释光峰温的统计提高, 直至趋于稳定. 上节中  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  单晶的热释光峰温为 450 K, 相比较  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的热释光峰温, 其峰值最低, 符合这里的深

电子陷阱机理与  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体粒径的关系.

### 3.2 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ 晶态粉体的光释光特性

#### 3.2.1 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ 晶态粉体光释光衰减曲线特征

图4是中位径为 51.248  $\mu\text{m}$  (40—60  $\mu\text{m}$ ) 的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体和  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  单晶在辐照剂量为 10 Gy 下恒定光源连续激发的光释光衰减曲线 (CW-OSL), 激发光源为 Risø TL/OSL-DA-15 自带的蓝色发光二极管阵列, 激发波长为  $470 \pm 30 \text{ nm}$ , 辐射源为  $^{90}\text{Sr}\beta$  射线. 图4可以看出,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体光释光衰减曲线同样呈现典型的指数衰减特征, 具有良好的光释光强度效应, 曲线由快速衰减和慢速衰减两部分组成.

根据恒定光源激发的光释光简化模型,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体光释光强度可以表示为 [11,12]

$$I_{\text{OSL}} = I_1 \exp[-t/\sigma_1] + I_2 \exp[-t/\sigma_2], \quad (2)$$

其中,  $I_{\text{OSL}}$  为光释光的总强度,  $I_1, I_2$  分别为快速衰减和慢速衰减部分的起始强度,  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  分别为快衰和慢衰部分的衰减常数, 运用 (2) 式对光释光衰减曲线进行拟合, 得到粒度为 40—60  $\mu\text{m}$  ( $d_{50} = 51.248 \mu\text{m}$ ) 的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体快衰减和慢衰减常数  $\sigma_1 = 4.63 \text{ s}$  和  $\sigma_2 = 13.93 \text{ s}$ . 相比于相同条件下  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  单晶的快衰和慢衰常数的  $\sigma_1 = 4.68 \text{ s}$  和  $\sigma_2 = 24.13 \text{ s}$  [13].  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体其快衰速率几乎保持不变, 但是其慢衰速率却显著加快. 其原因将在下节得以补充.

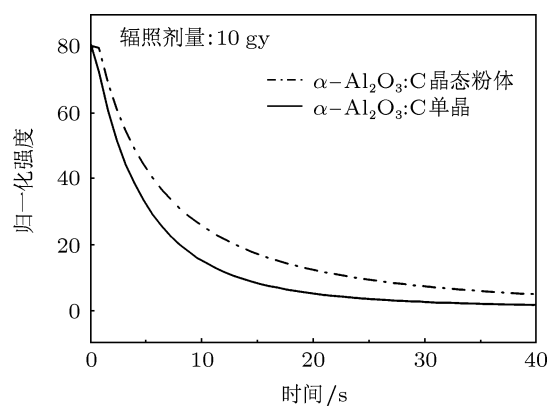


图4 40—60  $\mu\text{m}$  ( $d_{50} = 51.248 \mu\text{m}$ ) 粒径  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体和  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  单晶在相同辐照剂量下光释光衰减特征 (CW-OSL)

### 3.2.2 不同粒径的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ 晶态粉体光释光衰减特征

实验均采用辐照剂量为 10 Gy 的  $^{90}\text{Sr}\beta$  射线, 激发光源为自带的蓝色发光二极管阵列, 激发波长为  $470 \pm 30 \text{ nm}$ , 在相同条件下, 分别测试粒径为  $20\text{--}40 \mu\text{m}$  ( $d_{50} = 31.525 \mu\text{m}$ ),  $40\text{--}60 \mu\text{m}$  ( $d_{50} = 51.248 \mu\text{m}$ ),  $60\text{--}80 \mu\text{m}$  ( $d_{50} = 69.857 \mu\text{m}$ ) 三种粒径  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的光释光衰减特性, 测试结果如图 5 所示. 可见在相同辐照剂量和激发测试条件下, 三种粒度的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体衰减曲线均表现出典型的指数衰减特征, 但随着粒径的改变, 其快衰和慢衰部分的起始强度, 以及衰减常数均发生改变.

不同粒度  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体在相同的辐照和测试条件下, 运用 (2) 式对光释光衰减曲线进行拟合, 得到各衰减曲线的快衰和慢衰部分的衰减常数列于表 2, 从表 2 可以发现, 随着  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体粒径的减少, 其光释光曲线快衰部分衰减速率变化不大, 但是其慢衰部分的衰减速率却不断加快.

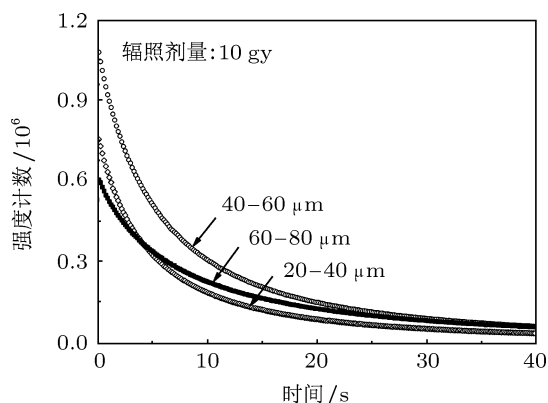


图 5 不同粒径  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体在相同辐照剂量下光释光衰减特征 (CW-OSL)

表 2 不同粒径  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体在相同辐照条件下光释光快衰和慢衰起始强度和速率值

粒度 / $\mu\text{m}$	$I_1$	$I_2$	$\sigma_1/\text{s}$	$\sigma_2/\text{s}$
60—80	420963	309516	4.44	17.57
40—60	558965	475728	4.63	13.93
20—40	302838	269486	4.44	12.73

根据  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  热释光和光释光机理<sup>[14]</sup>,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体接受  $^{90}\text{Sr}\beta$  射线辐照时其内部电离出电子 - 空穴对, 其中电子被激发到导带, 既可以被主剂量陷阱俘获而记录下辐照剂量, 也可能被  $\text{F}^+$  色心俘获而使其变成激发的  $\text{F}$  色心, 释放部分光波. 同时  $\beta$  射线辐照电离出的空穴被  $\text{F}$  色心俘获, 致使  $\text{F}$  色心变成  $\text{F}^+$  色心. 伴随着样品在  $470 \text{ nm}$  蓝光激发下, 电子从主剂量陷阱中释放, 主要与  $\text{F}^+$  色心复合得到激发态的  $\text{F}$  色心, 激发态  $\text{F}$  色心发射出  $420 \text{ nm}$  附近的荧光, 主要决定着光释光快衰部分<sup>[15]</sup>, 故光释光衰减曲线的快衰速率主要与  $\text{F}$  色心的荧光寿命有关, 对温度变化很敏感, 故不同粒径的光释光快衰速率变化不大. 根据浅陷阱能级理论<sup>[16]</sup>, 样品在  $470 \text{ nm}$  蓝光激发下, 从主剂量陷阱中释放的电子, 一部分被浅陷阱能级俘获, 然后以较慢的速率释放与复合中心发光, 主要决定着光释光慢衰部分, 故慢衰速率主要与浅能级中俘获的电子浓度相关. 而光释光衰减曲线的慢衰部分主要与导带附近的两个浅能级有关, 其陷阱深度分别为  $0.65 \text{ eV}$  和  $0.77 \text{ eV}$ <sup>[16]</sup>. 随着粒径的减小,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的表面积不断增大,  $470 \text{ nm}$  蓝光激发到导带的电子被浅陷阱能级俘获概率提高, 导致浅陷阱能级电子浓度提高, 所以慢衰速率不断加快. 上节中  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  单晶慢衰速率为  $\sigma_2=24.13\text{s}$ , 相比较  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的慢衰速率, 其衰减速率最慢, 符合这里的浅陷阱能级理论与晶态粉体粒径的关系.

同时, 表 2 发现:  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体光释光快速衰减和慢速衰减部分的起始强度与粒径相关, 在相同的  $\beta$  辐照和蓝光激发条件下, 随着粒径的减小, 其  $I_1, I_2$  强度变化规律均是先增后减, 这与在相同条件下的热释光强度与粒径大小变化规律相同. 其实,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的热释光和光释光是两个联系非常紧密的过程. 两个过程均是在先接受  $^{90}\text{Sr}\beta$  射线辐照时其内部电离出电子 - 空穴对, 电子主要被主剂量陷阱捕获记录下辐照剂量. 热释光和光释光的不同只是在于主剂量陷阱中电子被不同形式的能量激发到  $\text{F}^+$  色心复合而发射出  $420 \text{ nm}$  附近的荧光, 热释光是通过加热激发, 而光释光则是蓝光激发, 在本质上具有相同性, 所以这里的  $I_1, I_2$  强度变化规律跟热释光强度随着粒径

大小变化规律是相同的.

## 4 结论

本文研究了  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体的辐照剂量学性能, 采用温梯法生长的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  单晶经过研磨后的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体, 具有单一热释光峰, 这是在剂量学应用上的一大优点.  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体在自带 0.1—10 Gy 剂量的  $\beta$  射线辐照下, 热释光曲线符合一级动力学模型, 光释光曲线具有

典型的指数衰减特征. 不同粒径的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体热释光和光释光性能研究表明, 粒径对其热释光强度和热释光峰温的影响符合多陷阱能级复合峰理论, 粒径对其光释光强度和衰减速率的影响符合浅电子陷阱能级理论. 研究得出粒径为 40—60  $\mu\text{m}$  ( $d_{50} = 51.248 \mu\text{m}$ ) 的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体具有最佳的辐照剂量学效应, 为  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  晶态粉体作为剂量计材料的应用提供了实验依据, 同时为  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$  辐照剂量计材料的应用开辟了一条新的路径.

- 
- [1] Akselrod M S, Kortov V S, Kravetsky D J, Gotlib V I 1990 *Radiat. Prot. Dosim.* **32** 15
- [2] Akselrod M S, Kortov V S, Gorelova E A 1993 *Radiat. Prot. Dosim.* **47** 159
- [3] Akselrod, M S, Kortov, V S, Kravetsky, D J, Gotlib, V I 1990 *Radiat. Prot. Dosim.* **33** 119
- [4] Li B T, Shi E W, Li S F 2004 *Chin. J. Radiol Health* **13** 219 (in Chinese) [李宝廷, 石二为, 李顺福 2004 中国辐射卫生 **13** 219]
- [5] Yang X B, Xu J, Li H B, Bi Q Y, Su L B, Cheng Y, Tang Q 2010 *Chin. Phys. B* **19** 047803
- [6] McKeever S W S 1985 *Thermoluminescence of Solids* (Cambridge: Cambridge University Press) p13
- [7] Walker F D, Colyott L E, AgersnapLarsen N, McKeever S W S 1996 *Radiat. Meas.* **26** 711
- [8] AgersnapLarsen N B, Htter-Jensen L, McKeever S W S 1999 *Radiat. Prot. Dosim.* **84** 87
- [9] Whitley V H, McKeever S W S 2002 *Radiat. Prot. Dosim.* **100** 61
- [10] Yukihara E G, Whitley V H, McKeever S W S, Akselrod A E, Akselrod M S 2004 *Radiat. Meas.* **38** 317
- [11] Zhang C X, Lin L B, Leung P L, Tang Q 2004 *Acta. Phys. Sin.* **53** 291 (in Chinese) [张纯祥, 林理彬, 梁宝鏊, 唐强 2004 物理学报 **35** 291]
- [12] Tang Q, Zhang C X, Leung P L, Li M, Luo D L 2005 *Acta. Phys. Sin.* **54** 64 (in Chinese) [唐强, 张纯祥, 梁宝鏊, 李德卉, 罗达玲 2005 物理学报 **54** 64]
- [13] Yang X B, Li H B, Xu J, Cheng Y, Su L B, Tang Q 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 7900 (in Chinese) [杨新波, 李红军, 徐军, 程艳, 苏良碧, 唐强 2008 物理学报 **57** 7900]
- [14] Springis M, Kulis P, Veispals A, Tale I 1995 *Radiat. Meas.* **24** 453
- [15] Summers G P 1984 *Radiat. Prot. Dosim.* **8** 69
- [16] Markey B G, Colyott L E, McKeever S W S 1995 *Radiat. Meas.* **24** 457

# Thermoluminescence and optically stimulated luminescence characteristics of $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C crystal powder of different particle size\*

Hu Ke-Yan<sup>1)2)</sup> Li Hong-Jun<sup>2)</sup> Xu Jun<sup>2)†</sup> Yang Qiu-Hong<sup>1)</sup>  
Su Liang-Bi<sup>2)</sup> Tang Qiang<sup>3)</sup>

1) (*Department of Electronic Information Materials, Shanghai University, Shanghai 201800, China*)

2) (*Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

3) (*Department of Physics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China*)

(Received 12 October 2011; revised manuscript received 8 January 2012)

## Abstract

In this work, we first report on the radiation dose effect of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C crystal powder. The thermoluminescence(TL) and optically stimulated luminescence (OSL) of the powder are investigated by RisøTL/OSL-DA-15. The as-grown  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C crystal powder of same particle size shows a single TL peak and the TL intensity increases as irradiation dose increases, but no shift of the position of the TL peak is found, which is consistent with first-order recombination kinetics. And in the same radiation dose and test conditions, with the particle size of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C crystal powder decreasing, the TL intensity decreases after first increase and then the TL peak is gradually increases and approaches to a stable value, which shows that the  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C crystal powder, 40—60  $\mu$ m in diameter, has the best TL effect. The OSL decay curve of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C crystal powder shows the typical exponential decay characteristics, and the relationship between OSL intensity and decay rate with the particle size of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C crystal powder is found to be consistent with the shallow-electronic-trap theory.

**Keywords:**  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C crystal powder, particle size, thermoluminescence, optically stimulated luminescence

**PACS:** 78.60.K, 76.30.M

\* Project supported by the Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (Grant No. 10ZR1434200), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61177037, 10505033), and the Basic Scientific Research and Business Special Funds of Sun Yat-Sen University(Grant No. 2010300003161457).

† E-mail: xujun@mail.shenc.ac.cn