

高低温条件下氟化锂材料的离子激发发光光谱分析

仇猛淋 王广甫 褚莹洁 郑力 胥密 殷鹏

Ion beam induced luminescence spectra of lithium fluoride at high- and low-temperature

Qiu Meng-Lin Wang Guang-Fu Chu Ying-Jie Zheng Li Xu Mi Yin Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 207801 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.207801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.207801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I20>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单晶六方 SiC 和多晶化学气相沉积 SiC 的常温辐照肿胀差异性

Comparative study of irradiation swelling in monocrystalline and polycrystalline silicon carbide

物理学报.2017, 66(6): 066104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.066104>

点缺陷浓度对非化学计量比  $L_{12}$  型结构的  $A_{13}Sc$  弹性性能的影响

Effects of point defect concentrations on elastic properties of off-stoichiometric  $L_{12}$ -type  $A_{13}Sc$

物理学报.2016, 65(7): 076101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.076101>

基于蒙特卡洛和器件仿真的单粒子翻转计算方法

Calculation of single event upset based on Monte Carlo and device simulations

物理学报.2014, 63(19): 196102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.196102>

离子束刻蚀碲镉汞晶体的电学特性研究

Study on electrical properties of ion-beam-etched HgCdTe crystal

物理学报.2015, 64(11): 116102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.116102>

辐照下背栅偏置对部分耗尽型绝缘层上硅器件背栅效应影响及机理分析

Back-gate bias effect on partially depleted SOI/MOS back-gate performances under radiation condition

物理学报.2012, 61(20): 206102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.206102>

# 高低温条件下氟化锂材料的离子 激发发光光谱分析

仇猛淋<sup>1)</sup> 王广甫<sup>1)2)†</sup> 褚莹洁<sup>1)</sup> 郑力<sup>1)</sup> 胥密<sup>1)</sup> 殷鹏<sup>1)</sup><sup>1)</sup>(北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875)<sup>2)</sup>(北京市辐射中心, 北京 100875)

(2017年4月21日收到; 2017年7月2日收到修改稿)

在北京师范大学 GIC4117 串列加速器原有离子激发发光 (ion beam induced luminescence, IBIL) 分析靶室基础上, 安装了可实现 80—900 K 温度范围内精确控温的冷热样品台, 实现高低温条件下 IBIL 光谱的测量. 添加金硅面垒探测器, 在离子辐照材料样品过程中同步采集背散射离子的计数, 实现束流的在线监测. 在不同温度下, 利用 2 MeV  $H^+$  束轰击氟化锂样品, 获得的 IBIL 光谱中可明显观察到温度对不同发光中心发光效果的影响: 激子峰和杂质峰发光在低温条件下更为清晰; 高温时各类型 F 色心的发光强度在较小的注量下即可达到饱和值或开始衰减. 辐照初期受扰激子峰 (296 nm) 发光强度的上升过程表明不能排除受扰激子峰与点缺陷发光中心相关的可能性, 激子峰强度的上升源自低注量时核弹性碰撞产生的应变键; 温度对空位迁徙速率及非辐射复合的影响是造成发光强度随注量演变差异的重要原因.

**关键词:** 离子激发发光, 高低温, 氟化锂**PACS:** 78.60.Hk, 61.80.Jh, 61.72.J-**DOI:** 10.7498/aps.66.207801

## 1 引言

离子辐照绝缘体或者半导体材料过程中, 材料中靶原子的外层电子激发跃迁释放出光子, 这一现象称为离子激发发光 (ion beam induced luminescence, IBIL)<sup>[1]</sup>, 释放出的光子携带了材料中缺陷或者杂质的相关原位信息. 由于是在离子辐照的同时采集发光光谱, IBIL 光谱还可给出材料在辐照过程中相关发光中心随离子注量的实时演变情况, 因而在材料辐照损伤<sup>[2]</sup>、地质样品鉴定<sup>[3]</sup>及人工合成材料等<sup>[4,5]</sup>领域得到广泛应用. 但目前国际上的 IBIL 分析多为常温下的测量<sup>[6,7]</sup>, 而样品温度对辐照产生的空位迁徙、激子的状态以及非辐射复合 (电子跃迁过程中以发射声子等其他形式释放能量, 不释放光子) 占比等影响十分明显, 因此温度因素

是 IBIL 光谱分析中需要考虑的一个重要因素.

由于在热释光剂量测定<sup>[8,9]</sup>以及固态激光器<sup>[10]</sup>方面的应用, 氟化锂材料在多种辐照条件下形成的各缺陷发光中心得到了广泛研究<sup>[11–15]</sup>. 紫外波段为激子峰 (其中 296 nm 为受扰激子峰, 可能受不稳定的杂质或缺陷中心影响), 400 nm 左右为杂质峰; 540, 670, 880 nm 处谱峰均为 F 型色心 (F 型色心指阴离子空位及其聚集体, 可俘获不同数量的电子从而呈现不同的电性), 其中 540 nm 处肩峰对应的发光中心为  $F_3^+$  色心, 670 nm 处的发光峰对应  $F_2$  色心, 880 nm 处谱峰则来自  $F_3^-$  和  $F_2^+$  色心发光峰的重叠. 但到目前为止, 紫外波段激子峰的起源还有待进一步确认, 近红外波段 (880 nm 处) 发光中心随离子注量的演变研究也刚刚起步<sup>[6]</sup>, 不同温度条件下各发光中心随离子注量的演变情况更鲜见报道<sup>[15]</sup>.

† 通信作者. E-mail: 88088@bnu.edu.cn

在此背景下, 本文介绍了在北京师范大学串联加速器实验室新建高低温 IBIL 分析靶室上开展的高低温条件下氟化锂材料的 IBIL 光谱测量及其分析.

## 2 实验装置

北京师范大学 GIC4117  $2 \times 1.7$  MV 串联加速器原有 IBIL 分析系统可实现常温下的 IBIL 光谱测量<sup>[16]</sup>, 材料在辐照过程中产生的光子经由光纤通管和光纤进入光谱仪(型号 QE-PRO, 可探测波长范围为 200—1000 nm, 最小积分时间可设定为 8 ms), 由计算机进行光谱采集. 在此基础上, 我们进行了改造工作. 为实现不同温度下的 IBIL 测量, 将原有真空靶室内的样品架改为定制的冷热样品台, 冷热样品台由美国 Instec 公司定制, 可在 80—900 K 温度范围内精确控温, 通常状况下温度波动范围为  $\pm 1$  K.

原有 IBIL 分析系统中, 离子束通过样品架之间的空位到达样品架后方的法拉第筒中进行束流测量. 安装冷热样品台后, 离子束无法穿透样品台到达原有法拉第筒. 为此, 在离子束到达样品台前的路径上新建法拉第筒, 由靶室上方气缸控制位置高度, 测量束流时将法拉第筒放下拦阻离子束, 进行 IBIL 光谱测量时将法拉第筒收起; 在新建法拉第筒前端添加负压抑制板, 抑制离子束轰击法拉第筒时逸出的二次电子, 提升束流测量的准确度, 如图 1 所示.

在 IBIL 分析中, 由于发光强度与束流成正比, 束流的波动对发光强度的影响十分明显, 并对辐照注量的准确度产生影响. 但由于 IBIL 分析的样品多为绝缘体材料, 难以直接进行束流积分测量. 考虑到背散射离子产额同样与束流成正比, 在 IBIL 靶室内添加了背散射离子采集系统, 进行 IBIL 光谱测量过程中束流波动的监测. 如图 1 所示, 在散射角  $157.5^\circ$ 、距离样品表面 8 cm 处安装了金硅面垒探测器, 测量时信号经由前置放大器和主放大器到达计算机多道系统. 多道分析器选用多度定标 (multi-channel scaler, MCS) 工作模式, 设定与 IBIL 光谱测量相同的积分时间进行背散射离子计数, 从而实现辐照过程中的束流在线监测以及后续数据处理过程中光谱强度及辐照注量的计算.

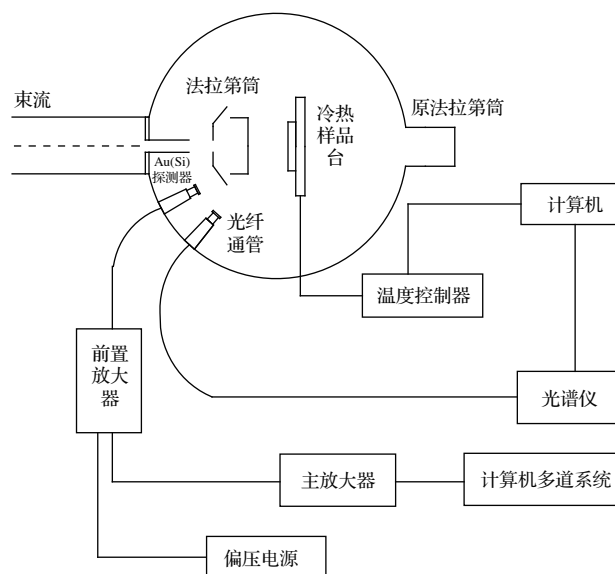


图 1 高低温 IBIL 装置简图

Fig. 1. Schematic of the IBIL experimental setup for high- and low-temperature applications.

## 3 实验结果与讨论

实验样品为购自 MTI 合肥公司的纯氟化锂晶体, 晶向  $\langle 100 \rangle$ , 尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.95 \text{ mm}$ ; 选用 2 MeV  $\text{H}^+$ , 束斑直径为 6.7 mm, 积分时间为 0.5 s, 束流大小 10 nA, 每个样品的辐照注量约为  $5.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ . 分别选定常温 (290 K), 100, 200, 450, 550 K 温度条件进行 IBIL 光谱测量. 图 2 所示为常温时氟化锂 IBIL 光谱随离子注量的演变情况.

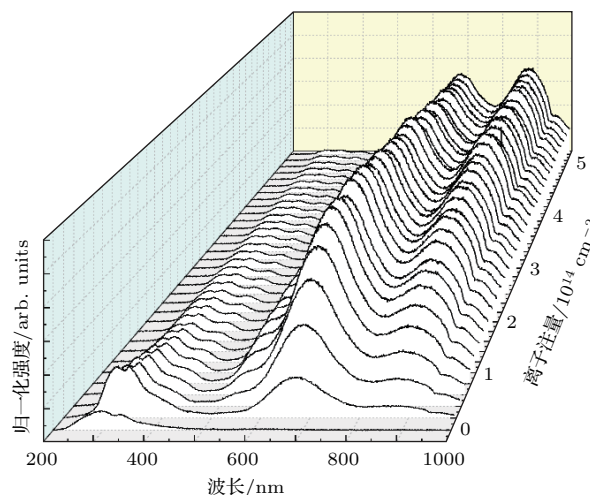


图 2 常温时氟化锂材料的 IBIL 光谱随离子注量的演变情况

Fig. 2. Normalized IBIL spectra of LiF at various fluences at room temperature.

图3所示为离子注量为 $5.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时, 100, 200, 290, 450, 550 K 温度条件下氟化锂材料的IBIL光谱(940 nm处的波谷是由系统误差造成). 可以看出, 相比于常温和高温条件, 紫外波段的激子峰(296和340 nm)和杂质峰(400 nm)在低温时更为明显.  $F_3^+$ 色心(540 nm)和 $F_2$ 色心(670 nm)的峰强度在高温时十分接近, 而在常温和低温下 $F_2$ 色心(670 nm)的峰强度则明显高于 $F_3^+$ 色心(540 nm)的峰强度. 在近红外波段,  $F_3^-$ 和 $F_2^+$ 色心重叠的发光峰(880 nm)则是在常温下峰强度较高, 且高于 $F_2$ 色心(670 nm)的峰强度; 而在低温或者高温时, 近红外波段的峰强度均低于 $F_2$ 色心(670 nm)的峰强度, 且高温下强度更低. 不同温度条件下光谱中各发光中心的相对强度差异将结合发光峰强度随注量的演变情况(图4、图5)进行分析.

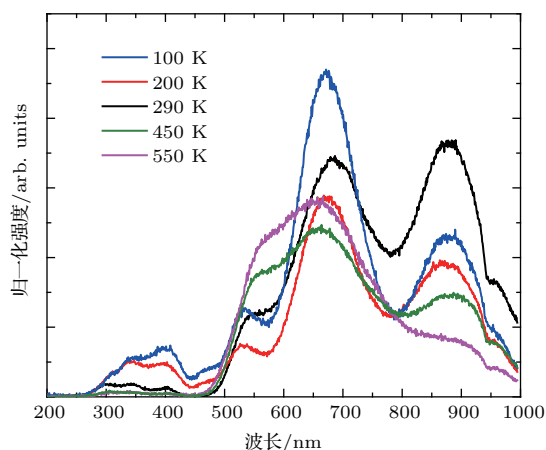


图3 离子注量为 $5.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时 100, 200, 290, 450, 550 K 温度条件下氟化锂材料的IBIL光谱

Fig. 3. Normalized IBIL spectra of LiF at 100, 200, 290, 450, 550 K under ion fluence of  $5.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ .

与其他发光测量方法(光致发光、阴极发光等)相比, IBIL方法的优势之一在于可以显示各发光峰强度随离子注量的实时演变情况<sup>[7]</sup>. 图4和图5分别给出不同温度下各发光峰强度随离子注量的演变情况.

如图4所示, 296 nm处受扰激子峰的强度在100 K时经过一个缓慢上升过程后随着注量保持稳定; 而在200, 290, 450 K时, 在经过非常短暂的上升后随着注量增加逐渐衰减至稳定状态; 在550 K时则是经历一个上升阶段后缓慢下降. 目前296 nm激子峰的来源还不确定, Skuratov等<sup>[12]</sup>利用快重离子和Valotto等<sup>[6]</sup>利用2 MeV  $H^+$ 的实

验结果均显示296 nm处的激子峰强度随注量的增加呈单一下降趋势, 因此认为激子的复合可能位于晶格位置或者靠近杂质离子位置, 而不是点缺陷. 此外, 在实验室利用20 keV  $H^-$ 辐照氟化锂的IBIL光谱研究中, 也没有观测到激子峰的上升过程<sup>[14]</sup>. 但在本研究中296 nm峰强度在辐照初期( $10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 量级)均有一个短暂的上升过程, 这可能是因为Skuratov等<sup>[12]</sup>的实验使用的快重离子具有较高的电离能量密度, 辐照初期短暂的上升过程可能会被随后的衰减过程覆盖; 而Valotto等<sup>[6]</sup>虽然使用的是与本文相同的2 MeV  $H^+$ , 但其束流较大, 离子注量率达到 $1.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 比本文高出2—3个数量级, 因此辐照初期的上升过程可能同样未能捕捉到; 利用20 keV  $H^-$ 辐照氟化锂的IBIL光谱研究中, 由于采用的束流较大(束流1  $\mu\text{A}$ , 注量率为 $1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 因而同样未能捕捉到 $10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 注量附近可能的上升过程. 由于观察

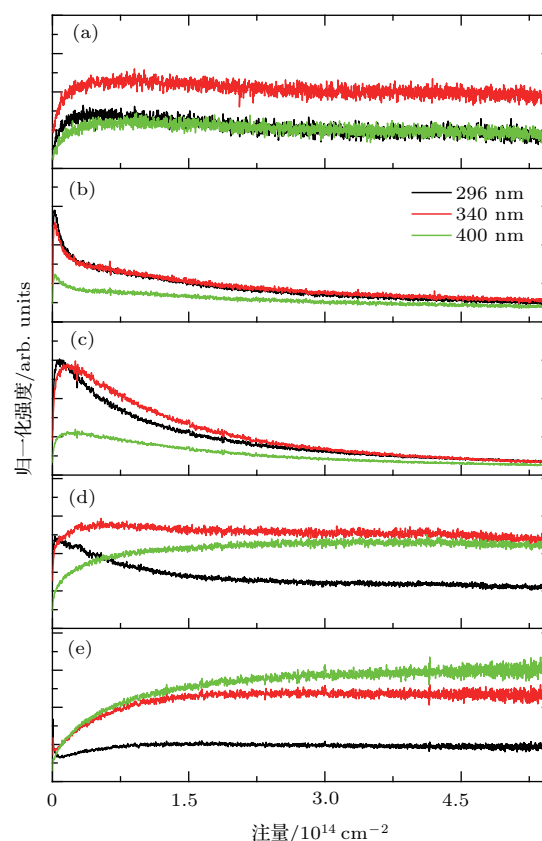


图4 不同温度下296, 340, 400 nm发光峰强度随离子注量的演变情况 (a) 550 K; (b) 450 K; (c) 290 K; (d) 200 K; (e) 100 K

Fig. 4. Evolutions of the luminescence peak intensities at 296, 340, 400 nm with the irradiation fluence at different temperatures: (a) 550 K; (b) 450 K; (c) 290 K; (d) 200 K; (e) 100 K.

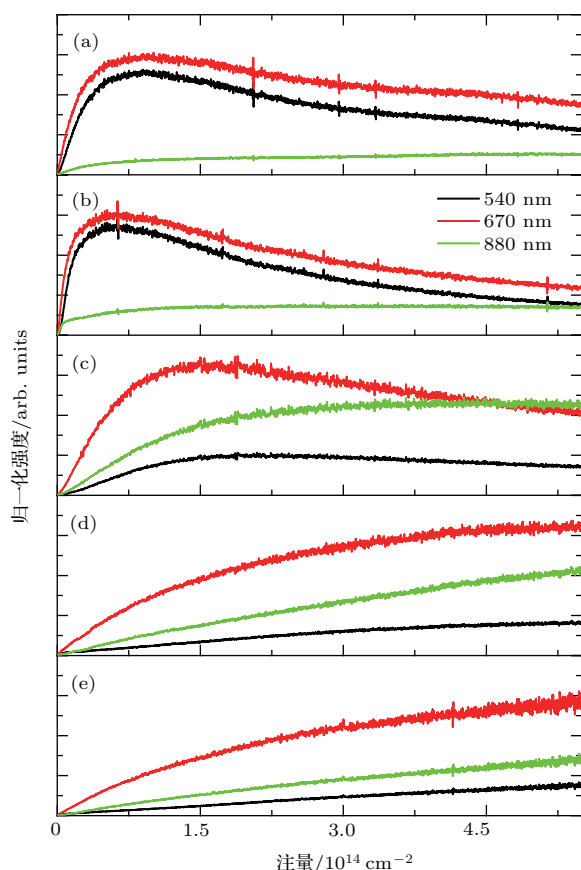


图5 不同温度下 540, 670, 880 nm 发光峰强度随离子注量的演变情况 (a) 550 K; (b) 450 K; (c) 290 K; (d) 200 K; (e) 100 K

Fig. 5. Evolutions of the luminescence peak intensities at 540, 670, 880 nm with the irradiation fluence at different temperatures: (a) 550 K; (b) 450 K; (c) 290 K; (d) 200 K; (e) 100 K.

到 296 nm 受扰激子峰强度在辐照初期的上升过程, 基于其单一下降趋势作出的激子复合与点缺陷无关的判断可能存在问题. 也就是说, 不能排除 296 nm 激子峰与不稳定的点缺陷中心相关的可能性.

340 nm 处的激子峰则为典型的自陷激子峰, 在 100 和 200 K 时其强度均上升至最高值后保持稳定, 其中 100 K 时的上升过程较 200 K 时稍慢; 290 和 450 K 时, 辐照初期峰强度经历一个短暂上升过程后迅速下降, 450 K 时的衰减速率明显更快; 550 K 时激子峰强度则是随离子注量的增加上升至稳定强度.

296 和 340 nm 处激子峰强度在辐照初期的上升过程源自低注量时核弹性碰撞造成的应变键数量的增加, 应变键的存在使得激子的复合概率增加, 在 IBIL 光谱中表现为初期激子峰强度的上升<sup>[7]</sup>. 随着注量的增加, 点缺陷的数量持续增长

并开始扩散和聚集, 引起的晶格结构损伤改变了激子的迁移率和扩散长度, 减小了激子被俘获的概率, 影响复合发光中心的数量, 造成激子峰强度呈现下降趋势<sup>[7,17]</sup>. Jimenez-Rey 等<sup>[18]</sup>将注量在  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  量级时出现的发光强度由上升转变为下降的可能原因归结于离子辐照引起的压实效应 (compaction effect, 也叫作 densification effect), 在  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  注量附近 (变化注量和本文类似) 开始出现独立离子径迹的重合, 晶体结构损伤改变了激子的寿命并使离子键的平均应力减小, 激子被俘获的概率降低, 使得发光强度呈指数减弱. 但通过 SRIM 模拟计算可知, 本文实验使用的 2 MeV  $\text{H}^+$  的电子能损 ( $0.033 \text{ keV/nm}$ ) 并未达到氟化锂的离子径迹形成阈值 ( $4 \text{ keV/nm}$ )<sup>[19]</sup>, 因而实验中激子峰的下降过程是离子束辐照引起的注入层温度升高进而造成的激子分解、非辐射复合机理 (温度较高时能量通过热振动的形式传递给周围环境而不发射光子, 非辐射复合比例的增加使得发光强度降低, 在低温下非辐射复合影响较小) 的竞争以及晶格损伤造成的激子被俘获概率降低等综合因素造成的. 因此图 3 和图 4 中 100, 200, 290, 450 K 时激子峰的相对强度随温度升高而降低, 且在低温时需要更高注量才能开始下降是可以理解的. 550 K 时的演变情况并不相同, 但从图 3 可以看出 550 K 时激子峰已经十分微弱, 可能此时的激子峰发光中心在高温下由于激子受热分解、非辐射复合和晶格恢复等多种湮没和复原机理的综合作用已经达到一个十分微弱的平衡状态.

400 nm 处的峰为杂质峰, 现有的研究结果表明这可能与氧或镁杂质有关. 随着离子注量的增加, 在低温 (100 和 200 K) 时峰强度上升到最大值后保持稳定; 在常温 290 K 和高温 450 K 时, 在经历辐照初期的短暂上升过程后峰强度逐渐下降, 450 K 时的衰减速率明显快于 290 K 时. 550 K 时杂质峰已经十分微弱, 随着注量增加, 峰强度上升至一很小的强度后缓慢下降. 400 nm 处的杂质峰强度在常温和高温条件下随注量增加而发生的下降可能源自离子轰击引起的温度上升以及高温条件时非辐射复合比例的增加.

540 和 670 nm 处对应的发光中心分别为  $\text{F}_3^+$  色心和  $\text{F}_2$  色心, 各温度条件下峰强度随离子注量的演变趋势十分类似. 低温时峰强度在到达  $5.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  注量前一直上升; 常温和高温时

峰强度则是随注量增加先上升至最大值随后逐渐衰减, 其中高温条件下峰强度在较低注量时便开始下降. 880 nm 处的峰是  $F_3^-$  和  $F_2^+$  色心的重叠发光峰, 峰强度在低温时与  $F_3^+$  和  $F_2$  色心相似, 在  $5.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  注量前保持上升趋势; 常温和高温时的峰强度则是随注量增加上升至最大值后保持不变, 其中高温条件下峰强度在较低注量时便达到最大值.

在辐照初期, 随着离子注量的增加, 新的空位不断形成并逐渐迁移、聚集. 通过  $V_a + F_2 \rightarrow F_3^+$  ( $V_a$  代表阴离子空位),  $F_2^+ + F \rightarrow F_3^+$ ,  $F_3^+ + e \rightarrow F_3$ ,  $F_3^+ + 2e \rightarrow F_3^-$  等反应形成各类型 F 色心 ( $F_3^+$ ,  $F_2$ ,  $F_3^-$  和  $F_2^+$  等), 因此发光强度随着注量的增加而增大; 随着离子束的持续轰击, 更高阶的缺陷聚集体 ( $F_n$  心、位错等) 开始形成, 点缺陷对应的发光中心逐渐减少, 使得对应的发光中心数量达到平衡或者减少, 从而表现出 IBIL 光谱中不同峰位的相对强度差异以及发光强度随离子注量增长出现的饱和以及衰弱. 此外, 由于是正离子辐照, 入射的正离子和材料表面逸出的二次电子会发生电荷积累现象, 随着注量的增加, 持续增多的正电荷积累产生的表面电场会影响后续入射离子的能量和方向, 并可能使按照恒定束流计算的注量存在偏大的现象, 因此在之前的工作中利用  $H^-$  辐照来避免这一问题<sup>[14]</sup>. 常温时, 对比 Valotto 等<sup>[6]</sup> 利用  $H^+$  辐照氟化锂的 IBIL 光谱研究, 利用  $H^-$  辐照时 F 型色心在较低注量处达到饱和强度<sup>[14]</sup>, 而本研究中常温时 F 型色心达到饱和强度的注量与利用  $H^-$  辐照时较为接近, 这是由于利用实际入射离子产生的背散射离子计数对注量进行计算, 较 Valotto 等<sup>[6]</sup> 研究中的注量计算更为准确.

低温条件下空位迁徙速率大大减小, 降低了点缺陷的聚集或缺陷间的转化速率, 这是温度影响各 F 型色心的发光强度随注量演变情况的重要原因; 同时低温下热振动的减弱使得非辐射复合的比例大大降低. 高温条件下温度的升高使空位迁徙速率上升, 点缺陷的聚集和缺陷间的转化明显加快, 更容易形成更高阶的 F 型色心, 同时部分色心在特定温度下也存在相互转换的现象 (如 500 K 附近  $F_3$  色心向  $F_4$  色心转换); 但温度过高会产生退火效应, 造成点缺陷的复原, 非辐射复合比例也会增加, 从而导致发光强度的减小<sup>[11,14,15]</sup>. 因此, 相比于低温条件, 高温条件下的发光强度在较低注量时便

达到饱和或开始衰减. 这也可以解释为什么图 3 中  $F_3^+$  色心 (540 nm) 低温时发光强度明显小于  $F_2$  色心 (670 nm), 而高温时  $F_3^+$  色心 (540 nm) 和  $F_2$  色心 (670 nm) 的发光强度已经大致相当; 此外, 高阶  $F_n$  心会产生很强的自吸收效应, 降低  $F_3^+$  色心的荧光强度<sup>[6,11]</sup>, 高温时  $F_n$  心的分解也可能是造成  $F_3^+$  色心 (540 nm) 相对强度增加的原因. 由于 880 nm 处是  $F_3^-$  和  $F_2^+$  色心的重叠发光峰, 不同温度下发光强度的差异可能由于低温下  $F_3^-$  色心和高温下  $F_2^+$  色心对应发光中心减少.

## 4 结 论

本文介绍了可在高低温情况下实现 IBIL 测量的装置的改造工作. 高低温 IBIL 分析系统可以灵敏探测不同温度条件下离子辐照引起的各类型缺陷的发光及其随离子注量的实时演变情况.

不同温度条件下氟化锂材料的 IBIL 光谱结果表明: 不能排除 296 nm 处受扰激子峰与点缺陷发光中心相关的可能性, 激子峰的上升过程源自低注量时核弹性碰撞产生的应变键; 激子峰和杂质峰发光在低温条件下更为清晰; 高温时, 各类型 F 色心发光强度在较小的注量下就能达到饱和值或开始衰减. 各类型 F 色心随离子注量增长的形成或湮没、温度对空位迁徙率和非辐射复合占比的影响、正电荷积累效应和自吸收效应等相关物理机理是造成不同温度下各类型发光中心相对强度及其随注量演变行为差异的原因.

## 参考文献

- [1] Huddle J R, Grant P G, Ludington A R, Foster R L 2007 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **261** 475
- [2] Furumoto K, Tanabe T 2013 *J. Nucl. Mater.* **442** S511
- [3] Lo Giudice A, Re A, Angelici D, Calusi S, Gelli N, Giuntini L, Massi M, Pratesi G 2012 *Anal. Bioanal. Chem.* **404** 277
- [4] Marković N, Siketić Z, Cosic D, Jungb H K, Leeb N H, Hanc W T, Jakšića M 2015 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **343** 167
- [5] Brooks R J, Hole D E, Townsend P D, Wu Z, Gonzalo J, Suarez-Garcia A, Knott P 2002 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **190** 709
- [6] Valotto G, Quaranta A, Piccinini M, Monteverdi R M 2015 *Opt. Mater.* **49** 1
- [7] Crespillo M L, Graham J T, Zhang Y, Weber W J 2016 *J. Lumin.* **172** 208

- [8] Baldacchini G, Davidson A T, Kalinov V S, Kozakiewicz A G, Montekali R M, Nichelatti E, Voitovich A P 2007 *J. Lumin.* **122** 371
- [9] Ribeiro D R S, Souza D N, Maia A F, Baldochi S L, Caldas L V E 2008 *Radiat. Meas.* **43** 1132
- [10] Dergachev A Y, Mirov S B 1998 *Opt. Commun.* **147** 107
- [11] Russakova A, Sorokin M V, Schwartz K, Dauletbekovaa A, Akilbekova A, Baizhumanova M, Zdorovetsd M, Koloberdina M 2013 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **313** 21
- [12] Skuratov V A, Gun K J, Stano J, Zagorski D L 2006 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **245** 194
- [13] Shiran N, Belsky A, Gektin A, Gridin S, Boiaryntseva I 2013 *Radiat. Meas.* **56** 23
- [14] Qiu M L, Chu Y J, Wang G F, Xu M, Zheng L 2017 *Chin. Phys. Lett.* **34** 016104
- [15] Skuratov V A, Didyk A Y, Azm S M A A 1994 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **94** 480
- [16] Qiu M L, Chu Y J, Xu M, Wang G F 2016 *J. Nucl. Radiochem.* **38** 57 (in Chinese) [仇猛淋, 褚莹洁, 胥密, 王广甫 2016 核化学与放射化学 **38** 57]
- [17] Ginhoven R M V, Jónsson H, Corrales L R 2006 *J. Non-Cryst. Solids* **352** 2589
- [18] Jimenez-Rey D, Peña-Rodríguez O, Manzano-Santamaría J, Olivares J, Muñoz-Martin A, Rivera A, Agulló-López F 2012 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **286** 282
- [19] Itoh N, Duffy D M, Khakshouri S, Stoneham A M 2009 *J. Phys. Condens. Mat.* **21** 474205

# Ion beam induced luminescence spectra of lithium fluoride at high- and low-temperature

Qiu Meng-Lin<sup>1)</sup> Wang Guang-Fu<sup>1)2)†</sup> Chu Ying-Jie<sup>1)</sup> Zheng Li<sup>1)</sup> Xu Mi<sup>1)</sup> Yin Peng<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

<sup>2)</sup> (Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China)

( Received 21 April 2017; revised manuscript received 2 July 2017 )

## Abstract

A new ion beam induced luminescence (IBIL) measuring setup, equipped with a custom-made heating/cooling sample stage (the attainable temperature ranges from 80 K to 900 K), has been established on the GIC4117 tandem accelerator in Beijing Normal University. As the yield of back scattering ions is proportional to the beam flux, an Au-Si surface barrier detector is employed to count the back scattering ions synchronously with collecting the IBIL spectra under the multi-channel scaler (MCS) mode of the multichannel analyzer, making it possible to online monitor the beam current. Then, the yield of back scattering ions is used to correct the intensity of the IBIL spectrum and calculate the ion fluence, for eliminating the influence of the beam current fluctuation.

IBIL spectra of pure lithium fluoride (LiF) at different temperatures (100, 200, 290, 450, 550 K) under the 2 MeV  $H^+$  irradiation are acquired and the significant influence of temperature on luminescence centers is observed. The emission bands relating to exciton recombination (296 and 340 nm) and impurities (400 nm) are more prominent at low temperatures and present quite lower intensities at high temperatures. Moreover, these luminescent intensities decay with ion fluence increase obviously at high temperatures after initially increasing in the early period of irradiation. The initial increase of the disturbed exciton peak at 296 nm can be attributed to the strained bonds produced by nuclear elastic scattering at a low fluence, which was not observed in previous IBIL measurements under high ionization energy density or high ion beam flux. This observed increase indicates that the emission feature may also originate from the emitting centers relating to point defects, not just from exciton transition near lattice or impurities. The luminescent intensities of  $F_2$  color centers (peaked at 670 nm) are dominant at all temperatures, while the luminescent intensities of  $F_3^+$  color centers (peaked at 540 nm) are not obvious at low temperatures and the luminescent intensities of  $F_3^-/F_2^+$  color centers (peaked at 880 nm) are weak at high temperatures. The luminescent intensities of these F-type centers reach saturated values at lower fluences at high temperatures. The different evolution behaviors under different temperatures can be due to the influence of temperature on the vacancy migration rate and the non-radiative recombination. In addition, the surface charge accumulation may lead to the luminescent intensities of color centers reaching saturated values at higher fluences, compared with the previous IBIL measurements of LiF. The self-absorption effect would reduce the intensities of  $F_3^+$  color centers because of the absorption of F-type centers at low temperatures, while the effect is weak at high temperatures due to the degradation of F-type centers.

**Keywords:** ion beam induced luminescence, high- and low-temperature, lithium fluoride

**PACS:** 78.60.Hk, 61.80.Jh, 61.72.J–

**DOI:** 10.7498/aps.66.207801

---

† Corresponding author. E-mail: 88088@bnu.edu.cn