

专题：载能离子束技术

不同离子辐照氟化锂材料时
原位发光光谱测量分析*仇猛淋¹⁾ 赵国强¹⁾ 王庭顺¹⁾ 罗长维¹⁾ 王广甫^{1)2)†}
张丰收¹⁾²⁾ 吕沙沙¹⁾ 廖斌¹⁾

1) (北京师范大学核科学与技术学院, 射线束教育部重点实验室, 北京 100875)

2) (北京市辐射中心, 北京 100875)

(2020年1月3日收到; 2020年2月6日收到修改稿)

在BNU400注入机上搭建的离子激发发光(ion beam induced luminescence, IBIL)测量装置上,开展了相同能量(100 keV)条件下的3种离子(H^+ 、 He^+ 以及 O^+)辐照氟化锂材料时的IBIL光谱的原位测量工作,对比研究离子种类对氟化锂材料辐照缺陷的生成及其演变行为的影响.结合SRIM(Stopping and Range of Ions in Matter)模拟的结果,可以发现 He^+ 辐照时的IBIL光谱强度最高,这是由于 He^+ 激发产生的电子空穴对密度高于 H^+ ,而 O^+ 辐照时由于激发出的电子空穴对密度过高引起的非辐射复合比例增加,从而导致发光效率过低;质量数越大的离子辐照时,核阻止本领越大,会加快缺陷的生成和湮灭速率,降低达到平衡状态时的发光强度.近红外波段的 F_3^-/F_2^+ 色心发光峰强度及其演变行为表明其耐辐照性能好于可见光波段的 F_2 色心.

关键词: 离子激发发光, 氟化锂, 不同离子

PACS: 78.60.Hk, 61.72.J-, 61.80.Jh

DOI: 10.7498/aps.69.20200020

1 引言

氟化锂中的点缺陷及其聚集体(F型色心)凭借其良好的辐射敏感度、室温稳定性以及光学性能优异等特点在可调谐激光器、辐射成像探测器及热释光剂量计等领域具有重要的应用价值^[1-4].目前色心的制备可利用多种辐射源在氟化锂材料中着色生成稳定、均匀的色心,辐照条件的差异对色心的形成和稳定性有着明显的影响^[5-7],因此不同辐照条件下材料中点缺陷及其聚集体的生成和演变行为研究对氟化锂材料在各领域的开发和应用具有重要的意义.现阶段主要的研究方法是利用荧光法测量不同辐照条件下氟化锂材料中各色心的发

光情况.目前氟化锂材料的发光中心研究已经有了一定的基础^[8-10],主要有位于紫外波段的激子峰(与杂质或者不稳定缺陷有关的激子复合),位于540 nm处的 F_3^+ 色心以及可应用在可调谐激光器的670 nm处的 F_2 色心;其余的一些发光中心则研究的较少,如400 nm以及440 nm附近的杂质峰(氧离子以及镁离子)和880 nm附近 F_3^-/F_2^+ 色心的重叠峰(同样可应用在可调谐激光器上).

在这些荧光法研究中,离子激发发光方法,通过在离子辐照过程中探测外层电子激发跃迁产生的光谱,将离子辐照和分析测试过程合二为一,可实现离子辐照过程中发光中心形成及其演变行为的原位分析^[11-12].相比于采用激光激发(遵循选择定则先吸收后发射的方式)的光致发光

* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 11905010)、中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 2018NTST04)、中国博士后科学基金(批准号: 2019M650526)和广东省重点领域研发计划(批准号: 2019B090909002)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 88088@bnu.edu.cn

(photoluminescence, PL) 测量 (紫外波段的光信号受激发源可提供的波长影响较大; 不同发光中心先吸收再发射的系数有所差异), 以及采用 X 射线电离激发方式的辐射发光 (radioluminescence, RL) 测量 (穿透能量强, 光信号涉及到整个晶体, 但不利于材料表面损伤分析), 离子束激发时电离激发区域较为集中, 激发出的电子密度更高, 离子激发发光方法的探测灵敏度更高, 因此国内外的实验室陆续开展了不同实验条件下氟化锂材料的离子激发发光研究. 其中, 俄罗斯的 Skuratov 等^[13] 利用 Ar 等重离子辐照了氟化锂样品, 并采集了 80—300 K 温度范围内 250—700 nm 范围内的 IBIL 光谱, 获得了位于 670 nm、525 nm、330 nm 及 296 nm 中心处的发光峰及其演变行为; 意大利的 Quaranta 等^[14] 利用 MeV 的 H^+ 轰击氟化锂材料, 在获得的 IBIL 光谱中首次报道了近红外波段的 F_3/F_2^+ 色心及其演变情况, 发现近红外波段的 F_3/F_2^+ 色心的重叠峰和 670 nm 处的 F_2 色心相比, 需要更大的注量才能达到饱和强度. 国内, 目前仅本课题组自 2015 年起开展了 20 keV 的 H 辐照条件下氟化锂材料的 IBIL 光谱测量^[7] 及 2 MeV 的 H^+ 辐照不同温度下的氟化锂材料的 IBIL 光谱测量^[15] 工作.

在此背景下, 本文介绍了在 BNU400 注入机上搭建的可实现多种离子辐照过程中 IBIL 光谱测量的装置, 以及不同离子种类辐照过程中氟化锂材料中发光中心的生成及演变行为的研究工作.

2 IBIL 装置及实验

IBIL 光谱测量装置的改装搭建工作在 BNU400 注入机的原注入靶室基础上开展^[16]. 如图 1 所示.

利用靶室侧面原有的引线接口, 通过安装真空光纤通管, 外侧端口通过光纤连接光谱仪 (型号 QE-PRO, 探测波长 200—1000 nm), 真空内侧端口连接探测光纤; 探测光纤末端增加了 74 UV 准直透镜 (聚焦光信号, 提高光探测效率), 固定在转接法兰的切槽处且避免遮挡束流. 光路调节过程中, 利用光路的可逆性, 从真空光纤通管外侧端口输入激光信号, 通过调节光纤的位置和角度使其正对样品中心. 辐照时, 离子束垂直入射样品表面, 为保证束流的均匀性, 在 X - Y 方向同时以大于

1000 Hz 的频率进行电扫描, 扫描面积 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$.

实验样品为纯的氟化锂单晶样品 (晶相 100, 尺寸 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.95\text{ mm}$, 双面抛光处理), 购置于合肥科晶公司. 选用相同能量 (100 keV) 的 3 种离子 (H^+ 、 He^+ 以及 O^+) 开展 IBIL 光谱测量工作, 束流大小为 $3\mu\text{A}$, 积分时间设定为 0.5 s, 每个样品的注量约为 $2 \times 10^{15}\text{ cm}^{-2}$, 测量过程中靶室真空低于 10^{-3} Pa . 为了减小电荷积累效应对 IBIL 光谱的影响, Bachiller-Perea 等^[17] 提出在在样品表面的部分区域粘贴一层薄的石墨导电胶带来减少绝缘体样品辐照过程中电荷积累可能出现的起弧现象, 在本文的实验中也借鉴了这一做法.

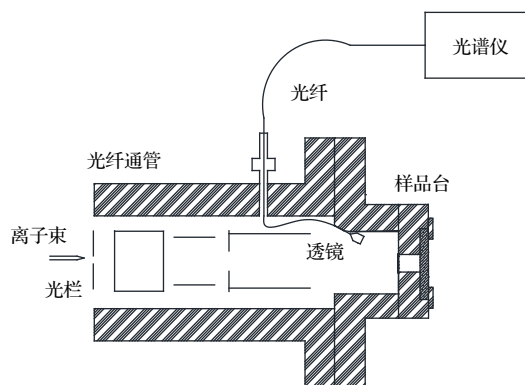


图 1 BNU400 注入机 IBIL 装置示意图

Fig. 1. Schematic of the IBIL experimental setup on BNU400 ion implanter.

3 SRIM 模拟结果

SRIM 软件是常用的模拟计算离子轰击靶材料过程中的能量损失和分布的程序. 图 2 为 SRIM 软件模拟的相同离子能量 (100 keV) 条件下 3 种离子的电子阻止本领 (electron stopping power, S_e) 和核阻止本领 (nuclear stopping power, S_n) 随入射深度分布的情况.

图 2 中可以发现相同能量下 (100 keV), 轻离子的射程长, H^+ 离子辐照时, 在大约 400 nm 深度前的电子阻止本领几乎保持不变, 随后才逐渐下降, He^+ 和 O^+ 离子的电子阻止本领呈现单调下降趋势, O^+ 离子的下降速率更为明显; 质量数越大的离子, 核阻止本领越显著, O^+ 离子的核阻止本领明显高于 H^+ 离子和 He^+ 离子.

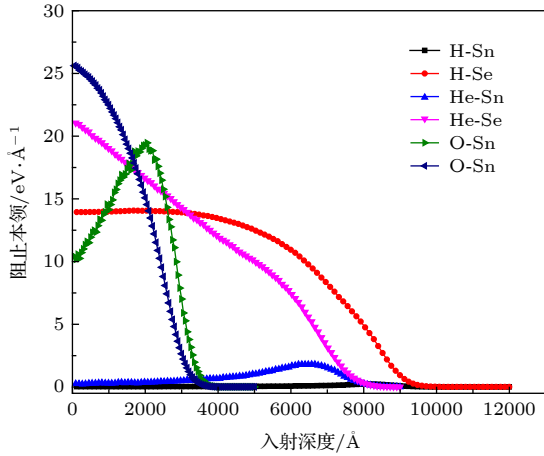


图 2 100 keV 能量时 H⁺、He⁺和 O⁺离子在氟化锂中的阻止本领的 SRIM 模拟结果

Fig. 2. SRIM calculation of 100 keV H⁺, He⁺ and O⁺ stopping power in lithium fluoride.

4 实验结果与讨论

4.1 H⁺辐照的 IBIL 实验

图 3 给出的是 100 keV H⁺辐照时氟化锂材料发光强度随注量演变情况. 图中可以看到紫外波段(200~400 nm) 隐约可见 3 个发光峰, 其中 300 nm 左右处的激子峰强度稍强, 大约在 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 注量左右达到最大发光强度; 可见近红外波段主要有 670 nm 处的 F₂ 色心和 880 nm 处的 F₃/F₂⁺ 色心重叠峰, 540 nm 处的 F₃⁺ 色心发光峰强度较弱, 在 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 注量左右 F₂ 色心的发光峰强度达到饱和, F₃/F₂⁺ 色心重叠峰则需更大注量 ($3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 注量附近) 才能达到饱和强度值. 950 nm 处的强度的明显低于邻近的波长, 是由于 BNU400 注入机 IBIL 装置上的传导光纤在 950 nm 处的透过率稍差. 此外, 光信号在晶体内部传输过程中会产生自吸收现象, 是光谱分析中需要关注的一个因素; 但考虑到本文中的 IBIL 装置是从离子辐照样品表面采集的光信号, 结合 SRIM 模拟结果 (离子的辐照深度仅有 μm 量级), 因此笔者认为本文实验条件下自吸收现象对光谱分析的影响较弱, 文献 [14] 中的光谱分析也持类似的观点. 由于同能量下 He⁺和 O⁺辐照时的 IBIL 光谱随注量演变的图形与 H⁺辐照时相差不大, 差异仅在于发光强度以及 F 型色心到达饱和值或衰减至平衡浓度时的注量值, 将在下文的具体发光中心随注量演变情况对比说明, 文中不再给出.

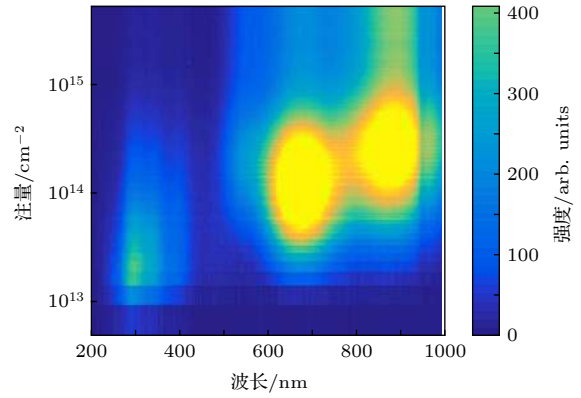


图 3 100 keV 的 H⁺辐照单晶氟化锂的发光强度随注量演变情况

Fig. 3. Emission intensity as function of both fluence and wavelength obtained under 100 keV H⁺.

从图 4 给出的 100 keV 的 H⁺离子辐照氟化锂时 296 nm、340 nm 和 400 nm 处发光强度随注量演变情况中, 可以看出紫外波段的激子峰和杂质峰在辐照初期有着一段非常陡峭的上升过程 (发光强度最大值出现在 10^{13} cm^{-2} 注量附近), 随后逐渐衰减, 本文中在 BNU400 注入机上开展的束流注量率约为 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 辐照初期前几个的 IBIL 光谱在紫外波段的强度存在上升, 在注量达到 $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 后保持着十分微弱的强度. 分析在低注量阶段的发光行为变化中, 由 SRIM 模拟结果, 几种离子的电子阻止本领并未达到氟化锂材料的离子径迹形成阈值, 因而排除了 Jimenez-Rey 等人的密实化效应 (densification effect, 也叫作 compaction effect) 的解释 [18]; 这一变化可能来自于低注量阶段核弹性碰撞生成的应变键, 增大激子的复合概率, 从而在辐照初期的光谱中呈现出激子峰发光强度的上升 [12]; 随着离子的持续轰击, 点缺陷的数量不断增长逐渐开始扩散和聚集, 产生的晶格结构损伤影响了激子的迁移和扩散, 使得激子被捕获的概率减小, 进而影响发光中心的数量, 导致紫外波段激子峰的发光强度出现下降 [15]; Crespillo 等 [19] 则给出了另外一种相对合理的解释: 离子辐照过程中, 根据激发速率和载流子的寿命, 在 $10^{12} \text{--} 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 注量附近, 离子注入引起的高密度的电子空穴对会形成一个稳态的电子空穴对的云状态, 在此期间, 电子和空穴将会移动到晶格位置然后被陷阱捕获或者在一个合适的复合中心进行复合, 因而出现了激子峰出现先上升后下降的演变方式.

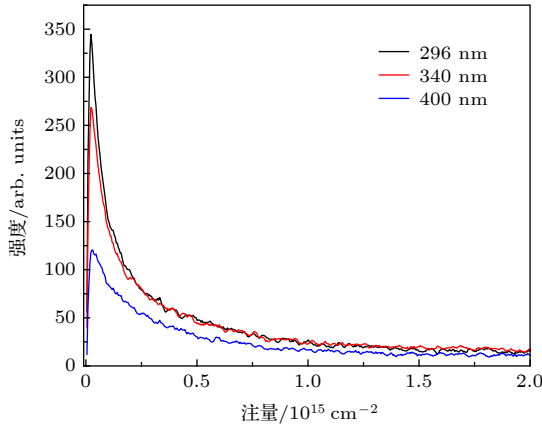


图 4 100 keV 的 H⁺离子辐照氟化锂时 296 nm、340 nm 和 400 nm 处发光强度随注量演变情况

Fig. 4. Evolutions of the luminescence peak intensities at 296, 340, 400 nm with the irradiation fluence under 100 keV H⁺.

图 5 给出的是 100 keV 的 H⁺离子辐照氟化锂时 540 nm、670 nm 和 880 nm 处发光强度随注量演变情况. 540 nm、670 nm 以及 880 nm 峰中心的几种发光中心均为 F 型色心, 发光强度的演变与点缺陷的形成和聚集转化有关. 入射离子不断形成造成原子位移, 形成的晶格空位逐渐迁移和聚集, 通过 $F + F^+ \rightarrow F_2^+$, $F_2^+ + F \rightarrow F_3^+$, $F_3^+ + e \rightarrow F_3$, $F_3^+ + 2e \rightarrow F_3^-$ 等多种反应生成各类型 F 色心 (F_3^+ 、 F_2 、 F_3^- 和 F_2^+ 等等), 因此对应的发光强度一开始随着注量的增加而增强. 540 nm 处在 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 注量 (Φ_{max}) 附近达到发光强度最大值; 670 nm 处在 $1.2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 注量附近; 880 nm 处在 $2.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 注量附近; 随着注量的持续增

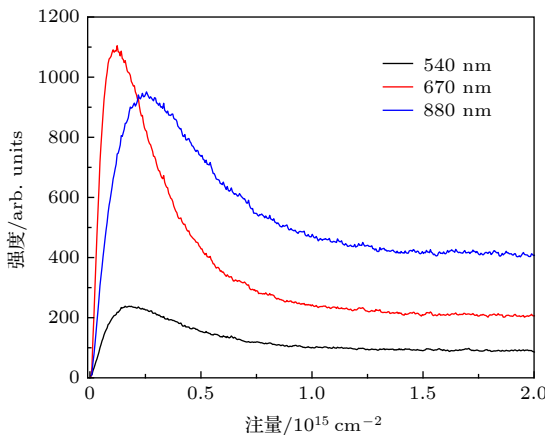


图 5 100 keV 的 H⁺离子辐照氟化锂时 540 nm、670 nm 和 880 nm 处发光强度随注量演变情况

Fig. 5. Evolutions of the luminescence peak intensities at 540, 670, 880 nm with the irradiation fluence under 100 keV H⁺.

加, 开始形成更复杂的空位聚集体 (F_n 心、位错等), 使得点缺陷对应的发光中心开始减少, IBIL 光谱中可以观察到不同峰位之间的相对强度发生变化, F 型色心发光强度随注量增加达到最大值后开始下降, 最终达到一平衡状态. 与之前开展的低能负离子辐照氟化锂的 IBIL 光谱 [7] 类似, 880 nm 处的 F_3^-/F_2^+ 色心的变化速率较 670 nm 处的 F_2 色心的变化更慢, 辐照条件下稳定较好, 这一点还体现在发光强度衰减后达到平衡状态时, 880 nm 处的 F_3^-/F_2^+ 色心依然保持着较高的发光强度, 虽然其峰值强度较 670 nm 处 F_2 色心的峰值强度稍弱.

4.2 He⁺辐照的 IBIL 实验

图 6 和图 7 分别给出的是 100 keV He⁺辐照氟化锂的 IBIL 光谱各发光中心强度随注量的演变图, 紫外波段初期的上升过程同样约在 10^{13} cm^{-2} 达到峰值强度, 这一点和 H⁺辐照较为接近. 540 nm 处约在 $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 左右达到发光强度最大值; 670 nm 处约在 $3.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 左右; 880 nm 处约在 $9.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 左右, 较 H⁺辐照时的注量均有所提前. 从电子阻止本领和核阻止本领来看: 100 keV 的 H⁺和 100 keV He⁺的电子阻止本领分别为 $13.92 \text{ eV}/\text{\AA}$ 和 $21.04 \text{ eV}/\text{\AA}$, 核阻止本领分别为 $0.0232 \text{ eV}/\text{\AA}$ 和 $0.3004 \text{ eV}/\text{\AA}$. 可以发现 He⁺离子的电子/核阻止本领均高于 H⁺离子, 但由于质量数相近两者的阻止本领差距并不是很大. 按照西班牙 F. Agulló-López 等 [20] 的理论和实验研究表明, 入射离子激发产生的电子空穴对数量可由 $N = E/I$ 公式算出, E 为入射离子能量, I 为有效电离能 (通常设定为禁带宽度 E_g 的 2.5 倍左右, 即大约 40% 的能量用于激发电子到导带), 从公式中可以看出相同能量的离子产生的电子空穴对数量应该是一致的. 但相比于相同能量的 H⁺离子, 由于 He⁺离子的阻止本领高, 离子的射程短, 因而相同能量时 He⁺离子激发产生的电子密度更高; 此外, 由于 He⁺的核阻止本领更高, 产生的点缺陷也较同能量的 H⁺离子更多, 因而产生的 F 型色心也更多. 所以, 在相同能量下, He⁺离子辐照时的发光产额比 H⁺离子高.

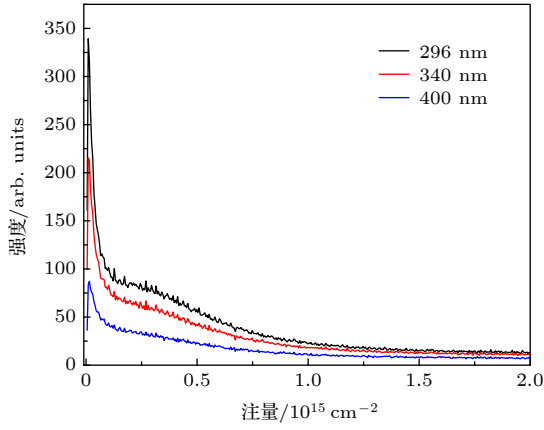


图 6 100 keV 的 He⁺离子辐照氟化锂 296 nm、340 nm 和 400 nm 处发光强度随注量演变情况

Fig. 6. Evolutions of the luminescence peak intensities at 296, 340, 400 nm with the irradiation fluence under 100 keV He⁺.

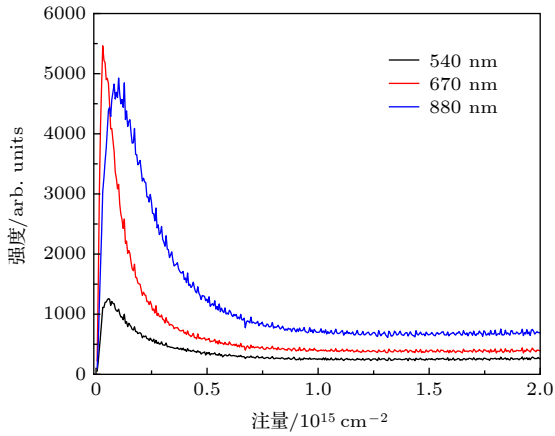


图 7 100 keV 的 He⁺离子辐照氟化锂 540 nm、670 nm 和 880 nm 处发光强度随注量演变情况

Fig. 7. Evolutions of the luminescence peak intensities at 540, 670, 880 nm with the irradiation fluence under 100 keV He⁺.

由于核阻止本领更大, 因而 He⁺离子辐照时的缺陷的产生和湮灭速率均大于 H⁺离子辐照时的速率, 从而表现在 He⁺离子辐照时 F 型色心在较低注量下达到峰值, 达到平衡浓度时的发光强度与峰值的相对比值也低于同能量的 H⁺离子辐照。

4.3 O⁺辐照的 IBIL 实验

图 8, 图 9 分别给出的是 100 keV O⁺辐照辐照氟化锂的 IBIL 光谱各发光中心强度随注量的演变情况。

从图 8 和图 9 中可以看出紫外波段的激子峰和杂质整体发光强度较小, 受束流波动的影响比较明显。540 nm 处约在 $3.8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 左右达到发

光强度最大值; 670 nm 处约在 $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 左右; 880 nm 处约在 $5.9 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 左右, 均小于 H⁺及 He⁺辐照时出现峰值时的注量。达到稳定状态时, O⁺离子辐照时的发光强度十分微弱。

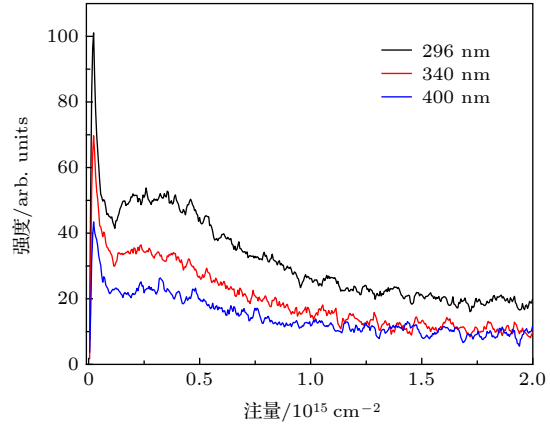


图 8 100 keV 的 O⁺离子辐照氟化锂时 296 nm、340 nm 和 400 nm 处发光强度随注量演变情况

Fig. 8. Evolutions of the luminescence peak intensities at 296, 340, 400 nm with the irradiation fluence under 100 keV O⁺.

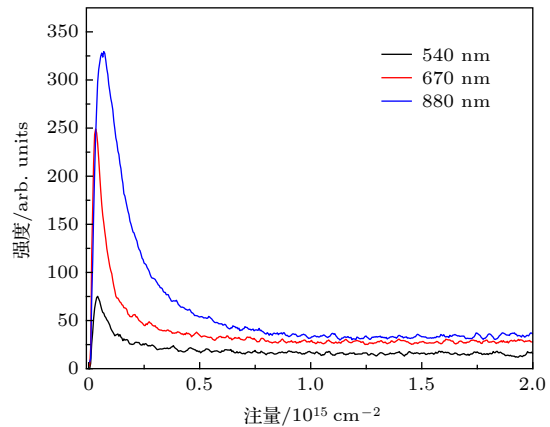


图 9 100 keV 的 O⁺离子辐照氟化锂 540 nm、670 nm 和 880 nm 处发光强度随注量演变情况

Fig. 9. Evolutions of the luminescence peak intensities at 540, 670, 880 nm with the irradiation fluence under 100 keV O⁺.

100 keV 的 O⁺辐照时电子阻止本领和核阻止本领分别为 $25.64 \text{ eV}/\text{\AA}$ 和 $10.15 \text{ eV}/\text{\AA}$ 。核阻止本领的作用较轻离子 H⁺和 He⁺更为显著。从之前的研究中可以发现 880 nm 处的 F₃⁻/F₂⁺ 色心的耐辐照性能好于 670 nm 处 F₂ 色心, 在重离子 O⁺辐照的结果中来看, 这一点更为明显, 不仅表现在形成和湮灭速率上 (670 nm 处 F₂ 色心在 O⁺离子辐照时损失更快), 还表现在峰值强度的对比中。O⁺离

子辐照时的核阻止本领更高,加之入射射程短,造成的损伤也更为集中和严重,缺陷的形成和湮灭速率也较 H^+ 和 He^+ 更快,因而表现在达到峰值的注量更低,同时达到平衡状态时的发光强度也比 H^+ 和 He^+ 辐照时的平衡状态时的发光强度更弱.

按照 $N = E/I$ 公式计算,能量相同,激发的电子空穴对的数目相同, O^+ 的射程分布短,因而 O^+ 离子辐照时产生的电子空穴对的密度更高,发光强度理应更高.但从发光效率来看, O^+ 辐照时的发光强度明显低于同能量轻离子 H^+ 和 He^+ 辐照时发光强度.这是因为当电子空穴对的密度达到一定阈

值时,会通过非辐射复合的方式形成点缺陷或者以声子的形式耗散能量,剩余的电子空穴对的数目较少,造成发光效率的低下,实验研究表明重离子辐照时产生的电子空穴对数量由于非辐射复合作用会减少到原有数量的 1%—10%^[20–21]. O^+ 离子辐照时的核阻止本领和非辐射复合共同作用使得缺陷的生成和湮灭速率更为迅速,造成激子在迁徙长度变小,被辐射中心俘获而复合发光的概率也更低,因此重离子辐照时发光效率十分低下.

具体几种离子辐照氟化锂材料结果对比如表 1 所示:

表 1 100 keV 的 H^+ 、 He^+ 和 O^+ 3 种离子辐照氟化锂材料的结果对比
Table 1. Comparisons of lithium fluoride under 100 keV H^+ , He^+ and O^+ .

离子种类	F_3^- 色心 $\Phi_{\max}/\text{cm}^{-2}$	F_2 色心 $\Phi_{\max}/\text{cm}^{-2}$	F_3^-/F_2^+ 色心 $\Phi_{\max}/\text{cm}^{-2}$	$Se/eV \cdot \text{\AA}^{-1}$	$Sn/eV \cdot \text{\AA}^{-1}$	$R_p/\mu\text{m}$
H^+	10×10^{13}	11.5×10^{13}	24.3×10^{13}	13.92	0.0232	0.8336
He^+	5×10^{13}	3.3×10^{13}	9.5×10^{13}	21.04	0.3004	0.6708
O^+	3.8×10^{13}	3×10^{13}	5.9×10^{13}	25.64	10.15	0.2459

5 结 论

对比在 BNU400 注入机上 IBIL 装置开展的相同能量 (100 keV) 3 种离子 (H^+ 、 He^+ 和 O^+) 辐照氟化锂材料时 IBIL 光谱结果,可以发现:能量相同,质量数接近的离子 (H^+ 和 He^+) 辐照时,质量数大的 He^+ 离子激发产生的电子空穴对密度更高,发光产额更高;重离子 O^+ 辐照时,由于非辐射复合的作用,发光效率较低.辐照离子的质量数越大,核阻止本领越明显,晶格缺陷的生成和湮灭速率更快, F 型色心达到峰值时的注量越小,达到平衡状态时的发光强度也更弱. 880 nm 处的 F_3^-/F_2^+ 色心的耐辐照性能好于 670 nm 处 F_2 色心,不仅体现在 880 nm 处的 F_3^-/F_2^+ 色心的生成和湮灭速率更慢,还体现在重离子辐照时 880 nm 处的 F_3^-/F_2^+ 色心的发光强度好于 670 nm 处 F_2 色心.

参考文献

[1] Huang Z H, 1983 *J. Synthetic. Cryst.* **4** 36 (in Chinese) [黄振辉 1983 人工晶体学报 **4** 36]
 [2] Dergachev A Y, Mirov S B 1998 *Opt. Commun.* **147** 107
 [3] Baldacchini G, Davidson A T, Kalinov V S, Kozakiewicz A G, Montereali R M, Nichelatti E, Voitovich A P 2007 *J. Lumin.* **122** 371
 [4] Ribeiro D R S, Souza D N, Maia A F, Baldochi S L, Caldas L

V E 2008 *Radiat. Meas.* **43** 1132
 [5] Shiran N, Belsky A, Gektin A, Gridin S, Boiaryntseva I 2013 *Radiat. Meas.* **56** 23
 [6] Voitovich A P, Kalinov V S, Runets L P, Stupak A P, Martynovich E F, Montereali R M, Baldacchini G 2013 *J. Lumin.* **143** 207
 [7] Qiu M L, Chu Y J, Wang G F, Xu M, Zheng L 2017 *Chin. Phys. Lett.* **34** 016104
 [8] Baldacchini G 2002 *J. Lumin.* **100** 333
 [9] Skuratov V A, Gun K J, Stano J, Zagorski D L 2006 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **245** 194
 [10] Yang B R, Li W Q 1993 *J. Synthetic. Cryst.* **2** 163 (in Chinese) [杨百瑞, 李文琪 1993 人工晶体学报 **2** 163]
 [11] Townsend P D, Wang Y F 2013 *Energy. Proced.* **41** 64
 [12] Crespillo M L, Graham J T, Zhang Y, Weber W J 2016 *J. Lumin.* **172** 208
 [13] Skuratov V A, Didyk A Y, Alazm S A 1997 *Radiat. Phys. Chem.* **50** 183
 [14] Valotto G, Quaranta A, Piccinini M, Montereali R M 2015 *Opt. Mater.* **49** 1
 [15] Qiu M L, Wang G F, Chu Y J, Zheng L, Xu M, Yin P 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 207801 (in Chinese) [仇猛淋, 王广甫, 褚莹洁, 郑力, 胥密, 殷鹏 2017 物理学报 **66** 207801]
 [16] Chu Y J, Wang G F, Zheng L, Qiu M L, Yin P, Xu M 2018 *Surf. Coat. Tech.* **348** 91
 [17] Bachiller-Perea D, Jiménez-Rey D, Muñoz-Martín A, Agulló-López, F 2016 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 085501
 [18] Jiménez-Rey D, Peña-Rodríguez O, Manzano-Santamaría J, Olivares J, Muñoz-Martín A, Rivera A, Agulló-López F 2012 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* **286** 282
 [19] Crespillo M L, Graham J T, Agullo-Lopez F, Zhang Y, Weber W J 2017 *J. Phys. Chem. C* **121** 19758
 [20] Agullo-Lopez F, Climent-Font A, Muñoz-Martín Á, Olivares J, Zucchiatti A 2016 *Prog. Mater. Sci.* **76** 1
 [21] Rivera A, Méndez A, García G, Olivares J, Cabrera J M, Agulló-López F 2008 *J. Lumin.* **128** 703

SPECIAL TOPIC — Carrying ion beam technology

In situ luminescence measurement from lithium fluoride under various ions*

Qiu Meng-lin¹⁾ Zhao Guo-qiang¹⁾ Wang Ting-shun¹⁾ Luo Chang-wei¹⁾
 Wang Guang-fu^{1)2)†} Zhang Feng-shou¹⁾²⁾ Lv Sha-sha¹⁾ Liao Bin¹⁾

1) (*Key Laboratory of beam technology of Ministry of Education, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

2) (*Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China*)

(Received 3 January 2020; revised manuscript received 6 February 2020)

Abstract

To contrast the generation and their evolution behaviors of irradiation damage in lithium fluoride under various ion, in situ luminescence measurements from lithium fluoride are carried out under 100 keV H⁺, He⁺ and O⁺ on the ion beam induced luminescence (IBIL) experimental setup on BNU400 ion implanter. Combined with Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) calculation of 100 keV H⁺, He⁺ and O⁺ stopping power in lithium fluoride, the emission intensity under He⁺ is the strongest, due to the higher excitation density of electron-hole pairs than them under H⁺ and the rising non-radiative recombination ratio under heavy ion O⁺. With the mass number increase of the incident ion, the nuclear stopping power would be increased, resulting in the faster rate of both formation and annihilation of point defects, the lower fluence for F-type centers reaching the highest intensity and the weaker luminescence intensity at the state of equilibrium. The irradiation resistance of F₃⁻/F₂⁺ centers at 880 nm are better than the F₂ centers at 670 nm, shown not only in the slower formation and annihilation rates of F₃⁻/F₂⁺ centers but also the higher luminescence intensity of F₃⁻/F₂⁺ centers under heavy ion O⁺.

Keywords: ion beam induced luminescence, lithium fluoride, various ions

PACS: 78.60.Hk, 61.72.J-, 61.80.Jh

DOI: [10.7498/aps.69.20200020](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200020)

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11905010), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2018NTST04), the China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (Grant No. 2019M650526) and Guangdong Province Key Area R&D Program (Grant No. 2019B090909002).

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