

## GeV 重离子束辐照 LiF 引起的晶体内部结构改变\*

陈宇鹏<sup>1)2)</sup> 史路林<sup>2)3)</sup> 王瑜玉<sup>2)4)†</sup> 程锐<sup>2)4)</sup> 杨杰<sup>2)4)</sup>陈良文<sup>2)4)</sup> 范伟丽<sup>1)</sup> 董俊煜<sup>2)</sup>

1) (河北大学物理与科学技术学院, 保定 071002)

2) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

3) (西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070)

4) (先进能源科学与技术广东省实验室, 惠州 516000)

(2024 年 5 月 22 日收到; 2024 年 6 月 20 日收到修改稿)

高能强流重离子束入射到固体物质中, 沿飞行路径的离子能量沉积密度将改变宏观靶物质的温度和压强等, 并可能在高压高密条件下产生新的材料缺陷. 本文利用兰州重离子加速器装置 HIRFL-CSR 引出的能量为 264 MeV/u 的  $\text{Xe}^{36+}$  离子束, 入射到 LiF 晶体靶物质中, 在线测量了 LiF 的发射光谱, 观测到沿离子路径的晶体颜色变化. 通过解离方法取得了不同位置处的 X 射线衍射 (X-ray Diffraction) 与 X 射线光电子能谱结果, 显示在 Xe 离子的布拉格峰区域出现了  $\text{LiF}_3$  ( $\text{LiF} + \text{F}_2$ ) 结构相, 讨论了新的结构缺陷的产生与重离子束能量沉积密度间可能的相关性. 这为离子束驱动的高能量密度物理的能量沉积过程提供了一定参考.

**关键词:** LiF 晶体, 重离子束, 能量密度, 色心**PACS:** 64.70.kp, 41.75.Ak, 34.50.Bw, 61.72.jn**DOI:** 10.7498/aps.73.20240717

## 1 引言

高能量密度物质存在于恒星、行星内部区域和惯性约束聚变的内爆压缩和传播燃烧等过程中; 有关高能量密度物质的产生、物理特性与动态演化规律等是当今物理学最前沿的交叉学科, 不仅与传统的原子物理、等离子体物理等密切相关, 在天体物理、聚变科学等领域也具有重要的应用价值<sup>[1]</sup>.

基于加速器装置的强流重离子束驱动产生的高能量密度物质, 为实验室系统性探索高能量密度物理的诸多关键问题提供了新的研究手段. 其产生的高能量密度物质不仅体积大、空间分布均匀、材料种类丰富, 并且通过调整束靶耦合的方式, 能

够实现精准制备所需的物质状态, 因此获得了国际科学家的广泛关注. 德国的 FAIR 与中国的 HIAF 装置, 均将重离子束驱动的高能量密度物理研究作为重要的研究内容之一<sup>[2]</sup>.

为了精确控制离子束打靶产生的极端物质状态, 需要对离子束在物质内部的能量沉积密度分布进行深入细致的研究. LiF 晶体, 作为一种高透光率的材料, 在激光工业等领域具有广泛的应用<sup>[3]</sup>. 其晶体结构与高透光特性为研究离子束在物质内部的能量沉积过程提供了理想的靶物质. 在被辐照后, 其内部晶体的电子结构改变造成其透光率以及颜色变化的现象与离子的能量沉积密度直接关联, 因此通过研究色心等缺陷的产生与变化过程, 为探索离子的能量沉积过程提供了一种新的研究途径<sup>[3]</sup>.

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1602500)、国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流项目 (批准号: 12120101005) 和自然科学基金 (批准号: 12205247) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangyuyu@impcas.ac.cn

众多学者已经针对 LiF 晶体的色心与缺陷进行了相关研究. Perez 等<sup>[4]</sup>与 Wangts 等<sup>[5]</sup>分别研究了沿着轻离子路径上产生的电子色心, 实验证明了单个缺陷的浓度与炮弹离子的阻止本领成正比. Perez 等<sup>[6]</sup>也研究了低温下 LiF, NaCl 和 KBr 晶体中的色心生成, 证明在碱金属卤化物中, 经典辐射源实验中已知的激子机制也负责离子诱导发光和色心生成. 大量不同 MeV—GeV 能区的重离子实验表明, 晶体内部存在与膨胀<sup>[7]</sup>、表面小丘形成<sup>[8,9]</sup>、溅射<sup>[10]</sup>、化学径迹蚀刻<sup>[11]</sup>、电子密度变化和空穴团有关的阈值效应<sup>[12]</sup>. 从各种方法获得的大数据集中表明, 大阻止本领的重离子所引起的径迹可以用具有复杂缺陷聚集物的核区(半径 1—2 nm)被一大片导致膨胀的缺陷区所包围来描述<sup>[12,13]</sup>. 此外, 还有一个扩展径迹光晕(半径 5—30 nm), 主要是简单的色心. 这种不均匀的缺陷分布是沉积能量随  $1/r^2$  分布的结果(其中  $r$  是与离子路径的径向距离). Schwartz 等<sup>[12]</sup>研究了 LiF 晶体暴露于不同束流参数的重离子束时, 色心聚集和复合过程的不同阶段. 其主要研究了电子色心, 因为它们在紫外和可见光谱区域很容易通过光学吸收光谱获得, 而  $V_3$  空穴中心在真空紫外区域吸收所以无法在光谱中观测到. 同时, 能量高低直接决定电子空穴对产生的数量, 能量越高, 电子空穴对数量越多. 然而对于离子能量沉积引起的内部材料变色、束靶作用过程中的瞬态光谱发射等问题, 目前还未有相关的研究报道.

本文基于 HIRFL-CSR 加速器装置, 引出脉宽为 300 ns、离子强度为  $5 \times 10^8$  ppp (particle per pulse)、能量为 264 MeV/u 的  $\text{Xe}^{36+}$  离子束流, 与 LiF 晶体材料作用, 实验测量了束靶作用过程中的靶材料的发射光谱; 观测到了晶体内部颜色渐变, 并且通过晶体解离的方式, 对晶体内部不同区域的晶体结构进行测试. 理论上结合晶体的色心理论对离子束在该材料中的能量沉积密度分布进行讨论.

## 2 实验装置介绍

本实验在兰州重离子加速器 HIRFL-CSR 的实验终端开展, 由 CSR 引出的  $\text{Xe}^{36+}$  离子束, 能量为 264 MeV/u, 脉冲长度为 300 ns, 离子束流强度约  $5 \times 10^8$  ppp, 在靶点区离子的束斑尺寸约为 1 mm. 实验装置如图 1(a) 所示, 离子束自 CSR 引出到达

实验终端之后, 经过最左侧蓝色偏转磁铁到达束线, 经过两块黄色聚焦磁铁聚焦后到达橘红色被保护的靶区, 在靶区处使用光纤连接光谱仪、条纹相机以及光电倍增管对靶区状态进行实时监测. 实验中脉冲发次共 125 发(下文以  $p$  代表脉冲发次), 每发次之间间隔 30 s. 在束靶作用过程中, 采用光学诊断的方式, 时刻检测靶区的发射光谱(见图 2(a)), 为了降低高能离子束打靶区域的辐射对探测器系统的干扰, 采用了光纤匹配耦合透镜的方式, 瞄准靶点的作用区域, 透镜收光孔直径为 5 mm, 与 LiF 样品距离为 4 cm. 后端靶区内各装置位置示意图见图 1(b); 在靶区探测时所使用的仪器设备分别为: 瞬态光谱仪(型号为 Andor shamrock 500i, 探测波长为 200—800 nm, 分辨率为 0.12 nm)、光电倍增管(即 PMT, 用于探寻发光过程中光强最强的时刻)和条纹相机(探测波长为 350—850 nm, 用于实现高时间分辨, 配合 PMT 使探测时间与发光时间相耦合).

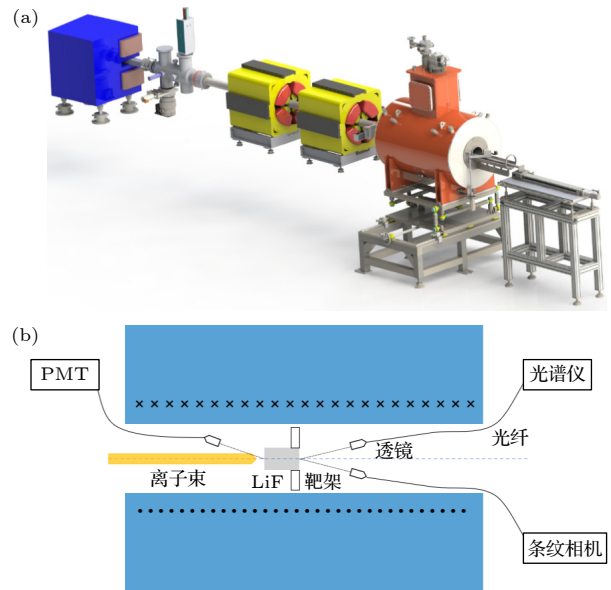


图 1 (a) 基于 HIRFL 装置的重离子束打靶实验装置示意图; (b) 靶区内各装置位置示意图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of heavy ion beam targeting experimental setup based on HIRFL; (b) diagram of the positions of devices within the target area.

辐照材料选用商业公司所制的圆柱形 LiF 晶体材料, 在辐照方向晶相为 (010); 直径和长度都为 12 mm. 维持靶区真空条件稳定之后, 重离子束沿中心方向射入 LiF 晶体, 通过实验前的理论计算, 将靶材长度设计为略大于该能量下的离子射程, 因此离子将完全停止在材料内部, 并在射程末

端形成布拉格峰能量沉积区. 实验前通过测试将光谱仪探测时间、曝光时间与 PMT 所测得发光时间相耦合, 实验过程中随着脉冲发次不断检测靶材的在线发射光谱, 离子束脉冲发次共计 125 p, 通过计算得到离子在靶区的累积剂量最终为  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ . 实验后将晶体沿离子入射的垂直方向进行解离 (见图 3), 对分片后的样品分别进行了荧光光谱测量以及使用 X'Pert<sup>3</sup> 系列 X 射线衍射仪 (每列计数率为 13 Mcps, 背景噪音每列不超过 0.002 cps, 总计噪音不超过 0.5 cps) 进行 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 测试. 之后为了进一步验证实验结果, 在相同的实验条件下, 将离子束更换为 430 MeV/u  $^{84}\text{Kr}^{26+}$  离子束 (总计辐照剂量不变)、将靶材提前制成堆叠层状靶 (详见 3.3 节) 进行重复实验. 实验后对样品进行了 X 射线光电能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 测试 (所采用仪器为 Thermo Fisher X 射线光电能谱仪, 计数率高于 4 Mcps).

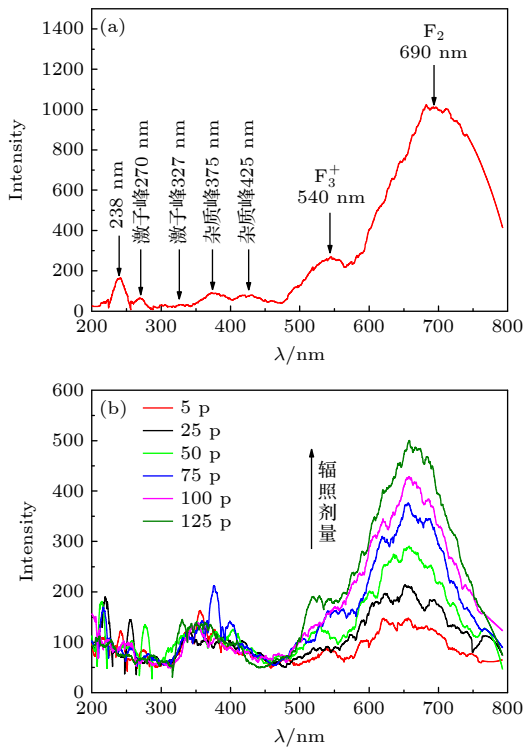


图 2 260 MeV/u 的  $\text{Xe}^{36+}$  离子轰击 LiF 晶体的在线发光光谱结果 (a) 在线发光光谱的峰位分布; (b) 不同辐射剂量下的光谱强度演化 (其中 p 代表束流脉冲发次)

Fig. 2. Luminescence spectrum of 260 MeV/u  $\text{Xe}^{36+}$  ion bombardment on LiF crystals: (a) The peak position distribution of the luminescence spectrum; (b) the spectral intensity evolution at different radiation doses (where p represents the number of beam pulses).

### 3 实验结果与分析讨论

#### 3.1 束靶作用中的离子激发光谱

实验过程中随着辐照剂量的提高, LiF 的在线发光光谱被连续监测, 图 2(a) 为  $\text{Xe}^{36+}$  离子轰击 LiF 晶体的一个脉宽作用时间内 (300 ns), 靶区的特征发射光谱以及峰位的分布图. 从图 2(a) 可看出, 在 200—400 nm 波段区域, 分别有 4 个峰出现, 238 nm 处的峰为俘获自由激子过程引起的发射峰, 通常认为是由两个卤化物离子俘获空穴引起的<sup>[14]</sup>; 270 nm 和 327 nm 处的两峰来源于离子激发晶体材料的激子发光; 375 nm 处的峰值对应于 LiF 晶体中的氧原子或镁离子杂质发光峰. 另外在可见和近红外波段的光谱主要有 690 nm 处的  $\text{F}_2$  色心发光和 540 nm 处的  $\text{F}_3^+$  的色心发光<sup>[15]</sup>, 其中在 425 nm 处有部分的晶体的杂质发光.

图 2(b) 为靶区内不同辐照剂量下的发射光谱 (以脉冲发次 p 间接代表辐照剂量), 可以明显地看到位于 690 nm 处的  $\text{F}_2$  和 540 nm 处的  $\text{F}_3^+$  的发光强度随辐照剂量增大逐渐增强, 因为随着剂量的不断增大,  $\text{F}_2$  与  $\text{F}_3^+$  色心的体积浓度逐渐增大, 相应的特征发光强度也随之增大<sup>[16]</sup>. 由于 Xe 离子具有较高的能量, 入射深度较深, 并且在大范围内存在的固体晶格数量较多, 相应的晶体场环境对其的影响较弱, 所以晶体发光位置未发生太大变化. 随着辐照剂量的不断提升, 一直到 125 p (p 代表束流脉冲发次) 时才观测到明显的晶体颜色变化, 如图 3 所示, 在离子外围颜色为黄色, 在离子核心区域, 随着离子沉积能量密度的升高样品变为棕色与深棕色.

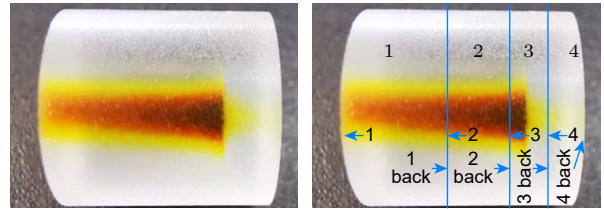


图 3  $\text{Xe}^{36+}$  辐照后的 LiF 样品图以及沿束流方向解离示意图, 图中箭头指向面即图 4(a) 相应的测试面 (不代表实际测试位置, 测试位置位于每个切面中心变色处)

Fig. 3. Diagram of LiF sample after irradiation with  $\text{Xe}^{36+}$  and schematic diagram of dissociation along the beam direction. The arrow in the figure points to the corresponding testing surface in Fig. 4(a) (which does not represent the actual testing position, and the testing position is located at the discoloration point at the center of each section).



碱卤化物本身一般在可见光波段是无色透明的, 色心等缺陷的产生会使晶体变色. 在碱卤化物晶体中, 卤素离子空位带正电荷, 能够俘获一个电子, 形成一个色心, 称为 F 色心<sup>[17]</sup>; 若有两个相邻的卤素离子空位可联合俘获两个电子, 此缺陷称为  $F_2$  色心. 晶体中相邻的一对卤素离子结合成卤素分子且带一个负电荷, 这个复合体能够俘获一个空穴, 达到电中性而稳定, 这种复杂的缺陷称为  $V_k$  色心<sup>[10]</sup>. 图 3 中样品晶体的变色区域具有非常复杂的损伤结构, 重离子束轰击 LiF 靶后, 由于能量沉积密度的改变, 垂直束线方向上由外到内产生了缺陷分布. 最外围黄色区域为简单色心, 主要为 F 色心, 与传统的辐射类似, 所有种类的离子都在离子径迹周围形成高达几十纳米的单一缺陷. 中层浅棕色区域为小型聚集体, 主要为  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_3^+$  等色心<sup>[12]</sup>. 对于最内层深棕色区域 (轨道核心处) 缺陷主要为更复杂的缺陷聚集体或团簇, 例如分子氟包裹体、金属锂胶体等<sup>[18]</sup>. 轨道核心完全由重离子的炮弹离子形成, 各向异性的小角度 X 射线散射证明了核心确实存在<sup>[12]</sup>, 主要原因可能是圆柱半径 1—2 nm 内能量沉积密度变化所引起的电子密度的变化. Trautmann 等<sup>[7]</sup>表明当离子达到阻止本领阈值 4.2 keV/nm 时会形成轨道核心. 随着离子径迹由外围到中心, 晶体内的能量沉积密度不断提高,

使得外围到中心出现不同的晶体缺陷. 正是因为这种缺陷分布, 使得我们未能在光谱中发现明显的缺陷存在的证据.

### 3.2 X 射线晶体衍射测试

为了对晶体内因不同的辐射剂量引起的不同能量沉积密度造成的颜色变化作进一步空间分辨的分析, 我们沿束流方向将图 3 样品解离为 1/1 back, 2/2 back, 3/3 back, 4/4 back 四个部分共 8 个面进行 XRD 测试 (测试面示意图见图 3), 每次测试均将测试点置于样品中心变色处, 测试结果如图 4(a) 所示, 最下方为实验中所使用 LiF 晶体的标准卡, 上方依次为解离后晶体的各个面的测量结果, 其中 1, 2, 3, 4 为各部分沿入射方向的前表面, 1 back, 2 back, 3 back, 4 back 为各部分沿入射方向的后表面. 由 1 到 2 的变化可见在前期的过程中主要由于电子能损造成的色心变化, 核能损相对而言对于晶体结构影响较大. 在 2 back 到 3 的变化可以观测到晶体的混乱程度在增加. 同时对各个阶段对比 LiF 结构标准卡, 除 3 号区域外, 均可看到和标准卡比对完好. 在 3 号区域中, 可以看到  $52.6^\circ$  范围内形成了新的结构相.

图 4(b) 给出了 3 号区域的 XRD 新相分析, 最下方为 3 号区域的相图, 上方为各种 LiF 结构的

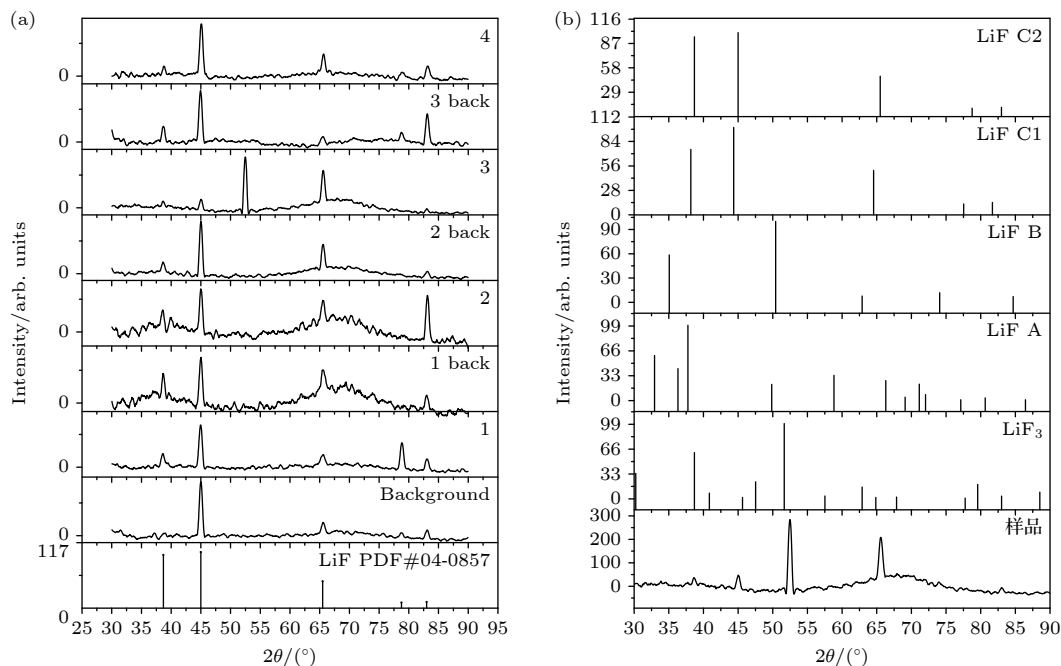


图 4 (a)  $Xe^{36+}$  离子束轰击后 LiF 晶体各解离面的 XRD 测试结果; (b) 区域 3 的 XRD 对比图

Fig. 4. (a) XRD test results of various dissociation surfaces of LiF crystals after  $Xe^{36+}$  ion beam bombardment; (b) XRD comparison diagram in region 3.

标准相图, 经过对比可以发现新结构相可能来源于  $\text{LiF}_3$  ( $\text{LiF}+\text{F}_2$ ) 的相, 此相为损伤后的  $\text{LiF}$  晶格与分子氟在高能量沉积密度下复合产生. Knutson 等<sup>[18]</sup> 在 1965 年就曾在辐照后的  $\text{LiF}$  中观测到分子氟的产生. 而在本次实验中辐照并未穿透样品, 同时极短的脉冲间隔导致所产生的分子氟无法逸散, 在辐照的末端布拉格峰区域即 3 区域大量堆积. 在轨道核心区域随着能量沉积密度的逐渐提高, 所产生的分子氟与被激发的电子形成  $V_k$  色心, 与损伤后的  $\text{LiF}$  晶格复合形成大量分子氟包裹体  $\text{LiF}_3$  ( $\text{LiF}+\text{F}_2$ ), 同时失去氟的锂离子由于真空条件无法被氧化从而聚合形成锂胶体, 导致 3 区域的 XRD 相图剧烈变化. 这种新的结构相易在空气中分解, 将样品暴露于空气中一段时间后再进行 XRD 测试时, 3 区域即恢复正常的结构相.

重离子辐照可以直接取代晶格原子或通过平衡位置的电子激发破坏基质晶格的局部秩序, 从而使晶体产生各种缺陷. 在很高的能量情况下, 炮弹离子与靶原子之间的弹性碰撞可以忽略不计, 它们之间的相互作用特征几乎是纯的电子激发<sup>[19]</sup>. 在重离子束辐照且高温高压的条件下可能会在布拉格峰区产生更复杂的缺陷, 比如分子氟包裹体或锂胶体. 而我们的实验并未对靶区的温度压强进行限制, 在重离子束能量较高的情况下依然出现了这些缺陷. 并且这种缺陷处于轨道核心处被简单或小型聚集体的中心包裹, 因为自吸收现象, 我们无法在在线发射光谱中观测到, 只能在之后的 XRD 与 XPS 分析中看到这些缺陷存在的证据<sup>[20]</sup>. 重离子束轰击  $\text{LiF}$  的过程中在布拉格峰前, 色心的产生主要来源于密集的电子激发, 在布拉格峰值位置核能损逐渐变重要. 垂直束流方向的外围简单色心主要来源于热扩散效应或膨胀后造成的压致电离. 束流末端中心的简单色心以及各种复杂缺陷主要来源于高能量沉积密度下的电离激发. 这种变化不是  $\text{LiF}$  晶体独有, 类似的离子晶体特别是碱卤化物在重离子束的辐照下会产生各种缺陷以及色心, 但在室温下, 只有 F 中心保持稳定, 而间隙 ( $\text{H}$  和  $\text{X}_{\text{int}}^-$ )、阴离子空位  $\text{v}_a^+$  是可移动的, 可以与其他缺陷相互作用, 特别是形成复杂的色心和聚集体<sup>[18]</sup>. 高通量辐照由于能量沉积密度的提高增大了缺陷浓度并加强了它们之间的相互作用, 以至于在轨道核心处产生了新的结构相.

### 3.3 X 射线光电子能谱分析

为了进一步验证新的结构相的产生, 将相同的靶材提前制作成堆叠层状, 并且通过理论计算提前将布拉格峰区固定在第 4 块层状靶的背面开展了重复实验. 第 2 次实验采用 430 MeV/u  $^{84}\text{Kr}^{26+}$  离子束对样品进行辐照, 并限制与之前相同的辐照剂量. 离子束束斑较之前相比较较大, 可以覆盖整个靶. 从实验结果来看, 被辐照部分与之前同样有明显的变色, 越靠近中心部分变色越明显, 同时相比之前的实验由于辐照束斑较大, 聚焦于某一处的剂量较低, 导致变色现象与图 3 相比稍浅.

实验之后我们分别对前 4 块堆叠层状靶的前后 2 个面共 8 个面的中心处进行 XPS 分析, 结果如图 5 所示, 其中 F 代表前表面, B 代表后表面. 从结果来看, 前 7 个表面均只有氟元素在结合能为 684—685 eV 处的结构峰, 此峰为金属氟化物中氟元素的 1s 态的结合能, 符合氟元素在  $\text{LiF}$  中的固有性质. 第 8 个表面也就是第 4 个靶的背面, 出现了氟元素的另一个结构峰, 此峰来源于氟的有机聚集体<sup>[20]</sup>. 同时 XPS 分析结果显示 4B 面上的锂

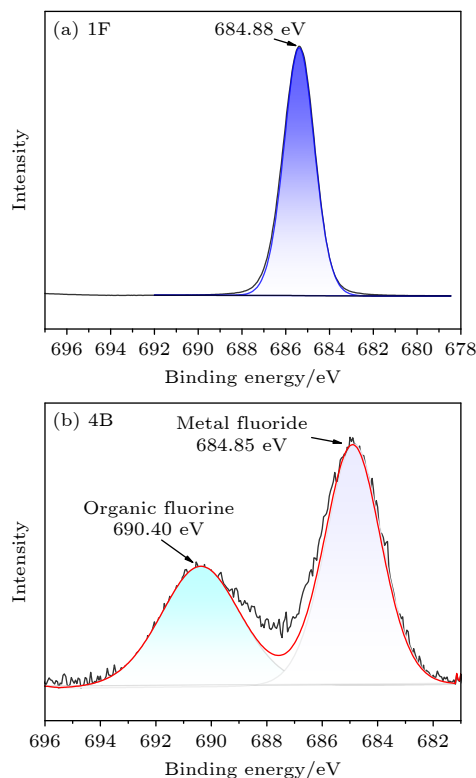


图 5 XPS 分析结果 (a) 前 7 个面的测量结果; (b) 最后一个面的测量结果

Fig. 5. XPS analysis results: (a) The measurement results of the first seven faces; (b) the measurement results of the last face.

元素占比相较于其余 7 个面有略微增加. 样品在空气中暴露一段时间后, 由于本次采用堆叠层状靶并且布拉格峰区位于最后一个面, 所以一部分新产生的氟分子可能逸散至外界, 一部分氟分子暴露在空气中形成氟的有机聚集体, 不再维持原本 LiF 的结构. 该实验结果印证了我们推断的重离子束辐照 LiF 引起的新的结构相产生, 也间接反映了样品内部确实产生了上述新的结构缺陷.

## 4 结 论

本工作研究了 LiF 靶材在 GeV 重离子束辐照下发生的颜色变化以及可能的内部损伤, 并通过 XRD 以及 XPS 的方法间接观测到了分子氟包裹体这种复杂缺陷的产生. 结果发现 LiF 晶体在 GeV 离子束室温辐照下产生的缺陷主要为 F 色心和小型聚集体  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_3^+$  色心; 越靠近轨道核心处离子能量越高, 所产生的离子径迹中的能量沉积密度越大, 从而使缺陷浓度显著增大; 在离子沉积的布拉格峰区发现了更复杂的缺陷聚集体分子氟包裹体, 此前发现的此类复杂缺陷均在高温条件下产生, 而我们通过增大辐射剂量在室温下也发现了此类复杂缺陷<sup>[20]</sup>, 这可能为各种相似靶材在高剂量辐照下的改性, 也为离子束驱动的高能量密度物理的靶材选定提供了一定参考.

## 参考文献

[1] Kang W, Du Y, Cao S, et al. 2020 *Sci. Sin. Phys. Mech.*

- Astron.* **50** 112004
- [2] Yang J, Chen Y, Shen G, et al. 2020 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **50** 112011
- [3] Matsubayashi M, Faenov A, Pikuz T, et al. 2011 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* **651** 90
- [4] Perez A, Davenas J, Dupuy C H S 1976 *Nucl. Instrum. Methods* **132** 219
- [5] Wangts Z G, Dufourt C, Paumiertt E, Toulemonde M 1994 *J. Phys.: Condens. Matter* **6** 6733
- [6] Perez A, Balanzat E, Dural J 1990 *Phys. Rev. B* **41** 3943
- [7] Trautmann C, Toulemonde M, Schwartz K, et al. 2000 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **164–165** 365
- [8] El-Said A S, Cranney M, Ishikawa N, et al. 2004 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **218** 492
- [9] Müller A, Neumann R, Schwartz K, Trautmann C 1998 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **146** 393
- [10] Toulemonde M, Assmann W, Trautmann C, Grüner F 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 057602
- [11] Trautmann C, Schwartz K, Geiss O 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 3560
- [12] Schwartz K, Trautmann C, Steckenreiter T, Geiß O, Krämer M 1998 *Phys. Rev. B* **58** 11232
- [13] Davidson A T, Schwartz K, Comins J D, Kozakiewicz A G, Toulemonde M, Trautmann C 2002 *Phys. Rev. B* **66** 214102
- [14] Schwartz K, Trautmann C, El-Said A S, Neumann R, Toulemonde M, Knolle W 2004 *Phys. Rev. B* **70** 184104
- [15] Pikuz T, Faenov A, Fukuda Y, et al. 2012 *Opt. Express* **20** 3424
- [16] Lushchik A, Lushchik Ch, Schwartz K, et al. 2007 *Phys. Rev. B* **76** 054114
- [17] Thevenard P, Guiraud G, Dupuy C H S, Delaunay B 1977 *Radiat. Eff.* **32** 83
- [18] Knutsont D, Bray P J 1966 *J. Phys. Chem. Solids.* **27** 147–161.
- [19] Dauletbekova A, Schwartz K, Sorokin M V, et al. 2015 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **359** 53
- [20] Ditter M, Becher M, Orth S, et al. 2019 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **441** 70

# Internal structural changes in crystals induced by GeV heavy ion beam irradiation of LiF\*

Chen Yu-Peng<sup>1)2)</sup> Shi Lu-Lin<sup>2)3)</sup> Wang Yu-Yu<sup>2)4)†</sup> Cheng Rui<sup>2)4)</sup>  
Yang Jie<sup>2)4)</sup> Chen Liang-Wen<sup>2)4)</sup> Fan Wei-Li<sup>1)</sup> Dong Jun-Yu<sup>2)</sup>

1) (School of Physics and Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

2) (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

3) (School of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

4) (Advanced Energy Science and Technology Guangdong Provincial Laboratory, Huizhou 516000, China)

( Received 22 May 2024; revised manuscript received 20 June 2024 )

## Abstract

When an incident high-energy heavy ion beam enters into solid material, the energy deposition density

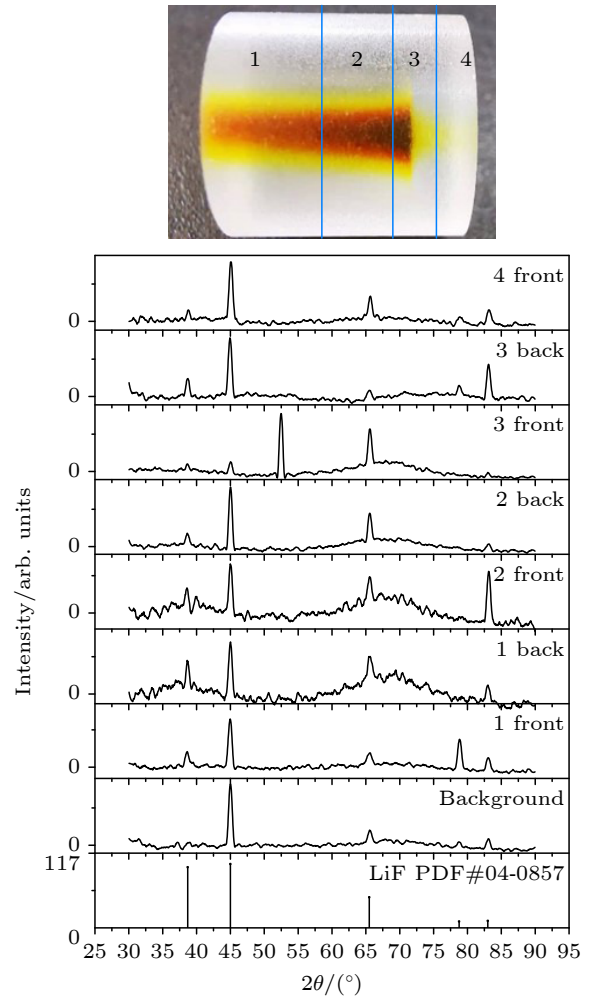
along the ion flight path can change the temperature and pressure of macroscopic target, and new material defects can be created under the high-pressure and high-density conditions. To accurately control the extreme state in material generated by heavy ion beam, it is necessary to conduct in-depth research on the energy deposition density of ions and ascertain the new potential defects in matter. Reported in this work is the new experiment conducted on the HIRFL-CSR at Lanzhou, with the extracted 264 MeV/u  $\text{Xe}^{36+}$  ion beams irradiating an LiF crystal target. The emission spectrum of the LiF is measured *in-situ*. Moreover, the crystal color is observed to vary along the ion path, and X-ray diffraction (XRD) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) are used to observe the potential new phases at different positions of crystal through the target dissociation method.

It is apparent that in No. 3-front a new phase around  $52.6^\circ$  is found in XRD result, which is believed to be  $\text{LiF}_3$  ( $\text{LiF}+\text{F}_2$ ) structural phase and appears in the Bragg peak region of Xe ions in LiF. Furthermore, to verify this result, a similar experiment is done by using a 430 MeV/u  $^{84}\text{Kr}^{26+}$  ion beam, and the stacked layered LiF target is analyzed after the irradiation. The XPS result shows more complex defects aggregating in the Bragg peak region of Kr ions in LiF at room temperature. In previous study, such complex defects were all created under high temperature conditions. We find that these complex defects can be produced around the Bragg peak region of ions in LiF at room temperature, resulting in a temporally high temperature and high pressure condition. This paper can provide some experimental evidences and references for the target material modification in heavy ion beam driven high-energy density physics research.

**Keywords:** LiF crystal, heavy ion beam, energy density, color center

**PACS:** 64.70.kp, 41.75.Ak, 34.50.Bw, 61.72.jn

**DOI:** 10.7498/aps.73.20240717



\* Project supported by the National Key Research and Development Program (Grant No. 2022YFA1602500), the National Natural Science Foundation of China for International (Regional) Cooperation and Exchange (Grant No. 12120101005), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12205247).

† Corresponding author. E-mail: wangyuyu@impcas.ac.cn

## GeV重离子束辐照LiF引起的晶体内部结构改变

陈宇鹏 史路林 王瑜玉 程锐 杨杰 陈良文 范伟丽 董俊煜

## Internal structural changes in crystals induced by GeV heavy ion beam irradiation of LiF

Chen Yu-Peng Shi Lu-Lin Wang Yu-Yu Cheng Rui Yang Jie Chen Liang-Wen Fan Wei-Li Dong Jun-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 156401 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240717

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240717>

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

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 面向高温介电储能应用的聚合物基电介质材料研究进展

Research progress of polymer based dielectrics for high-temperature capacitor energy storage

物理学报. 2020, 69(21): 217701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201006>

#### 烧蚀对强脉冲离子束在聚合物材料中能量沉积的影响

Influence of ablation on energy deposition in polymer material under irradiation of intense pulsed ion beam

物理学报. 2020, 69(11): 115202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200212>

#### 气体团簇离子束两步能量修形法的平坦化效应

Double-step gas cluster ion beam smoothing

物理学报. 2021, 70(5): 053601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201454>

#### 一种用于强流脉冲离子束的束流输出稳定性实时监测方法

A method of real-time monitoring beam output stability of intense pulsed ion beam

物理学报. 2023, 72(17): 175205 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230854>

#### 基于强流离子源的离子束溅射镀膜设备均匀性优化

Uniformity optimization of ion beam sputtering coating equipment based on strong current ion source

物理学报. 2024, 73(5): 058101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231491>

#### 离子束表面处理对光电阴极发射的影响

Effect of ion-beam surface treatment on photocathode emission

物理学报. 2021, 70(21): 218503 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210587>