

IBIL 在氚增殖材料研究中的应用

仇猛淋¹, 褚莹洁¹, 胥 密¹, 王广甫^{1,2,*}

1. 北京师范大学核科学与技术学院, 北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京 100875;
2. 北京市辐射中心, 北京 100875

摘要: 在氚增殖材料辐照效应的研究中, 离子激发发光 (ion beam induced luminescence, IBIL) 是一种高效实用的实时分析技术。本文介绍了国外 MeV 离子束对多种氚增殖材料的 IBIL 研究。研究表征了样品中的辐照缺陷特征及其演变情况, 对辐照缺陷的产生机制进行了讨论, 并提出辐照过程中的相关动力学模型。最后, 介绍了北京师范大学串列加速器上 IBIL 装置应用现状, 并对 IBIL 应用在氚增殖材料研究中的前景进行了讨论。

关键词: 氚增殖材料; 辐照效应; IBIL

中图分类号: TL99 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2016)01-0057-08

doi: 10.7538/hhx.2016.38.01.0057

Application of IBIL in Tritium Breeding Materials Research

QIU Meng-lin¹, CHU Ying-jie¹, XU Mi¹, WANG Guang-fu^{1,2,*}

1. College of Nuclear Science and Technology, Key Laboratory of Beam Technology and Material Modification Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China

Abstract: Ion beam induced luminescence (IBIL) is an efficient and practical real-time analysis technology in the radiation effect research of tritium breeding materials. The IBIL research work in the irradiation effect of tritium breeding materials using MeV ion beam was reviewed in this paper. The characteristics and evolutions of irradiation defects under different experimental conditions were reported mainly. Based on the analysis of IBIL, the generation mechanisms of irradiation defects were discussed and the kinetic model in the process of irradiation was also presented. Finally, the IBIL set-up at the tandem accelerator of Beijing Normal University was presented and some prospects in tritium breeding materials research using IBIL were suggested.

Key words: tritium breeding materials; irradiation effect; IBIL

目前核聚变技术的研究热点之一就是氚增殖材料(锂基陶瓷)的相关研究。我国已开展 20 余年的固态氚增殖材料的制备工作, 如 Li_2O 、 LiAlO_2 、

Li_2ZrO_3 、 Li_2TiO_3 和 Li_4SiO_4 等, 初步采用锂基陶瓷 Li_4SiO_4 材料, 同时考虑其他性能优异的材料作为必要的候选材料^[1-3]。

收稿日期: 2015-10-10; 修订日期: 2015-11-30

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项基金资助项目(2012YQ180118); 北京市自然科学基金资助项目(1142006)

作者简介: 仇猛淋(1991—), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, 核技术及应用专业

* 通信联系人: 王广甫(1964—), 男, 河北邢台人, 教授, 从事离子束分析研究, E-mail: 88088@bnu.edu.cn

氚增殖材料中的锂与中子反应,生成 MeV 的氚实现氚的“自持”。反应过程中,产生 MeV 的氚、氦等二次离子与氚增殖材料相互作用,在材料中形成多种类型的缺陷,从而影响氚增殖材料的功能性以及“自持”氚的输运作用。目前从理论计算上预测三元锂基陶瓷中辐照缺陷相关特性还存在一定的困难,需要结合相关实验进行研究。因此,氚增殖材料的 MeV 离子辐照效应研究是十分必要的,MeV 离子辐照与中子直接辐照结果相结合,将有助于厘清中子辐照氚增殖材料过程中直接损伤与二次离子损伤的相关机理。现阶段我国在氚增殖材料的研制过程中尚缺乏系统的辐照效应研究,总体来说正处于起步阶段,研究基础和理论水平有待进一步提高。

现阶段的研究结果认为辐照过程中产生的缺陷在“自持”氚扩散过程中起着很重要的作用:(1)氧空位缺陷(ODC,可形成 E 色心或 F 色心)、非桥氧空穴中心(NBOHC)以及过氧自由基(POR)等缺陷会捕获生成的氚,并影响氚的价态及释氚温度;(2)氚在释放过程中需要多种类型缺陷的参与,并受环境条件影响较大^[4-7]。在材料辐照效应的研究中,常规的方法为预先对材料进

行不同辐照条件的处理,随后利用多种分析方法进行离线非原位的表征,分析缺陷的类型和结构。而离子激发发光(Ion beam induced luminescence, IBIL)技术则是在离子辐照的过程中探测材料中原子外层电子激发跃迁产生的发光光谱,实时高效地研究材料本身及辐照过程中产生的缺陷的种类、结构以及缺陷的演变情况^[8-9]。将 IBIL 应用到氚增殖材料离子辐照研究中,可为材料缺陷研究提供原位数据分析。

本文介绍了国外 MeV 离子束对 Li_2O 、 Li_2TiO_3 、 Li_2ZrO_3 、 Li_2SnO_3 、 Li_2SiO_3 、 Li_4SiO_4 和 LiTaO_3 等材料的单晶样品或陶瓷样品开展的 IBIL 研究^[10-14],并对本实验室 IBIL 装置现状进行了简要介绍,讨论了其在氚增殖材料研究中的应用前景。

1 氚增殖材料 IBIL 研究

1.1 二元锂基材料 Li_2O

日本 Asaoka 等^[10]利用 2 MeV 的 He^+ 束辐照二元锂基氧化物 Li_2O 的陶瓷样品及单晶样品,不同温度下的 IBIL 光谱图示于图 1。由图 1 可知,出现了中心分别位于 260、340、380、510 nm

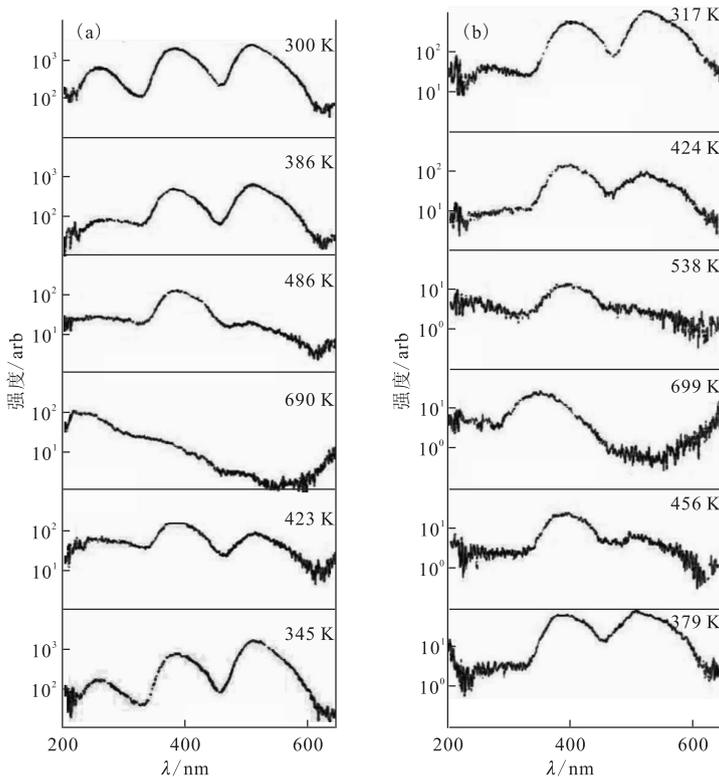


图 1 Li_2O 的陶瓷样品(a)及单晶样品(b)在不同温度条件下的 IBIL 光谱^[10]

Fig. 1 IBIL spectra of sintered lithium oxide(a) and single crystal lithium oxide(b) at various temperatures^[10]

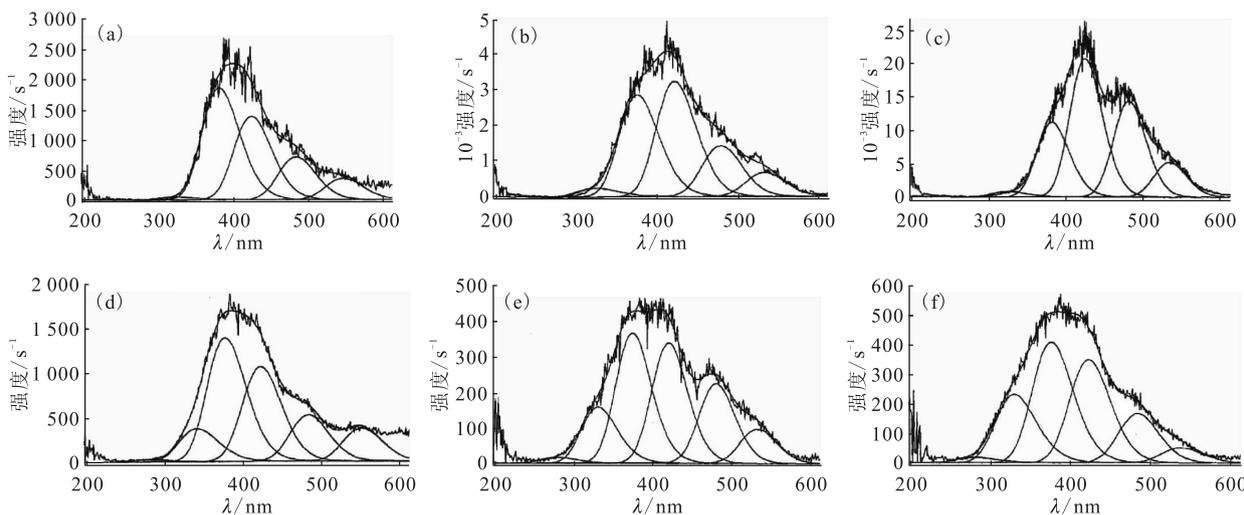
的四个发射峰。同时可以观察到陶瓷样品与单晶样品中发射峰的强度及变化行为存在明显差异。结合吸收光谱测试,分析认为 260 nm 和 510 nm 处的发射峰可能与材料中的羟基有关,受样品的制备工艺和预处理影响较大;340 nm 和 380 nm 处的发射峰对应缺陷为 F^0 色心和 F^+ 色心。通过对比 IBIL 光谱中的强度变化和峰位变化,可以明显观察到高温条件下缺陷的复原以及 F^+ 色心转型成 F^0 色心这一过程。

Asaoka等^[10]的研究结果表明即使是配比及

组成成分都相同的材料,由于制备工艺上的差异以及不同的实际使用环境,产生的辐照缺陷会有着不同的强度变化。IBIL 光谱灵敏地探测到缺陷的演变情况,可详细地研究材料中辐照缺陷在不同条件下的差异。

1.2 三元锂基材料 Li_2TiO_3 、 Li_2ZrO_3 和 Li_2SnO_3

Moritani等^[11]则采用 2 MeV 的 H^+ 束和 He^+ 束对 Li_2TiO_3 、 Li_2ZrO_3 和 Li_2SnO_3 三种三元锂基材料陶瓷样品进行 IBIL 研究(图 2—4)。并对不同温度下的 IBIL 光谱进行了对比分析。

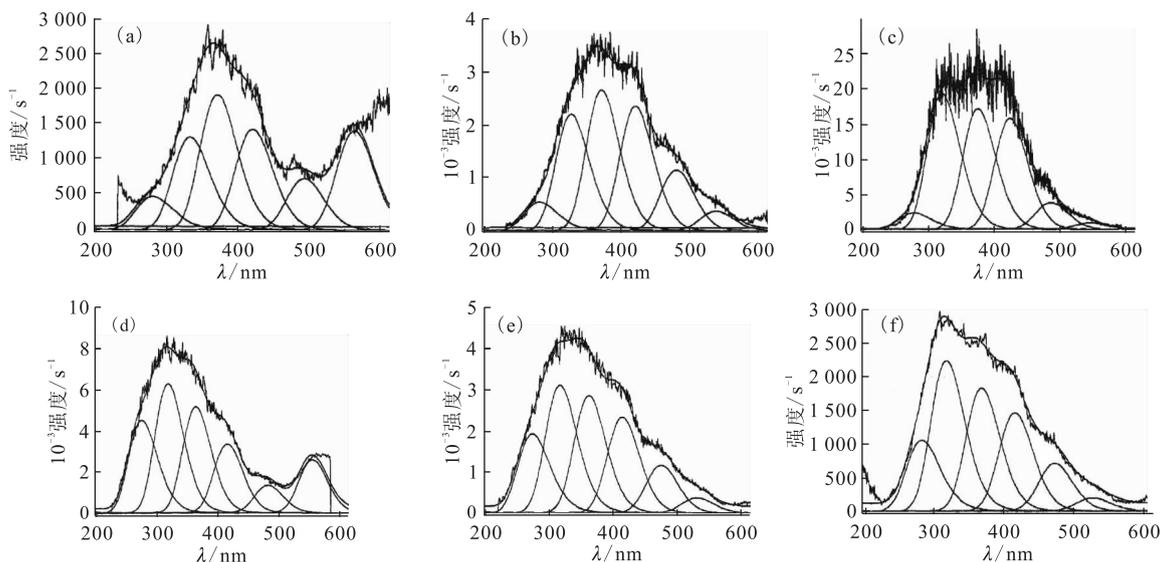


光滑曲线为拟合峰(图 3—5 同此)

(a)——693 K,(b)——431 K,(c)——303 K,(d)——697 K,(e)——426 K,(f)——312 K

图 2 不同温度下 Li_2TiO_3 材料在 H^+ 束(a—c)和 He^+ 束(d—f)轰击下的 IBIL 光谱^[11]

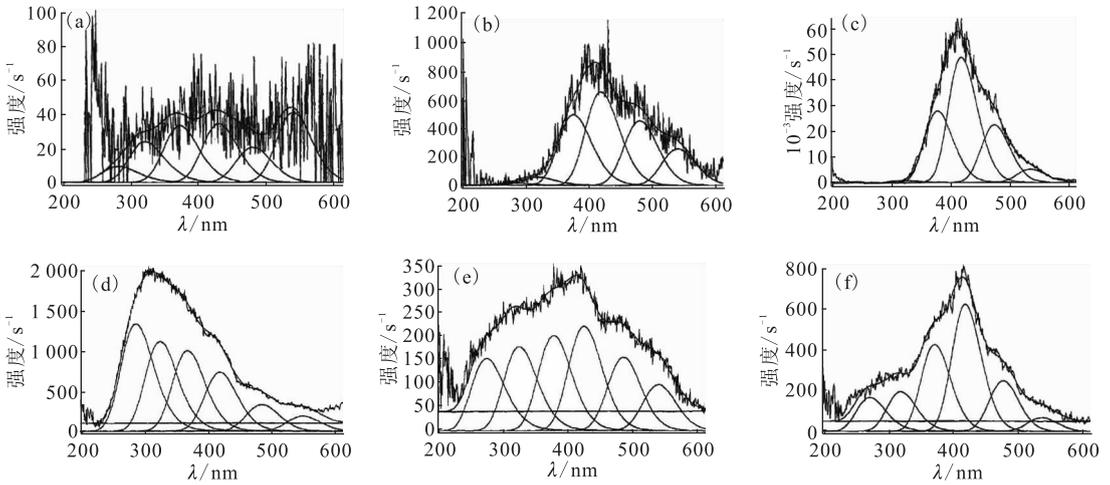
Fig. 2 IBIL spectra of Li_2TiO_3 under H^+ (a-c) and He^+ (d-f) irradiation at different temperatures^[11]



(a)——683 K,(b)——552 K,(c)——316 K,(d)——711 K,(e)——509 K,(f)——311 K

图 3 不同温度下 Li_2ZrO_3 材料在 H^+ 束(a—c)和 He^+ 束(d—f)轰击下的 IBIL 光谱^[11]

Fig. 3 IBIL spectra of Li_2ZrO_3 under H^+ (a-c) and He^+ (d-f) irradiation at different temperatures^[11]



(a)——545 K, (b)——428 K, (c)——321 K, (d)——825 K, (e)——473 K, (f)——313 K

图 4 不同温度下 Li_2SnO_3 材料在 H^+ 束(a—c)和 He^+ 束(d—f)轰击下的 IBIL 光谱^[11]

Fig. 4 IBIL spectra of Li_2SnO_3 under H^+ (a-c) and He^+ (d-f) irradiation at different temperatures^[11]

由图 2—4 可知,相对于二元锂基陶瓷材料 Li_2O ,三元锂基陶瓷材料的 IBIL 光谱更加复杂。这是由于多种类型缺陷的存在,各缺陷对应的 IBIL 发射峰存在重叠现象。通过不同温度下的 IBIL 光谱分析,表明不同种类的缺陷对温度变化有着不同的“敏感”程度。Moritani 等^[11]对光谱进行分峰拟合处理,将采集的 IBIL 光谱利用最小二乘法拟合

为几个高斯峰的叠加,拟合结果列入表 1。由表 1 可知,每个发射峰可对应不同缺陷结构产生的 IBIL 光谱,结果表明,三元锂基陶瓷材料的不同缺陷对应的发射峰在不同离子种类辐照下有着显著的差异。根据缺陷在高温下的变化行为分析,Moritani 等认为中心小于 340 nm 的几种缺陷与 F^0 色心相关,大于 380 nm 的几种缺陷则与 F^+ 色心相关。

表 1 分峰拟合结果^[11]
Table 1 Results of peak fitting^[11]

陶瓷材料	入射离子	发射峰 1/nm	发射峰 2/nm	发射峰 3/nm	发射峰 4/nm	发射峰 5/nm	发射峰 6/nm
Li_2TiO_3	H^+	280	325	378 ± 4	423 ± 3	482 ± 4	536 ± 4
	He^+	280	335 ± 7	376 ± 3	421 ± 2	481 ± 2	535 ± 3
Li_2ZrO_3	H^+	280	327 ± 4	371 ± 5	421 ± 3	483 ± 8	541 ± 6
	He^+	276 ± 6	319 ± 5	366 ± 5	416 ± 3	478 ± 3	531 ± 2
Li_2SnO_3	H^+	280	320	376 ± 5	421 ± 4	477 ± 5	536 ± 7
	He^+	278 ± 7	321 ± 4	371 ± 5	421 ± 2	485 ± 4	540 ± 5

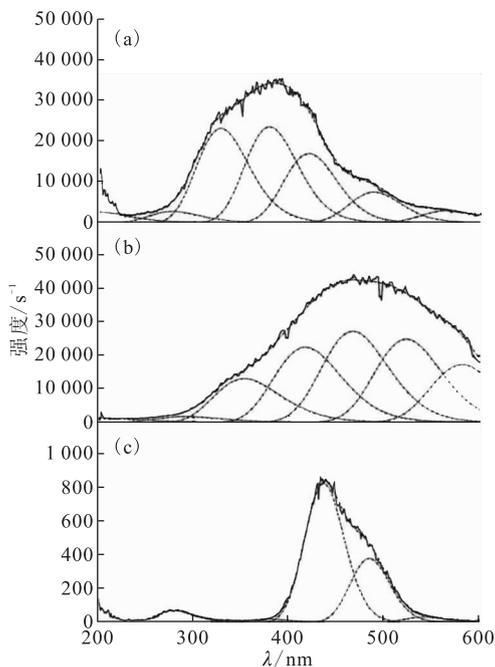
据此,对三元锂基陶瓷材料中的缺陷产生机制进行了探讨,推测反应过程如式(1—4)。(1)式中的三元锂基陶瓷材料在离子束辐照下跃迁至激发态;式(2)表现的是第一步生成 F^+ 色心的过程;式(3)、式(4)则是第二步生成 F^0 色心的过程,说明 F^0 色心的形成需要更多能量,合理地解释了 F^0 色心在热激发或高温条件下才能生成的原因。



1.3 三元锂基材料 Li_2SiO_3 和 Li_4SiO_4

Moritani 等^[12]随后对三元锂基陶瓷材料 Li_2SiO_3 和 Li_4SiO_4 进行 IBIL 分析。测试选用的离子为 2 MeV 的 H^+ 束和 He^+ 束,同时采集了纯度较高的 SiO_2 的 IBIL 光谱与 Li_2SiO_3 和 Li_4SiO_4 作对比分析,结果示于图 5,讨论了辐照过程中缺陷的产生机制,并对辐照过程中可能涉及的动力学模型进行推算。由图 5 可知,与 Li_2TiO_3 、 Li_2ZrO_3 、 Li_2SnO_3 等锂基陶瓷材料辐照

过程中的 IBIL 光谱类似, Li_2SiO_3 和 Li_4SiO_4 的 IBIL 光谱呈现出多种发射峰叠加的现象。结合相关缺陷研究分析:三元锂基陶瓷材料 Li_2SiO_3 和 Li_4SiO_4 产生的辐照缺陷中包含着二元锂基陶瓷材料 Li_2O 中的 F^+ 和 F^0 色心(硅酸盐中对应为 E 色心),此外还有非桥氧空穴中心 NBOHC 以及过氧自由基 POR 等缺陷。



(a)——297 K, 0.9 nA; (b)——296 K, 1.6 nA;
(c)——310 K, 50 nA

图 5 He^+ 束轰击下 Li_2SiO_3 (a)、 Li_4SiO_4 (b) 和 SiO_2 (c) 的 IBIL 光谱^[12]

Fig. 5 IBIL spectra of Li_2SiO_3 (a), Li_4SiO_4 (b) and SiO_2 (c) under He^+ irradiation^[12]

在研究温度对缺陷产生机制的影响过程中,选择在 IBIL 光谱采集过程中进行升温操作。结果发现荧光强度首先随着温度的上升达到峰值,随后温度继续升高荧光强度却逐渐降低至某一平衡状态,这一现象被称为超额荧光(excess luminescence)。超额荧光现象直观地说明:在升温过程中,对应缺陷的数量先上升至饱和状态,然后逐步衰减。 Li_2SiO_3 中 380 nm 发射峰的荧光强度在温度升高过程中的变化情况示于图 6^[12]。

在原有三元锂基陶瓷材料缺陷产生机制的研究基础上,将锂基硅酸盐材料中辐照缺陷的产生过程归纳为式(5—7)。反应(5)为锂基硅酸盐材料在离子束轰击下跃迁激发态的过程;反应(6)和

(7)为激发态的锂基硅酸盐材料在形成氧空位缺陷(ODC)过程中分别产生间隙氧原子(分子)和过氧联接的过程。

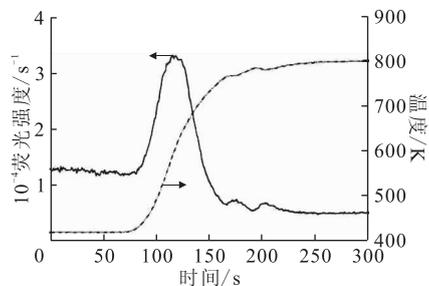


图 6 Li_2SiO_3 中 380 nm 发射峰的超额荧光现象^[12]

Fig. 6 Temperature-transient behavior of luminescence intensity at 380 nm for Li_2SiO_3 irradiated^[12]

在此基础上推算出辐照过程中的荧光强度公式为式(8)。

$$I = I_1 + I_2 = k_1 c(\text{Li}_{2n}\text{SiO}_{n+2}^*) + k_2 c(\text{Li}_{2n}\text{SiO}_{n+2}^*) \quad (8)$$

式中: I_1 和 I_2 分别为反应(6)和(7)的荧光强度; k_1 和 k_2 分别为反应(6)和(7)的反应速率,和温度相关,可由阿伦尼乌斯公式计算得出。

研究表明,辐照过程中,离子种类及温度的变化对缺陷的产生及演变有着较大的影响,而这些影响都可以在 IBIL 光谱上实时地表现出来。对于进一步研究缺陷的形成或分解的机理以及缺陷对“自持”氚的影响,IBIL 光谱上的差异表现可以作为一种有效的数据支持。对于 ODC 等辐照缺陷,由于本身的反磁性,无法用常见的缺陷分析技术电子顺磁共振法(ESR)来分析,但通过 IBIL 光谱可以直接观察到该类型缺陷的生成及演变情况。

1.4 三元锂基材料 LiTaO_3

近期, Hoshi 等^[13] 利用 IBIL 分析方法对三元锂基材料 LiTaO_3 在辐照过程中的形成和复原过程进行研究。实验选用 LiTaO_3 的单晶样品,入射离子选用 H^+ 、 He^+ 、 He^{2+} 和 O^+ 四种离子,离子能量为 0.3~2.4 MeV,温度为 80~300 K,每片样品粒子注量达到 1×10^{22} 离子/ m^2 。IBIL 光谱探测系统选用新型 CCD 相机单色仪。

采用和 Katsui 小组 IBIL 结合 SRIM(stopping and range of ions in matter)模拟计算类似的研究方

法^[14], Hoshi^[13]利用 SRIM 模拟计算了各入射离子在材料中的射程, 结合 IBIL 光谱分析, 揭示了 IBIL 的发光强度与离子入射射程成正相关关系, 结果示于图 7。同时发现 LiTaO_3 的 IBIL 发光强度随着粒子注量的增加而衰减, 而且入射离子质量数越大, 发光强度的衰减幅度更大(图 8^[13])。

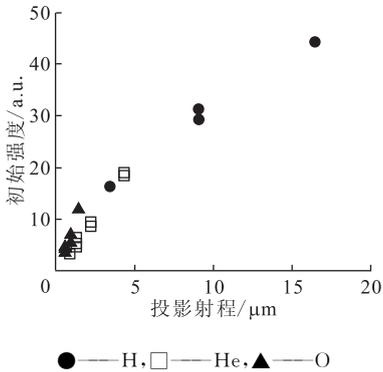


图 7 IBIL 发光强度与不同离子入射射程相关性^[13]
Fig. 7 Luminescence intensity plotted as a function of the projected range of hydrogen, helium and oxygen ions^[13]

此外, 将 SRIM 模拟计算得到的核阻止本领与电子阻止本领与发光中心的湮灭及复原速率相关联, 结果示于图 9^[13]。由图 9 可知, LiTaO_3 材料中发光中心的湮灭及复原速率与核阻止本领成正相关, 与电子阻止本领的关联较小。说明 LiTaO_3 材料中发光中心缺陷的破坏主要由核碰撞造成, 电子碰撞造成的影响很小。

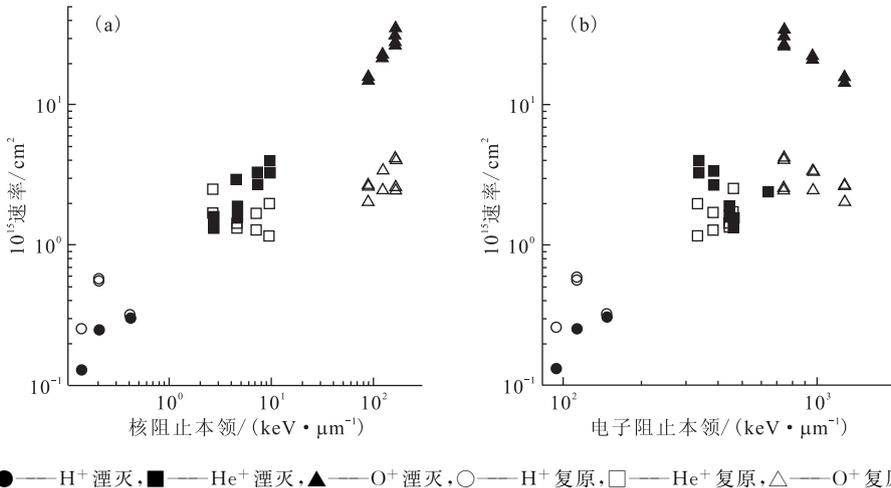


图 9 发光中心的湮灭及复原速率与核阻止本领(a)及电子阻止本领(b)的关联^[13]
●—H⁺湮灭, ■—He⁺湮灭, ▲—O⁺湮灭, ○—H⁺复原, □—He⁺复原, △—O⁺复原

Fig. 9 Annihilation and recovery rates of the luminescent center plotted as a function of nuclear stopping power(a) and electronic stopping power(b)^[13]

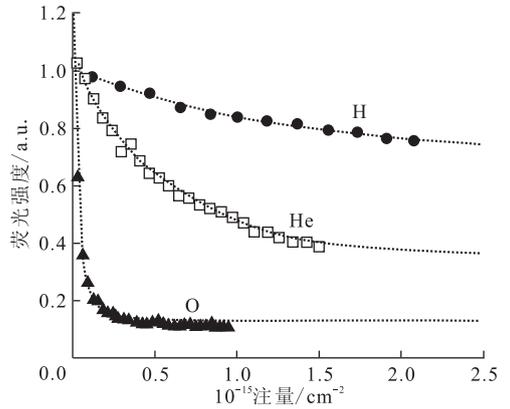


图 8 发光强度与不同粒子注量相关性^[13]

Fig. 8 Normalized intensity of ion-induced luminescence plotted as a function of fluence of hydrogen, helium and oxygen ions^[13]

另外还研究了 80 K 和 300 K 下发光中心缺陷的湮灭及复原速率的变化, 结果示于图 10^[13]。由图 10 可知: 辐照过程环境温度对 LiTaO_3 材料中发光中心缺陷的湮灭速率影响较小, 高温环境有利于复原速率的上升; 辐照过程中离子束轰击造成的局部温度升高也可导致复原速率的上升。

综上所述可以看出, IBIL 应用于不同氚增殖材料的辐照效应研究主要开展了以下工作: 根据光谱分析相关缺陷的类型与结构; 不同制备工艺下同种材料的 IBIL 光谱对比差异; 温度对辐照效应的影响; 辐照缺陷随注量的演变情况; 入射离子种类、能量对辐照效应的影响; IBIL 光谱与理论计算的关联。

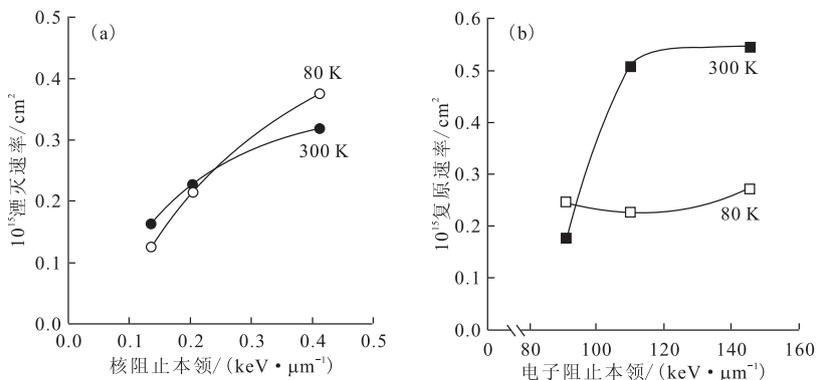


图 10 温度对发光中心缺陷的湮灭速率(a)及复原速率(b)的影响^[13]

Fig. 10 Annihilation rate(a) and recovery rate(b)

of the luminescent center plotted as a function of stopping power at 80 K and 300 K^[13]

1.5 IBIL 结果与中子辐照结果对比 (以 Li₄SiO₄ 为例)

肖成建等^[15]对 Li₄SiO₄ 微球进行了中子辐照处理,采用 ESR 测量了辐照后产生的缺陷。从 ESR 谱(图 11^[15])上得到的缺陷为 E' 色心,对应的朗德因子 $g=2.0015$; NBOHC,对应的 $g=2.0432$; POR 的特征吸收并不清晰。而日本 Moritani 等^[16]对 ESR 谱进行分解,认为 SiO₂ 骨架经中子辐照会产生 E' 色心、NBOHC 和 POR 三种色心。这与 IBIL 分析得到的结果^[12] (1.3 节)相一致,IBIL 分析作为一种实时原位分析技术,可与 ESR 谱等多种分析研究相结合,通过对辐照过程中的缺陷特征变化的在线监测,为缺陷特征的演变提供详实的数据支持。

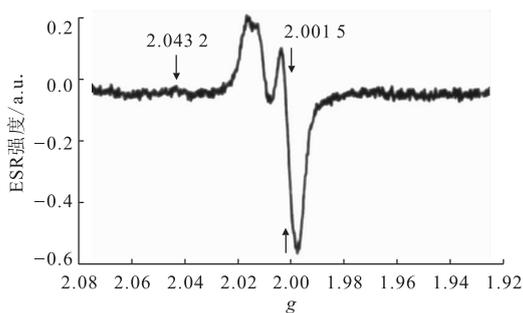


图 11 中子辐照 Li₄SiO₄ 的 ESR 谱^[15]

Fig. 11 ESR spectrum of Li₄SiO₄ under neutron irradiation^[15]

2 本实验室 IBIL 应用现状

北京师范大学串联加速器实验室在 GIC4117 型 2×1.7 MV 串联加速器原有内束 PIXE 分析

靶室基础上进行了 IBIL 分析系统的搭建工作,将原有观察窗口改为安装有光纤真空通管的铝制法兰,用以联接高性能光谱仪,实验过程中通过计算机控制光谱仪的操作及辐照过程中光信号的采集。GIC4117 串联加速器 IBIL 分析系统简图示于图 12。

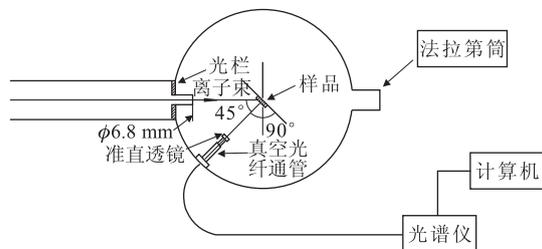
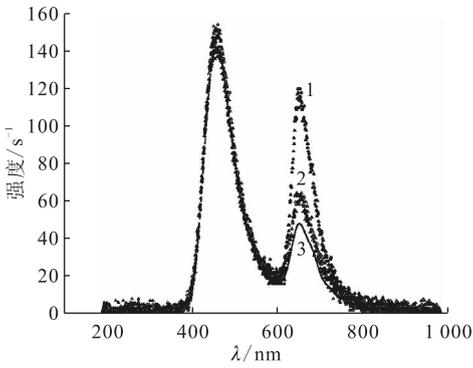


图 12 GIC4117 串联加速器 IBIL 分析系统简图

Fig. 12 Schematic diagram of IBIL set-up on GIC4117 tandem accelerator

在 IBIL 分析系统搭建完成之后,对 IBIL 分析系统中最常用的测试样品之一石英玻璃进行了测试。实验使用的 H⁺ 束能量为 2.5 MeV,束流大小为 10 nA,测试样品选用未经辐照处理的石英玻璃,IBIL 光谱采集的积分时间为 5 s。测试结果示于图 13。由图 13 可知,每一个 IBIL 光谱中心处于 460 nm 及 650 nm 处的两个发射峰,结合石英玻璃相关缺陷研究,认为 460 nm 处的发射峰是由氧空位中心 ODC 引起的,而位于 650 nm 的发射峰的出现则与非桥氧空穴中心缺陷 NBOHC 有关。从图 13 中的三个光谱对比可以看出,石英玻璃中 ODC 在辐照初期的浓度相对稳定;NBOHC 对辐照剂量较为敏感,发光强度衰减十分明显。



1——0~5 s, 2——5~10 s, 3——10~15 s

图 13 石英玻璃的 IBIL 光谱图

Fig. 13 Three IBIL spectra of quartz glass under H^+ irradiation

测试结果表明:GIC4117 串列加速器现有的 IBIL 分析系统可以灵敏地探测辐照过程中材料本征缺陷及辐照损伤引起的光学信号,从而分析相关缺陷的类型及结构;并可实时观测缺陷随辐照剂量的演变情况。

3 结 论

综上所述,IBIL 应用在氚增殖材料辐照效应研究中有明显的优势:(1) IBIL 分析技术采用 MeV 离子,可有效模拟实际应用中氚增殖过程生成的二次离子与材料的相关作用;(2) IBIL 分析技术将辐照过程与光谱测量合二为一,十分高效;(3) IBIL 可以实时原位地反映辐照过程中缺陷特征及其演变行为,可为氚释放过程中与缺陷的作用机理提供有效的原位数据。

目前我国针对锂基陶瓷氚增殖剂的辐照效应尚无广泛、系统的研究工作。IBIL 作为一种实时原位分析技术可以高效地研究不同实验条件下的材料辐照效应,验证国产锂基陶瓷氚增殖材料的相关制备工艺,并为氚增殖材料实际应用在辐照环境中提供可靠的实验数据支持。

参考文献:

[1] 赵林杰,肖成建,陈晓军,等. 固态氚增殖剂研究进展[J]. 核化学与放射化学, 2015, 37(3): 129-142.
 [2] 李姣龙. 固态氚增殖剂的制备研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
 [3] 李运姣,徐仓,李林,等. 固体氚增殖材料 Li_2TiO_3 制备研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(1): 182-190.

[4] 肖成建,陈晓军,高小铃,等. D^+ 注入 Li_4SiO_4 的表面化学状态及其热解吸行为[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(12): 1418-1422.
 [5] Moriyama H, Tanaka S, Noda K. Irradiation effects in ceramic breeder materials[J]. J Nucl Mater, 1998, 258(4): 587-594.
 [6] Oyaidzu M, Morimoto Y, Kodama H, et al. Correlation between annihilation of radiation defects and tritium release in Li_2TiO_3 [J]. J Nucl Mater, 2004, 329(8): 1313-1317.
 [7] Nishikawa Y, Oyaidzu M, Yoshikawa A, et al. Correlation between tritium release and thermal annealing of irradiation damage in neutron-irradiated Li_2SiO_3 [J]. J Nucl Mater, 2007, 367-370(4): 1371-1376.
 [8] Townsend P D, Wang Y. Defect studies using advances with ion beam excited luminescence[J]. Energy Procedia, 2013: 64-79.
 [9] Finch A A, Garcia-Guinea J, Hole D E, et al. Ion luminescence of zircon: rare earth emissions and radiation damage[J]. J Phys D: Appl Phys, 2004, 37(20): 2795-2803, 2809.
 [10] Asaoka Y, Moriyama H, Iwasaki K, et al. In-situ luminescence measurement of irradiation defects in lithium oxide[J]. J Nucl Mater, 1991, 183(3): 174-179.
 [11] Moritani K, Moriyama H. In situ luminescence measurement of irradiation defects in ternary lithium ceramics under ion beam irradiation[J]. J Nucl Mater, 1997, 248(1): 132-139.
 [12] Moritani K, Tanaka S, Moriyama H. Production behavior of irradiation defects in lithium silicates and silica under ion beam irradiation[J]. J Nucl Mater, 2000, 281: 106-111.
 [13] Hoshi K, Nagata S, Zhao M, et al. Ion-induced luminescence and damage process of $LiTaO_3$ [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, 2013, 315(8): 149-152.
 [14] Katsui H, Nagata S, Toh K, et al. Study on damage process and hydrogen effect in Li_2ZrO_3 by using ion-induced luminescence[J]. J Nucl Mater, 2009, (2): 1074-1077.
 [15] 肖成建. 锂陶瓷微球释氚行为及其与辐照缺陷的相关性研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2013.
 [16] Moritani K, Teraoka Y, Takagi I, et al. Electron spin resonance measurement of irradiation defects in vitreous silica irradiated with neutrons and ion beams[J]. J Nucl Mater, 2004, 329-333: 988-992.