

离子辐照 GaAs 的光致发光和拉曼散射研究

杨迪¹ 孙梦利¹ 袁伟¹ 杜鑫¹ 彭海波¹ 王铁山¹ 郭红霞²

1 (兰州大学 核科学与技术学院 兰州 730000)

2 (西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 利用 250 keV 质子和 4.5 MeV 氪离子(Kr^{17+})辐照未掺杂 GaAs, 注量分别为 $1 \times 10^{12} \sim 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 和 $3 \times 10^{11} \sim 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 使用光致发光谱和拉曼散射谱分析表征。发光谱的结果表明, 随着剂量增大, 质子辐照后的 C_{As} 峰及其声子伴线逐渐减弱, 913 nm 处的复合缺陷峰则先增大后减小, 此峰与材料制备时的 Cu 掺杂无关。Kr 离子辐照后本征发光峰则完全消失。拉曼散射谱的结果表明, 相比于质子辐照, Kr 离子辐照后 LO 声子峰峰位向低频方向移动, 出现非对称性展宽, 晶体结构发生明显改变。质子和 Kr 离子辐照效应的差异是由于移位损伤相差至少三个量级造成的。最后采用多级损伤累积(Multi-step damage accumulation, MSDA)模型得到了材料内缺陷的演化过程, 并很好地解释了随损伤剂量增大 GaAs 光学性能及晶体结构的变化趋势。

关键词 GaAs, 辐照效应, 光致发光谱, 拉曼散射谱

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.100201

Study on photoluminescence and Raman scattering in GaAs by ion irradiation

YANG Di¹ SUN Mengli¹ YUAN Wei¹ DU Xin¹ PENG Haibo¹
WANG Tieshan¹ GUO Hongxia²

1(School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

2(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract Background: GaAs is widely used as the second generation semiconductor material in the fields of aerospace and radiation detection. **Purpose:** Study of the irradiation effects of GaAs is of guiding significance for the evaluation of the radiation resistance of GaAs devices. **Methods:** Semi-insulating GaAs were irradiated by 250-keV H^+ and 4.5-MeV Kr^{17+} ions with fluences ranging respectively from $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ to $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ and $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ to $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Photoluminescence (PL) spectrum and Raman scattering spectra were used to measure GaAs samples before and after irradiation. **Results:** PL spectrum shows that the intensity of C_{As} peaks and phonon replicas decrease with increasing fluence of H^+ irradiation. The $I_{\text{Ga-V}_{\text{As}}}$ peak in 913 nm was increased at lower fluence and decreased at higher fluences. But all the peaks completely disappeared with Kr^{17+} irradiation. The results of Raman spectra show that the longitudinal-optical (LO) phonon peak at 295-cm^{-1} slides towards the low-frequency side and broadens its width asymmetrically by Kr^{17+} irradiation, while it has no obvious change by proton irradiation. **Conclusion:** The difference between the effect of proton and Kr^{17+} irradiation is due to the difference of the displacement damage by three orders of magnitude at least. The evolution process of damage defects in GaAs is obtained by using Multi-step

强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室(西北核技术研究所)专项经费资助项目

第一作者: 杨迪, 男, 1991 年出生, 2014 年毕业于兰州大学, 现为硕士研究生, 研究方向为半导体材料辐照效应

通信作者: 王铁山, E-mail: tswang@lzu.edu.cn

Supported by State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect (Northwest Institute of Nuclear Technology) Special Project

First author: YANG Di, male, born in 1991, graduated from Lanzhou University in 2014, master student, focusing on semiconductor materials irradiation effect

Corresponding author: WANG Tieshan, E-mail: tswang@lzu.edu.cn

收稿日期: 2016-05-26, 修回日期: 2016-07-13

damage accumulation (MSDA) model, and then the trends of optical properties and crystalline structure are well explained.

Key words GaAs, Irradiation effect, Photoluminescence spectrum, Raman scattering spectra

砷化镓(GaAs)半导体是一种直接禁带半导体材料,因其具有较高的电子迁移率而广泛应用于光纤通信、航天以及半导体发光器件等领域。由砷化镓制成的超高速强流脉冲辐射探测器对 γ 射线、X射线、中子以及带电粒子都很灵敏。这种探测器可以用于同步辐射装置、惯性约束聚变、核武器研制等各种辐射场中脉冲粒子流的测量,以及应用于亚纳秒技术的各个领域。在这些环境中,由于受到粒子辐照损伤器件参数很容易变坏。因此,研究砷化镓的粒子辐照效应对砷化镓抗辐照器件的应用具有指导意义。

粒子辐照会在 GaAs 单晶内产生移位原子或空位而形成缺陷,这些缺陷会俘获电子或载流子,对材料的宏观性能产生影响。光致发光(Photoluminescence, PL)谱也称荧光光谱,是一种研究半导体材料发光性能的有效测试方法。过去数十年,国内外利用 PL 谱的研究主要集中在中子辐照对掺硅 GaAs 发光性能的影响^[1-4]以及高能质子辐照 GaAs 太阳能电池后对其光电性能的影响^[5-6],但对于低能质子及重离子注入未掺杂 GaAs 则鲜有报道。此外,拉曼散射谱也被应用于研究 GaAs 辐照效应对其晶体结构的影响,Peercy^[7]最早报道了重离子辐照后拉曼谱中声子峰出现明显变化,随后 Tiong^[8]采用空间局域模型给出了砷离子注入后产生的微晶尺寸,并对声子峰随辐照剂量增大的变化给出了解释。Holtz 等^[9]又通过拉曼光谱研究了砷化镓辐照后的损伤随深度分布的变化情况。

本文的工作是利用质子、氦离子辐照未掺杂半绝缘砷化镓(SI-GaAs)。通过 PL 光谱和拉曼散射谱的表征方法,研究了辐照损伤对其发光性能和晶体结构的影响。尝试通过计算移位损伤(Displacement per atom, dpa)将两种离子辐照相结合,得到随移位损伤增大发光性能和晶体结构的变化趋势,重点研究了这种变化的机理及辐照产生缺陷的演化过程。

1 实验介绍

样品采用垂直梯度凝固法(Vertical gradient freeze, VGF)生长的 SI-GaAs 单晶晶片,表面为(100)晶面,其电阻率约为 $1 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$,电子迁移率约为 $5.3 \times 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。样品表面尺寸为 $1 \text{ cm} \times 0.8 \text{ cm}$,厚度约为 $700 \mu\text{m}$ 。

质子和氦离子(Kr^{4+})辐照是在中国科学院近代

物理研究所 320 kV 高电荷态离子源平台上进行的,质子辐照能量为 250 keV,注量为 $1 \times 10^{12} - 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$,流强约为 50 nA。选用的 Kr 离子束的电荷态为 17+, 能量为 4.5 MeV,注量为 $3 \times 10^{11} - 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$,流强约为 1 μA 。整个辐照过程中靶室真空度约为 $5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 。

PL 谱的测试采用中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所变温测试系统的光致发光谱仪,激发光波长选为 532 nm,发射光谱波长范围为 750–1 000 nm,分辨率为 0.5 nm,测量温度是在液氮 4 K 下进行的。拉曼光谱测试仪器为 Labram HR800 型激光共聚焦拉曼光谱仪,实验配置为背向散射,激发波长为 532 nm,测量范围 $100 - 500 \text{ cm}^{-1}$,光谱分辨率约为 1 cm^{-1} ,测试在室温条件下完成。另外本文中所用的 PL 光谱和拉曼光谱这两种测试手段对应光子能量均为 2.33 eV,光子穿透深度 $d_{\text{opt}} = 1/2\alpha$,此能量下的 GaAs 吸收系数 α 约为 $7.456 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ^[10],因此估算出测试深度约为 65 nm。

2 实验结果

2.1 光致发光谱

图 1 是不同注量质子和 Kr 离子辐照后的 SI-GaAs 及原生样品的 PL 谱。从图 1 中可以看出,有 3 个明显的发光峰。从左到右依次是位于 820 nm (1.512 1 eV)附近对应自由激子(Free exciton, FE)以及各种束缚激子(Bound exciton, BE)跃迁的激发峰;位于 830 nm (1.493 9 eV)和 832 nm (1.490 3 eV)的激发峰对应导带到碳杂质受主 C_{As} 的跃迁 C(B-A)以及施主能级到 C_{As} 的跃迁形成的施主-受主对(Donor-acceptor pair, DAP),其中碳杂质为砷化镓基片生长过程中引入的一种本征杂质原子;位于 850 nm (1.458 8 eV)的发光峰为 C_{As} 峰的声子伴线(Phonon replica, PR)^[2,11]。 C_{As} 峰及其声子伴线是砷化镓中的本征缺陷峰,其强度随质子辐照剂量的增大明显衰减(图 1(A-E)),当 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ Kr 离子辐照后发光峰完全消失(图 1(F)),我们将在分析讨论部分详细说明。需要注意的是 913 nm (1.358 eV)处还有一小峰,这对应着导带到复合缺陷 $I_{\text{Ga}}-V_{\text{As}}$ 跃迁的发光峰^[4],有人认为该处的发光峰与铜(Cu)受主有关^[12]。我们将该峰放大后如图 2 所示,可以很明显地看到这是辐照后产生的峰,原生样品在

该处并没有发光峰。因此，此峰与材料制备时的 Cu 掺杂无关。

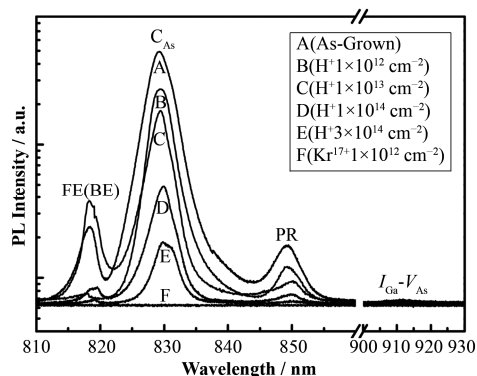


图 1 250 keV 质子和 4.5 MeV Kr¹⁷⁺辐照后的半绝缘 GaAs PL 谱

Fig.1 PL spectrum for SI-GaAs irradiated by 250-keV proton and 4.5-MeV Kr¹⁷⁺ ions.

2.2 拉曼光谱

拉曼散射谱是用于研究晶体结构变化的主要测试手段。砷化镓材料的拉曼谱中主要有两个峰，分别是位于 292 cm⁻¹ 的光学支格波纵(Longitudinal optical, LO)声子峰和 269 cm⁻¹ 光学支格波横(Transverse optical, TO)声子峰，且 TO 峰在(100)方向背散射模式下是禁戒的。在对 SI-GaAs 进行质子辐照和 Kr 离子辐照后拉曼谱分别如图 3(a)、(b)所

示，原生谱中 LO 峰和 TO 峰的峰位并没有在 292 cm⁻¹ 和 269 cm⁻¹ 处，而是位于 295 cm⁻¹ 和 271 cm⁻¹，这是由于 VGF 法生长的样品残余应力较小而造成声子峰峰位偏大^[13]。对于质子辐照，随着辐照剂量的增大，LO 声子峰的峰位和峰宽基本没有变化，禁戒的 TO 声子峰很弱。对于 Kr 离子辐照，随着辐照注量的增大，LO 声子峰的峰位向低频方向移动，强度衰减，出现了很明显的非对称性展宽，TO 声子峰开始明显增强，这是由局部晶格失序扰乱了选择定则造成的。当注量达到 1×10¹³ cm⁻² 时，还可以看到声子峰向低频方向延伸到 200 cm⁻¹ 处以及中心在 180 cm⁻¹ 处出现了由许多无序峰组成的宽带。

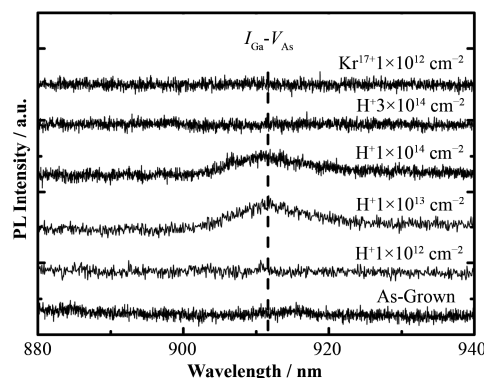


图 2 PL 谱中位于 913 nm 处缺陷峰
Fig.2 913-nm defect peak in PL spectrum.

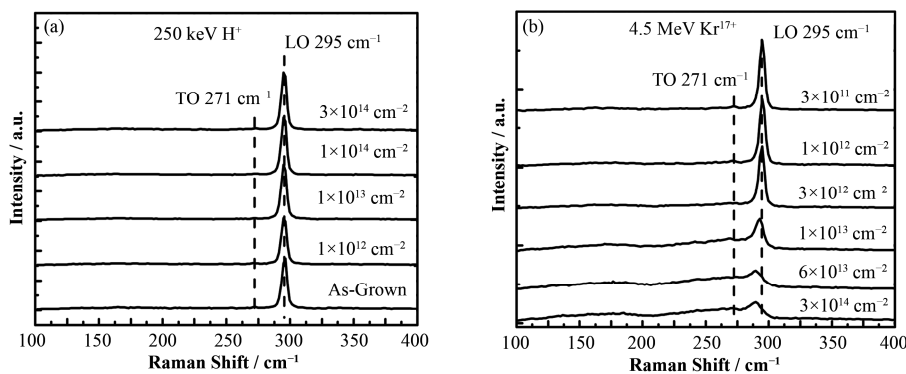


图 3 半绝缘 GaAs 的拉曼光谱 (a) 质子辐照, (b) Kr¹⁷⁺辐照
Fig.3 First-order Raman spectra of SI-GaAs. (a) Proton irradiation, (b) Kr¹⁷⁺ ions irradiation

3 分析和讨论

对于带电粒子辐射诱导的损伤效应，主要通过电子能损和核能损两种机制对材料造成损伤。当入射粒子能量较低时，核能损是主要的损伤机制，入射离子与材料内的晶格原子碰撞，使其产生移位，形成移位损伤缺陷，这些缺陷会在半导体禁带中产生新的载流子俘获中心，从而对半导体的光电性能产生影响。dpa 是材料中每个原子被撞出移位的次

数。因此可以通过计算移位损伤剂量表征辐照后砷化镓内产生的损伤。移位损伤剂量的计算方法如下：

$$\text{dpa} = \frac{\Phi(N_{\text{Ga}}^{\text{vac}} + N_{\text{As}}^{\text{vac}} + N^{\text{nov}})M_{\text{mol}}}{\rho N_A} \quad (1)$$

式中： $N_{\text{Ga}}^{\text{vac}}$ 为每个入射粒子在单位射程上产生的 Ga 空位的平均浓度； $N_{\text{As}}^{\text{vac}}$ 为每个入射粒子在单位射程上产生的 As 空位的平均浓度； N^{nov} 为每个入射粒子在

单位射程上产生的级联空位的平均浓度。这三项可以由 SRIM 程序模拟给出^[14]。 Φ 为入射粒子注量； ρ 为靶物质密度($5.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)； N_A 为阿伏伽德罗常数($6.02\times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)； M_{mol} 为 GaAs 摩尔质量数($145 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$)。

图 4 和 5 是用 SRIM-2013 程序分别模拟计算的在 GaAs 中注入剂量为 $3\times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 质子和 Kr 离子后, 材料的移位损伤剂量以及入射离子的沉积随深度的分布关系。其中质子和 Kr 离子的最大射程约为 1980 nm 和 1820 nm, 两种离子在材料中的射程相近且都远大于 PL 光谱和拉曼光谱的分析深度(约 65 nm), 移位损伤随入射深度有明显变化且主要集中在射程末端, 分别为 $7.51\times 10^{-3} \text{ dpa}$ 和 1.95 dpa , 此时对应的质子和 Kr 离子原子百分含量分别为 0.89% 和 0.35%。因此在同等注入剂量下重离子辐照损伤比质子大三个量级左右。考虑本工作选择的两种光谱测试方式的测试深度为 65 nm 左右, 为与实际情况相符, 选择了两种离子在测试深度处的移位损伤剂量, 分别为 $1.2\times 10^{-4} \text{ dpa}$ 和 $5.1\times 10^{-1} \text{ dpa}$, 此时 Kr 离子的辐照损伤也比质子大至少三个量级。

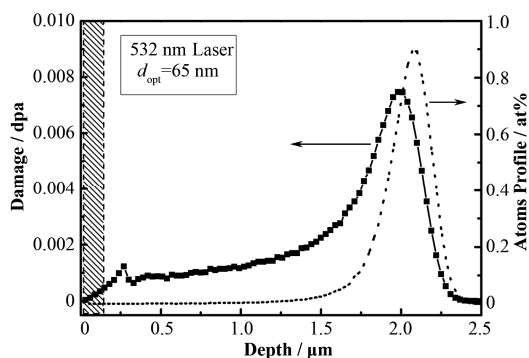


图 4 SRIM-2013 模拟 250 keV H^+ 离子辐照半绝缘 GaAs 后移位损伤与 H^+ 含量随深度的分布

Fig.4 Displacement damage dose and H^+ atoms profile with ions depth for SI-GaAs by implantation with 250-keV H^+ from SRIM-2013.

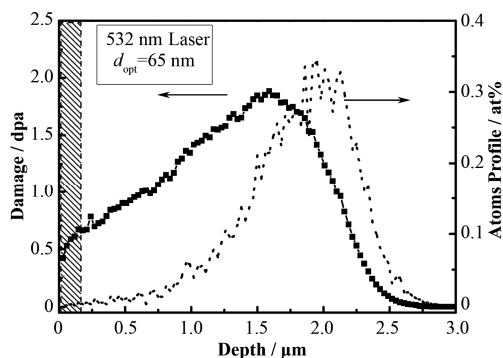


图 5 SRIM-2013 模拟 4.5 MeV Kr^{17+} 离子辐照半绝缘 GaAs 后移位损伤与 Kr^{17+} 含量随深度的分布

Fig.5 Displacement damage dose and Kr^{17+} atoms profile with ions depth for SI-GaAs by implantation with 4.5-MeV Kr^{17+} from SRIM-2013.

3.1 移位损伤对发光性能的影响

为更好地研究辐照损伤对 GaAs 材料发光性能的影响, 做出了前述 PL 谱中 C_{As} 缺陷峰及 $I_{\text{Ga-V}_{\text{As}}}$ 复合缺陷峰随损伤剂量的变化关系, 如图 6 所示。当损伤剂量很低时, 材料内的辐照损伤主要以点缺陷(Frenkle pairs)为主, 这些缺陷与 GaAs 内的杂质原子相互作用产生复合缺陷俘获激子发光。随着损伤增大, 复合缺陷会增多, 相应复合缺陷发光峰($I_{\text{Ga-V}_{\text{As}}}$)也会增大, 使得位于近导带附近的 C_{As} 本征缺陷峰呈现衰减趋势。随着损伤继续增大, 除了产生点缺陷, 还能形成多空位等复杂缺陷。这些缺陷会在中间带隙引入许多新的深能级陷阱^[15], 从而俘获激子发光, 造成自由激子数目的减少, 致使 C_{As} 峰强度减弱的同时复合缺陷峰也会衰减。当损伤剂量达到 $2\times 10^{-3} \text{ dpa}$ 时, 即用注入剂量为 $1\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ Kr 离子辐照后, 所有发光峰完全衰减到零。此时 GaAs 内的缺陷非常多, 在禁带中产生了很多深能级中心以及非辐射复合中心, 从而完全复合了激子, 使得导带附近的缺陷发光中心不能通过激子的跃迁而发光。此外, 大量缺陷也会相互聚集形成更复杂的缺陷团, 使晶格空间的完整性遭到破坏, 发光中心不能通过激子跃迁发光。晶体空间完整性被破坏也在图 3(b)的 Kr 离子辐照的拉曼谱中得到了验证。

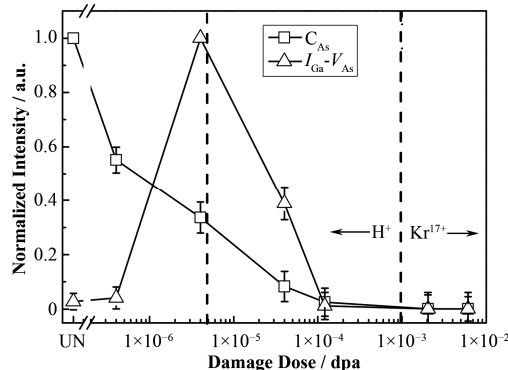


图 6 发光峰归一化强度随损伤剂量的变化关系
Fig.6 Normalized PL peak intensity as a function of implantation damage dose by 250-keV H^+ and 4.5-MeV Kr^{17+} ions.

3.2 移位损伤对晶体结构的影响

拉曼光谱中的 LO 声子峰的峰位和半高宽的变化情况如图 7 所示。当损伤剂量非常小时, 辐照产生的移位损伤非常小且不足以破坏晶体空间完整性, 因而其峰位和半高宽基本无变化。Kr 离子辐照使得损伤剂量增大到超过 0.01 dpa 时, 峰位和半高宽开始出现明显的变化, 并在 0.1 dpa 时趋于饱和。晶体应力增大造成峰位向低频方向移动, 晶体空

间完整性被严重破坏，使得峰出现明显的非对称性展宽，辐照区域产生微晶结构(μ -GaAs)和非晶结构(α -GaAs)的混合物。从整体来看，GaAs 晶体开始向非晶态转化^[16]，如图 3(b)，从 Kr 离子辐照拉曼谱中可以看到，晶体无序度变大使得被禁戒的 TO 峰强度增加，晶体向非晶态转变从而形成了许多无序峰组成的宽峰带。Peercy 等^[7]用 400 keV 的 Xe 离子辐照 GaAs 观察到了声子峰的半高宽在注入剂量超

过 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 开始有明显变化，我们计算出该剂量下所对应损伤剂量约为 0.013 dpa，Braunstein 等^[17]采用 1 MeV 的 Si 离子注入后 LO 峰峰位和半高宽发生明显变化时所对应的损伤剂量约为 0.015 dpa，都超过了 0.01 dpa 对应的损伤阈值。因此，对于低能离子注入，只有当损伤剂量超过 0.01 dpa 时，GaAs 晶体才会发生明显畸变。

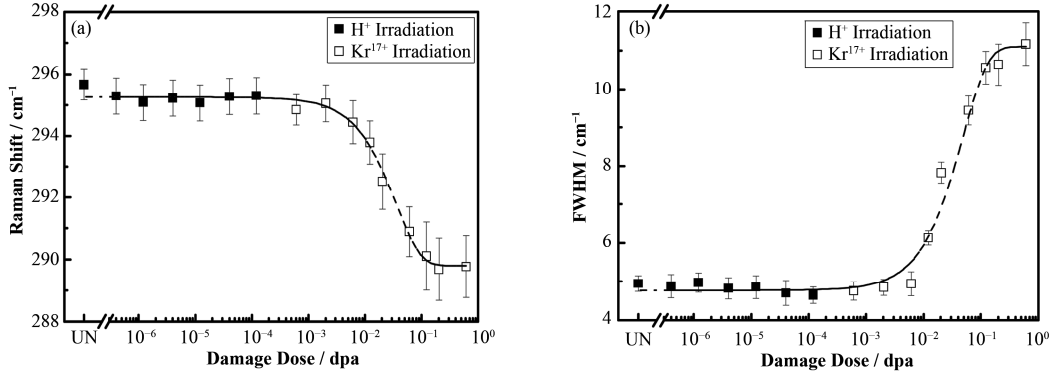


图 7 LO 峰随损伤剂量的变化关系 (a) 峰位变化, (b) 半高宽变化
Fig.7 LO peak position and FWHM as a function of implantation damage dose.

3.3 辐照缺陷的演化过程

Menzel 等^[18]通过比较碳化硅辐照后的拉曼谱结果和卢瑟福背散射谱结果，给出了通过拉曼谱得到无序度的计算方法。为进一步分析晶体结构随辐照损伤演化的机理，我们给出了 Kr 离子辐照 GaAs 后无序度随损伤剂量的变化关系，如图 8 所示。

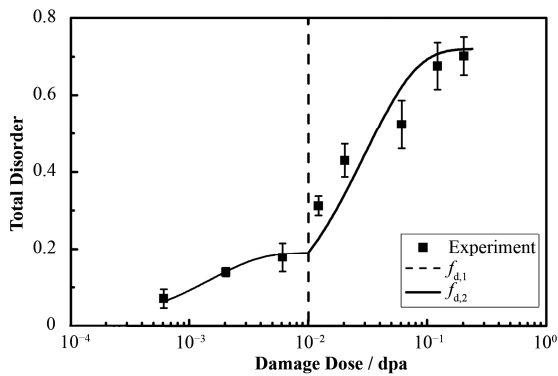


图 8 Kr^{17+} 辐照后无序度随损伤剂量的变化关系
Fig.8 Total disorder as a function of implantation damage dose by Kr^{17+} ions.

无序度的计算公式为：

$$f_d = 1 - \frac{A_{\text{LO}}}{A_{\text{LO}}^{\text{cryst}}} \quad (2)$$

式中： A_{LO} 代表辐照后 LO 声子峰的面积； $A_{\text{LO}}^{\text{cryst}}$ 代表原生晶体的 LO 声子峰的面积。

Jagielski 等^[19]提出的多级损伤累积(Multi-step

damage accumulation, MSDA)模型与我们的实验结果符合较好。采用两级损伤累积，拟合公式为：

$$\begin{cases} f_{d,1} = f_{d,1}^{\text{sat}} [1 - \exp(-\sigma_1 D)] & (0 < D < D_1) \\ f_{d,2} = f_{d,2}^{\text{sat}} + (f_{d,2}^{\text{sat}} - f_{d,1}^{\text{sat}}) [1 - \exp(-\sigma_2 (D - D_1))] & (D > D_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $f_{d,1}^{\text{sat}}$ 和 $f_{d,2}^{\text{sat}}$ 分别为第一级和第二级累积损伤过程的无序度饱和值； σ_1 和 σ_2 分别为第一级和第二级损伤截面； D 是损伤剂量(dpa)； D_1 是第一级向第二级转化的临界损伤剂量(dpa)。

拟合参数如表 1 所示。第一级损伤累积过程发生在损伤剂量小于 0.01 dpa 时，在低损伤剂量下辐照产生的缺陷以点缺陷对为主且主要分布在晶格间隙处，对晶体结构没有太大影响，这与图 7 所示 LO 峰的峰位和半高宽在损伤剂量小于 0.01 dpa 时基本不变的结果一致。由于点缺陷对的间隙原子在室温下很可能迁移至晶格的表面层，使得损伤层中的空位浓度增加形成空位富集区，从而造成晶体无序度的升高。这与 Vetrano 等^[20]通过透射电镜(Transmission electron microscope, TEM)观察到的结果一致。我们通过 PL 谱的测试结果(图 6)从侧面证实了空位发生聚集的过程。在这一阶段，随着空位浓度升高，相应的间隙原子与空位的复合几率也会增大，空位浓度达到稳定，因此当辐照剂量接近 0.01 dpa 时，无序度会饱和，饱和值为 0.19。第二

级损伤累积过程发生在辐照剂量大于 0.01 dpa 时, 高浓度的空位缺陷聚集增大了晶体内应力^[19], 同时会形成更复杂的缺陷团簇, 进而破坏了晶格的完整性, 使得晶体发生畸变, 无序度增大。图 7 所示 LO 峰的峰位和半高宽的变化也证实了辐照损伤剂量大于 0.01 dpa 时会出现晶体畸变。二级损伤在辐照剂量超过 0.1 dpa 时达到饱和, 此时 LO 峰的峰位和半高宽也趋于稳定, 晶体畸变过程达到平衡。Braunstein 等^[17]指出在高剂量离子辐照下会发生动力学退火效应使 GaAs 内的缺陷出现自修复行为, 因而无序度能够达到稳定。值得注意的是此时饱和无序度为 0.71, 说明 GaAs 晶体没有完全转化为非晶态, 可能存在着第三级甚至更多的损伤累积过程, 需要更高辐照剂量的结果加以证明。

表 1 MSDA 模型拟合无序度的参数
Table 1 Fitted parameters of the total disorder data (deduced from Raman spectroscopy) by using the MSDA model.

第一级过程 1st step		第二级过程 2nd step		
$\sigma_1 / \text{dpa}^{-1}$	$f_{d,1}^{\text{sat}}$	$\sigma_2 / \text{dpa}^{-1}$	$f_{d,2}^{\text{sat}}$	D_1 / dpa
657	0.19	35	0.71	0.01

4 结语

本文研究了质子和 Kr 离子注入 GaAs 的光致发光光谱以及拉曼散射谱。通过计算 dpa 量化了不同离子的辐照效应, 表明质子和 Kr 离子辐照后的明显差异主要是由于重离子移位损伤比质子至少大三个量级造成的。当损伤剂量非常低时, 产生的缺陷以点缺陷为主, 其对晶体的结构影响不大, 但这些点缺陷会与材料内的杂质相互作用形成缺陷能级俘获激子发光, 从而减弱半导体的本征发光峰。当损伤剂量很高时, 移位原子非常多, 产生级联效应, 大量点缺陷聚集增大了晶体的内应力且形成复杂的缺陷团簇, 破坏了晶体结构, 出现局域非晶化。最后采用 MSDA 模型拟合 Kr 离子辐照后无序度的变化情况, 得到辐照缺陷随损伤剂量增大的演化过程, 很好地对应了 GaAs 光学性能和结构的变化趋势。

参考文献

- Khanna S M, Rejeb C, Jorio A, *et al.* Electron and neutron radiation-induced order effect in gallium arsenide[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1993, **40**(6): 1350–1359. DOI: 10.1109/23.273532
- Jorio A, Rejeb C, Parenteau M, *et al.* Radiation induced carrier enhancement and intrinsic defect transformation in n-GaAs[J]. Journal of Applied Physics, 1993, **74**(4): 2310–2317. DOI: 10.1063/1.354716
- Jorio A, Parenteau M, Aubin M, *et al.* A mobility study of the radiation induced order effect in gallium arsenide[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, **41**(6): 1937–1944. DOI: 10.1109/23.340527
- 刘健, 王佩璇. 中子辐照 GaAs 快速退火行为的低温光荧光研究[J]. 发光学报, 1998, **19**(1): 50–55. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7032.1998.01.010
- LIU Jian, WANG Peixuan. Photoluminescence of defects in neutron-irradiated SI-GaAs[J]. Chinese Journal of Luminescence, 1998, **19**(1): 50–55. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7032.1998.01.010
- Anspaugh B E. Proton and electron damage coefficients for GaAs/Ge solar cells[C]. Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Second IEEE, 1991: 1593–1598. DOI: 10.1109/PVSC.1991.169472
- 赵慧杰, 何世禹, 肖志彬, 等. 50–170 keV 质子照射对 GaAs/Ge 太阳能电池光谱响应的影响[J]. 核技术, 2008, **31**(1): 31–34
- ZHAO Huijie, HE Shiyu, XIAO Zhibin, *et al.* 50–170 keV proton irradiation on spectral response in GaAs/Ge space solar cell[J]. Nuclear Techniques, 2008, **31**(1): 31–34
- Peercy P S. Raman scattering of ion-implanted GaAs[J]. Applied Physics Letters, 1971, **18**(12): 574–576
- Tiong K K, Amirtharaj P M, Pollak F H, *et al.* Effects of As⁺ ion implantation on the Raman spectra of GaAs: “Spatial correlation” interpretation[J]. Applied Physics Letters, 1984, **44**(1): 122–124. DOI: 10.1063/1.94541
- Holtz M, Zallen R, Brafman O, *et al.* Raman-scattering depth profile of the structure of ion-implanted GaAs[J]. Physical Review B, 1988, **37**(9): 4609–4617. DOI: 10.1103/PhysRevB.37.4609
- Aspnes D E, Studna A A. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs and InSb from 1.5 to 6.0 eV[J]. Physical Review B, 1983, **27**(2): 985–1009. DOI: 10.1103/PhysRevB.27.985
- Satoh M, Kuriyama K, Makita Y. Photoluminescence study of the annealing behavior of transmuted impurities in neutron-transmutation-doped semi-insulating GaAs[J]. Journal of Applied Physics, 1989, **65**(6): 2248–2253. DOI: 10.1063/1.342837
- Xin S H, Schaff W J, Wood C E C, *et al.* Capped versus capless heat treatment of molecular beam epitaxial GaAs[J]. Applied Physics Letters, 1982, **41**(8): 742–744.

- DOI: 10.1063/1.93662
- 13 Bunger T, Behr D, Flade T, *et al.* Development of a vertical gradient freeze process for low EPD GaAs substrates[J]. Materials Science and Engineering B, 2001, **80**(1): 5–9. DOI: 10.1016/S0921-5107(00)00573-0
- 14 Ziegler J F, Biersack J P. Treatise on Heavy-ion science[M]. New York: Springer-Verlag, 1985: 99–129. DOI: 10.1007/978-1-4615-8103-1_3
- 15 赵慧杰, 何世禹, 孙彦铮, 等. 100 keV 质子辐照对空间 GaAs/Ge 太阳能电池光电效应的影响[J]. 物理学报, 2009, **58**(1): 404–410. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3290.2009.01.062
ZHAO Huijie, HE Shiyu, SUN Yanzheng, *et al.* Effect of 100 keV proton irradiation on photoemission of GaAs/Ge space solar cells[J]. Acta Physica Sinica, 2009, **58**(1): 404–410. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3290.2009.01.062
- 16 Zallen R, Holtz M, Geissberger A E, *et al.* Raman-scattering studies of implantation-amorphized gallium arsenide: comparison to sputtered and evaporated a-GaAs films[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1989, **114**: 795–797. DOI: 10.1016/0022-3093(89)90723-0
- 17 Braunstein G, Tuschel D, Chen S, *et al.* Raman scattering study of lattice disorder in 1-MeV Si-implanted GaAs[J]. Journal of Applied Physics, 1989, **66**(8): 3515–3522. DOI: 10.1063/1.344108
- 18 Menzel R, Gartner K, Wesch W, *et al.* Damage production in semiconductor materials by a focused Ga⁺ ion beam[J]. Journal of Applied Physics, 2000, **88**(10): 5658–5661. DOI: 10.1063/1.1319168
- 19 Jagielski J, Thome L. Damage accumulation in ion-irradiated ceramics[J]. Vacuum, 2007, **81**(10): 1352–1356. DOI: 10.1016/j.vacuum.2007.01.059
- 20 Vetrano J S, Bench M W, Robertson I M, *et al.* *In situ* studies of ion irradiation effects in an electron microscope[J]. Metallurgical Transactions A, 1989, **20**(12): 2673–2680. DOI: 10.1007/BF02670160