

# Research Progress of Irradiation Damage for GaAs Materials and Devices

Bingkun Chen, Huimin Jia\*, Xue Chen, Dengkui Wang, Xuan Fang, Jilong Tang, Dan Fang, Xinwei Wang, Xiaohua Wang, Zhipeng Wei

State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Email: \*huiminjia01@163.com

Received: Feb. 8<sup>th</sup>, 2018; accepted: Feb. 21<sup>st</sup>, 2018; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

As a kind of III-V semiconductor materials, GaAs, with direct band gap and high carrier mobility, has a good anti-radiation ability, and makes an important candidate for the preparation of space devices. However, when the semiconductor devices were working in space, they will be affected by the radiation of the complex space particles, resulting in the degradation of the device performance, the decrease of the reliability and the limitation of the lifetime. Therefore, it is of great significance to analyze the irradiation effect damage of the GaAs material. This paper reviews the research progress on the damage effect of different particle materials on GaAs materials and devices, and expounds the influence of different particle irradiation sources on the structure and luminescent properties of GaAs. This paper has practical significance for the further application of GaAs materials in space environment.

## Keywords

GaAs, Irradiation Damage, Electron Irradiation, Proton Irradiation, Ion Irradiation

---

# GaAs材料及器件的辐照损伤研究进展

陈炳坤, 贾慧民\*, 陈雪, 王登魁, 方铤, 唐吉龙, 房丹, 王新伟, 王晓华, 魏志鹏

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春

Email: \*huiminjia01@163.com

收稿日期: 2018年2月8日; 录用日期: 2018年2月21日; 发布日期: 2018年2月28日

---

\*通讯作者。

文章引用: 陈炳坤, 贾慧民, 陈雪, 王登魁, 方铤, 唐吉龙, 房丹, 王新伟, 王晓华, 魏志鹏. GaAs 材料及器件的辐照损伤研究进展[J]. 应用物理, 2018, 8(2): 141-150. DOI: 10.12677/app.2018.82017

## 摘要

GaAs作为重要的III-V族半导体材料,具有直接带隙和高载流子迁移率,且具有良好的抗辐照能力,是制备空间器件的重要候选材料之一。当半导体器件在空间工作时,会受到复杂的空间粒子辐照的影响,导致器件性能下降,可靠性降低,寿命受限,因此,研究GaAs材料的辐照效应损伤具有重要意义。本文综述了不同粒子材料对GaAs材料及器件的辐照损伤效应的研究进展,阐述了不同粒子辐照源对GaAs材料结构及发光特性的影响,对GaAs材料在空间环境中的进一步应用具有实际意义。

## 关键词

GaAs, 辐照损伤, 电子辐照, 质子辐照, 离子辐照

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

GaAs 作为第二代半导体材料的典型代表,其具有直接带隙(1.42 eV)、高载流子迁移率等特点(8500 cm<sup>2</sup>/vs) [1] [2] [3],是制备光电子器件的重要的材料,在太阳能电池、探测器等方面有广泛的应用。同时,GaAs 材料具有良好的抗辐照能力[4] [5],是制备空间器件的重要候选材料之一。

然而,当半导体器件在空间中工作时,会受到太空中各种辐射粒子的照射,如空间带电粒子、空间中性粒子以及空间 X 射线等[6] [7] [8]。粒子辐照会与材料原子发生相互作用,导致材料在力学位移及组织成分与结构上的变化。同时,材料的辐照损伤会因辐射粒子种类、能量、材料性质的不同而发生变化 [9] [10]。因此,研究粒子对 GaAs 材料的辐照损伤直接关系着其光电子器件在空间技术中应用的稳定性和寿命。本文分别综述了电子辐照、质子辐照及离子辐照对 GaAs 材料及器件性质的影响,为推进 GaAs 材料在空间环境中的进一步应用具有实际意义。

## 2. 不同粒子对 GaAs 材料及器件的辐照损伤研究

### 2.1. 电子辐照对 GaAs 材料及器件的损伤研究

对于地球的卫星而言,其主要受地球辐射带的影响,地球辐射带包含范艾伦辐射带和人工辐射带。人工辐射主要由质子和电子构成,因此研究电子辐照对 GaAs 材料及器件的损伤对 GaAs 基光电子器件在卫星中的应用具有重要的意义。

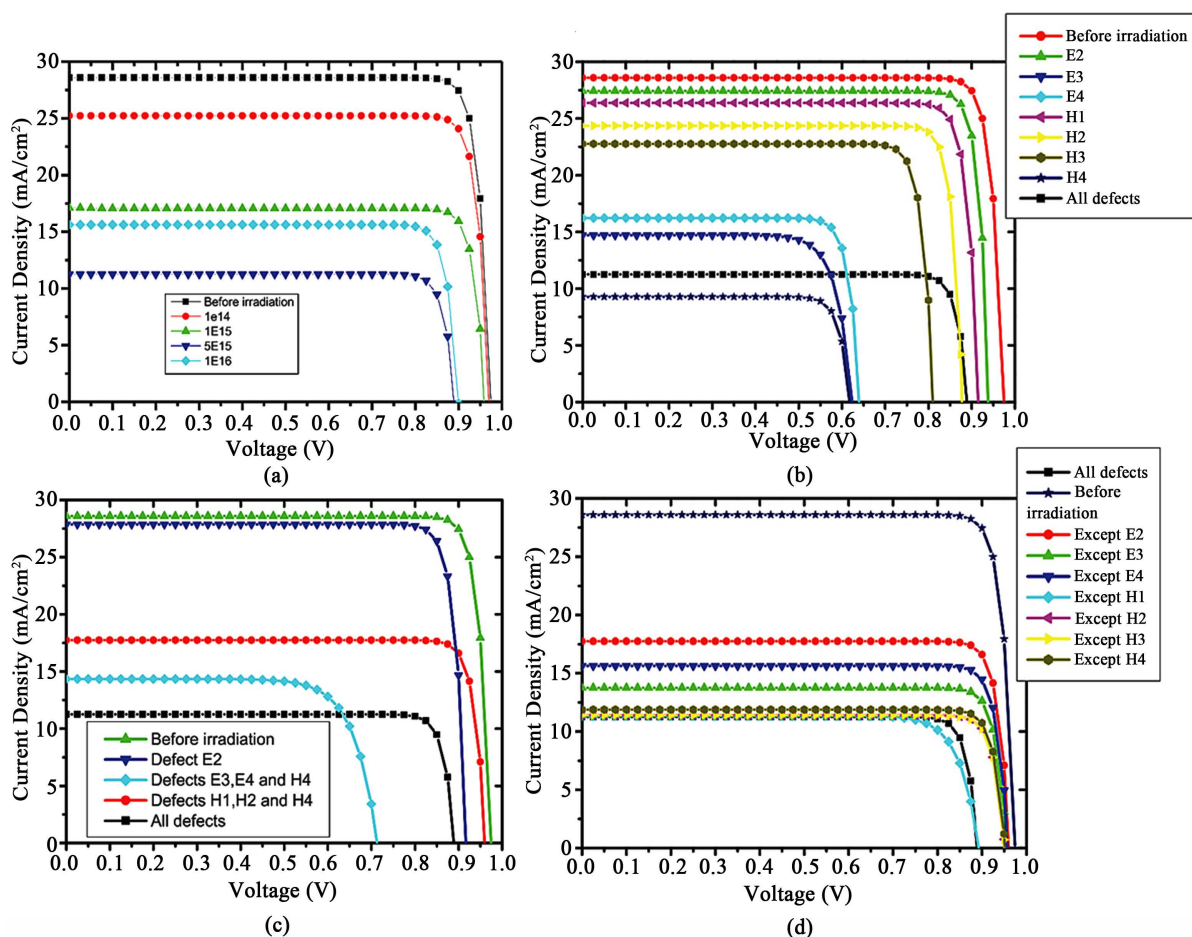
张新辉对 GaAs/Ge 太阳能电池的电子辐射损伤进行了研究,研究发现,辐照后器件的开路电压,短路电流,转换效率皆发生了不同程度的衰减,且辐照总量越大,衰减程度越高。同时,电池在长波长段衰减较多,并通过深能级瞬态谱(DLTS)测试表明辐照后带隙中引入了 0.42 eV、0.43 eV 的深能级缺陷。提出通过改进电池制作工艺,提高电池各半导体层均匀性,减小电池结深和减小电池有效部分的厚度等方式提高了电池的耐辐射性能[11]。

2015 年,郑勇等人通过变温光致发光光谱研究了电子辐照对 GaAs 的影响,通过 Arrhenius 公式拟合,发现 GaAs 中存在三种非辐射复合中心,分别为温度小于 70 K 的浅能级缺陷, H3(E<sub>v</sub> + 0.71 eV)空穴陷阱

和  $H2(E_v + 0.41 \text{ eV})$  空穴陷阱, 并且发现  $H3$  具有更高的辐射复合率[4]。同年, Mazouz H, Logerais P O 等人采用数值模拟方法模拟了  $1 \text{ MeV}$  电子辐照对单结 GaAs 太阳能电池性能的影响, 确定了辐照引入缺陷导致电池输出参数下降, 如图 1 所示。发现 GaAs 太阳能电池对密度为  $10^{16} \text{ e/cm}^{-2}$  的电子照射极其敏感, 电子辐照会在 GaAs 中产生电子缺陷 E3、E4 以及空穴缺陷 H4, 这是导致短路电流( $J_{sc}$ )退化的最主要原因。同时, 这些缺陷也会使开路电压( $V_{oc}$ )发生变化。仿真结果还表明, 当电子缺陷 E2 与其他缺陷结合时对太阳能电池性能有最为显著的影响[12]。

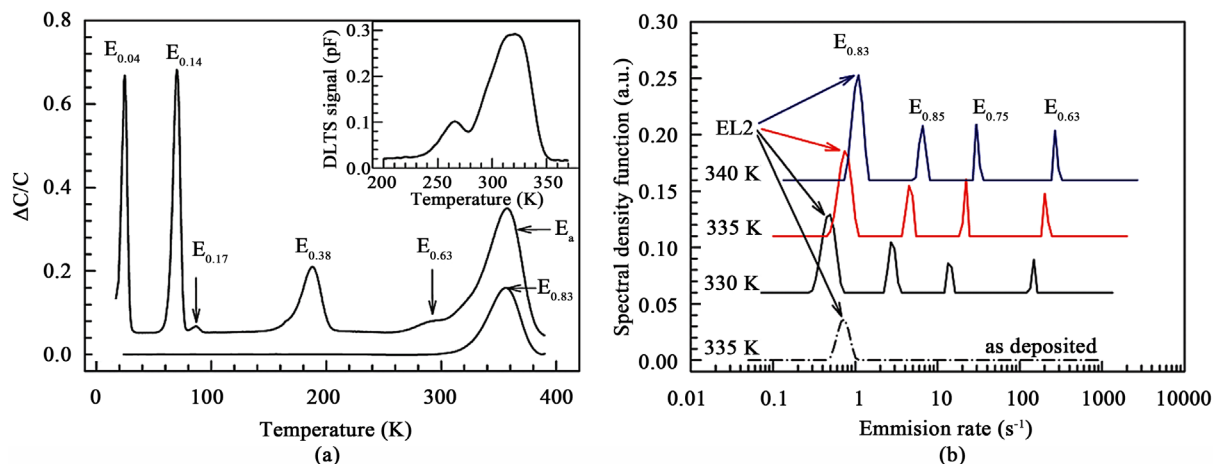
Tunhuma S M 等人利用使用深能级瞬态光谱学研究了电子辐照在 n-GaAs 中所引起的缺陷。辐照前, 材料中只存在  $E_{0.83}$ (EL2)缺陷, 辐照后会出现  $E_{0.04}$ ,  $E_{0.14}$ ,  $E_{0.17}$ ,  $E_{0.38}$ ,  $E_{0.63}$ , 如图 2 所示。通过 L-DLTS, 发现 EL2 缺陷是由  $E_{0.75}$ ,  $E_{0.83}$ ,  $E_{0.85}$  组合产生的, 因此可知, 除了空位和间隙外, 高能电子辐照还会在 n-GaAs 材料中诱发一系列类似于 EL2 缺陷的中间电子陷阱[13]。

最近, 王君玲通过变温光致发光光谱研究了  $1.0 \text{ MeV}$  电子在 GaInP/GaAs/Ge 多结太阳能电池中所引起的缺陷, 发现电子辐照过后材料中形成了非辐射复合中心, 并通过 Arrhenius 曲线确定了复合中心的热活化能, 确定非辐射复合中心为 p 型 GaAs 电池( $E_c - 0.96 \text{ eV}$ )的 E5 电子缺陷[14]。中国科学院新疆理化所



**Figure 1.** 1 J(V) characteristics of GaAs solar energy after electron irradiation: (a) J(V) characteristics as a function of fluence for  $1 \text{ MeV}$  electron irradiation; (b) J(V) characteristics as a function of defect level for the electron fluence of  $10^{16} \text{ e/cm}^{-2}$ ; (c) (d) J(V) characteristics as a function of defect level for the electron fluence of  $10^{16} \text{ e/cm}^{-2}$  [12]

**图 1.** 电子辐照对 GaAs 太阳能电池 J-V 特性的影响: (a)  $1 \text{ MeV}$  电子辐照, 不同辐照通量下的 J-V 特性; (b)  $10^{16} \text{ e/cm}^{-2}$  辐照通量下产生不同缺陷的 J-V 特性; (c) (d)  $10^{16} \text{ e/cm}^{-2}$  辐照通量下产生不同组合缺陷后的 J-V 特性[12]



**Figure 2.** DLTS spectrum for then-GaAs after electron irradiation: (a) DLTS spectrum for the sample before and after irradiation (where the lower line is the DLTS spectrum before irradiation and the upper line is the DLTS spectrum after irradiation). Inset: the DLTS spectrum after irradiation for 24 hours; (b) L-DLTS spectra of unirradiated samples and L-DLTS spectra with different temperatures after irradiation [13]

**图 2.** 电子辐照 n-GaAs 的 DLTS 谱: (a) 样品辐照前后的 DLTS 谱(其中下面的线为辐照前, 上面的线为辐照后)。插图: 辐照 24 小时后观察到的宽峰; (b) 未辐照样品的 L-DLTS 光谱及辐照后不同温度下的 L-DLTS 光谱[13]

玛丽娅等人采用能量为 1 MeV, 注量为  $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$  的电子束对 InGaAs/GaAs 量子阱材料进行辐照, 发现电子辐照材料时, 会在材料中引入 Frenkel 缺陷, Frenkel 缺陷作为材料中的非辐射复合中心, 导致 PL 强度减弱; 材料发光峰位的变化则是由应变弛豫和扩散共同作用产生的[15]。辐照后的量子阱中同时存在应力的释放和原子的互混, 应变弛豫造成了 PL 峰值能量的红移, 此后随着辐照注量的增加, 发生 In-Ga 原子互扩散, 应变逐渐接近完全弛豫, 辐照后样品的 PL 峰值能量主要受扩散的影响而出现蓝移现象, 如图 3 所示。

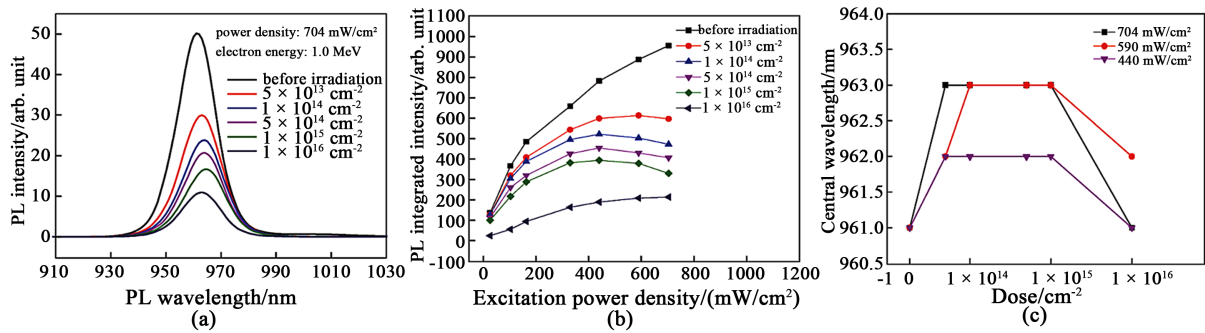
电子辐照会对 GaAs 材料及器件造成很大的影响, 一般情况下, 辐照后材料的发光特性会减弱, GaAs 材料器件会发生衰减, 辐照总剂量越大, 衰减程度越高。辐照会引入新的能级缺陷比如电子缺陷 E2, E3, E4 等, 空穴缺陷, 中间电子缺陷及 Frenkel 缺陷, 而这些缺陷的形成是导致 GaAs 材料及器件参数下降的主要原因。

## 2.2. 质子辐照对 GaAs 材料及器件的损伤研究

空间辐射环境由地球辐射带、太阳宇宙射线和银河宇宙射线组成。对于太阳宇宙射线, 当太阳耀斑发生时, 产生大量高能带电粒子的发射, 这些带电粒子大部分由质子组成。银河宇宙射线是来自银河各个方向的高能带电粒子, 绝大部分是质子。因此, 研究质子对 GaAs 材料及器件的损伤至关重要。近几年来, 国内外对 GaAs 的电子辐照已进行了大量的研究, 事实上, 质子的静止质量比电子大的多, 约为 1837 倍, 其辐照损伤也比电子辐照损伤更大。

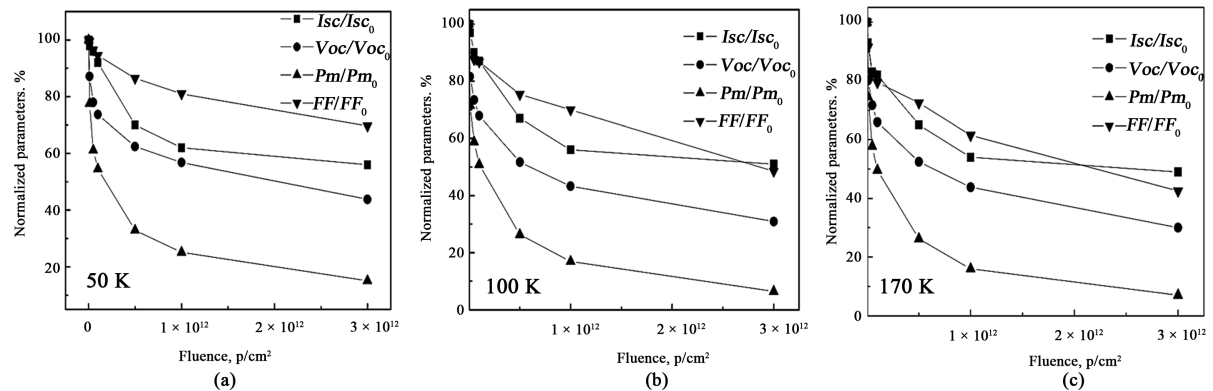
孙旭芳等人对质子辐照空间 GaAs/Ge 太阳能的性质进行了研究, 发现在电池效率下降相同幅度时, 10 MeV 质子辐照的注量比 1 MeV 电子辐照的注量低 3 个量级, 即 10 MeV 质子辐照的辐照损伤比 1 MeV 电子辐照的辐照损伤高 3 个量级, 同时通过深能级瞬态谱发现, 质子辐照所引入的缺陷中心和电子辐照也不相同, 电子辐照引入的为  $E_c - 0.12 \text{ eV}$  和  $E_c - 0.18 \text{ eV}$  的深能级缺陷, 质子辐照引入的为  $E_c - 0.18 \text{ eV}$  和  $E_c - 0.65 \text{ eV}$  的深能级缺陷[16]。2008 年, 赵慧杰等人对低能质子辐照 GaAs/Ge 太阳能电池性能演化及损伤机理进行了研究。质子辐照后 GaAs/Ge 太阳电池的输出性能随辐照能量和注量的增大而降低, 如图 4 所示, 通过深能级瞬态谱发现, 质子辐照在 GaAs/Ge 太阳电池中引入了高密度的深能级缺陷, 分别





**Figure 3.** PL spectra of electron irradiation of InGaAs/GaAs quantum wells: (a) PL spectra of InGaAs/GaAs quantum wells as a function of electron fluence; (b) PL intensity intensities of InGaAs/GaAs quantum wells with different electron fluence versus excitation power density; (c) The luminescence peak center wavelength changes of InGaAs/GaAs quantum well samples with the electron fluence at different excitation power densities [15]

**图 3.** 电子辐照 InGaAs/GaAs 量子阱的 PL 光谱: (a) InGaAs/GaAs 量子阱 PL 谱随电子注量的变化; (b) InGaAs/GaAs 量子阱样品在不同电子注量下的 PL 积分强度随激发功率密度的变化; (c) InGaAs/GaAs 量子阱样品在不同激发功率密度下的发光峰中心波长随电子注量的变化[15]



**Figure 4.** Variation curves of electrical properties of GaAs/Ge solar cells with different energy proton irradiation: (a) Variation curves at 50 K; (b) Variation curves at 100 K; (c) Variation curves at 170 K [17]

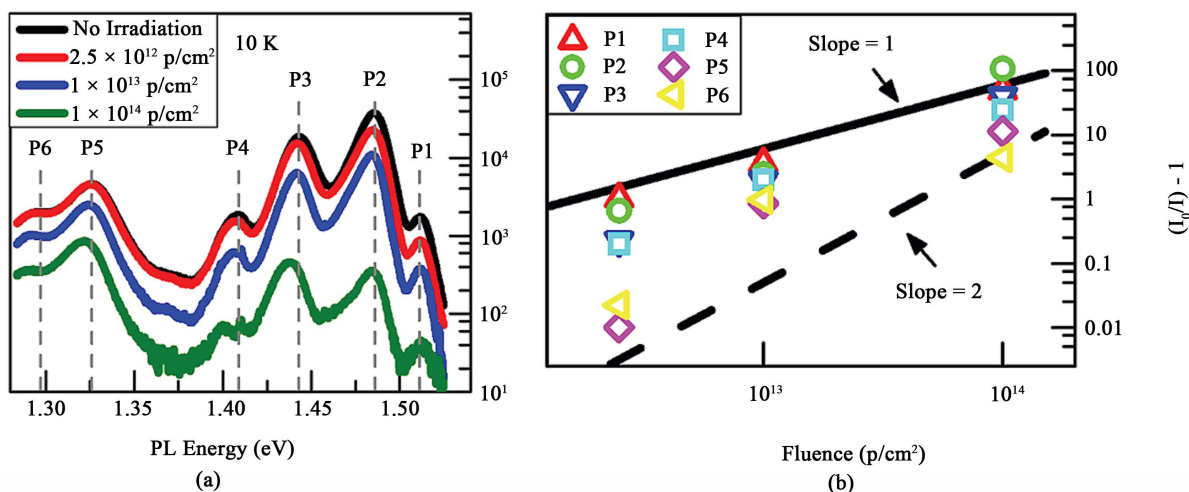
**图 4.** 不同能量质子辐照下 GaAs/Ge 太阳能电池电性能参数随注量变化曲线: (a) 在 50 K 下的变化曲线; (b) 在 100 K 下的变化曲线; (c) 在 170 K 下的变化曲线[17]

为  $E_c - 0.24$  eV、 $E_c - 0.33$  eV、 $E_c - 0.38$  eV、 $E_c - 0.52$  eV、 $E_c - 0.72$  eV 和  $E_c - 0.75$  eV，且缺陷的能级位置随辐照能量和注量的不同而变化[17]。

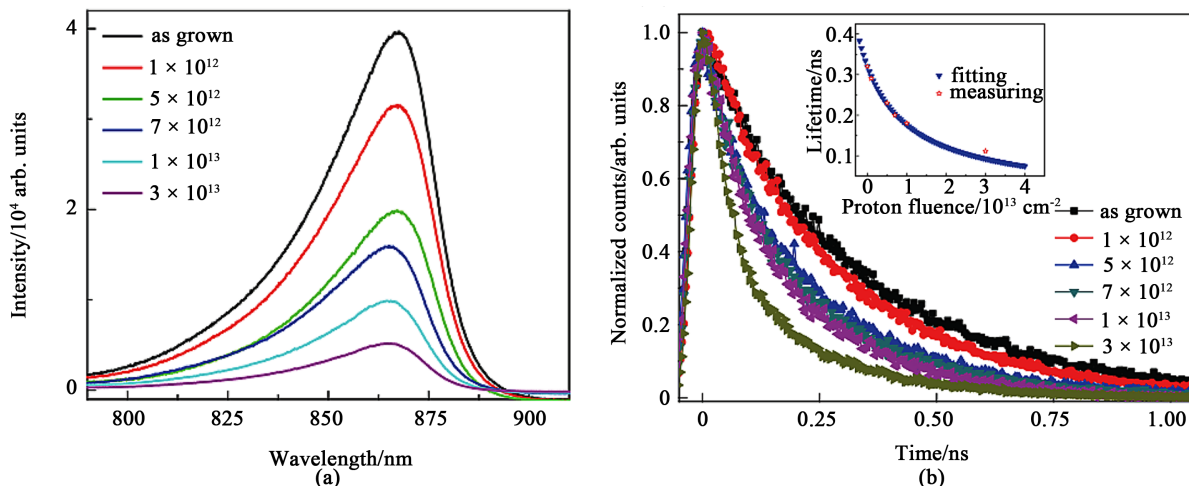
2015 年, Pursley B C 等人通过光致发光光谱研究了 5 MeV 质子辐照在 n-GaAs 材料中所造成的辐照损伤[18]。从样品辐照前后的低温 PL 光谱可知, 辐照后峰强降低, 同时, 辐照不会对以 1.512 eV 为中心的 P1 处带间跃迁和以 1.485 eV 为中心的 P2 激子和浅受主跃迁造成影响。但是, 位于 1.443 eV, 1.408 eV, 1.326 eV 和 1.297 eV 的 P3, P4, P5 和 P6 随着注量的增加而向低能端移动。P3 和 P4 为 P1 和 P2 的声子伴线, P5 和 P6 是杂质峰。P4 在辐照后逐渐分裂成两个单独的峰, 这可能是由于引入新的缺陷所导致的, 如图 5 所示。

2017 年 Tan L Y 等人采用时间分辨 PL 光谱研究质子辐照在 GaAs/AlGaAs 核壳纳米线中所引入的辐照缺陷。通过图 6 发现 PL 峰强和载流子寿命皆随辐照注量的增加而降低, 这与辐照引起的位移缺陷密切相关。同时, 通过理论计算发现, GaAs/AlGaAs 核-壳纳米线中, 辐射对表面复合和辐射复合无影响, 质子辐照引起的缺陷为 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合中心, 用于捕获自由载流子[19]。

质子辐照后对 GaAs 材料及器件的影响要大于电子辐照。研究证明, 质子辐照会显著降低材料的发



**Figure 5.** Photoluminescence (PL) of n-GaAs material at different irradiation doses: (a) Photoluminescence (PL) measurements of irradiated and reference samples; (b) Relationship between peak intensity of PL and irradiation fluence [18]  
**图 5.** 不同辐照剂量下 n-GaAs 材料的 PL 光谱: (a) 样品辐照前后的低温 PL 谱; (b) PL 峰强和辐照剂量的关系 [18]



**Figure 6.** The influence of radiation doses on the PL spectra of the sample: (a) PL spectra with different radiation doses; (b) Time-resolved PL spectra with different radiation doses [19]  
**图 6.** 辐照剂量对样品 PL 光谱的影响: (a) 不同辐照剂量下样品的 PL 光谱; (b) 不同辐照剂量下样品的时间分辨 PL 光谱 [19]

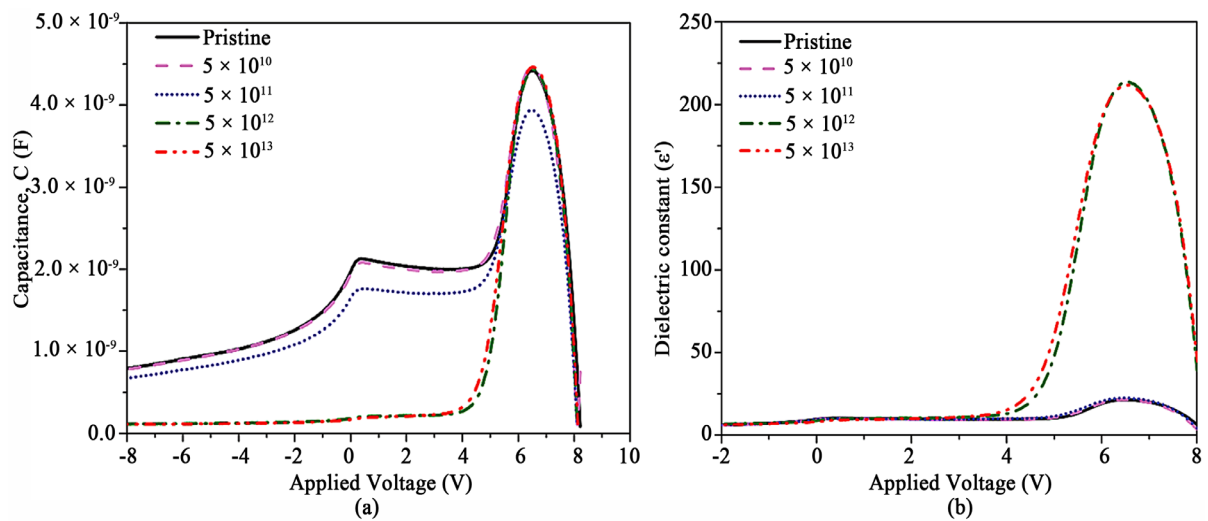
光性能及载流子寿命，辐照剂量越大，降低幅度越大。质子辐照也会在材料中引入缺陷，且通常质子辐照引入的深能级缺陷比电子辐照引入的深能级缺陷更深，如质子辐照会产生 E5( $E_c - 0.96\text{eV}$ )等深能级缺陷，说明质子辐照会对 GaAs 材料及器件产生更大的辐照损伤。这是因为质子的质量远大于电子，相同条件下质子具有比电子更高的能量，所以引入的深能级缺陷更深。

### 2.3. 离子辐照对 GaAs 材料及器件的损伤研究

空间中，除了存在大量的电子和质子外，也存在许多重离子，因此离子辐照对材料的损伤同样重要。2007 年，刘运宏等人用碳离子束模拟空间环境辐射，研究离子辐照对 GaAs/Ge 太阳能电池性能的影响，发现使 GaAs/Ge 太阳电池的最大输出功率衰减到原值的 50%时，2 MeV 碳离子所需注量为  $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ，而引起相同性能的衰减，2 MeV 质子需要的辐照注量为  $2.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ，这比 C 离子辐照注量要大两个

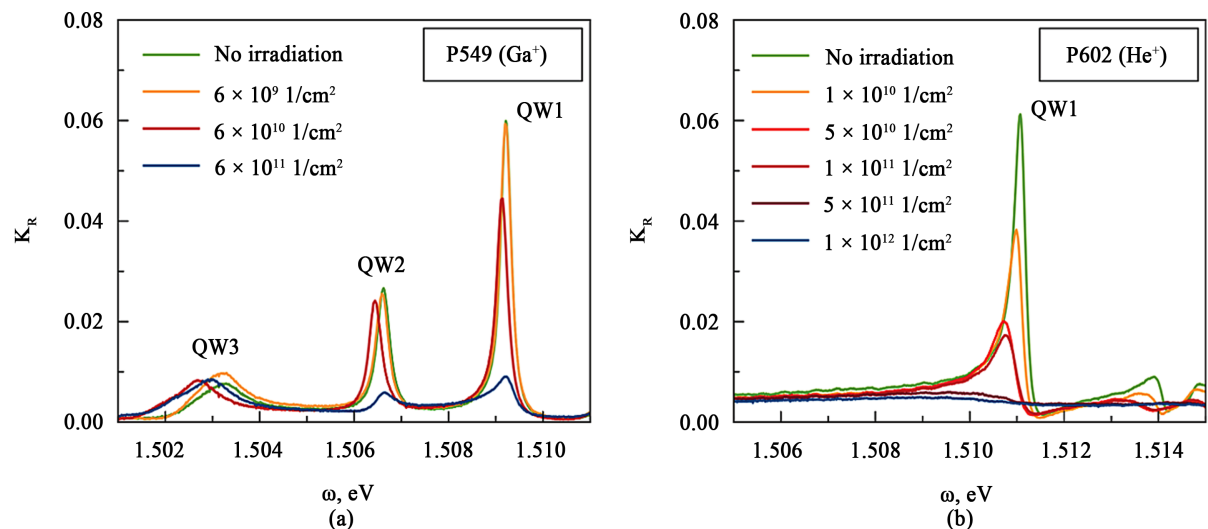
量级, 这意味着空间环境中 C 离子的成分虽小, 但也会造成太阳电池性能的明显衰减[20]。2015 年, Deshmukh P 等人用碳离子辐照 GaAs 材料, 发现辐照会降低 SI-GaAs 中的载流子寿命并增加其电阻率[21], 同年, Singh A 等人用不同的碳离子辐照剂量对 GaAs 材料进行辐照, 得到了相同的结论[22]。Bobby A 等人研究了 25 MeV C<sup>4+</sup> 离子辐照对 Ni/n-GaAs 肖特基势垒二极管原位电容和介电性能的影响, 研究发现, 随着离子注量增加, 电容和电荷密度降低, 其他相关参数也随之发生变化, 如图 7 所示。通过电子能量损失机理得知, 电容和电荷密度的降低重离子诱导产生的受主能级缺陷有关[23]。

2015 年 Kapitonov Y V 等人分别研究了 30 KeV Ga<sup>+</sup> 和 35 KeV He<sup>+</sup> 离子辐照对 InGaAs/GaAs 单量子阱激子反射谱的影响。研究发现离子辐照导致反射光谱中激子共振的强度下降和半峰宽展宽, 如图 8 所示,



**Figure 7.** The capacitance and dielectric constant of the material before and after irradiation: (a) The capacitance of the material before and after irradiation; (b) The dielectric constant of the material before and after irradiation [23]

**图 7.** 辐照前后材料电容和介电常数的变化: (a) 辐照前后电容的变化; (b) 辐照前后介电常数的变化[23]



**Figure 8.** Reflectance spectra of samples at different irradiation fluence: (a) Reflectance spectra of Ga<sup>+</sup> ions at different irradiation fluence; (b) Reflectance spectra of He<sup>+</sup> ions at different irradiation fluence [24]

**图 8.** 在不同辐照剂量下样品的反射光谱: (a) 在不同 Ga<sup>+</sup> 离子辐照剂量下样品的反射光谱; (b) 在不同 He<sup>+</sup> 离子辐照剂量下样品的反射光谱[24]

这些变化与激子跃迁振子强度的降低无关,因而与辐照引起的激子态缺陷无关,而与 Ga(In)和 As 空位相关的结构缺陷相关[24]。

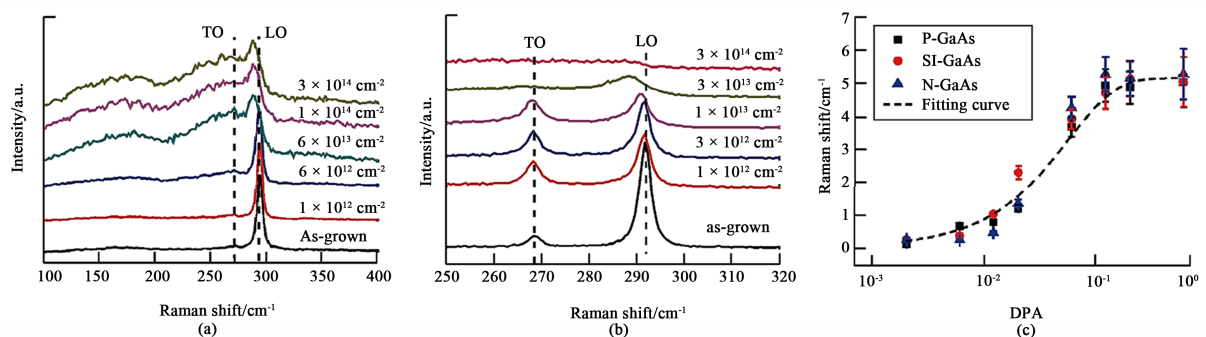
2016 年杨迪等人采用氩离子辐照非掺杂的 GaAs 材料,利用光致发光和拉曼散射研究其发光性质,并且与质子辐照对 GaAs 材料的发光性能相对比,结果发现氩离子辐照和质子辐照对样品发光性能影响完全不同。质子辐照后的  $C_{As}$  峰及其声子伴线逐渐减弱,913 nm 处的复合缺陷峰则先增大后减小,而 Kr 离子辐照后本征发光峰完全消失。质子辐照后 LO 声子峰的峰位和峰宽基本没有变化,TO 声子峰很弱,离子辐照后 LO 声子峰强度降低,峰位向低频方向移动,且非对称性展宽,TO 声子峰开始明显增强,晶体结构发生明显改变[25]。随后又通过 4.5 MeV 的氩离子分别辐照高掺杂锌(P 型)与高掺杂硅(N 型)GaAs 材料。发现氩离子辐照后 P 型 GaAs 材料 LO 声子峰位向低频移动,出现非对称展宽,TO 峰随辐照注量的增大而增强。而对于 N 型 GaAs,辐照后,拉曼谱中 LO 峰和 TO 峰的变化情况与 P 型类似,但其受辐照的影响更大,在高辐照损伤下,其声子峰会消失。通过比较发现,LO 声子峰的峰位偏移随辐照所产生的变化具有相同的变化趋势,这说明表明在辐照中,掺入的杂质并没有给 GaAs 的晶体结构产生明显的影响,如图 9 所示。N 型材料比 P 型材料对辐照更为敏感,这可能是由于混合晶向的生长方式导致其结构稳定性更差[26]。

相对于质子辐照,离子辐照在空间环境中的成分虽小,但是也会造成 GaAs 材料及器件性能的明显下降,且在相同辐照注量下离子辐照对 GaAs 材料及器件的影响要大于质子辐照。离子辐照会降低 GaAs 材料及器件载流子寿命并增加其电阻率,降低器件的电学性能,这是因为离子辐照会在材料中诱导产生受主能级缺陷,而离子辐照对 GaAs 材料及器件的损伤仍需进一步的探索研究。

### 3. 结论与展望

本文从不同的空间辐照环境出发,阐述了不同粒子材料对 GaAs 材料及器件的辐照损伤效应,发现 GaAs 受高能粒子辐照时,会产生辐照损伤,在材料内部产生深能级缺陷,降低 GaAs 材料的发光性能及载流子寿命,降低太阳能电池效率。但是,不同的粒子诱导的辐照损伤会有差别,其中质子辐照损伤会高于电子辐照损伤,而离子辐照损伤会高于质子辐照损伤,这是因为不同粒子具有不同的静止质量,因而具有不同的能量。了解不同粒子对 GaAs 材料的辐照效应,对推进 GaAs 材料在空间领域的进一步应用具有重要的实际意义。

目前,电子和质子辐照在 GaAs 材料中所引入的缺陷已得到证实,可离子辐照对于 GaAs 材料的辐照



**Figure 9.** Raman spectra of samples by Kr irradiation: (a) Raman spectra of P-type GaAs by Kr irradiation; (b) Raman spectra of N-type GaAs by Kr irradiation; (c) LO peak shift as a function of implantation damage dose of N-GaAs, P-GaAs and SI-GaAs [26]

图 9. 氩离子辐照样品的拉曼光谱: (a) 氩离子辐照 P 型 GaAs 的拉曼光谱; (b) 氩离子辐照 N 型 GaAs 的拉曼光谱; (c) N 型、P 型和本征未掺杂 GaAs LO 声子峰峰位偏移随辐照损伤的变化[26]



损伤尚不完备。已有的 GaAs 材料的离子辐照效应研究侧重于简单的性能分析,对于引入缺陷的指认尚不完全。为进一步推进 GaAs 材料在空间器件中的应用,应采用光致发光光谱和深能级瞬态谱等有效手段进一步研究 GaAs 材料的离子辐照效应。

## 致 谢

感谢国家自然科学基金(61474010, 61574022, 61504012, 61674021, 11674038, 61704011); 吉林省科技发展计划(20160519007JH, 20160101255JC, 20160204074GX, 20170520117JH); 长春理工大学科技创新基金(XJJLG-2016-11, XJJLG-2016-14)对本研究工作的支持。

## 参考文献 (References)

- [1] Boland, J.L., Casadei, A., Tutuncuoglu, G., *et al.* (2016) Increased Photoconductivity Lifetime in GaAs Nanowires by Controlled n-Type and p-Type Doping. *ACS Nano*, **10**, 4219-4227. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b07579>
- [2] Chang, C.C., Chi, C.Y., Yao, M., *et al.* (2012) Electrical and Optical Characterization of Surface Passivation in GaAs Nanowires. *Nano Letters*, **12**, 4484-4489. <https://doi.org/10.1021/nl301391h>
- [3] Luo, L.B., Chen, J.J., Wang, M.Z., *et al.* (2014) Near-Infrared Light Photovoltaic Detector Based on GaAs Nanocone Array/Monolayer Graphene Schottky Junction. *Advanced Functional Materials*, **24**, 2794-2800. <https://doi.org/10.1002/adfm.201303368>
- [4] 郑勇, 肖鹏飞, 易天成, 等. 1MeV 电子辐照 GaAs/Ge 太阳电池变温光致发光研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015(6): 568-570.
- [5] 王建利, 牛沈军, 兰天平, 等. 砷化镓材料[J]. 科技创新导报, 2010(32): 75-77.
- [6] Wirth, B.D. (2007) How Does Radiation Damage Materials? *Science*, **318**, 923-924. <https://doi.org/10.1126/science.1150394>
- [7] Sickafus, K.E., Grimes, R.W., Valdez, J.A., *et al.* (2007) Radiation-Induced Amorphization Resistance and Radiation Tolerance in Structurally Related Oxides. *Nature Materials*, **6**, 217-23. <https://doi.org/10.1038/nmat1842>
- [8] Messenger, S.R., Burke, E.A., Morton, T.L., *et al.* (2003) Modelling Low Energy Proton Radiation Effects on Solar Cells. *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, 11-18 May 2003, 716-719 Vol. 1.
- [9] 肖厦子, 宋定坤, 楚海建, 等. 金属材料力学性能的辐照硬化效应[J]. 力学进展, 2015, 45(1): 141-178.
- [10] 李东波, 赵冬, 华军. 碳原子辐照损伤后石墨烯拉伸力学性能的温度相关性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(3): 454-458.
- [11] 张新辉. GaAs/Ge 太阳电池抗电子辐射研究[J]. 电源技术, 2004, 28(1): 17-21.
- [12] Mazouz, H., Logerais, P.O., Belghachi, A., *et al.* (2015) Effect of Electron Irradiation Fluence on the Output Parameters of GaAs Solar Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**, 13857-13865. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.127>
- [13] Tunhuma, S.M., Auret, F.D., Legodi, M.J., *et al.* (2016) The Fine Structure of Electron Irradiation Induced EL2-Like Defects in n-GaAs. *Journal of Applied Physics*, **119**, 5211-5208. <https://doi.org/10.1063/1.4945774>
- [14] Wang, J.L., Yi, T.C., Zheng, Y., *et al.* (2017) Temperature-Dependent Photoluminescence Analysis of 1.0 MeV Electron Irradiation-Induced Nonradiative Recombination Centers in n<sup>+</sup>-p GaAs Middle Cell of GaInP/GaAs/Ge Triple-Junction Solar Cells. *Chinese Physics Letters*, **34**, 182-184. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/34/7/076106>
- [15] 玛丽娅, 郭旗, 艾尔肯, 等. In(0.22)Ga(0.78)As/GaAs 量子阱光致发光谱电子辐照效应研究[J]. 光学学报, 2017(2): 191-198.
- [16] 赵慧杰. 低能质子和电子辐照 GaAs/Ge 太阳电池性能演化及损伤机理[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [17] 孙旭芳, 王荣, 刘运宏, 等. 质子辐照与电子辐照对空间 GaAs/Ge 太阳电池性能影响比较[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2006, 42(5): 489-491.
- [18] Pursley, B.C., Song, X., Torresisea, R.O., *et al.* (2015) Robustness of n-GaAs Carrier Spin Properties to 5 MeV Proton Irradiation. *Applied Physics Letters*, **106**, 323-217. <https://doi.org/10.1063/1.4907286>
- [19] Tan, L.Y., Li, F.J., Xie, X.L., *et al.* (2017) Study on Irradiation-Induced Defects in GaAs/AlGaAs Core-Shell Nanowires via Photoluminescence Technique. *Chinese Physics B*, **26**, 328-332. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/26/8/086201>

- [20] 刘运宏, 王荣, 孙旭芳. 碳离子辐射对空间 GaAs/Ge 太阳能电池性能影响的研究[J]. 核技术, 2007, 30(4): 259-261.
- [21] Deshmukh, P., Singh, A., Pal, S., *et al.* (2015) Photomixing and Photoconductive THz Generation Improvement in SI-GaAs after Carbon Irradiation. *International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Hong Kong, 23-28 August 2015, 1-2. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2015.7327843>
- [22] Singh, A., Pal, S., Surdi, H., *et al.* (2015) Carbon Irradiated Semi Insulating GaAs for Photoconductive Terahertz Pulse Detection. *Optics Express*, **23**, 6656-6661. <https://doi.org/10.1364/OE.23.006656>
- [23] Bobby, A., Shiwakoti, N., Sarun, P.M., *et al.* (2015) Swift Heavy Ion Induced Capacitance and Dielectric Properties of Ni/n-GaAs Schottky Diode. *Current Applied Physics*, **15**, 1500-1505. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2015.08.020>
- [24] Kapitonov, Y.V., Shapochkin, P.Y., Petrov, Y.V., *et al.* (2015) Effect of Irradiation by He<sup>+</sup> and Ga<sup>+</sup> Ions on the 2D-Exciton Susceptibility of InGaAs/GaAs Quantum-Well Structures. *Physica Status Solidi*, **252**, 1950-1954. <https://doi.org/10.1002/pssb.201451611>
- [25] 杨迪, 孙梦利, 袁伟, 等. 离子辐照 GaAs 的光致发光和拉曼散射研究[J]. 核技术, 2016, 39(10): 17-23.
- [26] 杨迪, 彭金鑫, 孙梦利, 等. 重离子注入 GaAs 辐照损伤研究[J]. 现代应用物理, 2017, 8(1): 56-60.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [app@hanspub.org](mailto:app@hanspub.org)