

电子辐照下 GaAs/Ge 太阳能电池载流子输运机理研究

齐佳红 胡建民 盛延辉 吴宜勇 徐建文 王月媛 杨晓明 张子锐 周扬

Carrier transport mechanism of GaAs/Ge solar cells under electrons irradiation

Qi Jia-Hong Hu Jian-Min Sheng Yan-Hui Wu Yi-Yong Xu Jian-Wen Wang Yue-Yuan Yang Xiao-Ming Zhang Zi-Rui Zhou Yang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 108802 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.108802

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.108802>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚合物和小分子叠层结构有机太阳能电池研究

[A Study of tandem structure organic solar cells composed of polymer and small molecular sub-cells](#)

物理学报.2014, 63(21): 218801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.218801>

前后光栅周期对于双光栅结构薄膜太阳能电池光俘获效应的影响

[Influence of front and back grating period on light trapping of dual-grating structure thin film solar cell](#)

物理学报.2014, 63(19): 198801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.198801>

硅基薄膜太阳能电池一维光子晶体背反射器的模拟设计与制备

[Simulation, design and fabrication of one-dimensional photonic crystal back reflector for silicon thin film solar cell](#)

物理学报.2014, 63(12): 128801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.128801>

硅片及其太阳能电池的光衰规律研究

[Study on light-induced degradation of silicon wafers and solar cells](#)

物理学报.2014, 63(2): 028803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.028803>

渐变带隙氢化非晶硅锗薄膜太阳能电池的优化设计

[Optimization design of hydrogenated amorphous silicon germanium thin film solar cell with graded band gap profile](#)

物理学报.2014, 63(2): 028802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.028802>

电子辐照下 GaAs/Ge 太阳能电池载流子 输运机理研究*

齐佳红¹⁾ 胡建民^{1)†} 盛延辉¹⁾ 吴宜勇²⁾ 徐建文³⁾ 王月媛^{1)‡}
杨晓明¹⁾ 张子锐¹⁾ 周扬¹⁾

1) (哈尔滨师范大学, 光电带隙材料教育部重点实验室, 物理与电子工程学院, 哈尔滨 150025)

2) (哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

3) (上海空间电源研究所, 上海 200233)

(2014年11月27日收到; 2014年12月14日收到修改稿)

通过地面模拟辐照试验获得不同能量电子辐照下 GaAs/Ge 太阳能电池电学参数退化的基本规律, 在此基础上使用 PC1 D 模拟程序分析太阳能电池内部的载流子输运机理, 建立不同能量的电子辐照下 GaAs/Ge 太阳能电池中多数载流子浓度和少数载流子扩散长度随辐照粒子注量变化的基本规律. 研究表明: 多数载流子浓度和少数载流子扩散长度均随入射电子注量的增大而减小, 多数载流子去除率和少数载流子扩散长度损伤系数均随电子能量的增高而增大, 多数载流子去除效应和少数载流子扩散长度缩短分别是电池开路电压和短路电流退化的主要原因.

关键词: GaAs 太阳能电池, 辐照损伤, 载流子浓度, 载流子扩散长度

PACS: 88.40.hj, 81.40.Wx, 07.89.+b

DOI: 10.7498/aps.64.108802

1 引言

航天器在轨服役期间要经历非常恶劣的空间环境. 太阳能电池作为航天器的主要能源供给装备必然受到高能粒子辐射环境的作用导致电池性能发生明显退化, 从而要求空间太阳能电池须具备较高的光电转换效率和较强的抗辐照能力. GaAs 太阳能电池因具备高的光电转换效率和抗辐照能力而被广泛应用于航天领域. 由于空间带电粒子辐照导致太阳能电池电学性能发生明显退化而影响航天器在轨服役期间的可靠性和寿命, 所以 GaAs 太阳能电池辐照损伤效应和机理研究备受广大航天工作者的关注.

美国喷气动力实验室和海军实验室分别创建

了等效注量法^[1]和位移损伤剂量法^[2], 在太阳能电池在轨行为评价方法方面做了大量的研究工作, 为航天器服役寿命预测提供了重要的实验依据和理论支持. 胡建民等^[3]采用等效注量法评价 GaAs/Ge 太阳能电池在地球同步轨道环境下的服役行为, 而后采用位移损伤剂量法分别评价 GaAs/Ge 和 GaInP/GaAs/Ge 太阳能电池的在轨行为^[4]. 研究表明, GaInP/GaAs/Ge 电池中 GaAs 子电池损伤是引起三结电池电学性能退化的主要原因, 与 GaAs/Ge 电池相比, GaInP/GaAs/Ge 电池表现出更为优良的抗辐照性能. 在空间太阳能电池辐照损伤机理研究方面的已有研究表明, 太阳能电池的性能优劣是由其内部载流子的输运状态和机理决定的^[5]. 空间带电粒子在电池内部产生损伤缺

* 国家自然科学基金(批准号: 11075043)、黑龙江省教育厅科学技术研究项目(批准号: 12541233)、哈尔滨师范大学硕士研究生创新科研基金(批准号: HSDSSCX2014-28)和哈尔滨师范大学科技创新能力提升计划(批准号: 10XYG-04, KJB201110)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hujianmin@foxmail.com

‡ 通信作者. E-mail: yywang72@foxmail.com

陷改变了载流子的运输状态,从而导致电池性能下降^[6].为深入探索空间太阳电池的辐照损伤机理,胡建民等^[7,8]研究了GaInP/GaAs/Ge电池和GaAs/Ge电池的暗特性.结果表明:在空间带电粒子辐照下,太阳电池串、并联电阻的变化与电池不同区域的损伤密切相关,串联电阻增大和并联电阻减小是导致太阳电池电学性能退化的重要原因.目前的研究结果并未能从电池内部载流子运输机理的角度揭示太阳电池辐照损伤的内在机理.为此,本文通过地面等效模拟加速试验研究电子辐照对GaAs/Ge太阳电池内部载流子运输状态和机理的影响,以试验数据为基础通过PC1D程序^[9]拟合太阳电池的光谱响应和*I-V*特性曲线,给出多数载流子(多子)浓度和少数载流子(少子)扩散长度与辐照电子能量和注量的关系,进一步揭示太阳电池辐照损伤的内在物理机理.研究结果对太阳电池的在轨行为评价和抗辐加固具有重要意义.

2 实 验

试验样品选用GaAs/Ge单结太阳电池,采用金属有机化合物气相沉积法(MOCVD)制备,面积为2 cm × 1.4 cm,其结构参数如图1所示.

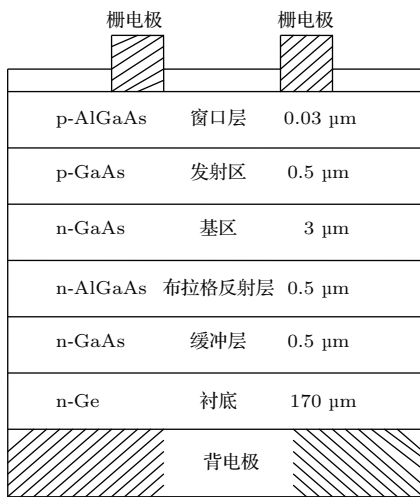


图1 空间GaAs/Ge太阳电池结构示意图

Fig. 1. Structure chart of GaAs/Ge solar cells.

为了研究不同能量的电子辐照对太阳电池电学性能的影响,试验选择1, 1.8和10 MeV电子,使用ELV-8型电子加速器对GaAs/Ge太阳电池进行辐照试验.根据地面等效模拟加速试验的等效模拟区间^[10]选取电子通量为 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.参

照太阳电池国际测试标准^[11],在25 °C和AM0(辐照功率为 $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)太阳光谱辐照条件下进行*I-V*特性测试.

3 结果与讨论

3.1 光谱响应分析

为研究不同能量的电子辐照对太阳电池电学性能的影响,本文对1和1.8 MeV电子辐照下的光谱响应曲线进行对比分析.图2为不同能量的电子辐照下GaAs/Ge太阳电池的光谱响应曲线.由图2可见,随着入射电子能量的增高,GaAs/Ge太阳电池的光谱响应曲线的衰减幅度增大.光谱响应表示在一定波长的光照下太阳电池对光生少子的收集效率.电子辐照下电池内部产生的位移损伤缺陷源于入射电子与晶格原子的弹性散射.当入射电子的能量高于晶格原子发生位移的能量阈值(电子在GaAs材料中的原子位移阈能为245 keV)时,电子能量越高则弹性散射效应越强,位移损伤缺陷浓度也越高^[7].位移损伤缺陷为光生少子的陷阱,较高的陷阱浓度造成少子扩散长度更大幅度地缩短,从而收集效率的衰减更加明显.

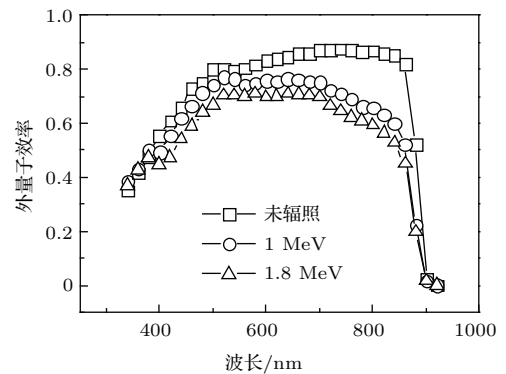


图2 不同能量的电子辐照下GaAs/Ge太阳电池的光谱响应曲线

Fig. 2. Spectral response curves for the GaAs/Ge solar cells under different energy electrons irradiation.

此外,由图2可见,随着入射光波长的增加,GaAs/Ge太阳电池光谱响应的衰减幅度增大.已有研究表明,光谱响应在不同波段的衰减与电池不同区域(发射区、结区和基区)的损伤有关.光谱响应在340—720 nm波段范围内的衰减主要是由发射区的辐照缺陷引起光生载流子扩散长度缩短、收集效率降低所致,而在720—900 nm波段的衰减主要是由基区的辐照损伤缺陷造成的^[12].当

电池受到辐射且内部产生损伤缺陷时, 光生载流子的扩散长度缩短, 处于基区底部和发射区顶部的光生载流子更难以运动到空间电荷区而被收集. 能量大于 1 MeV 的电子完全能够穿透电池片, 在电池内部不同区域产生的辐照损伤缺陷浓度是近似均匀的. 由于单结 GaAs/Ge 电池发射区厚度 (约为 0.5 μm) 远小于基区厚度 (约为 3 μm), 而光生载流子的扩散长度与基区厚度相当, 当太阳电池受到辐射损伤时, 与发射区相比, 基区底部的光生载流子更难以到达结区, 所以在一定的电子辐照剂量下光谱响应在长波区的衰减幅度比短波区更大. 可见, 在相对较低的电子辐照剂量下, GaAs/Ge 太阳电池电学性能的退化更多地源于基区损伤.

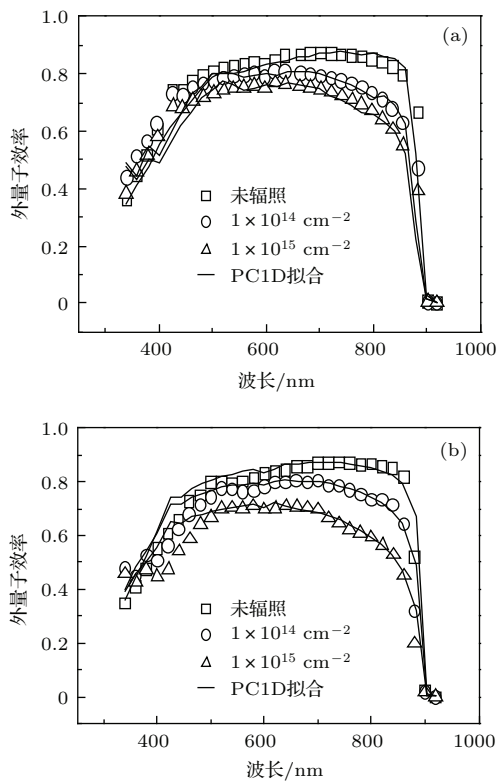


图3 不同剂量的电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池光谱响应曲线 (a) 1 MeV; (b) 1.8 MeV
Fig. 3. Spectral response curves of the GaAs/Ge solar cells for various fluences electrons irradiation for (a) 1 MeV, (b) 1.8 MeV.

为进一步分析不同能量电子辐照下太阳电池内部载流子输运性质的变化规律, 本文采用 PC1D 太阳电池模拟程序拟合电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池的光谱响应. 图3为不同能量的电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池光谱响应的试验曲线和理论拟合曲线. 由图3可见, 光谱响应的试验测试曲线与理论拟合曲线符合较好. 随着电子辐照剂量的

增加, 电池光谱响应的退化幅度增大, 这与较大的电子辐照剂量导致较高的位移损伤缺陷浓度直接相关.

3.2 伏安特性与载流子输运机理分析

以太阳电池光谱响应拟合数据为基础, 使用 PC1D 程序可以计算不同能量的电子辐照下太阳电池的开路电压和短路电流. 图4为不同能量的电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池的归一化开路电压 (a) 和归一化短路电流 (b) 退化曲线. 由图4可见, 不同能量的电子辐照下, GaAs/Ge 太阳电池开路电压和短路电流的退化幅度均随入射电子能量的增高而增大, 这与太阳电池内部载流子的输运状态和性质密切相关.

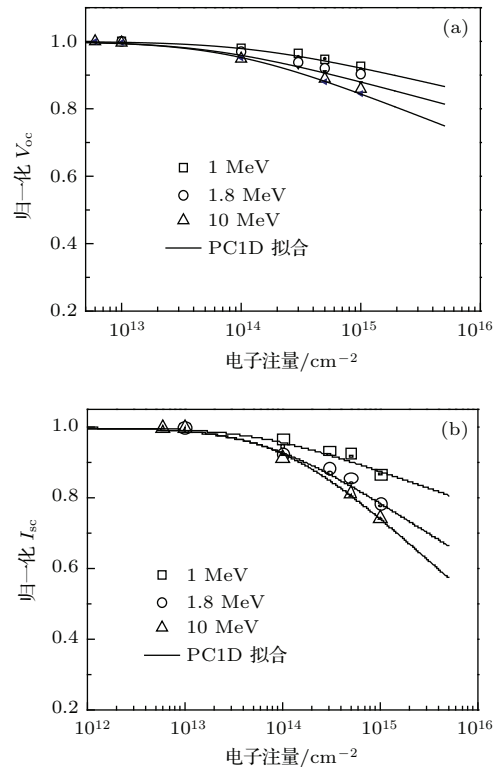


图4 不同能量的电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池电学参数退化曲线 (a) 归一化开路电压; (b) 归一化短路电流
Fig. 4. The degradation curves of the normalized open voltage (a) and normalized short circuit current (b) of GaAs/Ge solar cells under different energy electrons irradiation.

根据半导体器件物理可知, P-N 结的内建电压为

$$V_D = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}, \quad (1)$$

式中 k_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, q 为电子电量, N_A 与 N_D 分别为受主浓度和施主浓度; n_i 为

本征载流子浓度. 设电池P型发射区的多子(空穴)浓度为 n_p , N型基区多子(电子)浓度为 n_n , 则在杂质全部电离的情况下 $N_A \approx n_p$, $N_D \approx n_n$. 从而内建电压表示为^[6]

$$V_D = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{n_p n_n}{n_i^2}. \quad (2)$$

在忽略有效力场的情况下, 太阳电池的开路电压近似等于内建电压. 可见太阳电池的开路电压主要取决于电池的多子浓度. 有研究表明, 空间带电粒子辐照使半导体材料内的多子产生去除效应. 多子浓度 n 随入射粒子注量的变化关系为^[13]

$$n = n_0 \exp\left(\frac{-R_C \phi}{n_0}\right), \quad (3)$$

式中 n_0 和 n 分别表示辐照前、后的多子浓度; ϕ 为入射粒子注量; R_C 为多子去除率, 表示一定辐照注量下载流子浓度的变化率. 图5为不同能量的电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池多子浓度与电子注量的关系曲线. 由图5可见, 不同能量的电子辐照下, GaAs/Ge 太阳电池中多子浓度随电子注量的增加而降低. 由(3)式计算得到的不同能量的电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池多子去除率列于表1中. 由表1可见, 随着入射电子能量的增加, 多子去除率明显增大. 综上所述, 一定能量的电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池开路电压的退化主要源于多子的去除效应.

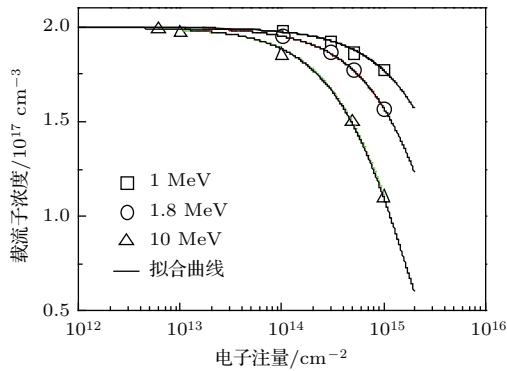


图5 不同能量电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池多子浓度随电子注量的变化

Fig. 5. The changing curves of majority carriers' concentration vs. electrons fluence for GaAs/Ge solar cells under different energy electrons irradiation.

如前所述, 辐照引入的位移损伤缺陷作为少子陷阱造成少子扩散长度缩短, 少子扩散长度随入射粒子注量的变化关系式为

$$\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + K_L \phi, \quad (4)$$

式中 L_0 和 L 分别为辐照前、后的少子扩散长度; ϕ 为辐照注量; K_L 为少子扩散长度损伤系数, 反映了单位辐照注量下少子扩散长度的相对变化.

通过PC1D程序拟合可以得到不同能量的电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池中少子扩散长度随电子注量变化的关系曲线, 如图6所示. 由图6可见, 一定能量的电子辐照下, GaAs/Ge 太阳电池中少子扩散长度随电子注量的增加而缩短. 由(4)式计算得到不同能量的电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池的少子扩散长度损伤系数列于表1中. 由表1可见, 随着入射电子能量的增高, 少子扩散长度损伤系数明显增大.

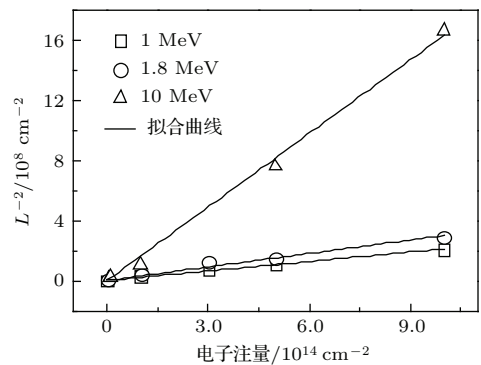


图6 不同能量电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池少子扩散长度随电子注量的变化

Fig. 6. The changing curves of minority carriers' diffusion length vs. electrons fluence for GaAs/Ge solar cells under different energy electrons irradiation.

表1 电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池多子去除率与少子扩散长度损伤系数

Table 1. Majority carriers' removal rate and damage coefficient of minority carriers' diffusion length for GaAs/Ge solar cells under different energy electrons irradiation.

| 电子能量 | 1 MeV | 1.8 MeV | 10 MeV |
|----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
| R_C/cm^{-1} | 24.03 | 41.93 | 121.09 |
| K_L | 2.04×10^{-7} | 3×10^{-7} | 1.85×10^{-6} |

4 结 论

本文研究了不同能量的电子辐照下 GaAs/Ge 太阳电池载流子的输运机理. 研究结果表明, 一定能量的电子辐照下, GaAs/Ge 太阳电池光谱响应曲线长波段衰减较明显, 说明电学性能退化更多地源于电池基区损伤; 随入射电子注量的增加, GaAs/Ge 太阳电池中多子浓度降低、少子扩散长度

缩短; 多子去除率和少子扩散长度损伤系数均随电子能量的增高而增大. 上述结果就是太阳能电池电学参数随入射电子注量增大而发生退化以及电池电学参数退化幅度随电子能量增高而增大的根本原因. 说明多子去除效应和少子扩散长度缩短分别是造成 GaAs/Ge 太阳能电池开路电压和短路电流发生退化的内在物理机理.

参考文献

- [1] Anspaugh B E 1996 *GaAs Solar Cell Radiation Handbook* (California: JPL Publication Jet Propulsion Laboratory) p5
- [2] Messenger S R, Jackson E M, Warner J H, Walters R J 2010 *Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Honolulu, Hi, June 20–25, 2010 p1106
- [3] Hu J M, Wu Y Y, He S, Qian Y, Chen M B, Yang D Z 2010 *Acta Energetiae Sol. Sin.* **31** 1568 (in Chinese) [胡建民, 吴宜勇, 何松, 钱勇, 陈鸣波, 杨德庄 2010 太阳能学报 **31** 1568]
- [4] Wu Y Y, Yue L, Hu J M, Lan M J, Xiao J D, Yang D Z, He S Y, Zhang Z W, Wang X C, Qian Y, Chen M B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 098110 (in Chinese) [吴宜勇, 岳龙, 胡建民, 蓝慕杰, 肖景东, 杨德庄, 何世禹, 张忠卫, 王训春, 钱勇, 陈鸣波 2011 物理学报 **60** 098110]
- [5] Hu J M, Wu Y Y, Xiao J D, Yang D Z, He S Y 2008 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **92** 1652
- [6] Hu J M, Wang Y Y 2013 *Radiation Damage Effects of Space Charged Particles for GaAs Solar Cells* (Beijing: Chinese Atomic Energy Press) p96 (in Chinese) [胡建民, 王月媛 2013 GaAs 太阳能电池空间带电粒子辐照损伤效应 (北京: 中国原子能出版社) 第 96 页]
- [7] Hu J M, Wu Y Y, Qian Y, Yang D Z, He S Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5051 (in Chinese) [胡建民, 吴宜勇, 钱勇, 杨德庄, 何世禹 2009 物理学报 **58** 5051]
- [8] Yue L, Wu Y Y, Zhang Y Q, Hu J M, Sun C Y, Hao M M, Lan M J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 188101 (in Chinese) [岳龙, 吴宜勇, 张延清, 胡建民, 孙承月, 郝明明, 蓝慕杰 2014 物理学报 **63** 188101]
- [9] Basore P <http://www.pv.unsw.edu.au/info-about/our-school/products-services/pc1d> [2014-11-20]
- [10] Hu J M, Wu Y Y, Yang D Z, He S Y 2008 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **266** 3577
- [11] ASTM Standard E948-05a (<http://www.astm.org>)
- [12] Hu J M, Wu Y Y, Zhang Z W, Yang D Z, He S Y 2008 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **266** 267
- [13] Zuleeg R, Lehovec K 1980 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **27** 1343

Carrier transport mechanism of GaAs/Ge solar cells under electrons irradiation*

Qi Jia-Hong¹⁾ Hu Jian-Min^{1)†} Sheng Yan-Hui¹⁾ Wu Yi-Yong²⁾ Xu Jian-Wen³⁾
Wang Yue-Yuan^{1)‡} Yang Xiao-Ming¹⁾ Zhang Zi-Rui¹⁾ Zhou Yang¹⁾

1) (Key Laboratory for Photonic and Electronic Bandgap Materials, Ministry of Education, School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

2) (School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

3) (Shanghai Institute of Space Power Sources, Shanghai 200233, China)

(Received 27 November 2014; revised manuscript received 14 December 2014)

Abstract

In this paper, the basic laws of spectral response, open-circuit voltage and short circuit current of GaAs/Ge solar cells are obtained by ground simulation irradiation test under the different-energy electron irradiation, such as 1, 1.8 and 10 MeV. The carrier transport mechanism in cells is analyzed using the PC1 D simulation program. The variations of the majority carrier concentration and the minority carrier diffusion length with the irradiation particle fluence are obtained in GaAs/Ge solar cells under different-energy electron irradiation. Majority carrier removal rate and minority carrier diffusion length damage coefficient are calculated under different-energy electron irradiation. The results show that majority carrier concentration and minority carrier diffusion length decrease with increasing the incident electron fluence. The majority carrier removal rate and the damage coefficient of minority carrier diffusion length increase with increasing the electrons energy. The majority carrier removal effect and the minority carrier diffusion length shortened are the main reasons of open-circuit voltage and short circuit current degradation of the solar cells, respectively.

Keywords: GaAs solar cells, irradiation damage, carrier concentration, carrier diffusion length

PACS: 88.40.hj, 81.40.Wx, 07.89.+b

DOI: 10.7498/aps.64.108802

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11075043), Heilongjiang Provincial Department of Education Science and Technology Research Project, China (Grant No. 12541233), Harbin Normal University Graduate Innovation Research Fund, China (Grant No. HSDSSCX2014-28), and Harbin Normal University of Science and Technology Innovation Capacity Upgrading Planning, China (Grant Nos. 10XYG-04, KJB201110).

† Corresponding author. E-mail: hujianmin@foxmail.com

‡ Corresponding author. E-mail: yywang72@foxmail.com