

# 国产高效 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的低能质子辐射效应\*

王 荣<sup>1,†</sup> 刘运宏<sup>1</sup> 孙旭芳<sup>1</sup> 崔新宇<sup>2</sup>

(1 北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京师范大学低能核物理研究所, 北京市辐射中心, 北京 100875)

(2 中国电子科技集团公司第十八研究所, 天津 300381)

**摘要:** 运用  $2 \times 1.7$  MV 串列静电加速器提供的质子束, 对 MOCVD 方法制备的 GaInP/GaAs/Ge 三结电池进行低能质子辐射效应研究. 选质子能量为 0.28, 0.62 和 2.80 MeV, 辐照注量为  $1 \times 10^{10}$ ,  $1 \times 10^{11}$ ,  $1 \times 10^{12}$  和  $1 \times 10^{13}$   $\text{cm}^{-2}$ . 对电池的辐射效应用  $I-V$  特性和光谱响应测试进行分析. 研究表明: 随辐照注量的增加, 太阳电池性能参数  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  和  $P_{max}$  的衰降幅度均增大; 但随质子辐照能量的增加,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  和  $P_{max}$  的衰降幅度均减小. 实验中 0.28 MeV 质子辐照引起电池  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_{max}$  衰降最显著, 三结电池中光谱响应衰降最明显的是中间 GaAs 电池.

**关键词:** GaInP/GaAs/Ge 太阳电池; 质子辐照; 光谱响应

EEACC: 8420

中图分类号: TM914

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)10-1599-04

## 1 引言

多结太阳电池是一种新型高效太阳电池, 国产 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池效率接近 29% (AM0), 有望得到更广泛的空间应用. 近地空间范艾伦辐射带 (Van Allen radiation belt) 中各种能量、不同通量的质子、电子辐射都会造成其性能衰降, 影响电源系统的正常工作. 因此, 必须对其进行抗辐射性能研究. 对这种国产 GaInP/GaAs/Ge 多结太阳电池的电子辐射效应研究已有报道<sup>[1]</sup>, 考虑到用 MOCVD 方法制备的 GaInP/GaAs/Ge 三结电池的结构特点以及低能质子比高能质子对太阳电池的辐射损伤更为严重<sup>[2,3]</sup>, 所以, 本工作选择 0.28 ~ 2.80 MeV 低能质子对这种国产高效 GaInP/GaAs/Ge 多结太阳电池的辐射效应进行了研究.

## 2 实验

实验样品是国产空间实用 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池, 用金属有机化合物化学气相沉积法 (MOCVD) 制备, 效率为 25.2% ~ 28.3%, 光照面积为  $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ , 其结构见图 1. 样品以 p 型 Ge 单晶为衬底, 掺杂制备 n 型层形成 Ge 底电池, 通过过

渡结 (TJ2) 在其上制备 GaAs 中间太阳电池, 再在另一过渡结 (TJ1) 上制备 GaInP 顶太阳电池.  $\text{MgF}_2/\text{ZnS}$  双层抗反射膜 (anti-reflection coating) 用于减少光的反射, 各部分厚度详见图 1. 样品上下还制作了用于导电连接的前电极和背电极.

辐照实验在北京师范大学  $2 \times 1.7$  MV 串列静

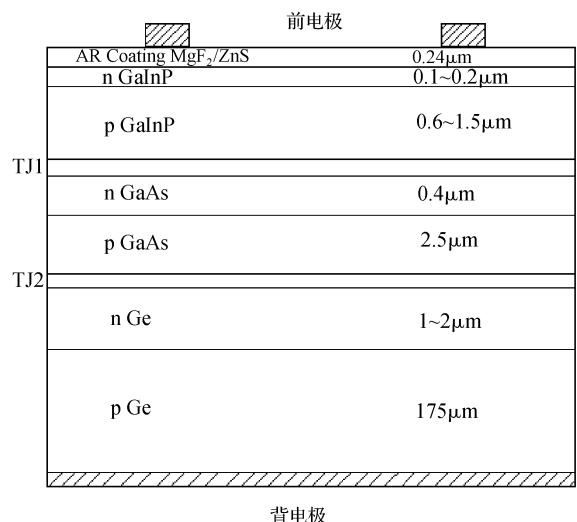


图 1 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of GaInP/GaAs/Ge solar cell

\* 国家自然科学基金(批准号:10675023)和北京市自然科学基金(批准号:1052009)资助项目

† 通信作者. Email: wangr@bnu.edu.cn

2007-03-06 收到, 2007-05-07 定稿

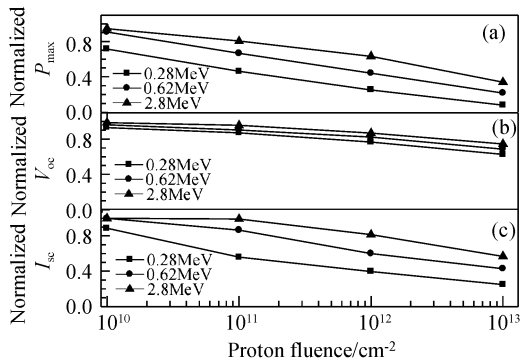


图 2 GaInP/GaAs/Ge 电池性能参数  $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$  和  $P_{max}$  随质子不同能量及注量辐照的变化

Fig. 2 Changes in properties of GaInP/GaAs/Ge solar cell as a function of proton irradiation fluence with different energies

电加速器大型设备上完成. 根据我们近年来对 GaAs 薄膜太阳电池质子辐射效应的研究<sup>[2,3]</sup>, 低能质子比高能质子对太阳电池的辐射损伤更为严重, 所以本实验中选质子能量为 0.28, 0.62 和 2.80 MeV. 再根据我们多年对太阳电池质子辐射效应的研究<sup>[2~4]</sup>, 知道质子注量低于  $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  的辐照引起电池的性能衰降太小以致难以测到, 而高于  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  的辐照导致电池的性能衰降过大, 没有研究的意义. 因此选择质子辐照注量为  $1 \times 10^{10}$ ,  $1 \times 10^{11}$ ,  $1 \times 10^{12}$  和  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . 为了减小辐照温升对样品电池的影响, 限制辐照注量率约为  $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$ , 并用计算机控制的二维扫描系统实现均匀辐照.

辐照实验前后, 对太阳电池样品用 LAPSS II 标准太阳模拟器 (引进美国光谱实验室设备), 在 AM0 (大气质量为零的太阳光谱分布)、 $136.7 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,  $25^\circ\text{C}$  条件下进行电流-电压 ( $I$ - $V$ ) 特性测试; 并用单色仪、斩波器、偏置光源和 Stanford 锁相放大器组成的测试系统测量辐照前后电池的光谱响应.

### 3 结果与讨论

利用测得的辐照前后 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池样品的  $I$ - $V$  特性, 分析得到太阳电池的短路电流  $I_{sc}$ , 开路电压  $V_{oc}$  和最大输出功率  $P_{max}$ . 图 2 汇总了各种能量质子辐照太阳电池引起其性能参数  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  和  $P_{max}$  衰降 (归一化的) 随不同辐照注量的变化. 从图 2 中容易看出, 对相同能量的质子辐照, 随辐照注量的增加, 太阳电池性能参数  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  和  $P_{max}$  的衰降幅度均增大; 但是, 对相同注量的质子辐照, 随质子辐照能量的增加,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  和  $P_{max}$  的衰降

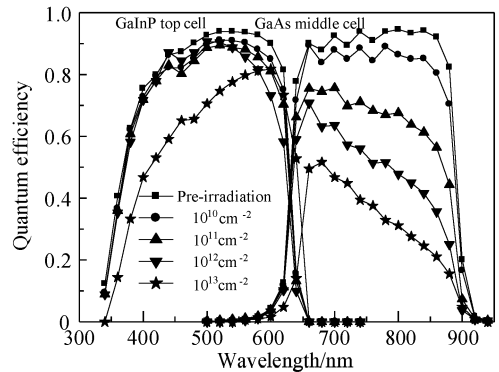


图 3 GaInP/GaAs/Ge 电池光谱响应随质子注量的变化  
Fig. 3 Spectral response of GaInP/GaAs/Ge cells versus proton fluence

幅度均减小, 0.28 MeV 质子辐照电池引起电池性能衰降最显著, 2.80 MeV 引起电池性能衰降最弱, 0.62 MeV 引起电池性能衰降介于二者之间.

比较图 2 (b), (c) 也可看出: 随辐照注量的增加, 太阳电池性能参数  $I_{sc}$  衰降幅度比  $V_{oc}$  衰降幅度要大, 虽然质子辐射产生的缺陷更大, 可能作为复合中心, 增加了复合电流, 降低了  $V_{oc}$ , 但整个辐射响应主要由  $I_{sc}$  衰降控制, 说明质子辐射损伤主要发生在电池的基区<sup>[5]</sup>.

为了进一步解释 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池性能衰降的微观机理, 对这种太阳电池不同注量质子辐照后的光谱响应变化进行测试分析. 图 3 给出了 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池的光谱响应随不同注量质子辐照 (相同能量为 0.62 MeV) 的变化. 图中未画 Ge 底电池的光谱, 因为其辐照后仍有很大的短路电流, 不会影响 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池的电流<sup>[1]</sup>.

由图 3 可知, GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池光谱响应衰降幅度随辐照注量的增加而增大, 但各部分电池不同波段光谱响应的衰降幅度是不同的. 在低注量  $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  辐照时, 光谱响应没有明显的衰降变化; 但注量从  $1 \times 10^{11}$  增加到  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  时, 三结电池的 GaAs 中间电池光谱响应在 750~900 nm 长波范围有明显衰降, 600~700 nm 短波范围衰降较小; 当注量大于  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  时, GaInP 顶电池和中间 GaAs 电池的光谱响应分别在 350~550 nm 短波波段、700~900 nm 长波段出现显著衰降. 中间 GaAs 电池的光谱响应在 700~900 nm 长波段出现显著衰降的原因是质子辐射使 GaAs 电池基区和发射区少数载流子寿命减小、其扩散长度缩短所致, 可用如下方程描述<sup>[6]</sup>.

$$\Delta(1/L^2) = 1/L_{\phi}^2 - 1/L_0^2 = K_L \phi$$

其中  $L_{\phi}$ ,  $L_0$  分别为辐射前后的少数载流子的扩散长度;  $K_L$  为损伤系数;  $\phi$  为辐射注量.

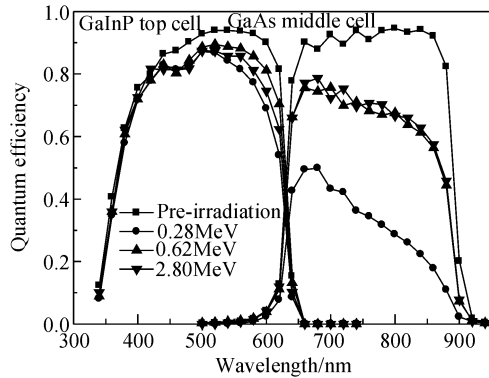


图 4 GaInP/GaAs/Ge 电池光谱响应随质子能量的变化  
Fig. 4 Spectral response of GaInP/GaAs/Ge cells versus proton energies

GaInP 顶电池光谱响应在 350~550nm 短波段出现显著衰减,主要是由于质子辐照顶 GaInP 电池在发射区、窗口层及其界面产生的损伤也会增大,使得发射区光生少子扩散长度减小,当其值减小到小于结深时,引起光谱响应在短波范围内的显著衰减<sup>[7]</sup>.

为了解释 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池性能衰减随不同能量质子辐照的变化,并对这种太阳电池不同能量质子辐照后的光谱响应变化进行了测试分析.

图 4 是 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池的光谱响应随不同能量质子辐照(相同注量为  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ )的变化.由图 4 可知,GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池光谱响应衰减幅度随着辐照质子能量的减小而增大.但 GaInP 顶电池光谱响应衰减变化较小,而中间 GaAs 电池光谱响应衰减明显,尤其是 0.28MeV 低能质子引起电池光谱响应衰减最大,说明 0.28MeV 低能质子对多结电池的中间 GaAs 电池损伤最为严重.根据实验样品太阳电池结构,用 SRIM2003 程序<sup>[8]</sup>对质子在 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池中的损伤分布进行理论模拟近似(抗反射薄层模拟中忽略)计算.模拟结果表明质子在电池中产生的损伤分布是不均匀的,出现强的 Bragg 损伤峰(如图 5 所示).依上述太阳电池多层厚度结构,0.28MeV 的质子辐射产生的损伤最严重的 Bragg 损伤峰在 GaAs 中间电池 pn 结附近,这样导致 0.28MeV 低能质子引起电池性能衰减最为显著;而 0.62MeV 的质子辐射的 Bragg 损伤峰(离电池表面约  $6.3 \mu\text{m}$ )远于 Ge 底电池 pn 结(离电池表面约  $5.5 \mu\text{m}$ ),辐射引起电池性能衰减较弱;而 2.80MeV 的质子辐射损伤峰(离电池表面约  $55 \mu\text{m}$ )远离顶、中间、底电池的三个 pn 结,从而引起电池性能衰减最弱.

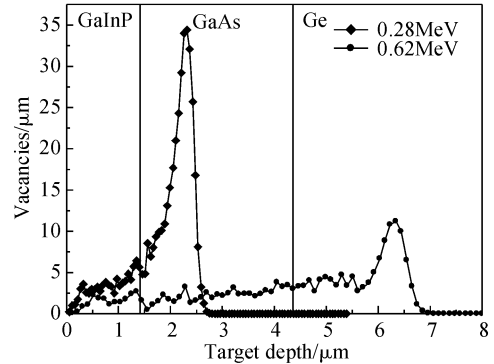


图 5 0.28 和 0.62MeV 的质子在 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池中产生的损伤分布  
Fig. 5 Damage distribution of 0.28 and 0.62MeV protons in GaInP/GaAs/Ge solar cell

## 4 结论

通过对国产 GaInP/GaAs/Ge 三结电池低能质子辐射,用  $I-V$  特性和光谱响应测试分析其辐射效应,得到如下结论:随辐照注量的增加,这种太阳电池性能参数  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  和  $P_{max}$  的衰减幅度增大;但是,随质子辐照能量的增加, $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  和  $P_{max}$  的衰减幅度减小,0.28MeV 质子辐照电池引起电池性能衰减最显著.GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池光谱响应也是随着辐照注量的增加,其衰减幅度是增大的,当注量高于  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  辐照,质子引起中间 GaAs 电池光谱响应在 750~900nm 长波范围的明显衰减;而这种太阳电池光谱响应是随着辐照质子能量的增大,其衰减幅度是减小的.0.28MeV 低能质子辐射引起中间 GaAs 电池光谱响应衰减最大.

## 参考文献

- [1] Niu Zhenhong, Guo Qi, Ren Diyuan, et al. Effects of electron irradiation on a home-made type of triple-junction GaInP/GaAs/Ge solar cell. Nuclear Techniques, 2007, 30(1):37 (in Chinese) [牛振红, 郭旗, 任迪远, 等. 一种国产 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的电子辐照特性. 核技术, 2007, 30(1):37]
- [2] Wang Rong, Guo Zengliang, Zhang Xinghui, et al. 5-20 MeV proton irradiation effects on GaAs/Ge solar cells for space use. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2003, 77:351
- [3] Wang Rong, Guo Zengliang, Wang Guangpu. Low energy proton irradiation effects on GaAs/Ge space solar cells. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 80:1052
- [4] Wang Rong, Zhou Hongyu, Si Geli, et al. A comparison of electric properties of back-field Si solar cell and GaAs/Ge solar cell for space use as a function of proton irradiation fluence. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(1):49 (in Chinese) [王荣, 周宏余, 司戈丽, 等. 空间实用背场 Si 太阳电池和 GaAs/Ge 太阳电池性能随质子辐照注量变化的比较. 半导体学报, 2002, 23(1):49]
- [5] Dharmarasu N, Yamaguchi M, Khan A, et al. High-radiation-

- resistant InGaP, InGaAsP, and InGaAs solar cells for multi-junction solar cells. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(15):2399
- [ 6 ] Dharmarasu N, Khan A, Yamaguchi M, et al. Effect of proton irradiation on  $n^+p$  InGaP solar cells. *J Appl Phys*, 2002, 91(5):3306
- [ 7 ] Sumita T, Imaizumi M, Matsuda S, et al. Proton radiation analysis of multi-junction space solar cells. *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, 2003, 206:448
- [ 8 ] Ziegler J F, Biersack J P, Littmark U. The stopping and range of ions in material. New York: Pergamon Press, 2003

## Low-Energy Proton Irradiation Effects of GaInP/GaAs/Ge Triple-Junction Solar Cells for Space Use\*

Wang Rong<sup>1,†</sup>, Liu Yunhong<sup>1</sup>, Sun Xufang<sup>1</sup>, and Cui Xinyu<sup>2</sup>

(1 *Key Laboratory of Beam Technology and Materials Modification of the Ministry of Education, Beijing Radiation Center, Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)  
(2 *Tianjin Institute of Power Sources, Tianjin 300381, China*)

**Abstract:** GaInP/GaAs/Ge triple-junction (3J) solar cells fabricated by metal-organic chemical vapor deposition were irradiated with 0.28, 0.62, and 2.80 MeV protons at doses ranging from  $1 \times 10^{10}$  to  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  using a  $2 \times 1.7 \text{ MV}$  tandem accelerator. The performance degradation of the 3J solar cells was analyzed with current-voltage characteristics and spectral response measurements. The degradation rates of the short circuit current ( $I_{sc}$ ), open circuit voltage ( $V_{oc}$ ), and maximum power output ( $P_{max}$ ) were found to increase as the proton irradiation dose increased, but the degradation rates of  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , and  $P_{max}$  decreased as the proton irradiation energy increased. Irradiation with a proton energy of 0.28 MeV gave rise to the highest degradation rates of  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , and  $P_{max}$  of the solar cells. Also, the spectral response of the GaAs middle cell in 3J solar cells was degraded more significantly than the GaInP top cell.

**Key words:** GaInP/GaAs/Ge solar cell; proton irradiation; spectral response

**EEACC:** 8420

**Article ID:** 0253-4177(2007)10-1599-04

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 10675023) and the Natural Science Foundation of Beijing City (No. 1052009)

† Corresponding author. Email: wangr@bnu.edu.cn

Received 6 March 2007, revised manuscript received 7 May 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics