

# 质子辐射损伤对单结GaAs/Ge太阳电池暗特性参数的影响\*

岳龙<sup>1)2)</sup> 吴宜勇<sup>1)†</sup> 张延清<sup>1)</sup> 胡建民<sup>3)</sup> 孙承月<sup>1)</sup>  
郝明明<sup>2)</sup> 兰慕杰<sup>4)</sup>

1) (哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

2) (工业和信息化部电子第五研究所, 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广州 510610)

3) (哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 哈尔滨 150025)

4) (哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150025)

(2014年5月5日收到; 2014年5月19日收到修改稿)

基于p-n结暗特性双指数模型, 对经质子辐射后的单结GaAs/Ge太阳电池的暗特性 $I-V$ 曲线进行数值拟合, 确定了单结GaAs/Ge太阳电池在辐射前后的四个暗特性特征参数, 即串联电阻 $R_s$ 、并联电阻 $R_{sh}$ 、扩散电流 $I_{s1}$ 和复合电流 $I_{s2}$ . 研究表明, 质子辐射后单结GaAs/Ge太阳电池的 $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{s1}$ 和 $I_{s2}$ 四个暗特性参数均发生显著变化. 经低能质子辐射后, 单结GaAs/Ge太阳电池的 $R_{sh}$ 随位移损伤剂量的增加而减小, 而 $R_s$ ,  $I_{s1}$ 和 $I_{s2}$ 三个参数随位移损伤剂量的增加而增大, 其中串联电阻随位移损伤剂量线性增加而与辐射质子能量无关. 理论分析表明, 上述参数的变化与质子辐射损伤区域分布有关. 基区和发射区的损伤主要引起单结电池串联电阻和扩散电流的增加; 结区的损伤导致并联电阻减小, 复合电流增大.

**关键词:** 砷化镓太阳电池, 质子辐射, 暗特性, 数值拟合

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

**DOI:** 10.7498/aps.63.188101

## 1 引言

太阳电池作为航天器的一次能源, 直接暴露在空间环境下. 空间环境中存在的高能带电粒子对太阳电池产生辐射损伤, 造成太阳电池性能退化. 太阳电池的带电粒子辐射损伤行为已有较广泛的研究, 包括太阳电池的辐射损伤与缺陷行为、电池性能退化规律、在轨性能退化评价理论等诸多方面<sup>[1-7]</sup>. 美国喷气推进实验室的Tada和Anspaugh分别总结了大量的试验数据, 编著了关于砷化镓系列太阳电池辐射手册, 为空间太阳电池评价和技术发展提供了坚实的基础<sup>[6]</sup>. 由太阳电池工作原

理可知, 太阳电池本质上是一个大面积二极管(p-n结)<sup>[2]</sup>, 其 $I-V$ 特性主要受二极管电压电流叠加机制控制<sup>[3]</sup>. 考察粒子辐射对太阳电池二极管特征参数的影响有助于加深对太阳电池辐射损伤与性能退化本质的了解, 同时对太阳电池暗特性表征和分析也是评价太阳电池质量的重要途径. 半导体理论研究表明, 太阳电池在暗条件下的 $I-V$ 性能包含了其结构演化和性能参数的重要信息, 相比明特性表征方法, 暗特性测试可以避免因光照不均匀、光线不稳定以及温升带来测量误差的问题<sup>[8]</sup>.

目前半导体二极管暗特性曲线的拟合方法较多, 可获得的参数主要有六个, 即串联电阻 $R_s$ 、并联电阻 $R_{sh}$ 、扩散结反向饱和电流 $I_{s1}$ (本文中简称

\* 国防科工局技术基础科研项目(批准号: Z1620120003)、工业和信息化部电子第五研究所发展基金青年计划专项(批准号: 13F06)和工业和信息化部电子第五研究所发展C类项目(批准号: 13C05)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wuyiyong@hit.edu.cn

为扩散电流)、再复合结反向饱和电流  $I_{s2}$  (本文中简称为复合电流)、扩散结品质因子  $n_1$ 、再复合结品质因子  $n_2$ . 通过对暗特性曲线的研究表明, 在曲线的不同区段, 这六个参数所起的作用有较大差异. 利用该特性对太阳电池暗特性曲线不同阶段的控制函数进行简单近似, 可进一步简化曲线拟合过程. 基于上述思想, Wemer<sup>[9]</sup> 利用简化的太阳电池暗特性曲线拟合方法成功获得  $R_s$ ,  $R_{sh}$  和  $I_{s1}$  三个参数; Ortiz-Conde 等<sup>[10]</sup> 利用积分的方法也得到了相近的结果; Kaminski 等<sup>[11]</sup> 对两种方法进行比较, 提出了更为简便的暗特性曲线拟合方法.

利用太阳电池的暗特性分析评价其受粒子辐射损伤行为正逐渐受到研究者的关注, Wang 等<sup>[12]</sup> 通过对太阳电池暗特性研究, 考察了 40 keV 电子对单结  $\alpha$ -Si:H 电池的影响, 完善了非晶硅辐射损伤模型; Lord 等<sup>[13]</sup> 利用太阳电池暗特性双指数模型, 研究了 1 MeV 质子对单结和三结  $\alpha$ -Si:H 电池辐射损伤行为, 发现高剂量辐射条件下, 电池的并联电阻和注入电流变化明显. 目前对于普遍应用于空间飞行器且具有较高转化率及抗辐射性能的二硫化镉太阳电池暗特性与辐射损伤行为关系的研究还极少.

本文通过对单结 GaAs/Ge 太阳电池暗特性的研究, 考察了低能质子辐射对单结 GaAs/Ge 太阳电池二极管的暗特性参数的影响规律, 并分析了质子辐射损伤区域的不同而导致暗特性参数变化的机理.

## 2 试验方法

本文研究的单结 GaAs/Ge 太阳电池结构如图 1 所示. 暗特性测试设备为 KEITHLY 公司生产的 2612 型双通道数字源表. 测试时, 暗室温度为 300 K. 利用低能质子辐射在太阳电池中产生非均匀损伤的特点<sup>[6]</sup>, 选取质子的能量为 40, 70, 100 和 170 keV 的低能质子对单结 GaAs/Ge 太阳电池的不同区域进行辐射, 每个能量质子的注量为  $5 \times 10^{10}$ ,  $1 \times 10^{11}$  和  $5 \times 10^{11} \text{ p}\cdot\text{cm}^{-2}$ . 辐射设备为哈尔滨工业大学的 KH $\Phi$ K 型空间辐照环境综合模拟设备.

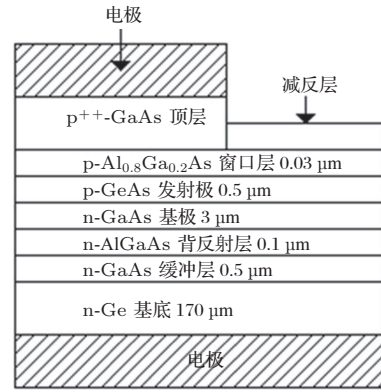


图 1 单结 GaAs 太阳电池结构示意图

## 3 结 果

图 2 为经 40, 70, 100 和 170 keV 质子辐射后单结 GaAs/Ge 太阳电池暗  $I$ - $V$  特性曲线. 带电粒子在太阳电池中产生的辐射损伤常用位移损伤剂量表征<sup>[5]</sup>. 质子在太阳电池中产生的位移损伤剂量可由下式计算:

$$D_d = \Phi \times \text{NIEL}, \quad (1)$$

其中,  $D_d$  为质子辐射在太阳电池材料中产生的位移损伤剂量(单位 Gy),  $\Phi$  为带电粒子辐射注量 ( $\text{p}\cdot\text{cm}^{-2}$ ); NIEL 为质子在 GaAs 材料中产生的非电离能量损失(non-ionizing energy loss). 本文利用 SRIM 软件对不同能量质子在 GaAs 材料中产生的 NIEL 数值进行了计算, 结果表明 40, 70, 100 和 170 keV 的质子在 GaAs 材料中产生的 NIEL 分别为  $1.4016 \times 10^{-16}$ ,  $8.8576 \times 10^{-17}$ ,  $6.5488 \times 10^{-17}$  和  $4.0976 \times 10^{-17} \text{ Gy}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{p}^{-1}$ . 根据 (1) 式及辐射试验参数, 可以得出质子在 GaAs/Ge 太阳电池中的位移损伤剂量, 相应的计算结果示于图 2 中.

由图 2 可见, 在相同能量下, 随质子引起的位移损伤剂量的增加, 暗特性曲线总体向左移动, 说明在相同的正向电压下, 太阳电池暗电流随辐射位移损伤剂量增加而增大, 这是导致太阳电池在光照条件下的输出功率降低, 转化效率下降的原因之一.

本文采用太阳电池双指数模型描述暗特性条件下太阳电池  $I$ - $V$  曲线. 暗条件下, 输出电流  $I$  与偏置电压  $U$  应遵循 (2) 式:

$$I_L = I_{s1} \left( \exp \frac{U - I_L R_s}{A_1 U_T} - 1 \right)$$

$$+ I_{s2} \left( \exp \frac{U - I_L R_s}{A_2 U_T} - 1 \right) - \frac{U - I_L R_s}{R_{sh}}, \quad (2)$$

其中  $A_1 = \frac{n_d}{kT}$ ,  $A_2 = \frac{n_r}{kT}$ ,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度 (本文中试验温度为 298 K),  $n_d$  和  $n_r$  分别为扩散结品质因子和复合结品质因子, 其变化范围均在 1 和 2 之间. 为了简化曲线拟合过程, 减少拟合参数, 提高拟合精度, 将  $n_d$  和  $n_r$  分别设定为 1 和 2, 这与文献 [14] 对两个品质因子的设定方法一致.

基于上述模型, 采用 Kaminski 等 [11] 提出的二极管暗特性曲线拟和方法, 并利用 Matlab 程序对质子辐射后的单结 GaAs/Ge 太阳电池的暗特性曲线进行了数值拟合. 拟合出四个重要的参数, 即串联电阻  $R_s$ 、并联电阻  $R_{sh}$ 、扩散电流  $I_{s1}$ 、复合电流  $I_{s2}$ . 图 3 为四个参数随质子辐射位移损伤剂量的关系曲线. 由图可见:

- 1) 随质子辐射位移损伤剂量的增加, 单结 GaAs/Ge 太阳电池的串联电阻  $R_s$ , 扩散电流  $I_{s1}$  和复合电流  $I_{s2}$  增大, 而并联电阻  $R_{sh}$  减小;
- 2) 质子辐射后单结 GaAs/Ge 太阳电池的串联电阻随位移损伤剂量呈线性增加趋势 (见图 3(a));
- 3) 经 40 keV 质子辐射的太阳电池扩散电流  $I_{s1}$

最大, 比 170 keV 质子辐射的情况大两个量级, 而经 70 keV 质子辐射的太阳电池的扩散电流增加的程度次之, 经 100 keV 与 170 keV 质子辐射的太阳电池的扩散电流  $I_{s1}$  随位移损伤剂量的变化规律相近, 几乎重合成一条直线 (见图 3(b));

4) 经 70 keV 质子辐射的 GaAs/Ge 太阳电池的复合电流  $I_{s2}$  随剂量增加的程度最大, 其次是经 100 keV 和 170 keV 辐射的 GaAs/Ge 太阳电池, 经 40 keV 质子辐射的太阳电池的复合电流增加程度最小;

5) 经 70 keV 质子辐射的 GaAs/Ge 太阳电池的并联电阻下降程度最大, 经 100, 170, 40 keV 辐射的太阳电池的并联电阻下降程度依次减小.

## 4 讨 论

### 4.1 串联电阻变化与辐射损伤的关系

太阳电池的串联电阻主要由太阳电池的体电阻、表面电阻、电极导体电阻和电极与太阳电池表面接触电阻所组成. 本试验采用的是同一批生产的单结 GaAs/Ge 太阳电池, 因此所有太阳电池的电极导体电阻很接近. 电极和太阳电池表面接触电阻与表面电阻在同类型同面积的太阳电池中差异非

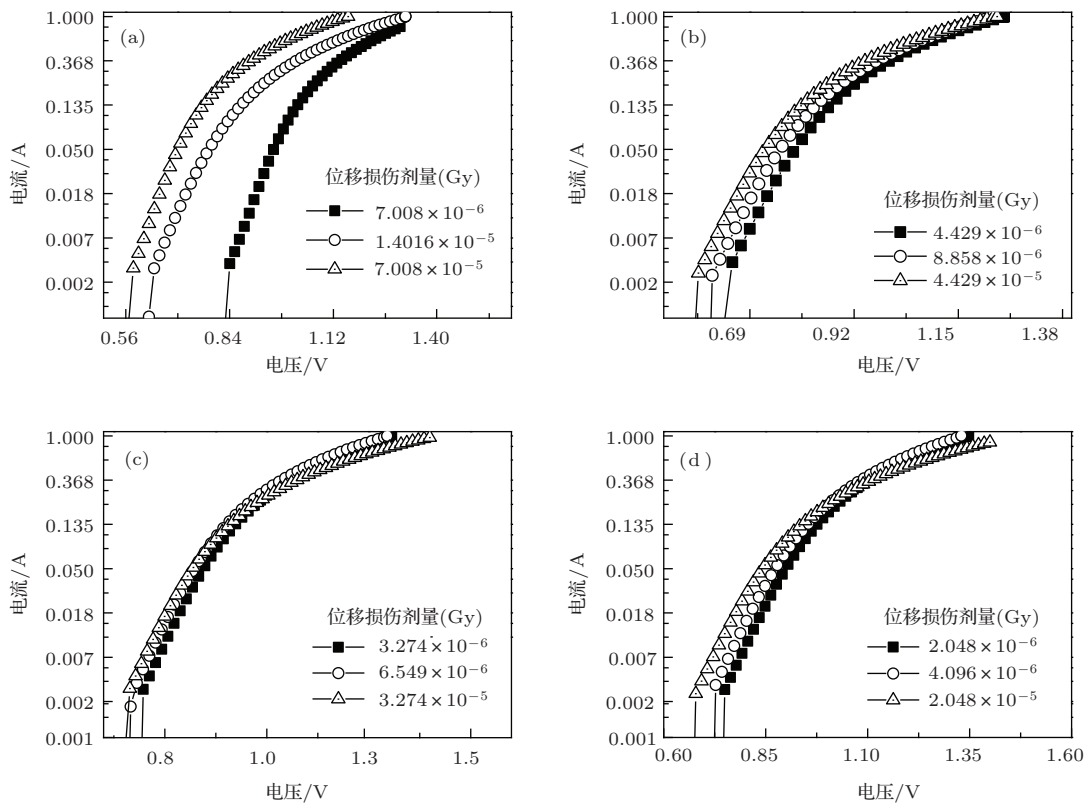


图 2 经不同能量质子辐射后单结 GaAs/Ge 太阳电池暗特性曲线 (a) 40 keV; (b) 70 keV; (c) 100 keV; (d) 170 keV

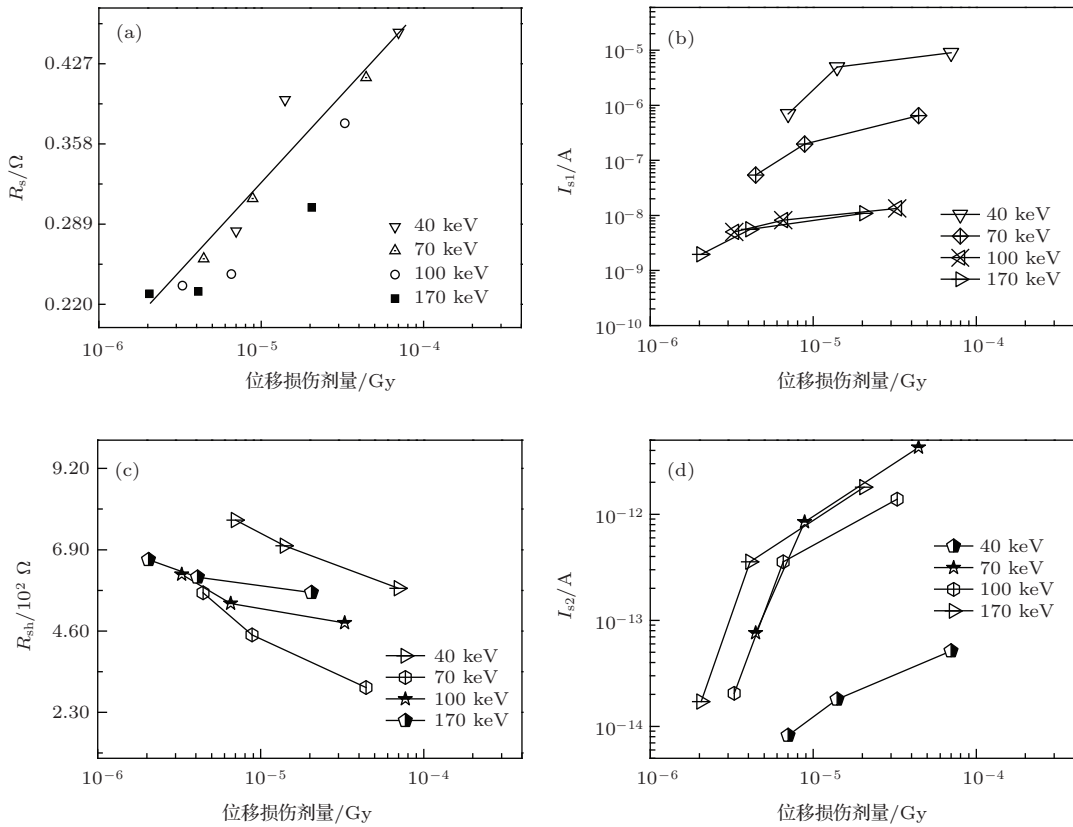


图3 经质子辐射的单结 GaAs/Ge 太阳电池暗特性拟合参数随位移损伤剂量变化 (a)  $R_s$ ; (b)  $I_{s1}$ ; (c)  $R_{sh}$ ; (d)  $I_{s2}$

常小. 由此推断, 引起串联电阻变化差异的原因只有太阳电池的体电阻变化的差异. 体电阻决定于载流子浓度和迁移率. 对单结 GaAs/Ge 太阳电池而言, 辐射损伤在太阳电池的基区和发射区引入深能级缺陷, 这些深能级缺陷可作为载流子的俘获和复合中心, 从而增加注入载流子在向结区扩散的过程中的俘获和复合几率, 降低载流子的迁移率, 当产生较高的缺陷浓度时将会发生多数载流子的去除效应, 这些结果会使体电阻增加. 与此同时结区的位移损伤缺陷也会造成太阳电池体电阻增加.

综上所述, 辐射过程中太阳电池体电阻的变化主要与基区、发射区和结区的损伤有关. 不同能量的低能质子会在太阳电池内不同区域产生非均匀损伤, 因而研究低能质子辐射对太阳电池暗特性的影响, 需要考虑低能质子在太阳电池中的射程. 利用 SRIM<sup>[15]</sup> 程序模拟了不同能量质子在单结 GaAs/Ge 太阳电池中不同深度产生的空位浓度 (即辐射位移损伤缺陷), 结果如图 4 所示. 从图中可见, 由于射程的限制, 40, 100 和 170 keV 质子辐射主要在单结 GaAs/Ge 太阳电池的发射区和基区产生位移损伤, 其中 40 keV 质子产生的位移缺陷几乎全部分布于发射区; 更高能量的质子 (100 keV

和 170 keV) 在太阳电池中产生的位移损伤主要集中在基区. 70 keV 质子辐射损伤主要发生在结区附近, 且其在基区和发射区也产生较大损伤. 虽然在单结 GaAs/Ge 太阳电池中由于掺杂的差异而有发射区、基区和结区等不同功能区, 但其组成材料仍然主要是 GaAs, 故而在不同功能区产生辐射位移损伤缺陷的阈值能量基本相同. 辐射缺陷对太阳电池结构的体电阻的影响机理基本相同, 不论质子能量的高低, 只要产生的位移损伤剂量相同, 对太阳电池串联电阻的影响基本相同, 而与太阳电池中辐射缺陷的分布关系不大, 因此串联电阻变化与质子所产生的位移损伤剂量具有线性关系, 而与质子的能量无关.

#### 4.2 扩散电流变化与辐射损伤的关系

太阳电池的扩散电流由产生于耗尽区两侧一个少子扩散长度内电子-空穴对的复合电流构成. 质子辐射损伤区域越靠近结区, 产生的扩散电流越大. 由图 4 可知, 40 keV 质子产生的空位密度峰值离太阳电池的结区最近, 因此经 40 keV 辐射的 GaAs/Ge 太阳电池扩散电流增加的程度最大;

70 keV 质子在太阳电池的结区两侧均产生辐射损伤而且离结区较近, 而 100 keV 和 170 keV 质子在太阳电池中产生的空位分布于基区, 且均离结区较远, 因此经 70 keV 质子辐射的太阳电池的扩散电流显著高于 100 keV 和 170 keV 质子辐射情况. 值得指出的是, 100 keV 和 170 keV 质子在太阳电池中的射程明显大于结区深度, 在结区两侧产生的位移缺陷较少. 可以认为, 100 keV 和 170 keV 质子在结区两侧一个载流子扩散长度内产生的位移损伤缺陷是均匀分布的, 且与位移损伤剂量成正比. 在这种均匀损伤情况下, 太阳电池的扩散电流应与质子位移损伤剂量成线性关系, 因而 100 keV 和 170 keV 质子辐射的太阳电池扩散电流随位移损伤剂量的变化规律基本一致(见图 3(b)).

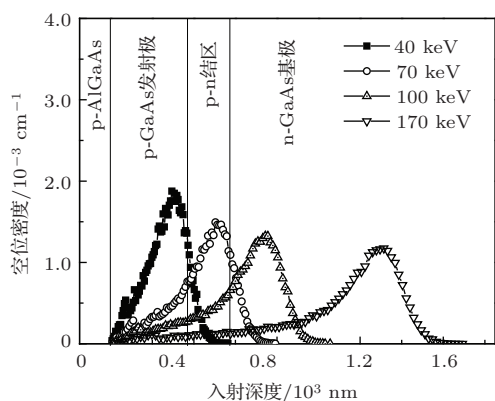


图 4 40—170 keV 低能质子辐射单结 GaAs/Ge 产生损伤缺陷分布的 SRIM 模拟结果

### 4.3 并联电阻变化与辐射损伤的关系

并联电阻  $R_{sh}$  主要来源于太阳电池的结区缺陷, 因此结区的损伤对并联电阻的影响最大. 由 SRIM 模拟结果(图 4)可知, 70 keV 质子辐射在太阳电池的结区产生大量的空位, 其对结区的损伤最严重, 从而使太阳电池的并联电阻下降最为显著. 100 keV 质子辐射在结区产生的空位浓度大于 170 keV 和 40 keV 质子辐射, 因此 100 keV 质子辐射太阳电池的并联电阻下降程度大于后两种质子辐射情况. 而 40 keV 质子产生的位移缺陷集中于太阳电池的发射区, 几乎不会对太阳电池结区产生损伤, 故其引起并联电阻下降的程度最小.

### 4.4 复合电流变化与辐射损伤的关系

复合电流  $I_{s2}$  主要来自于结区, 是电子和空穴通过结区缺陷引入的复合中心发生复合过程而产

生的电流. 复合电流的增加与结区的位移损伤程度有很大的关系, 可以认为质子辐射损伤对复合电流  $I_{s2}$  的影响机理与对并联电阻的  $R_{sh}$  影响机理相似, 只是对相应参数的影响规律相反, 质子辐射损伤造成复合电流  $I_{s2}$  增加, 其中以 70 keV 质子辐射造成 GaAs/Ge 太阳电池的  $I_{s2}$  增加程度最大.

## 5 结 论

本文通过对单结 GaAs 太阳电池暗特性测量与数值分析, 获得了与太阳电池二极管特性相关的四个重要参数: 串联电阻、并联电阻、扩散电流和复合电流. 结合低能质子辐射损伤分布特点, 对低能质子辐射前后太阳电池暗特性的四个参数变化规律和机理进行了分析和讨论, 得到如下主要结论:

- 1) 经质子辐射后, 单结 GaAs/Ge 太阳电池串联电阻、扩散电流和复合电流随辐射位移损伤剂量的增加而增大, 并联电阻则随之减小;
- 2) 单结 GaAs/Ge 太阳电池的串联电阻随辐射位移损伤剂量线性增加, 与质子的能量无关;
- 3) 太阳电池发射区和基区特别是靠近结区的部位损伤程度越大, 太阳电池的暗扩散电流越大; 当质子的射程大于太阳电池的结区深度, 则太阳电池的扩散电流随辐射位移损伤剂量呈线性关系, 与质子能量无关;
- 4) 质子辐射引起 GaAs/Ge 太阳电池结区的损伤会导致太阳电池的并联电阻显著下降, 而扩散电流升高; 70 keV 质子的损伤区主要在太阳电池的结区附近, 此时太阳电池的并联电阻和复合电流变化远大于其他能量辐射下的参数变化.

### 参考文献

[1] Bissels G M M W, Asselbergs M A H, Bauhuis G J, Mulder P, Haverkamp E J, Vlieg E, Schermer J J **2012 Sol. Energy Mater. Sol. Cells** **104** 97

[2] Fedoseyev, Alex, Marek Turowski, Timothy Bald, Ashok RamanJeffrey, H Warner 2013 *Proceedings SPIE 8876, Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments VII* San Diego, United States, September 24, 2013, p88760W-14

[3] Hu, J M, Wu Y Y, Zhang Z W, Yang D Z, He S Y **2008 Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B** **266** 3577

[4] Imaizumi M, Yuri Y, Bolton P R, Sato S, Ohshima T 2012 *Photovoltaic Specialists Conference, 2012 38th IEEE* Astin, United States, June 3-8, 2012 p002831

- [5] 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, 兰慕杰, 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]
- [6] Anspaugh B E 1996 *GaAs Solar Cell Radiation Handbook* (Vol. 1) (California: JPL Publication) pp1-28
- [7] Gao X, Yao S S, Xue Y X, Li K, Li D M, Wang Y, Wang Y F, Feng Z Z 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5015
- [8] Xiong C, Yao R H, Geng K W 2011 *Chin. Phys. B* **20** 057302
- [9] Werner J H 1988 *Appl. Phys. A* **47** 291
- [10] Ortiz-Conde A, Ma Y S, Thomson J, Santos E, Liou J J, García Sánchez F J, Lei M, Finol J, Layman P 1999 *Solid-State Electron.* **43** 845
- [11] Kaminski A, Marchand J J, Fave A, Laugier A 1997 *Photovoltaic Specialists Conference* Anaheim, United States, Sep 29–Oct 3, 1997 p203
- [12] Wang Q H, Lord K J, Woodyard R 2000 *Photovoltaic Specialists Conference* Anchorage, United States, Sep. 15–22, 2000 p1057
- [13] Lord K R, Walters M R, Woodyard J R 1993 *Photovoltaic Specialists Conference* Louisville, United States, May 10–14, 1993 p1448
- [14] Walters R J, Messenger S R, Cotal H L, Summers G P 1996 *J. Appl. Phys.* **80** 4315
- [15] Ziegler J F, Ziegler M D, Biersack J P 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **268** 1818

# Effect of irradiation damage on the dark electric properties of single junction GaAs/Ge solar cells\*

Yue Long<sup>1)2)</sup> Wu Yi-Yong<sup>1)†</sup> Zhang Yan-Qing<sup>1)</sup> Hu Jian-Min<sup>3)</sup>  
 Sun Cheng-Yue<sup>1)</sup> Hao Ming-Ming<sup>2)</sup> Lan Mu-Jie<sup>4)</sup>

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

2) (The Fifth Electronics Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology, Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, Guangzhou 510610, China)

3) (Harbin Normal University, School of Physics and Electronic Engineering, Harbin 150025, China)

4) (Harbin Institute of Technology, School of Astronautics, Harbin 150025, China)

( Received 5 May 2014; revised manuscript received 19 May 2014 )

## Abstract

In this paper, the dark electrical properties are studied by measuring the dark current-voltage characteristics of a type of domestic single-junction (SJ) GaAs/Ge solar cell after proton irradiation. Using a double exponential mode for the dark electrical properties of p-n junction, the dark  $I$ - $V$  curves of the proton-irradiated SJ cells are mathematically fitted, and there are four kinds of typical parameters, namely series resistance ( $R_s$ ), parallel resistance ( $R_{sh}$ ), diffusion current ( $I_{s1}$ ), and recombination current ( $I_{s2}$ ), which are determined to characterize the irradiation effects. Hence, four parameters such as  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{s1}$  and  $I_{s2}$  are significantly changed after proton irradiation, where  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{s1}$  increase while  $R_{sh}$  decreases with increasing the displacement damage dose. In addition,  $R_s$  increases with displacement damage dose, which is unrelated to proton energies. Theoretical analysis indicates that the above-mentioned changes of the parameters result from the damage distributions in different regions of the solar cells. Irradiation-induced damage in the base and emitter regions of the cells could induce  $R_s$  and  $I_{s1}$  to augment, while junction-region damage causes the  $R_{sh}$  to decrease but the  $I_{s2}$  to increase.

**Keywords:** GaAs/Ge solar cells, proton irradiation, dark electric properties, numerical fitting

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

**DOI:** 10.7498/aps.63.188101

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. Z1620120003), the Youth Foundation of The Fifth Electronics Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology, China (Grant No.13F06) and Class C (Grant No. 13C05).

† Corresponding author. E-mail: [wuyiyong@hit.edu.cn](mailto:wuyiyong@hit.edu.cn)