

GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的电子辐照损伤效应

胡建民^{1,2)†} 吴宜勇¹⁾ 钱 勇³⁾ 杨德庄¹⁾ 何世禹¹⁾

1) 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

2) 哈尔滨师范大学阿城学院, 哈尔滨 150301)

3) 上海空间电源研究所, 上海 200233)

(2008 年 7 月 2 日收到, 2008 年 11 月 7 日收到修改稿)

研究了 1 MeV 和 1.8 MeV 电子辐照下 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的辐照损伤效应. 电学性能研究结果表明, GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的开路电压、短路电流和最大功率随辐照剂量的增加发生明显衰减, 在 1 MeV 电子辐照下剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时, 与辐照前相比最大功率衰减了 17.7%. 暗 $I-V$ 特性分析表明, 高能电子辐照下三结电池串、并联电阻的变化是引起太阳电池电学性能衰减的重要原因. 光谱响应分析结果表明, GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池电学性能发生明显衰减的主要原因是其 GaAs 子电池的严重损伤造成的, 而 GaAs 子电池的损伤主要表现为基区底部光生载流子收集效率的明显衰减. 提高 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池抗辐照能力的关键在于尽可能地减小 GaAs 子电池的基区损伤.

关键词: GaInP/GaAs/Ge 太阳电池, 电子辐照, 电学性能, 光谱响应

PACC: 8630J, 6180, 7870

1. 引 言

空间太阳电池在轨服役期间由于受到空间带电粒子的辐射作用, 电学性能会发生明显衰减, 这将直接影响航天器在轨飞行的可靠性和服役寿命, 所以, 研究空间带电粒子作用下太阳电池的辐照效应和机理, 对于正确评价太阳电池在轨行为和提高太阳电池的抗辐射能力具有重要意义.

GaAs 太阳电池凭借其较高的光电转换效率和优良的抗辐照性能已经成为新一代高性能空间电源, 在空间光伏领域占居重要地位. 由于单结 GaAs 电池只能吸收特定波段(340—900 nm 波长范围)的太阳光, 而整个波段的太阳光不能有效利用, 这在一定程度上限制了其光电转换效率. 为满足大功率长寿命航天器的需要, 具有更高光电转换效率的多结 GaAs 叠层太阳电池已经步入空间应用领域, 成为最具应用前景和吸引力的空间太阳电池^[1]. 多年来, 已经在高能粒子辐照效应研究的基础上, 建立了单结 GaAs 太阳电池较为成熟的评价规范^[2], 而有关空间用多结叠层太阳电池的性能评价研究也正受到关注. Walters 等人^[3]研究了 InP/Si 和 GaInP/GaAs 双结

电池的辐射效应, 使用位移损伤剂量模型评价了双结太阳电池的在轨行为. Sumita 等人^[4]研究了质子辐照作用下 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的相对损伤系数(RDC), 结果表明能量为几百千电子伏的低能质子对电池产生较大损伤. 目前, 国际上对 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的辐照效应研究尚处于探索阶段, 而有关国产 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的辐照效应研究工作也已经展开, 牛振红等人^[5]对 1MeV 电子辐照下 Si 电池、GaAs/Ge 单结电池和 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的抗辐照性能进行了比较研究, 结果表明 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池表现出较为优良的抗辐照能力.

为科学评价 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的在轨行为和进一步提高 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池抗辐照性能提供实验依据, 本文选取 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池为研究对象, 测量了能量为 1MeV 和 1.8MeV 电子辐照前后不同辐照剂量下太阳电池的电学性能, 分析了电子辐照对电池光谱响应的影响, 研究结果对阐明 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的辐照损伤机理和提高三结太阳电池抗辐照能力具有重要意义.

† 通讯联系人. E-mail: hujianmin@hit.edu.cn

2. 实 验

试验样品为 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池,用金属有机化合物气相沉积法(MOCVD)制备,面积为 $3 \times 4 \text{ cm}^2$,其结构参数如图 1 所示.为比较分析需要取面积为 $2 \times 1.4 \text{ cm}^2$ 的 p-n 型单结 GaAs/Ge 太阳电池作参考电池,其发射区厚度为 $0.5 \text{ }\mu\text{m}$,基区厚为 $3 \text{ }\mu\text{m}$.

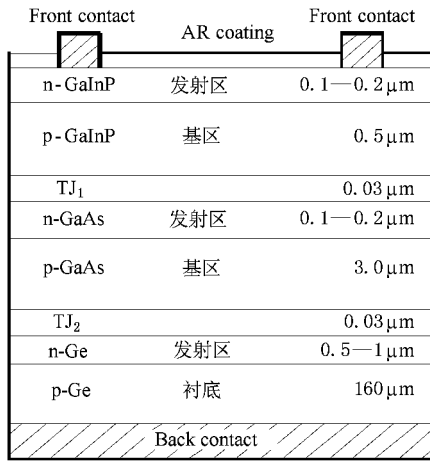


图 1 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池结构示意图

辐照试验使用 ELV-8 型电子加速器,电子束与样品垂直,样品室温度为 25°C .电子能量分别为 1 MeV 和 1.8 MeV,辐照剂量为 1×10^{14} , 3×10^{14} , 5×10^{14} , 1×10^{15} 和 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$,辐照通量为 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

使用美国 Spectrolab spectrosun solar simulator model X25 Mark II 型标准太阳模拟器在 25°C , AM0 (能量密度为 $136.7 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$) 太阳光谱辐照条件下,参照太阳电池国际测试标准^[6]对辐照前后电池样品性能参数(如短路电流 I_{sc} ,开路电压 V_{oc})进行测试,同时使用量子效率测试仪测量了 340—960 nm 波段范围内辐照前后太阳电池的相对光谱响应.

3. 结果和讨论

3.1. 电学性能结果分析

图 2 为 1 MeV 电子辐照后 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池电学性能测试结果.如图可见,GaInP/GaAs/Ge 电池的 V_{oc} , I_{sc} 和 P_{max} 随辐照剂量的增加发生明显衰

降,在辐照剂量为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,其最大功率衰降到辐照前的 82.3%.此外,与开路电压相比,短路电流的衰降幅度明显偏大.

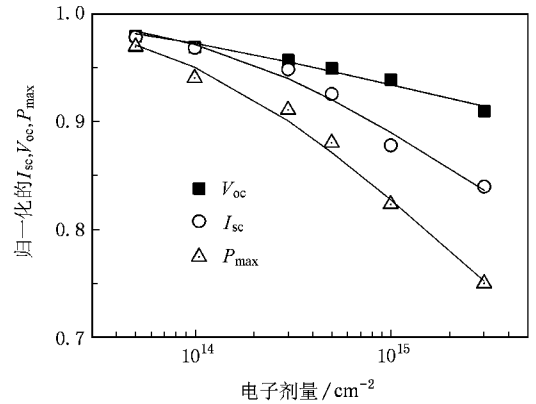


图 2 1 MeV 电子辐照后 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池电学性能随电子剂量的变化

带电粒子辐照条件下,太阳电池短路电流发生衰降的主要原因是由于辐照缺陷成为光生载流子的复合中心,减小了光生载流子的扩散长度,使得发射区和基区的部分光生电子空穴对来不及到达结区被空间电场分离而发生复合,降低了光生载流子的收集效率.电池的结区损伤主要是由于辐照缺陷在禁带中引入的深能级造成的,GaAs 太阳电池开路电压的表达式如下:

$$V_{oc} = AkT \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right), \quad (1)$$

式中, A 为常数, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, I_{sc} 为短路电流, I_0 为由空间电荷区载流子的复合而引起的漏电流.由辐照缺陷引入的深能级成为导带电子和价带空穴发生跃迁的“台阶”,起到了复合中心的作用,使太阳电池模型中二级管的漏电流增大,从而造成太阳电池的开路电压衰降.此外,由(1)式可知,在一定的辐照剂量条件下,太阳电池的开路电压随短路电流的变化呈对数衰降,从而决定短路电流的衰降幅度明显大于开路电压.

图 3 为 1 MeV 和 1.8 MeV 电子辐照后 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池归一化 P_{max} 的变化曲线.如图可见,与 1 MeV 电子相比,1.8 MeV 电子辐照下归一化 P_{max} 的衰降幅度偏大.由于空位缺陷的形成源于入射电子与晶格原子的弹性散射,在入射电子和晶格原子的传递能量高于晶格原子位移阈能的情况下,电子能量越高,弹性散射效应越强,其在材料中产生的空位缺陷浓度越大,所以,与 1 MeV 电子相

比 1.8 MeV 电子辐照下 GaInP/GaAs/Ge 电池 V_{oc} 、 I_{sc} 和 P_{max} 的衰减幅度偏大。

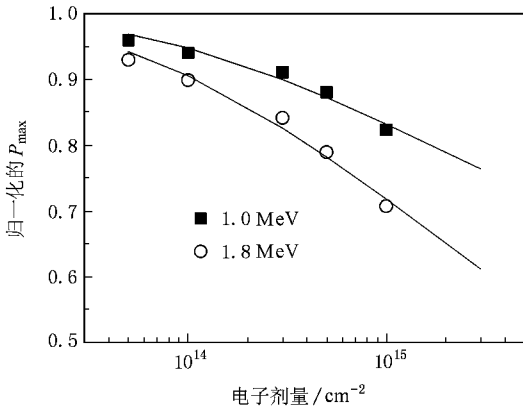


图 3 不同能量电子辐照后 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池归一化的最大功率 P_{max} 随电子剂量的变化

3.2. 暗 I-V 特性结果分析

图 4 为不同辐照剂量条件下 1 MeV 电子辐照后 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池暗 I-V 特性曲线。如图可见，电池暗 I-V 特性曲线形状随辐照剂量的增加发生明显变化。利用双指数函数解析模型方法^[7]对暗 I-V 特性进行拟和可以得出串、并联电阻随电子辐照剂量的变化曲线，如图 5 所示。由图可见，GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池串联电阻随辐照剂量的增加而增大，并联电阻随辐照剂量的增加而减小。

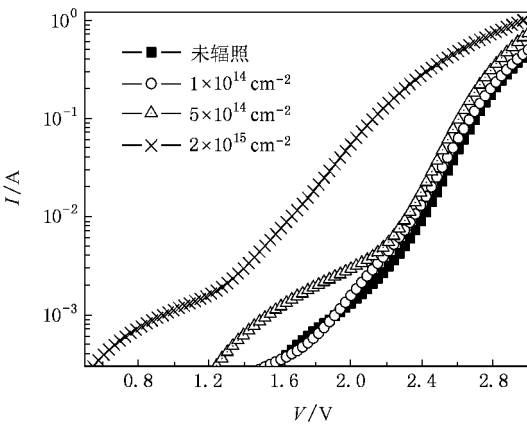


图 4 1 MeV 电子不同剂量下 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池暗 I-V 特性曲线

半导体的电导率 $\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$ ，其中 n 、 p 分别为电子和空穴浓度， μ_n 、 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率。载流子的迁移率值取决于载流子的散射机

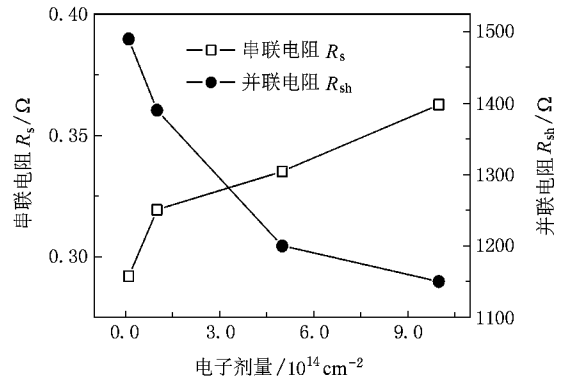


图 5 1 MeV 电子辐照下 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池的串并联电阻随剂量的变化

构。由于带电粒子在太阳电池内部产生的辐照缺陷改变了载流子的散射机构，增加了载流子的散射，从而导致电池串联电阻增加。在太阳电池处于短路的情况下，光电流在串联电阻上的电压降使得二极管仍处于正向偏置，这一正向偏置电压引起的暗电流抵消了部分光电流，所以随串联电阻增加，电池的短路电流减小。带电粒子在电池空间电荷区产生的深能级缺陷，增加了空间电荷区两侧电子和空穴的复合概率，造成太阳电池二极管漏电流增大，并联电阻减小。在太阳电池处于开路的情况下，由于部分光电流要流过并联电阻而损耗，不能全部用以建立光生电压，从而太阳电池并联电阻减小导致开路电压降低^[8]。所以说，在带电粒子辐照作用下太阳电池串并联电阻的变化成为电池开路电压和短路电流发生衰减重要原因。

3.3. 光谱响应测试结果分析

图 6 为 1 MeV 电子辐照前后 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池的光谱响应。如图可见，在辐照剂量为 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的情况下 GaInP 顶电池和 Ge 底电池的光谱响应几乎不变，而 GaAs 中电池光谱响应发生明显衰减。这说明 GaInP 顶电池和 Ge 底电池的抗辐照能力远远高于 GaAs 中电池。GaInP 顶电池具有较好的抗辐照能力主要是由于 GaInP 中的空位缺陷的迁移能 (V_{In} 为 0.26 eV 和 V_P 为 1.2 eV) 远小于 GaAs 中的空位缺陷迁移能 (V_{Ga} 为 1.79 eV 和 V_{As} 为 1.48 eV)，室温下 InP 材料中辐照缺陷的退火效应更明显^[9]。Ge 底电池的抗辐照能力较强主要是由于在 1 MeV 电子辐照产生的辐照缺陷退火温度较低，大多数位移损伤缺陷要在低温 (4—10 K) 下才能产生^[10,11]。上

述结果表明,在一定的辐照剂量下,引起 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池电学性能衰减的主要原因是其 GaAs 中电池的辐照损伤.

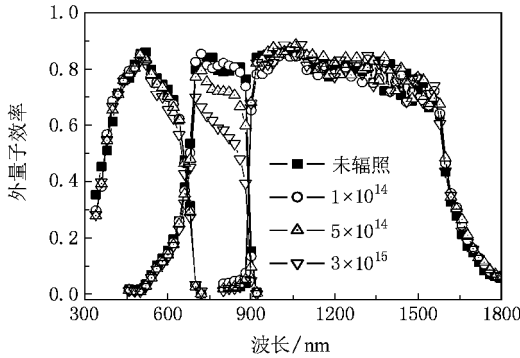


图 6 1 MeV 电子辐照前后 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池的光谱响应曲线

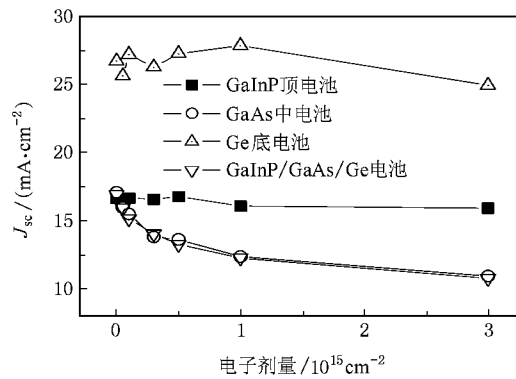


图 7 1.8 MeV 电子辐照后 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池短路电流密度及其各子电池电流密度随辐照剂量的变化

图 7 为 1.8 MeV 电子辐照下 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池的短路电流密度 J_{sc} 及其各子电池电流密度随辐照剂量的变化曲线.如图可见,辐照前 GaInP 顶电池、GaAs 中间电池和 Ge 底电池的短路电流密度分别为 16.7 、 17.1 和 $26.7 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$,在三个子电池中起限流作用的是 GaInP 顶电池.辐照后,GaInP 顶电池和 Ge 底电池的电流密度保持不变,GaAs 中间电池的电流密度随辐照剂量的增加发生明显衰减,其在三个子电池中起限流作用.此外,GaAs 中间电池与 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池短路电流密度衰减曲线在辐照过程中保持一致.上述结果说明,带电粒子辐照后 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池的短路电流取决于 GaAs 中间电池,GaAs 中电池的严重损伤是引起 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池电学性能衰减的主要原因.

图 8 为辐照剂量达到 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 的情况下,

1 MeV 和 1.8 MeV 电子辐照前后 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池的光谱响应.如图可见,与 1 MeV 电子相比,1.8 MeV 电子辐照下 GaAs 中电池光谱响应衰减较大,这与上文的电学性能分析结果一致.

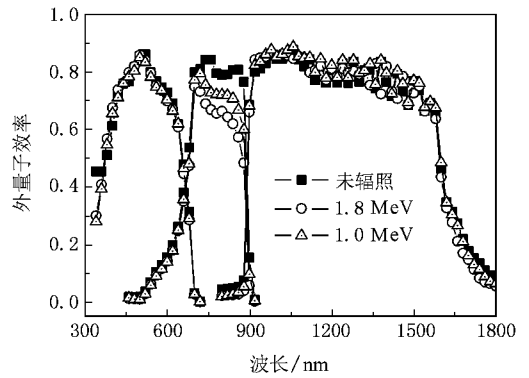


图 8 不同能量的电子辐照前后 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池的光谱响应曲线

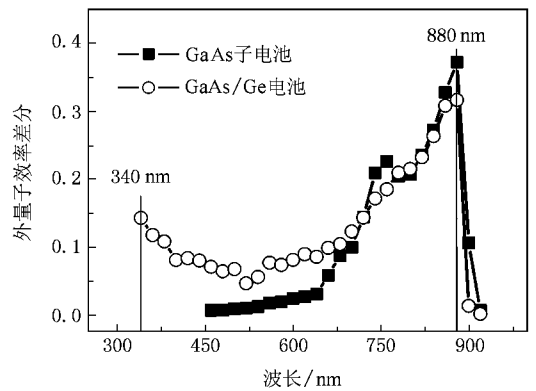


图 9 1 MeV 电子辐照前后 GaAs 子电池和 GaAs/Ge 电池光谱响应差分结果

为进一步研究 GaAs 中电池光谱响应的衰减机理,图 9 分别给出了单结 GaAs/Ge 电池和 GaInP/GaAs/Ge 电池的 GaAs 中电池在 1 MeV 电子辐照前后光谱响应的差分结果.由图可见,单结 GaAs/Ge 电池光谱响应在 340—920 nm 波段均有明显衰减,在 340 nm 和 880 nm 处各存在一个衰减峰,且 880 nm 处的衰减峰偏高.太阳电池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^[12,13].光谱响应在 340—820 nm 波段范围内的衰减主要是由发射区和结区的辐照缺陷引起光生载流子扩散长度减小,收集效率降低所致,而在 820—920 nm 波段的衰减是由基区的辐照缺陷造成的.当电池受到辐射内部产生损伤缺陷时,光生载流子的

扩散长度就会减小,处于基区底部和发射外区顶部的光生载流子就不能运动到空间电荷区而被收集,所以光谱响应衰降峰的高低直接反映了辐照缺陷对太阳电池光生载流子收集效率的影响。由于单结 GaAs/Ge 电池发射区厚度(约为 $0.5 \mu\text{m}$)远小于光生载流子的扩散长度(约为几个 μm),而基区厚度(约为 $3 \mu\text{m}$)与光生载流子的扩散长度相当,太阳电池一旦受到辐射损伤,与发射区相比基区底部的载流子更难于到达结区,从而 880nm 处的衰降峰明显偏高。

此外,如图 9 可见,与单结 GaAs/Ge 电池的光谱响应衰降不同,GaAs 中电池仅在 880 nm 处存在一个衰降峰,而 340 nm 处的短波衰降峰消失,其主要原因有二:一是由于 GaInP 顶电池对入射光谱中短波部分的强烈吸收大大减小了 GaAs 中电池的短波响应,由图 8 可见在 $300\text{—}500 \text{ nm}$ 波段范围内的光子全部被 GaInP 顶电池吸收;二是由于 GaAs 中电池发射区厚度(约为 $0.1 \mu\text{m}$)远小于单结 GaAs/Ge 电池的发射区厚度(约为 $0.5 \mu\text{m}$),在一定的辐照剂量条件下,GaAs 中电池发射区光生载流子的收集效率不受辐照缺陷的影响。

由如上分析可知,在 高能电子辐照下 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池电学性能衰降的主要原因是其

GaAs 子电池的严重损伤造成的,从而改善 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池抗辐照性能的关键在于其 GaAs 子电池,特别是 GaAs 子电池基区的抗辐照能力。

4. 结 论

通过太阳电池 $I-V$ 特性和光谱响应测量研究了 1 MeV 和 1.8 MeV 电子辐照下 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池的辐照损伤效应。电子辐照试验结果表明,随电子辐照剂量的增加,GaInP/GaAs/Ge 太阳电池的电学性能发生明显衰降,与 1 MeV 电子相比, 1.8 MeV 电子辐照下 GaInP/GaAs/Ge 电池 P_{max} 的衰降幅度较大。暗 $I-V$ 特性分析结果表明,GaInP/GaAs/Ge 太阳电池串并联电阻的变化是导致其电学性能衰降的重要原因。光谱响应分析结果表明,造成 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池性能明显衰降的主要原因是 GaAs 子电池的严重辐照损伤造成的,改善 GaInP/GaAs/Ge 太阳电池抗辐照性能的关键在于提高其 GaAs 子电池的抗辐照性能。

本文在电池性能测试过程中得到了上海空间电源研究所陆剑峰、张梦炎和陈萌炯等人的大力支持与帮助,特此感谢。

- | | |
|---|--|
| <p>[1] Yamaguchi M, Takamoto T, Araki K, Ekins-Dauke N 2005 <i>Solar Energy</i>. 79 78</p> <p>[2] Anspaugh B E 1996 <i>GaAs Solar Cell Radiation Handbook</i> (California : JPL Publication Jet Propulsion Laboratory) p5 31</p> <p>[3] Walters R J, Cotal H L, Messenger S R, Burke E A, Wojtczuk S J, Serreze H B, Sharps P R, Timmons M L, Iles P, Yeh Y C M 1998 <i>Solar Energy Mater. Solar Cells</i> 50 305</p> <p>[4] Sumita T, Imaizumi M, Matsuda S, Ohshima T, Ohi A, Itoh H 2003 <i>Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B</i> 206 448</p> <p>[5] Nu Z H, Guo Q, Ren D Y, Liu G, Gao S, Xiao Z B 2007 <i>Nuclear Techniques</i> 30 37 (in Chinese) [牛振红、郭旗、任迪远、刘刚、高嵩、肖志斌 2007 <i>核技术</i> 30 37]</p> <p>[6] ASTM Standard E 2236-05a (http://www.astm.org)</p> <p>[7] Kaminski A, Marchand J J, Fave A, Laugier A 1997 <i>IEEE 26 th PVSC</i> 203</p> | <p>[8] Liu E K 1989 <i>Solar cells and applications</i> (Beijing : Science press) p100 (in Chinese) [刘恩科 1989 <i>光电池及其应用</i> (北京 : 科学出版社) 第 100 页]</p> <p>[9] Dharmarasu N, Yamaguchi M and Khan A, Yamada T, Tanabe T, Takagishi S, Takamoto T, Ohshima T, Itoh H, Imaizumi M, Matsuda S 2001 <i>Appl. Phys. Lett.</i> 79 2399</p> <p>[10] Bourgoin J C, Mooney P M, Poulin F 1980 <i>Defects and Radiation Effects in Semiconductors</i>, edited by Hasinguti R R (London : Institute of Physics) p33</p> <p>[11] Poulin F, Bourgoin J C 1982 <i>Bourgoin Phys. Rev. B</i> 26 6788</p> <p>[12] Hu J M, Wu Y Y, Zhang Z W, Yang D Z, He S Y 2008 <i>Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B</i> 266 267</p> <p>[13] Chen C, Wang Z Q, Yang Q Z 1986 <i>Proceedings of the 2th International PVSEC</i>, Beijing, 596</p> |
|---|--|

Damage of electron irradiation to the GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell

Hu Jian-Min¹ [✉]† Wu Yi-Yong¹⁾ Qian Yong³⁾ Yang De-Zhuang¹⁾ He Shi-Yu¹⁾

1 *✉ School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

2 *✉ A¹ Cheng College, Harbin Normal University, Harbin 150301, China*

3 *✉ Shanghai Institute of Space Power Sources, Shanghai 200233, China*

(Received 2 July 2008 ; revised manuscript received 7 November 2008)

Abstract

Radiation damages of 1 MeV and 1.8 MeV electrons to the triple-junction GaInP/GaAs/Ge solar cell are investigated. The results indicate that electric properties of the GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell, such as open-circuit voltage, short-circuit current and maximum power, decrease obviously as the irradiation fluence increases. Under the irradiation fluence of $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ of 1 MeV electrons, the maximum power output is degraded by 17.7%. Under higher energy electron irradiation, the dark I - V characteristic shows that the changes in both the series and parallel connection resistance of the triple-junction cell are reasons causing the degradational of electrical properties. By the analysis of spectral response, the degradation in electric properties is primarily due to the severe damage of the GaAs sub-cell. The damage of the sub-cell is associated closely with the obvious decrease in the collecting efficiency of light-generated carriers in the bottom of the base-zone. The key to improve the radiation resistance of the triple-junction GaInP/GaAs/Ge solar cell is to reduce the damage of the base-zone of GaAs sub-cell as much as possible.

Keywords : GaInP/GaAs/Ge solar cells, electron irradiation, electric properties, spectral response

PACC : 8630J, 6180, 7870

† Corresponding author. E-mail : hujianmin@hit.edu.cn