

# 量子阱 GaAs 太阳电池的质子辐射效应\*

王 荣<sup>1,2,3</sup> 杨靖波<sup>2</sup> 范 强<sup>4</sup> 许 颖<sup>5</sup> 孙旭芳<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 100875)

(2 北京师范大学低能核物理研究所, 北京 100875)

(3 北京市辐射中心, 北京 100875)

(4 Department of Electronic & Electrical Engineering, University of Sheffield, UK)

(5 北京市太阳能研究所, 北京 100083)

**摘要:** 用  $I-V$  特性、光谱响应和深能级谱分析辐射效应, 分析了  $1 \times 10^9 \sim 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , 2MeV 质子辐照量子阱 GaAs 太阳电池. 结果表明, 随辐照注量增大, 电池  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_{max}$  衰降程度增加; 相同的注量,  $P_{max}$  衰降程度最大. 当注量大于  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  时,  $I_{sc}$  衰降程度比  $V_{oc}$  的大; 当注量小于  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  时,  $V_{oc}$  衰降程度比  $I_{sc}$  的大; 在 900 ~ 1000nm 波长范围内,  $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  辐照使量子阱光谱响应特性消失. 这与量子阱结构受到损伤引入位于  $E_c - 0.35\text{eV}$  的深能级有关.

**关键词:** 量子阱; GaAs 太阳电池; 质子辐照

**EEACC:** 8420

**中图分类号:** TM914

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2005)08-1558-04

## 1 引言

量子阱 GaAs 太阳电池是近几年国内外积极开发的一种新型高效太阳电池. 它通过量子阱结构吸收更低能量的光子使电池响应向长波范围扩展从而提高光电转换效率<sup>[1]</sup>, 其效率的提高有望使这种电池成为空间卫星航天器电源. 但作为空间电源还有一项重要因素要考虑, 那就是抗空间粒子辐射的能力. 因为卫星太阳电池板工作中始终暴露在空间质子、电子等多种粒子辐射的环境中, 其抗辐射能力的高低直接影响着卫星航天器的可靠运行.

近几年, 中国科学院半导体研究所向贤碧研究员和她带领的课题组对 GaAs 太阳电池电子和质子辐射效应及其退火效应进行了大量的研究工作<sup>[2,3]</sup>, 国内外对 GaAs 太阳电池辐射效应的研究报道也不少<sup>[4~7]</sup>, 但对多重量子阱 (multi-quantum well, MQW) GaAs 太阳电池辐射效应研究却未见报道. 本工作利用地面实验室加速器提供的质子束

模拟空间环境粒子辐射, 对这种新型高效太阳电池的辐射效应进行了研究.

## 2 实验

量子阱 GaAs 太阳电池实验样品是用金属有机物化学气相沉积法 (MOCVD) 制备, 其结构如图 1 所示. 样品以 n 型 GaAs 为衬底, 先外延  $2.3\mu\text{m}$  的 n 型 GaAs 层; 后用 GaAsP/InGaAs 制成 20 个周期的量子阱和量子垒 (其阱宽度为  $7.5\text{nm}$ , 垒宽度为  $21.5\text{nm}$ ) 层, 厚度为  $0.60\mu\text{m}$ ; 在量子阱层上再外延  $0.54\mu\text{m}$  的 p 型 GaAs; 沉积  $0.07\mu\text{m}$  的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  抗反射层, 用于减小光的反射. 电池效率为 17.7% (AM0).

电池样品质子辐照在北京师范大学  $2 \times 1.7\text{MV}$  串列静电加速器上完成. 选质子能量 2MeV, 辐照注量为  $1 \times 10^9 \sim 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , 为了减小样品辐照温度的影响, 限制注量率  $\sim 5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 并用计算机控制二维扫描系统实现样品的均匀辐照.

\*北京市优秀人才基金和北京市自然科学基金(批准号:1052009)资助项目

王 荣 男, 1963 年出生, 博士, 副教授, 主要从事材料及空间太阳电池辐射效应研究.

2004-12-11 收到, 2005-02-24 定稿

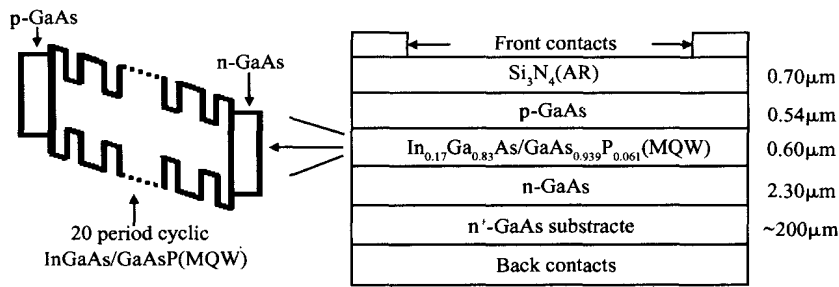


图 1 量子阱 GaAs 太阳电池结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of MQW GaAs solar cell

用 ORIEL 标准太阳光模拟器,在 AM0, 136.7mW·cm<sup>-2</sup>,25 条件下,对辐照前和不同注量辐照后的电池样品进行 I-V 曲线测试.并用 CVI 单色仪、斩波器和 Stanford 锁相放大器组成的测试系统测量电池样品在 400~1000nm 范围的光谱响应.还用中国科学院半导体研究所的深能级瞬态谱仪对电池样品辐射引入的损伤缺陷进行了测试.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 I-V 特性测试

利用测得的 I-V 特性曲线,可得到不同辐照注量电池样品的短路电流 I<sub>sc</sub>、开路电压 V<sub>oc</sub>和最大输出功率 P<sub>max</sub>.图 2 给出了质子的不同辐照注量引起电池 I<sub>sc</sub>,V<sub>oc</sub>和 P<sub>max</sub>(归一化)的衰降变化.从图 2 可以明显地看出以 2MeV 质子辐照这种太阳电池后, I<sub>sc</sub>,V<sub>oc</sub>和 P<sub>max</sub>随辐照注量 φ 的衰降变化.注量低于 1×10<sup>9</sup>cm<sup>-2</sup>的质子辐照,没有观测到电池 I<sub>sc</sub>,V<sub>oc</sub>,P<sub>max</sub>的衰降变化,但辐照注量 φ 增大到 1×10<sup>10</sup>cm<sup>-2</sup>时,电池 I<sub>sc</sub>,V<sub>oc</sub>,P<sub>max</sub>分别衰降为原值的 98%,95%和 92%;当 φ 增加为 3×10<sup>11</sup>cm<sup>-2</sup>时,I<sub>sc</sub>,V<sub>oc</sub>,P<sub>max</sub>分别衰降为原值的 91%,84%和 72%;当 φ 为 3×10<sup>12</sup>cm<sup>-2</sup>时,I<sub>sc</sub>,V<sub>oc</sub>,P<sub>max</sub>分别衰降为原值的 69%,67%和 37%;进一步增加 φ 到 1×10<sup>13</sup>cm<sup>-2</sup>时,I<sub>sc</sub>,V<sub>oc</sub>,P<sub>max</sub>分别衰降为原值的 50%,57%和 19%;当 φ 辐照注量继续增大为 2×10<sup>13</sup>cm<sup>-2</sup>时,电池 I<sub>sc</sub>衰降为原值的 35%,V<sub>oc</sub>衰降为原值的 54%,P<sub>max</sub>衰降为原值的 10%.可见,随质子辐照注量 φ 的增大,这种太阳电池的 I<sub>sc</sub>,V<sub>oc</sub>,P<sub>max</sub>衰降程度不断增加,但相同的辐照注量 φ,I<sub>sc</sub>,V<sub>oc</sub>,P<sub>max</sub>衰降程度不同,以 P<sub>max</sub>衰降程度最大.而对于 I<sub>sc</sub>和 V<sub>oc</sub>的衰降变化,当辐照注量小于 3×10<sup>12</sup>cm<sup>-2</sup>时,V<sub>oc</sub>衰降程度比 I<sub>sc</sub>的大;当辐

照注量大于 3×10<sup>12</sup>cm<sup>-2</sup>时,I<sub>sc</sub>衰降程度比 V<sub>oc</sub>的大.

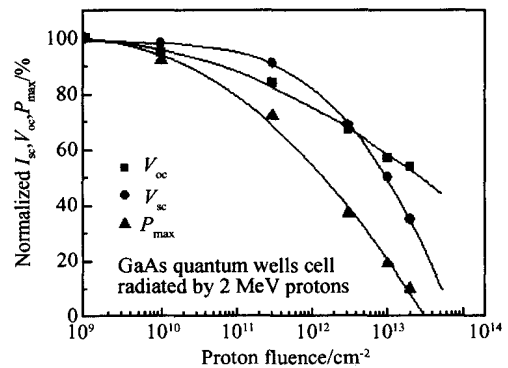


图 2 不同注量质子辐照引起电池(归一化) I<sub>sc</sub>,V<sub>oc</sub>和 P<sub>max</sub>衰降变化

Fig. 2 Changes of normalized I<sub>sc</sub>,V<sub>oc</sub> and P<sub>max</sub> of the solar cell as a function of proton irradiation fluence

在辐照注量大于 3×10<sup>12</sup>cm<sup>-2</sup>范围,电池的 I<sub>sc</sub>衰降程度比 V<sub>oc</sub>的大,此衰降规律与文献[2~4]中 GaAs 电池的研究结果一致.但在辐照注量小于 3×10<sup>12</sup>cm<sup>-2</sup>范围时,电池的 V<sub>oc</sub>衰降程度明显比 I<sub>sc</sub>的大,这可能是引入量子阱结构的缘故.因为量子阱结构的引入会使电池的光吸收向低能端拓宽,提高短路电流 I<sub>sc</sub>;同时也会降低有效带隙宽度使开路电压 V<sub>oc</sub>降低.较小注量辐照对量子阱结构的损伤弱,没有引起电池量子阱上述特性的明显变化;但当辐照注量大于 3×10<sup>12</sup>cm<sup>-2</sup>时,质子辐照对量子阱结构的损伤加重,量子阱结构特性逐渐表现得明显,使得这种太阳电池 I<sub>sc</sub>和 V<sub>oc</sub>衰降规律与无量子阱的 GaAs 电池相似.

#### 3.2 光谱响应测试

图 3 示出了量子阱 GaAs 电池辐照前和不同注

量辐照后相对光谱响应的衰降变化. 由图可知, 随辐照注量增加, 相对光谱响应的衰降变化增大. 在整个波长范围,  $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  注量辐照后的电池比未辐照电池的相对光谱响应有明显衰降变化, 而且不同波长范围相对光谱响应的衰降程度不同. 利用 TRIM95 Monte Carlo 程序<sup>[8]</sup> 模拟计算 2MeV 质子在 GaAs 中的射程为  $32.74 \pm 1.81 \mu\text{m}$ , 远远大于电池受光面下有源区的厚度 (约  $3 \mu\text{m}$ ). 这样, 尽管 2MeV 质子穿过了电池的有源区, 但在电池有源区质子穿过的径迹附近仍会将其能量传递给晶格原子, 使晶格原子产生移位形成空位、填隙原子等损伤缺陷. 这些缺陷会起到复合载流子的作用, 导致少数载流子寿命减小, 扩散长度缩短, 使电池长波范围的光谱响应衰降; 同时由于质子在电池发射区、窗口层以及界面产生的辐射损伤也会增大光生载流子的表面复合速度, 使光生载流子寿命减小, 引起电池短波范围光谱响应的衰降<sup>[6,7]</sup>. 所以, 辐照引起电池相对光谱响应在整个波长范围明显衰降.

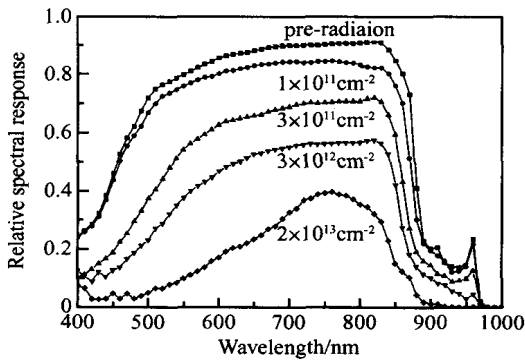


图 3 量子阱 GaAs 太阳电池辐照前和不同注量辐照后的相对光谱响应  
Fig. 3 Relative spectral response of MQW GaAs cells pre-radiation and after radiated with different fluence

从图 3 还特别注意到在 900 ~ 1000nm 波长范围内, 质子辐照前, 由于将量子阱结构引入电池, 电池能吸收更低能量的光子, 提高短路电流  $I_{sc}$ , 使光谱响应向长波端拓展; 而  $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  注量质子辐照量子阱 GaAs 电池后, 使电池的量子阱结构受到严重损伤, 量子阱特性表现不明显, 这与前面  $I-V$  特性分析结果一致.

### 3.3 深能级瞬态谱

对辐照前后的电池样品, 在反向偏置电压  $V_R$  为 - 5 ~ 10V, 脉冲电压  $V_p$  为 0V, 率窗 为

1. 656ms 条件下进行深能级瞬态谱测试, 未经辐照的样品没测到深能级. 图 4 给出了  $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ,  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,  $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  注量辐照电池样品测得的深能级瞬态谱. 对测量数据分析可得, 不同注量质子辐照引入的缺陷能级为  $E_c - 0.35\text{eV}$ 、俘获截面为  $5.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ , 辐照引入的缺陷浓度随辐照注量增加而增大.

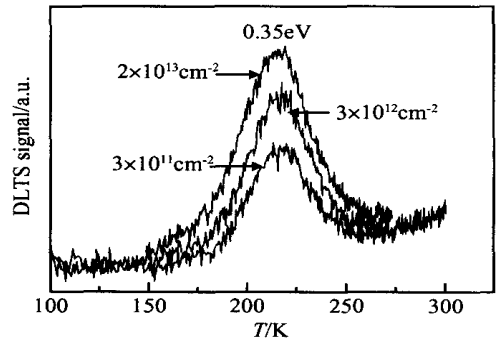


图 4 不同注量质子辐照量子阱 GaAs 太阳电池深能级瞬态谱  
Fig. 4 DLTS spectra in MQW GaAs solar cells irradiated using protons with different fluence

## 4 结 论

利用对 2MeV 质子辐照量子阱 GaAs 太阳电池的辐射效应研究, 得到了这种量子阱电池性能参数  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  和  $P_{max}$  随辐照注量  $1 \times 10^9 \sim 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  的衰降变化规律. 当辐照注量大于  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  时, 辐照对量子阱结构的损伤严重, 其  $I_{sc}$  和  $V_{oc}$  衰降规律与无量子阱 GaAs 电池相似; 而在辐照注量较小时, 才表现出量子阱特性, 使得电池  $V_{oc}$  衰降程度比  $I_{sc}$  的大. 在整个波长范围,  $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  注量质子辐照引起电池相对光谱响应明显衰降, 在 900 ~ 1000nm 波长范围内, 量子阱光谱响应特性消失. 质子辐照量子阱 GaAs 太阳电池引起电性能参数和光谱响应衰降变化与位于  $E_c - 0.35\text{eV}$  的深能级有关.

致谢 感谢中国科学院半导体研究所张砚华、卢励吾老师在深能级测试和分析方面给予的帮助.

### 参 考 文 献

[ 1 ] Ekins-Daukes N J, Barnes J M, Barnham K W J, et al. Strained and strain-balanced quantum well devices for high efficiency tandem solar cells. Solar Energy Materials and So-

- lar Cells, 2001, 68:71
- [ 2 ] Xiang Xianbi, Du Wenhui, Chang Xiulan, et al. Electron irradiation and thermal annealing effect on GaAs solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1998, 55:313
- [ 3 ] Xiang Xianbi, Du Wenhui, Liao Xianbo, et al. Proton irradiation and thermal annealing of GaAs solar cells. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2001, 22(6):710
- [ 4 ] Wang Rong, Guo Zengliang, Zhang Xinghui, et al. 5-20meV proton irradiation effects on GaAs/Ge solar cells for space use. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2003, 77(4):351
- [ 5 ] Anspaugh B E. GaAs solar cell radiation handbook. California:JPL Publication, 1996
- [ 6 ] Sumita T, Imaizumi M, Matsuda S, et al. Proton radiation analysis of multi-junction space solar cells. *Nuc Instrum Methods Phys Res B*, 2003, 206:448
- [ 7 ] Kachare R, Anspaugh B E. Spatial resolution and nature of defects produced by low-energy proton irradiation of GaAs solar cells. *Appl Phys Lett*, 1986, 49(21):1459
- [ 8 ] Ziegler J F, Biersack J P, Littmark U. The stopping and range of ions in material. New York: Pergamon Press, 1995

## Proton Irradiation Effects on Multi-Quantum Wells GaAs Solar Cells<sup>\*</sup>

Wang Rong<sup>1,2,3</sup>, Yang Jingbo<sup>2</sup>, Fan Qiang<sup>4</sup>, Xu Ying<sup>5</sup>, and Sun Xufang<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Beam Technology and Materials Modification of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(2 Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(3 Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China)

(4 Department of Electronic & Electrical Engineering, University of Sheffield, Sheffield S1 3JD, UK)

(5 Beijing Institute of Solar Energy, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Performance degradation of multi-quantum wells (MQW) GaAs solar cells based on InGaAs/GaAsP grown on GaAs substrates are studied using 2MeV proton irradiation with fluence  $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  to  $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . It is shown that the degradation rates of short circuit current ( $I_{sc}$ ), open circuit voltage ( $V_{oc}$ ), and maximum power output ( $P_{max}$ ) increase as the irradiation fluence increases. The degradation of  $I_{sc}$  is faster than that of  $V_{oc}$  for a fluence above  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , but the change of  $V_{oc}$  is faster than that of  $I_{sc}$  below  $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , due to the quantum well structure. The quantum well spectral response disappears in the wavelength from 900nm to 1000nm after proton irradiation with  $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . The degradations of electric properties and spectral response are relative to the proton irradiation-induced  $E_c - 0.35\text{eV}$  defect in irradiated MQW GaAs solar cells.

**Key words:** MQW; GaAs solar cells; proton irradiation

**EEACC:** 8420

**Article ID:** 0253-4177(2005)08-1558-04

<sup>\*</sup> Project supported by the Beijing Excellent Persons Foundation and the Beijing Natural Science Foundation (No. 1052009)

Wang Rong male, was born in 1963, PhD, associate professor. He is engaged in the research on irradiation effects of semiconductor materials and space solar cells.

Received 11 December 2004, revised manuscript received 24 February 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics