

GaInP₂/GaAs/Ge 叠层太阳电池中的 高效率 Ge 底电池*

王亮兴 涂洁磊 张忠卫 池卫英 彭冬生 陈超奇 陈鸣波

(上海空间电源研究所, 上海 200233)

摘要: 从电池的结构参数及器件工艺等方面分析了 Ge 底电池的开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 和填充因子 FF 的影响. 结果表明: 控制发射层的表面复合, 并减薄其厚度可以提高开路电压 V_{oc} , 并可以有效提高短路电流 I_{sc} ; 调整相应的器件工艺有利于填充因子 FF 的提高. 采用上述改进措施, 成功得到 V_{oc} 达到 287.5mV, I_{sc} 达到 73.13mA/cm², 效率达到 7.35% 的 Ge 太阳电池.

关键词: Ge 太阳电池; 高效率; 表面复合速率; 器件工艺的改善

PACC: 0270; 8630; 8115; 6800

中图分类号: TK514 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0196-04

1 引言

高效率 GaInP₂/GaAs/Ge 三结叠层太阳电池已成为目前的研究热点, 其中 Ge 底电池的 pn 结是在外延生长 GaInP₂ 或 (Al)GaAs 时扩散形成的^[1~3], 对整个叠层电池的性能产生重要影响: (1) Ge 底电池的电性能, 对整个叠层电池的效率贡献约为 10%; (2) GaAs-Ge 异质界面的扩散特性和缺陷, 对整个叠层电池的影响甚至更大. 由于我们已经初步解决了 GaAs-Ge 界面的扩散和缺陷问题^[4], 本文仅对 Ge 底电池的电性能进行了研究. Friedman 等人^[1]的研究结果显示: Ge 电池的 V_{oc} 主要由发射层 (Emitter) 决定, 而改变基区 (Base) 的参数 (如: 厚度、浓度、扩散长度) 较难获得改进.

本文从太阳电池的基本原理出发, 分析了影响 Ge 底电池电性能的因素, 调整电池的结构参数与器件工艺, 从而获得高性能的 Ge 太阳电池.

2 实验

采用低压 (2×10^4 Pa) 金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 技术 (Aixtron 200-4), 在 p 型 Ge 单晶衬

底上分别生长 n 型 GaInP₂ 和 n 型 (Al)GaAs, 浓度约为 10^{18} cm⁻³, 然后再生长 0.5 μ m 的高掺杂 n 型 GaAs 接触层. III 族源分别为 TMGa, TMAI, TMIn; V 族源分别为 AsH₄ 和 PH₃. 主要器件后工艺包括: 光刻、制作背面和正面电极、选择性腐蚀、蒸镀减反射膜 (TiO₂/SiO₂) 和热退火等. 以 Spectrolab X-25 模拟器作为 AM0 光源, 测量电池的光伏性能. 测量用的参考电池是 Spectrolab 生产的 GaInP₂/GaAs 叠层电池样品, 以标定 AM0 光源的光强 (135.3 mW/cm²).

3 分析与讨论

3.1 Ge 电池的开路电压

众所周知, 太阳电池的开路电压 V_{oc} 与材料的禁带宽度 E_g 、发射区和基区的浓度以及反向饱和电流等有关. 发射区厚度 X_e 和表面复合速率对 V_{oc} 的影响情况, 如图 1 所示. 计算中取: 发射区浓度 $N_e \approx 10^{19}$ cm⁻³, 基区浓度 $N_b = 1 \times 10^{18}$ cm⁻³, 电子和空穴的迁移率 $\mu_e = 1000$ cm²/(V · s), $\mu_h = 600$ cm²/(V · s), 扩散长度 $L_e = 0.4$ μ m, $L_b = 30$ μ m, 表面复合速率 S_e 分别取 $0, 5 \times 10^4, 2 \times 10^5, 6 \times 10^5, 3 \times 10^7$ cm/s

* 国家重点基础研究发展规划资助项目 (批准号: ZM200002B01)

时,并限定 $J_{sc} = 16\text{mA/cm}^2$. 可见,当 $S_e \approx 6 \times 10^5\text{cm/s}$ 时, V_{oc} 几乎不受发射层厚度的影响,而只有在 S_e 较小的情况下,减小 X_e 才能提高 V_{oc} .

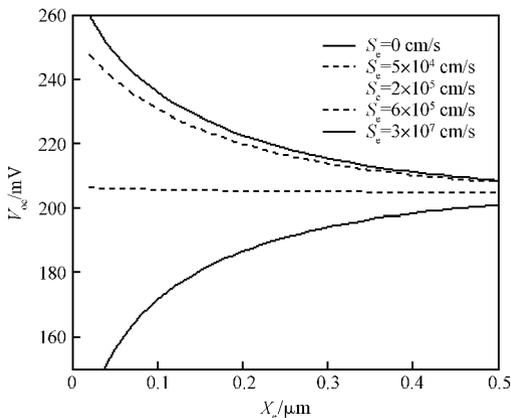


图1 不同表面复合速率 S_e 时开路电压 V_{oc} 与发射层的厚度 X_e 的关系

Fig. 1 Calculated curves of $V_{oc}(X_e)$ for various values of S_e

图2则表明, V_{oc} 强烈依赖于扩散长度 L_e 和表面复合速率 S_e . 当 $L_e = 1\mu\text{m}$ 时, X_e 对 V_{oc} 的影响较小,当 L_e 较短时,减薄 X_e 可以显著提高 V_{oc} . 图中“○”为 Friedman^[1]的结果,有、无 GaInP₂ 窗口层时的 S_e 和 V_{oc} 分别为 $1 \times 10^5\text{cm/s}$, 0.24V 和 $6 \times 10^6\text{cm/s}$, 0.17V. 在相同测试条件下,即限定 $J_{sc} = 16.00\text{mA/cm}^2$ 时,可得到 $V_{oc} = 0.246\text{V}$, $\text{FF} = 0.634$ 的结果(S32-3).

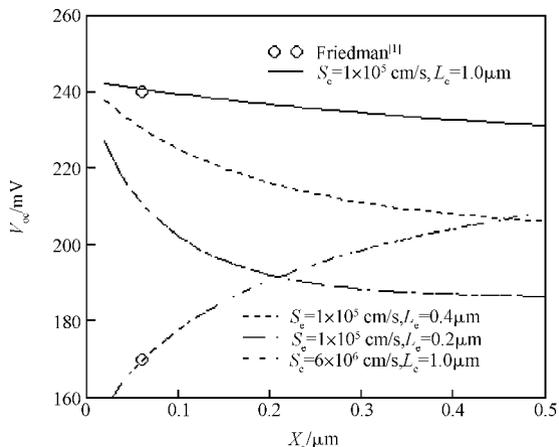


图2 不同扩散长度 L_e 时开路电压 V_{oc} 与发射层的厚度 X_e 的关系

Fig. 2 Calculated curves of $V_{oc}(X_e)$ for various values of L_e

3.2 Ge 电池的光电流

假设能量大于材料带隙的光子均可全部吸收,在 AM0 光谱条件下,我们计算了光电流密度 J_{ph} 与能带 E_g 之间的关系,如图3所示. Ge 电池的最大光电流密度为 79.1mA/cm^2 ,经过 GaAs 滤光后的 $J_{ph} = 41.5\text{mA/cm}^2$. 对于 $170\mu\text{m}$ 的 Ge 电池,假设被吸收的光全部转化为光电流,光电流密度可以达到 $J_{ph} = 75.8\text{mA/cm}^2$,经过 GaAs 滤光后(即能量小于 GaAs 带隙的光子)的 $J_{ph} = 37.0\text{mA/cm}^2$,滤光前后减少了 38.8mA/cm^2 ,约为叠层电池的短路电流密度的两倍.

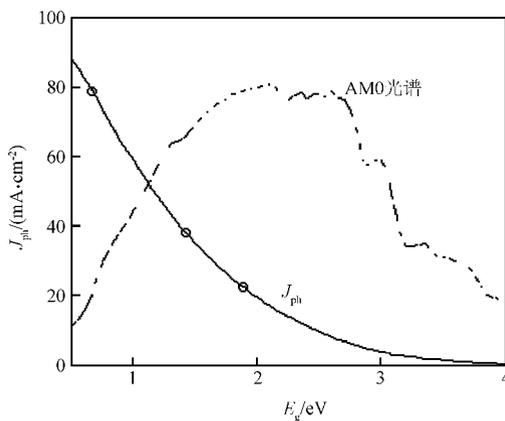


图3 光电流密度 J_{ph} 与能带 E_g 之间的关系

Fig. 3 Calculated curve of light current density J_{ph} as a function of energy gap E_g . AM0 spectrum is also shown.

对于窗口层为 GaInP₂ 的 Ge 电池,取 $L_b = 30\mu\text{m}$, $L_e = 1.0\mu\text{m}$, $S_e = 1 \times 10^6\text{cm/s}$, X_e 分别为 0.1, 0.2, $0.5\mu\text{m}$,可得到如图4所示的内量子效率计算值. AM0 光谱下,电流密度分别为 50.4, 46.9, 37.8mA/cm^2 ,经过 GaAs 滤光后的电流密度分别为 33.4, 32.4, 28.6mA/cm^2 . 反射光谱曲线也示于图4中. 显然发射层厚度对光电流的收集产生显著影响.

Ge 结发射层的厚度和浓度剖面,取决于 MOCVD 生长过程中的 V 族的扩散特性. 由于发射层重掺杂 As 或 P, 少数扩散长度较短,因此减少发射层厚度(例如降低生长温度),可以收集更多的光生载流子. 当 Ge 电池发射层厚度增加时,电池量子效率降低,短路电流密度降低,开路电压降低. 因此得到较薄的发射层是获得高效率 Ge 电池的关键因素之一.

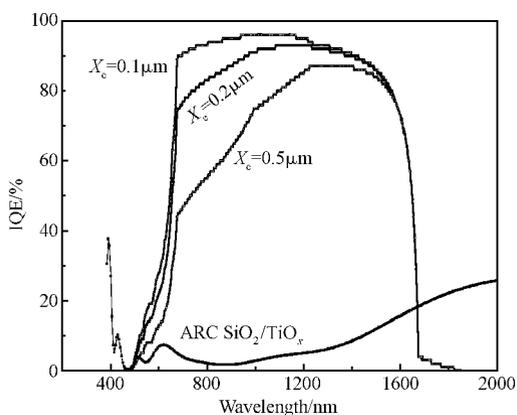


图4 Ge 电池的理论量子效率和反射光谱

Fig. 4 Theoretical internal quantum efficiencies for various values of X_e . Calculated reflectance curve is shown as well.

3.3 Ge 电池的填充因子

实验中发现, Ge 电池中 n/p 结中的 n-Ge 厚度小于 $0.2\mu\text{m}$, 且为高掺杂, 周边的损伤和杂物将产生严重的影响, 进而导致电池填充因子 FF 的下降, 增加腐蚀工艺后可明显改善 FF, 如图 5 所示. 这一现象可解释为腐蚀可令电池周边的旁路减少, 提高并联电阻. 腐蚀前、后的并联电阻由 $27\Omega \cdot \text{cm}^2$ 增加到 $223\Omega \cdot \text{cm}^2$, V_{oc} 随之增加了 32.5mV , 而短路电流密度无明显变化, 因此电池效率显著提高, 由 2.14% 增加到 2.80% .

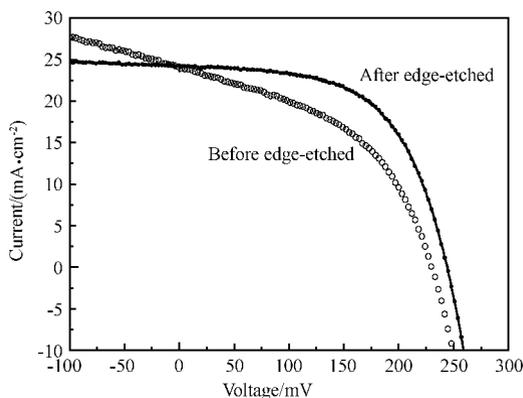


图5 周边腐蚀前后 Ge 电池的 I-V 特性

Fig. 5 I-V characteristics of Ge cell before and after edge-etched

表1 是电池 SA32-1(经过 $200\mu\text{m}$ 的 GaAs 晶片滤光)、SA32-2(经过边缘处理和 GaAs 晶片滤光)、SA32-3(调整光强限定 $J_{sc} = 16.00\text{mA}/\text{cm}^2$)、SA32-

4 在 AM0 光谱 1sun 下的测试结果. 其中, SA32-4 的效率已经达到 7.35% , 通过进一步改进器件工艺, 如果 FF 达到 0.67 , 效率可以达到 10.4% .

表1 Ge 电池的电性能(AM0, 25°C)

Table 1 Performance parameters of Ge cell(AM0, 25°C)

No.	V_{oc}/mV	$J_{sc}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	FF	$\eta / \%$
S32-1	230.0	24.17	0.453	2.14
S32-2	262.5	24.28	0.595	2.80
S32-3	246.2	16.00	0.634	1.85
S32-4	287.5	73.13	0.473	7.35

4 结论

计算表明, Ge 电池的开路电压和短路电流密度主要由发射层的厚度、浓度和表面复合控制. 因此在试验中我们重点改进了发射层参数: 厚度 X_e 小于 $0.2\mu\text{m}$, 浓度 N_e 约为 10^{19}cm^{-3} , $S_e \approx 10^6\text{cm/s}$; 并对器件工艺进行了研究, 增加了腐蚀工艺, 使电池的 FF 显著提高, 获得了效率为 7.35% 的 Ge 电池.

对于 $\text{GaInP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$ 三结叠层太阳电池, 由于 Ge 结位于最下端, 只有能量小于 GaAs 带隙的光子才可以到达 Ge 结, 因此采用 $200\mu\text{m}$ 厚 GaAs 晶片(上表面镀 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 减反射膜)滤光后测试 Ge 电池的性能: V_{oc} 达到 262.5mV , J_{sc} 达到 $24.28\text{mA}/\text{cm}^2$, FF 达到 0.595 . 这些结果为研制 $\text{GaInP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$ 三结叠层太阳电池奠定了良好的基础.

致谢 感谢王向武教授在 MOCVD 生长方面的帮助.

参考文献

- [1] Friedman D J, Olson J M. Analysis of Ge junctions for $\text{GaInP}_2/\text{GaAs}/\text{Ge}$ three-junction solar cells. Prog Photovolt: Res Appl, 2001, 9: 179
- [2] Venkatasubramania R, Timmons M L, Pickett R T, et al. High-temperature performance and radiation resistance of high-efficiency Ge and $\text{Si}_{0.07}\text{Ge}_{0.93}$ solar cells on lightweight Ge substrates. Proc 21th IEEE PVSC Conf, 1991: 85
- [3] Krut D D, Cavicchi B T, Lillington D T. The development of Ge bottom cell for monolithic and stacked multi-junction applications. Proc 21th IEEE PVSC Conf, 1991: 90
- [4] Wang Liangxing, Zhang Zhongwei, Chen Mingbo, et al. The study on the characteristics of GaAs/Ge interface. Annual Conference of Chinese Solar Cell, Shanghai, 2003: 201 (in Chinese)[王亮兴, 张忠卫, 陈鸣波, 等. GaAs/Ge 太阳电池界面特性研究. 中国太阳能学会年会论文集, 上海, 2003: 201]

High Efficiency Ge Bottom Cell for GaInP₂/GaAs/Ge Three-Junction Tandem Solar Cell*

Wang Liangxing, Tu Jielei, Zhang Zhongwei, Chi Weiyang, Peng Dongsheng,
Chen Chaoqi, and Chen Mingbo

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

Abstract: Analyze the impacts of structure and device process of Ge solar cell on open-voltage, light current density, and fill factor. By controlling the surface-recombination velocity, reduction of emitter thickness, and improvement of device process, demonstrate Ge solar cell with open-voltage of 287.5mV, short-circuit current density of 73.13mA/cm², and efficiency of 7.35%.

Key words: Ge solar cell; high efficiency; surface-recombination velocity; improvement of device process

PACC: 0270; 8630; 8115

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0196-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(No. ZM200002B01)

Received 18 September 2004, revised manuscript received 10 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics