

GaAs/Ge 太阳电池异常 $I-V$ 特性曲线分析*

涂洁磊^{1,2} 王亮兴¹ 张忠卫¹ 池卫英¹ 彭冬生¹ 陈超奇¹

(1 上海空间电源研究所, 上海 200233)

(2 云南师范大学太阳能研究所, 昆明 650092)

摘要: 分析了 GaAs/Ge 单结太阳电池研制中两种异常 $I-V$ 特性曲线出现的主要原因: GaAs/Ge 界面的相互扩散, 形成附加结或附加势垒; 并获得与实验有很好吻合的计算模拟结果, 进一步证实了理论分析. 此外, 在上述分析的指导下, 通过降低生长温度和优化成核条件, 成功获得了效率为 20.95% (AM0, 25°C, 2cm×4cm) 的 GaAs/Ge 太阳电池.

关键词: GaAs/Ge 太阳电池; $I-V$ 特性曲线; 计算机模拟; 界面扩散

PACC: 0270; 8630; 6800

中图分类号: TN304.2+3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)S0-0192-04

1 引言

GaAs 太阳电池以其高的光电转换、强的抗辐照能力以及好的耐高温特性等优越性能已成为空间电源系统的首选. 但传统的 GaAs/GaAs 太阳电池由于 GaAs 单晶衬底材料的成本高、机械强度差, 以及半导体材料生长技术的不断提高, 逐渐被 GaAs/Ge 太阳电池所取代. 后者因 Ge 材料的机械强度高、价格低, 与 GaAs 晶格常数和热胀系数等参数相近, 可制备光伏性能相当, 具有更高重量比功率的 GaAs/Ge 太阳电池, 在空间电源应用方面获得广泛重视^[1], 并已进入批量生产及使用阶段. 80 年代中后期, 美国 Spectrolab, Tecstar, Spire, 意大利 CISE, 日本 MELCO, 英国 EEV 等公司, 采用 MOCVD 技术大批量生产 GaAs/Ge 太阳电池, 批产平均效率已达 18.0%~19.5% (AM0, 1sun). 我国也于 90 年代中后期, 采用 MOCVD 技术研制 GaAs/Ge 太阳电池, 典型效率为 19% (AM0, 1sun).

然而, 在 Ge 衬底上外延生长 GaAs 属于在非极性衬底上生长极性材料, 而且两种材料晶格常数和热胀系数的微小差异将导致反相畴和位错等晶体缺陷^[2,3]. 此外, 在材料生长过程中, GaAs/Ge 界面的相互扩散^[4,5] 都将造成 GaAs/Ge 太阳电池光伏性

能异常. 本文分析了实际生产中出现的 $I-V$ 特性曲线异常现象, 采用物理模型进行模拟分析, 解释出现异常的原因, 并由此提出改进措施, 成功制得了高效率 GaAs/Ge 太阳电池.

2 实验

采用低压 (2kPa) 金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 技术 (Aixtron 200-4), 在 n 型 Ge 单晶衬底上生长 GaAs 电池样品. III 族源分别为 TMGa, TMAI, TMIIn; V 族源分别为 AsH₃ 和 PH₃; p 型掺杂剂为 SiH₄; n 型掺杂剂为 DEZn 和 CCl₄. 主要器件后工艺包括: 光刻、制作正面和背面电极、选择性腐蚀、制作减反射膜 (TiO₂/SiO₂) 和热退火等. 采用电化学 $C-V$ 和二次离子质谱 (SIMS) 等方法测试分析界面扩散. 以 Spectrolab X-25 模拟器作为 AM0 光源, 测量电池样品的光伏性能.

3 分析讨论

3.1 实验结果

采用图 1 所示的太阳电池结构, 可生长研制得到典型转换效率达到 19% 的 GaAs/Ge 单结太阳电

* 国家重点基础研究发展计划资助项目 (批准号: ZM200002B01)

池,其正常的光伏 $I-V$ 特性曲线如图 2 中曲线 a 所示.然而在研制过程中,亦出现了如图 2 中曲线 b, c 所示的异常曲线,其相应的电学性能由表 1 示出.



图 1 GaAs/Ge 太阳能电池结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GaAs/Ge solar cell

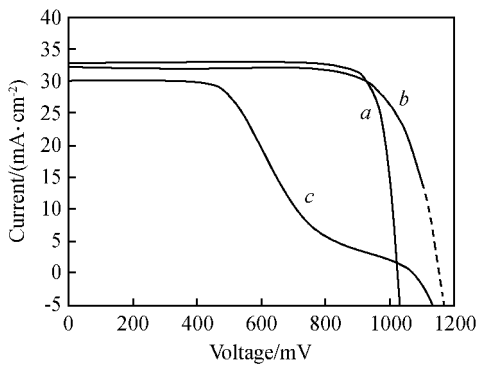


图 2 GaAs/Ge 太阳能电池的 $I-V$ 特性曲线

Fig. 2 $I-V$ curves of GaAs/Ge solar cells

表 1 GaAs/Ge 太阳能电池的光伏性能

Table 1 Photovoltaic performance of GaAs/Ge solar cells

曲线	V_{oc}	J_{sc}	FF	E_{ff}
a	1026	32.94	0.839	20.95
b	1154	32.23	0.740	20.35
c	1071	30.37	0.450	10.81

3.2 分析与模拟

对于上述两种具有异常光伏曲线的情形,其开路电压 V_{oc} 较高,但是填充因子 FF 明显偏低,表明电池中存在附加结或附加势垒.通过 $C-V$ 及 SIMS 测试发现,附加结或附加势垒的形成与初始层生长温度密切相关.即不同生长条件,可能形成不同类型的附加结.在 GaAs 的生长过程中,Ga 和 As 都可能作为 p 型和 n 型掺杂剂,向 Ge 衬底内扩散;同时,Ge 亦可能扩散到 GaAs 中,作为 n 型掺杂,形成 n-GaAs/n⁺-GaAs 附加结(Ge 向 GaAs 内扩散距离达

几个微米,浓度达 $10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)^[5],极性与 p/n-GaAs 结相同.而在实际生长过程中,就 Ga 和 As 向 Ge 衬底内的扩散,对于较高的生长温度,As 的扩散浓度可达到 10^{19} cm^{-3} 以上,扩散距离较长;而 Ga 的浓度更高,但扩散距离很短.从而导致在 GaAs/Ge 界面形成很浅的 p/n 附加结(曲线 b).对于较低的生长温度,只观测到 As 的扩散^[6],即在 GaAs/Ge 界面形成 n-GaAs/n-Ge 异质结,极性与 p/n-GaAs 相同.其电流的输运方式与金属-半导体势垒相似,可将其描述为在 GaAs/Ge 界面存在一个附加势垒(曲线 c).

为了证实上述分析,我们建立了模型并进行了计算机模拟.根据太阳能电池的基本原理,假定:

(1) 光生电子和光生空穴通过 pn 结,即认为被收集;

(2) 多子运动按介电弛豫时间的顺序传播,满足该区域内各处粒子流守恒条件;

(3) 考虑稳态,小注入情况.

显然,在 GaAs/Ge 电池中,有

$$J(\text{GaAs}) = J_{ph} - \frac{V - JR_s}{R_{sh}} - J_0 \left(e^{\frac{V - JR_s}{nkT/q}} - 1 \right) \quad (1)$$

类似地,对于曲线 b ,可描述为 GaAs 的 p/n 结和 Ge 附加结串联而成.Ge 附加结的 $J-V$ 特性可表示为

$$J(\text{Ge}) = J_{ph} - \frac{V - JR_s}{R_{sh}} - J_0 \left(e^{\frac{V - JR_s}{n_1 kT/q}} - 1 \right) \left(e^{\frac{V - JR_s}{n_2 kT/q}} + 1 \right) \quad (2)$$

式中 n_1 和 n_2 分别描述 Ge 结正向和反向工作时的结特性. R_s, R_{sh} 为电池的串联电阻和并联电阻.因为两个结是串联的,当电流为 J 时,分别求方程(1)和(2),此时的总 $J-V$ 光伏特性可写为

$$V_{\text{GaAs+Ge}}(J) = V_{\text{GaAs}}(J) + V_{\text{Ge}}(J) \quad (3)$$

对于曲线 c ,可描述为 p/n 结和 Schottky 结相串联.Schottky 结区内,电流通过 n-N 异质结势垒的输运,与金属-半导体势垒相似.对于 n-GaAs/n-Ge 异质结,其 $J-V$ 光伏特性可表示为^[7]

$$J(\text{n-GaAs/n-Ge}) = J_0 \left(1 - \frac{V}{V_d} \right) \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (4)$$

其中饱和电流为

$$J_0 = \frac{q^2 N_2 V_d}{\sqrt{2\pi m_2 kT}} e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \quad (5)$$

其势垒高度可表示为

$$V_d = \frac{\Delta E_c}{q} - \frac{kT}{q} \ln \left[\left(\frac{N_1}{N_2} \right) \left(\frac{m_2}{m_1} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (6)$$

当电流为 J 时,分别求方程(1)和(4),此时总的 J - V 光伏特性为

$$V_{\text{GaAs+GaAs/Ge}}(J) = V_{\text{GaAs}}(J) + V_{\text{GaAs/Ge}}(J) \quad (7)$$

式中 q 为电子电荷; k 为 Boltzmann 常数; T 为绝对温度; N_1 , N_2 和 m_1 , m_2 分别为 n-Ge 和 n-GaAs 的掺杂浓度和电子有效质量.

分别比较以上(1),(3)和(6)式的模拟曲线和实验结果,如图 3 所示,可见理论结果与实验结果是完全吻合的.这表明以上理论分析是正确的.

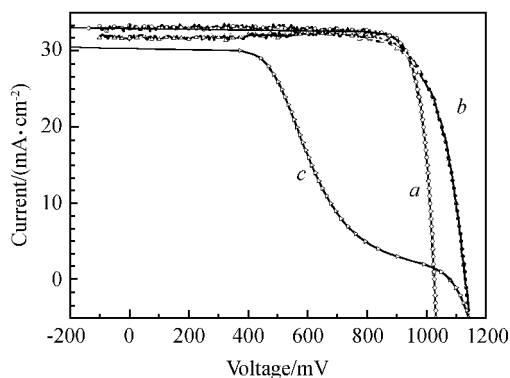


图 3 GaAs/Ge 太阳电池 I - V 模拟曲线和实验结果

Fig. 3 Simulative and experimental I - V curves of GaAs/Ge solar cells

3.3 改进措施

为了避免上述两种 I - V 特性异型,获得钝化的 GaAs/Ge 界面和良好的 GaAs 外延层表面形貌是必须的.一般地,可考虑从以下方面进行改进:(1)衬底的选择;(2)衬底处理;(3)电池结构;(4)MOCVD 生长条件等.

本工作选择低电阻率的 Ge 衬底 ($\rho_s = 0.04 \sim 0.4 \Omega \cdot \text{cm}$),而重点在于调整控制 MOCVD 生长条件(生长温度和生长速率),以获得好的 GaAs/Ge 界面特性.研究表明,初始层的生长温度是影响表面形貌和界面性质的关键因素^[3],即决定 GaAs/Ge 界面的钝化或活性.实验结果显示,仅在较窄的生长温度范围内,可得到钝化的 Ge 结及高性能的 GaAs 电池.此外,高生长速率可得到几乎完好的外延层,其界面是突变的,无扩散现象;而低生长速率则将明显增加互扩散效应.由此,根据本实验室的实际情况,工作中选择合适的初始层生长温度($550 \sim 600^\circ\text{C}$)和生长速率($1 \sim 1.5 \mu\text{m/h}$),从而稳定得到转换效率为 20.95%(AM0, 25°C , $2\text{cm} \times 4\text{cm}$)的 GaAs/Ge 太阳

电池.显然,这一结果为 GaAs/Ge 单结太阳能电池在空间电源系统中的广泛应用,提供了可靠的保证.

4 结论

GaAs/Ge 单结电池的研制中,常出现两种异常光伏特性情况,尽管此时的开路电压 V_{oc} 较高,但其填充因子 FF 明显偏低.通过对 GaAs/Ge 界面的测试与分析,认为除了 p/n-GaAs 结外,电池中存在附加结或附加势垒.其形成原因为:Ge 向 GaAs 外延层中的扩散,以及 Ga 和 As 向 Ge 衬底内的扩散.由理论模型得到的模拟结果与实验有很好的 consistency,从而进一步证实了附加结或附加势垒的成因.由此,本文调整了 MOCVD 生长工艺,选择合适的初始层生长温度和生长速度,得到钝化的 GaAs/Ge 界面,成功获得效率为 20.95%(AM0, 25°C , $2\text{cm} \times 4\text{cm}$)的 GaAs/Ge 太阳电池.

致谢 感谢王向武教授在 MOCVD 生长方面的帮助.

参考文献

- [1] Tyagi R, Singh M, Thirumvalavan M, et al. The influence of As and Ga prelayers on the metal-organic chemical vapor deposition of GaAs/Ge. *J Electron Mater*, 2002, 31(3): 234
- [2] Ringel S A, Sieg R M, Carlin J A, et al. Toward achieving efficiency III-V space cells on Ge/GeSi/Si wafers. 2nd World Conference and Exhibit on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 1998: 3594
- [3] Ringel S A, Sieg R M, Ting S M, et al. Anis-phase domain-free GaAs on Ge substrates grown by molecular beam epitaxy for space solar cell applications. *Proc 26th IEEE PVSC*, Anaheim, CA, 1997: 793
- [4] Chang K I, Yeh Y C, Iles P A, et al. Heterostructure GaAs/Ge solar cells. *Proceedings of the 19th Photovoltaic Specialists Conference NY*, 1987: 273
- [5] Friedman D J, Olson J M. Analysis of Ge junctions for GaInP/GaAs/Ge three-junction solar cells. *Prog Photovolt: Res Appl*, 2001, 9: 179
- [6] Partain L D, Virshup G F, Kaminar N R. Quantum yield spectra and I - V properties of a GaAs solar cell grown on a Ge substrate. *PVSC-22*, 1988: 759
- [7] Chang L L. Conduction properties of Ge-GaAs_{1-x}P_x n-n heterojunctions. *Solid-State Electron*, 1965, 8: 721

Analysis on Abnormal $I-V$ Curves of GaAs/Ge Solar Cells*

Tu Jielei^{1,2}, Wang Liangxing¹, Zhang Zhongwei¹, Chi Weiyang¹,
Peng Dongsheng¹, and Chen Chaoqi¹

(1 *Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200233, China*)

(2 *Inst. of Solar Energy, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China*)

Abstract: The main reasons why $I-V$ curves are abnormal in developing GaAs/Ge solar cells are discussed for each diffusion in GaAs/Ge interface, which will form additional junction or potential. And theoretical calculating simulations agreeing with experiments re-confirm above ideas. As the result, GaAs/Ge solar cells with 20.95% (AM0, 25°C, 2cm × 4cm) are successfully obtained by increasing growth temperature and optimising condition of forming nucleus.

Key words: GaAs/Ge solar cells; $I-V$ curves; calculating simulation; diffusion in interface

PACC: 0270; 8630; 6800

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0192-04

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

Received 2 November 2004, revised manuscript received 19 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics