

# 基于 Ge 衬底的高带隙 AlGaInP 太阳电池研究

姜德鹏<sup>1</sup>, 黄珊珊<sup>2</sup>, 马涤非<sup>2</sup>, 彭 娜<sup>2</sup>, 张小宾<sup>2</sup>

(1. 上海空间电源研究所, 上海 200245; 2. 中山德华芯片技术有限公司, 中山 528437)

**摘 要:** 以高带隙的 AlGaInP 材料为研究对象, 基于 AlGaInP/Ge 双结电池结构, 通过改变 AlGaInP 子电池的 Al 组分、基区厚度、窗口层厚度等参数来改善电池的电性能。研究表明: 随着 Al 组分从 10% 降至 6%, AlGaInP 子电池的材料带隙从 2.05 eV 降至 2.00 eV, 外量子效率(EQE)响应的范围及强度均有明显提高, 在 AM1.5G 光谱条件下电池效率从 10.01% 升至 14.86%, 并发现通过基区加厚可提高中长波段的 EQE 响应, 而通过窗口层减薄则有利于提高短波 EQE 响应, 最终双结电池在 AM1.5G 光谱条件下效率达到 17.16%。

**关键词:** III-V 族半导体; 宽带隙; 金属有机化合物气相外延; 量子效率

中图分类号: TM914.4

文献标识码: A

## 0 引 言

III-V 族多结太阳电池通过不同带隙的子电池吸收对应波段的太阳光来提高光电转换效率。为达到最佳效率, 既要求各子电池达到带隙匹配, 又要求各子电池材料的晶格常数相匹配。近年来各类研究机构对 III-V 族多结电池技术进行了一系列研究<sup>[1]</sup>。France 等<sup>[2]</sup>制备一种倒装生长的四结电池, 并在 AM1.5G 条件下达到 37.8% 的转换效率。但因其晶格失配及衬底转移带来的问题, 导致产品成品率低且成本高<sup>[3]</sup>。美国 SpectroLAB 实验室的研究人员制备的一种新型五结键合电池在 AM1.5G 条件下获得 38.8% 的转换效率<sup>[4]</sup>, 但拼接电池需要分别在不同衬底上进行外延生长后剥离衬底, 且键合后存在空洞和隐裂<sup>[5]</sup>。上述两种方法制备得到的电池虽然实验室转换效率较高, 但复杂的芯片工艺及较低的成品率并不适合量产。

一种基于 Ge 衬底正向生长晶格匹配的 AlGaInP/AlGaAs/Ga(In)As/GaInNAs/Ge (2.05 eV/1.72 eV/1.42 eV/1.1 eV/0.7 eV) 五结电池, 能获得较高的转换效率且无需复杂的外延生长及剥离工艺, 具有很大的发展潜力。但高 Al 组分的 AlGaInP 材料将引入更多的氧系缺陷并形成深能

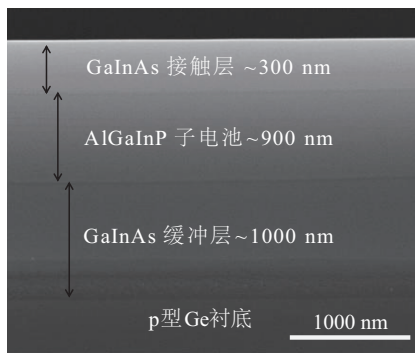
级陷阱中心, 这会加快非辐射复合速率, 限制电池的少子寿命, 降低电池的光电流而成为五结电池的限流结<sup>[6]</sup>。为研究基于 Ge 衬底高转换效率的 AlGaInP 电池, 笔者通过改变 Al 组分、基区厚度、窗口层厚度去改善 AlGaInP 子电池的电性能。这种优化的 AlGaInP 电池结构可直接用于五结电池中作为顶电池。

## 1 实 验

所有电池结构的外延生长使用美国 Veeco 公司制造的 K475 型低压 MOCVD 设备, 主要的 MO 源为: TMGa、TMAl、TMIn 作为 III 族源, PH<sub>3</sub>、AsH<sub>3</sub> 作为 V 族源, 基区及背场 p 型掺杂源为 DEZn, 窗口层及发射区 n 型掺杂源为 Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 衬底选用 [1 0 0] 偏向 [1 1 1] 9° 的 p 型 Ge 衬底。图 1a 为 AlGaInP/Ge 双结电池结构示意图。通过对 p 型 Ge 衬底进行 n 型磷扩散, 可在衬底上直接形成带隙 0.67 eV 的 Ge 电池, 隧道结采用重掺的 AlGaAs/GaAs 隧道结。其中, AlGaInP 电池的窗口层为 Al<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P, 背场为 Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As, 发射区及基区为 Al<sub>x</sub>Ga<sub>0.51-x</sub>In<sub>0.49</sub>P。根据图 1b 所示的电池截面的扫描电镜(SEM)测试结果可知, 所生长的电池结构与设计结构参数高度吻合。



a. 结构示意图



b. SEM截面图

图1 AlGaInP/Ge双结电池示意图

Fig. 1 Schematic showing structure of AlGaInP/Ge DJ solar cell

共进行5组对照实验,如表1所示,其中样品1~样品3的Al组分依次为10%、8%、6%;样品4在样品3的基础上将电池基区厚度从600 nm增至715 nm;样品5在样品3的基础上将窗口层厚度从40 nm减薄到20 nm,其他实验参数相同。

表1 5组样品的实验条件

Table 1 Experiment conditions of the 5 groups of samples

样品	Al组分/%	基区厚度/nm	窗口层厚度/nm
1	10	600	40
2	8	600	40
3	6	600	40
4	6	715	40
5	6	600	20

实验中制备的电池芯片规格为3 cm×4 cm,通过利用电子束蒸发技术制备AuGeNi/Au正面电极、Au/Ag/Au背面电极,并采用离子源辅助镀膜技术(AID)来制备电池的TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>膜系减反射膜。使用

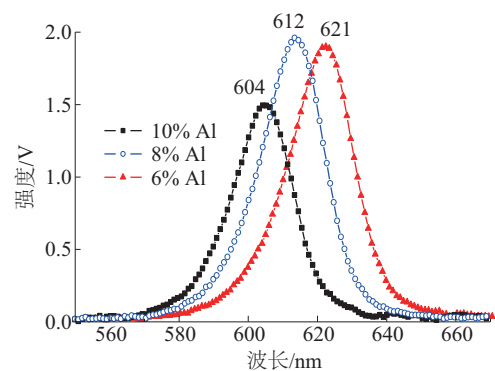
Nanometrics公司制造的RPM Blue型测试仪表征了AlGaInP材料的光致发光谱,使用Jordan Valley Semiconductors公司制造的QC3型高分辨率双晶衍射测试仪表征AlGaInP材料与Ge基底的布拉格衍射角差值,使用Bentham公司制造的PVE300测试仪测试AlGaInP电池的外量子效率及内量子效率,使用Newport公司制造的Oriol Sol3A型模拟器对电池的光照电流密度与电压( $J$ - $V$ )特性曲线进行表征。本文主要讨论基于Ge衬底的AlGaInP/Ge双结电池在AM1.5G条件下镀膜后的电性能及AlGaInP子电池的光谱响应特性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同Al组分

提高AlGaInP顶电池的Al组分能提高电池的开路电压,但电池的短路电流会随之降低。多结电池要求保证各结子电池达到电流匹配,电流不匹配会引起热损耗,不利于提高电池的转换效率。并Al组分引入的氧系缺陷会极大地降低短路电流,使得AlGaInP子电池成为五结电池中的限流结。为研究Al组分对电池性能的影响,制备AlGaInP材料中Al组分分别为10%、8%、6%的AlGaInP/Ge双结电池。

图2为上述样品的PL(光致发光)测试及XRD(X射线衍射)测试结果,其中 $\omega$ 代表X射线入射束与样品表面的夹角, $2\theta$ 代表X射线反射束与样品表面的夹角。从图2可看出,随着Al组分的降低,AlGaInP材料的PL中心波长从604 nm增至621 nm,相应的禁带宽度从2.05 eV减至约2.00 eV,PL峰的强度变强表明材料的质量变好;AlGaInP的XRD峰与衬底峰相差少于 $-150$  arcsec ( $-0.0417^\circ$ ),这表明不同Al组分的AlGaInP材料与衬底能保持较好的晶格匹配。



a. PL

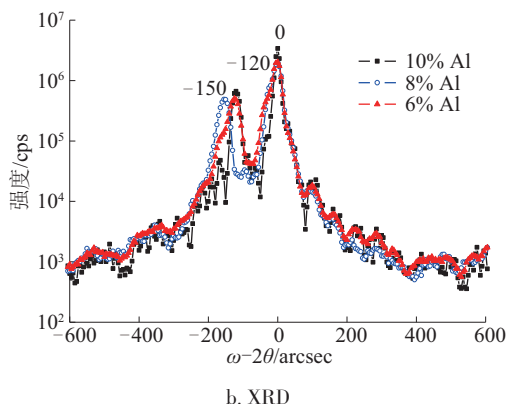


图2 不同Al组分AlGaInP材料的PL及XRD测试  
Fig. 2 PL and XRD testing of AlGaInP materials with various aluminum contents

图3所示为不同Al组分的AlGaInP子电池的EQE响应曲线,可看出:1)随着Al组分的降低,AlGaInP子电池的EQE响应范围变大,EQE响应强度变强。这是由于材料的带隙变小,光源中大于其带隙的光子数量变多,因而长波响应范围变大;2)入射光子能量与材料带隙相差增大,材料吸收系数也增大,因而各波段响应强度均变强。

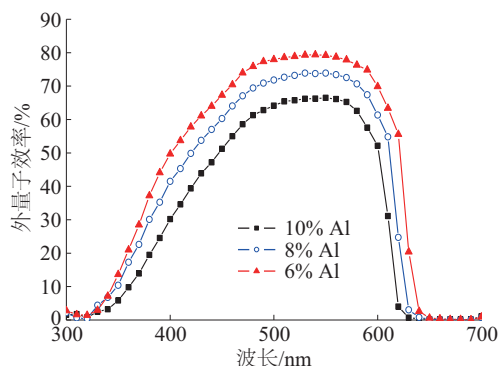


图3 不同Al组分的AlGaInP子电池EQE响应曲线  
Fig. 3 EQE of AlGaInP sub-cells with various aluminum contents

图4给出了在AM1.5G光谱条件下不同Al组分的AlGaInP/Ge双结电池的光照J-V特性。出随着Al组分的降低,短路电流密度( $J_{sc}$ )提高,与外量子效率(EQE)测试结果相一致。从表2给出的AlGaInP/Ge双结电池性能参数可看出,Al组分降低,开路电压稍有降低,这是由于AlGaInP的带隙变窄;同时因更高的Al组分将引入更多的氧系缺陷使AlGaInP材料质量变差,则随着Al组分的降

低,电池的填充因子(FF)变高<sup>[7]</sup>。Al组分从10%减至6%,AlGaInP/Ge双结电池的转换效率从10.01%增至14.86%。

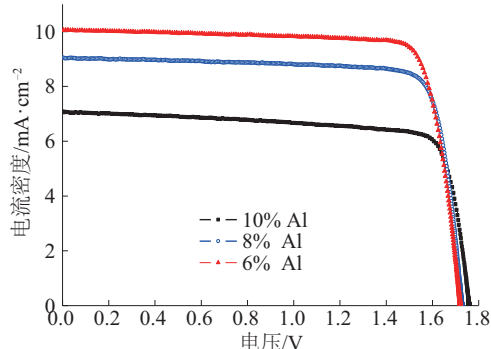


图4 不同Al组分AlGaInP/Ge双结电池J-V曲线  
Fig. 4 J-V curve of AlGaInP/Ge DJ solar cells with various aluminum contents

表2 AlGaInP/Ge双结电池性能参数

Table 2 J-V characteristics of AlGaInP/Ge DJ solar cells

样品	Al组分/%	短路电流密度/ $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$	开路电压/V	填充因子/%	效率/%
1	10	7.08	1.75	80.9	10.01
2	8	9.05	1.74	84.9	13.35
3	6	10.07	1.71	86.5	14.86

## 2.2 基区加厚

从图5所示的不同基区厚度对AlGaInP子电池EQE的影响及图6所示的AlGaInP/Ge双结电池J-V曲线可看出,随着基区厚度的提高,AlGaInP子电池的EQE长波响应变强,AlGaInP/Ge双结电池的短路电流密度增加。这是因为半导体的光吸收系数与入射光的波长即光子能量有关,半导体对能量

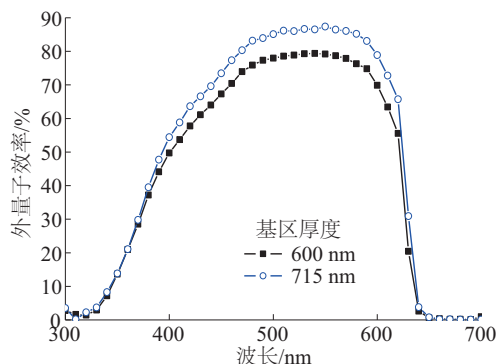


图5 不同基区厚度AlGaInP子电池EQE响应曲线  
Fig. 5 EQE of AlGaInP sub-cells with different base thickness

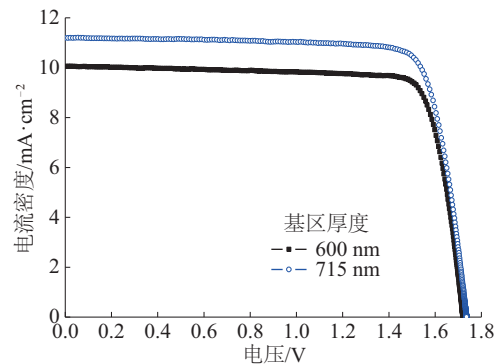


图6 不同基区厚度AlGaInP/Ge双结电池J-V曲线

Fig. 6 J-V curve of AlGaInP/Ge DJ solar cells with different base thickness

小的光吸收系数较小,当基区厚度较薄时,一部分长波的入射光并未被顶电池吸收利用,而是从顶电池透射出去了。

表3所示为AM1.5G光谱条件下的双结电池性能参数。加厚基区后电池的短路电流密度增加了11.4%,而开路电压及填充因子变化不大,电池的转换效率从14.86%增至16.74%。但在多结电池中,顶电池基区的厚度并非越大越好,由于存在体内和表面复合,随着光生载流子与耗尽层距离的增加,载流子收集效率呈指数式减小,因而在基区中比约一个扩散长度深处产生的载流子不能被收集。另外,过厚的顶电池基区会吸收过多的长波光光子,导致子电池能吸收利用的光子数减少而短路电流密度偏低,因而有时为了达到各子电池的电流匹配,需对顶电池基区进行适当的减薄。

表3 不同基区厚度的AlGaInP/Ge双结电池性能参数

Table 3 J-V characteristics of AlGaInP/Ge DJ solar cells with different base thickness

样品	基区厚度/ nm	短路电流密度/ $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	开路电压/ V	填充因子/ %	效率/ %
3	600	10.07	1.71	86.5	14.86
4	715	11.22	1.72	86.4	16.74

### 2.3 窗口层减薄

从图7给出的不同基区厚度对AlGaInP子电池EQE的影响及图8给出的AlGaInP/Ge双结电池J-V曲线可看出,窗口层从40 nm减薄至20 nm,

AGaInP子电池的EQE短波响应变强,AlGaInP/Ge双结电池的短路电流密度明显增加。

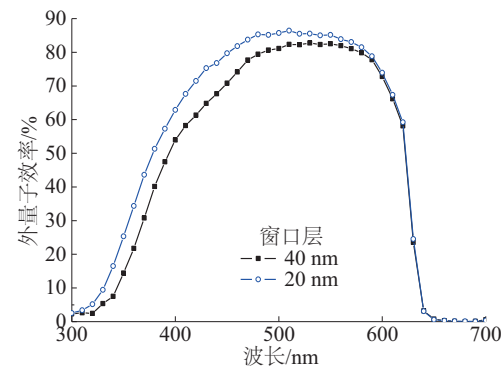


图7 不同窗口层厚度的AlGaInP子电池EQE响应曲线

Fig. 7 EQE of AlGaInP sub-cells with different window thickness

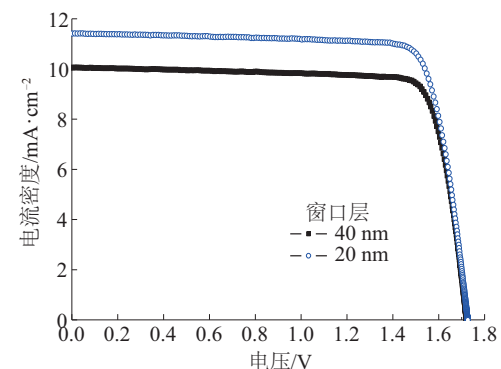


图8 AlGaInP/Ge双结电池J-V曲线

Fig. 8 J-V curve of AlGaInP/Ge DJ solar cells

表4为AM1.5G光谱条件下的AlGaInP/Ge双结电池性能参数,可看出双结电池的短路电流密度从10.07 mA/cm²增至11.97 mA/cm²,而开路电压及填充因子变化不大,AlGaInP/Ge双结电池转换效率从14.86%增至17.16%。

表4 AlGaInP/Ge双结电池性能参数

Table 4 J-V characteristics of AlGaInP/Ge DJ solar cells

样品	窗口层厚度/ nm	短路电流密度/ $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	开路电压/ V	填充因子/ %	效率/%
3	40	10.07	1.71	86.5	14.86
5	20	11.97	1.72	87.3	17.16

为进一步验证AlInP窗口层减薄提高EQE响应的原因,本文做了内量子效率(IQE)及反射率



( $R$ )测试,图9为测得的 AlGaInP 子电池的  $IQE$  曲线及反射率曲线。可看出 AlInP 层减薄使 350~550 nm 波段的反射率稍有降低,但降幅并不是很大,而减薄后的  $IQE$  短波响应比减薄前的强很多,因此可判断 AlInP 窗口层厚度对表面反射率的影响较小;由于 Al 组分为 50% 的 AlInP 材料对短波的吸收系数较高,因而窗口层的光吸收是降低 AlGaInP 子电池短波响应的主要原因,窗口层的厚度减薄有利于提高外量子效率。

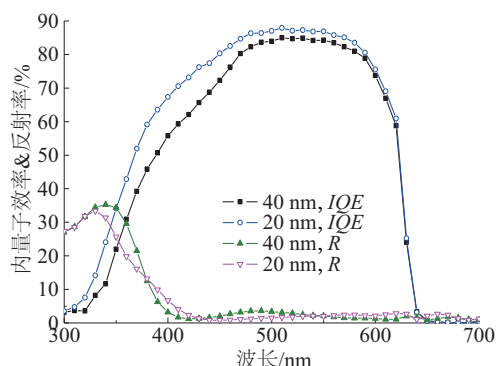


图9 不同窗口层厚度的 AlGaInP/Ge 双结太阳电池的  $IQE$  及反射率

Fig. 9  $IQE$  and reflectance of AlGaInP/Ge DJ solar cells with different window thickness

## 2.4 AlGaInP 子电池的带隙-电压差

开路条件下的带隙-电压偏差 ( $W_{oc}$ ) 是衡量电池内非辐射复合的重要标准,其大小代表材料质量的优劣,带隙-电压偏差计算公式为:

$$W_{oc} = \frac{E_g}{q} - V_{oc} \quad (1)$$

式中,  $E_g$  ——材料带隙;  $q$  ——电子电荷<sup>[8]</sup>。

一般认为,单倍太阳下单结电池的  $W_{oc}$  在 400 mV 以下表明太阳电池的材料质量较好,电池内部的非辐射复合中心较少<sup>[9]</sup>。Perl 等<sup>[10]</sup>通过升高 AlGaInP 的生长温度,将  $W_{oc}$  从 480 降至 420 mV。

前文所获得的电池性能参数都是基于 AlGaInP/Ge 双结电池的,为确定 AlGaInP 子电池的开路电压,我们做了结构为图 10 所示的 Ge 单结电池的实验,其实验参数与在双结电池中的参数一致。在 AM1.5G 条件下,Ge 单结电池的开路电压为 0.266 V,得出样品 5 双结电池中 AlGaInP 子电池的开路电压为 1.452 V,由带隙-电压偏差公式,即式(10)计算得到  $W_{oc}$  为 548 mV,这表明 AlGaInP 的

材料质量仍有改善空间。

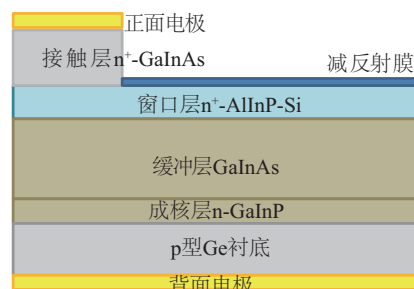


图 10 Ge 单结电池结构

Fig. 10 Schematic structures of Ge single-junction solar cells

## 3 结 论

通过改变 AlGaInP 材料的 Al 组分生长带隙在 2.05~2.00 eV 之间的 AlGaInP/Ge 双结电池,随着 Al 组分从 10% 降至 6%,AlGaInP 子电池的带隙降低吸收光谱变宽,材料质量提高,电池的短路电流及填充因子增加,在 AM1.5G 光谱条件下 AlGaInP/Ge 双结电池转换效率从 10.01% 增至 14.86%。另外,通过增加基区厚度和减少窗口层厚度均可明显提高 AlGaInP 子电池的电流密度。通过将基区厚度从 600 nm 增至 715 nm 使 AlGaInP 子电池的  $EQE$  长波响应变强,并使双结电池的短路电流密度增加了 11.4%;通过将窗口层从 40 nm 减薄至 20 nm 使 AlGaInP 子电池的  $EQE$  短波响应变强,并使其短路电流密度增加了 18.9%。最终,实验制备得到的 AlGaInP/Ge 双结电池在 AM1.5G 光谱下获得的短路电流密度为 11.97 mA/cm<sup>2</sup>,开路电压为 1.72 V,  $FF$  为 87.3%,转换效率为 17.16%。

本文中效率最高的双结电池中 AlGaInP 子电池的带隙-电压偏移为 0.548 V,表明材料质量及电池电性能仍有改善空间。

## [参考文献]

- [1] Wilt D, Stan M. High efficiency multijunction photovoltaic development[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(37): 11931—11940.
- [2] France R M, Geisz J F, Garcia I, et al. Design flexibility of ultrahigh efficiency four-junction inverted metamorphic solar cells[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2016, 6(2): 578—583.
- [3] 薛超,姜明序,高鹏,等. 柔性砷化镓太阳电池[J]. 电源技术, 2015, 39(7): 1554—1557.

- [3] Xue Chao, Jiang Mingxu, Gao Peng, et al. Thin film GaAs solar cells[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(7): 1554—1557.
- [4] Chiu P T, Law D C, Woo R L, et al. 35.8% space and 38.8% terrestrial 5J direct bonded cells[A]. 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC) [C], Denver, 2014.
- [5] 彭红玲, 马绍栋, 张冶金, 等. 键合的双结太阳电池研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(6): 1481—1485.
- [5] Peng Hongling, Ma Shaodong, Zhang Yejin, et al. Research on two-junction bonding solar cell[C]. Acta Energiae Solaris, 2015, 36(6): 1481—1485.
- [6] Lu Hongbo, Li Xinyi, Zhang Wei, et al. A 2.05 eV AlGaInP sub-cell used in next generation solar cells[J]. Journal of Semiconductors, 2014, 35(9): 83—86.
- [7] Jones G, Cain N, Peggs D W, et al. An optical study of the properties of  $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_0.51\text{In}_{0.49}\text{P}$  epitaxial layers with varying composition, hydrostatic pressure and GaAs substrate orientation[J]. Materials Science & Engineering B, 1999, 66(1-3): 126—130.
- [8] King R R, Law D C, Edmondson K M, et al. Advances in high-efficiency III-V multijunction solar cells[J]. Advances in OptoElectronics, doi: 10.1155/2007129523.
- [9] Masuda T, Tomasulo S, Lang J R, et al. Comparison of single junction AlGaInP and GaInP solar cells grown by molecular beam epitaxy[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(9): 094504.
- [10] Perl E E, Simon J, Geisz J F, et al. Development of a 2.0 eV AlGaInP solar cell grown by OMVPE [A]. 41st IEEE Photovoltaic Specialist Conference [C], Seattle, 2015.

## STUDY ON HIGH-BANDGAP OF AlGaInP SOLAR CELLS ON Ge SUBSTRATE

Jiang Depeng<sup>1</sup>, Huang Shanshan<sup>2</sup>, Ma Difei<sup>2</sup>, Peng Na<sup>2</sup>, Zhang Xiaobin<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200245, China;

2. Uniwatt Technology Co., Ltd., Zhongshan 528437, China)

**Abstract:** Optimizing the aluminum content, base thickness and window thickness of AlGaInP sub-cell, the efficiency of AlGaInP/Ge double-junction (DJ) solar cell is obviously improved. We find that the samples with lower aluminum content exhibited a clear improvement in the all-wavelength external quantum efficiency (*EQE*) of the AlGaInP sub-cell. And by increasing the base thickness, a clear improvement was achieved in the long-wavelength *EQE* of the AlGaInP sub-cell. Finally, we reduce the thickness of the window layer and get an improvement in the short-wavelength *EQE* of the AlGaInP sub-cell. Under the spectrum at 1000 W/m<sup>2</sup> (AM1.5G), the best of these AlGaInP/Ge DJ solar cells had an efficiency of 17.16%.

**Keywords:** III-V semiconductors; broadband; MOCVD; quantum efficiency