

GaInP/GaAs/InGaAs 倒装三结太阳能电池设计与优化

马大燕¹, 陈诺夫¹, 付蕊¹, 刘虎^{1,2}, 白一鸣¹, 陈吉堃³

(1. 华北电力大学可再生能源学院, 北京 102206; 2. 石家庄铁道大学数理系, 石家庄 050041;

3. 北京科技大学材料学院, 北京 100083)

摘 要: 为获得带隙组合对太阳光谱有效的分割利用, 基于细致平衡原理, 结合 p-n 结形成机理, 应用 Matlab 语言对 GaInP(1.90 eV)/GaAs/InGaAs 倒装结构电池体系底电池带隙和各子电池厚度进行模拟优化。结果表明底电池带隙为 1.0 eV 时, 光电转换效率最高。通过对 GaInP(1.90 eV)/GaAs(1.42 eV)/InGaAs(1.0 eV) 倒装结构三结太阳能电池各结厚度进行优化, 综合考虑材料成本及生产技术等因素, 最佳厚度组合为 1.35、2.83 和 3.19 μm 时, 光电转换效率为 44.4%, 仅比最高转换效率低 0.3%。

关键词: 太阳能电池; 细致平衡; p-n 结; 倒装结构(IMM)

中图分类号: TM914.4

文献标识码: A

0 引 言

目前, 晶格匹配生长的高质量三结太阳能电池由 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 、 $\text{Ga}_{0.99}\text{In}_{0.01}\text{As}$ 和 Ge 底电池串联而成, 其光电转换效率达 41.6% (AM1.5, 364 倍)^[1,2]。而变质三结太阳能电池 $\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.65}\text{P}/\text{Ga}_{0.83}\text{In}_{0.17}\text{As}/\text{Ge}$ 在 454 倍聚光, AM1.5 条件下, 可达 41.1%^[3]。GaInP/GaAs/Ge 三结太阳能电池因其带隙组合的限制, 转换效率再上升空间不大。而倒装多结太阳能电池因为其可以更合理分配太阳光谱, 减少热能损失, 提高开路电压, 期望可得到更高的转换效率。目前, 倒装结构太阳能电池最高转换效率由美国可再生能源国家实验室 (NREL) 生产的 GaInP/GaAs/InGaAs/InGaAs 四结电池提供, 转换效率高达 45.7% (AM1.5, 234 倍)^[4,5], 仅比德国 Fraunhofer ISE 实验室生产的 GaInP/GaAs/InGaAsP/InGaAs 四结键合太阳能电池 46.0% (AM1.5, 508 倍)^[6,7] 的多结太阳能电池的最高效率低 0.3%。2013 年, 日本 Sharp 公司生产的小面积 GaInP/GaAs/InGaAs(1.0 eV) 倒装三结太阳能电池, 光电转换效率为 44.4% (AM1.5, 302 倍)^[8], 这也是迄今为止三结太阳能电池聚光条件下的最高效率。

对于 1 eV 的底电池材料的选择, 参考大多数相关文献, 为简化计算, 均假设光子能量 100% 被吸

收, 忽略材料吸收系数, 少子扩散长度、寿命等因素的影响^[9,10]。本文将基于细致平衡原理的基本方程式出发, 尽可能考虑一切因素, 应用 Matlab 程序对 GaInP/GaAs/InGaAs 倒装三结太阳能电池 InGaAs 的禁带宽度以及各子电池的厚度进行模拟优化, 使各子电池的电流密度更匹配, 降低能耗, 提高效率, 从而为实现倒装结构产业化打下基础。

1 实验方法

倒装三结太阳能电池的制备原理如图 1^[11]所示, 首先在 GaAs 衬底上依次生长晶格匹配的 GaInP、GaAs 顶电池和中电池, 然后应用阶变缓冲层技术生

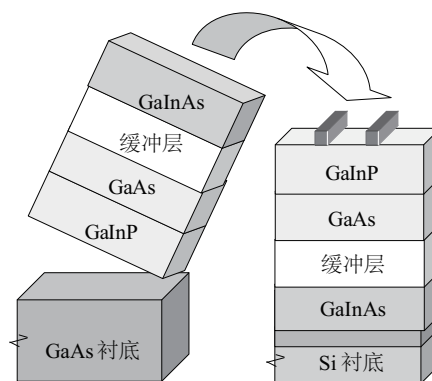


图1 倒装三结太阳能电池结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of the 3J IMM cell structure

收稿日期: 2016-03-08

基金项目: 北京市自然科学基金(2151004)

通信作者: 陈诺夫(1959—), 男, 博士、教授, 主要从事太阳能电池与光伏发电系统方面的研究。nfchen@ncepu.edu.cn

长晶格失配的 InGaAs 的底电池,将生长完的外延片键合在 Si 衬底上,最后通过剥离工艺将原有 GaAs 衬底去除,从而可实现 GaAs 衬底的循环使用。

本实验采用 AM1.5 标准太阳光谱 (ASTM G173-03^[12] 光谱),温度设为 300 K。假设顶电池 GaInP、中电池 InGaAs 依次倒装生长在 GaAs 衬底上,且保持晶格匹配。实验表明 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ 的晶格常数与 Ga 组分百分比存在如下关系:

$$a_{\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}} = xa_{\text{GaP}} + (1-x)a_{\text{InP}} \quad (1)$$

式中, a ——晶格常数; x ——Ga 组分百分比。

$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ 与 GaAs 晶格完全匹配可得到 $x \approx 0.516$,而 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ 带隙与 Ga 组分百分比又存在如下关系式^[13]:

$$E_{\text{g,Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}} = 1.35 + 0.668x + 0.758x^2 \quad (2)$$

式中, E_{g} ——带隙。

经计算,顶、中禁带宽度组合为 1.90 eV/1.42 eV。然后确定底电池的禁带宽度,即 InGaAs 中的 In 的组分。器件结构如图 2 所示。

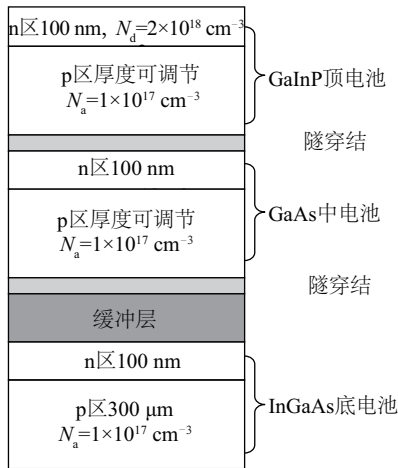


图2 倒装三结太阳电池器件参数设计模型

Fig. 2 Device parameters for model of the 3J IMM cell

假设各子电池的发射极厚度均为 100 nm,均匀掺杂,发射极施主掺杂浓度为 $N_d = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,基区受主掺杂浓度为 $N_a = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。顶、中电池基区厚度均为可调节,以便更好地进行电池结构优化。而由于底电池厚度只影响自身的光子吸收率,对顶、中电池无影响,故把底电池的厚度视为无穷厚。计算中还假设:1)无串联电阻损失和理想的隧穿结;

2)材料表面无反射损失;3)光子吸收从 300 nm 处开始计算。

在不考虑二极管影响因子和串联电阻的影响,作为理想的太阳电池,其伏安特性方程可表示为:

$$V = \frac{k_B T}{q} \left[\ln \left(\frac{J_{\text{sc},1} - J}{J_{0,1}} + 1 \right) + \ln \left(\frac{J_{\text{sc},2} - J}{J_{0,2}} + 1 \right) + \ln \left(\frac{J_{\text{sc},3} - J}{J_{0,3}} + 1 \right) \right] \quad (3)$$

式中, q ——电子电量; k_B ——玻尔兹曼常数; T ——绝对温度; $J_{\text{sc},i}$ 、 $J_{0,i}$ ($i = 1, 2, 3$) ——分别表示电池正装后第 i 结电池的短路电流密度和暗电流密度。

每个子电池的短路电流密度 J_{sc} 可通过式(4)求得:

$$J_{\text{sc}} = \int_0^\infty e \Phi_{\text{inc}}(\lambda) QE(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

式中, $\Phi_{\text{inc}}(\lambda)$ ——电池入射光谱某一特定波长 (λ) 处的光子通量密度; QE ——电池的外量子效率。

对于只有基区结深 x_e 、耗尽区宽度 W 和发射区结深 x_b 简化的理想太阳电池,如图 3 所示, QE 可表述为:

$$QE = QE_{\text{emitter}} + QE_{\text{depl}} + \exp[-\alpha(x_e + W)] QE_{\text{base}} \quad (5)$$

式中, QE_{emitter} 、 QE_{depl} 、 QE_{base} ——发射区、耗尽区和基区的 QE ,各区 QE 和 J_0 具体计算方程参考文献[14]。

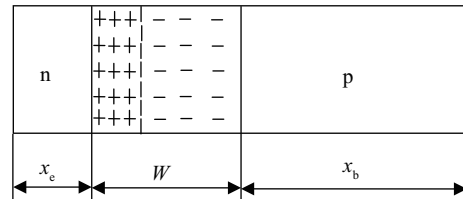


图3 简化的单结太阳电池工作原理图

Fig. 3 Simple solar cell structure used to analyze operation of a solar cell

$QE(\lambda)$ 作为一个重要的电池参数,描述的是电池材料对光谱中某一波长光子的吸收效率,本文主要参考 Shockley 关于 p-n 结的理论模型来解决光生载流子的复合、吸收与扩散。这样模型建立中需要的参数包括发射区、基区的少数寿命 $\tau_{n,p}$,空穴、电子在发射区、基区的扩散长度 $L_{n,p}$ 、迁移率 $\mu_{n,p}$ 、扩散系数 $D_{n,p}$ 、表面复合速度 $S_{n,p}$ 等,它们彼此之间的关系式(6)^[15,16]:

$$D_n = \frac{k_B T \mu_n}{q}, D_p = \frac{k_B T \mu_p}{q};$$

$$L_n^2 = D_n \tau_n, L_p^2 = D_p \tau_p;$$

$$\frac{1}{\tau_n} = B N_d + \frac{1}{\tau_{SRH}}, \frac{1}{\tau_p} = B N_a + \frac{1}{\tau_{SRH}} \quad (6)$$

式中, B ——辐射复合系数; τ_{SRH} ——Shockley-Read-Hall 寿命; N_d ——发射区施主掺杂浓度; N_a ——基区受主掺杂浓度。

为揭示各子电池对光的吸收限随带隙的变化情况,模型中各子电池吸收系数参照 Kurtz 等^[17]在靠近吸收限附近拟合较好的以 E_g 为变量的表达式。对于模型中其他各参数详细数据见表 1。

表 1 模型计算中分别用到的各子电池材料的相关参数

Tabel 1 Material parameters used for simulating GaInP, GaAs and GaIn Assubcells and respectively

参数	GaInP	GaAs	GaInAs
$\mu_n / \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	40.0	95.2	147.3
$\mu_p / \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	1139.0	6646.8	4566.5
$B / \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	7.5×10^{-10}	7.5×10^{-10}	7.5×10^{-10}
τ_{SRH} / s	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}
$S_{n,p} / \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	10^4	10^4	10^4

J - V 特性曲线中的最大功率点可通过式(7)和式(8)得到:

$$\frac{d(JV)}{dJ} = 0 \quad (7)$$

$$\eta = \frac{J_m V_m}{P_{in}} \quad (8)$$

式中, P_{in} ——AM1.5 标准太阳平均辐照度; η ——光电转换效率; J_m ——最大功率点对应的电流密度; V_m ——最大功率点对应的电压。

通过计算 η , 建立电池光电转换效率和 InGaAs 带隙、GaInP 电池厚度 t_1 、GaAs 电池厚度 t_2 之间的联系。

2 结果与讨论

首先讨论 GaInP/GaAs/InGaAs 倒装三结太阳能电池中 InGaAs 的最优带隙。图 4 所示, 在 AM1.5 光谱下, 假设顶、中、底电池厚度为无穷大时, 三结电池转换效率和底电池禁带宽度之间的关系。由图 4 可知, 底电池禁带宽度在 1.0 eV 以下, 如 A 点, 电池

体系转换效率随底电池禁带宽度降低幅度不大, 仅有 3%, 电池体系与衬底的失配度反而提升近 2%, 故此禁带宽度不可取。而禁带宽度在 1.0 eV 以上, 如 C 点, 虽然失配度降低了 0.5%, 但转换效率降低幅度超过失配度的 10 倍, 故 C 点也不可取。底电池禁带宽度为 1.0 eV 时, 电池转换效率最高, 为 42.1%, 而此时对应的底电池组分为 $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}$, 此 GaInP/GaAs/ $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}$ 电池体系对应的禁带宽度组合为 1.90 eV/1.42 eV/1.0 eV, 此禁带宽度组合也是接下来作厚度计算时所采用的组合。而对于这里引入的 2.5% 的失配位错可通过组分跳变和低温大失配缓冲层技术来释放^[18], 以保证由此所导致的位错密度在可接受范围内。

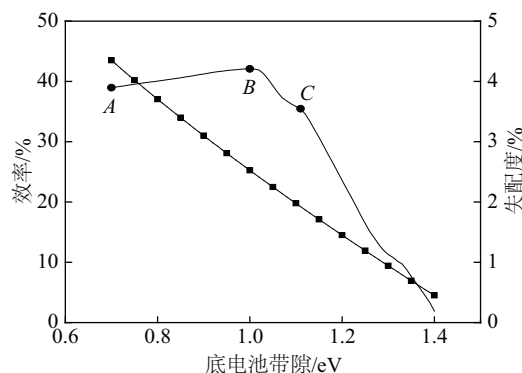


图 4 GaInP 顶电池、GaAs 中电池晶格匹配的电池体系, 以底电池禁带宽度为变量对应的电池体系转换效率以及底电池与衬底的失配度

Fig. 4 The η as function of bottom E_g for GaInP top and GaAs middle cell with same lattice constant of 3J IMM cell. The lattice mismatch between InGaAs bottom cell and GaAs substrate is also indicated

以上计算均假定 GaInP/GaAs/ $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}$ 倒装结构电池体系中各子电池厚度为无穷厚的前提下进行底电池禁带宽度的优化。为了更精确模拟太阳能电池的转换效率, 还需确定太阳电池的厚度, 通过调整电池厚度可将太阳光谱更精细的在子电池之间进行分配, 从而提高器件的转换效率。在当前的试验条件和材料生长技术手段中, 电池生产中可通过金属有机化合物气相沉积 (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) 来控制材料的厚度。接下来针对 GaInP/GaAs/ $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}$ 倒装结构三结太阳能电池的禁带宽度组合 1.90 eV/1.42 eV/

1.0 eV 的电池体系,假设底电池 InGaAs 的厚度足够厚,计算顶、中电池厚度对器件转换效率的影响。

图 5 是针对 GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 倒装三结太阳能电池体系所计算的顶、中电池厚度对顶、中电池短路电流的影响,可知,顶、中电池对应的短路电流密度随它们各自厚度的增加呈上升的趋势并趋于饱和,随顶电池厚度增加,由于顶电池吸收的太阳光增加,则到达下一结电池的光强度随之减弱,故中电池短路电流密度逐渐减小,这样就得到一个某顶电池厚度下,顶、中电池电流相等的点,即电流匹配点。由图 5 可得到,顶电池厚度在约 1.11 μm 处,顶、中电池电流匹配,匹配电流为 13.35 mA/cm^2 ,由于图 5 中 GaAs 中电池的短路电流密度是对中电池厚度作平均得到,故与效率最高点有些许差异。

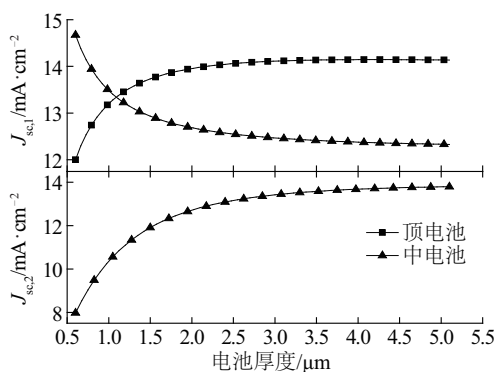


图 5 顶、中电池电流密度和顶电池厚度及中电池短路电流密度与中电池厚度的关系

Fig. 5 The J_{sc} the upper two subcells as function of top cell thickness t_1 and J_{sc} of GaAs middle cell as function of middle cell thickness t_2

图 6 是此电池体系所得到的顶、中电池厚度的效率等高图。对于串联多结电池,整个器件的输出电流取决于子电池中生成的最小光电流。而对于 GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 倒装三结太阳能电池体系,在假定底电池厚度足够厚的前提下,由图 5 可得,器件的输出电流只与 $J_{sc,1}$ 、 $J_{sc,2}$ 有关。在优化顶、中电池厚度时,若要提高整体器件的转换效率,就是要在保证顶、中电池电流匹配的前提下,电流取最大。根据图 6 中每组不同顶电池厚度 t_1 和中电池厚度 t_2 组合所对应的光电转换效率,可看到,顶、中电池最佳厚度组合 $t_1=1.62 \mu\text{m}$, $t_2=4.50 \mu\text{m}$ (图中 E 点),此时理论转换效率最高为 44.35%。本着材料成本及实际生产条件考量,较感兴趣的是顶、中电

池厚度组合 $t_1=1.35 \mu\text{m}$, $t_2=2.83 \mu\text{m}$ (图中 F 点),此时理论转换效率为 44.1%。

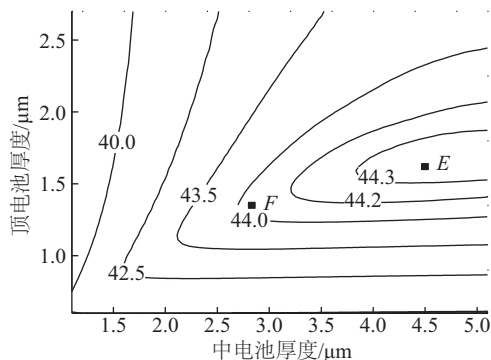


图 6 顶电池和中电池厚度组合所对应理论转换效率等高图

Fig. 6 Contour plot of theoretical η as function of upper two subcells thickness

下面将基于 GaInP/GaAs/Ga_{0.3}In_{0.7}As 倒装结构三结太阳能电池 E、F 点所对应的顶、中电池厚度组合,来优化底电池的厚度。由图 7 可知, E、F 组合下,此电池体系理论转换效率最高时对应的 $J_{sc,3}$ 分别为 14.70 和 15.01 mA/cm^2 ,明显高于 $J_{sc,1}$ 、 $J_{sc,2}$,而根据电池电流取最小原则,底电池短路电流密度的变化对电池输出电流影响不大,从而也验证了以上进行顶、中电池厚度优化时,假设顶电池厚度为无穷厚的正确性。结合表 2,当底电池厚度分别增加到 3.79 μm (图中 I 点)、3.19 μm (图中 II 点)后,电池最大转换效率开始缓慢的下降并最终趋于饱和, $J_{sc,3}$ 表现出同样的变化趋势。这种现象归因于 p-n

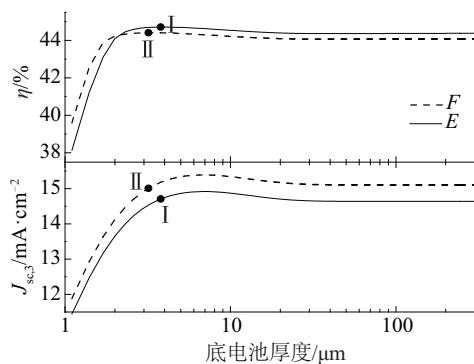


图 7 GaInP/GaAs/Ga_{0.3}In_{0.7}As 倒装结构三结太阳能电池在 E 点、F 点组合下底电池短路电流密度、器件光电转换效率和底电池厚度 (t_3) 之间的关系

Fig. 7 The J_{sc} of bottom cell and theoretical η as function of bottom thickness t_3 for combination E and F of GaInP/GaAs/Ga_{0.3}In_{0.7}As 3J IMM cell

结内部少子的复合,当电池厚度一再增加时,光子虽然可更充分地被吸收形成电子空穴对,但由于它距空间电荷区更远,使得更多的电子空穴对在未扩散到电荷耗尽区就复合了,不仅未形成有效的光生电流,反而使得此时的量子效率出现下降,如图 7 所示。由于计算模型考虑的是实际情况下的量子效率,这与过去大多数做电池模拟优化时假定量子效率为 100%^[17,19]有所不同,这也是本文对过去计算模型的改进。结合图 4,正是由于这种有效电子空穴对的下降,使得 E、F 组合对应的最大光电转换效率较各子电池厚度为无穷厚时提高了 2% 以上,因此合理的电池厚度对于高效的太阳电池设计至关重要。

表 2 GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 倒装结构太阳电池在 I、II 组合下各子电池的电流密度和光电转换效率

Table 2 The individual junction's J_{sc} and theoretical η for combination I and II of GaInP/GaAs/Ga _{0.7} In _{0.3} As 3J IMM cell					
组合	参数	顶	中	底	效率/%
I	厚度/ μm	1.62	4.50	3.79	44.7
	电流密度/ $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	13.80	13.90	14.70	
	厚度/ μm	1.35	2.83	3.19	44.3
II	电流密度/ $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	13.62	13.68	15.01	

图 8 是基于本文建立的计算模型,在上文得到的 II 点对应的各子电池厚度组合下,该倒装结构电池体系的外量子效率(EQE),为了进行对比,传统 Ge 基太阳电池的外量子效率也一并示出。由图 8 可知,倒装结构三结太阳电池的顶电池 GaInP 和中电池的顶电池的顶电池 GaInP 和中电池 GaAs 的吸收限均较传统 Ge 基电池短 7~12 nm。这是由于传统 Ge 基电池中的顶电池 Ga_{0.5}In_{0.5}P 和中电池 Ga_{0.99}In_{0.01}As 为保证与 Ge 衬底的晶格匹配,较倒装结构增加了 In 的组分,禁带宽度降低,吸收限升高,电流密度增加。结合表 3 给出的各子电池的短路电流密度,Ge 基太阳电池的底电池 Ge 覆盖了较宽的光谱,电流密度接近其他两结电池 2 倍,造成大量光生电流的浪费,而此时倒装结构三结太阳电池电流密度分别为 13.62、13.68、15.01 mA/cm²,电流匹配度较高,虽然短路电流密度较 Ge 基太阳电池下

降了 3%,但开路电压上升了 14%,因而光电转换效率较传统 Ge 基三结太阳电池提高了 4%,这也是倒装结构太阳电池的优势所在。

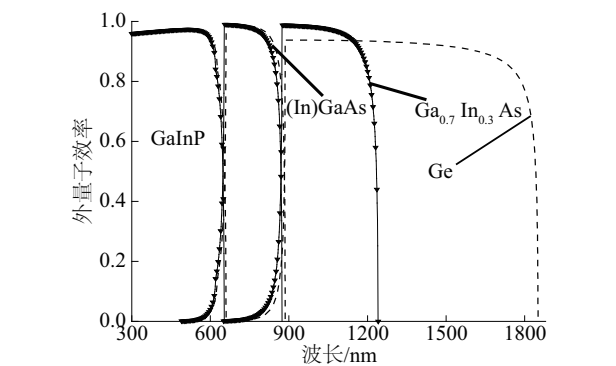


图 8 GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 倒装结构太阳电池的量子效率曲线

Fig. 8 Quantum efficiency of GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 3J IMM cell

表 3 GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 倒装结构太阳电池的短路电流密度

Table 3 Short-circuit current density of GaInP/GaAs/Ga _{0.7} In _{0.3} As 3J IMM cell			
电学性能参数		GaInP/GaAs/Ga _{0.7} In _{0.3} As	Ga _{0.5} In _{0.5} P/Ga _{0.99} In _{0.01} As/Ge
$J_{sc}/\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$J_{sc,1}$	13.62	14.05
	$J_{sc,2}$	13.68	14.12
	$J_{sc,3}$	15.01	25.37
V_{oc}/V		3.58	3.14
$\eta/\%$		44.4	40.3

3 试验验证

GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 倒装三结太阳电池材料采用低压金属有机物化学气相沉积(LP-MOCVD)设备生长。生长中采用三甲基镓(TMGa)、三甲基铟(TMIn)等金属有机化合物作为 III 族源,砷烷(AsH₃)、磷烷(PH₃)作为 V 族源,10.16 cm n 型 GaAs 作为衬底,生长 GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 外延层。然后将生长完外延层的外延片键合在 Si 衬底上,将原有的 GaAs 衬底剥离,然后按照传统的正装 Ge 基 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池工艺蒸镀金属电极、减反膜、划片,制备了面积为 5.5 mm×5.5 mm 太阳电池芯片。

图 9 为标准光照下 (AM1.5) GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 倒装三结太阳电池所测得的 J - V 曲线,由图可知,所制备的倒装结构三结太阳电池的开路电压为 2.93 V,短路电流密度为 13.06 mA/cm²,光电转换效率为 33.02%,较目前国际上报道 GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 倒装三结太阳电池的最高效率 37.90% (AM1.5)^[20]还有一定差距,外延层生长技术还有待提高。而目前国际上一些主要厂商生产的 GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池的开路电压和短路电流密度分别为 2.62 V 和 14.37 mA/cm²,转换效率为 32% (AM1.5)^[21],由此可见倒装三结太阳电池短路电流密度较 Ge 基三结太阳电池变化不大,但开路电压提高了 0.3 V,较传统的 Ge 基三结太阳电池开路电压上升了近 12%,转换效率提高了 1 个百分点。GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 倒装三结太阳电池开路电压的优势与图 8 分析的结果完全吻合,从而也验证了本文所建立模型的正确性。

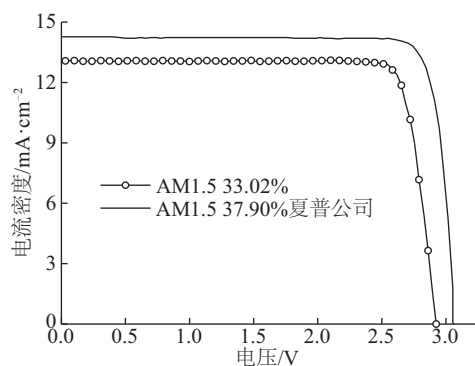


图9 GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 倒装结构太阳电池的
电流密度-电压(J - V)曲线

Fig. 9 J - V curve of GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 3J IMM cell

4 结 论

本文在进行电池模拟计算时,尽可能结合实际量子效率与电池内部参数的关系,以求获得最精确的电池最优参数组合。通过计算得到底电池带隙在 1.0 eV 时 GaInP/GaAs/GaInAs 倒装结构三结太阳电池的光电转换效率最高。除带隙外,厚度作为影响电池光电转换效率的又一重要因素。本文在假设底电池厚度为无穷厚的前提下,首先对 GaInP/GaAs/Ga_{0.3}In_{0.7}As (1.0 eV) 倒装结构三结太阳电池的顶、中电池厚度进行优化,得到 E 、 F 组合,然后分别

针对 E 、 F 组合进行底电池厚度优化,分别得到 I、II 两点对应的最佳电池厚度组合,综合材料成本及实际生产技术等因素,II 点对应的电池厚度组合更优,此时的理论转换效率为 44.4%,只比 I 低 0.3%。最后基于本文建立的计算模型,制备了面积为 5.5 mm×5.5 mm 太阳电池芯片。通过测得的 J - V 曲线可知, GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 倒装三结太阳电池的开路电压和短路电流密度分别为 2.93 V 和 13.06 mA/cm²,较传统 Ge 基太阳电池的短路电流密度变化不,但开路电压提升了近 12%,光电转换效率提高了 1%,随着外延层生长技术的提高, GaInP/GaAs/Ga_{0.7}In_{0.3}As 倒装三结太阳电池的优势将更明显。

[参考文献]

- [1] King R R, Law D C, Edmondson K M, et al. 40% efficient metamorphic GaInP/InGaAs/Ge multijunction solar cells[J]. Applied Physics Letter, 2007, 90(18): 3516—3518.
- [2] King R R, Boca A, Hong W, et al. Band-gap-engineered architectures for high-efficiency multijunction concentrator solar cells [A]. Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition [C], Hamburg, Germany, 2009.
- [3] Guter W, Schone J, Philipps S P, et al. Current matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(22): 3504—3506.
- [4] France R M, Geisz J F, Garcia I, et al. Quadruple-junction inverted metamorphic concentrator devices [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2015, 5(1): 432—437.
- [5] Green M A, Emery K, Hishikawa Yoshihir, et al. Solar cell efficiency tables (Version 46) [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2015, 23(7): 805—812.
- [6] Green M A, Emery K, Hishikawa Yoshihir, et al. Solar cell efficiency tables (Version 45) [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2015, 23(1): 1—9.
- [7] Dimroth F, Grave M, Beutel P, et al. Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs/InGaAsP/InGaAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency [J].

- Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2014, 22(3): 277—282.
- [8] Sasaki Kazuaki, Agui Takaaki, Nakaido Katsuya, et al. Development of InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple junction concentrator solar cells[A]. Proceedings of 9th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems[C], Miyazaki, Japan, 2013.
- [9] Stan M, Aiken D, Cho B, et al. Very high efficiency triple junction solar cells grown by MOVPE[J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310(23): 5204—5208.
- [10] Kurtz S R, Myers D, Olson J M. Projected performance of three- and four- junction devices using GaAs and GaInP [A]. Proceeding of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference[C], Anaheim, California, USA, 1997.
- [11] Takamoto Tatsuya, Agui Takaaki, Yoshida Atsushi, et al. World's highest efficiency triple-junction solar cells fabricated by inverted layers transfer process [A]. Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference[C], Honolulu, Hawaii, USA, 2010.
- [12] National Renewable Energy Lab. Reference solar spectral irradiance: Air mass 1.5[EB/OL]. <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5>, 2016-02-02.
- [13] Abram F I. New semiconductor materials. characteristics and properties [EB/OL] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html>, 2016-02-20.
- [14] Luque A, Hegedus S. Handbook of photovoltaic science and engineering[M]. New York: Wiley, 2011, 323—326.
- [15] Ghannam M Y, Poortmans J, Nijs J F, et al. Theoretical study of the impact of bulk and interface recombination on the performance of GaInP/GaAs/Ge triple junction tandem solar cells[A]. Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion[C], Osaka, Japan, 2003.
- [16] Yamaguchi Masafumi, Amano Chikara. Efficiency calculation of thin-film GaAs solar cells on Si substrates [J]. Journal of Applied Physics, 1985, 58(9): 3601—3606.
- [17] Kurtz S R, Faine P, Olson J M. Modeling of two-junction, series-connected tandem solar cells using top-cell thickness as an adjustable parameter[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(4): 1890—1895.
- [18] 张银桥, 蔡建九, 张双翔, 等. 不同缓冲层对 GaAs 基 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 材料特性的影响[J]. 固体电子学研究进展, 2010, 30(3): 470—472.
- [18] Zhang Yinqiao, Cai Jianjiu, Zhang Shuangxiang, et al. Effect of different buffer layer on the characteristics of the $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ layer grown on GaAs substrate[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2010, 30(3), 470—472.
- [19] Létay G, Bett A W. EtaOpt—A program for calculating limiting efficiency and optimum bandgap structure for multi-bandgap solar cells and TPV cells [A]. Proceedings of the 17th European PV Solar Energy Conference[C], Munich, Germany, 2001.
- [20] Green M A, Emery K, Hishikawa Yoshihir, et al. Solar cell efficiency tables (Version 42)[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2013, 21: 827—837.
- [21] Green M A, Emery K, Hishikawa Yoshihir, et al. Solar cell efficiency tables (Version 38)[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2011, 19: 565—572.

DESIGN AND OPTIMIZATION OF INVERTED METAMORPHIC GaInP/GaAs/InGaAs TRIPLE JUNCTION SOLAR CELL

Ma Dayan¹, Chen Nuofu¹, Fu Rui¹, Liu Hu^{1,2}, Bai Yiming¹, Chen Jikun³

(1. School of Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Department of Mathematics and Physics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050041, China;

3. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the p-n junction formation mechanism and meticulous equilibrium condition, the gap of inverted metamorphic GaInP (1.90 eV)/GaAs/InGaAs battery system and the thickness of each sub-cell were simulated and optimized by using Matlab language. The results showed that the bottom cell band gap of 1.0 eV has the highest conversion efficiency. By optimizing the junction thickness of GaInP (1.90 eV)/GaAs (1.42 eV)/InGaAs (1.0 eV) inverted metamorphic triple junction solar cell and considering the material cost and production technology, the optimal thickness combination is 1.35, 2.83 and 3.19 μm , the photoelectric conversion efficiency is 44.4%, only 0.3% lower than the maximum conversion efficiency.

Keywords: solar cell; detailed balance method; p-n junction; inverted metamorphic structure