

不同背场的 GaAs 基单结太阳能电池伏安特性及分析

谢波实¹, 代 盼², 罗向东^{1,2}, 陆书龙²

¹南通大学江苏省专用集成电路设计重点实验室, 江苏 南通 226019;

²中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123

摘要 介绍了 GaAs 基太阳能电池的原理、等效电路及性能参数, 基于集成电路工艺与器件计算机辅助工艺设计 (TCAD) 仿真工具, 设计了背场分别为 InAlGaP 和 InAlP 的两种 GaAs 基太阳能电池, 并对其结构和性能进行仿真。同时, 通过分子束外延 (MBE) 设备制备了这两种太阳能电池, 并测试了其伏安 (IV) 特性。在考虑并联电阻和串联电阻对太阳能电池伏安特性的实际影响后, 仿真结果与实验结果基本一致。重掺杂 (原子浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 的 InAlGaP 作为 GaAs 太阳能电池背场时, 伏安特性曲线是典型的太阳能电池的伏安特性。重掺杂 (原子浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 的 InAlP 作为 GaAs 太阳能电池背场时, 伏安特性曲线呈现“S”形变化。分析结果表明, 背场与基层形成漂移场, 加速了光生少子在电池中的输运, 提高了光生电流, 同时, 背场将光生少子反射回有源区, 降低了背表面的复合概率。当 InAlP 作为背场时, 由于异质结的存在, 影响了载流子的运输, 在较小的偏压下, 载流子主要通过隧道效应越过势垒, 在较大的偏压下, 载流子主要通过热电子发射越过势垒, 因此伏安特性曲线呈现“S”形变化。

关键词 光学器件; 太阳能电池; 砷化镓; 背场

中图分类号 TN914.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0223002

IV Characteristics and Analysis for GaAs Based Single Junction Solar Cells with Different Back Surface Fields

Xie Boshi¹, Dai Pan², Luo Xiangdong^{1,2}, Lu Shulong¹

¹Jiangsu Key Laboratory of ASIC Design, Nantong University, Nantong, Jiangshu 226091, China;

²Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangshu 215123, China

Abstract The principle, equivalent circuit and performance parameters of GaAs based solar cells are introduced. Based on technology computer aided design (TCAD) tools, two different types of GaAs based solar cells with back surface fields of InAlGaP and InAlP are presented, and their structures and performances are simulated. Meanwhile, the two solar cells are manufactured by molecular beam extension (MBE) device and their IV characteristics are tested. After considering the practical effect of the shunt resistance and series resistance on the IV characteristics of solar cells, the simulation results and the experimental results are basically consistent. When InAlGaP with doping concentration of $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ is used as back surface field in GaAs solar cells, the IV curve is the typical IV characteristic of a solar cell. When InAlP with doping atomic concentration of $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ is used as back surface field, the IV curve turns into S-shaped. The analysis results show that the drift field, which is formed by back surface field and base layer, can accelerate the transport of photo generated minority carriers in the cell and increase the photo-generated current. Meanwhile, the minority carriers are reflected back to active region because of back surface field, thus reducing the composite of carriers. Due to the existence of hetero junction, the transport processes of the majority carriers with InAlGaP back surface field are affected. The majority carriers can be transported via tunnel with minor voltage. When forward voltage increases, carriers can mainly surmount the barrier through thermal

收稿日期: 2016-09-18; **收到修改稿日期:** 2016-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(61474067, 61176128, 61376091, 61534008)、交通运输部科技计划(2013319813100)

作者简介: 谢波实(1991—), 男, 硕士研究生, 助教, 主要从事 GaAs 太阳能电池和 CCD 驱动电路方面的研究。

E-mail: 14110040@yjs.ntu.edu.cn

导师简介: 罗向东(1974—), 男, 博士, 教授, 主要从事半导体器件和 GaAs 太阳能电池方面的研究。

E-mail: luoxd@ntu.edu.cn

excitation and the S-shaped IV curve appears.

Key words optical devices; solar cell; GaAs; back surface field

OCIS codes 230.0250; 140.6810; 160.6000

1 引 言

III-V 族半导体材料是一类重要的太阳能电池材料, GaAs 是 III-V 族半导体材料的典型代表, 室温下, 其禁带宽度是 1.43 eV(实验表明, 当禁带宽度在 1.2~1.6 eV 之间时, 转化效率最高), 与太阳光谱匹配, 是理想的太阳电池材料^[1-3]。与硅太阳能电池相比, GaAs 太阳能电池有抗辐射、耐高温、效率高等优点, 被视为 21 世纪卫星航天器的新一代主电源^[4-5]。

在太阳能电池的研制中, 若在背表面处引入一个高低结(亦称背场), 在整个电池的几何结构设计能充分发挥光伏作用且满足太阳能电池的工作原理时, 背场能提高电池的开路电压, 降低电池的反向饱和暗电流和背表面复合速度以及制作良好的背面欧姆接触^[6-7]。因此, 如今的半导体太阳能电池研制和生产中大都引入背场结构。本文借助集成电路工艺与器件计算机辅助设计工具(TCAD)分别设计了以 InAlGaP 和 InAlP 为背场的 GaAs 基单结太阳能电池, 仿真并分析其性能参数, 并将仿真结果与实验结果相比较, 分析了太阳能电池的伏安(IV)特性产生的原理。

2 太阳能电池的工作原理以及性能参数

2.1 工作原理

太阳能电池是利用光伏效应来发电的。对于给定的半导体材料, 其禁带宽度是一个固定值 E_g , 当入射光子能量大于 E_g 时, 可将价带中的电子激发到导带形成电子空穴对^[8], 在结电场的作用下, 电子被推向 N 区, 空穴被推向 P 区, 其结果是电子积累在 N 区, 空穴积累在 P 区, 使 PN 结两端电位发生变化, 由光照而产生电动势, 这一现象称为光伏效应。光伏效应涉及三个主要物理过程: 1) 半导体材料吸收光能产生非平衡的电子空穴对; 2) 非平衡电子和空穴从产生处向势场区运动, 这种运动可以是扩散运动, 也可以是漂移运动; 3) 非平衡的电子和空穴在势场作用下向相反的方向运动而分离^[9-10]。

2.2 性能参数

太阳能电池在实际应用中起着电源的作用, 理想情况下, 它的等效电路如图 1 所示。

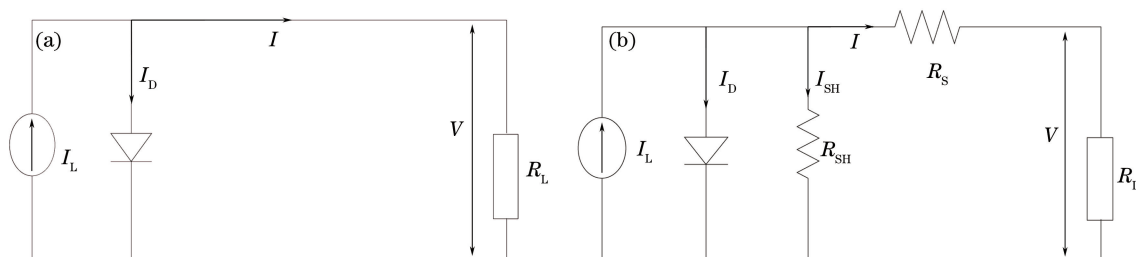


图 1 太阳能电池的等效电路图。(a) 理想情况的太阳能电池等效电路图; (b) 实际情况的太阳能电池等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of solar cell. (a) Equivalent circuit of solar cell under ideal conditions;

(b) equivalent circuit of solar cell under actual conditions

图 1(a)中电流源为短路光电流 I_L , 有:

$$I = I_L - I_D = I_L + I_0 [1 - \exp(V/V_T)], \quad (1)$$

式中 V_T 为半导体的热电势, I_D 是 PN 结正向电流, I_0 为 PN 结反向饱和电流, I 是通过负载的电流。光电流和暗电流方向是相反的。根据(1)式, 在开路情况下, $I=0$, 得到开路电压 V_{oc} 为

$$V_{oc} = V_T \ln\left(1 + \frac{I_L}{I_0}\right). \quad (2)$$

实际上, 半导体材料存在着并联电阻 R_{sh} 和串联电阻 R_s , 在这种情况下, 通过负载的电流 I 变为

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right] - 1 \right\} - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}}, \quad (3)$$

式中 I_L 为不考虑太阳能电池内阻的输出电流, I_0 为二极管的反向饱和电流, q 为电子电荷, n 为二极管指数, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度。 R_s 与 R_{sh} 主要影响电池的填充因子和电池效率。 太阳电池的效率指的是太阳电池的功率转化效率, 它是太阳电池的最大输出功率与输入光功率的百分比, 即:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中 P_{in} 为输入光功率, P_m 为太阳电池的最大输出功率:

$$P_m = V_{mp} I_{mp}, \quad (5)$$

式中 V_{mp} 和 I_{mp} 分别为太阳电池输出最大功率时所对应的电压和电流。

填充因子也是衡量太阳能电池的重要技术指标之一, 其公式为

$$F_F = \frac{I_{mp} V_{mp}}{I_{sc} V_{oc}}, \quad (6)$$

式中 I_{sc} 为短路电流, 分母是极限输出功率, 分子是最大的输出功率, 填充因子越大越好。 这表明最大输出功率和极限功率越接近。 影响填充因子参数的因素有并联电阻、光照强度和串联电阻等。

3 GaAs 基太阳能电池的性能仿真与分析

3.1 结构设计

根据太阳能电池的一般结构, 设计的新型 GaAs 太阳能电池结构如图 2 所示。

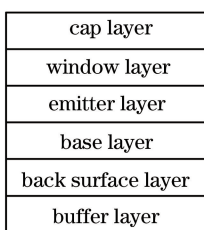


图 2 单结 GaAs 太阳能电池结构

Fig. 2 Structure of single junction GaAs solar cell

有源区由发射层和基层构成, 是太阳能电池的核心区域, 当光子能量大于该电池材料的禁带宽度时, 半导体材料吸收光子的能量, 产生一个电子空穴对, 在内电场的作用下, 光生载流子将进行漂移运动, 进而产生与内电场方向相同的光生电流和与内电场方向相反的光生电势, 所以在载流子复合之前, 应该努力降低少数载流子的复合, 提高光电流^[11]。

窗口层的主要作用是减少太阳电池的表面复合。 因为窗口层有很宽的带隙, 所以在理想的情况下, 窗口层对于短波长范围的光子来说基本是透明的, 不会产生严重的吸收。 另外窗口层与 GaAs 发射层材料之间由于禁带宽度的差异所形成的扩散势垒能够抑制少子的扩散, 将扩散到界面的光生少子反射回去^[12], 降低了少子复合的概率。

背场与基层形成漂移场, 加速了光生少子在电池中的输运, 提高了光生电流, 同时, 背场将光生少子反射回有源区, 降低了背表面的复合概率。 背场一般采用重掺杂并且要求禁带宽度大于基区材料的禁带宽度, 重掺杂目的是与基区一起形成漂移场以加速光生少子在电池中的运输, 提高光生电流。

本研究所设计的两种 GaAs 单结太阳能电池结构参数如表 1 所示, 背场分别为 $In_{0.484} Al_{10.516} P$ 和 $In_{0.483} (Al_{10.2Ga})_{0.517} P$ 。

表 1 单结 GaAs 太阳能电池参数

Table 1 Parameters of single junction GaAs solar cell

Structure	Thickness /nm	Atomic doping concentration / cm^{-3}
GaAs (cap layer)	1	4×10^{18}
InAlP (window layer)	20	3×10^{17}
N-InGaP (emitter layer)	80	8×10^{17}

Structure	Thickness /nm	Atomic doping concentration /cm ⁻³
P-InGaP (emitter layer)	650	5 × 10 ¹⁶
P-InGaP (emitter layer)	55	2 × 10 ¹⁸
InAlP or InAlGaP (back surface layer)	30(30)	2 × 10 ¹⁸ (2 × 10 ¹⁸)
GaAs (buffer layer)	30	2 × 10 ¹⁸

在 TCAD 仿真工具中,设计者可以定义入射光源的波长、强度、入射位置和角度等参数,设置光照强度为 1000 W/cm²,需要用到仿真模型有:1) bgn,能带变窄模型;2) srh,间接复合模型;3) auger,俄歇复合模型;4) conmob,迁移率受杂质浓度影响模型。数值方法用耦合算法(Newton)。

3.2 伏安特性仿真

分别对 150 K 和 300 K 下的两种背场的太阳能电池进行伏安特性仿真。表 2 和表 3 为需要设置的材料的禁带宽度 E_g 和功函数 W 。

表 2 150 K 时的材料参数

Table 2 Material parameters at 150 K

Material	Band gap /eV	Work function /eV
GaAs	1.49	4.07
InGaP	1.92	4.08
InAlGaP	2.04	3.85
InAlP	2.30	3.93

表 3 300 K 时的材料参数

Table 3 Material parameters at 300 K

Material	Band gap /eV	Work function /eV
GaAs	1.42	4.07
InGaP	1.80	4.08
InAlGaP	2.08	3.60
InAlP	2.34	3.76

伏安特性曲线是太阳能电池的基本特性,它表征电流输出端电流和电压的关系。根据所设计的太阳能电池结构,在确定的光照条件下,得到不同温度下 GaAs 太阳能电池的伏安特性曲线。并且通过分子束外延(MBE)设备制备了这两种太阳能电池,将仿真数据和实验数据进行比较,得到结果如图 3 所示。

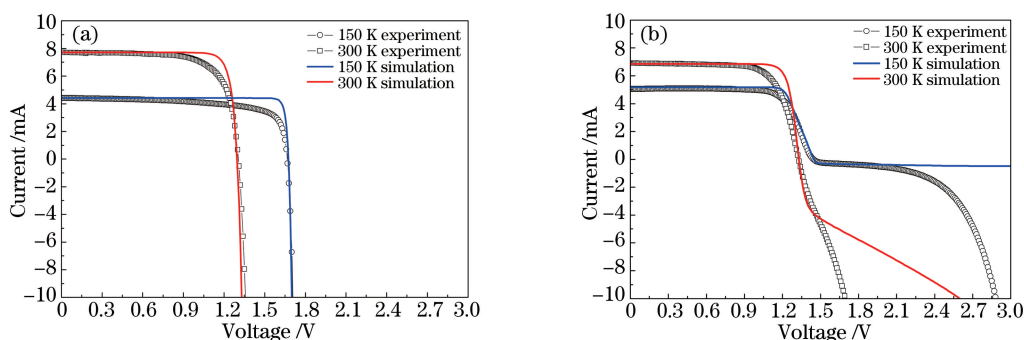


图 3 两种背场的太阳能电池伏安特性曲线。(a) 背场为 InAlGaP; (b) 背场为 InAlP

Fig. 3 IV characteristic curves of two back surface fields solar cells. (a) Back surface field is InAlGaP; (b) back surface field is InAlP

3.3 结果分析与讨论

从图 3 可看到,处于工作状态的太阳能电池,其效率有衰退的现象,这是因为光照引起电池温度升高的缘故。温度系数是描述电池性能的一个重要参数。饱和电流是温度的函数,影响饱和电流的参数有本征载流子浓度 n_i 、扩散系数 D 、表面复合速度 S 以及复合寿命 τ 等^[13]。扩散电流分量与 n_i^2 成正比,因此分析太阳能电池伏安温度特性主要是讨论 n_i 与温度的关系。本征载流子浓度公式为

$$n_i = 2 (m_n m_p)^{3/4} \left(\frac{2\pi k_B T}{h} \right)^{2/3} \exp(-E_g/2kT) \quad (7)$$

除了本征载流子浓度和温度有直接关系外,空穴和电子的有效质量也和温度有关,它们是通过能带的 $E(k)$ 与温度发生关联的,是间接的较弱的依赖关系。另外,带隙宽度也是和温度有关的函数,带隙宽度与温度的关系式为^[14]

$$E_g = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (8)$$

式中 α, β 是因材料而异的常数, $E_g(0)$ 是绝对零度时半导体材料的带隙。(8)式表明随着温度上升带隙会不断减小。虽然带隙宽度减小可以扩宽电池的光吸收范围,提高短路电流,但带隙减小的直接原因是 n_i 增加。由于 n_i 与 T 的关系是指数关系,因此温度上升的直接结果是 n_i 迅速增加,总的结果是 V_{oc} 下降。

开路电压对温度的依赖关系可以近似地表示为^[15]

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = - \frac{\frac{1}{q} E_g(0) - V_{oc} + \xi \frac{kT}{q}}{T} \quad (9)$$

开路电压随着温度上升而下降,短路电流随着温度的上升稍有提高,电池效率降低。从图 3 的仿真结果可以看出,实际测得的电池效率与仿真结果相比略低。这是因为为了得到电池材料与结构对其性能影响比较清晰的物理图像,仿真时没有考虑电池的寄生电阻:并联电阻 R_{sh} 和串联电阻 R_s 。实际上,不为零的 R_s 与有限的 R_{sh} 对电池的影响是不可忽略的。串联电阻 R_s 主要来源于电池本身的体电阻、接触电阻、金属本身的电阻及背电极的接触电阻等,并联电阻 R_{sh} 主要来源于电池 PN 结的漏电流,包括 PN 结边缘的漏电流和内部的漏电流。从(3)式可以看出,光生电压被串联电阻消耗了 IR_s , 使输出的电压值下降。 R_{sh} 的表现为使电池的整体特性变差。电流为零时,电路呈开路状态,串联电阻 R_s 对开路电压没有影响;电流不为零时,输出终端间会有一压降 IR_s , 所以串联电阻对填充因子的影响很大, R_s 越大短路电流的降低越明显。当电压为零时,电路呈短路状态,并联电阻 R_{sh} 不影响短路电流;当电压不为零时,与 PN 结并联的电阻 R_{sh} 将分流一部分电流,呈现输出电流减小 V/R_{sh} 的伏安特性。考虑了 R_s 和 R_{sh} 的值后再次进行拟合,结果如图 4 所示。

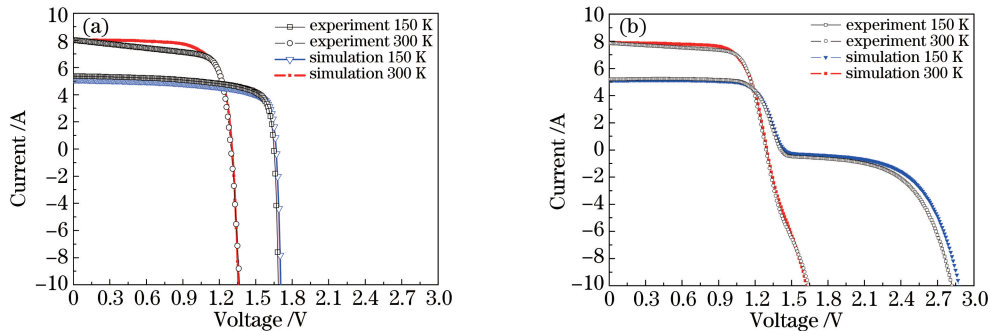


图 4 考虑了 R_s 和 R_{sh} 后的拟合结果。(a) 背场为 InAlGaP; (b) 背场为 InAlP

Fig. 4 Fitting results in consideration of R_s and R_{sh} . (a) Back surface field is InAlGaP; (b) back surface field is InAlP

通过仿真结果分析发现,当 R_s 为 $1.6 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$, R_{sh} 为 $5.5 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$ 时,背场为 InAlGaP 的 GaAs 太阳能电池仿真结果与实际测量结果能够很好地吻合[图 4(a)];而当 R_s 为 $1.6 \times 10^4 \Omega/\text{cm}^2$, R_{sh} 为 $7 \times 10^6 \Omega/\text{cm}^2$ 时,背场为 InAlP 的 GaAs 太阳能电池的仿真结果也与实验测试结果接近,在电压为 1.3~1.5 V 附近异常弯曲的现象也能够被很好地拟合[图 4(b)]。

特别需要提到的是,在图 3(b)和图 4(b)中,背场为 InAlP 的 GaAs 太阳能电池的伏安曲线在 1.3~1.5 V 附近存在异常弯曲现象。在 300 K 时,当外加正向电压在 1.3 V 附近时,伏安曲线存在异常弯曲,呈现“S”形弯曲。而在 150 K 时,该“S”形弯曲现象在正向电压为 1.45 V 附近出现。这一异常弯曲现象在背场为 InAlGaP 的 GaAs 太阳能电池中并不存在,如图 3(a)和图 4(a)所示。因此,这一异常弯曲现象主要是由背场变化引起的。

从图 5 的能带图中可以看出,当引入 InAlP 作为背场时,背场与缓冲层形成异质结,构成了一个较大的

三角形高尖峰势垒。如果势垒厚度有限,载流子无需具有高出整个尖峰顶的能量,能够以隧穿方式越过势垒。目前的实际生产中,在半导体上制造欧姆接触主要就是利用隧道效应的原理。但是隧道效应几乎与温度无关,因此,隧道效应并不能完全解释温度对背场为 InAlP 的 GaAs 电池的伏安特性曲线的影响。另外一个影响载流子运动的是热电子发射。此时,势垒的形状不重要,重要的是势垒的高度,只要载流子有足够高的能量就可以越过势垒。

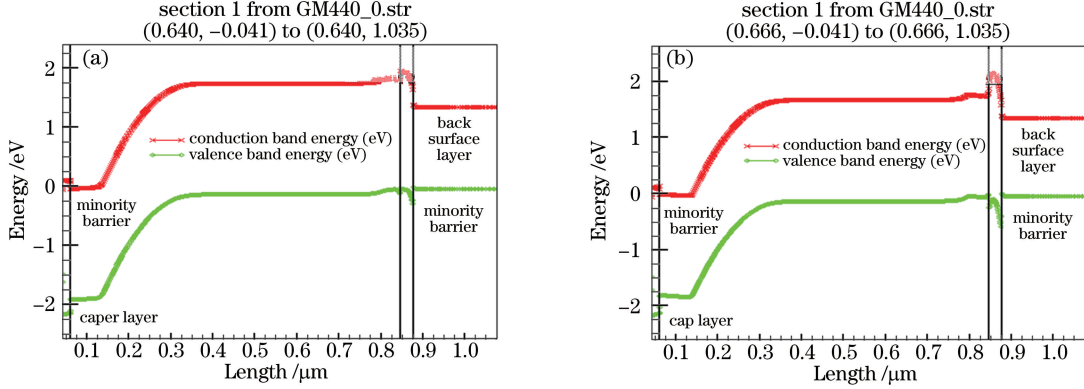


图 5 GaAs 太阳能电池的能带结构。(a) 背场为 InAlGaP; (b) 背场为 InAlP

Fig. 5 Band structure of GaAs solar cells. (a) Back surface field is InAlGaP; (b) back surface field is InAlP

肖特基发射和 Frenkel-Poole 发射都属于热电子发射,两者的电流对电压的依赖关系比较相近,肖特基发射的电流密度公式为

$$J = AT^2 \exp\left(\frac{\alpha \sqrt{V}}{T} - \frac{q\phi_b}{kT}\right), \quad (10)$$

式中 $\alpha = \sqrt{q/4\pi\epsilon d}$, ϵ 为介质的相对介电常数, A 为等效理查德松常数, q 为电子电荷, ϕ_b 为肖特基发射所要翻越的势垒高度, T 为绝对温度。

Frenkel-Poole 发射的电流密度公式为

$$J \propto V \exp\left(\frac{2\alpha \sqrt{V}}{T} - \frac{q\phi_t}{kT}\right), \quad (11)$$

式中 ϕ_t 为陷阱的深度,其他参数的意义和(10)式中的一样。在较强的正向电压下,电流主要来源于肖特基发射和 Frenkel-Poole 发射共同作用的结果。虽然两者都属于热激发,但成因各不相同。前者激发的是导带中的电子发射电流,随场强的增强和温度的升高而增大,对温度的依赖更为明显^[16-17];后者是受陷阱辅助激发,激发的是陷阱中的电荷,因此陷阱的密度与 Frenkel-Poole 发射电流有很大关系。发射电流的大小很大程度上取决于界面态密度中的缺陷数目。

从肖特基发射和 Frenkel-Poole 发射电流公式对比可知,前者对温度的依赖更明显一些,正向偏压较大时,太阳能电池的温度有所升高,因此可以认为在场强较强时,肖特基发射贡献的电流较大^[18]。由于界面态和缺陷的存在引起了电子(空穴)导电,电子(空穴)被缺陷能级俘获,而它们发生电离,使电子(空穴)激发到导带(价带)参与导电;在低场下,对于缺陷能级上的电子,由于缺陷能级距离导带(价带)较远,一般不参与导电,当外场很强时,由于导带在外场作用下大幅度倾斜,缺陷能级上的电子被激发到导带参与导电。这说明,在正向偏压较大时 Frenkel-Poole 发射的贡献也是不可忽略的。

简单地说,在小电压下,能越过势垒的电子很少,热电子发射电流很小,电流由隧道过程决定。当电压增加时,热电子发射电流迅速增加,超过了隧道电流,电流就由热发射决定。因为热电子发射现象和温度正向相关,所以在 300 K,电压达到 1.3 V 时,伏安特性曲线就开始发生偏移。图 6 为在不同温度下,背场为 InAlP 的 GaAs 太阳能电池暗场的伏安特性曲线。无光照时,暗场的伏安特性曲线并没有出现“S”形伏安特性,由此可以证明“S”形伏安特性与暗电流无关。

从图 5 可以得到,当重掺杂(原子浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)的 InAlP 作为 GaAs 太阳能电池的背场时,背场价带存在一个较大三角形势垒,而当重掺杂(原子浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)的 InAlGaP 作为背场时,这个势垒较

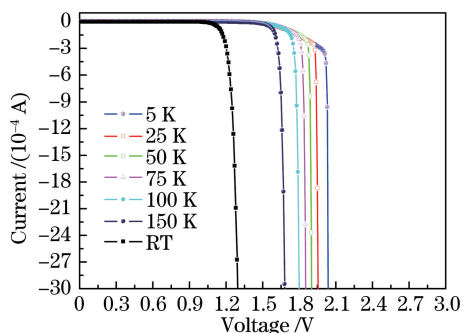


图 6 无光照下的背场为 InAlP 的 GaAs 太阳能电池伏安特性曲线

Fig. 6 IV characteristic curves of the GaAs solar cell whose back surface field is InAlP without illumination

小。因此当 InAlGaP 作为背场时伏安特性为典型的太阳能伏安曲线。

对于背场为 InAlP 的 GaAs 太阳电池的伏安曲线,可描述为 PN 结与肖特基结串联,“S”形伏安曲线为一个 PN 结与肖特基结串联叠加的结果,在肖特基结区内,电流通过异质结势垒的运输,与金属-半导体势垒相似^[19]。

由于肖特基势垒的存在,热电子发射总是存在的。在正向偏压较小时,载流子主要通过隧穿越过势垒,此时隧道电流占主导作用。当电压达到 V_{oc} 左右时,肖特基结开启,肖特基发射和 Frenkel-Poole 发射共同作用,载流子主要通过热电子发射穿越势垒,此时,热电子发射电流占主导地位,呈现出“S”形伏安特性。

4 结 论

基于单结 GaAs 太阳能电池结构,设计了两种具有不同背场(InAlGaP 和 InAlP)的单结太阳能电池结构,仿真并分析了其伏安特性,并将仿真结果与电池实验测试结果进行比较。结果表明,随着温度的增加,开路电压明显下降,短路电流稍有提高。以重掺杂的 InAlGaP 作为背场的 GaAs 太阳能电池结构为典型的太阳能电池伏安特性。以重掺杂的 InAlP 作为背场的 GaAs 太阳能电池结构的伏安特性曲线在正向电压 1.3~1.5 V 附近呈“S”形变化。这是因为异质结的存在,影响了载流子的运输,在较小的偏压下,载流子主要通过隧道效应越过势垒,在较大的偏压下,载流子主要通过热电子发射越过势垒。研究结果与分析可为改进电池设计与工艺提供参考。

参 考 文 献

- [1] Jiang Jianping, Sun Chengcheng. Hetero junction principles and devices[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 13-15.
江剑平, 孙成城. 异质结原理与器件[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 13-15.
- [2] Chen Mingbo, Cui Rongqiang, Wang Liangxing *et al.* p-n GaInP₂/GaAs tandem solar cells[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(11): 3632-3636.
陈鸣波, 崔容强, 王亮兴, 等. p-n 型 GaInP₂/GaAs 叠层太阳电池研究[J]. 物理学报, 2004, 53(11): 3632-3636.
- [3] Zhu Rongzhen, Wang Rui, Jiang Tian, *et al.* Research of laser irradiation effect on monocrystalline silicon solar cells and single junction GaAs solar cells[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(4): 479-485.
朱荣臻, 王睿, 江天, 等. 单晶 Si 和单结 GaAs 太阳能电池的激光损伤特性对比研究[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(4): 479-485.
- [4] Garg A, Kapoor A, Tripath K N. Laser-induced damaged studies in GaAs[J]. Optics & Laser technology, 2003, 35(1): 21-24.
- [5] Xue Qing, Wu Wenhui, Ye Yunxia, *et al.* Property degradation of GaAs/Ge solar cells after femtosecond laser irradiation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 041405.
薛青, 吴文慧, 叶云霞, 等. 飞秒激光辐照对 GaAs/Ge 太阳能电池的性能退化研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 041405.
- [6] Limcharoen A, Pakpum C, Limsuwan P. Apolymer-rich re-deposition technique for non-volatile etching by-products in reactive ion etching systems[J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(7): 75202.

- [7] Yan Xingmao, Wang Qingkang. Application of CdSe/ZnSe/ZnS quantum dots in monocrystalline silicon solar cells[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(10): 1358-1361.
- [8] Jiang Jianhui, Wu Kongping, Lu Kailin, *et al.* Effect of intermediate-band on the ZnO/ZnTe photovoltaic solar cell[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0916003.
蒋建慧, 吴孔平, 鲁开林, 等. 中间带对 ZnO/ZnTe 光伏太阳能电池性能的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0916003.
- [9] Yang Xudong, Chen Han, Bi Enbing, *et al.* Key issues in highly efficient perovskite solar cells[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(3): 038404.
杨旭东, 陈 汉, 毕恩兵. 高效率钙钛矿太阳能电池发展中的关键问题[J]. 物理学报, 2015, 64(3): 038404.
- [10] Meng Qingju, Liu Haibo. Semiconductor physics and devices[M]. Beijing: Science Press, 2009: 55.
孟庆巨, 刘海波. 半导体物理与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 55.
- [11] Xiong Yankai. Simulation study of III-V GaAs-based compound semiconductor solar cell [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010: 55-58.
熊衍凯. III-V 族 GaAs 基半导体太阳能电池的模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 55-58.
- [12] Xie Xide, Lu Dong. Band theory of solid[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2007: 55.
谢希德, 陆 栋. 固体能带[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2007: 55.
- [13] King R R, Law D C, Edmondson K M, *et al.* 40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(18): 183516.
- [14] Xu Y, Shi J, Lü S, *et al.* Simple way to engineer metal-semiconductor interface for enhanced performance of perovskite organic lead iodide solar cells[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(8): 5651-5656.
- [15] Zhai T, Ye M, Li L, *et al.* Single-crystalline Sb₂Se₃, nanowires for high-performance field emitters and photodetectors [J]. Advanced Materials, 2010, 22(40): 4530-4533.
- [16] He Wei, Lu Shulong, Yang Hui. Initial heteroepitaxial growth and characterization of GaAs on Ge(100) by all-solid-source molecular beam epitaxy[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(2): 206-209.
何 巍, 陆书龙, 杨 辉. 利用全固态分子束外延方法在 Ge(100)衬底上异质外延 GaAs 薄膜及相关特性表征[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(2): 206-209.
- [17] Shi Jiangjan, Wei Huiyun, Zhu Lifeng, *et al.* S-shaped current-voltage characteristics in perovskite solar cell[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(3): 038402.
石将建, 卫会云, 朱立峰, 等. 钙钛矿太阳能电池中 S 形伏安特性研究[J]. 物理学报, 2015, 64(3): 038402.
- [18] Zhang Hanmou, Ma Shuyi. Study on the current transport mechanisms of the structure Au/(C/SiO₂)/p-Si[J]. Journal of Northwest Normal University, 2006, 42(4): 44-46.
张汉谋, 马书懿. Au/(C/SiO₂)/p-Si 结构中的电流运输机理研究[J]. 西北师范大学学报, 2006, 42(4): 44-46.
- [19] Stranks S D, Eperon G E, Grancini G, *et al.* Electron-hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber[J]. Science, 2013, 342(6156): 341-344.