

# MOCVD GaAs 太阳电池的结特性

施小忠 夏冠群 汪乐 莫金玑

(中国科学院上海冶金研究所半导体材料和器件研究室 上海 200050)

**摘要** 本文用拟合的方法求得了太阳电池的结特性参数。结果表明 MOCVD 太阳电池的效率随电池外延 n 型层厚度的增大而增大, 暗电流随电池外延 n 型层厚度的增大而减小。MOCVD 电池承受反向电流的冲击的能力随电池外延 n 型层厚度的增大而增强。MOCVD 电池比 LPE 电池所能承受的反向电流密度大。

EEACC: 8420, 2560H; PACC: 8630J

## 1 引言

液相外延(LPE)和金属有机化合物气相淀积(MOCVD)方法是制作太阳电池材料的两种主要方法。国内使用LPE方法时间较长,MOCVD方法才刚起步,工艺不很完善,但目前制作的MOCVD电池的效率已很接近LPE电池的效率。增大MOCVD电池外延层的厚度可以提高电池的效率,同时还发现增大n型外延层的厚度能提高电池承受大电流的反向冲击的能力。为此,本文探讨了增大n型外延层的厚度对提高电池的效率所起的作用,同时说明了电池承受大电流的反向冲击的能力随n型层厚度的增大而增大的原因。

## 2 实验方法

### 2.1 样品制备

#### 2.1.1 材料

本实验所用的器件样品的材料均为  $n^+$ -GaAs(衬底)/n-GaAs(缓冲层)/n-GaAs(掺Si)/p-GaAs(掺Zn)/p-GaAs(掺Zn)。多层外延生长采用LPE和MOCVD两种方法。

衬底的浓度为  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , 晶向为(100), 厚度为  $400 \mu\text{m}$ 。缓冲层浓度为  $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。n-GaAs层浓度为  $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。p-GaAs层浓度为  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , 厚度为  $0.7 \mu\text{m}$ 。p-GaAs层浓度约为  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 。n-GaAs层(包括缓冲层)及GaAs的厚度见表1。其中样品MOCVD1和MOCVD2无缓冲层。

施小忠 男, 1968 年出生, 博士生, 从事 GaAs 太阳电池的研制和应用  
夏冠群 男, 1941 年出生, 研究员, 博士生导师, 从事 GaAs 器件和电路研究  
汪乐 男, 1939 年出生, 副研究员, 从事太阳电池的研制和应用工作  
1997-07-14 收到, 1997-12-08 定稿

### 2 1 2 器件

器件样品制作标准工艺: (1) 先在外延材料正面 p 型 Ga<sub>0.2</sub>Al<sub>0.8</sub>As 上蒸发淀积厚度约为 100nm 的 SiO<sub>2</sub> 减反射层, 然后在材料背面用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O 腐蚀液减去 5μm 衬底后蒸 AuGeNi/Au. (2) 正面光刻, 开出正面电极图形, 用干法刻蚀和选择性腐蚀方法分别将图形中的 SiO<sub>2</sub> 和 Ga<sub>0.2</sub>Al<sub>0.8</sub>As 去除, 带胶蒸 Cr/Au, 剥离形成正面电极. (3) 在 430 °C 下 30 秒快速合金化一次完成欧姆接触. (4) 使用选择电镀 Au 的方法加厚正面电极达 3.0μm. 电池的面积为 1.0cm × 1.0cm.

器件样品分两种, 一种为 1.0cm × 1.0cm 的太阳电池, 一种为 1.0mm × 1.0mm 的二极管.

### 2 2 测试

太阳电池的光照 I-V 特性由 AM 1 太阳模拟光源测得, 测试温度为 25 °C. 二极管的暗场正向 I-V 特性由 HP-4145B 半导体参数分析仪测得.

### 2 3 二极管的大电流反向冲击实验

测量样品冲击前的暗场正向 I-V 特性. 然后用半导体参数分析仪给四种样品加较小的瞬态反向偏压. 时间约为 0.1 秒. 测出流过样品的最大反向电流, 此电流定为对应的反向冲击电流. 接着测量冲击后二极管的暗场正向 I-V 特性. 逐步增大反偏电压, 测出相应的反向冲击电流, 测量每次冲击后二极管的正向 I-V 特性. 反偏电压一直增大到二极管出现击穿现象为止.

### 2 4 数据处理

pn 结二极管的暗场 I-V 特性有如下关系式:

$$J = J_{od} \left( e^{\frac{q(V - J R_s)}{A_1 k T}} - 1 \right) + J_{or} \left( e^{\frac{q(V - J R_s)}{A_2 k T}} - 1 \right) + \frac{V - J R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

其中  $J_{od}$  是中性区的饱和扩散电流密度;  $J_{or}$  是空间电荷区的饱和复合电流密度;  $V$  是外加电压;  $J$  是流过电池的电流密度;  $R_s$  是单位面积电池的串联电阻;  $R_{sh}$  是单位面积电池的旁路

电阻;  $k$  是玻尔兹曼常数;  $T$  是绝对温度;  $A_1$  和  $A_2$  分别为扩散电流和复合电流指数因子. 为了获得 pn 结的结特性参数, 本文采用了文献[1]中给出的改进的阻尼最小二乘法对实测的暗场 I-V 曲线进行拟合.  $A_1$  取 1.0. 整条拟合曲线的标准剩余误差用  $\sigma$  表示.

## 3 实验结果

### 3 1 太阳电池的光照特性

图 1 分别是 LPE 材料和 MOCVD 材料的太阳电池光照射下的 I-V 关系曲线. 这些曲线对应的拟合参数列于表 2 中. 其中  $V_{oc}$  表示电池的开路电压;  $I_{sc}$  表示电池的短路电流;  $V_m$  表示最大输出

表 1 n-GaAs 层(包括缓冲层)及 GaAlAs 层的厚度

样品编号	n-GaAs 层	p-Ga <sub>0.2</sub> Al <sub>0.8</sub> As 层
LPE	5.0μm	0.25μm
MOCVD1	0.8μm	0.25μm
MOCVD2	1.6μm	0.25μm
MOCVD3	5.5μm	70nm

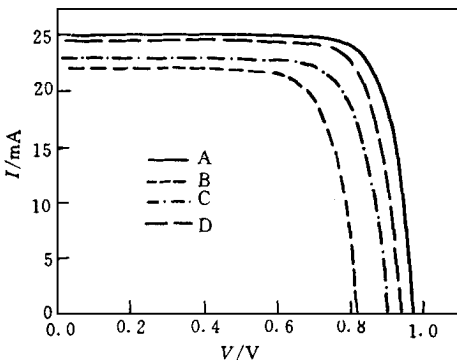


图 1 GaAs 太阳电池的光照 I-V 关系曲线  
A: LPE 材料; B: MOCVD1 材料;  
C: MOCVD2 材料; D: MOCVD3 材料

功率点相应的工作电压;  $I_m$  表示最大输出功率点相应的工作电流; FF 表示电池的填充因子;  $\eta$  表示电池的效率 可见, 随着外延 n 型层厚度的增大, MOCVD 电池的六个参数均增大 当 MOCVD 样品的 n 型外延层的厚度达  $5.5\mu\text{m}$  时, 电池的参数值与 LPE 电池的对应值很相近

表 2 太阳电池的光照特性参数

样品	$V_{oc}/V$	$I_{sc}/\text{mA}$	$V_m/V$	$I_m/\text{mA}$	FF/%	$\eta/\%$
LPE	0.97	25.0	0.82	23.53	79.6	19.3
MOCVD1	0.82	22.0	0.68	20.14	75.9	13.7
MOCVD2	0.90	23.0	0.74	21.54	77.0	15.9
MOCVD3	0.94	24.5	0.78	23.18	78.5	18.1

### 3.2 二极管的暗场 I-V 特性

#### 3.2.1 大电流反向冲击前的 I-V 特性

图 2 是 LPE 和 MOCVD 样品承受电流反向冲击前的正向暗场 I-V 特性, 这些 I-V 关系曲线对应的拟合结果列于表 3 中

表 3 四种样品大电流反向冲击前的 I-V 关系曲线的拟合结果

样品	$J_{od}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$J_{or}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$A_2$	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_{sh}/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$	$\sigma$
LPE	$1.14 \times 10^{-17}$	$2.69 \times 10^{-9}$	2.07	$4.81 \times 10^{-2}$	$4.91 \times 10^6$	$1.34 \times 10^{-1}$
MOCVD1	$1.00 \times 10^{-18}$	$1.34 \times 10^{-7}$	2.21	$3.31 \times 10^{-2}$	$5.33 \times 10^4$	$1.07 \times 10^{-1}$
MOCVD2	$4.05 \times 10^{-19}$	$2.14 \times 10^{-8}$	2.16	$6.55 \times 10^{-2}$	$3.09 \times 10^5$	$1.36 \times 10^{-1}$
MOCVD3	$3.95 \times 10^{-17}$	$1.60 \times 10^{-9}$	1.90	$7.49 \times 10^{-3}$	$1.11 \times 10^7$	$7.49 \times 10^{-2}$

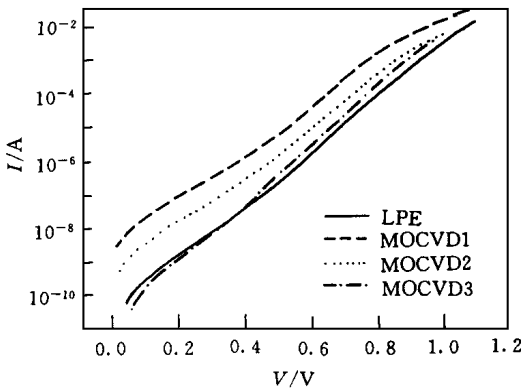


图 2 电流冲击前四种样品的暗场 I-V 关系曲线

拟合结果表明, MOCVD 样品的饱和复合电流密度随着外延 n 型层厚度的增加而减小 MOCVD1 的饱和复合电流密度是 MOCVD2 的 5 倍左右, 是 MOCVD3 的 100 倍左右; 其旁路电阻是 MOCVD2 的五分之一左右, 是 MOCVD3 的一百分之一左右 MOCVD3 的各拟合参数与 LPE 的相应的参数值相近

#### 3.2.2 大电流反向冲击后的 I-V 特性

图 3 是 LPE 和 MOCVD 样品承受大电流反向冲击后的正向暗场 I-V 特性, 这些 I-V 关系曲线对应的拟合结果列于表 4 中 LPE、MOCVD1、MOCVD2 和 MOCVD3 样品受到的最大瞬态反向冲击电流密度分别为  $1.0$ 、 $3.0$ 、 $4.0$  和  $40.0 \text{ A/cm}^2$  对应各自所能承

表 4 四种样品大电流反向冲击后的 I-V 关系曲线的拟合结果

样品	$J_{od}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$J_{or}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$A_2$	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_{sh}/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$	$\sigma$
LPE	$3.23 \times 10^{-19}$	$1.01 \times 10^{-8}$	2.05	$3.86 \times 10^{-2}$	$2.81 \times 10^6$	$1.34 \times 10^{-1}$
MOCVD1	$1.00 \times 10^{-18}$	$3.14 \times 10^{-6}$	2.87	$2.02 \times 10^{-2}$	$2.04 \times 10^3$	$6.47 \times 10^{-2}$
MOCVD2	$4.05 \times 10^{-19}$	$2.70 \times 10^{-8}$	2.16	$6.27 \times 10^{-2}$	$3.11 \times 10^5$	$1.37 \times 10^{-1}$
MOCVD3	$3.28 \times 10^{-16}$	$9.67 \times 10^{-9}$	2.25	$2.23 \times 10^{-2}$	$5.06 \times 10^6$	$1.71 \times 10^{-1}$

### 受的最大冲击电流密度

结果表明,当二极管受到大电流反向冲击后,复合电流密度增大,旁路电阻减小,串联电阻的变化主要是由于测试电路的电阻的变化所致.对于绝大多数样品,大电流反向冲击后二极管的复合电流指数因子都有增大的倾向,而且其值通常大于 2.0

### 3.2.3 饱和复合电流密度与反向冲击电流密度的关系

图 4 表示四种样品受到不同的反向电流冲击后样品的饱和复合电流密度与冲击前的饱和复合电流密度之比随反向冲击电流密度的变化关系

可见,样品的  $J_{or2}/J_{or1}$  随着反向冲击电流密度增大的而增大,这一比值还随 n 型基

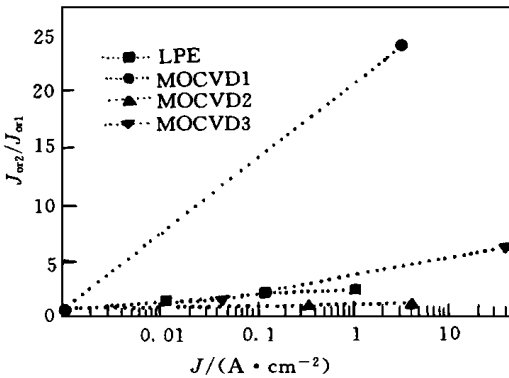


图 4 实验测量到的大电流反向冲击后与冲击前二极管的饱和复合电流密度之比  $J_{or2}/J_{or1}$  随反向电流密度的变化关系

区的大反向冲击密度远比 LPE 样品的对应值大

### 3.2.4 旁路电阻与反向冲击电流密度的关系

图 5 表示四种样品的旁路电阻与受到不同的反向电流冲击后样品的旁路电阻之比随反向冲击电流密度的变化关系.可见,  $R_{sh1}/R_{sh2}$  随样品受到的反向冲击电流密度的增大而增大,同时还随二极管 n 型外延层厚度的减小而增大

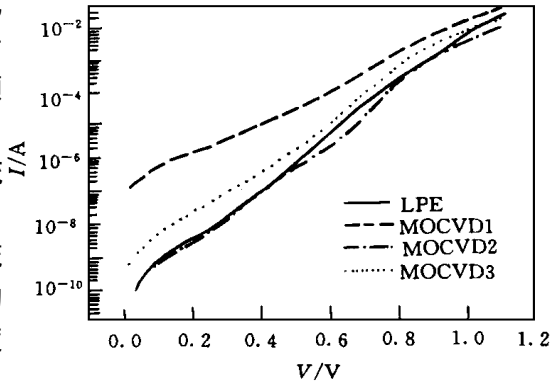


图 3 电流冲击后四种样品的暗场 I-V 关系曲线

区的厚度的减小而增大. MOCVD2 的  $J_{or2}/J_{or1}$  值比 MOCVD3 的相应值小,但是,由于大电流反向冲击前 MOCVD3 的饱和复合电流密度比 MOCVD2 的饱和复合电流密度小,因此其相对变化量比 MOCVD2 的相对变化量小.例如,当反向冲击的电流密度为  $4.0 \text{ A/cm}^2$  时, MOCVD2 的饱和复合电流密度的绝对变化量为  $5.6 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ ,而 MOCVD3 的饱和复合电流密度的绝对变化量约为  $8.0 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$ ,几乎小一个数量级. MOCVD3 与 LPE 的  $J_{or2}/J_{or1}$  随反向冲击电流密度的变化关系很相近,不过 MOCVD3 所能承受的最

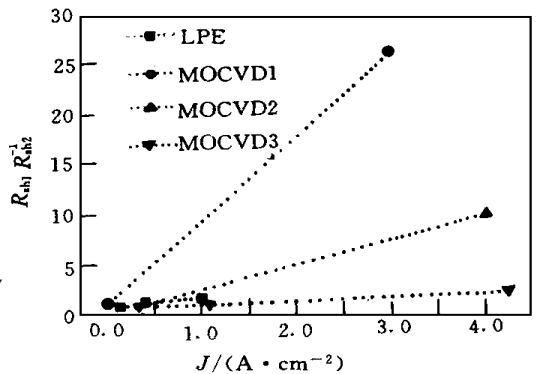


图 5 实验测量到的大电流反向冲击前与冲击后的二极管的单位面积的旁路电阻之比  $R_{sh1}/R_{sh2}$  随反向电流密度的变化关系

## 4 分析与讨论

通过测量二极管的暗场结特性来取代直接测量太阳电池的结特性主要基于以下考虑: 第一是尽量减小因电池面积增大可能引起的结的不均匀性给电池的结特性带来的影响, 其次是尽量消除电池的正面电极及电池的顶层的薄层电阻对暗场结特性的影响, 提高拟合结果的准确度。由于我们制作的二极管的材料和结构与太阳电池的材料和结构相同, 因此, 以上讨论的二极管的暗场结特性在很大的程度上反映了太阳电池的暗场的结特性。

电池的短路电流主要取决于  $p-n$  结收集到的光生载流子的多少。MOCVD1 的空间电荷区的饱和复合电流密度比 MOCVD2 和 MOCVD3 的对应值大, 说明外延的基区较薄时, 衬底对电池的性能影响较大, 这种影响可能来自衬底与外延层的交界面的缺陷及衬底杂质向外延层的扩散以及外延时衬底上的位错向外延层的延伸, 在外延层及  $p-n$  结区产生大量复合中心使光生载流子减少的结果。目前已有大量的研究结果表明用 MOCVD 方法在 GaAs, Si 和 Ge 等衬底材料上外延时在外延层中会产生大量的缺陷及位错向外延层延伸的现象<sup>[2,3]</sup>。MOCVD3 的暗电流较小, 加上复合掉的光生电子空穴对较少, 因此输出电流较大。因此 MOCVD 样品的短路电流随外延  $n$  型层厚度的增大而增大。

MOCVD 样品的  $n$  型层厚度小于  $5.5\mu\text{m}$  时, 电池的开路电压随基区厚度的增大而增大, 可能是电池的暗电流减小的缘故。因为暗电流是影响电池开路电压的一个关键因素<sup>[4]</sup>。这结果与 Yamaguchi 等的结果相同<sup>[5]</sup>。

MOCVD1、MOCVD2 和 MOCVD3 三组样品的反向击穿电压的大小分别为 6.0、8.0、10.0V, 说明样品的反向击穿电压随  $n$  型外延层厚度的增大而增大。击穿电压的差异是衬底杂质向基区扩散的差异所致。MOCVD1 的  $n$  型外延层较薄, 衬底杂质扩散至结附近的量较大, 隧道电流较大; 此外, MOCVD1 结区的复合电流和漏电流较大, 因此 MOCVD1 的反向击穿电压较低。当样品中引入缓冲层及加大基区的厚度后, 以上几部分暗电流减小了, 从而提高了击穿电压。MOCVD 样品与 LPE 样品击穿电压的差异来源于击穿的机制不同。MOCVD 样品的结区较窄, 因此隧道电流占主导, 而 LPE 样品的结区较宽, 雪崩效应占主导。

外延  $n$  型层中缺陷不但降低了电池的效率, 同时也降低了承受大电流反向冲击的能力。即电池未被击穿前在承受相同的反向电流冲击下, 电池的暗电流的变化量随缺陷密度的增大而增大。样品经受大电流的反向冲击后, 电池参数的变化主要来自电池边缘。Kalingamudali, Melloch 和 Stelwag 等对 GaAs 太阳电池的边界效应作了较深入的研究<sup>[6-8]</sup>, 他们的结果表明, 当样品的周长与面积之比小于 50 时, 边界效应不明显了。本文所用的样品的周长与面积之比均小于 50, 因此, 这些样品在经受大电流的反向冲击前可以忽略边界效应对电池结特性的影响, 然而, 当电池受到大电流的反向冲击以后, 电池的边界效应会引入较大的暗电流。图 6 是与 MOCVD2 有相似结构的二极管在受到大电流反向冲击前, 冲击后及二极管的侧面被腐蚀掉  $1.0\mu\text{m}$  时的暗场正向  $I-V$  特性关系曲线。结果表明, 二极管经受大电流的反向冲击后, 样品的击穿总是从边界开始。LPE 样品也观察到类似的现象。Honsberg 等在对商业应用的太阳电池作光发射实验时<sup>[9]</sup>, 观察到电池的击穿从正面电极或电池边缘处开始的现象。因此, 在研究电池的大电流的反向冲击时应该考虑电池的边界效应。

本文中MOCVD3的窗口层较薄,但其效率不及LPE样品的效率。主要原因是电池材料的pn结的不均匀性所致,这种不均匀性包括掺杂的不均匀,厚度的不均匀等。为了检测这种不均匀性的存在,我们制备了不同尺寸的二极管,二极管的饱和复合电流密度与二极管的周长与面积之比的关系曲线如图7所示。Tobin<sup>[10]</sup>等制作的样品的 $J_{or}$ 与 $L/S$ 间有严格的线性关系,而本实验中所用的样品的测试点偏离直线,说明材料的pn结不均匀。图2表明偏压较大时MOCVD3结区的复合电流较LPE样品的大,这也是MOCVD3的效率不及LPE样品的原因。

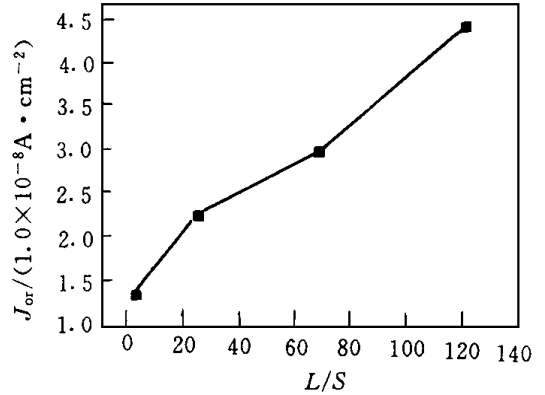
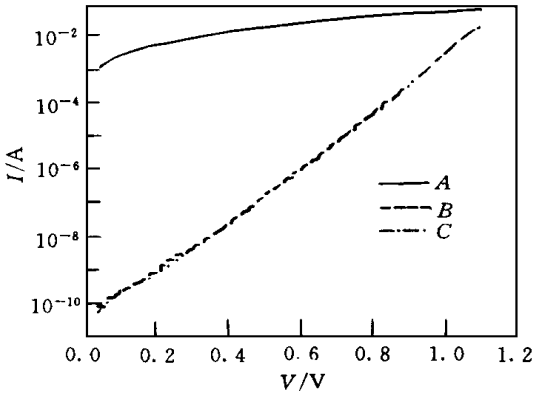


图6 MOCVD材料制作的二极管在受到大电流反向冲击前(A),冲击后(B)及二极管的侧面被腐蚀掉1.0 $\mu\text{m}$ (C)三种情况下的暗态正向I-V特性关系曲线  
二极管面积为1.2mm $\times$ 1.2mm,对应的最大反偏电压为8.0V,电池边界被击穿

图7 MOCVD法制作的二极管的饱和复合电流密度与二极管的周长与面积之比的关系曲线  
 $J_{or} / (1.0 \times 10^{-8} \text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$

## 5 结论

增大MOCVD电池n型外延层的厚度可以提高电池的效率,增大n型外延层的厚度能提高电池承受大电流的反向冲击的能力。n型外延层较厚电池的效率较高是由于衬底的杂质扩散至结区的量较少所致。MOCVD电池所能承受大电流的反向冲击的能力比LPE电池强,原因是MOCVD电池的结区较薄,雪崩击穿的可能性降低的结果。

致谢 感谢朱福英女士在C-V测试上的帮助和讨论

## 参 考 文 献

[1] 王子琦,陈朝,刘士毅,固体电子学研究与进展,1987,7(4): 304~ 313  
 [2] M. Kato *et al*, Proceedings of the 18th Photovoltaic Specialists Conference (IEEE, N.Y., 1985): 14~ 19  
 [3] S.M. Vernon *et al*, Proceedings of the 20th Photovoltaic Specialists Conference (IEEE, N.Y., 1990): 211~ 216  
 [4] H. J. Hovel, Solar Cells, Vol 11, Semiconductors and Semimetals Series (New York: Academic Press, 1975).  
 [5] M. Yamaguchi *et al*, J. Appl Phys, 1986, 59(5): 1751~ 1753

- [ 6 ] S. R. D. Kalingamudali *et al* , Solid-State Electronics, 1997, **41**(3): 417~ 422
- [ 7 ] M. R. Melloch *et al* , Proceedings of the 20th Photovoltaic Specialists Conference (IEEE, NY, 1990): 163~ 167.
- [ 8 ] T. B. Stellwag *et al* , Proceedings of the 20th Photovoltaic Specialists Conference (IEEE, NY, 1990): 442~ 447.
- [ 9 ] C. Honsberg and A. M. Barnett, Solar Cells, 1987: 59~ 63
- [10] S. P. Tobin *et al* , IEEE Trans on Electron Devices, 1990, **37**(2): 469~ 477.

## Junction Characteristics of MOCVD and LPE GaAs Solar Cells

Shi Xiaozhong, Xia Guanqun, Wang Le, Mo Jinji

*(Department of Semiconductor Materials and Devices, Shanghai Institute of Metallurgy,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)*

Received 14 July 1997, revised manuscript received 8 December 1997

**Abstract** The parameters of GaAs solar cells are obtained by curve-fitting. The results suggest that as the thickness of the n-GaAs epitaxial layer increases, the efficiency of the solar cell increases, the dark current decreases, and the ability in loading reverse current improves. MOCVD solar cells allow higher reverse current density through the pn junction than the LPE solar cells.

**EEACC:** 8420, 2560H; **PACC:** 8630J