

Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ 薄膜太阳电池的 *J-V* 特性*

何炜瑜 孙云[†] 乔在祥 敖建平 王兴磊 李长健

(南开大学光电子薄膜器件与技术天津市重点实验室, 光电信息技术重点实验室(南开大学, 天津大学), 天津 300071)

摘要: 对 Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ (CIGS) 太阳电池 *J-V* 特性曲线进行了测试和分析, 采用 Matlab 软件进行计算, 得到电池的二极管品质因子、反向饱和电流密度、串联电阻、并联电阻等特性参数. 采用数值逼近法, 将得到的参数回归 *J-V* 方程, 与测试结果符合较好. 对不同光照强度下电池的特性参数进行计算, 发现并联电阻随光照强度增加而降低, 并分析了原因.

关键词: Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂; 太阳电池; 并联电阻; 晶界势垒; 弱光

PACC: 8630J; 7280E; 0700 **EEACC:** 4250; 2520M; 2560B

中图分类号: TM914.4^{†2} **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)12-1941-04

1 引言

Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ (简称 CIGS) 多晶薄膜太阳电池效率高、不衰退、成本低, 具有非常好的发展前景, 实验室小面积电池的转换效率已经达到 19.5%^[1], 大面积组件效率也达到了较高的水平^[2].

在实际应用条件下, CIGS 太阳电池组件每峰瓦的年发电量高于单晶硅组件^[2], 主要有以下几个原因: (1) CIGS 太阳电池的弱光响应较好; (2) CIGS 太阳电池的温度系数较低; (3) CIGS 太阳电池的光谱响应与太阳光谱更匹配.

太阳电池 *J-V* 特性曲线的测试是表征电池性能最重要的测试方法之一, 不仅可以得到太阳电池的光电转换效率、开路电压、短路电流密度、填充因子等基本性能参数, 还可以得到二极管品质因子、反向饱和电流密度、串联电阻和并联电阻等特性参数, 这几个参数表征着实际测试的 *J-V* 曲线与理想的二极管特性的偏离, 对于改进太阳电池性能有非常重要的指导意义.

本文对 CIGS 太阳电池的 *J-V* 曲线进行测试分析, 并采用 Matlab 软件计算电池的各项特性参数, 根据计算结果拟合的 *J-V* 曲线与实际测试曲线进行了比较. 在不同光照强度下测试电池的 *J-V* 曲线, 研究其特性参数与光照的关系, 并对结果进行了分析.

2 CIGS 太阳电池的制备与 *J-V* 曲线的测试分析方法

2.1 CIGS 太阳电池的制备

在溅射金属 Mo 电极的 Soda lime 玻璃衬底

上, 采用三步共蒸发方法^[3] 沉积 Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ 薄膜, 衬底温度 560°C, 形成 Ga 与 III 族元素的原子比 *x* 为 32%、略呈贫 Cu 组分 (Cu/III = 94%) 的 CIGS 薄膜; 然后采用化学水浴沉积 (CBD) 方法制备 CdS 缓冲层, 磁控溅射双层 ZnO 窗口层, 最后蒸发 Ni-Al 电极完成电池的制备.

2.2 CIGS 太阳电池 *J-V* 曲线的测试

电池的 *J-V* 特性的测试是在实验室太阳光模拟器 (AM1.5) 下进行的, 采用氙灯作为光源. 模拟器的光强采用天津电子 18 所 205 计量站提供的单晶 Si 标准电池进行校准, 调节模拟器光源的输出功率, 使标准电池的短路电流达到标定值^[4], 电池的测试温度为 25°C.

改变模拟器光源的输出功率, 就可以测试在不同光照强度下 CIGS 太阳电池的 *J-V* 输出特性.

由于光照对电池材料特性的影响, 在分析太阳电池性能时, 不仅要测试光照条件下的 *J-V* 曲线, 还要测试暗态的 *J-V* 特性 (关掉模拟器光源, 使电池处于暗室中, 测得的 *J-V* 曲线即为暗态 *J-V* 特性).

2.3 电池 *J-V* 曲线的分析方法

根据薄膜太阳电池的单二极管模型^[5], 其 *J-V* 方程为:

$$J(V) = J_0 \left[\exp\left(\frac{q(V - R_s J)}{AkT}\right) - 1 \right] + \frac{V - R_s J}{r_{sh}} - J_L \quad (1)$$

式中 *A* 为二极管品质因子; *J*₀ 为反向饱和电流密度; *R*_s 为串联电阻; *r*_{sh} 为并联电阻; *k* 为玻尔兹曼

* 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2004AA513020)

[†] 通信作者. Email: suny@nankai.edu.cn

2007-06-12 收到, 2007-07-17 定稿

常数; T 为测试时电池的温度; J_L 为电池的光电流, $V = 0$ 时, $J_L \approx J_{sc}$.

根据测得的 J - V 曲线, 可以求出(1)式中的参数. 其求解过程如下^[6]:

(1) dJ/dV 作为纵坐标相对于横坐标 V 作图, 由于 $R_s/r_{sh} \ll 1$, 在 $V = 0$ 附近, 忽略二极管正向电流, 得到电导 $G = \frac{1}{r_{sh}} = dJ/dV|_{V=0}$, 即可求得电池的并联电阻 r_{sh} .

(2) $dV/dJ = R_s + \frac{AkT}{q}(J + J_L)^{-1}$ 作为纵坐标相对于横坐标 $(J + J_L)^{-1}$ 作图, 其线性拟合的直线与纵坐标的交点即为电池的串联电阻 R_s .

(3) $(J + J_{sc}) - GV$ 作为纵坐标相对于横坐标 $V - R_s J$ 作半对数图, 可以通过线性拟合的直线与纵坐标的交点得到电池的反向饱和电流密度 J_0 , 通过其斜率得到二极管品质因子 A .

(4) 同理, 采用上述方法分析暗态 J - V 曲线, 可以得到 CIGS 电池暗态下相应的特性参数.

3 结果与讨论

3.1 CIGS 太阳电池 J - V 曲线的测试结果分析

图 1 是光照与暗态下 J - V 曲线的测试结果, 电池的转换效率 $\eta = 12.11\%$, 短路电流 $J_{sc} = 29.73 \text{ mA/cm}^2$, 开路电压 $V_{oc} = 0.5897 \text{ V}$, 填充因子 $FF = 0.6907$. 与目前报道的最好的 CIGS 太阳电池 J - V 测试结果^[1] 相比, 开路电压和填充因子明显偏低, 其原因将在 3.2 节中分析.

图 1 中光照条件下的 J - V 曲线并非暗态曲线的简单平移, 而是存在一个交叉点, 这是由于电池内部吸收层 CIGS 薄膜与 CdS 薄膜界面处的势垒高度在光、暗条件下不同引起的. 在 CIGS 与 CdS 界面

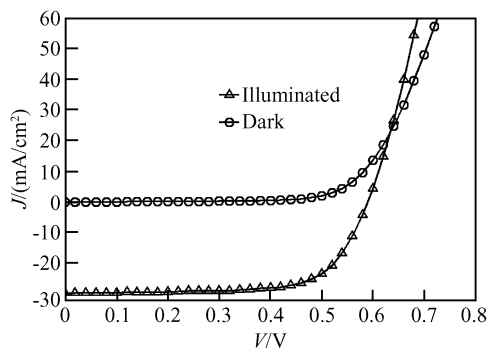


图 1 CIGS 太阳电池的光照及暗态 J - V 特性曲线

Fig.1 Illuminated and dark J - V measurement results

处, 两种材料的导带极小值不同, 形成电子势垒^[7]. 在光照条件下, 光照使 CdS 中大量被深受主能级俘获的电子释放出来, 载流子浓度大大增加, n 型导电类型增强, 引起 CdS 的导带最小值下移, 从而使 CIGS 与 CdS 界面处的导带边失调值减小, 势垒高度降低, 电子比较容易渡越势垒形成电流. 而在暗态时, 界面处电子势垒较高, 在正向偏压辅助下电子渡越势垒时, 会在 CdS 两端产生压降 ΔV_{Cds} , ΔV_{Cds} 使光、暗曲线发生偏移, 形成交叉.

3.2 CIGS 太阳电池特性参数的计算结果分析

按照 2.3 节所述的方法计算 CIGS 太阳电池的特性参数, 如图 2 所示. 从图 2(a) 可以看出, 在 $V = 0$ 附近得到并联电阻 $r_{sh} = 1/G = 478.26 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 根据图 2(b) 拟合的直线在纵轴上的截距可以得到串联电阻 $R_s = 1.454 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 根据图 2(c) 拟合的直线的斜率可以得到品质因子 $A = 1.71$, 由纵轴上的截距还可以得到反向饱和电流 $J_0 = 3.8 \times 10^{-5} \text{ mA/cm}^2$.

反向饱和电流密度 J_0 较高, 导致电池的开路电压很低, 反向饱和电流密度与载流子寿命、迁移率等因素有关, J_0 高表明电池内部存在较强的复合过程.

二极管品质因子 $1 < A < 2$, 表明电池主要复合过程是空间电荷区的复合, 关于 CIGS 太阳电池复合机制的研究^[8,9] 认为空间电荷区复合是主要的复合机制, $A = 1.71$, 表明空间电荷区的复合较强. A 值的大小对于 CIGS 电池效率影响较大, 表 1 为历次 CIGS 最高纪录电池的特性参数. 品质因子 A 值逐渐降低, 表明空间电荷区复合逐渐减弱, 趋向于以中性区复合为主, 使电池性能改善, 转换效率增加.

此外, 电池并联电阻比文献值^[10] 低 1~2 个数量级, 这是填充因子低的重要原因之一.

在暗态条件下, 采用同样方法计算得到 $R_s = 1.288 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $r_{sh} = 1994.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $A = 1.77$, $J_0 = 3.1 \times 10^{-5} \text{ mA/cm}^2$. 与光照条件下的 J - V 曲线相比, A , J_0 和 R_s 三个参数略有变化, 但电池的并联电阻 r_{sh} 明显增大, 从 478.26 增大到 $1994.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$. 这一点将在 3.4 节中详细分析.

3.3 对特性参数进行数值回归的结果

为了验证曲线拟合得到的特性参数的准确性, 将得到的 A , J_0 , R_s , r_{sh} 带入(1)式中, 得到一个超越方程, $J(V) = F(J, V)$, 采用数值逼近的方法可以得到方程的数值解, 如图 2(d) 中的实线所示, 可以看出, 回归的结果(实线)与测试结果(三角符号)符合较好.

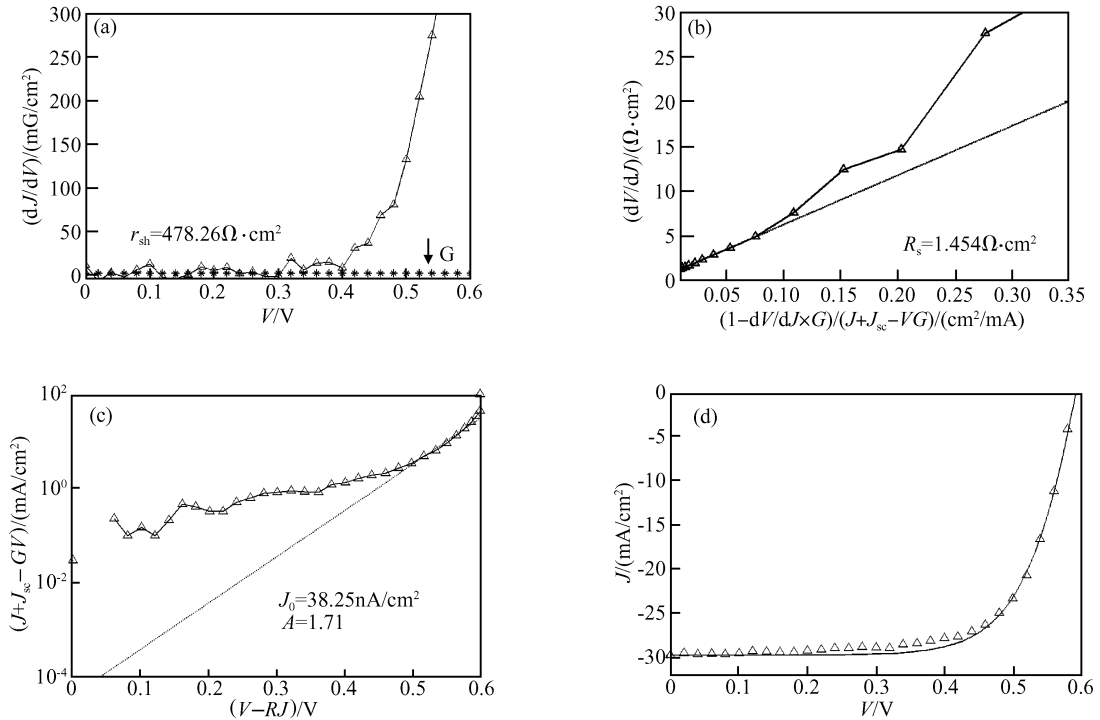


图 2 CIGS 太阳电池特性参数的计算与数值回归的结果
Fig. 2 Derived parameters of CIGS solar cell from illuminated J - V measurements

3.4 光照强度对 CIGS 太阳电池特性参数的影响

在不同入射光辐照度下,计算 CIGS 太阳电池的特性参数,并与单晶硅太阳电池进行比较,结果表明,在 $60 \sim 100 \text{mW/cm}^2$ 范围内,CIGS 电池的 R_s , A , J_0 基本不随光强变化,而 r_{sh} 和 FF 都随光强的增加而降低.图 3 为 CIGS 与 Si 太阳电池的并联电阻随光照强度变化的曲线,入射光辐照度由标准电池测得.

从图 3 可以看出,Si 太阳电池的并联电阻随光照强度的增大变化很小,CIGS 太阳电池并联电阻随光照强度的增大明显降低,其光、暗条件下并联电阻相差 4 倍.我们认为可能有两种原因导致这种变化:一方面,光照条件下 CIGS 薄膜的晶界势垒降低,电池经由晶界的漏电增加,并联电阻减小;另一方面,由于光电导的作用^[11],CIGS 薄膜的电阻率降

表 1 历次 CIGS 最高纪录电池的特性参数

Table 1 Characteristic parameters of record-efficiency CIGS solar cells

	$\eta/\%$	V_{oc}/V	$J_{sc}/(\text{mA}/\text{cm}^2)$	FF/%	A	$J_0/(\text{mA}/\text{cm}^2)$
1 ^[11]	17.7	0.674	34.0	77.0	1.6	-
2 ^[11]	18.8	0.678	35.22	78.65	1.5	-
3 ^[1]	19.2	0.689	35.71	78.12	1.35	-
4 ^[1]	19.5	0.693	35.34	79.4	1.3	3.3×10^{-8}

低,使电流更容易流经漏电区域,造成漏电增加,并联电阻减小.

为便于比较,将电池的输出功率对最大输出功率进行归一.图 4 是 CIGS 与 Si 电池归一化输出功率随光强变化的曲线,CIGS 太阳电池输出功率随光强减小而降低的趋势较为缓慢,辐照度为标准太阳光辐照度的十分之一时,CIGS 太阳电池的归一化输出功率比 Si 电池高近 15%,这与弱光下 CIGS 太阳电池的 r_{sh} 和 FF 的改善有关,这一优点使得 CIGS 太阳电池的弱光性能较好.

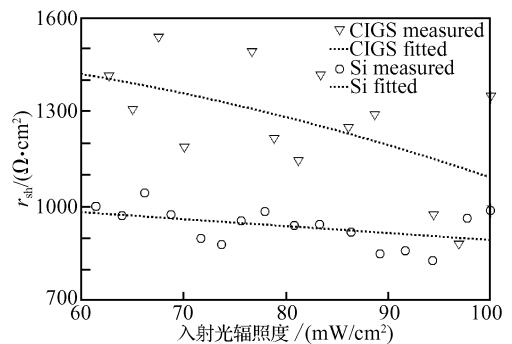


图 3 CIGS 与 Si 太阳电池的并联电阻随光照强度的变化
Fig.3 Irradiance dependence of the shunt resistance of CIGS and Si solar cells

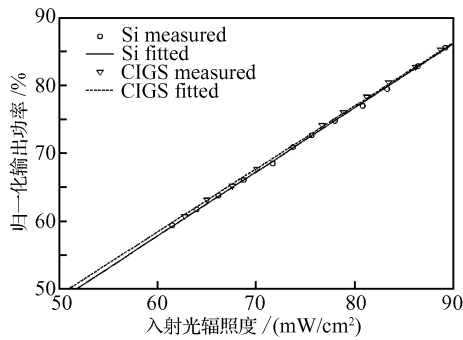


图 4 CIGS 与 Si 太阳电池的输出功率随光照强度的变化
Fig.4 Irradiance dependence of the output power of CIGS and Si solar cells

4 结论

对制备的 CIGS 太阳电池的 $J-V$ 曲线进行测试和分析,得到了太阳电池的特性参数 A , J_0 , R_s , r_{sh} 等,将得到的参数回归 $J-V$ 方程,与测试结果符合较好,证实了计算结果的准确性.计算结果表明,我们的 CIGS 电池的 J_0 和 A 值较大,复合较强,主要的复合过程是空间电荷区的复合.对不同光照强度下电池的特性参数进行计算,发现并联电阻随光照强度增加而降低,并联电阻的这种随光强变化的趋势,可能是 CIGS 电池弱光性能比较好的一个原因.

$J-V$ Characteristics of $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ Thin Film Solar Cells*

He Weiyu, Sun Yun[†], Qiao Zaixiang, Ao Jianping, Wang Xinglei, and Li Changjian

(Institute of Photo-Electronics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: $J-V$ characteristics of $\text{Cu}(\text{Ga}_x\text{In}_{1-x})\text{Se}_2$ (CIGS) thin film solar cells are measured and analyzed. The diode saturation current density J_0 , diode quality factor A , series resistance R_s and shunt resistance r_{sh} are deduced using Matlab. The calculated results coincide with the measurement very well. A CIGS cell produced in our laboratories is characterized at different illumination intensities. The calculated characteristic parameters are plotted with the irradiance. The shunt resistance r_{sh} decreases as illumination increases. The increased shunt resistance is most likely one of the reasons for the better performance of CIGS solar cells under weak illumination.

Key words: $\text{Cu}(\text{Ga}_x\text{In}_{1-x})\text{Se}_2$; solar cells; shunt resistance; grain boundary barrier; weak illumination

PACC: 8630J; 7280E; 0700

Article ID: 0253-4177(2007)12-1941-04

参考文献

- [1] Contreras M A, Ramanathan K, AbuShama J, et al. Diode characteristics in state-of-the-art $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ solar cells. *Prog Photovolt: Res Appl*, 2005, 13: 209
- [2] Dimmler B, Powalla M, Schaeffler R. CIS solar modules; pilot production at wuerth solar. *Proceedings of the 31st IEEE PVSC*, 2005: 189
- [3] Gabor A M, Tuttle J R, Albin D S, et al. High-efficiency $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ solar cells made from $(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{Se}_3$ precursor films. *Appl Phys Lett*, 1994, 65(2): 198
- [4] Ashok S, Pande K P. Photovoltaic measurements. *Solar Cells*, 1985, 14: 61
- [5] Hegedus S S, Shafarman W N. Thin-film solar cells; device measurements and analysis. *Prog Photovoltaics*, 2004, 12: 155
- [6] Gloeckler M. Device physics of $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ thin-film solar cells. PhD Thesis, Colorado State University, 2005: 17
- [7] Kronik L, Burstein L, Leibovitch M, et al. Band diagram of the polycrystalline $\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ heterojunction. *Appl Phys Lett*, 1995, 67: 1405
- [8] Walter T, Menner R, Koble C, et al. Characterization and junction performance of highly efficient $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CuInSe}_2$ thin film solar cells. *Proceedings of the 12th European Photovoltaic Energy Conference*, 1994: 1755
- [9] Rau U. Tunneling-enhanced recombination in $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ heterojunction solar cells. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(1): 111
- [10] Contreras M A, Egaas B, Ramanathan K, et al. Progress toward 20% efficiency in $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ polycrystalline thin-film solar cells. *Prog Photovolt: Res Appl*, 1999, 7: 311
- [11] Virtuani A, Lotter E, Powalla M. Performance of $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ solar cells under low irradiance. *Thin Solid Films*, 2003, 431/432: 443

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2004AA513020)

[†] Corresponding author. Email: suny@nankai.edu.cn

Received 12 June 2007, revised manuscript received 17 July 2007