

CdTe/CdS 太阳电池 I - V , C - V 特性研究^{*}

杨学文[†] 郑家贵 张静全 冯良桓 蔡 伟 蔡亚平
李 卫 黎 兵 雷 智 武莉莉

(四川大学材料科学系, 成都 610064)

(2005 年 8 月 24 日收到, 2005 年 10 月 26 日收到修改稿)

测量了 CdTe 太阳电池器件从 50kHz 至 1MHz 频率范围的电容-电压特性, 计算了吸收层的载流子浓度和空间电荷区的位置, 电容-电压特性测试结果出现两个峰, 峰特征与测试频率有关, 用多结模型进行模拟分析, 解释了实验结果. 测量了电池从 220K 至 300K 的变温暗电流-电压特性, 得出电池的反向暗饱和电流密度 J_0 和二级管理想因子 A , 分析了 J_0 , A 随测量温度的变化, 并讨论了电池器件的电流特性.

关键词: CdTe 太阳电池, 电流-电压特性, 电容-电压特性

PACC: 7340L, 7360L, 7280E

1. 引 言

CdTe 是直接带隙材料, 禁带宽度 1.45eV, 接近太阳电池所需的理想值. CdTe 与宽带隙的 CdS 窗口层形成的异质结 CdTe/CdS 太阳电池具有转换效率高, 制造成本低的优势. 已有将近 10 个研究小组报道取得了高于 11% 的转换效率, 其中以近空间升华技术制备的小面积 CdTe/CdS 太阳电池效率已达 16.5%, 另有 2 个小组也报道了 15.8% 的转换效率^[1]. 基于对 CdTe, CdS 等薄膜材料的电子学性质表征, 测量 CdTe 太阳电池的变温电流-电压特性及电容-电压特性, 研究 CdTe/CdS 异质结的电流输运机理, 对于改进 CdTe 太阳电池的制备工艺, 提高其转换效率具有重要意义.

本文测量了 CdTe 太阳电池从 50kHz 至 1MHz 频率范围的电容-电压特性, 计算了吸收层的载流子浓度和空间电荷区的位置, 使用模拟软件对电池的电容-电压特性进行了模拟分析. 同时测量了样品的变温暗电流-电压特性, 得出电池的反向暗饱和电流密度 J_0 和二级管理想因子 A , 在此基础上简要分析了 CdTe 太阳电池的电流特性.

2. 实 验

2.1. 电池结构及制备

本文报道电池结构为 $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{ZnTe}:\text{Cu}/\text{Au}$. 其中, CdS 用化学池沉积(CBD)法制备, CdTe 用近空间升华(CCS)法沉积, ZnTe/ZnTe:Cu 复合背接触层用真空共蒸发法沉积, 制备细节参见文献[2, 3].

2.2. C - V 特性测试

使用 Agilent 公司的 4284A 半导体特性测试仪测量变频 C - V 特性, 频率为 50kHz—1MHz, 扫描电压: -1.5V—3V.

2.3. I - V 特性测试

使用西安交通大学研制的脉冲氙灯太阳电池 I - V 特性测试系统测量光 I - V 特性. 使用 Agilent 公司的 4155C 半导体特性测试仪测量变温暗 I - V 特性, 电池样品置于中国科学院研制的低温样品室中, 测试过程中样品室保持低真空并保持暗态, 使用 TCK-100 温度控制器控温, 精度 0.2K, 测量温度范围为 300K—220K.

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号 2003AA513010)资助的课题.

[†] E-mail: xuweny@163.com

3. 结果与讨论

3.1. $C-V$ 特性

转换效率为 11.6% 的 CdTe 太阳电池的变频 $C-V$ 特性如图 1 所示. 根据曲线计算得到频率为 1 MHz 时 CdTe 太阳电池的吸收层载流子浓度 N_D 约为 $2.07 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 空间电荷层宽度 X_D 为 $2.25 \times 10^{-4} \text{ cm}$.

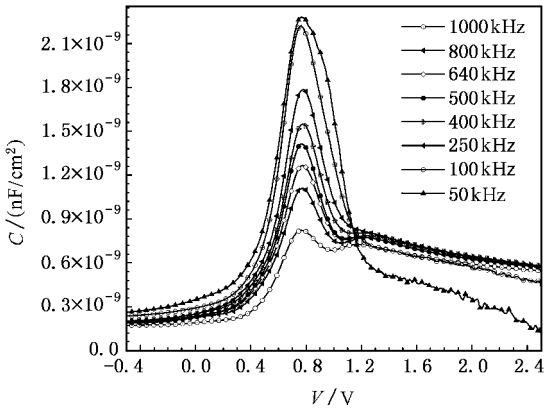


图 1 CdTe/CdS 太阳电池的变频 $C-V$ 特性曲线

由图 1 可见, 频率较高时, 电池的 $C-V$ 特性曲线出现了两个峰, 在低频下, 曲线第一个峰的强度明显增强, 第二个峰消失. 由 pn 结势垒电容 C_T 和扩散电容 C_D 与电压的关系

$$C_T = A \left[\frac{e \epsilon \epsilon_0 N_D}{2(V_D - V)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$C_D = \frac{A q^2 p_{n0} L_p}{k_0 T} e^{eV/k_0 T}. \quad (2)$$

对比两式可见, 与势垒电容 C_T 相比, 扩散电容 C_D 随正向偏压 V 按指数规律增加, 所以在相同的电压下, 扩散电容起主要作用. 我们知道, 扩散电容随频率的增加而减小, 所以在图 1 中, 高频(1 MHz)时由于扩散电容减小, 使得第一个峰的强度较低频时要小得多.

使用 Gent University 开发的 SCAPS 模拟软件模拟所测电池的 $C-V$ 特性, 结果如图 2 所示.

模拟得出的曲线基本可以反映测量得到的 $C-V$ 特性. 根据拟和分析时的参数设置, 可以进一步理解样品的 $C-V$ 特性. 对 CdTe 电池, 当存在背接触肖特基 (Schottky) 结时, 其 $I-V$ 、 $C-V$ 特性等效电路模型如图 3 所示^[4], 即直流情况下电池的等效电路为两个结反向串联 (CdS/CdTe 主结和背接触 Schottky 结),

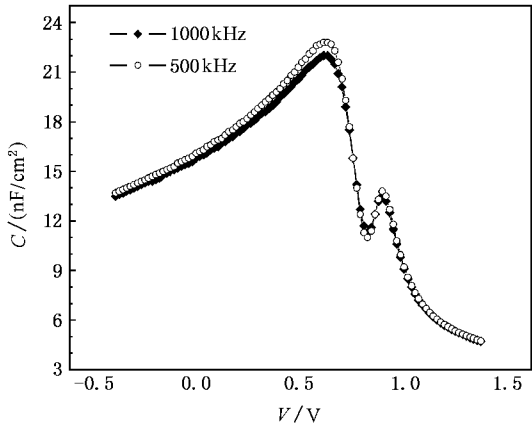


图 2 SCAPS 模拟的 CdTe 太阳电池变频 $C-V$ 特性

交流情况下电池的等效电路为两个电容串联, 每个电容又和一个电阻并联.

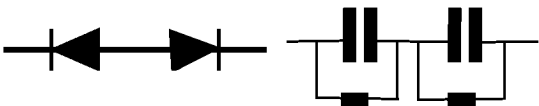


图 3 CdTe 太阳电池的等效电路

由电池 $I-V$ 特性可知, 电流随着电压的增加由负值变为正值. 当 I 为负时, 电压主要降落在反向偏置的 CdS/CdTe 接触结上, 使得 CdS/CdTe 结上的电容随电压的增加而增大, 直到电容饱和, 此时 $C-V$ 曲线上出现第一个峰. 当电压增加到一定值时, I 为正值, CdS/CdTe 结上形成的二极管正向偏置, 背接触上形成的二极管反向偏置, 降在背接触二极管上的电压随总电压的增加而增加, 使总电容增加, 但由于总电容是两个电容串联的形式, 即

$$C_{\text{tot}}^{-1} = C_j^{-1} + C_c^{-1}, \quad (3)$$

所以 $C-V$ 特性曲线中, 当电压较大时, 总电容会随电压的增加而减小, 也就是形成第二个峰的原因.

3.2. $I-V$ 特性分析

对于同一样品进行了不同温度下的暗 $I-V$ 特性测试, 室温 (300K) 时的 $I-V$ 特性曲线如图 4 所示.

由图 4 可见, 室温下 CdTe 太阳电池具有良好的整流特性, 反向电流明显饱和. 我们计算了不同温度下样品的二极管理想因子 A 和反向暗饱和电流密度 J_0 , 结果如图 5 所示.

由图 5 可见, 随着温度的降低, 二极管理想因子 A 从室温的 2.13 变为 220K 时的 9.95. 与室温相比,

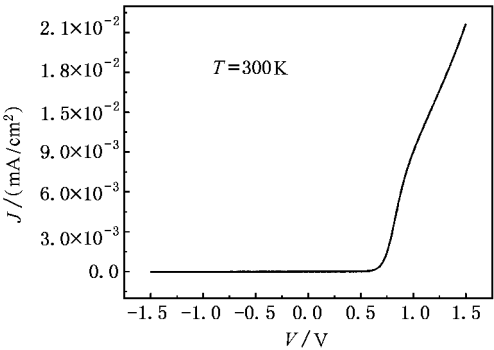


图 4 CdTe/CdS 太阳电池的 $I-V$ 特性曲线

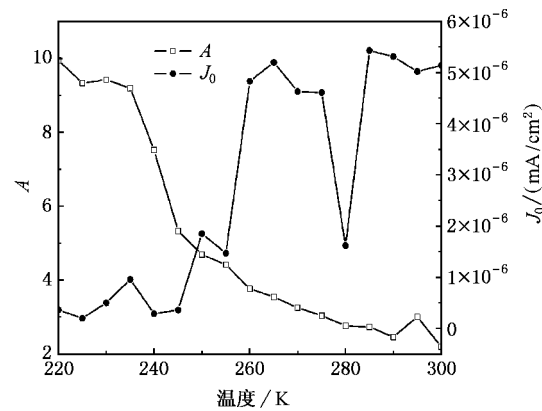


图 5 不同温度下 A, J_0 值

220K 的反向暗饱和电流密度 J_0 降低了一个数量级,从 10^{-6} mA/cm^2 量级降低至 10^{-7} mA/cm^2 .

图 6 为不同温度下的 $\ln J-V$ 关系曲线.

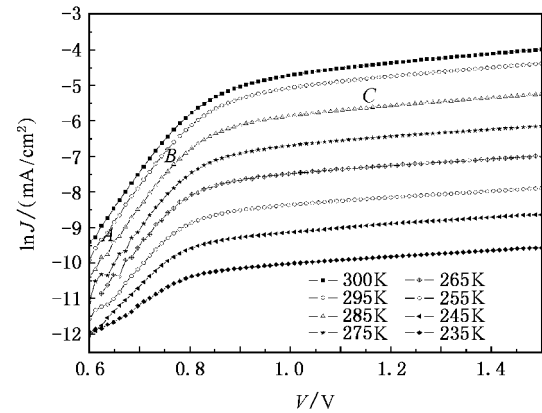


图 6 不同温度下 $\ln J-V$ 特性曲线

图 7 为不同正向偏压下样品的 $\ln J-1/T$ 关系曲线.

由图 6 可以看出, $\ln J-V$ 关系曲线显示不同的斜

率,对应不同的载流子输运机理.根据正向偏压的大小将曲线分为三个不同的区域,进一步分析其室温下载流子输运机理.

区域 A 中,正向偏压范围约为 0.6V—0.7V,电流大小可以表示为

$$I = I_0 [\exp(qV/AkT) - 1], \quad (4)$$

其中,二极管理想因子 A 约为 2,表明室温下电流以复合电流为主^[5,6].

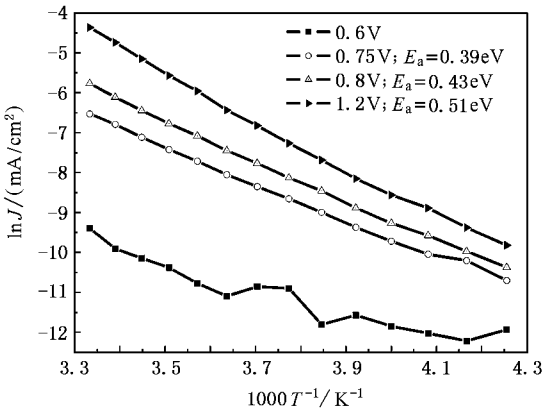


图 7 不同偏压下 $\ln J-1/T$ 关系曲线

区域 B 中,正向偏压范围为 0.7V—0.9V. B 区域中计算得到二极管理想因子 A 在 2—3 之间,并且由 $C-V$ 特性分析得知,测试样品存在较复杂的界面态,所以推断在室温下电流以热电子发射电流为主^[6—8].

区域 C 中,正向偏压范围为 1.0V—1.5V. $\ln J-V$ 关系曲线的斜率基本上与温度无关,正向电流可以表示为

$$I = I_0 \exp(\alpha V_a), \quad (5)$$

其中 α 是与温度无关的常数,由上式可以看出 C 区域中的正向电流以隧道电流为主^[9,10].

4. 结 论

对 CdTe 太阳电池进行了变温暗 $I-V$ 特性测试以及变频 $C-V$ 特性测试.高频 $C-V$ 特性出现两个峰表明背接触层处可能形成了一个反向肖特基结,利用电容串连模型可以基本解释 $C-V$ 特性曲线两个峰值之间的关系.根据峰值大小及其随频率的变化情况,推断 CdTe/CdS 界面以扩散电容为主.

从变温 $I-V$ 测试可知,本文所测电池样品具有良好的整流特性.其室温载流子输运机理较为复杂,

在较低的正向偏压下 ,以复合电流及热电子发射电流 为主 ,在 1.0—1.5V 偏压下 表现出隧道电流的特性 .

[1]

Wu X , Kcane J K , Dhre B G *et al* 2001 Germany ,Record of 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference 22-26

[2]

Xia G P , Zheng J G , Li B *et al* 2004 *Journal of Sichuan University* **41** 118 (in Chinese) [夏庚培、郑家贵、黎 兵等 2004 四川大学学报 **41** 118]

[3]

Li W , Feng L H , Wu L L *et al* 2005 *Acta Phys . Sin .* **54** 1879 (in Chinese) [李 卫、冯良桓、武莉莉等 2005 物理学报 **54** 1879]

[4]

Niemegeers A , Burgelman M 15 March 1997 *J . Appl . Phys .* **81** 763

[5]

Yasuhiro T , Toshiaki K W , Yoshinori H 1993 *Jpn . J . Appl . Phys .* **32** 1923

[6]

Hussein R , Borchert D , Grabosch G , Fahrner W R 2001 *Materials & Solar Cells .* **69** 123

[7]

Chen G B , Li Z F , Cai W Y *et al* 2003 *Acta Phys . Sin .* **52** 1496 (in Chinese) [陈贵宾、李志锋、蔡炜颖等 2003 物理学报 **52** 1496]

[8]

Hu Z H , Liao X B , Diao H W *et al* 2005 *Acta Phys . Sin .* **54** 2302 (in Chinese) [胡志华、廖显伯、刁宏伟等 2005 物理学报 **54** 2302]

[9]

Niemegeers A , Burgelman M 1996 Proc . 25nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference . 901-904

[10]

Georgakilas A , Aperathitis E 1997 *Materials Science and Engineering B* **44** 383

[6]

Hussein R , Borchert D , Grabosch G , Fahrner W R 2001 *Materials*

Characteristics of CdTe solar cell device^{*}

Yang Xue-Wen[†] Zheng Jia-Gui Zhang Jing-Quan Feng Liang-Huan
Cai Wei Cai Ya-Ping Li Wei Li Bing Lei Zhi Wu Li-Li
(Collage of the Material Science & Engineering , Sichuan University , Chengdu 610064 , China)
(Received 24 August 2005 ; revised manuscript received 26 October 2005)

Abstract

For increasing the efficiency of CdTe/CdS solar cells , it is important to measure the current-voltage and capacitance-voltage characteristics and then carry out a numerical simulation based on electronic measurement of CdTe and CdS thin films. In this paper, the capacitance-voltage characteristics were measured in the frequency range from 50kHz to 1MHz. The carrier concentrations of the absorber layer and the space charge region width were calculated. The dark current-voltage characteristics of the CdTe solar cell were measured in the temperature range from 220K to 300K. The saturated reverse dark current density J_0 and the diode ideal factor A of the solar cells were obtained. The relations of J_0 and A with temperature were discussed.

The results show that the capacitance-voltage curves has two peaks and the intensities and positions of the peaks are dependent on measurement frequency. The results are simulated and explained with the multi-junction model. With decreasing temperature , the saturated reverse dark current decreases from 10^{-6} mAcm⁻² at room temperature to 10^{-7} mAcm⁻² at 220K , and the diode ideal factor rises from 2.13 at room temperature to 9.95 at 220K.

Keywords : CdTe solar cell , $I-V$ characteristic , $C-V$ characteristic

PACC : 7340L , 7360L , 7280E

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program (863 program) of China (Grant No.2003AA513010).
[†] E-mail : xueweny@163.com