

文章编号:1000-582X(2003)10-0034-05

CdS/ CdTe 异质结太阳能电池极限效率的计算*

郭江^{1,2},王万录^{1,3},刘高斌¹,冯良桓⁴

(1. 重庆大学 数理学院,重庆 400044; 2. 成都理工大学 信息工程学院,四川 成都 610059;
3. 重庆大学 光电技术与系统教育部重点实验室,重庆 400044; 4. 四川大学 材料科学系,四川 成都 610064)

摘要:讨论了 CdS/CdTe 异质结的电流电压特性,研究了 CdS/CdTe 太阳能电池在 AM1.5 太阳光谱辐射下的转换效率,给出了不计所有损失的理想极限情况下,其电池转换效率可达 27%。同时讨论了考虑部分材料参数影响的条件下,实际 CdS/CdTe 太阳能电池的转换效率,在所选定的参数下为 23%,从近期实际制备的 CdS/CdTe 太阳能电池的进展,以及较为合理的理论推论和分析来看,此效率将有可能达到。

关键词:CdS/CdTe 异质结太阳能电池;光生电流;转换效率

中图分类号:TK514;O484.5

文献标识码:A

近来在研究开发新能源的领域,光伏市场发展非常迅速。世界主要几大公司宣称近期光伏组件产量将会增加到 263.5 MW,其中薄膜太阳能电池将达到 91.5 MW^[1]。世界著名太阳能专家施密特教授曾说:"太阳能将在 21 世纪中取代原子能作为世界性能能源,唯一的问题是在 2030 年实现还是在 2050 年实现^[2]。"所以,发展低成本的多晶薄膜太阳能电池有望解决日益严重的能源危机。而 CdS/CdTe 薄膜太阳能电池是最好的候选者。它一般是用 n 型 CdS 作为窗口层材料,p 型 CdTe 作为吸收体。由于 CdTe 具有直接带隙结构,对于波长小于吸收限的光具有较大的吸收系数,仅 1 μm 厚的 CdTe 便可吸收能量大于 CdTe 禁带宽度的 99% 的入射光,从而降低了对扩散长度的要求。人们预计其理论转换效率可达 27%^[1]。另外,它还是一种稳定的可大面积低成本生产的太阳能电池,其价格仅为非晶硅太阳能电池的一半,在光伏科技界有极大的吸引力,在地面太阳光伏转换应用方面发展前景极为广阔。所以世界各国都相继展开了对它的研制和开发,已取得了不少成果。笔者将在 CdS/CdTe 异质结电流电压特性基础之上,研究和讨论 CdS/CdTe 异质结太阳能电池在 AM1.5 太阳光谱辐射下的转换效率。

1 CdS / CdTe 异质结的电流电压特性

CdS / CdTe 形成的异质结能带结构如图 1 所示。其中 CdTe 和 CdS 的禁带宽度分别为 $E_{g1} = 1.45 \text{ eV}$, $E_{g2} = 2.42 \text{ eV}$;电子亲和势分别为 $\chi_1 = 4.28 \sim 4.50 \text{ eV}$, $\chi_2 = 4.00 \sim 4.79 \text{ eV}$ ^[3-5]。相对介电常数分别为: $\epsilon_{r1} = 10.9$, $\epsilon_{r2} = 8.9$;电子和空穴有效质量分别为 $m_{n1}^* = 0.11 m_0$, $m_{p1}^* = 0.2 m_0$;CdTe 中电子迁移率为 $\mu_{n1} = 600 \text{ cm}^2/\text{v} \cdot \text{s}$ ^[6-7]。CdTe 中电子扩散长度 $L_{n1} = 0.7 \mu\text{m}$ ^[5]。受主、施主浓度 N_A, N_D 依据实验中制备的相关薄膜的实验值^[8-9]选定为 $N_A = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 和 $N_D = 1.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$;费米能级为 $E_{F1} - E_{v1} = kT \ln [2(2\pi m_0 \cdot k/h^2)^{3/2} (m_{p1}^* T/m_0)^{3/2} / N_A] = 0.102 \text{ eV}$, $E_{c2} - E_{F2} = kT \ln [2(2\pi m_0 k/h^2)^{3/2} (m_{n2}^* T/m_0)^{3/2} / N_D]$ ^[8] = 0.071 67 eV (T 取室温 300 K)。

设 CdS / CdTe 组成突变异质结,在耗尽近似下求解泊松方程,由电中性条件可解得异质结空间电势分布及 CdTe 和 CdS 中空间电荷区宽度分别为:

$$V_1 = \frac{1}{2} \frac{q}{\epsilon_1} N_A (x - x_1)^2 \quad (x_1 < x < x_0)$$

$$V_2 = V_D - \frac{1}{2} \frac{q}{\epsilon_2} N_D (x_2 - x)^2 - \Delta E_c \quad (x_0 < x < x_2)$$

* 收稿日期:2003-05-10

基金项目:国家 863 计划项目(2001AA513011);光电技术和系统教育部重点实验室资助课题

作者简介:郭江(1957-),女,四川泸州人,成都理工大学副教授,主要从事光电子材料的理论研究。

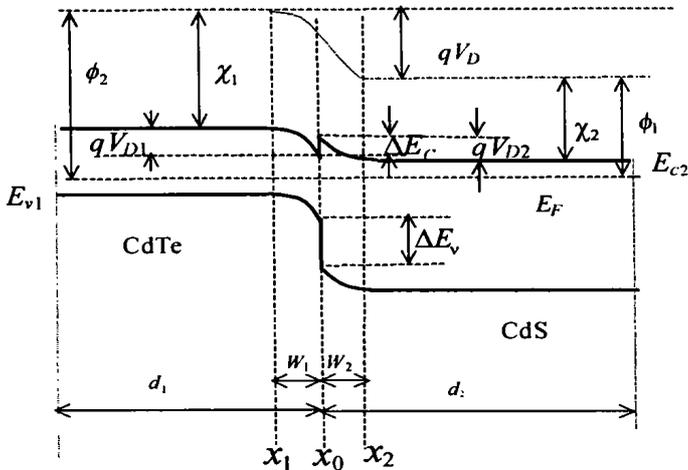


图1 CdS/CdTe 能带结构示意图

$$W_1 = [2\epsilon_1\epsilon_2N_DV_D/qN_A(\epsilon_1N_A + \epsilon_2N_D)]^{1/2} \quad (1)$$

$$W_2 = [2\epsilon_1\epsilon_2N_AV_D/qN_D(\epsilon_1N_A + \epsilon_2N_D)]^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{及 } V_{D1} = \eta V_D, V_{D2} = (1 - \eta)V_D; \eta^{-1} = \left(1 + \frac{\epsilon_1N_A}{\epsilon_2N_D}\right)$$

其中,自建势垒 $V_D = \phi_1 - \phi_2$, 导带分裂 $\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2 = 0.50 \sim -0.51 \text{ eV}$, 价带分裂 $\Delta E_v = (E_{g2} - E_{g1}) - \Delta E_c = 0.47 \sim 1.48 \text{ eV}$ 。由能带图可见,异质结的能带在界面上是断续的,在能带图中势垒界面在 CdS 处有一个势垒尖峰,且此势垒尖峰处于势垒上的位置及尖峰的高度将随 CdS、CdTe 薄膜的电子亲和势及掺杂浓度的不同而不同,概括起来可出现下列 3 种情况:1) 势垒尖峰不露出 CdTe 导带底;2) 势垒尖峰露出 CdTe 导带底(当 $\Delta E_c > 0$, 且 $\eta \sim 0$ 即 $N_D \ll N_A$ 时,有可能发生);3) 当导带分裂 $\Delta E_c < 0$ 时能带图中的势垒尖峰将消失。同时由能带图还可知:异质结的能带结构无论如何热平衡,电子和空穴越过结克服的势垒高度都不同。空穴由 CdTe 价带到 CdS 价带应克服的势垒高度为 $qV_D + \Delta E_v$, 而电子由 CdS 导带到 CdTe 导带应克服的势垒高度为 $qV_D - \Delta E_c$ (即空穴遇到的势垒高度比电子遇到的势垒高度高 $\Delta E_v + \Delta E_c = E_{g2} - E_{g1} = 0.97 \text{ eV}$)。所以通过异质结势垒的将主要是电子流,空穴流可忽略。在下面的讨论中只计及电子电流的贡献。

对 1)、3) 2 种能带结构情势垒尖峰的作用变得很弱,甚至消失。按通常的 p-n 结扩散模型,求解注入 P 区 CdTe 中的少子所满足的稳态连续性方程,可得 CdS/CdTe 异质结的正向电流密度为(在略去势垒区的复合和界面态的影响时):

$$j_d = j_0(e^{qV/kT} - 1) \quad (3)$$

其中反向饱和电流

$$j_0 = qD_{n1} \frac{n_{20}}{L_{n1}} e^{-(qV_D - \Delta E_c)/kT} = kT\mu_{n1} \frac{n_i^2}{N_A L_{n1}} = \frac{kT\mu_{n1}}{N_A L_{n1}} \frac{4(2\pi kT/h^2)^3 (m_{n1}^* m_{p1}^*)^{3/2} e^{-E_{g1}/kT}}{7.23 \times 10^{-16} \text{ mA/cm}^2} \quad (4)$$

对 2) 中的能带结构情形,势垒尖峰较高,此时在结的 CdTe 区一侧存在一较深的三角形的电子势阱,此势阱中将存在大量的二维电子气体要向 n 区输出,所以必须考虑其对电流的贡献。用 Anderson 扩散模型处理,通过求解注入 P 区的电子的和注入 n 区的二维电子的稳态连续性方程可得其正向电流密度为:

$$j = j'_0 [e^{qV(1-\eta)/kT} - e^{-qV\eta/kT}]$$

$$\text{其中 } j'_0 = \frac{qn_{20}D_{n2}}{L_{n2}} e^{-qV_{D2}/kT} \approx j_0 e^{(qV_D\eta - \Delta E_c)/kT}。可见$$

$j_0 \ll j'_0$, 大的反向电流 j'_0 对提高电池的开路电压、效率等是很不利的,所以 2) 中的能带结构在高效率的太阳能电池中应当尽可能避免,对 CdS/CdTe 异质结,只要 $N_D \geq 0.5 N_A$ 即可避免出现此能带结构。现在太阳能电池领域所备制的 CdS/CdTe 太阳能电池几乎都能满足此要求。因此在以下讨论电池的理想转换效率时 2) 中的情况将不考虑,用式(3)表达异质结的伏安特性。

2 CdS/CdTe 异质结太阳能电池的极限转换效率

2.1 光生电流的最大值

首先考虑最理想的情况,设入射光谱中所有能量 $h\nu \geq E_{g1}$ 的光子均能在 CdS/CdTe 太阳能电池中产生电子-空穴对,并且此电子-空穴对可全部被电池所收集。而产生最大光生电流。讨论中将入射光谱选定为目前最广泛使用的太阳辐射地面标准 AM1.5 太阳辐射谱,使用 ERDA 的标准光谱数据,且已归一化到功率密度为 $W_0 = 100 \text{ mW/cm}^2$, 使其接近地面接收到的太阳辐射功率密度的最大值。用数字计算方法可算得该辐射光谱中满足 $h\nu \geq E_{g1}$ 的光子数为:

$$N(E_{g1}) = \sum_{\lambda=0}^{\lambda_{\max}} N_{\lambda} \Delta\lambda = 1.61057 \times 10^{17} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \\ (\lambda_{\max} = 1.24/E_{g1} = 8.55 \times 10^{-7} \text{ m})$$

N_{λ} 为单位时间入射到单位面积上在波长 λ 附近单位波长范围内的光子数。

所以 CdS/CdTe 异质结太阳能电池在 AM1.5 太阳光谱照射下所能产生的最大光生电流密度为:

$$j_{L\max} = qN(E_{g1}) = 31 \text{ mA/cm}^2 \quad (5)$$

2.2 极限转换效率

当受光照的太阳电池接上负载时,光生电流流经负载并在负载两端建立起端电压,此时太阳电池的工作情况可用图2所示的等效电路来描述。流经负载的电流为:

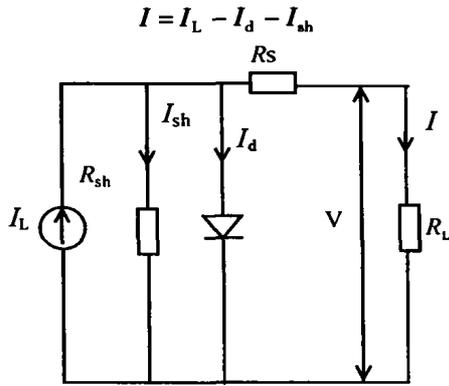


图2 太阳电池的等效电路图

或用电流密度表示为: $j = j_L - j_d - j_{sh}$, 其中 j_d 为 CdS/CdTe 异质结的正向电流密度。将式(3)代入可得太阳电池的负载电流电压关系为:

$$j = j_L - j_0 [e^{q(V+R_s j)/kT} - 1] - \frac{V + R_s j}{R_{sh}} \quad (6)$$

现考虑理想极限情况即 $R_{sh} \rightarrow \infty, R_s \rightarrow 0, j_L = j_{LMAX} = 31 \text{ mA/cm}^2$ 则式(6)变为:

$$j = j_L - j_0 (e^{qV/kT} - 1) \quad (7)$$

由此可得开路电压

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln(1 + j_L/j_0) = 0.99 \text{ V} \quad (8)$$

短路电流密度 $j_{sc} = j_L = 31 \text{ mA/cm}^2$

输出功率 $P = jV = [j_L - j_0 (e^{qV/kT} - 1)] V$

由 $dP/dV = 0$ 可得最大输出功率点之电压 V_m 满足:

$$(1 + qV_m/kT) e^{qV_m/kT} = 1 + j_L/j_0 \quad (9)$$

可解得: $V_m = 0.8975 \text{ V}$

将 V_m 代入式(7)有:

$$j_m = (j_L + j_0) \frac{qV_m/kT}{1 + qV_m/kT} = 30.13 \text{ mA/cm}^2 \quad (10)$$

填充因子(用 F 表示):

$$F = \frac{P_m}{V_{oc} j_{sc}} = \frac{V_m}{V_{oc}} \left\{ 1 - \frac{j_0}{j_{sc}} (e^{qV_m/kT} - 1) \right\} = 0.881 \quad (11)$$

从而 CdS/CdTe 太阳电池在 AM1.5 太阳光谱照射下的极限转换效率为:

$$\eta = \frac{j_{sc} V_{oc} F}{W_0} = \frac{V_m j_m}{W_0} = 27\% \quad (12)$$

3 考虑部分材料参数后的转换效率

3.1 考虑材料参数影响后的光生电流

考虑材料对入射光子的吸收及各区载流子的产生、复合、扩散等因素后,光生电流将会减少。因为太阳电池中各区产生的光生载流子必须在复合之前越过耗尽区才能对光生电流有贡献。所以求解实际的光生电流必须考虑到各区中载流子的产生、复合、扩散、漂移等各种因素的影响。

设太阳电池被波长为 λ 的单色光照射时产生的光生电流密度为 $j_L(\lambda)$, 则太阳电池的总光生电流密度为: $j_L = \int j_L(\lambda) d\lambda$ 积分对入射光谱中的所有波长进行 $j_L(\lambda)$ 为波长 λ 的入射光在太阳电池各区产生的光生电流密度之和,一般可表为^[6]:

$$j_L(\lambda) = j_1(\lambda) + j'_1(\lambda) + j_2(\lambda) + j'_2(\lambda)$$

式中 $j'_1(\lambda), j_1(\lambda)$ 分别为 CdTe 中空间电荷区和中性区贡献的光生电流密度 $j'_2(\lambda), j_2(\lambda)$ 分别为 CdS 中空间电荷区和中性区贡献的光生电流密度。在 CdS/CdTe 异质结太阳电池中 $j_2(\lambda)$ 可不考虑, 因为 CdS 窗口层一般厚度较小通常接近 CdS 中耗尽区的宽度, 所以电中性区宽度常可忽略。以下分别计算 $j_1(\lambda), j'_1(\lambda), j'_2(\lambda)$ 。

计算中 CdS、CdTe 的电子亲和势选取为太阳电池领域经常使用的值 $x_1 = 4.28 \text{ eV}, x_2 = 4.5 \text{ eV}$; 薄膜的厚度根据近期人们在实验上研制的较高效率的太阳电池尺寸^[8] 选取为 $d_1 = 4 \mu\text{m}, d_2 = 60 \text{ nm}$; 且设 CdS 和 CdTe 的吸收系数当 $h\nu < E_g$ 时 $\alpha = 0$, 当 $h\nu \geq E_g$ 时 α 为常数, 由现有的实验结果分析, 可取 $\alpha_2(\text{CdS}) = 2 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}, \alpha_1(\text{CdTe}) = 5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 。

对空间电荷区, 设光照下所产生的光生载流子均可被电场所分离, 由各区中光生载流子的产生率(设量子效率为 1):

$$g_1(x) = \alpha_1 N_A e^{-\alpha_2 d_2} e^{-\alpha_1 x} \quad (0 < x < W_1)$$

$$g_2(x) = \alpha_2 N_A e^{-\alpha_2 x} \quad (d_2 - W_2 < x < d_2)$$

可算得各区贡献的光生电流密度分别为:

$$j'_1(\lambda) = \int_0^{W_1} q N_A \alpha_1 e^{-\alpha_2 d_2} e^{-\alpha_1 x} dx =$$

$$qN_{\lambda}\alpha_1 e^{-\alpha_2 d_2} (1 - e^{-\alpha_1 W_1}) \quad (13)$$

$$j'_2(\lambda) = \int_{d_2 - W_2}^{d_2} qN_{\lambda}\alpha_2 e^{-\alpha_2 x} dx = qN_{\lambda}\alpha_1 e^{-\alpha_2 d_2} (e^{\alpha_1 W_1} - 1) \quad (14)$$

对在 CdTe 中空间电荷区以外的电中性区,光照下所产生的光生电子必需扩散到势垒区中去才能被电场所分离,从而对光生电流做出贡献,电中性区电子扩散过程

$$j_1(\lambda) = qD_{n1} \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} \Big|_{x=x_1} = qN_{\lambda} \frac{\alpha_1 L_{n1}}{\alpha_1^2 L_{n1}^2 - 1} e^{-\alpha_2 d_2} e^{-\alpha_1 W_1} \cdot \left\{ \alpha_1 L_{n1} - \left[\frac{\frac{s_n L_{n1}}{D_{n1}} \left(\text{ch} \frac{d_1 - W_1}{L_{n1}} - e^{-\alpha_1(d_1 - W_1)} \right) + \text{sh} \frac{d_1 - W_1}{L_{n1}} + \alpha_1 L_{n1} e^{-\alpha_1(d_1 - W_1)}}{\frac{s_n L_{n1}}{D_{n1}} \text{sh} \frac{d_1 - W_1}{L_{n1}} + \text{ch} \frac{d_1 - W_1}{L_{n1}}} \right] \right\}$$

若忽略背表面的复合即设 $S_n = 0$ 有

$$j_1(\lambda) = qN_{\lambda} \frac{\alpha_1 L_{n1}}{\alpha_1^2 L_{n1}^2 - 1} e^{-\alpha_2 d_2} e^{-\alpha_1 W_1} \cdot \left\{ \alpha_1 L_{n1} - \left[\frac{\text{sh} \frac{d_1 - W_1}{L_{n1}} + \alpha_1 L_{n1} e^{-\alpha_1(d_1 - W_1)}}{\text{ch} \frac{d_1 - W_1}{L_{n1}}} \right] \right\} \quad (16)$$

由式(13)、(14)、(16) 可得太阳能电池光生电流密度:

$$j_L = \sum_{\lambda=0}^{\lambda_{\max}} [j_1(\lambda) + j'_1(\lambda) + j'_2(\lambda)] \Delta\lambda = 26.56 \text{ mA/cm}^2 \quad (17)$$

3.2 转换效率

此时光生电流密度为 $j_L = 26.56 \text{ mA/cm}^2 = j_{sc}$, 将此 j_L 分别代入式(8)、(9)、(10)、(11)、(12) 可算得考虑部分材料参数影响后 $V_{oc} = 0.986 \text{ V}$, $V = 0.893 \text{ V}$, $j_m = 25.81 \text{ mA/cm}^2$, $F = 0.88$, $\eta = 23\%$ 。

4 讨 论

以上首先从理论上讨论了 CdS/CdTe 异质结的电流电压特性,给出了 CdS/CdTe 异质结的能带结构,对高性能的 CdS/CdTe 异质结太阳能电池其能带结构中势垒尖峰一般情况不露出 CdTe 导带底,所以其电流电压特性与一般 p-n 结相似。只是由于电子和空穴越过结时遇到的势垒高度的较大差异导致结电流主要由电子提供,而可不计空穴电流的作用。在忽略势垒区的复合和界面态的影响时,给出了该异质结的电流 -

所满足的稳态连续性方程为:

$$g_1(x) - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + D_{n1} \frac{\partial^2 (n_p - n_{p0})}{\partial x^2} = 0 \quad (15)$$

由边界条件: $x = x_1$ 时, $n_p = n_{p0}$; $x = d_1$ 时, $D_{n1} \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} \Big|_{x=d_1} = S_n (n_p - n_{p0})$, (S_n 为电池背表面复合速度), 由式(15) 可解得 $n_p - n_{p0}$, 于是到达 x_1 处的电子电流密度为:

电压关系。在此基础之上研究和讨论了 CdS/CdTe 太阳能电池在理想情况下的极限转换效率,由结果可见,在不考虑任何损失的条件下,其电池转换效率在 AM1.5 太阳光谱辐射下可达 27%, 与以前人们的预计值相符合。这对实际 CdS/CdTe 太阳能电池的研究、制备及生产有很好的指导意义,因为在讨论极限转换效率时所忽略的各种损失,总是可以通过不断改进电池各层材料的制作工艺,优化电池结构和材料的各种参数,协调电池的各种配置,使之不断地减少,直至最少,甚至趋于 0,从而使转换效率趋于极限效率。例如在本文中研究和讨论的忽略了电池表面反射损失,背表面复合及串并连电阻影响后的太阳能电池,所得到的电池转换效率在 AM1.5 太阳光谱辐射下仍可达 23% (此效率还可通过改变材料的各种参数的组合和电池结构加以改变和提高)。对表面的反射损失今已有各种手段使之减到很小,背表面复合可通过采用复合背接触层使之非常低以至可忽略,而电池的串并连电阻的影响现有的各种制作工艺也可使其降到比较低(如 1 cm^2 CdS/CdTe 太阳能电池的串联电阻已有做到 0.5Ω 的报道^[8]), 所以此 23% 的效率是有望接近的。的确,近年来实际制备的 CdS/CdTe 太阳能电池的转换效率也呈现出不断上升的趋势,已有将近 10 个研究小组报道取得了高于 11% 的效率,其中以 CCS 方法制作的小面积 CdS/CdTe 太阳能电池效率已达 16%^[9], 另有 2 个组织也取得 15.8% 的效率。所以进一步提高 CdS/CdTe 异

质结太阳能电池的转换效率无论从理论上还是从实际的制备上看都是大有希望的。

5 结 论

理论上对 CdS/CdTe 异质结太阳能电池异质结的特性进行了研究,并在此基础之上计算给出了太阳能电池的理论极限转换效率,和考虑部分材料参数影响时实际 CdS/CdTe 异质结太阳能电池的转换效率。从近期实际制备 CdS/CdTe 太阳能电池的研究进展和合理的理论分析看,此实际电池的效率在不久将有可能到达。对太阳能电池的研究和制备有很好的指导意义。

参考文献:

- [1] 季秉厚,王万录.多晶薄膜与太阳电池[J].太阳能学报,1999,20:102-114.
- [2] 崔容强,黄燕,孙铁囤.中国太阳能光伏发电面临的困难与前景[J].能源工程,1999,5:1-3.
- [3] 黄德修.半导体光电子学[M].成都:成都电子科技大学出版社,1989.40-68.
- [4] 冯良桓,蔡伟,郑家贵,等.碲化镉复合背接触层对碲化镉太阳能电池性能的影响[J].太阳能学报,2001,22(4):403-408.
- [5] 高桥清,滨川圭弘,俊川昭雄.太阳光发电[M].北京:新时代出版社,1987.47-52.
- [6] 赵富鑫,魏彦章.太阳电池及其应用[M].北京:国防工业出版社,1985.120-134.
- [7] 王家骅,李长键,牛文成.半导体器件与物理[M].北京:科学出版社,1983.6-10.
- [8] 刘恩科,朱秉升,罗晋生.半导体物理学[M].北京:国防工业出版社,1989.50-63.
- [9] ARAMOTO T, KUMAZAWA S, HIGUCHI H, et al. 16.0% efficient thin-film CdS/CdTe solar cells[J]. Jpn J Appl Phys, 1997, 36(10): 6 304-6 305.

Investigation on Limit Efficiency of CdS/CdTe Heterojunction Solar Cells

GUO Jiang^{1,2}, WANG Wan-lu^{1,3}, LIU Gao-bin¹, FEN Liang-huan⁴

(1. Department of Applied Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Department of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. Key Laboratory of Education Ministry of for Optoelectronic Technology and System, Chongqing 4000044, China;

4. Department of Material Science, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The current-voltage properties of CdS/CdTe heterojunction are discussed, then, the limit efficiency of CdS/CdTe heterojunction solar cells are investigated under AM1.5 illumination. Analysis results show that the efficiency of solar cells can be achieved to 27% at idealized limit conditions without any loss, which is in agreement with previously reference result. At the same time, the realistic efficiency of CdS/CdTe heterojunction solar cells is about 23%, when some effect of material parameters are considered. From the considerable progress of CdS/CdTe solar cells during recent years, theoretical efficiency of 23% can be expected in the near future.

Key words: CdS/CdTe heterojunction solar cells; Photo-generated current; conversion efficiency

(编辑 张 芊)