

基于双结模型非理想太阳能电池伏安特性参数数值分析

赵守仁^{1,2}, 黄志鹏^{2,3}, 孙雷^{1,2}, 孙朋超², 张传军¹,
邬云骅², 曹鸿², 黄志明¹, 王善力², 褚君浩^{1,2*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;
2. 上海太阳能电池研究与发展中心 上海 201201;
3. 华东师范大学, 上海 200241)

摘要:提出了一种对于太阳能电池光照条件和暗特性条件下对其伏安特性全段进行拟合提取参数的改进方法. 对太阳能电池 J - V 曲线进行分段, 提取每段的 4 个关键参数: 串联电阻 (R_s)、并联电阻 (R_{sh})、品质因子 (n)、反向饱和电流密度 (J_0). 这种方法采用了双结电路模型法, 并以 CdS/CdTe 薄膜电池为例进行了光照下和暗特性分析, 得到了比单结电流模型更多的参数, 并且具有较高的拟合精度 (误差 $< 0.7\%$).

关键词: CdS/CdTe 薄膜; 太阳能电池; 伏安特性; 双结电路模型; Rollover

中图分类号: TM914.4 文献标识码: A

Numerical analysis of the non-ideal current-voltage characteristics of solar cell

ZHAO Shou-Ren^{1,2}, HUANG Zhi-Peng^{2,3}, SUN Lei^{1,2}, SUN Peng-Chao², ZHANG Chuan-Jun¹,
WU Yun-Hua², CAO Hong², HUANG Zhi-Ming¹, WANG Shan-Li², CHU Jun-Hao^{1,2*}

(1. National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Shanghai Center for Photovoltaics, Shanghai 201201, China;
3. East China Normal University, 200241, China)

Abstract: A revised method to evaluate parameters of solar cell from current-voltage characteristics, under illuminated or non-illuminated conditions, was described. The series resistance (R_s), the shunt resistance (R_{sh}), the ideality factor (n), and the reverse saturation current density (J_0) were extracted using the two diode circuit model from selected regions of the J - V curves. Using the presented model, more parameters with higher fitted precision have been extracted from experimental J - V curves of a CdS/CdTe thin film solar cell than using a single diode circuit one.

Key words: CdS/CdTe thin film; solar cell; current-voltage characteristics; two diode circuit model; Rollover

PACS: 88.40.hj, 88.40.jm, 85.60.Bt

引言

太阳能电池伏安特性曲线对于评价太阳能电池

具有重要意义. 常用参数开路电压 (V_{oc})、短路电流 (J_{sc})、最大功率点 (P_m) 容易从曲线获得. 其他重要参数 (串联电阻 (R_s)、并联电阻 (R_{sh})、品质因子

收稿日期: 2012-10-24, 修回日期: 2012-12-03

Received date: 2012-10-24, revised date: 2012-12-03

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KGCX2-YW-38)、(KGCX2-YW-384); 上海市 2012 年度“科技创新行动计划”节能减排领域项目 (12dz1201000)

Foundation items: supported by the important initiatives in the knowledge innovation project of Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. KGCX2-YW-38)、(Grant Nos. KGCX2-YW-384); 2012-Shanghai, "Science and technology innovation action plan" energy-saving emission reduction project (Grant Nos. 12dz1201000)

作者简介 (Biography): 赵守仁 (1979-), 男, 山东滕州人, 助研, 博士研究生, 主要研究领域为 CdS/CdTe 薄膜电池中试制备及其机理研究. E-mail: srzhao@mail.sitp.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jhchu@mail.sitp.ac.cn

(n)、反向饱和电流(J_s)由于伏安特性曲线为超越方程需要借助一定手段获得,截止目前已有很多种方法对其进行拟合.从不同角度大致类型如下:(1)光照条件:恒定光照条件^[1]、非光照条件^[2,3]、恒定光照条件和非光照条件^[4-5]、变光照条件下^[6];(2)电池模型:单结电路模型法^[7,8]、双结电路模型法^[9,10];(3)数学处理方法:LambertW 方程法^[11-13]、最小二乘法^[14-19]、垂直优化法^[20]、五点分析法^[21]、电导优化法^[22,23]等.

本文拟合基于恒定光照(100 mW cm^{-2})和无光照条件下,室温 300 K,采用双结电流模型和最小二乘法对 CdS/CdTe 薄膜太阳能电池伏安特性进行拟合.是对 Bouzidi^[19]采用最小二乘法的改进和适用范围的扩大,前者基于单结模型基础上对于光照下进行的理论分析,当正向偏压较大时,理论值会偏离实际值,不能很好适用于 CdS/CdTe 薄膜太阳能电池在较大正偏时的分析.这是由于 p-CdTe 需要较大功函数的金属($\Phi_m \geq 6.0 \text{ eV}$)才可以使之形成欧姆接触,有着较大功函数的 Au($\Phi_m = 5.1 \text{ eV}$)形成 p-CdTe/Au 肖特基接触的势垒高度为 0.9 eV.因此必须通过 p-CdTe 表面重掺杂减小其势垒高度.一般认为当势垒高度小于 0.2eV 可以形成比较好的欧姆接触^[24].伏安曲线较大正向偏压可以显示出其对背接触好坏.因此研究对于 $V > V_{oc}$ 的伏安曲线拟合具有重要意义,这是研究 CdS/CdTe 薄膜电池通过其电流密度-电压曲线判断背接触状况的一项重要手段.

1 理论分析

图 1 所示,当正偏电压 V 加在双结电路两端时,该电压可以由三部分组成: n^+ -CdS/p-CdTe 主结(PN 结)的分压 V_m 、背部肖特基结 p-CdTe/ p^+ -CdTe:Cu/Au (MS 结)的分压 V_b 、串联电阻分压 JR_s ;

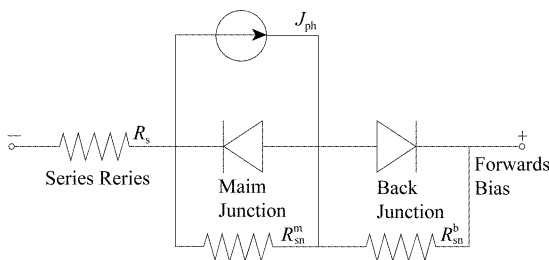


图 1 太阳能电池双结电路模型
Fig. 1 Two-diode circuit model of the solar cell

在光照下,CdS/CdTe 薄膜电池电流为:

$$J = J_m = J_b = J_{series} \quad (2)$$

式(2)中 J_m 、 J_b 、 J_{series} 分别为流经主结、背结及内部串联电阻电流.

流经主结的光照下电流为:

$$J_m = J_{m0} [\exp(-qV_m/nkT) - 1] - J_{ph} + V_m/R_{sh} \quad (3)$$

式(3)为非理想 PN 结伏安特的数学模型,式中五个参数:光生电流 J_{ph} 、反向饱和电流 J_{m0} 、品质因子 n、串联电阻 R_s 、并联电阻 R_{sh} .当 $V < V_{oc}$ 时,外加偏压位于主结和串联电阻上面,背接触分压忽略不计.此时 $V_m = V - JR_s$.

式(3)可以写为:

$$J_m = J_{m0} [\exp(-q(V - JR_s)/nkT) - 1] - J_{ph} + (V - JR_s)/R_{sh} \quad (4)$$

同理,无光照下, $J_{ph} = 0$;其伏安特性为:

$$J_m = J_{m0} [\exp(-q(V - JR_s)/nkT) - 1] + (V - JR_s)/R_{sh} \quad (5)$$

电流流经背接触为:

$$J_b = -J_{b0} [\exp(-qV_b/n_bkT) - 1] + V_b/R_{sh}^b \quad (6)$$

因此实际测得 J-V 曲线为两段 pn 结 J-V 数据的叠加,见图 2.令 $dJ/dV = 0$,得到对应电压 V'_{oc} ($V'_{oc} \geq V_{oc}$);作为 V_m 和 V_b 的分界点.伏安特性曲线在较高正偏下的“Rollover”与背接触势垒有关^[25].

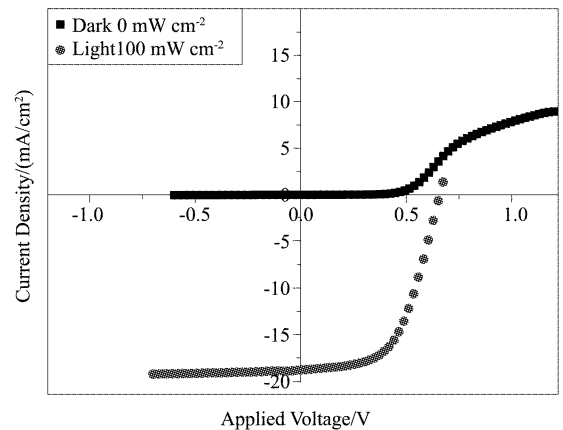


图 2 CdS/CdTe 电池有光照和无光照伏安曲线
Fig. 2 J-V curve of a CdS/CdTe solar cell under illumination (grey line) and dark condition (black line).

1.1 数值分析

令 $V_{th} = kT/q$ 和 $G_{sh} = 1/R_{sh}$.

则得:

$$J = J_0 \left\{ \exp \left[\frac{1}{nV_{th}} (V - JR_s) \right] - 1 \right\} + G_{sh} (V - JR_s) \quad 0 \text{mWcm}^{-2}, \quad (7-1)$$

$$J = J_0 \left\{ \exp \left[\frac{1}{nV_{th}} (V - JR_s) \right] - 1 \right\} + G_{sh} (V - JR_s) - J_{ph} \quad 0 \text{mWcm}^{-2}. \quad (7-2)$$

令:

$$\bar{J}_0 = \frac{J_0}{1 + R_s G_{sh}} \quad 0 \text{ 或 } 100 \text{ mWcm}^{-2}, \quad (8-1)$$

$$\bar{G}_{sh} = \frac{G_{sh}}{1 + R_s G_{sh}} \quad 0 \text{ 或 } 100 \text{ mWcm}^{-2}, \quad (8-2)$$

$$\bar{J}_{ph} = \frac{J_{ph}}{1 + R_s G_{sh}} \quad 100 \text{ mWcm}^{-2}. \quad (8-3)$$

计算光照条件下采用以上 3 个公式;计算暗条件下采用前两个公式.

则得:

$$J = J_0 \left\{ \exp \left[\frac{1}{nV_{th}} (V - JR_s) \right] - 1 \right\} + \bar{G}_{sh} V \quad 0 \text{mWcm}^{-2}, \quad (9-1)$$

$$J = \bar{J}_0 \left\{ \exp \left[\frac{1}{nV_{th}} (V - JR_s) \right] - 1 \right\} + \bar{G}_{sh} V - \bar{J}_{ph} \quad 100 \text{ mWcm}^{-2}. \quad (9-2)$$

对于反偏和低正偏情况下:

$$J = \bar{G}_{sh} V \quad 0 \text{mWcm}^{-2}, \quad (10-1)$$

$$J = \bar{G}_{sh} V - \bar{J}_{ph} \quad 100 \text{ mWcm}^{-2}. \quad (10-2)$$

在该段进行线性拟合可以得到光照下 \bar{G}_{sh} 和 \bar{J}_{ph} 和无光照下的 \bar{G}_{sh} .

令 $J_c = J + \bar{G}_{sh} V$, 在正偏 ($V - JR_s > kT$) 则有:

$$J_c = \bar{J}_0 \left\{ \exp \left[\frac{1}{nV_{th}} - (V - JR_s) \right] \right\} \quad 0 \text{mWcm}^{-2}, \quad (11-1)$$

$$J_c = \bar{J}_0 \left\{ \exp \left[\frac{1}{nV_{th}} - (V - JR_s) \right] \right\} - \bar{J}_{ph} \quad 100 \text{mWcm}^{-2}. \quad (11-2)$$

对超越方程(11)进行变换可得:

$$V = nV_{th} \ln \bar{J}_0 + nV_{th} \ln(1 + J_c) + JR_s \quad 0 \text{mWcm}^{-2}, \quad (12-1)$$

$$V = nV_{th} \ln \frac{\bar{J}_{ph}}{J_0} + nV_{th} \ln \left(1 + \frac{J_c}{J_{ph}} \right) + JR_s \quad 100 \text{mWcm}^{-2}, \quad (12-2)$$

(12) 可以写为一般方程形式:

$$f(J) = C_0 + C_1 \ln(J_c) + C_2 J \quad 0 \text{mWcm}^{-2}, \quad (13-1)$$

$$f(J) = C_0 + C_1 \ln \left(1 + \frac{J_c}{J_{ph}} \right) + C_2 J \quad 100 \text{mWcm}^{-2}. \quad (13-2)$$

采用 matlab 或者 mathcad 等数值分析软件对方程组进行求解,利用最小二乘法^[14-19]求出 C_0 、 C_1 和 C_2 . 可以分别得到 $V < V'_{oc}$ 范围内的光照下五个参数:光生电流 J_{ph} 、反向饱和电流 J_{m0} 、品质因子 n 、串联电阻 R_s 、并联电阻 R_{sh} ;无光照下 4 个参数:反向饱和电流 J_{m0} 、品质因子 n 、串联电阻 R_s 、并联电阻 R_{sh} .

1.2 $V > V'_{oc}$ 数值分析

当外加偏压达到主结饱和电压 V_{oc} 后,其内建电场被拉平,剩余压降主要落在背肖特基结上.背结结构为 p-CdTe/p⁺-CdTe:Cu/Au.以暗特性为例:其对应方程见公式(6).其中 V_b 为所加外加偏压的部分分压, J_{b0} 为背结反向饱和电流, n_b 为背结品质因子, R_{sh}^b 为背结并联电阻.当主结达到饱和电压时其对应电压不再增大.剩余分压随着外置偏压的增大而增大.设定主结和串联电阻总分压为 V'_{oc} ,则 $V_b = V - V'_{oc} - \Delta J R_s$,其中由于当 $V > V'_{oc}$ 后,串联电阻分压增加,此处不能忽略不计,否则会引起较大拟合误差. $V > V'_{oc}$ 曲线段为背结的反偏段,可以拟合的参数有:反向饱和电流 J_{b0} 、并联电阻 R_{sh}^b 和品质因子 n_b . n_b 和 R_{sh}^b 在一定范围内取值利用 matlab 循环语句计算,取 RMSE 最小为最佳值.其背结并联电阻取值范围: $R_{sh}^b = \left[\frac{dJ}{dV} \right]_{V > V'_{oc}}^{-1}$.根据热电子发射理论^[26-28],肖特基势垒二极管中电流是由多数载流子空穴通过热电子发射跃过内建电势差而形成,因此可以根据背接触反向饱和电流 J_{b0} 求得对应势垒高度 Φ_b .

2 结果与讨论

测试 CdS/CdTe 样品的器件结构为 glass/FTO/CdS/CdTe/CdTe:Cu/Au.采用 Oriel 连续光谱测试仪 (AM1.5 100mW cm⁻²) 获得其在 300 K 时 J-V 实验数据,如图 2 所示.暗条件下偏压范围: -0.6 ~ 1.2 V;光照条件下偏压范围: -0.7 ~ 0.7 V.由于光照条件下正向偏压不够,“Rollover”现象不够明显.图 3 所示,采用 $dJ/dV = 0$,把电流电压数据分为两段,分界点为 V'_{oc} ,暗特性和光照下的分别为 0.630 V 和 0.605 V. $V < V'_{oc}$ 时,主结 CdS/CdTe 作用占主导,拟合分析时背结作用忽略; $V < V'_{oc}$ 时,背结 CdTe/CdTe:Cu/Au 机制占主导,主结由于 $V > V_{oc}$ 而失去整流特性,忽略不计.图 2 可以看出,暗特性下,

正偏电压较大时显现出“Rollover”;光照条件下,通过图 3 可以看到“Rollover”拐点,由于数据量不够,不能对光照条件下的背接触进行拟合.

对于拟合数据采用如下统计数据作为模型参数提取算法性能的精度指标评价.采用三个指标:均方根误差 RMSE(The root mean square error)、平均绝对误差 MAE(the mean absolute error)、平均偏差 MBE(the mean bias error).

$$RMSE = (\sum_{i=1}^m |e_i|^2 / m)^{1/2}$$

$$MBE = \sum_{i=1}^m e_i / m$$

$$MAE = \sum_{i=1}^m |e_i| / m$$

对于暗特性下, $V < V'_{oc}$ 时 $e_i = J_i - J_{i,cal}$, $V > V'_{oc}$ 时 $e_i = J_i / J_{i,cal} - 1$;对于光照下.式中 m 为测量的数据点数. I_i 为测量值; $I_{i,cal}$ 为相应的计算值.采用以上方法可以得到其对应伏安特性的八个参数: R_s 、 R_{sh} 、 n 、 J_{m0} 、 R_{sh}^b 、 n_b 、 J_{b0} 、 Φ_b .

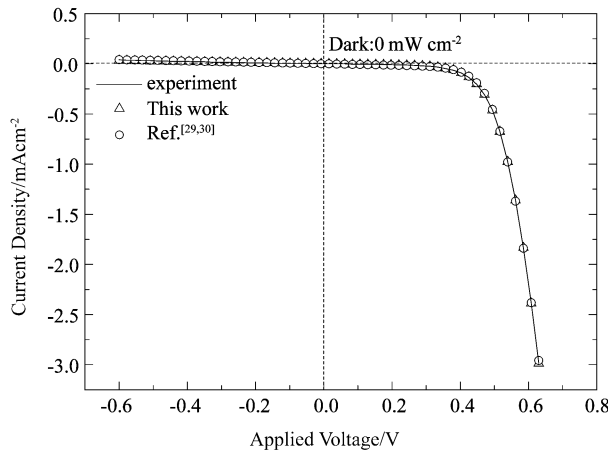


图 4 CdS/CdTe 电池有光照时理论与实验测量数据比较
Fig. 4 Comparison of theoretical and experimental curve for CdS/CdTe solar cell under illumination condition

将测量数据点在图 4、图 5 和图 6 中标出,并和采用拟合参数的电流方程算出的 $J-V$ 数据比较来验证本文提出方法确定的 CdS/CdTe 太阳电池方程的准确性.实验数据和理论曲线符合的很好,误差小于 0.7%,其对应拟合数据见表 1 和表 2.该方法也验证了背结采用与主结相同形式的太阳电池方程可以获得较好的拟合效果.

图 4 为 CdS/CdTe 薄膜电池在和 100 mW cm^{-2} 时的理论与实验测量数据比较与采用文献[31-32]方法拟合都具有较小的误差值,但是在 $V-R_s J \approx kT$ 附近理论与实验数据有些偏差.这是由于两种方法都采用了 $V-R_s J \gg kT$ 近似,由于 R_s 的较大及样品

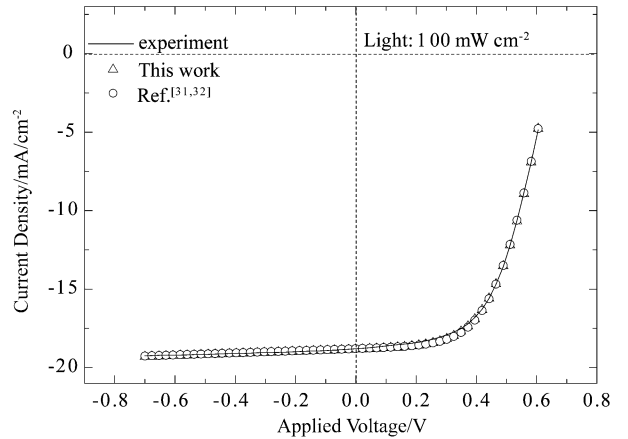


图 5 CdS/CdTe 电池无光照时理论与实验测量数据比较
Fig. 5 Comparison of theoretical and experimental curve for CdS/CdTe solar cell under dark condition ($V < V'_{oc}$)

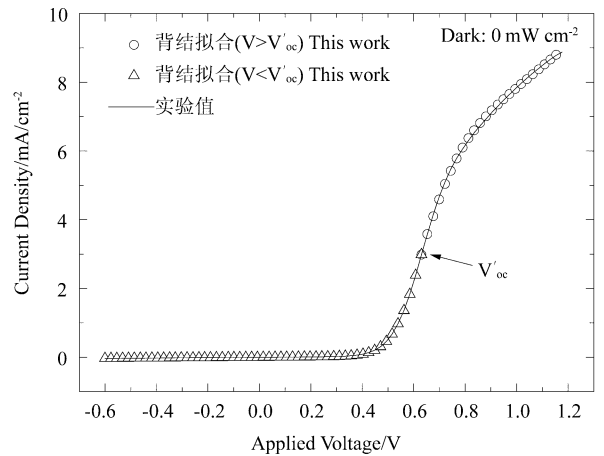


图 6 CdS/CdTe 电池无光照时理论与实验测量数据比较 (全段)
Fig. 6 Comparison of theoretical and experimental curve of CdS/CdTe solar cell under dark condition (in whole)

的 V_{oc} 偏小、品质因子较大使之近似不能完全成立所致,由于文献[31,32]方法的 R_s 较之本工作大,所以在 kT 附近理论与实验值偏差相对较大,这就导致反向饱和电流 J_0 两种方法具有差异.

图 5 为 CdS/CdTe 薄膜电池在 $V < V'_{oc}$ 和 0 mW cm^{-2} 时的理论与实验测量数据比较与采用文献[29-30]方法拟合都具有较小的误差值,在附近理论与实验数据很好吻合.这是由于虽然 R_s 较大,但是由于 R_{sh} 更大,且有较小的品质因子 n 使得 $V-R_s J \gg kT$ 近似较好成立,两种方法的反向饱和电流 J_0 差异较小.以上数据分析也表明了 R_s 的精确确定对于后面的数据拟合尤其是反向饱和电流 J_0 的精确

确定具有重要作用。

图 6 为 CdS/CdTe 薄膜电池在 0mWcm^{-2} 时的理论与实验测量数据比较. 其中 $V > V'_{oc}$ 时的理论与实验较好拟合, $\text{RMSE} < 5\%$, 并且 $V > V'_{oc}$ 和 $V < V'_{oc}$ 衔接较好. 背结 MS 结得到较好的拟合, 相关拟合数据见表 2.

表 1 所示, 采用文献 [29, 30] 与本方法拟合数据对比, 拟合误差小于 0.6% ; 采用文献 [31, 32] 与本方法拟合数据对比, 拟合误差小于 0.7% . 表 2 所示, 采用本方法拟合背结参数, 无相关文献方法比较.

表 1 文献 [29-32] 方法和本工作 CdS/CdTe 太阳能电池优化拟合参数

Table 1 Optimal parameter of CdS/CdTe solar cell obtained in Ref. [29-32] and in this work

Parameters (300 K)	0mWcm^{-2}		100mWcm^{-2}	
	Ref. [29,30]	This work	Ref. [31,32]	This work
$R_s(\Omega \text{ cm}^2)$	22.460	20.175	6.040	5.292
$R_{sh}(\Omega \text{ cm}^2)$	1.467×10^4	1.467×10^4	1.506×10^3	1.507×10^3
n	1.592	1.711	2.429	2.686
$J_0(\text{mA cm}^{-2})$	3.383×10^{-6}	7.472×10^{-6}	5.757×10^{-4}	1.542×10^{-3}
$J_{ph}(\text{mA cm}^{-2})$	0	0	18.873	18.909
RMSE (%)	0.516	0.522	0.643	0.604
MAE (%)	-0.176	-0.121	-0.135	-0.294
MBE (%)	0.426	0.615	0.453	0.400

表 2 本工作 CdS/CdTe 太阳能电池优化拟合参数

Table 2 Optimal parameter of CdS/CdTe solar cell obtained in this work

Parameters (300 K)	0mWcm^{-2}
	This work
$R_{sh}^b(\Omega \text{ cm}^2)$	1.446×10^2
n_b	2.295
$J_{b0}(\text{mA cm}^{-2})$	2.984
$\Phi_b(\text{eV})$	0.384
RMSE (%)	4.557
MBE (%)	3.727
MAE (%)	0.486

3 结论

提出了一种背结 MS 结与主结 PN 结有着相似的电流电压方程的双结电路模型法, 对背结 MS 结引入了品质因子 n 对其进行评价. 对于光照下和暗特性的拟合分析, 结合 CdS/CdTe 太阳能电池伏安特性的特点采用上述方法对正向较大偏压下的电流密度-电压数据进行拟合, 理论与实验较好吻合, 具有较高的拟合精度. 该方法可以获取相比于单结模型电流法更多参数, 对背接触影响较大的太阳能电

池的制备和研究具有很好的指导意义。

REFERENCES

- [1] Chegaar M, Ouennoughi Z, Guechi F, *et al.* Determination of Solar Cells Parameters under Illuminated Conditions[J], *Journal of Electron Devices*, 2003, 2:17-21.
- [2] Kaminski A, Marchand J J, Fave A, *et al.* New method of parameters extraction from dark I-V curve[C]. Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE. 1997:203-206.
- [3] Kaminski A, Marchand J J, Laugier A. I - V methods to extract junction parameters with special emphasis on low series resistance[J]. *Solid-State Electron* 1999, 43(4):741-745.
- [4] Rajkanan K, Shewchun J. A better approach to the evaluation of the series resistance of solar cells[J]. *Solid State Electron*, 1979, 22(2):193-197.
- [5] Aberle A G, Wenham S R, Green M A. A new method for accurate measurements of the lumped series resistance of solar cells[C]. Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty Third IEEE. 1993:133-139.
- [6] Fahrenbruch A L, Bube R H. Fundamentals of Solar Cells: Photovoltaic Solar Energy Conversion[M]. New York; Academic Press, 1983.
- [7] Bätzner D L, Romeo A, Zogg H, *et al.* CdTe/CdS Solar Cell Performance Under Low Irradiance[C]. Presented at the 17th EC PVSEC, Munich. October 2001 Paper VB1.40
- [8] Chen Y F, Wang X M, Li D, *et al.* Parameters extraction from commercial solar cells I - V characteristics and shunt analysis[J]. *Applied Energy*, 2011, 88:2239-2244.
- [9] Molina-Garcia A, Bueso M C, Kessler M, *et al.* CdTe thin-film Solar Module Modeling using a Non - Linear Regression Approach[C]. 17th Power Systems Computation Conference, Stockholm Sweden - August 22-26, 2011.
- [10] Shvydka D, Rakotoniaina J P, Breitenstein O. Lock-in thermography and nonuniformity modeling of thin-film CdTe solar cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(5):729-731.
- [11] Jain A, Kapoor A. A new approach to study organic solar cell using Lambert W-function Solar[J] *Energy Materials & Solar Cells*, 2005, 86:197-205.
- [12] Ding J L, Radhakrishnan R. A new method to determine the optimum load of a real solar cell using the Lambert W-function[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2008, 92:1566-1569.
- [13] Jain A, Kapoor A. Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2004, 81:269-277.
- [14] Bashahu M, Habyarimana A. Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance[J]. *Renewable Energy*, 1995, 6(2):129-138.
- [15] Wolf M, Noel G T, Stirn R J. Investigation of the double exponential in the current-Voltage characteristics of silicon solar cells[J]. *IEEE Transactions on Electron devices*, 1977, 24(4):419-428.
- [16] fuchs D, Sigmund H. Analysis of the current-voltage characteristic of solar cells[J]. *solid state Electronics*, 1986, 29(8):791-795.

(下转第 436 页)

降低了标记结果与模型参数间的相关性,因此与经典的 MRF 模型相比,采用本文所提基于局部统计特性的 MRF 模型具有更快的收敛速度,通常通过 2 至 3 次迭代即可收敛。

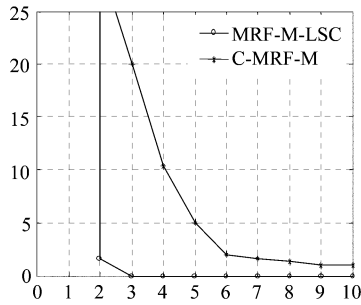


图 4 每步迭代标记结果变化像素个数
Fig 4 The changes of pixel number with each iteration

4 结论

针对复杂背景中的弱小目标检测问题,基于 MRF 理论,通过引入目标信杂比等先验信息和图像局部统计特性对 MRF 后验概率进行建模,有效提高了模型的准确性.算法在保证目标标记结果准确性的同时,有效降低了单帧图像背景的错误标记概率。

另外,由于算法降低了标记结果与模型参数间的相关性,因而提高了最优标记估计的收敛速度.最后通过仿真试验证明了上述结论的正确性。

REFERENCES

- [1] LI Z Stan. *Markov random field modeling in image analysis 3rd Edition*[M]. Springer Verlag Inc., 2009, 1-30.
- [2] Poggi G, Ragozini R P. Image segmentation by tree-structured Markov random fields [J]. *IEEE signal process letters*, 1999, **6**(7): 155-157.
- [3] ZHONG ping. *Random Field Models for Image Labeling* [D]. Changsha: National University of Defense Technology (钟平. 面向图像标记的随机场模型研究. 长沙:国防科学技术大学), 2008.
- [4] J Scharcanski, C R Jung, R T Clarke. Adaptive image denoising using scale and space consistency [J] *IEEE Trans. Image Process*, 2002, **11**(9): 1092-1101.
- [5] Sun Xin-de, Fang Gui-zhen. Infrared small targets detection based on MRF Model [J]. *Procedia Engineering*, 2012, **29**: 420-424.
- [6] Toufiq Parag. Coupled label and intensity MRF models for IR target detection[C]. *IEEE Computer Society Conference on CVPRW*, 2011, 7-13.
- [7] ZHONG Ping, WANG Run-sheng. Image segmentation based on Markov random fields with adaptive neighborhood systems[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(9): 097202.
- [8] Tzannes Alexis P, Brooks D H. Detecting small moving objects using temporal hypothesis testing [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, **38**(2): 570-586.
- [9] Charles J P, Mekkaoui-Allaoui I, Bordure G. A critical study of the effectiveness of the single and double exponential models for $I - V$ characterization of solar cells [J]. *Solid-state Electronics*, 1985, **28**(8): 807-820.
- [10] Datta S K, Mukhopadhyay K, Bandopadhyay S, et al. An improved technique for the determination of solar cell parameters [J]. *Solid State Electronics*, 1992, **35**(11): 1667-1673.
- [11] Bouzidi K, Chegaar M, Nehaoua N. New method to extract the parameters of solar cells from their illuminated $I - V$ curve [C]. 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing, Setif, Algeria. 2007:1-4.
- [12] Easwarakhanthan T, Bottin J, Bouhouch I, et al. Micro-computer-controlled simulator of a photovoltaic generator using a programmable voltage generator [J]. *Solar Cells*, 1986, **17**(2-3): 383-390.
- [13] Chan D S H, Phillips J R, Phang J C H. A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters [J]. *Solid-state Electronics*, 1986, **29**(3): 329-337.
- [14] Werner J H. Schottky barrier and pn-junction I/V plots - Small signal evaluation [J]. *Applied Physics A*, 1988, **47**: 291-300.
- [15] Chegaar M, Ouennoughi Z, Hoffmann A. A new method for evaluating illuminated solar cell parameters [J]. *Solid State Electronics*, 2001, **45**(2): 293-296.
- [16] Durose K, Edwards P R, Halliday D P. Materials aspects of CdTe/CdS solar cells [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1999, **197**: 733-742.
- [17] Stollwerck G, Sites J R. Analysis of CdTe Back-Contact Barriers [C]. Proceedings of the 13th European PVSEC, Nice, 1995, 2020-2022.
- [18] Sze S M. *Physics of Semiconductor Devices* [M], New York: Wiley, 1981: 279.
- [19] Demtsu S H, Sites J R. Effect of back-contact barrier on thin-film CdTe solar cells [J]. *Thin Solid Films*, 2006, **510**: 320-324.
- [20] Bashahu M, Nkundabakura P. Review and tests of methods for the determination of the solar cell junction ideality factors [J]. *Solar Energy*, 2007, **81**(7): 856-863.
- [21] BASHAHU M, HABYARIMANA A. Review and test of Methods for Determination of the Solar Cell Series Resistance [J]. *Renewable Energy*, 1995, **6**(2): 129-138.
- [22] Erees Q. B. Macabebe, E. Ernest van Dyk. Parameter extraction from dark current - voltage characteristics of solar cells [J]. *South African Journal of Science*, 2008, **104**: 401-404.
- [23] AMADOR R, LOPEZ R. Accurate Analytical Method for the Extraction of Solar Cell Model Parameters [J]. *Electronics Letters*, 1984, **20**(10): 406-408.
- [24] Sites J, Mauk P. Diode quality factor determination for thin-film solar cells [J]. *solar cells*, 1989, **27**: 411-417.

(上接 393 页)