

测量光伏探测器 PN 结品质因子与反向饱和电流的方法

李宏祺¹ 王惠民²

(¹ 武汉军械士官学校光电系, 湖北 武汉 430075; ² 北京理工大学信息学院, 北京 100081)

摘要 由于制造工艺和生产条件的不同, 光伏探测器的特征参量结品质因子和反向饱和电流有很大差别。提出一种 PN 结特征参量的间接测量方法, 并对该测量方法所用的数值计算方法的收敛性进行数学证明。提出了两个使用开路电压和短路电流计算光电池 PN 结品质因子和反向饱和电流的简化解析计算公式。与迭代法的计算结果相比, 使用简化解析计算公式得到的结品质因子和反向饱和电流的相对误差分别为 0.03% 和 0.25%; 与实验结果相比, 使用迭代法计算结果的开路电压值的相对误差不小于 0.3%。

关键词 光电子学; 光伏探测器; 品质因子; 反向饱和电流; 迭代法

中图分类号 TN01 **文献标识码** A

A Method of Measuring Quality Factor and Reverse Saturated Current of Photovoltaic Detector PN Junction

Li Hongqi¹ Wang Huimin²

(¹ Department of Optoelectronics, Wuhan Ordnance Noncommissioned Officers School, Wuhan, Hubei 430075, China)
(² School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The characteristic parameters quality factor and reverse saturated current of photovoltaic detectors have very big distinction since different manufacture handicraft and producing conditions. A indirect method of measuring semiconductor PN junction characteristic parameters is proposed, and the convergence property of the numerical computational method used in this method is proved. Two simplified analysis formulas on using open circuit voltage and short circuit current are proposed to calculate PN junction quality factor and reverse saturation current of the photocell. Compared with the results of the numerical computational method, the relative error of quality factor and the reverse saturated current calculated by the simplified analytical formula are 0.03% and 0.25%, respectively. Compared with experimental results, the relative errors of open-circuit voltage calculated with iterative method is not less than 0.3%.

Key words optoelectronics; photovoltaic detector; quality factor; reverse saturated current; iterative method

1 引 言

硅光伏器件是一种常用的光电探测器^[1~6], 它的特征参量有结品质因子和反向饱和电流, 它们随制造工艺和生产条件的不同有很大差别^[7]。反向饱和电流影响测量灵敏度, 结品质因子影响器件的一致性。对于阵列式或象限式器件, 在要求严格匹配的情况下, 需要各个光电池的特征参量一致, 例如, 象限式四极硅光电池要求其四个分立光电池在相同

光照度下有相同的输出电流。如何精确测量光电池的结品质因子和反向饱和电流成为研究光伏探测器件对数一致性的关键。目前检测光电池 PN 结品质因子有多种方法^[8], 包括测量中是否使用光照^[8,9]、是否考虑光电池的串联和并联电阻等^[10~12], 这些测量方法大多用于太阳电池领域^[8,9]。本文提出了一种光照实验和求解二元对数方程组数值计算相结合的测量方法, 并对所用的非线性对数方程组数值迭

作者简介: 李宏祺(1963—), 男, 河北人, 博士研究生, 主要从事光电探测和激光技术等方面的研究。

E-mail: lhqlaser@126.com

导师简介: 王惠民(1944—), 男, 江苏人, 教授, 主要从事光电探测技术方面的研究。E-mail: wanghm@bit.edu.cn

代法求解的收敛性进行了数学证明。

2 光照下的内部电流电压机制

设想 PN 结在能产生本征激发的光线照射下,凡能进入 PN 结空间电荷区的光生载流子都受内电场的作用。由于电场的方向从 N 区指向 P 区,所以空穴将被扫向 P 区,电子将被扫向 N 区。这种电荷的运动,就是 N 区流向 P 区的光生电流。因为 P 区侧的空间电荷区中原来带负电,由于空穴的进入将被中和一部分。同样,N 区侧的空间电荷区原来带正电,由于电子的进入也被中和一部分。总之,必将使原有的电场削弱,其结果相当于使 PN 结处于正向偏置。在此正向电压作用下,将引起从 P 区流向 N 区的正向扩散电流。于是,有两股电流:由空间电荷区电场将光生电子—空穴对分开,P 区收集光生空穴,N 区收集光生电子,形成从 N 区流向 P 区光生电流,该电流和经过 PN 结的反向饱和电流同向;空间电荷区电场削弱后,形成 P 区流向 N 区的扩散电流。当 PN 结两端开路时,净电流为零,此时在 PN 结两端建立起稳定的电势差,P 区为正 N 区为负。该电势差称为开路电压。如果将 PN 结两端短路,PN 结的端电压为零,流过外电路的电流最大,称为短路电流。光照下的 PN 结可以产生一个电动势,称为光生伏特效应。

根据光生伏特效应的机制,并利用 PN 结的电流-电压关系,可以得出硅光电池的电流-电压关系。令由光照而产生的光生电流用 I_L 表示,由于 PN 结空间电荷区电场将光生载流子分开,相当于使 PN 结处于正向电压 V 的作用之下,所产生的扩散电流用 I_F 表示,PN 结的反向饱和电流用 I_0 表示,PN 结品质因子用 η 表示,设热电压 $V_T = kT/q$, k 为玻尔兹曼常量, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K, T 为热力学温度,单位是开尔文,热力学温度和摄氏温度 t 的关系是: $T = t + 273.15$, q 为电子电荷, $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C。则扩散电流与正向电压的关系为

$$I_F = I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{\eta V_T}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

于是,光照下 PN 结的电流为

$$I = I_L - I_F = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{\eta V_T}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

当光电池两端短路时, $V = 0$, 由(2)式可得 $I = I_L$, 此时流过探测器的电流就是光生电流,称为短路电流,用 I_{sc} 表示,即 $I_{sc} = I_L$;

当光电池两端开路时,有 $I = 0$, 由(2)式可得

$$I_L = I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{\eta V_T}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

此时光电池两端的电压称为开路电压,用 V_{oc} 表示。由(3)式可得

$$V_{oc} = \eta V_T \ln(I_{sc}/I_0 + 1), \quad (4)$$

称为光电池的开路电压、短路电流、反向饱和电流与 PN 结品质因子关系式。

3 测量方法

根据半导体物理学,PN 结二极管的电流-电压特性可以表达为

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{\eta V_T}\right) - 1 \right], \quad (5)$$

对于硅材料分立器件, I_0 值为纳安培数量级。将(5)式变换为对数形式

$$V = \eta V_T \ln(I/I_0 + 1). \quad (6)$$

可见(4)式与(6)式在形式上相同。(4)式与(6)式中的 η 和 I_0 意义一样,都是 PN 结的特征参量,因此可用相同的解析方法。由于 η 无法直接测量,而 I_0 数值太小,只能采用间接测量的办法,先测量两组电流-电压数值,然后将测量结果代入(6)式,通过二元对数方程组求解。对于光电池,就是不同光照度下分别测量开路电压和短路电流,然后将测量结果代入(4)式,通过二元对数方程组求解。具体方法是采用联立方程组的办法,分别测得两组电流-电压数值(V_1, I_1)和(V_2, I_2),可以列出

$$V_1 = \eta V_T \ln(I_1/I_0 + 1), \quad (7)$$

$$V_2 = \eta V_T \ln(I_2/I_0 + 1), \quad (8)$$

认为测量温度已知,由(7)式,(8)式求解二元对数方程组可以得到结品质因子 η 和反向饱和电流 I_0 。考虑到二元非线性对数方程组求解的复杂性^[13],现给出一种简明求解方法。

由(7)式变换得

$$I_0 = \frac{I_1}{\exp[V_1/(\eta V_T)] - 1}, \quad (9)$$

由(8)式变换得

$$\eta = \frac{V_2}{V_T \ln(I_2/I_0 + 1)}, \quad (10)$$

把(9)式,(10)式改写成等价的迭代形式

$$I_{0n} = I_1 \left[\exp\left(\frac{V_1}{\eta_n V_T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (11)$$

$$\eta_{n+1} = \frac{V_2}{V_T} \left[\ln\left(1 + \frac{I_2}{I_{0n}}\right) \right]^{-1}, \quad (12)$$

式中 n 为迭代次数。根据 PN 结品质因子的半导体物理理论^[7],取初始值 η_0 ($1 < \eta_0 < 3$) 代入(11)式,

(12)式进行迭代。设所要求解的结品质因子的精度要求为 ϵ ，若 $|\eta_{n+1} - \eta_n| < \epsilon$ ，则认为迭代方程组收敛， η_{n+1} 就是所要求解的 PN 结品质因子，相应的 I_{0n+1} 就是求解的 PN 结反向饱和电流。

4 迭代求解法收敛性的证明

根据文献[13]，设 $I = a, V/V_T = b, I_0 = x, \eta = y$ ，

则(11)式，(12)式可以变换为

$$x_n = a_1 [\exp(b_1/y_n) - 1]^{-1} = \phi(y_n), \quad (13)$$

$$y_{n+1} = b_2 [\ln(1 + a_2/x_n)]^{-1} = f(x_n), \quad (14)$$

将(13)式代入(14)式，可得

$$y_{n+1} = f[\phi(y_n)]. \quad (15)$$

根据所述定理，若迭代(15)式收敛，需

$|\{f[\phi(y)]\}'| < 1$ ，由(15)式得

$$\begin{aligned} \{f[\phi(y)]\}' &= f'(\phi)\phi'(y) = -\frac{b_2}{[\ln(1 + a_2/x)]^2} \frac{1}{1 + a_2/x} \left(-\frac{a_2}{x^2}\right) \frac{-a_1}{[\exp(b_1/y) - 1]^2} \exp\left(\frac{b_1}{y}\right) \left(-\frac{b_1}{y^2}\right) = \\ &= \frac{b_2}{[\ln(1 + a_2/x)]^2} \frac{a_2}{x(x + a_2)} \frac{a_1}{[\exp(b_1/y) - 1]^2} \exp\left(\frac{b_1}{y}\right) \frac{b_1}{y^2} = \frac{b_1}{b_2} \frac{a_2}{a_1} \frac{a_1 + x}{a_2 + x}. \end{aligned} \quad (16)$$

将 $b_1 = V_1/V_T, b_2 = V_2/V_T, a_1 = I_1, a_2 = I_2, x = I_0, \eta = y$ 代入(16)式，可得

$$\{f[\phi(\eta)]\}' = \frac{V_1}{V_2} \frac{I_2}{I_1} \frac{1 + I_1/I_0}{1 + I_2/I_0} = \frac{V_1/(\eta V_T) \exp[V_1/(\eta V_T)]}{\exp[V_1/(\eta V_T)] - 1} \frac{\exp[V_2/(\eta V_T)] - 1}{V_2/(\eta V_T) \exp[V_2/(\eta V_T)]}, \quad (17)$$

注意到当 $x > 0$ 时，函数 $x e^x / (e^x - 1)$ 单调增加，故若 $V_1 < V_2$ ，则 $\{f[\phi(\eta)]\}' < 1$ 。

根据证明，只要使(11)式，(12)式选取合适的初始值和电压值，使 $V_1 < V_2$ ，迭代总可以收敛到所要求的计算精度，通过迭代法求出 PN 结品质因子 η 和反向饱和电流 I_0 。计算过程表明，若(11)式，(12)式中使 $V_1 < V_2, I_1 < I_2$ ，则迭代收敛；若 $V_1 > V_2, I_1 > I_2$ ，则迭代发散。计算过程和证明结果符合。

5 简化解析公式

在参考文献[10, 14]中提到了 PN 结品质因子的简化计算公式，但没有公式的证明，也没有分析使用公式时产生的误差。实际上在证明 PN 结品质因子^[15, 16] η 的简化解析公式的同时，还可以得到反向饱和电流 I_0 的简化解析公式。

设(9)式分母中的指数项数值远远大于 1，则可以简化为

$$I_0 = I_1 \exp\left(-\frac{V_1}{\eta V_T}\right). \quad (18)$$

假设 $\eta = 2, V_1 = 238.1 \text{ mV}, t = 28.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ，使用(18)式代替(9)式产生的误差为

$$\frac{\Delta I_0}{I_0} = \frac{\frac{I_1}{\exp[V_1/(\eta V_T)] - 1} - \frac{I_1}{\exp[V_1/(\eta V_T)]}}{\frac{I_1}{\exp[V_1/(\eta V_T)] - 1}} = 0.0103. \quad (19)$$

当开路电压大于 238.1 mV 时，使用(18)式代替

(9)式产生的误差不会超过 1%。同理，由于一般光电电池短路电流远远大于反向饱和电流，使用公式

$$\eta = \frac{V_2}{V_T \ln(I_2/I_0)}. \quad (20)$$

η 值产生的相对误差也很小，可以忽略。将(18)式代入(20)式化简，可解出

$$\eta = \frac{V_2 - V_1}{V_T \ln(I_2/I_1)}. \quad (21)$$

将(20)式代入(18)式化简，可解出

$$\ln I_0 = \frac{V_2 \ln I_1 - V_1 \ln I_2}{V_2 - V_1}. \quad (22)$$

(21)式，(22)式可以作为求解 PN 结品质因子 η 和反向饱和电流 I_0 的解析计算公式，式中电压、电流相当于光电电池的开路电压和短路电流。

6 实验验证

实验使用 2CR11 硅光电池，其光谱响应波长峰值约为 860 nm，选择钨丝灯作为光源，测量温度 $t = 28.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。通过改变硅光电池到钨丝灯的距离在其光敏面上得到不同辐照度值，分别测量光电电池在不同辐照度下的开路电压和短路电流，如表 1。

表 1 不同辐照度下光电电池的开路电压 (V_{OC}) 和短路电流 (I_{SC})

Table 1 Open circuit voltage and short circuit current at different irradiance

	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4
V_{OC}/mV	238.1	274.6	284.2	296.5
$I_{SC}/\mu\text{A}$	0.52	1.8	2.6	3.9

取表 1 前两组实验数据使用(11)式,(12)式进行迭代计算,测量温度已知,设初始值 $\eta_0=2$,计算精度要求 $\epsilon=10^{-5}$,可得 $\eta=1.13087$, $I_0=0.158219$ nA;取表 1 前两组实验数据使用(21)式,(22)式进行计算,可得 $\eta=1.13057$, $I_0=0.157832$ nA。简化解析公式计算结果和迭代计算结果的相对误差分别为

$$\Delta\eta/\eta < 0.03\%, \quad \Delta I_0/I_0 < 0.25\%.$$

将迭代结果 η 和 I_0 代入(4)式,取表 1 中后二组短路电流分别计算出与之相对应的开路电压: $V_{OC3}=285.4$ mV, $V_{OC4}=297.3$ mV,因此,计算值和实验测量结果的相对误差分别为: $\Delta V_{OC3}/V_{OC3}=0.4\%$, $\Delta V_{OC4}/V_{OC4}=0.3\%$ 。

为便于迭代法的运用,对使用迭代法计算时的迭代次数和精度要求的关系进行简要分析。精度要求 ϵ 和迭代次数 n 之间的关系为

$$\epsilon = |\alpha - x_n| \leq \lambda^n |\alpha - x_0|, \quad (23)$$

式中

$$\lambda = \{f[\phi(\eta)]\}' = \frac{V_1 \exp[V_2/(\eta V_T)] - 1 \exp[V_1/(\eta V_T)]}{V_2 \exp[V_1/(\eta V_T)] - 1 \exp[V_2/(\eta V_T)]}, \quad (24)$$

若 $\eta=\eta_0=2$, $V_T=26$ mV, $V_1=V_{OC1}=238.1$ mV, $V_2=V_{OC2}=274.6$ mV代入(24)式,可得 $\lambda=0.9279$,将该值代入(23)式,且 $\alpha=\eta=1.13087$, $x_0=\eta_0=2$,则

$$\epsilon = 10^{-5} \leq 0.9279^n |1.13087 - 2|, \quad (25)$$

解得迭代次数 $n \geq 145$,即精度要求为 10^{-5} 时,迭代次数约为 145 次。分析结果符合计算机实际迭代次数,选取接近迭代结果的初始值有利于减少迭代次数。

7 结 论

提出了一种半导体 PN 结特征参量的间接测量方法,并对该测量方法所用的数值计算方法的收敛性进行了数学证明。提出了两个使用开路电压和短路电流计算光电池 PN 结品质因子和反向饱和电流的简化解析计算公式。迭代法和简化解析计算公式所产生的误差处于比较小的范围,光电池的开路电压和短路电流的简化数学模型和实际情况有出入是产生误差的主要原因。本文 PN 结品质因子和反向饱和电流的测量方法以及简化解析计算公式可以作为一种实用测量方法使用,适用于硅光电池生产的在线测量,同时也适用于晶体管 PN 结品质因子和反向饱和电流的测量。

参 考 文 献

1 Defeng Zheng, Xiangzhao Wang, Feng Tang. An improved

- method of angle measurement with a position sensitive detector [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 403~406
- 2 Jintao Liang, Junhua Liu, Xin Li *et al.*. A piezoresistive microcantilever for thermal infrared detector [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3): 128~130
- 3 Fan Hui, Lu Yutian. Improved numerical model of metal-semiconductor-metal photodetector [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1032~1036
范 辉,陆雨田. 一种改进型金属-半导体-金属光电探测器数学模型 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1032~1036
- 4 Huang Yongqing, Ren Xiaomin, Huang Hui *et al.*. Improving resonant cavity enhanced photodetector's high speed performance by transparent and unique pattern ohmic contact microstructure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 617~620
黄永清,任晓敏,黄 辉等. 特殊图案透明欧姆接触微结构提高谐振腔增强型光探测器的响应性能 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 617~620
- 5 Li Li, Lu Qisheng, Jiang Houman *et al.*. Photoconduction-type CdS detector irradiated by two laser beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 85~89
李 莉,陆启生,江厚满等. 双光束组合激光辐照光导型 CdS 光电探测器的实验研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 85~89
- 6 Zeng Danhua, Xiao Tiqiao, Xi Zaijun *et al.*. Detector nonlinear error and compensation in phase-stepping interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1358~1362
曾丹华,肖体乔,席再军等. 相移干涉仪中探测器非线性误差及其补偿 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1358~1362
- 7 Liu Enke. *Solar Cells and Its Application* [M]. Beijing: Science Press, 1989. 73~108
刘恩科. *光电池及其应用* [M]. 北京: 科学出版社, 1989. 73~108
- 8 M. Bashahu, P. Nkundabakura. Review and tests of methods for the determination of the solar cell junction ideality factors [J]. *Solar Energy*, 2007, **81**(7): 856~863
- 9 P. Mialhe, J. P. Charles, A. Khoury *et al.*. The diode quality factor of solar cells under illumination [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1986, **19**(3): 483~492
- 10 Jia Quanxi, Liu Enke. A novel analytical method for the quality factor of a solar cell under illumination [J]. *Research & Progress of SSE*, 1989, **9**(3): 298~303
贾全喜,刘恩科. 光照下太阳能电池结品质因子解析的新方法 [J]. *固体电子学研究与进展*, 1989, **9**(3): 298~303
- 11 Amit Jain, Avinashi Kapoor. A new method to determine the diode ideality factor of real solar cell using Lambert W-function [J]. *Solar Energy & Solar Cell*, 2005, **85**(3): 391~396
- 12 Su Changhou. A new method for determination of figure of merit of the solar cell junction [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1993, **14**(3): 262~265
宿昌厚. 确定太阳能电池结品质因子的新方法 [J]. *太阳能学报*, 1993, **14**(3): 262~265
- 13 R. L. Burden, J. D. Fairs. *Numerical Analysis* [M]. Seventh Edition, Feng Yanli, Zhu Haiyan transl., Beijing: Higher Education Press, 2005. 535~573
R. L. Burden, J. D. Fairs. *数值分析* [M]. 第 7 版,冯烟利,朱海燕译,北京: 高等教育出版社, 2005. 535~573
- 14 A. W. Blakers, M. A. Green. Oxidation condition dependence of surface passivation in efficiency silicon solar cells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**(8): 818~820
- 15 Chengxin Wang, Guowei Wang, Hongwu Liu *et al.*. Experimental analysis and theoretical model for anomalously high ideality factors in ZnO/diamond p-n junction diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(13): 2427~2429
- 16 J. Deng, C. R. Wronski. Carrier recombination and differential diode quality factors in the dark forward bias current-voltage characteristics of a-Si:H solar cells [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**: 024509-1~024509-10