

# 半导体太阳电池最佳工作参数计算新法

宿昌厚 庞大文

(北京工业大学电子工程系,北京,100022)

1990年9月19日收到,1991年1月26日修改定稿

本文提出一个计算半导体太阳电池最佳工作参数的新方法,用它计算之结果与实测数据相比,误差在(1—3)%以内。

为充分发挥半导体太阳电池的光电转换能力,提高效率,应使它工作于最佳条件。本文提出一个计算最佳工作参数的新方法。

## 一、原 理

设  $V$  为太阳电池两端的输出电压,  $I$  是通过它的电流,根据太阳电池原理<sup>①</sup>

$$V = \frac{QKT}{q} \ln \left( \frac{I_{sc} - I}{I_s} + 1 \right). \quad (1)$$

式中  $I_{sc}$  是太阳电池的短路电流,  $I_s$  是其反向饱和电流,  $Q$  为品质因子。太阳电池的输出功率为

$$\begin{aligned} P &= VI = I \frac{QKT}{q} \ln \left( \frac{I_{sc} - I}{I_s} + 1 \right) \\ &= I \frac{QKT}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right) \frac{\ln \left( \frac{I_{sc} - I}{I_s} + 1 \right)}{\ln \left( \frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right)} \\ &= IV_{oc} \frac{\ln \left( \frac{I_{sc} - I}{I_s} + 1 \right)}{\ln \left( \frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right)}. \end{aligned}$$

将该式右端乘以  $\frac{I_{sc}}{I_{sc}}$  得到

$$P = I_{sc} V_{oc} \frac{I}{I_{sc}} \frac{\ln \left( \frac{I_{sc} - I}{I_s} + 1 \right)}{\ln \left( \frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right)}. \quad (2)$$

令  $a = \frac{I_{sc}}{I_s}$ ,  $b = \frac{I}{I_s}$  则(2)式变成

$$P = I_{sc}V_{oc}f(a, b). \quad (3)$$

其中

$$f(a, b) = \frac{b \ln(a - b + 1)}{a \ln(a + 1)}. \quad (4)$$

欲使电池输出最大功率, 应使  $f(a, b)$  为最大值。在一定的光强下, 对于给定的太阳电池  $a$  值不变, 因此必须使(4)式右侧的分子  $b \ln(a - b + 1)$  为最大。把它对  $b$  取微商并令其等于零, 得到

$$\ln(a - b_{opt} + 1) = \frac{b_{opt}}{a - b_{opt} + 1} \quad (5)$$

显然  $b = b_{opt}$  就是输出最大功率的条件, 此时对应的最佳工作电流  $I_m = I_s \cdot b_{opt}$ 。在(5)式中只要知道  $a$  即可求出  $b_{opt}$ , 进而从(4)式中得到太阳电池的填充因子

$$FF = f_{opt}(a, b_{opt}).$$

为简化书写, 令  $A = a$ ,  $B = b_{opt}$ , 我们有

$$\ln(A - B + 1) = \frac{B}{A - B + 1}, \quad (6)$$

$$FF = \frac{B \ln(A - B + 1)}{A \ln(A + 1)}. \quad (7)$$

设定一系列  $A$  值, 从(6)式中和(7)式中可分别求出一组相应的  $B$  值和一组相应的  $FF$  值, 如表 1 所示。

本文所述新方法立足于, 在  $\ln A$  和  $\ln B$  之间存在着良好的线性关系。把  $A$  值分为两个范围画出的这种近似直线关系及其直线方程式示于图 1 中。图 2 是填充因子  $FF$  与  $\ln A$  的关系。只要知道短路电流和反向饱和电流之比值, 就可确定  $FF$  值。

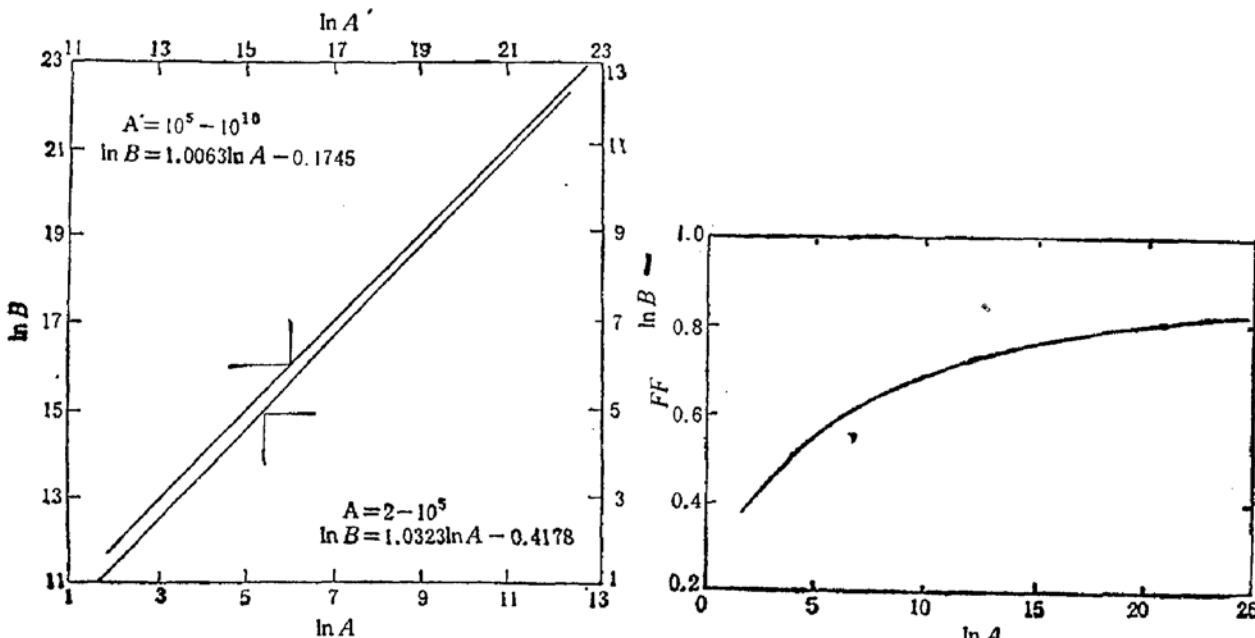


图 1  $\ln B$  与  $\ln A$  之间的关系

图 2  $FF$  与  $\ln A$  之间的关系

表1  $A$ 、 $B$  及  $FF$  的关系

$A$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$	$10^9$
$B$	$7.7 \times 10$	$8.4 \times 10^2$	$8.8 \times 10^3$	$9.0 \times 10^4$	$9.2 \times 10^5$	$9.3 \times 10^6$	$9.4 \times 10^7$	$9.5 \times 10^8$
$FF$	0.53	0.62	0.68	0.72	0.75	0.78	0.80	0.81

## 二、计算步骤

根据前述原理  $A = \frac{I_{sc}}{I_s}$ ,  $B = \frac{I_m}{I_s}$ . 从

$$V_{oc} = \frac{QKT}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right)$$

式中求出

$$e^{\frac{qV_{oc}}{QKT}} = \frac{I_{sc}}{I_s} + 1,$$

或写成

$$A = e^{\frac{qV_{oc}}{QKT}} - 1. \quad (8)$$

1. 已知  $V_{oc}$ 、 $T$  和  $Q$  按(8)式求出  $A$  值

2. 如果  $A \geq 10^5$  则按下式(9)求出  $B$  值

$$\ln B = 1.0063 \ln A - 0.1745. \quad (9)$$

若  $A < 10^5$  则用下式(10)求出  $B$  值

$$\ln B = 1.0323 \ln A - 0.4178. \quad (10)$$

用(9)和(10)二式求出的  $B$  值与(6)式结果相比, 误差小于 2%。

3. 由  $\frac{B}{A}$  值求最大功率点的输出电流

$$I_m = I_{sc} \frac{B}{A}. \quad (11)$$

$\frac{B}{A}$  可称之为‘电流因子’, 用  $CF$  表示, 即

$$CF = \frac{I_m}{I_{sc}} = \frac{B}{A}. \quad (12)$$

4. 用(7)式求填充因子  $FF$ 。 (7)式中的

$$\frac{\ln(A - B + 1)}{\ln(A + 1)} = \frac{V_m}{V_{oc}}$$

称为‘电压因子’, 用  $VF$  表示, 即

$$VF = \frac{V_m}{V_{oc}} = \frac{\ln(A - B + 1)}{\ln(A + 1)}. \quad (13)$$

因而

$$FF = CF \cdot VF. \quad (14)$$

5. 最大功率点的工作电压为

$$V_m = V_{oc} \cdot VF. \quad (15)$$

于是最佳负载电阻为

$$R_{opt} = \frac{V_m}{I_m}.$$

6. 已知入射光强为  $E[\text{mW/cm}^2]$ , 太阳电池的光电转换效率为

$$EFF = \frac{V_m I_m}{E S}.$$

$S$  是电池的面积 ( $\text{cm}^2$ )。

给计算机输入  $V_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 、 $Q$ 、 $S$  及  $E$  和  $T$ , 可立即得到太阳电池最佳工作状态下的  $V_m$ 、 $I_m$ 、 $P_m$ 、 $R_{opt}$ 、 $FF$ 、 $EFF$  以及电压因子  $VF$  和电流因子  $CF$  等八个参量。

### 三、计算结果

利用上述新计算法对于一些不同类型的太阳电池, 用计算机进行了计算, 其结果与附录所述常规计算法和已知的实测数据做了对比, 表 2 列出了一部分计算结果, 表 3 是这些电池的已知实测数据。

表 2. 计算结果

参数 电池 方法		$CF$	$VF$	$FF$	$V_m$ (V)	$I_m$ (mA)	$P_m$ (mW)	$R_{opt}$ (Ω)	$EFF$ (%)	备注
2	1	0.96	0.85	0.81	0.53	137.8	73.3	3.85	18.32	N+PP+ BSF
	2	0.95	0.86	0.82	0.54	136.2	73.5	3.97	18.38	SiO <sub>2</sub> 钝化 [4]
5	1	0.92	0.82	0.75	0.48	156.0	75.2	3.08	13.84	空间用绒面
	2	0.92	0.82	0.76	0.48	156.4	75.0	3.07	13.85	电池 [5]
6	1	0.91	0.81	0.74	0.47	249.2	116.3	1.87	11.86	SnO <sub>2</sub> /Si
	2	0.91	0.81	0.74	0.46	248.6	115.0	1.86	11.73	异质结 [6]
7	1	0.92	0.76	0.69	0.43	715.7	306.1	0.60	11.17	绒面电池
	2	0.89	0.78	0.69	0.44	691.9	303.0	0.64	11.16	[7]
8	1	0.93	0.83	0.77	0.46	116.9	53.6	3.92	13.39	三级 Si 标
	2	0.93	0.83	0.77	0.46	117.1	53.5	3.90	13.38	准电池
9	1	0.79	0.73	0.58	0.36	1474.8	528.9	0.24	7.83	方阵中的一个单体
	2	0.80	0.71	0.57	0.35	1495.7	525.1	0.24	7.77	

注: 方法 1——本文方法, 方法 2——常规方法

关于品质因子  $Q$ , 对于每一个具体的电池都按文献 [2] 中所述的方法分别进行了计算, 为此所需要的串联电阻  $R_s$  值, 按不同光强下的  $I-V$  曲线求出<sup>[3]</sup>. 表 2 中的方法 1 代表本文的新计算法, 方法 2 是指常规计算法.

表 3 表 2 中各电池的已知参数

参数 电池	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (mA)	$FF$	$EFF$ (%)	$Q$	$S$ (cm <sup>2</sup> )	$R_s$ (Ω)	$E$ (mW/cm <sup>2</sup> )	$T$ (°C)
2	0.627	143.6	0.80	18.0	1.13	4.0	0.08	100	31
5	0.585	170.0	0.75	13.8	1.60	4.0		135.5	21
6	0.572	273.0	0.75	11.99	1.70	9.8	1.1	100	28
7	0.565	780.0	0.71	11.41	2.17	27.4	0.11	100	20
8	0.532	126.5	0.75	13.08	1.40	4.0	0.2	100	27
9	0.492	1858.8	0.56	7.62	2.91	78.54		86	65.7

可以看到,用本文新方法计算的结果与实测数据吻合的相当好,以填充因子  $FF$  和转换效率  $EFF$  的实测数据(表 3)为准,计算结果的相对误差一般处在(1—3)% 以内。与常规计算法相比,结果的一致性更好。

#### 四、结 论

1.本文讨论的新方法中所用主要公式(7)、(9)、(10)具有较高的准确度,使用微机计算时编程容易;

2.在计算过程中同时可得到电流因子  $CF$  和电压因子  $VF$ ,其中电压因子  $V_m/V_{oc}$  不同于早期文献中定义  $V_{oc}/E_g$ .  $E_g$  是禁带宽度。

#### 附录: 太阳电池参数常规计算法

$$P = VI = V I_{sc} - V I_s (e^{\frac{qV}{QKT}} - 1),$$

取  $\frac{\partial P}{\partial V} = 0$  得到

$$\left(1 + \frac{qV_m}{QKT}\right) e^{\frac{qV_m}{QKT}} = 1 + \frac{I_{sc}}{I_s}.$$

令  $x = \frac{qV_m}{QKT}$ , 则有

$$(1 + x)e^x = 1 + \frac{I_{sc}}{I_s} = 1 + A.$$

或写成

$$\ln(1 + x) + x = \ln(1 + A).$$

已知  $A$ ,从该式中可精确地求出  $x$ ,然后

$$V_m = \frac{QKT}{q} x, I_m = I_{sc} - I_s (e^x - 1).$$

各参量即可求出。

#### 参 考 文 献

- [1] 宿昌厚,半导体光电子器件,北京工业大学教材,(1988)。
- [2] 刘恩科等, 2nd International PVSEC, 321—324, Aug. 19—22, 1986, Beijing, China.

- [3] 赵富鑫、魏彦章,太阳电池及其应用,212—213,国防工业出版社(1985).
- [4] Mark S., Spitzer et al., *IEEE Trans.*, ED-31, 546—550(1980).
- [5] 孙振东,电源技术,2,14(1984).
- [6] 江雪生等,太阳能学报,4,(4),407(1983).
- [7] 何敬文等,太阳能学报,8,(2),125(1987).

## A New Method for Computing Optimum Parameters of Solar Cell

Su Changhou and Pang Dawen

(Beijing Polytechnic university, Beijing, 100022)

### Abstract

A new method for computing optimum parameters of semiconductor solar cell is described. The calculating errors are (1—3)% in comparison with experimental data.