

# 关于PN结光伏理论的若干问题 ——评“硅太阳能电池旁路电阻的简便测量”

陈庭金

(云南师范大学太阳能研究所, 昆明650092)

**文摘:** 论述了pn结光伏理论, 指出了“硅太阳能电池旁路电阻的简便测量”一文中关于“光伏理论的修正”和“测量旁路电阻的新方法”的不妥和错误之处。

**关键词:** pn结, 光伏理论, 硅太阳能电池, 旁路电阻测量方法

## 0 引言

“硅太阳能电池旁路电阻的简便测量”<sup>[1]</sup>一文, 提出对光伏理论进行修正, 并给出“测量旁路电阻的新方法”。该文作者在其它论文中对pn结光生伏特效应的太阳能电池理论也提出了严厉的批评<sup>[1-7]</sup>。这些批评是: 太阳能电池“没有从电源原理论述电动势的建立, 所以很混乱, 含糊不清”; “经典光伏理论”的“叠加原理是错误的”, 理论和实验结果严重偏离; 经典光伏理论认为光电池不存在“非静电力”等等。该文作者针对光伏理论的这些原则问题, 提出了一系列的“新观点”, “纠正了叠加原理的错误”, 提出了“非静电力”的存在, 建立了“新的pn结光伏理论”, 并认为对pn结光伏理论作出了突破性的贡献。与此相反, 我们认为: 现有的pn结光伏理论虽然不是一个完美无缺的理论, 但是, 建立在固体能带理论基础上的半导体太阳能电池理论, 不仅能给光伏电源一个清晰的物理图象, 而且其理论结果与实验结果也符合较好。我们还认为, 该文作者并没有提出有意义的新学术观点和新的光伏理论, 更谈不上有新的突破, 却引入了一些不恰当、甚至是错误的论述。文中提出的“硅太阳能电池旁路电阻测量的新方法”也是错误的, 用该方法不可能正确地测量出太阳能电池的并联电阻 $R_{sh}$ 值。

限于篇幅, 本文中所用符号都是太阳能电池工作者所熟知的, 不再一一说明。同时, 对该文中的不妥和错误之处亦不逐条进行讨论, 而仅就涉及现有pn结光伏理论中若干原则问题, 提出我们的看法。

## 1 光伏电源及其理论

以下讨论均以简单的pn结半导体硅太阳能电池为例。

### 1.1 光伏效应及太阳能电池

如图1的实验指出: 用包含 $h\nu > E_g$ 的光子束辐照在具有pn结结构的半导体表面, 当结的深度在光的透入深度范围内, 则将在光照面和暗面之间产生光生电动势。这就是光生伏打效应。因光子没有将电子打出半导体外, 故亦称内光电效应。

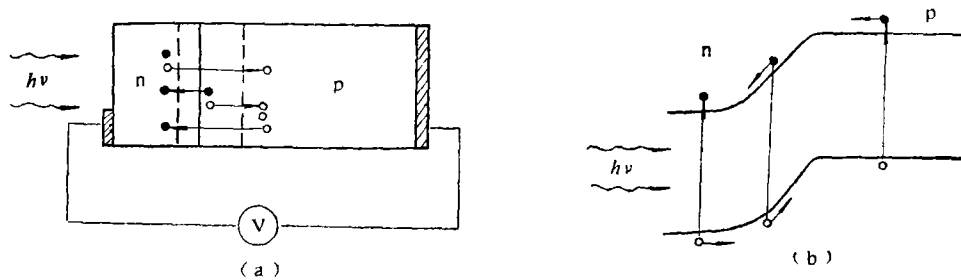


图1 光伏效应示意图

一个实用的pn结太阳能电池就是利用具有pn结结构的半导体器件的光生伏打效应作成的。

### 1.2 太阳能电池的物理模型及其工作原理

太阳能电池是根据量子力学原理工作的。当今太阳能电池理论是建立在能带模型上的数学模型及其数学处理结果,再引入一些参数进行修正后得到的,其理论结果与实验比较是令人满意的,已被太阳能电池的研究者们所普遍接受。图2画出了一个带负载的pn结太阳能电池的能带模型。

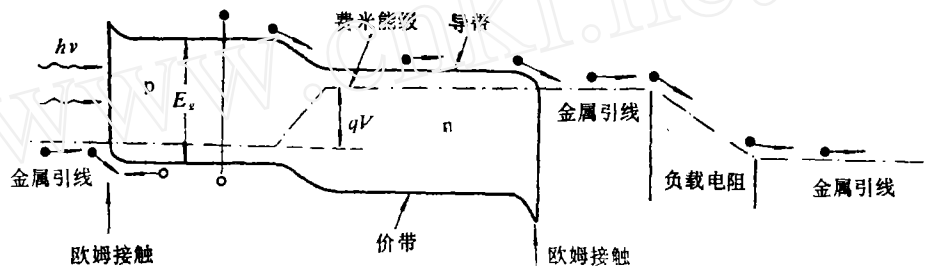


图2 带负载的硅pn结太阳能电池能带模型示意图

模型。

太阳光中能量 $E = h\nu > E_g$ 的光子辐照并透入到太阳能电池中后,与价带中的电子发生光电相互作用,价带电子被激发到导带产生电子-空穴对。以p区内被激发的电子为例,它被激发到比导带底更高的能级上。我们知道,当达到热平衡时,p区中少数浓度 $n_p$ 较小,由 $p_p n_p = n_i^2$ 可知,一般 $n_p \approx 10^5 \text{cm}^{-3} - 10^6 \text{cm}^{-3}$ ,因而导带能级几乎是空的,电子会很快落到导带底。光生电子及空穴将以总能量 $(h\nu - E_g)$ 作热运动,并以声子的形式传给晶格。p区作热运动的电子,因浓度差的存在向表面或向结扩散,其中一部份在半导体内部或表面复合而消失,形成相应的复合电流,一部份扩散到结的光生载流子,受结区强电场作用流入n区中。在n区中由于电子是多子,流入的电子按介电弛豫时间的顺序传播。同时为满足n区内粒子数守恒的条件,与流入的电子数相同的电子从n端接触电极引出线流出,并进入负载电阻 $R$ 。设 $R$ 上每秒流入 $x$ 个电子,则加在 $R$ 上的电压 $V = qxR = IR$ 。由于电路中无其它电源,电压 $V = IR$ 实际主要加在太阳能电池的结上,即结处于正向偏置。电子流过 $R$ 时失去相当于空间电荷区两侧n区和p区费米能级间电位差所相应的能量 $qV$ 。一旦结处于稳定的正向偏置时,二极管电流

$I_D = I_s(e^{qV/kT} - 1)$  朝着与光激发产生载流子形成的光电流  $I_{ph}$  相反的方向流动。因而流入  $R$  的电流为

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s(e^{qV/kT} - 1) \quad (1)$$

因此, 在  $R$  上一个电子失去  $qV$  的能量, 即等于一个光子的能量  $h\nu$  转换成  $qV$  和其它能量损失。流过  $R$  的电子到达  $p$  区表面电极处, 成为  $p$  区中的过剩载流子, 于是和  $p$  区中流出的空穴复合。上述光激发产生的电子和空穴以完全相同的方式分别朝相反方向运动, 绕电路一周复合, 在  $R$  上输出电流。这就是传统  $pn$  结太阳能电池能带模型的描述。要强调的是: 第一, 这里讲的是理想  $pn$  结太阳能电池。其条件为: 1) 小注入; 2) 突变耗尽层近似, 且耗尽层外是半导体中性区, 注入的光生少子在  $p$  区或  $n$  区作扩散运动; 3) 耗尽区宽度小于基区少数载流子扩散长度, 且该扩散长度大于电池厚度; 4) 各区杂质均已电离, 满足玻耳兹曼边界条件; 5) 电池的串联电阻  $R_s \rightarrow 0$ , 并联电阻  $R_{sh} \rightarrow \infty$ 。第二,  $I_{ph}$  和  $I_D$  是光辐照在太阳能电池上同时形成的。式(1)是稳态结果。光生载流子一部份用于降低内建势垒, 一部份输出到负载上。式(1)就是“叠加原理”所得的结果, 也是文献[1-7]作者多年来想予以修正的内容。

### 1.3 太阳能电池的直流模型

由图2给出的物理模型和相应的  $I-V$  特性方程(1), 可以由固体物理理论推导出来的太阳能电池方程组, 在给定的模型和边界条件下, 求出  $I_{ph}$  和  $I_D$  的解析式或数值解, 从而完成太阳能电池的理论表述。但是, 一个真实的太阳能电池, 结构复杂, 工作时影响太阳能电池输出电流和电压的因素很多, 式(1)不能完全描述一个真实  $pn$  结太阳能电池的  $I-V$  特性, 它也未达到对工程分析的足够精确度, 对不同结构、不同工艺条件下制作的太阳能电池, 观测其终端特性, 发现需要在太阳能电池的输出  $I-V$  特性式(1)中再增加  $A$ 、 $R_s$  和  $R_{sh}$  三个参数, 才能与测试结果符合得更好。即将式(1)改为

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{q(V + IR_s)/AKT}{}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

果与这个模型相应的等效电路如图3(a)所示。  $A = 1$ ,  $R_s$  和  $R_{sh}$  取不同值时, 由式(2)计算的  $I-V$  特性示于图3(b)中, 它称为太阳能电池的直流模型, 已广泛用于太阳能电池单体和太阳能电池

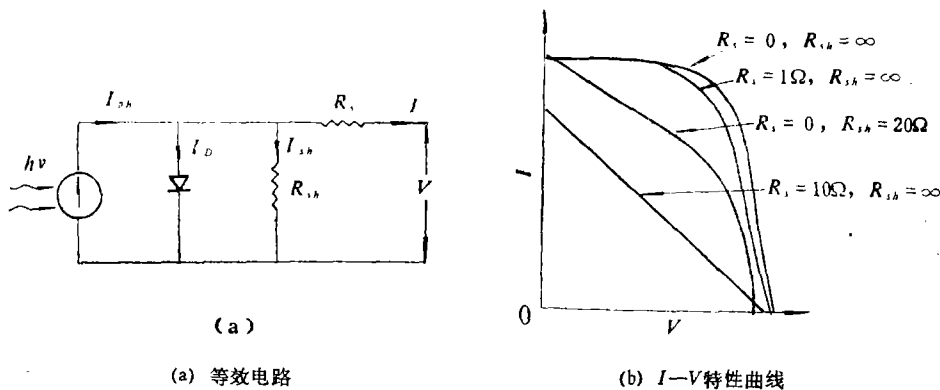


图3 太阳能电池的直流模型

方阵的分析。但是, 用式(2)描述一个真实太阳能电池的特性, 仍然还有某些较小的、难以处理的偏差。这种偏差的原因之一是难于精确地测出电池的  $A$ 、 $R_s$  和  $R_{sh}$  值, 其中特别是  $R_s$  值。因

此，又发展了一些更详细的太阳电池模型，如太阳电池的分布参数模型、太阳电池交流模型以及用于计算机的各种模型等等。可是，至今还没有哪一种单一的模型能够在所有温度、光照强度和辐照损伤范围内精确地描述一切现有的太阳电池。

#### 1.4 太阳电池电源和太阳电池电动势

提供非静电力的装置称为电源，其原理如图4所示。在电源的外部只有静电场  $\vec{E}_{外}$ ；在电源的内部，除了有静电场  $\vec{E}_{内}$  之外，还有非静电力  $\vec{K}$ 。 $\vec{K}$  的方向由负极指向正极，与  $\vec{E}_{内}$  的方向相反。因此，全电路欧姆定律的微分形式为

$$\vec{j} = \sigma(\vec{K} + \vec{E}_{内}) \quad (3)$$

电流是静电力和非静电力共同作用的结果。当电源的两电极与外部负载接通后，在静电力的推动下形成从正极到负极的电流。在电源内部，非静电力的作用使电流从内部由负极回到正极，使电荷的流动形成闭合的循环。

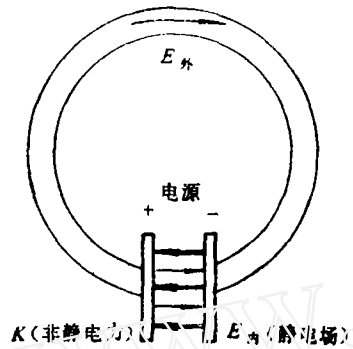


图4 电源原理图

过程是：光生的电子电流以及光生的空穴电流形成的总电流从正极流出，经负载  $R$  流到负极；在太阳电池内部，由于上述非静电力的作用，又从负极回到正极，使电荷的流动形成闭合的循环。电流流动的详细过程已表示在图2中，并已作过详细的描述。

电源的电动势  $\varepsilon$  定义为：把单位正电荷从负极通过电源内部移到正极时，非静电力所作的功：

$$\varepsilon = \int_{\text{电源内部}}^{-} \vec{K} \cdot \vec{dl} \quad (4)$$

太阳电池的电动势为

$$\varepsilon = \frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{q} = \frac{W_p - W_n}{q} = V \quad (5)$$

式中  $(W_p - W_n)$  分别为 p 型和 n 型半导体的功函数差，它是由非静电力对光生载流子做功的结果。或者说被激发的光生载流子由于扩散运动，电子由 p 区向 n 区聚集，空穴由 n 区向 p 区聚集，这样在两区的费米能级间就产生与带电的电荷量相应的能量差  $\Delta E_F = E_{Fn} - E_{Fp}$ ，这个  $\Delta E_F / q$  就是光生电动势。并与式(4)的定义完全一致。

#### 1.5 太阳电池的理论分析

根据太阳电池的能带模型可以建立其数学模型——太阳电池方程组。对这组方程进行处

理的结果便得到式(1)的电流方程,亦即 $I-V$ 特性。从而说明了“叠加原理”的正确。

对一维情况简述如下:在任一时刻 $t$ ,离太阳能电池表面任一距离 $x$ 处,光生的非平衡电子和空穴必须满足电荷守恒原理。这一原理可用电荷守恒方程或称连续性方程表示为:

对 $n$ 区的空穴:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G - U - \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} \quad (6)$$

$$J_p = q\mu_p p E - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (7)$$

对 $p$ 区的电子:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - U + \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} \quad (8)$$

$$J_n = q\mu_n n E - qD_n \frac{dn}{dx} \quad (9)$$

pn结耗尽区,用泊松方程处理。给定太阳能电池的工作状态和几何结构后,可以求解方程(6)和(8),并由式(7)和(9)得到太阳能电池的 $J_p$ 和 $J_n$ 。再求出耗尽区的光生电流 $J_{ar}$ ,最后得到总光生电流密度 $J_{ph} = J_p + J_n + J_{ar}$ 。对一个真实的太阳能电池,求上述方程组的解析解是不可能的,一般只能得到数值解<sup>(8-10)</sup>。

为进行理论分析,我们对上述方程组作下述形式处理。在稳态 $\left(\frac{\partial p}{\partial t} = 0, \frac{\partial n}{\partial t} = 0\right)$ 情况下,

由方程(6)和(8),可以把输出电流密度 $J$ 表示成

$$J = q \int_{\text{整个器件}} G dx - q \int_{\text{p区}} \frac{\Delta n}{\tau_p} dx - q \int_{\text{n区}} \frac{\Delta p}{\tau_p} dx - q \int_{\text{耗尽区}} U dx - q \Delta n_s S_n - q \Delta p_s S_p \quad (10)$$

式(10)指出:为了获得最大 $J$ 值,必须要求 $J_{ph}$ (第一项)尽可能大,其它五项复合电流密度尽可能小。同时指出, $J$ 与入射光强、材料的吸收系数、表面反射率、太阳能电池中的少数寿命、扩散长度、各区的掺杂浓度、表面复合速度、各区的几何厚度以及太阳能电池的工作温度等有密切关系。

我们知道,光照在太阳能电池上时,pn结两端的光生电压是正向偏置于太阳能电池的。因而式(10)的非平衡载流子可以等效为两个因素提供,即一为光注入,一为正偏电注入,相应地用脚标 $ph$ 和 $v$ 表示,则

$$\Delta p = \Delta p_{ph} + \Delta p_v$$

$$\Delta n = \Delta n_{ph} + \Delta n_v$$

从而式(10)变为式(1)

$$J = J_{ph} - J_D(V) \quad (1)$$

式中的 $J_{ph}$ 和 $J_D(V)$ 分别为

$$J_{ph} = q \int_{\text{个器件}} G dx - q \int_{\text{p区}} \frac{\Delta n_{ph}}{\tau_n} dx - q \int_{\text{n区}} \frac{\Delta p_{ph}}{\tau_p} dx$$

$$-q \int_{\text{耗尽区}} U_{ph} dx - q(\Delta p_s)_{ph} S_p - q(\Delta n_s)_{ph} S_n \quad (11)$$

$$J_D(V) = q \int_{\text{P区}} \frac{\Delta n_v}{\tau_n} dx + q \int_{\text{N区}} \frac{\Delta p_v}{\tau_p} dx + q \int_{\text{耗尽区}} U_v dx + q(\Delta p_s)_v S_p + q(\Delta n)_v S_n \quad (12)$$

这就论证了在pn结太阳能电池理论中, 采用“叠加原理”来描述是正确的。这些理论研究结果已用于指导设计, 并制作出高效率的pn结太阳能电池。

## 2 “简便测量”一文中的一些问题或错误举例

“硅太阳能电池旁路电阻的简便测量”一文的理论推导中有以下错误:

(1) 文中的式(4)

$$I_L \left( \frac{R_s + R_L}{R_{sh}} + 1 \right) + \frac{V_L}{R_{sh}} = I_p - I_s \left( e^{\frac{qV_D}{4kT}} - 1 \right) \quad (4)$$

应改为

$$I_L \left( \frac{R_s}{R_{sh}} + 1 \right) + \frac{V_L}{R_{sh}} = I_p - I_s (e^{qV_D/4kT} - 1)$$

(2) 文中式(13)

$$I_{sc} = I_p = I_D$$

应改为

$$I_{sc} = I_p, \quad I_D = 0$$

(3) 利用“补偿原理”建立的测量 $R_{sh}$ 的公式

$$R_{sh} = \frac{V_{oc}}{I_{sc} - I_D} \quad (19)$$

是在外加正偏 $V_f$ 和标准光源同时照射太阳能电池, 并使 $I_L = 0$ 时得到的。但该文建议的测量方法是: 打开电源, 关掉光源测量回路电流 $I_D$ , 并测量 $V_f$ 是不妥的。因为按该文的推理, 这时测得的 $I_D$ , 实际为 $(I_D + I_{sh})$ , 亦即等效的 $I_{sc}$ , 因而是算不出 $R_{sh}$ 值的。

## 3 讨论和结论

1. 目前的太阳能电池, 除pn结单晶硅太阳能电池外, 还有各种晶型、材料、结型、结构、用途的太阳能电池。无论哪种太阳能电池, 其工作原理是清楚的, 但描述它们的物理模型各异, 相应的数学模型及其数学处理大都难以精确, 因而理论结果与电池实测结果存在一定偏离, 故需要不断研究、完善。

2. pn结太阳能电池的理论分析和数学处理结果, 在目前的太阳能电池研究中最令人满意的, 且为太阳能电池研究工作者们所普遍接受。

3. 对太阳能电池的实验研究和已有的理论分析, 需要补充、修正, 甚至提出更好的新理论。但是在修正旧理论时, 一定要弄清楚旧理论的问题何在, 否则会导致错误。

## 参 考 文 献

- 1 刘忠厚. 半导体光电, 1988, 9(4): 101—103, 104—105
- 2 刘忠厚. 半导体光电, 1989a, 10(3): 71—74. 1989b, 10(4): 70—77
- 3 刘忠厚. 半导体光电, 1990, 11(3): 297—299
- 4 刘忠厚. 半导体光电, 1991, 12(2): 151—163
- 5 刘忠厚. 电源技术, 1987, (1): 12—17
- 6 刘忠厚. 电源技术, 1988, (1): 8—9
- 7 刘忠厚. 太阳能学报, 1991, 13(3): 330—333
- 8 Hovel H J. Semiconductors and Semimetals, Vol. 10, Solar Cell, New York: Academic press, 1975
- 9 Van Overstraeten R, Nuyts W. IEEE Trans. EI. Dev. ED-16, 1969, (7): 632
- 10 陈庭金等. 云南师范大学学报, 自然科学版, 1985, (2): 62—78
- 11 陈庭金等. 云南师范大学学报, 1990, 10 (1—2): 58—77

SEVERAL PROBLEMS ABOUT PHOTOVOLTAIC THEORY  
OF PN JUNCTION—COMMENTS ON “A SIMPLE AND  
CONVENIENT MEASURE OF SILICON SOLAR  
CELL BYPASS RESISTANCE”

Chen Ting-jin

(Solar Energy Research Institute, Yunnan Normal University, Kunming 650092)

**Abstract:** The photovoltaic theory of pn junction is reviewed thoroughly. The improper view points and mistakes existing in the “correction of photovoltaic theory” and “the new method of measure bypass resistance” raised in the article of “a simple and convenient measure of silicon solar cell bypass resistance” is pointed out.

**Key words:** p-n junction, photovoltaic theory, silicon cell, method of measure bypass resistance