

基于 P-N 结的太阳能电池伏安特性的分析与模拟*

任 驹 郭文阁 郑建邦

(西北工业大学理学院光信息技术实验室, 西安 710072)

摘 要 通过分析实际 P-N 结与理想模型之间的差别, 建立了 P-N 结二极管及太阳能电池的数学模型; 利用 Matlab 中的系统仿真模块库建立仿真模型, 设置参量, 求解模型方程并绘制了图形. 对太阳能电池在一定光照下旁路电阻及串联电阻取不同数值时对其开路电压、短路电流及填充因子的影响做了模拟, 并与实际测得的硅太阳能电池伏安特性进行了比较. 模型分析与实验测量的结果表明: 等效的旁路电阻和串联电阻分别影响电池的开路电压和短路电流. 仿真结果与实验测量结果一致.

关键词 P-N 结; 伏安特性; 等效电路模型; 太阳能电池

中图分类号 O475 **文献标识码** A

0 引言

P-N 结是许多微电子和光电子器件的核心部分. 这些半导体器件的电学特性及光电特性由 P-N 结的性质所决定, 掌握 P-N 结的性质是分析这些器件特性的基础. 半导体导电是通过两种载流子的漂移、扩散及产生与复合实现的^[1]. 由于 P-N 结的非线性特性, 其电流电压关系无法通过一个简单的解析模型来确定. 虽然肖克莱方程给出了理想 P-N 结的电流电压关系, 但与实际器件的性质差别很大. 在实际器件中, 由于表面效应、势垒区载流子的产生及复合、电阻效应等因素的影响, 其电流电压特性只在很小的范围内接近理想值. 正向电压增大时, I-V 曲线由指数关系转变为线性关系. 反向电压增大时, 在一定范围内也是线性关系, 反向电压过大还会发生 P-N 结的击穿.

本文通过一个简单的电路模型模拟了实际的 P-N 结, 讨论了各实际参量对伏安特性的影响. 并针对太阳能电池在一定光照下其实际参量如旁路电阻和串联电阻对其开路电压、短路电流及填充因子的影响, 利用计算机对其伏安特性进行建模分析, 以获得接近实际器件的特性.

1 P-N 结的伏安特性分析及等效电路

理想 P-N 结模型满足小注入、突变耗尽层及玻耳兹曼边界条件, 且不考虑耗尽层中载流子的产生和复合作用^[2]. 其电流电压关系可由肖克莱方程给出, 即

$$J = J_s \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中, V 为 P-N 结两端的电压, J 为通过 P-N 结的电流密度, J_s 为反向饱和电流. 当正向偏压较大时, 括号中的指数项远大于 1, 因而第二项可以忽略, 电流密度与电压呈指数增加关系. 反向偏压时, 当 $q|V| \gg kT$ 时, 指数项趋于 0, 电流不随电压改变, 趋于饱和值 J_s .

实验测量发现, 肖克莱方程与实际 P-N 结的伏安特性偏离较大, 主要表现在两个方面: 1) 正向电压较小时, 理论值比实验值小, 正向电压较大时, J-V 关系变为线性关系; 2) 反向偏压时, 反向电流比理论值大许多, 反向电流不饱和, 随反向偏压的增大略有增加. 这说明理想模型不能真实反映实际器件的特性, 需要建立更为完善的 P-N 结模型^[3]. 在实际器件中, 载流子的产生、传输和复合会对 P-N 结中的空间电荷场产生影响^[4], 从而导致 P-N 结电流电压特性偏离理想方程.

正向偏压时, 注入势垒区的载流子有一部分形成复合电流, 其大小与 $\exp(qV/2kT)$ 成正比, 总电流密度为扩散电流密度与复合电流密度之和. 对于硅, 在较低正向偏压下, 复合电流占主要地位, 因而总电流大于理想条件下的电流, 正向偏压较高时, 复合电流可以忽略^[2].

正向电流很大时, 器件体电阻及电极接触电阻上的压降不可忽略, 这样, 加在 P-N 结势垒区的电压就减小了, 正向电流增加就比较缓慢, 在体电阻及电极接触电阻上的压降占主要地位时, 电流电压关系便成为由电阻决定的线性关系.

反向偏压时, 势垒区电场增强, 通过复合中心产生的电子空穴对在复合之前被强电场驱走, 使得载流子产生率大于复合率, 形成产生电流^[2]

*西北大学人才引进基金项目(04XD0114)和研究生创业种子基金(Z200579)资助
Tel: 029-88495724 Email: renju@mail.nwpu.edu.cn
收稿日期: 2004-12-30

$$J_G = qGX_D \quad (2)$$

这个电流与势垒宽度 X_D 成正比, G 为净产生率. 随着反向偏压的增加, 势垒宽度增大, 所以反向电流不饱和, 随反向偏压增大而增大.

基于上面的考虑, 可以建立实际 P-N 结的一个等效电路模型^[5], 如图 1, R_{sh} 为考虑到载流子的产生

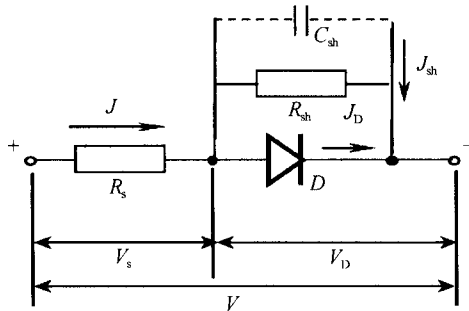


图 1 实际 P-N 结等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of a practical P-N junction

与复合电流而增加的一个并联电阻; R_s 为 P-N 结体电阻及电极接触电阻的等效串联电阻; C_{sh} 为 P-N 结的结电容. 理想情况下, R_{sh} 阻值为无穷大, R_s 阻值为零, C_{sh} 为零. 在直流偏压下, 电容效应可以忽略. 在外电压 V 作用下, 由图 1 可以得出等效电路的电流电压关系

$$J = J_D + \frac{V - JR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

式中, J_D 为通过理想 P-N 结势垒区的电流密度, 由肖克莱方程式(1)给出, 将其代入得

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{q(V - JR_s)}{kT}\right) - 1 \right] + \frac{V - JR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 在正向偏压较小时, 由于 R_{sh} 为有限大, 式中第二项大于零, 因而电流大于理想 P-N 结的电流, 如图 2 中 a 段; 当正向偏压比较大时, 正向电流很大, R_s 上的压降就会比较大, 而 P-N 结势垒区的压降 V_D 趋于饱和, 式(4)括号中 $(V - JR_s)$ 趋于定值, 即电流密度与电压成线性关系, 在 J-V 图上为一条直线, 如图 2 中 c 段, 其斜率由 R_s 决定; 在加

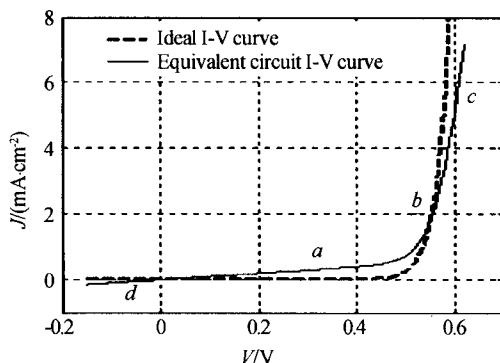


图 2 实际 P-N 结模型和理想 P-N 结伏安特性比较

Fig. 2 Comparison of a practical P-N junction model with an ideal one

反向偏压时, 势垒区的产生电流等效于 R_{sh} 上通过的电流, 由于 J_s 很小, 与之相比, 式(4)中的第二项便不可忽略, 且在反向电压增大时, 第二项起主要作用, 而第一项趋于定值 $-J_s$, 又因为 $R_{sh} \gg R_s$, 反向伏安特性可以化为

$$J = V/R_{sh} - J_s \quad (5)$$

可以看出, 反向偏压较大时, 电流与电压成线性关系, 在 J-V 图上为一条直线, 如图 2 中 d 段, 斜率由 R_{sh} 决定. 图 2 为根据式(4)所得的仿真结果, 所取电阻值 $R_s = 0.01 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$, $R_{sh} = 1 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$, $R_s/R_{sh} = 1 : 100$. 由图中可以看出, 描述 P-N 结等效电路伏安特性的曲线左右两端都趋近于直线, 且直线斜率分别等于旁路电阻和串联电阻的倒数.

2 太阳能电池的伏安特性等效电路

一般情况下, 少数载流子浓度很小, 因而反向电流通常是很小的, 约为 10^{-12} A/cm^2 数量级. 但有外界作用时, 会使到达 P-N 结边界的少数载流子的浓度提高, 这些载流子在内建电场的作用下做飘移运动, 形成较大的反向电流. 在太阳能电池中, 能量大于禁带宽度的入射光子被 P-N 结吸收产生激子, 光生激子在界面处分离形成自由载流子, 在内建电场的作用下向相反的方向迁移, 使空间电荷区边界处的少子浓度增加, 形成较大的 P-N 结反向电流^[1].

太阳电池在无外加电压时, 光照引起的载流子迁移会在 P-N 结两端产生光生电动势, 即光伏效应. 载流子迁移形成自 N 区向 P 区的光生电流 J_L , 光生电动势相当于在 P-N 结两端加正向电压, 从而在内部产生正向电流^[3]. 在 P-N 结开路时, 光生电流和正向电流相等时达到稳定态, 在 P-N 结两端建立起稳定的电势差, 这就是光电池的开路电压. 如果将 P-N 结与外电路接通, 在光照时就会有电流通过电路, 此时 P-N 结相当于一个电流源. 其等效电路如图 3, 光照情况下的 P-N 结可以等效为一个理想电流源、一个理想二极管和旁路电阻、串联电阻的组合. 由图 3 可以得出其电流电压关系如下

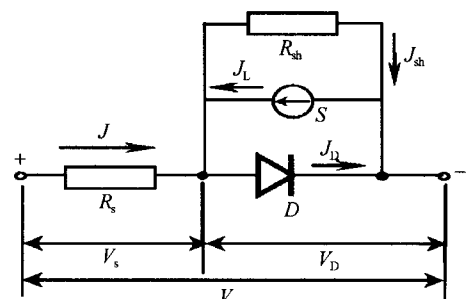


图 3 太阳能电池等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of a solar cell

$$J = J_s \left[\exp \left(\frac{q(V - JR_s)}{kT} \right) - 1 \right] + \frac{V - JR_s}{R_{sh}} - J_L \quad (6)$$

可以看出,有光照时的伏安特性曲线相当于将暗特性曲线向下平移 J_L 得到. 光照强度的增加会引起开路电压和短路电流的增加^[6]. 当二极管两端开路时,通过 P-N 结的净电流为零,此时电压为开路电压 V_{oc} . 在式(6)中令 $J=0$,则有

$$J_s \left[\exp \left(\frac{qV_{oc}}{kT} \right) - 1 \right] + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} = J_L \quad (7)$$

这表明,开路电压不受串联电阻 R_s 的影响,但随 R_{sh} 减小而减小. 在二极管两端短路时,电压为零,此时的电流为短路电流密度 J_{sc} . 若令 $V=0$,并且考虑到一般情况下 $R_s \ll R_{sh}$,式(6)可化为

$$J_{sc} = J_s \left[\exp \left(\frac{-qJ_{sc}R_s}{kT} \right) - 1 \right] - J_L \quad (8)$$

由式(8)可以看出,短路电流基本与 R_{sh} 无关,但受 R_s 的影响,随着 R_s 的增大, J_{sc} 会减小.

3 P-N 结太阳能电池伏安特性的计算机仿真

以上定性分析了 P-N 结等效电路中串联电阻和旁路电阻对其伏安特性的影响,并讨论了太阳能电池的短路电流和开路电压与电池内部的旁路电阻及串联电阻之间的关系. 但要对其做定量讨论,就要求解式(4)或式(6)的方程,这两个方程是超越方程,无法通过数学方法求解. 在此,通过 Matlab 中的 Simulink 系统仿真模块库建立仿真程序,对方程进行数值求解. 在系统中,令 $J_L=0$,即光电流为零,便得到式(4). 通过运行仿真得到的数据可以绘出不同参量下的伏安特性曲线,如图 4,图 5. 在模型中,P-N 结反向饱和电流密度 J_s 取值 10^{-12} A/cm²,温度 $T=300$ K,光生电流密度 $J_L=0.03$ A/cm². 在图 4 中,旁路电阻 R_{sh} 为无穷大,串联电阻 R_s 分别取 0、5、15、20 $\Omega \cdot \text{cm}^2$. 可以看出,在 R_s 改

变的过程中,曲线与横轴的交点没有变化,即对开路电压没有影响,而纵轴的交点却发生变化,随着 R_s 的增大,短路电流密度绝对值在减小(R_s 较小时变化不明显);另外, R_s 不为零的曲线在电压较大时伏安特性趋于线性关系,且其斜率由 R_s 决定;图 5 描述了当 R_s 为零, R_{sh} 取不同值时的影响,可以看出在 R_{sh} 改变的过程中,短路电流没有变化,开路电压发生比较明显的变化. 且 R_{sh} 不为零的曲线在反向偏压时伏安特性也趋于线性关系,斜率由 R_{sh} 决定. 表 1 和表 2 分别给出了太阳能电池在不同串联电阻和旁路电阻下的各输出量的情况. 主要是三个输出量:开路电压 V_{oc} 、短路电流密度 J_{sc} 、填充因子 F.F.

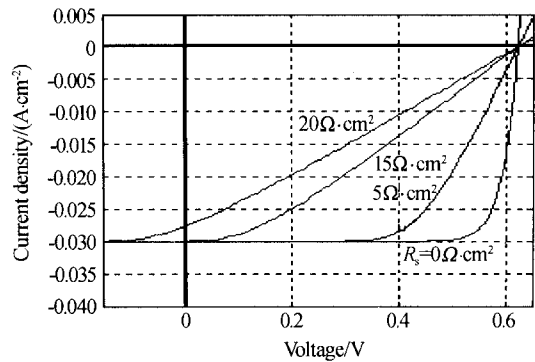


图 4 R_s 的大小对太阳能电池伏安特性的影响 ($R_{sh} = \infty$)
Fig. 4 Influence of R_s on I-V curves of solar cells ($R_{sh} = \infty$)

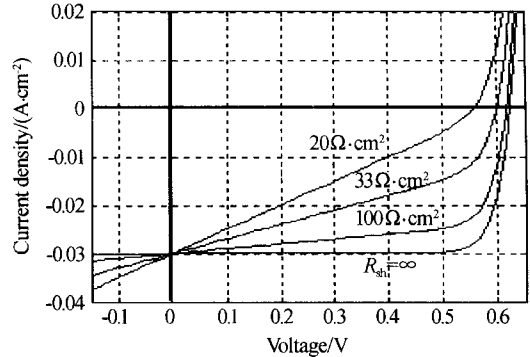


图 5 R_{sh} 的大小对太阳能电池伏安特性的影响 ($R_s = 0$)
Fig. 5 Influence of R_{sh} on I-V curves of solar cells ($R_s = 0$)

表 1 不同 R_s 值对应的太阳能电池的性能参量

$R_{sh} = \infty$	1	2	3	4	5	6
$R_s / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	0	10	20	30	40	50
V_{oc} / V	0.624	0.624	0.624	0.624	0.624	0.624
$J_{sc} / (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.03	0.03	0.027797	0.019848	0.015132	0.012199
F.F	0.83146	0.43825	0.26447	0.25269	0.25102	0.25047

表 2 不同 R_{sh} 值对应的太阳能电池的性能参量

$R_s = 0$	1	2	3	4	5	6
$R_{sh} / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	∞	1000	100	50	20	10
V_{oc} / V	0.624	0.623	0.618	0.61	0.556	0.3
$J_{sc} / (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
F.F	0.83146	0.81702	0.68316	0.54168	0.26978	0.25

图 6 和图 7 为根据式(7)和式(8)得到的仿真结

果,分别描述了开路电压随旁路电阻减小而下降和

短路电流随串联电阻增大而降低的关系。从图6可以看出,当 $1/R_{sh}$ 较大时,仿真结果曲线趋近于反比例函数曲线 $V_{oc}=0.03/(1/R_{sh})$;在图7中,当 R_s 较大时,仿真结果曲线趋近于反比例函数曲线 $J_{sc}=0.6/R_s$ 。其比例系数0.03和0.6分别近似等于短路电流和开路电压的值。

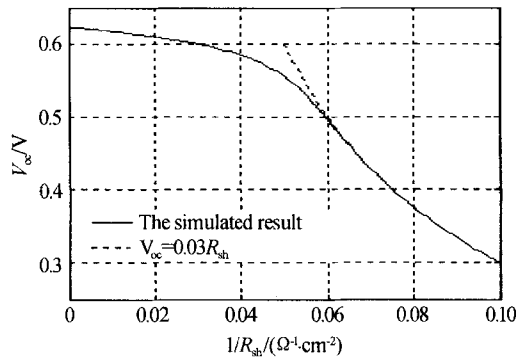


图6 开路电压与旁路电阻(R_{sh})的关系
Fig. 6 Open-circuit voltage vs. shunt resistance

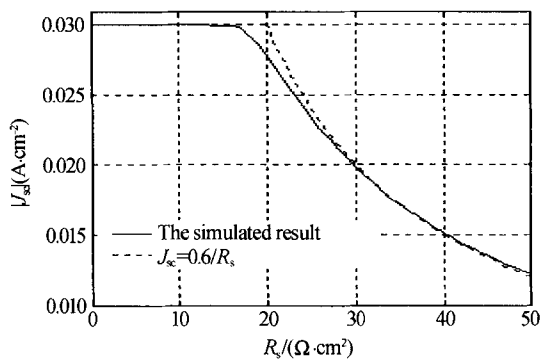


图7 短路电流与串联电阻(R_s)的关系
Fig. 7 Short-circuit current vs. series resistance

最后,对一个市售的 $1 \times 0.5 \text{ cm}^2$ 硅太阳能电池的伏安特性进行了测试,将测试结果与一定参量下的数值模拟结果进行了比较(如图8)。可以看出仿真结果与实验测量数据基本一致。

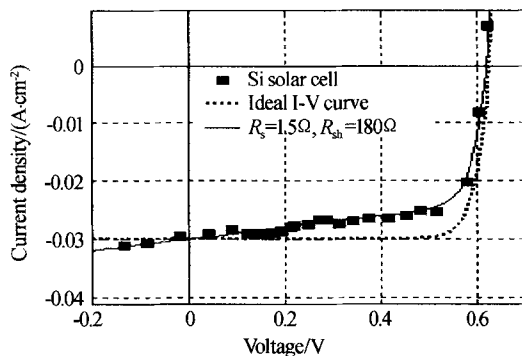


图8 Si太阳能电池实测数据与模拟结果的比较
Fig. 8 Measured I-V data of a Si solar cell compared to the simulated results

4 结论

本文通过对P-N结在外加偏压下的特性进行

分析,建立了实际P-N结的电路模型,并对其做了理论分析与数值模拟。对于二极管在正向和反向偏压下表现出的线性伏安特性,该模型可以达到与实验相似的结果。同时,对光照下的P-N结,利用Simulink的数学模块库建立了仿真系统,得出了在不同串联电阻和旁路电阻情况下的电流电压关系。由仿真所得的数据表明:串联电阻影响P-N结的正向伏安特性,使得正向偏压较低时电流大于理想值,正向偏压增大时伏安特性成线性关系;旁路电阻产生的漏电流影响反向特性,使反向电流不能饱和,在反向偏压较大时电流电压成线性关系。对于有外界能量输入的太阳能电池,数值模拟的结果表明:旁路电阻 R_{sh} 影响其开路电压, R_{sh} 减小会使开路电压降低,但对短路电流基本没有影响;串联电阻 R_s 影响短路电流, R_s 增大会使短路电流降低,而对开路电压没有影响; R_{sh} 的减小和 R_s 的增大都会使太阳能电池的填充因子和光电转换效率降低。理论分析和数值模拟的结果都与实验测得的数据一致。

参考文献

- 1 黄昆,韩汝琦. 半导体物理基础. 北京:科学出版社, 1979. 110~139
Huang K, Han R Q. Physics Foundation of Semiconductor. Beijing: Scientific Press, 1979. 110~139
- 2 刘恩科,朱秉升,罗晋升,等. 半导体物理学. 西安:西安交通大学出版社, 1998. 159~166
Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng, et al. Physics of Semiconductor. Xi'an: Press of Xi'an Jiaotong University, 1998. 159~166
- 3 Robert F. Pierret. Semiconductor Device Fundamentals. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 166~199
- 4 邱勇,杨延强,杨庆鑫,等. 有机聚合物材料中光生载流子传输的跳跃运输. 光子学报, 2001, 30(9): 1102~1103
Qiu Y, Yang Y Q, Yang Q X, et al. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(9): 1102~1103
- 5 梁创,廖静,梁冰,等. 硅雪崩光电二极管单光子探测器. 光子学报, 2000, 29(12): 1142~1143
Liang C, Liao J, Liang B, et al. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(12): 1142~1143
- 6 汪韬,赛小锋,李晓婷,等. 新型非涅尔聚焦聚光太阳能电池组件研究. 光子学报, 2003, 32(5): 626~626
Wang T, Sai X F, Li X T, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(5): 626~626

Analysis and Simulation of Solar Cells' V-A Properties Based on P-N Junction

Ren Ju, Guo Wenge, Zheng Jianbang

Optical Information Technology Laboratory, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

Received date: 2004-12-30

Abstract With the establishing of a mathematical model of P-N junction, the difference between a practical P-N junction and its ideal model was analyzed. The volt-ampere properties of diodes and solar cells were simulated through the model. The influence of series and shunt to open-circuit voltage and short-circuit current of solar cells under certain illumination were demonstrated. With a simple model established by Matlab, the equivalent circuit of a solar cell was numerically analyzed and solved through an equation. At last, I-V properties of a Si solar cell were measured and compared to the I-V curve calculated by our model whose parameters were set properly. The results show that the model established in this paper is consistent with the practical devices.

Keywords P-N junction; V-A property; Equivalent circuit; Solar cell



Ren Ju was born in 1981, Shanxi Province. He received his B. S. degree of material physics in Harbin University of Science and Technology in 2003. Now he is studying for his M. S. degree in optical in Northwest Polytechnical University. His main research interest is organic film solar cell.