

文章编号: 1000-7032(2012)06-0660-05

# 晶体硅太阳能电池数值模拟软件及其应用

张寅博<sup>1</sup>, 潘 淼<sup>1</sup>, 程 翔<sup>1</sup>, 陈 朝<sup>1 2 3\*</sup>(1. 厦门大学 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 能源研究院, 福建 厦门 361005;  
3. 福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 提出一种在 Matlab/GUI 环境下设计的晶体硅太阳能电池数值模拟软件, 通过光生少数载流子连续性方程建立了单晶硅  $N^+/P/P^+$  结构太阳能电池的物理模型。通过引进有效迁移率和有效少子扩散长度概念, 并考虑多晶硅中晶界复合后, 实现了对单晶硅、柱状多晶硅太阳能电池的开路电压、短路电流、填充因子、转化效率、串并联电阻等电池性能的参数指标的数值模拟。程序模拟结果通过数值和图形两种方式输出, 模拟结果与实验结果接近, 能够为晶体硅太阳能电池的设计与制备起到较好的指导作用。本程序对于以 N 型材料为衬底的晶体硅太阳能电池同样适用。

**关键词:** 晶体硅太阳能电池; 数值模拟; Matlab/GUI

中图分类号: TM914.41 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20123306.0660

## Numerical Simulation for Crystalline Silicon Solar Cells

ZHANG Yin-bo<sup>1</sup>, PAN Miao<sup>1</sup>, CHENG Xiang<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>1 2 3\*</sup>(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;  
2. School of Energy Research, Xiamen University, Xiamen 361005, China;  
3. Fujian Province Semiconductor Illumination Center, Xiamen 361005, China)

\* Corresponding Author, E-mail: cchen@xmu.edu.cn

**Abstract:** A software for the numerical simulation of crystalline silicon solar cells is developed. Photocarrier continuity equation, effective mobility, effective minority carrier diffusion length and carrier recombination on crystal boundary of multicrystalline silicon are taken into account in the physical model. The software outputs the numerical simulation of crystalline silicon solar cells by numerical results and graphics. As the simulation results close to experimental data, the software can be a good guide for the design and production of crystalline silicon solar cells.

**Key words:** crystalline silicon solar cells; numerical simulation; Matlab/GUI

## 1 引 言

太阳能电池的主要研究方向是提高电池的光电转换效率, 而光电转换效率及其性能参数受到电池材料参数、结构参数的影响<sup>[1]</sup>。因此, 在探索

优化太阳能电池设计与制备工艺以提高光电转换效率的过程中, 分析太阳能电池的材料参数、结构参数等如何影响电池性能就显得十分重要。

目前对于分析、模拟太阳能电池性能参数, 国内主要采用 TMA 公司开发的 Medici、Silvaco 公司开

收稿日期: 2012-03-12; 修订日期: 2012-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(61076056); 福建省重大科技专项专题(2007HZ0005-2)资助项目

作者简介: 张寅博(1986-), 男, 福建厦门人, 主要从事晶体硅太阳能电池制备与模拟的研究。

E-mail: zhangyinbo@foxmail.com

发的 Atlas、Crosslight 公司开发的 Apsys 和澳大利亚新南威尔士大学 Martin A. Green 等设计的 PC1D 进行<sup>[2]</sup>。它们在一定运用范畴内能够满足对于电池性能进行模拟的功能。然而,前三者对硅基薄膜所建立的模型过于简化,并不能完全适用于实际情况<sup>[3]</sup>;而 PC1D 软件使用有限元方法,需迭代运算,计算量较大。

本文提出一种自主开发的太阳能电池数值模拟软件,通过光生少数载流子连续性方程建立单晶硅太阳能电池的物理模型,引进了有效迁移率和有效少数扩散长度概念,并在考虑了多晶硅中晶界复合后,实现电池材料和结构参数对单晶硅、柱状多晶硅太阳能电池开路电压、短路电流、填充因子、转化效率和串并联电阻等电池性能指标影响的数值模拟。软件具有物理意义明确、无需反复迭代、计算速度快、模拟结果与实验结果接近等优点。

## 2 软件设计

### 2.1 软件功能

根据所要实现的数值模拟功能,软件设计开发了适应单晶硅/多晶硅、N 型衬底/P 型衬底、有/无背电场、有/无高低结 4 类选项、共 16 种结构晶体硅太阳能电池的数值模拟。

在对单晶硅太阳能电池的模拟中,软件主要针对单晶硅太阳能电池基区厚度、发射区厚度、基区少数载流子浓度和发射区少数载流子浓度等参数对电池短路电流、开路电压、填充因子和转换效率的影响情况进行模拟。

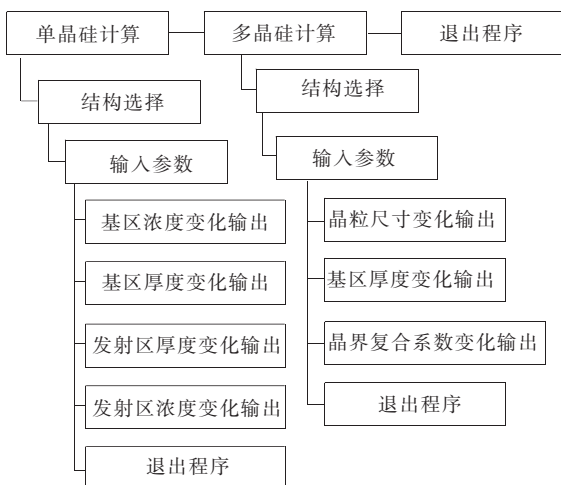


图 1 软件的菜单结构

Fig. 1 Menu structure of the software

在对多晶硅太阳能电池的模拟中,软件主要针对晶粒尺寸、基区厚度和晶界复合系数对电池转换效率等特性的影响情况进行模拟。

软件功能菜单结构如图 1 所示。

### 2.2 物理模型

利用软件对 P 型、N 型晶体硅太阳能电池进行数值模拟,相应的一维电池模型分别对应  $N^+/P/P^+$  和  $P^+/N/N^+$  结构。以  $N^+/P/P^+$  结构为例,电池简化后的一维结构模型如图 2 所示。

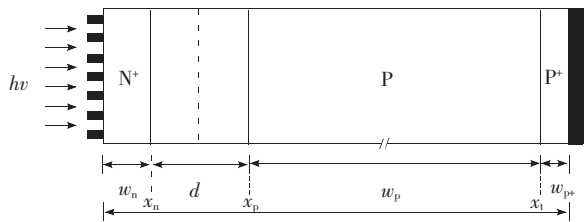


图 2  $N^+/P/P^+$  型硅电池的结构模型

Fig. 2 Model structure of  $N^+/P/P^+$  type silicon solar cell

其中  $x_n$  表示发射区结深的位置(厚度  $w_n$ )、 $x_p$  为基区前表层的位置(厚度  $w_p$ )、 $x_t$  表示不包括背面重掺杂区域的电池总厚度、 $d$  表示耗尽区厚度、 $w_{p+}$  表示背面场厚度。

多晶硅太阳能电池的模型:在理想条件下多晶硅的晶粒为柱状,晶界垂直于电池表面,晶粒内的光生少数载流子(以下简称少数)在电池内部的运输过程中通过 P-N 结收集。如果将晶界的影响归结为对少子的扩散长度和迁移率的改变,这时对多晶硅的模拟就可以转变为单晶硅的模型,如图 3 所示。

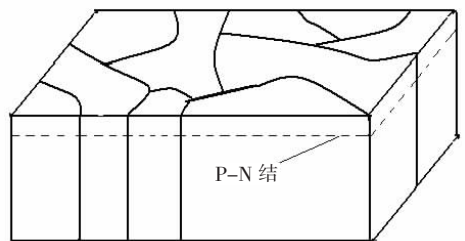


图 3 多晶硅太阳能电池的理想化柱状结构

Fig. 3 Idealized model structure of a columnar multicrystalline silicon solar cell

在权衡模拟的运算速度与准确性后,参照有关研究做出以下合理的假设和近似<sup>[4]</sup>:

- (1) 根据 M. Wolf 漂移场理论,不考虑杂质梯度所产生漂移场的影响;
- (2) 耗尽区的电流不仅包括光生电流也包括

载流子的复合电流;

(3) 光生载流子的量子产额为 1, 衰减均由吸收造成;

(4) 不考虑杂质对硅光吸收系数的影响;

(5) 发射区表面复合速率近似采用常数;

(6) 由于电池的厚度远大于背面场的厚度, 因此忽略了背电场的光生电流, 背面场仅用来计算基区的背表面复合速率;

(7) 在耗尽区的边界处, 非平衡载流子完全耗尽。

基于以上假设, 通过求解模型各区的少子稳态连续性方程与准平衡条件下的边界条件, 得出电池总电流密度。以  $N^+ / P / P^+$  结构中  $N^+$  区为例的稳态连续性方程与准平衡条件下的边界条件如式(1) ~ (3) 所示:

$$\frac{\partial^2 \Delta p(x)}{\partial x^2} - \frac{\Delta p(x)}{L_p^2} = \frac{G(x)}{D_p}, \quad (1)$$

$$-D_p \left. \frac{\partial \Delta p(x)}{\partial x} \right|_{x=0} = -S_n \Delta p(0), \quad (2)$$

$$\Delta p(x_n) = p(x_n) - p_{N0}, \quad (3)$$

其中  $S_n$  表示  $N^+$  区前表面光生载流子的复合速率  $p(x)$  表示  $N^+$  区  $x$  处的非平衡空穴浓度  $L_p$  和  $D_p$  分别是  $N^+$  区空穴的扩散长度和扩散系数。

在考虑晶界影响后, 少子的有效迁移率  $\mu_{eff}$  可表示为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{1}{\mu_{eff}} = \frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu_g}, \quad (4)$$

其中  $\mu_0$  为单晶硅中的少子迁移率  $\mu_g$  为考虑晶界影响后多晶硅的少子迁移率。

关于少子的有效扩散长度  $L_{eff}$ , 参照相关学者的研究<sup>[6-7]</sup> 在考虑了晶界复合速率  $S_g$  后推导少子有效扩散长度的公式。

目前对于多晶硅太阳能电池的模拟, 多数采用圆柱体模型和长方体模型, 本文采用圆柱体模型, 即认为多晶硅是由柱状圆柱体构成(直径为  $G$ ), 则在晶界处少子寿命的表达式由(5) 式给出:

$$\tau_g = \frac{G}{2S_g}, \quad (5)$$

式中  $\tau_g$  表示有晶界影响时的少子寿命  $S_g$  表示晶界复合速率。再根据下面的经典公式:

$$L_g = \sqrt{D\tau_g}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{L_{eff}^2} = \frac{1}{L_0^2} + \frac{1}{L_g^2}, \quad (7)$$

得到少子的有效扩散长度关于晶粒和晶界复合速度的表达式, 即

$$\frac{1}{L_{eff}^2} = \frac{1}{L_0^2} + \frac{2S_g}{DG}, \quad (8)$$

其中  $D$  是少子的扩散系数  $L_0$  是单晶硅中的少子扩散长度。

最后利用求解的少子的有效迁移率和有效扩散长度, 代入各区光生少子的连续性方程可以得到电池的短路电流密度  $J_{sc}$  及太阳能电池的其他特性如开路电压  $V_{oc}$ 、填充因子  $FF$  和光电转换效率  $\eta$ <sup>[4, 8]</sup>。

### 2.3 数值模拟主程序

通过以上讨论的拟实现功能和建立物理模型与基本假设, 编写了数值模拟主程序、各模块逻辑关联程序和操作界面程序。而数值模拟主程序又根据所实现功能不同细分为各个功能模块, 如对基区浓度、发射区厚度、晶粒尺寸等分别作为待考察目标变量, 模拟其对电池特性的影响。每个细分功能模块的程序结构如图 4 所示。

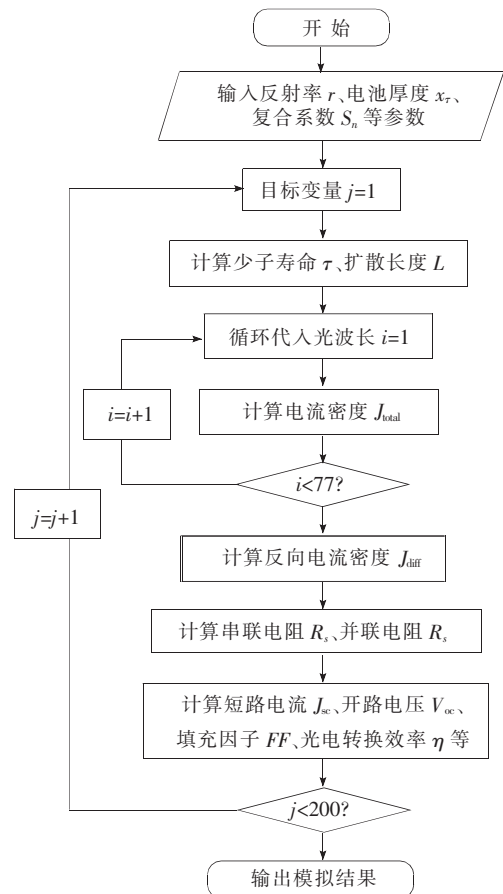


图 4 数值模拟主程序结构

Fig. 4 Program structure of numerical simulation

## 2.4 软件界面与模拟

软件采用 Matlab/GUI 环境开发,将冗长复杂的物理模型代码、数值运算代码编写在软件程序后台,而软件前台采用 GUI 人机互动对话框的形式,完成了包括太阳能电池结构选择、参数输入、参数与图形输出等数值模拟所需的流程,增强了本软件的通用性与使用的便捷性。以单晶硅太阳能电池数值模拟参数输入界面为例,如图 5 所示。



图5 参数输入界面

Fig.5 Parameters input interface

在软件实现对晶体硅太阳能电池数值模拟的过程中,先选择单晶硅/多晶硅、N型衬底/P型衬底、有/无背电场、有/无高低结的太阳能电池结构,然后通过如图 5 所示的参数输入界面输入反射系数、基区厚度、基区浓度、发射区厚度、发射区浓度、背电场厚度、背电场浓度、表面复合速率等电池参数,经过后台程序数据处理后,输出太阳能电池开路电压、短路电流、填充因子、转化效率等电池性能指标与相应变量变化区间内的数值与图形。

## 3 软件应用举例

### 3.1 基区少数浓度对 P 型多晶硅太阳能电池特性影响的模拟

在室温且大气质量为 AM1.5 的太阳光辐照条件下,选择对 P 型多晶硅无高低结无背电场太阳能电池进行数值模拟。输入参数包括:晶粒尺寸 2.5 mm、基区厚度 190  $\mu\text{m}$ 、发射区厚度 0.5  $\mu\text{m}$ 、发射区少数浓度  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、表面复合速率  $1 \times 10^3 \text{ cm/s}$ 、背面复合速率  $1 \times 10^3 \text{ cm/s}$ 、晶界复合速率  $1 \times 10^5 \text{ cm/s}$ 。其他固定参数包括:电池面积 25.38  $\text{cm}^2$ 、上电极栅线间距 0.2 cm、上电极的接触电阻  $1 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、前表面的遮光率 5%、前表面的反射系数 5%、带间复合系数  $2.5 \times 10^{-15} \text{ cm}^3/\text{s}$ 、空穴俄歇复合系数  $9.9 \times 10^{-32} \text{ cm}^6/\text{s}$ 、电子俄歇复合系数  $1.1 \times 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$ 、空穴 HSR 复合系

数  $3.65 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 、电子 HSR 复合系数  $3.9 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。同时,忽略电池背面对光的反射,并假设电池前表面对光反射均匀<sup>[4]</sup>。参数输入后,模拟 P 型衬底多晶硅太阳能电池的基区掺杂浓度  $N_A$  变化对电池转换效率、开路电压、短路电流的影响,模拟结果如图 6 所示。

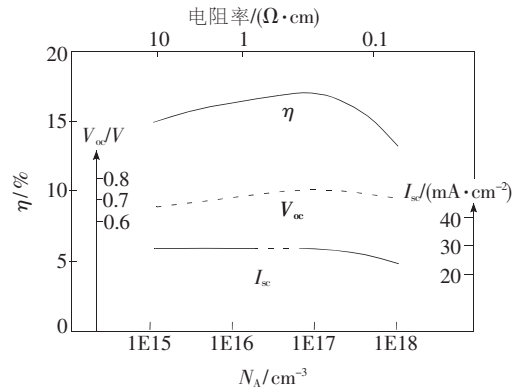


图6 基区掺杂浓度变化对电池特性的影响

Fig.6 The dependence of  $\eta/V_{oc}/I_{sc}$  on variable  $N_A$

### 3.2 模拟结果分析

图 6 给出了 P 型衬底多晶硅太阳能电池的转换效率、开路电压、短路电流在不同基区掺杂浓度情况下的数值曲线。可以看出,短路电流密度随基区掺杂浓度  $N_A$  的增加而减小。其原因主要是随着基区掺杂浓度的增加,基区少数寿命缩短,少数子在完全到达结之前被复合的几率增加,从而减小了短路电流密度。

而在一定程度上当基区掺杂浓度减小时,少数寿命增加,开路电压增大,从而提高了转换效率;但同时,掺杂浓度的减小增大了基区的串联电阻,从而又降低转换效率,两个因素相互制衡。由图中可以看出,在掺杂浓度约为  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时,转换效率达到最大值。模拟结果与 Martin A. Green 等人“从高性能的实验电池得到的太阳能电池的关键参数对 P 型掺杂浓度的依赖关系”的实验结果<sup>[9]</sup>趋势相同。

## 4 结 论

设计了一种能够适应单晶/多晶、N 型衬底/P 型衬底、有/无背电场、有/无高低结结构的晶体硅太阳能电池数值模拟软件。程序通过较为简单、明确的物理模型,避免了复杂耗时的迭代运算,模拟运算速度快,数值模拟与实验结果接近,对晶体硅太阳能电池的设计与制备有较好的指导作用。同

时 软件设计时充分考虑了数值模拟功能的后续 拓展开发 ,对于其他材料的太阳电池 ,如 GaAs、 ZnP、CdS、CdTe 等<sup>[10]</sup> ,只要修改程序代码中相关的材料参数即可实现数值模拟。

### 参 考 文 献:

- [ 1 ] Singh S N , Sharma S K , Singh P K , *et al.* Model of front-illuminated  $n^+ - p - p^+$  high efficiency silicon solar cell [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices* , 1992 , 39( 2) : 362-369.
- [ 2 ] Basore P A , Cluqston D A. PC1D version 4 for windows: From analysis to design [C]//Proceeding of 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference , Washington , USA: IEEE , 1996: 377-381.
- [ 3 ] Xiong Shaozhen , Zhu Meifang. *Solar Cell Foundation and Application* [M]. Beijing: Science Press , 2009: 113-134.
- [ 4 ] Zhang Meiyu , Chen Chao. Numerical simulation and analysis for Si  $N^+ / P / P^+$  solar cells [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica* ( 太阳能学报) , 2008 , 29( 10) : 1267-1273 ( in Chinese) .
- [ 5 ] Wang Yangyuan. *Polycrystalline Silicon Thin Film and Its Application in Integrated Circuit* [M]. Beijing: Science Press , 2000: 168-169.
- [ 6 ] Soclof S I , Iles P A. Grain boundary and impurity effects in low cost silicon solar cells [C]//Proceeding of 11th IEEE Photovoltaic Specialists Conference , New York , USA: IEEE , 1975: 56-61.
- [ 7 ] Imaizumi M , Ito T , Yamaguchi M. Effect of grain size and dislocation density on the performance of thin film polycrystalline silicon solar cells [J]. *J. Appl. Phys.* , 1997 , 81( 11) : 7635-7640.
- [ 8 ] Zhang Meiyu , Chen Chao. One-dimensional model calculation for polycrystalline silicon solar cells [J]. *Semiconductor Optoelectronics* ( 半导体光电) , 2008 , 29( 5) : 631-635 ( in Chinese) .
- [ 9 ] Green M A. *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion* [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press , 2010: 95-98.
- [ 10 ] Li Yanhua , Pan Miao , Pang Aisuo , *et al.* The application of electroluminescence imaging to detection the hidden defects in silicon solar cells [J]. *Chin. J. Lumin.* ( 发光学报) , 2011 , 32( 4) : 378-382 ( in Chinese) .