环境条件对晶硅电池温场分布及输出特性的影响

王欣欣, 陆晓东*, 高洁, 宋扬, 王洋

渤海大学新能源学院, 锦州 121007

* E-mail: lxd2211@sina.com

收稿日期: 2017-09-03; 接受日期: 2018-02-26; 网络版发表日期: 2018-05-29

国家重点基础研究发展计划(编号: 2010CB933804)和国家自然科学基金(批准号: 11304020)资助项目

摘要 基于有限差分法分析了电池与环境之间热交换过程不同时, 环境温度对电池内部温场分布及输出参数的影响. 研究表明: 在真空环境下, 电池温度将恒定在300 K, 电池与真空环境间主要的换热方式为热辐射; 在理想散热条件下, 电池温度与环境温度基本相同, 电池与环境间热交换方式为热传导, 电池的 V_{oc} , FF 和 η 随温度增加线性减小; 在静止空气层包围的条件下, 电池温度与环境温度之间存在较大差异, 电池前后表面出现温差, 电池与环境之间的热交换方式为热传导, 电池的 V_{oc} , FF 和 η 值随温度增加呈非线性减小的趋势.

关键词 晶硅电池, 输出参数, 温度, 短路电流, 开路电压

1 引言

环境温度对晶硅电池输出特性的影响, 自晶硅电池实用化后就受到广泛关注^[1]. 早在1958年, Prince等人^[2]就基于硅材料性质易受温度影响的特点, 研究了温度对不同电池输出特性的影响. 此后, 随着以晶硅电池为主要产品的光伏发电市场的逐渐扩大, 人们对晶硅电池输出参数温变特性的研究也逐渐深入, 并获得许多重要结论^[1-4]: 随温度增加, 晶硅电池的开路电压(V_{oc})逐渐减小, 短路电流(J_{sc})基本不变, 电池效率(η)降低.

近年来, 在全球光伏市场装机容量急剧增加的大背景下, 研究晶硅电池输出参数温变特性产生的机理, 已成为晶硅电池领域的研究热点. 2003年, Green^[5]讨论了载流子复合速率和载流子浓度的温变特性对晶硅

电池开路电压和短路电流的影响. 2003年, Malik等人^[6]研究了太阳辐射和环境温度变化时晶硅电池输出参数的变化规律. 2005年, Meneses-Rodriguez等人^[7]研究了在25°C~170°C范围内, 载流子输运机制和复合机制对晶硅电池输出参数的影响. 2008年, Singh等人^[8]研究了22°C~47°C范围内, 带隙宽度、方块电阻和串联电阻的温变特性对晶硅电池 V_{oc} 值和曲线因子(CF)的影响. 2012年, Mekhilef等人^[9]指出灰尘、湿度和风速是影响晶硅电池输出参数温变特性的重要因素, 且3种因素对电池输出参数的影响之间存在相互耦合. 2012年, Singh和Ravinda^[10]又指出: 反向饱和电流密度(j_0)是影响晶硅电池温变特性的关键因素. 2013年, Cuce等人^[11]研究了太阳辐照强度和环境温度变化对晶硅电池短路电流和开路电压的影响. 2014年, Xiao等人^[12]研究了少子迁移率的温变特性对晶硅电池效率的

引用格式: 王欣欣, 陆晓东, 高洁, 等. 环境条件对晶硅电池温场分布及输出特性的影响. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 671–679

Wang X X, Lu X D, Gao J, et al. Effect of environmental conditions on temperature field distribution and output characteristics of crystalline silicon cell (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 671–679, doi: 10.1360/N092017-00304

影响. 2015年, Ghani等人^[13]研究了串并联阻抗、带隙、暗电流和光电流等参数的温变特性对晶硅电池输出参数的影响. 2016年, Lu等人^[14]研究了电池前后表面温差对晶硅电池输出参数的影响. 上述研究表明: 环境温度变化对晶硅电池输出参数的影响主要与决定晶硅电池内部载流子产生、输运和收集过程有关的微观机制有关.

本文利用引入不同的边界层, 进一步探讨当晶硅电池与环境之间热交换过程不同时, 环境温度对晶硅电池温度分布及输出参数的影响.

2 数值方法和电池参数

2.1 数值方法

计算过程中, 先采用本组开发的二维有限差分程序求解Maxwell方程和半导体器件基本方程, 获得晶硅电池内部各点的载流子浓度和电流密度^[14,15]. 求解过程中, 在欧姆电极区和非欧姆电极区的边界条件分别采用Dirichlet和Neumann边界条件. 计算电池温度特性时, 将获得电学参量代入式(1)中, 求解电池内部的温场分布^[15].

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) Q_{\text{thermal}}, \quad (1)$$

式中, C 为单位体积的热容, κ 为热导率, T 为温度, Q_{thermal} 为稳态下单位体积内与载流子产生、复合和输运过程有关的吸放热. Q_{thermal} 表示形式如下:

$$Q_{\text{thermal}} = Q_J + Q_C + Q_{\text{PT}}, \quad (2)$$

式中, Q_J , Q_C 和 Q_{PT} 分别表示焦耳热、载流子产生和复合过程的吸放热以及Peltier和Thomson热, 具体为

$$Q_J = \frac{J_n^2}{qn\mu_n} + \frac{J_p^2}{qp\mu_p}, \quad (3)$$

$$Q_C = \frac{R-G}{q} \cdot [(E_p - E_n) + T(P_n + P_p)], \quad (4)$$

$$Q_{\text{PT}} = -\frac{T(J_n \nabla P_n - J_p \nabla P_p)}{q}, \quad (5)$$

式中, T , q , n 和 p 分别为温度、基本电荷、电子密度和空穴密度; J_n 和 J_p 为电子和空穴电流密度; μ_n 和 μ_p 为电子和空穴的迁移率; R 和 G 为载流子产生和复合速率; E_n 和 E_p 为电子和空穴的准费米能; P_n 和 P_p 为电子和空穴的热电功率. 式(3)~(5)涵盖了电池内部光生载流子

的带间跃迁、带内弛豫和带间复合过程及载流子与晶格之间的热交换. 式(1)求解方法仍为有限差分法, 边界条件采用Dirichlet型边界条件.

在有限差分计算过程中, 根据材料性质和场参数的空间分布对计算空间的网格进行赋值. 为获得准确的计算结果, 二维空间的网格分辨率选择 $\lambda_{\text{min}}/20$, 其中 λ_{min} 为入射光的最小波长. 计算效率和温度过程中采用的波长范围为300~1200 nm, 各材料的折射率和太阳光谱ASTM Direct+circumsolar tilt数据均源自专业网站(<https://www2.pvlighthouse.com.au/resources/photo-voltaic%20materials/refractive%20index/refractive%20index.aspx>).

2.2 电池结构及计算参数选择

(1) 几何参数

图1给出了电池芯片的结构, 其包括前表面Ag栅极(Cathode)、SiN_x减反膜(ARC)、晶硅有源层(c-Si)、背表面钝化层(BL)和底面Al电极(Anode), 其中ARC层、织构结构、BL层和Anode层构成晶硅电池的陷光结构. 在图1中, H1, H2, H3, H4和H5分别表示Cathode层、ARC层、BL层、Anode层和织构层的厚度; L1, L2和L3分别表示Cathode层、Anode层和周期性织构结构(文中代表金字塔结构, 织构角度为 θ)的宽度. 仿真过程中, 选择晶硅电池常用参数^[8,11,15]: H1=H4=500 nm, H2=80 nm, H3=200 nm和H5=7 μm; L1=L2=150 nm, L3=10 μm和 $\theta=54.74^\circ$.

(2) 工艺参数

在仿真中, 选择均匀掺杂的P型硅衬底, 掺杂浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ($\rho=0.266 \Omega \text{ cm}$), 电子和空穴的寿命均为1 ms; 在硅衬底前表面进行磷扩散, 扩散温度为900℃, 扩散时间为10 min, 扩散氛围中磷的浓度为 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. 图2是基于Silvaco软件的Athena模块, 利用上述扩散条件获得的杂质浓度分布, 其中 N 代表净杂质浓度, 坐标 X 和 Y 的取值方向见图1. 计算过程中, 先取 X 向和 Y 向网格间距均为1 μm, 然后利用Silvaco软件的Devedit模块对计算空间网格数量进行整体优化, 最终获得的三角形网格数为23262个. 由图2可见: 在相同扩散条件下, 因织构结构的影响, 杂质在晶硅电池内呈不均匀分布状态; 越靠近金字塔“塔尖”的位置, 越具有更大的结深; 不同条件下, 表面浓度趋于一致($N_s \approx 3.8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$).

图 1 (网络版彩图)晶硅电池的典型结构

(3) 材料参数

在热特性仿真过程中, 假设Ag和Al电极与硅有源层间形成良好的欧姆接触, 且主要考虑禁带宽度 E_g 、导带态密度 N_c 、价带态密度 N_v 、电子迁移率 μ_n 和空穴迁移率 μ_p 等对晶硅电池热性质的影响. 采用的具体公式如下^[14,15]:

$$E_g(T) = E_g(300) + E_{ga} \times \left[\frac{300^2}{300 + E_{gb}} - \frac{T^2}{T + E_{gb}} \right] \quad (6)$$

$$N_{c,v}(T) = \left(\frac{T}{300} \right)^{\frac{3}{2}} N_{c,v,300} \quad (7)$$

$$\mu_{n,p} = \mu_{n1,p1} \left(\frac{T}{300} \right)^{\alpha_n, \alpha_p} + \frac{\mu_{n2,p2} \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta_n, \beta_p}}{1 + \frac{N}{N_{n0,p0} \left(\frac{T}{300} \right)^{\gamma_n, \gamma_p}}} \quad (8)$$

式中, $E_g(300)$, $N_{c,300}$, $N_{v,300}$ 分别是300 K下晶硅材料的禁带宽度、导带态密度和价带态密度, T 为温度, N 为局部净掺杂浓度. 计算过程中的参数选择为^[14,15]: $E_g(300)=1.08$ eV, $E_{ga}=4.73 \times 10^{-4}$ eV/K, $E_{gb}=636$ K, $N_{c,300}$

$=2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_{v,300}=1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_{n1}=88 \text{ cm}^2/(\text{V s})$, $\mu_{p1}=54.3 \text{ cm}^2/(\text{V s})$, $\gamma_n=\gamma_p=2.546$, $\alpha_n=\alpha_p=-0.57$, $\beta_n=\beta_p=-2.33$, $\mu_{n2}=1252 \text{ cm}^2/(\text{V s})$, $\mu_{p2}=407 \text{ cm}^2/(\text{V s})$, $N_{n0}=1.432 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_{p0}=2.67 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 式(6)~(8)给出的各参数随温度变化, 既适用于电池体内温度均匀情况, 也适用于电池体内温度不均匀情况.

(4) 热学参数

仿真中采用计算材料热学参数的常用 κ 值和 C 值模型(<http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/palankovski/>):

$$\kappa(T) = \kappa_{300} \left(\frac{T}{300} \right)^{\alpha} \quad (9)$$

$$C(T) = C_{300} + C_1 \frac{\left(\frac{T}{300} \right)^{\beta} - 1}{\left(\frac{T}{300} \right)^{\beta} + \frac{C_1}{C_{300}}} \quad (10)$$

在250~400 K温度范围内, Al和Ag材料的 κ 值和 C 值受温度影响较小, 所以仿真过程中认为两种材料的热学参数不随温度变化, 且取300 K时这些的热学参数值. 图1中各材料的热学参数的选择如表1所示(<http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/palankovski/>; http://www.efunda.com/materials/materials_home/materials.cfm).

3 结果与讨论

环境与电池之间的热交换过程主要通过传导、对流和辐射3种方式实现, 其中对流换热方式主要指电池环境为气体, 换热速率受控于电池近表面的气流性质, 而传导和辐射换热方式取决于电池表面与环境之间的温度梯度及温差大小. 为了清晰地探讨环境温度对电池温场分布和输出参数的影响, 我们利用电池表面边界层(厚度为0.1 μm)性质变化, 研究不同环境条件对

图 2 (网络版彩图)杂质浓度分布. (a)为在 Y 值处于0~29 μm , X 值处于0~10 μm 范围内, 扩散后杂质浓度分布; (b)为沿平行于 Y 轴, 且过(X , $Y=0$)点的直线上的净杂质浓度分布

表 1 SiN_x , SiO_2 和Si的热学参数

参数	SiN_x	SiO_2	Si	Al	Ag
κ_{300} ($\text{W K}^{-1} \text{m}^{-1}$)	18.5	1.38	148	237	429
α	0.33	0.33	-1.3	0	0
C_{300} ($\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$)	709	709	711	890	235
C_1 ($\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$)	820	696	255	0	0
β	1.5	1.5	1.85	0	0

晶硅电池输出参数和温场特性的影响。

3.1 边界层为真空环境

若边界层为真空环境, 且取其热学参数为 $\kappa=10^{-10} \approx 0 \text{ W K}^{-1} \text{m}^{-1}$, $C=10^{-10} \approx 0 \text{ J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$ 。图3给出了此时电池内部温场分布、吸放热和输出参数情况, 其中图3(c)中给出了ASTM Direct+circumsolar太阳辐射光谱对应的光功率 W_1 和电池(Cell)吸收光谱对应的

光功率 W_2 的值; Q_{thermal} 的定义见式(1)。

由图3可见, 电池内部温度近似为300 K, 沿平行于X轴的直线上, 电池温度基本相同(图3(a)); 因高能光子更易在电池前表面吸收, 并将多余能量传递给晶格, 所以电池上表面的温度高于下表面的温度, 且呈线性降低趋势, 变化率约为 $4.17 \times 10^{-5} \text{ K}/\mu\text{m}$, 中心电极附近区域温度最低(图3(b)); 入射的光功率 $W_1=900 \text{ W/m}^2$, 电池吸收的光功率 $W_2=556 \text{ W/m}^2$ (图3(c)), Q_{thermal} 的变化范围非常大 ($-10^5 \sim 10^5 \text{ W/cm}^3$), 剧烈变化的范围集中在近电池前后表面非常薄的高载流子浓度区域, 而电池内部平行于X轴的直线上, Q_{thermal} 几乎具有相同的值, 且越靠近前表面 Q_{thermal} 的值越大(图3(d)和(e)); 电池输出参数, 即 $J_{\text{sc}}=-35.93 \text{ mA/cm}^2$, $V_{\text{oc}}=0.6761 \text{ V}$, $FF=84.24\%$, $\eta=20.61\%$ (如图3(f)所示), 电池输出的电功率 $P_E=V_{\text{oc}} \times J_{\text{sc}} \times FF=204 \text{ W/m}^2$ 。

由于电池外为真空环境, 传导和对流换热机制失

图 3 (网络版彩图) (a)为电池内部温场分布; (b)为电池内沿过($X=5 \mu\text{m}$, $Y=0 \mu\text{m}$), ($X=3 \mu\text{m}$, $Y=0 \mu\text{m}$)和($X=0 \mu\text{m}$, $Y=0 \mu\text{m}$)三点且平行于Y轴直线上的温度分布; (c)为电池吸收光谱性质; (d)为3种热产生机制的吸放热情况; (e)为非织构区3种热产生机制的吸放热情况; (f) 电池输出参数

去作用, 所以辐射换热方式将成为决定电池表面温度的唯一因素, 而电池内部的温度分布则完全由 Q_{thermal} 值及电池有源层固有的热参数决定. 由图3(c)和(f)可见, 图1电池结构对入射光功率的吸收率 $\alpha_{\text{sun}}=W_2/W_1 \times 100\%=61.78\%$; 入射光转换为热能的功率 $E_a=W_2-P_E=352 \text{ W/m}^2$. 根据热平衡条件和关系式 $E_b=\zeta\sigma T^4$ (Stefan-Boltzmann定律, 其中 E_b 为辐射能, ζ 为发射率, σ 为Stefan-Boltzmann常数, T 的Kelvin温度)可知, 当 $E_a=E_b$ 时, $\zeta=0.7666$, 这一数值与文献[16,17]给出的 ζ 取值范围基本一致, 其含义为平均发射率. 根据以上分析可知: 在电池内部存在3种热产生机制和表面仅有辐射换热方式的条件下, 电池可以保持稳定的温度分布和稳定的输出参数.

3.2 边界层为理想导热层

若边界层为理想的导热层, 即热量传递到边界均

会被有效吸收, 取边界层的热学参数为: $\kappa=10^{10} \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$, $C=10^{10} \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$. 此时电池内部温场分布、吸放热和输出参数情况, 如图4所示. 由图4(a)和(b)可见, 电池内部温度与环境温度基本一致, 仅存在微小温度漂移, 且温度漂移随环境温度增加而缓慢增大; 在平行于 X 轴的直线上, 电池内部具有相同的温度; 电池前表面的温度高于后表面温度, 且温度最高点主要集中于 Y 值处于 $50\sim 100 \mu\text{m}$ 范围内. 由图4(c)和(d)可见, 电池体内的 Q_{thermal} 值变化很小(计算表明250和350 K时, 电池内部 Q_{thermal} 值分别处于 $0\sim 10$ 和 $40\sim 50 \text{ W/cm}^3$ 范围内); 电池前后表面的 Q_{thermal} 值为负, 以吸热为主; 平行于 X 轴的直线上, Q_{thermal} 值基本不变. 由图4(e)和(f)可见, 随温度增加, 电池 I - V 特性曲线逐渐向电流轴靠近, 但 J_{sc} 值基本不变; V_{oc} , FF 和 η 值均呈现线性减小的趋势, 且三者减小的速率分别约为 1.82 mV/K , 0.0759% 和 0.0706% .

图4 (网络版彩图) (a)和(b)为环境温度为250和350 K时, 电池内部温场分布情况; (c)和(d)为环境温度250和350 K时, 电池内部3种热产生机制的总吸放热情况; (e)为不同温度下电池的 I - V 特性; (f)为不同温度下电池输出参数

边界层的无穷大热导率和热容条件, 确保了边界层内部不存在温差和边界层的温度不因电池与环境之间热交换过程而发生变化, 因此边界层实际作用是将电池表面温度固定于环境温度, 并形成良好的热沉. 在这种条件下, 由于电池表面、边界层与环境处于同一温度, 电池表面与环境之间辐射换热过程相互抵消, 所以传导换热成为电池表面唯一有效的换热方式. 电池表面温度受边界层温度的影响, 其温度取边界层温度, 而电池内部3种热产生机制产生的热量, 主要以热传导方式在电池内沿向边界层方向传输, 并建立起稳定的温度分布, 所以电池内部最高温度点主要集中在电池Y向中间线以上的区域(图4(a)和(b)). 在远离电池表面的低载流子浓度区域, 3种热产生机制的总作用是释放热量(Q_{thermal} 值为正), 这些热量在温度梯度的作用下, 不断向电池表面输送, 因电池表面载流子浓度较高, 能迅速吸收传递过来的热量, 所以表面成为主要的吸热区域. 在电池边界温度固定于环境温度的条件下, 硅材料较大的热导率将发挥明显的促使电池内部维持均匀温度状态的作用, 所以电池输出特性随环境温度的变化, 表现出明显的规律性.

3.3 边界层为空气层情况

当边界层为空气层时, 电池与边界层之间的热交换过程受多种因素的影响, 如空气热导率 $\kappa(0.026 \times 10^{-2} \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1})$ 、空气热容 $C(1 \text{ J cm}^{-3} \text{ K}^{-1})$ 、空气运动黏度系数 γ 、空气流速 v 、气流方向等. 为简化讨论, 这里我们假设电池上下表面织构结构内部的空气层均为静止的理想气体, 而晶硅电池外侧具有良好的散热(取边界热阻为 $0.01 \text{ cm}^2 \text{ K W}^{-1}$), 则此种情况与室内空气流动良好的测试环境条件类似. 此时电池内部及空气层的温场分布情况, 如图5所示. 由图5可见: 在环境温度为250 K时, 电池的前表面温度大于后表面温度, 且前后表面出现约1.5 K的温差, 如图5(a)所示; 在环境温度为350 K时, 电池后表面的温度高于前表面温度, 且前后表面也出现约1.5 K的温差, 如图5(b)所示; 电池前后表面织构区域的空气层, 均出现温度十分不均匀现象, 靠近电池表面的空气层温度与电池表面温度接近, 远离电池表面的空气层出现明显的温度梯度(亮暗变化明显), 并逐渐过渡到环境温度, 如图5(c)~(f)所示. 在仿真过程中发现: 当环境温度低于300 K时, 电池内部及

图5 (网络版彩图)晶硅电池内部和表面温度分布. (a)和(b)为250和350 K时, 电池内部温度分布情况; (c)和(d)为250和350 K时, 电池上表面空气层温度分布情况; (e)和(f)为250和350 K时, 电池下表面空气层温度分布情况

表面空气层的温度分布与环境温度为250 K时的情形类似; 当环境温度高于300 K时, 电池内部及表面空气层的温度分布与环境温度为350 K时情形类似。

实际上, 当边界层为空气层时, 因空气的热导率 κ 较硅材料低4个数量级, 热容较硅材料低2个数量级, 所以其可在一定程度上阻隔环境温度变化对电池温度特性的影响. 在存在空气层的情况下, 电池温度主要由两方面因素决定, 即电池内部的热产生机制及电池与环境之间的热交换过程. 由于电池表面与环境空气之间的温度基本相同, 且硅片表面为静止的理想气体, 所以电池与环境之间的热交换过程主要为热传导过程, 而辐射和对流换热过程可以不予考虑。

图6(a)和(b)给出了3种热产生机制产生的总吸放热情况, 可见, 远离电池表面的电池内部区域, 3种热产生机制的总作用为释放热量, 且越靠近电池后表面, 释放热量的量值越小, 体内区域释放的热量值均小于 10 W/cm^3 ; 在电池前后表面极薄的区域内, 3种热产生机制的总吸放热变化十分剧烈; 250 K时, 电池前后表

面仍主要以释放热量为主, 但电极区域附近还出现明显的吸热现象; 在350 K时, 电池前表面及后表面电极附近以吸收热量为主, 后表面薄层的其余部分以释放热量为主. 图6(c)和(d)为电池组织结构内空气层的温度变化及温度梯度变化情况, 其中电池前表面采用过点($X=0, Y=0$), 且平行于 Y 轴直线上的温度分布, 电池后表面采用过点($X=5, Y=0$), 且平行于 Y 轴直线上的温度分布. 由图6(c)和(d)可见, 250 K时, 随离有源层表面距离的增加, 空气层温度呈先缓慢减小, 后迅速减小的趋势, 且前表面空气层温度大于后表面空气层温度; 350 K时, 随离有源层表面距离的增加, 空气层温度呈先缓慢增加, 后迅速增加的趋势, 且后表面空气层温度大于前表面空气层温度; 有源层表面附近空气层的温度梯度接近于零, 而远离有源层且环境温度分别为250和350 K时, 空气层的温度梯度分别为正值和负值, 说明热传递方向相反; 随离有源层距离的增加, 温度梯度的绝对值逐渐增大, 且前表面温度梯度的绝对值逐渐小于后表面的温度梯度的绝对值. 依据有源层上下

图 6 (网络版彩图) (a)和(b)为环境温度为250和350 K时, 晶硅电池内部3种热产生机制的总吸放热情况; (c)和(d)为环境温度为250和350 K时, 空气层温度分布情况; (e)为不同温度下晶硅电池的 I - V 特性; (f)为不同温度下晶硅电池输出参数变化

表面温度梯度的交点, 可将有源层前后表面与环境之间的热交换过程分析如下: 当有源层向织构结构内空气释放热量时, 由于有源层上表面与织构结构内空气之间形成的温度梯度大于有源层下表面与织构结构内空气之间形成的温度梯度, 从而导致环境温度低于 300 K 时, 电池上表面的温度高于下表面的温度; 当环境温度高于电池温度时, 由于有源层下表面织构结构内空气与环境空气之间形成的温度梯度大于有源层上表面织构结构内空气与环境空气之间形成的温度梯度, 从而导致环境温度高于 300 K 时, 电池上表面的温度低于下表面的温度。

图6(e)和(f)给出了不同环境温度下晶硅电池的输出参数特性。由图6(e)和(f)可知, 随环境温度增加, 晶硅电池 I - V 特性曲线向电压轴靠近, 但电流密度轴的截距(短路电流)值基本不变(图6(e)); 随温度增加, V_{oc} , FF 和 η 值均逐渐降低, 特别是当环境温度大于 350 K 时, V_{oc} 值快速降低; 在 250~350 K 范围内, 随温度增加, V_{oc} , FF 和 η 值降低的速率分别为 0.37 mV/K, 0.01%/K 和 0.014%/K; 在 350~400 K 的范围内, 随温度增加, V_{oc} , FF 和 η 值降低的速率为 5 mV/K, 0.16%/K 和 0.129%/K。

4 总结

对 3 种不同环境条件下晶硅电池的温变特性进行了研究, 主要结论如下。

(1) 当边界层为真空环境时, 电池内部温度基本恒定在 300 K 左右, 且前表面温度略高于后表面温度; 电池与环境之间的热交换机制主要为热辐射。

(2) 在边界层为理想导热层的条件下, 电池温度基本与环境温度一致, 仅存在微小的温度漂移; 电池与环境之间的热交换过程主要是热传导过程; 随温度增加, 电池的 V_{oc} , FF 和 η 输出参数线性降低。

(3) 在边界层为空气层的情况下, 当环境温度低于 300 K 时, 电池前表面温度大于后表面温度, 并形成一定温差; 当环境温度大于 300 K 时, 电池的后表面温度大于前表面温度, 也形成一定的温差; 电池与环境之间的热交换方式主要为热传导; 随环境温度升高, 电池的 V_{oc} , FF 和 η 输出参数以 350 K 为分界线, 先缓慢降低逐渐过渡到快速降低。

(4) 不同条件下, 3 种热产生机制在远离电池表面的电池内部均以放热为主, 在电池前后表面具有十分剧烈的变化, 特别是在电极附近主要以吸热为主。

参考文献

- Agarwala A, Tewary V K, Agarwal S K, et al. Temperature effects in silicon solar cells. *Solid-State Electron*, 1980, 23: 1021–1028
- Prince M B, Wolf M. New developments in silicon photovoltaic devices. *J British Instit Radio Eng*, 1958, 18: 583–594
- Wysocki J J, Rappaport P. Effect of temperature on photovoltaic solar energy conversion. *J Appl Phys*, 1960, 31: 571–578
- Fan J C C. Theoretical temperature dependence of solar cell parameters. *Sol Cells*, 1986, 17: 309–315
- Green M A. General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modelling. *Prog Photovolt-Res Appl*, 2003, 11: 333–340
- Malik A Q, Damit S J B H. Outdoor testing of single crystal silicon solar cells. *Renew Energy*, 2003, 28: 1433–1445
- Meneses-Rodriguez D, Horley P P, González-Hernández J, et al. Photovoltaic solar cells performance at elevated temperatures. *Sol Energy*, 2005, 78: 243–250
- Singh P, Singh S, Lal M, et al. Temperature dependence of I - V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2008, 92: 1611–1616
- Mekhilef S, Saidur R, Kamalisarvestani M. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renew Sust Energy Rev*, 2012, 16: 2920–2925
- Singh P, Ravindra N M. Temperature dependence of solar cell performance—An analysis. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2012, 101: 36–45
- Cuce E, Cuce P M, Bali T. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. *Appl Energy*, 2013, 111: 374–382
- Xiao C, Yu X, Yang D, et al. Impact of solar irradiance intensity and temperature on the performance of compensated crystalline silicon solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2014, 128: 427–434
- Ghani F, Rosengarten G, Duke M, et al. On the influence of temperature on crystalline silicon solar cell characterisation parameters. *Sol Energy*, 2015, 112: 437–445

- 14 Lu X, Zhao Y, Wang Z, et al. Influence of environmental temperature and device temperature difference on output parameters of c-Si solar cells. [Sol Energy](#), 2016, 136: 333–341
- 15 陆晓东, 王泽来, 赵洋, 等. 晶硅电池温变过程中的输出参数及温度场特性. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 458–466
- 16 Sopori B, Chen W, Madjdpour J, et al. Calculation of emissivity of Si wafers. [J Elec Materi](#), 1999, 28: 1385–1389
- 17 Ravindra N M, Sopori B, Gokce O H, et al. Emissivity measurements and modeling of silicon-related materials: An overview. [Int J Thermophys](#), 2001, 22: 1593–1611

Effect of environmental conditions on temperature field distribution and output characteristics of crystalline silicon cell

WANG XinXin, LU XiaoDong, GAO Jie, SONG Yang & WANG Yang

College of New Energy, Bohai University, Jinzhou 121007, China

Based on the finite difference method, the influence of the ambient temperature on the temperature field distribution and output parameters of c-Si solar cell is analyzed when the heat exchange processes between the cell and environment are different. The study shows that under the vacuum environment, the cell temperature will be constant at 300 K, the main heat transfer mode between the cell and vacuum environment is the thermal radiation; under the ideal heat dissipation condition, the cell temperature is basically the same as ambient temperature, and the heat exchange between the cell and environment is heat conduction, the V_{oc} , FF and η of the battery decrease linearly with increasing the temperature; under the conditions of still air layer surrounding, there is an obvious difference between the cell temperature and ambient temperature, the surface of the cell has a temperature difference, the heat exchange between the cell and environment is heat conduction, the V_{oc} , FF and η of the battery decreases nonlinearly with the increase of temperature.

crystalline silicon solar cell, output parameters, temperature, short circuit current, open-circuit voltage

doi: [10.1360/N092017-00304](https://doi.org/10.1360/N092017-00304)