论文

晶硅电池温变过程中的输出参数及温度场特性

陆晓东*, 王泽来, 赵洋, 张鹏, 吴元庆, 张宇峰, 周涛

渤海大学新能源学院, 锦州 121000

* E-mail: lxd2211@sina.com

收稿日期: 2015-11-20; 接受日期: 2016-01-14; 网络版发表日期: 2016-03-18

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2010CB933804)和国家自然科学基金(批准号: 11304020, 61575029)资助项目

摘要 利用有限差分法, 分析了环境温度从 250 K 变化到 500 K, 且电池前后表面存在两种温差时, 晶硅电池输出参数的温度特性及电池内部温度场的分布情况. 研究表明: 当电池前后表面温度相同, 且温度逐渐增加时, 短路电流基本不变, 开路电压以 0.02 V/K 的速率线性减小, 电池效率以 0.07%/K 的速率线性降低, 温度场分布不均匀现象主要集中在接近电池前后表面的区域, 最大温度梯度达 ± 0.0002 K/ μm ; 当电池前后表面存在 1.5 K 温差, 且温度逐渐增加时, 电池各输出参数均出现不同程度的改善, 特别是开路电压相对无温差时可增加 0.25%~1.2%, 电池效率相对无温差时可增加 0.4%~1.5%, 温度场分布出现明显偏离由前后表面温差决定的温度梯度(0.0075 K/ μm)的现象.

关键词 晶硅电池, 输出参数, 温度, 短路电流, 开路电压

1 引言

晶硅电池是太阳电池市场的主要产品, 已广泛用于多种电能需求的场合, 特别是已应用于许多极端条件场合, 如不同纬度的高山、沙漠、海岛等. 不同应用场合的环境温度存在较大差异及环境温度随季节发生明显的变化, 将会对晶硅电池的性能产生重要的影响^[1]. 因此, 研究晶硅电池输出参数的温度特性及其影响因素, 对于扩大晶硅电池的适用范围, 提高晶硅电池组件的可靠性, 预测光伏系统的输出功率, 均具有十分重要的意义.

晶硅电池输出参数的温度特性很早就受到人们的重视, 但由于 2000 年以前光伏产业规模尚小, 光

伏发电的应用范围十分有限, 所以人们对晶硅电池输出参数的温度特性研究仅限于 15~50℃^[2]. 这一时期的研究表明^[1~4]: 随温度增加, 晶硅电池的开路电压(V_{oc})减小, 短路电流(J_{sc})基本不变; 受开路电压随温度变化的影响, 电池的填充因子(FF)和效率(η)均随温度增加而减小. 2000 年以后, 全球光伏装机容量呈现急剧增长的趋势, 光伏发电技术受到前所未有的重视. 在这种背景下, 影响光伏电站运行稳定性与可靠性的电池输出参数的温度特性, 逐渐成为晶硅电池领域的研究热点. 2003 年, Green^[5]探讨了温度变化引起载流子复合速率和载流子浓度的变化及其对开路电压和短路电流的影响. 2005 年, David 等人^[6]利用辅助热源, 从实验角度研究了温度在 25~170℃变

引用格式: 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

Lu X D, Wang Z L, Zhao Y, et al. The output parameter and temperature distribution characteristics of crystalline silicon solar cell varying with temperature (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 458–466, doi: 10.1360/N092015-00259

化时, 晶硅电池输出参数的特性. 2008 年, Singh 等人^[7]研究了温度在 22~47℃变化时, 晶硅电池的开路电压和曲线因子(CF)的变化规律, 并讨论了带隙宽度、方块电阻和串联电阻随温度的变化性质. 2012 年, Singh 和 Ravindra^[8]又指出: 反向饱和电流密度(j_0)是影响电池效率的关键因素. 2014 年, Xiao 等人^[9]研究了高纯冶金级晶硅电池的少子迁移率和电池效率的温度特性. 2015 年, Ghani 等人^[10]研究了晶硅电池输出参数的温度特性, 并讨论了串、并联阻抗、带隙、暗电流和光电流等参数随温度变化的规律. 综上可见: 晶硅电池输出参数的温度特性受材料和工艺等多种因素的制约.

目前, 探讨晶硅电池温度特性普遍采用的理论方法为: 假设电池内部温度均匀, 然后将温度变量引入到晶硅电池的各种材料参数中, 最后利用二极管模型求解电池输出参数的温度特性^[1,3,5-8]. 这种处理方法的优点是模型简单、结果易于理解、编程容易、计算量小等, 但其缺点也较明显, 即因推导二极管模型过程中引入多种假设, 所以其计算精度受到一定的限制, 且仅能给出定性分析的结果.

本文利用有限差分法求解二维 Maxwell 方程、半导体器件基本方程和热流方程, 研究商用晶硅电池输出参数的温度特性及其变化规律. 由于以三种基本方程为基础, 避免了使用过多假设, 所以计算结果精度高, 且可给出晶硅电池内部温度场分布情况及不同热产生机制作用的清晰物理图像. 在研究过程中, 考虑到实验已证实在晶硅电池工作过程中, 其前后表面会出现约 1.5℃的温差现象^[11](这种温差现象, 很难用传统的二极管模型进行求解), 所以将研究两种条件下(即电池前后表面温度均匀和存在温差两种情况), 晶硅电池输出参数的温变特性.

2 数值方法和电池结构

2.1 数值方法

计算过程中, 先采用频域有限差分法求解晶硅电池内部稳态光场分布^[12], 然后求解电池内部各点稳态光生载流子的产生速率, 并将其对应的电荷数引入到泊松方程中, 利用文献[13]提供的富残余自由泡沫法(enriched residual free bubbles method, ERFBM)程序, 求解半导体器件基本方程. 求解过程中, ERFBM 的网格划分直接使用频域有限差分法划分的

网格结构, 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. 最后将求解的电学参量带入(1)式中, 求解电池内部的温场分布^[14].

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

其中, 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产生的热量, 其表示形式如下^[15]:

$$Q_{\text{thermal}} = \left(\frac{J_n^2}{qn\mu_n} + \frac{J_p^2}{qn\mu_p} \right) + \frac{R-G}{q} \cdot [(E_p - E_n) + T(P_n + P_p)] - \frac{T(J_n \nabla P_n - J_p \nabla P_p)}{q}, \quad (2)$$

其中, q 为电荷, n 为载流子浓度, T 为温度, 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的速率, E_n 和 E_p 为电子和空穴的准费米能级, P_n 和 P_p 为电子和空穴的热电功率.

(2) 式中, $\left(\frac{J_n^2}{qn\mu_n} + \frac{J_p^2}{qn\mu_p} \right)$ 项代表焦耳热 (Q_J),

$\frac{R-G}{q} \cdot [(E_p - E_n) - T(P_n + P_p)]$ 项代表载流子产生和

复合过程产生的吸放热 (Q_C), $\frac{T(J_n \nabla P_n - J_p \nabla P_p)}{q}$ 项为

Peltier 和 Thomson 热效应项 (Q_{PT}). (1) 式求解方法为有限差分法, 边界条件采用 Dirichlet 型边界条件^[16].

2.2 电池结构及计算参数选择

常规晶硅电池结构主要包括前表面银栅极(阴极)、 SiN_x 减反膜、织构金字塔、晶硅有源层和底面铝电极(阳极), 如图 1 所示. 图 1 中, 晶硅电池有源层厚度为 $(T+H)$, 织构金字塔的高度为 H , 银栅极、减反层 SiN_x 和铝电极的厚度分别为 t_1 , t_2 和 t_3 , 织构结构宽度和银电极宽度分别为 w_1 和 w_2 , θ 为绒面织构角度. 计算过程中选择 $H=7 \mu\text{m}$, $T=200 \mu\text{m}$, $t_1=0.5 \mu\text{m}$, $t_2=70 \text{ nm}$, $t_3=0.5 \mu\text{m}$, $w_1=10 \mu\text{m}$, $w_2=0.5 \mu\text{m}$, $\theta=54.74^\circ$. 在晶硅电池结构中, SiN_x 减反膜、织构金字塔结构和底面铝反射镜(铝阳极)构成陷光结构, 其作用为有效减小入射光的反射及延长晶硅电池体内光场的光程, 进而增强硅有源层的吸光效率.

计算过程中, 选择硅衬底为 P 型均匀掺杂, 浓度

图1 (网络版彩图)常规晶硅电池的典型结构

为 $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ($\rho = 0.266 \text{ } \Omega \text{ cm}$), 电子和空穴的寿命均为 1 ms ; 磷扩散在前表面形成余误差分布, 结深为 $0.358 \text{ } \mu\text{m}$, 表面浓度 $N_s = 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Ag 和 Al 电极与硅有源层形成良好的欧姆接触. 在晶硅电池热特性研究中, 重点考虑禁带宽度 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 的温变特性对电池电学输出参数的影响. 采用的具体公式如下^[17-19]:

$$E_g(T) = E_g(300) + E_{g\alpha} \times \left(\frac{300^2}{300 + E_{g\beta}} - \frac{T^2}{T + E_{g\beta}} \right), \quad (3)$$

$$N_{c,v}(T) = \left(\frac{T}{300} \right)^{\frac{3}{2}} N_{c,v,300}, \quad (4)$$

$$\mu_{n,p} = \mu_{n1,p1} \left(\frac{T}{300} \right)^{\alpha_n, \alpha_p} + \frac{\mu_{n2,p2} \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta_n, \beta_p}}{1 + \frac{N}{N_{n0,p0} \left(\frac{T}{300} \right)^{\gamma_n, \gamma_p}}}, \quad (5)$$

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 为局部掺杂浓度. 计算过程中的参数选择为^[16-18]: $E_g(300) = 1.08 \text{ eV}$, $E_{g\alpha} = 4.73 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$, $E_{g\beta} = 636 \text{ K}$, $N_{c,300} = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_{v,300} = 1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_{n1} = 88 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$, $\mu_{p1} = 54.3 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$, $\gamma_n = \gamma_p = 2.546$, $\alpha_n = \alpha_p = -0.57$, $\beta_n = \beta_p = -2.33$, $\mu_{n2} = 1252 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$, $\mu_{p2} = 407 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$, $N_{n0} = 1.432 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_{p0} = 2.67 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

3 结果与讨论

3.1 电池材料参数的温变特性

晶硅材料参数的温变特性是晶硅电池输出参数(如 J_{sc} , V_{oc} , FF 和 η)随温度变化的微观机制, 即: 这些材料参数不仅会影响光生载流子的产生过程, 而且其还可通过电池工艺参数(如掺杂浓度、结深和少子寿命等)对光生载流子的输运和收集过程产生影响, 所以研究晶硅材料参数的温变特性有助于理解晶硅电池输出参数的温变特性.

根据(3)~(5)式可获得晶硅材料的禁带宽度 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 等参数随温度变化的曲线(图 2), 其中温度范围为 $250 \sim 500 \text{ K}$, 计算过程中的温度步长为 0.5 K . 图 2 给出各参数随温度变化的过程, 既适用于电池体内温度均匀的情况, 也适用于电池体内温度不均匀的情况. 由图 2(a)可见: 随温度增加, 晶硅材料的 E_g 缓慢减小, N_c 和 N_v 逐渐增加. E_g 值的减小和

图2 (网络版彩图)电池前后表面温度相同时, 晶硅材料参数随温度的变化

(a) E_g , N_c 和 N_v 随温度的变化; (b) μ_n 和 μ_p 随温度的变化

$N_c(N_v)$ 值的增加,有助于增加晶硅材料对长波段光的吸收系数.由图 2(b)可见:随温度增加, μ_n 和 μ_p 均减小,特别是 μ_n 下降明显. μ_n 和 μ_p 的减小,将会增加电池体内载流子的复合效率.

3.2 温差对晶硅电池输出参数和温度分布的影响

3.2.1 电池的前后表面无温差情况

1) 晶硅电池输出参数的温度特性

由于填充因子与开路电压之间存在如下关系^[20]:

$$FF = \frac{V_{oc} - \frac{kT}{q} \ln[qV_{oc}/kT + 0.72]}{V_{oc} + kT/q}, \quad (6)$$

式中, q 为基本电荷, k 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度, V_{oc} 为开路电压值,所以这里仅考虑电池前后表面温度相同时,电池的短路电流、开路电压和效率等参数随温度的变化.

图 3 给出了当电池温度从 250 K 逐渐升高到 500 K 时,电池输出参数的变化,可见: I - V 特性曲线逐渐向电流轴(纵轴)靠近(图 3(a));开路电压 V_{oc} 线性降低,降低速率约为 0.02 V/K(图 3(b));整个温变过程中,短路电流 J_{sc} 略有降低(约 0.04%)(图 3(b));电池效率 η 线性降低,降低速率约为 0.07%/K(图 3(c))降低速率处于 0.06%/K~0.075%/K,平均约为 0.07%/K.

电池短路电流的变化规律可用图 2 中禁带宽度 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 等参数随温度变化的关系给出合理的解释.尽管随温度升高,晶硅材料的 E_g 减小、 N_c 和 N_v 增加(图 2(a)),但由于靠近 E_g 附近的太阳光谱中光子密度较小^[21,22],所以 E_g , N_c 和 N_v 随温度的变化仅能使光生电流密度略有增加.与此相反,晶硅材料内 μ_n 和 μ_p 随温度的升高出现明显的下降(图 2(b)),导致电极对光生载流子的收集效率出现明显的降低.正是在上述两种机制的共同作用下,使电池的短路电流 J_{sc} 随温度升高出现了小幅降低的趋势.(7)式是开路电压 V_{oc} 随温度的变化关系^[23]:

$$V_{oc} = V_{oc,max} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{p_0 + \Delta n}{p_0}\right) - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_0 + \Delta n}{n_0}\right), \quad (7)$$

式中, q 为基本电荷, k 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度, n_0 和 p_0 为热平衡电子和空穴浓度, Δn 为热激发少子浓度. V_{oc} 为开路电压, $V_{oc,max}$ 为开路电压的最大理论

图 3 (网络版彩图) 电池前后表面温度相同时, 晶硅电池输出参数的温度特性

(a) I - V 特性曲线; (b) 短路电流 J_{sc} 和开路电压 V_{oc} 的温度特性; (c) 电池效率 η 及 $\delta\eta/K$ 的温度特性, $\delta\eta/K = (\eta_2 - \eta_1)/(K_2 - K_1)$ 表示每升高 1 K η 的变化情况, 其中 K 为开氏温度

值.由(7)式可见:随温度升高,热激发少子浓度 Δn 逐渐增加, V_{oc} 逐渐降低.正是由于 V_{oc} 和 J_{sc} 的这种温变性质,导致晶硅电池效率 η 的温变特性更接近于 V_{oc} 的温变特性.

2) 晶硅电池内部温度分布情况

除了电池输出参数随温度变化外,电池内部的温度分布也会发生一定变化.图 4 给出了电池前后表面温度相同时,电池内部的温度分布情况.由图 4 可

图 4 (网络版彩图)电池内部的温度分布情况
(a) 400 K; (b) 500 K

见: 当电池前后表面温度相同时, 电池芯片内部的温度基本与环境温度相同; 沿电池厚度方向, 离电池前后表面距离越近, 温度变化越明显; 紧邻电池前后表面存在一个较宽的低温区域; 电极附近的温度最高. 总体而言, 当电池前后表面温度相同时, 电池内部不同点发生温度漂移的幅度均很小, 如 400 和 500 K 的最大温度漂移幅度仅为 ± 0.001 K; 温度漂移较大区域主要集中在靠近电池表面 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 的电池内部, 此部分的温度梯度可表示为 $\pm 0.0002\ \text{K}/\mu\text{m}$. 计算还发现: 当温度小于 400 K 时, 电池内部温度漂移的幅度更小.

根据(2)式可知: 电池内部的温度漂移主要由 3 种热产生机制引起, 即焦耳热 Q_J , Peltier 和 Thomson 效应引起的吸放热 Q_{PT} 和载流子产生和复合过程引起的吸放热 Q_C . 图 5 给出了 400 K 时, 每种机制的吸放热情况. 除 Q_C 外, 因其余两种机制释放热量的离

图 5 (网络版彩图)在 400 K 时, 电池内部不同机制的吸放热情况

(a) Q_J 的分布情况; (b) Q_{PT} 的分布情况; (c) Q_C 的分布情况. Q 代表每种机制放出的热量

散程度非常大, 所以图 5 以 $\frac{Q}{|Q|} \log_{10}(|Q|)$ 表示吸放热情况. 由图 5 可见: Q_J 和 Q_C 主要为加热作用, 但 Q_{PT}

主要以制冷作用为主;沿电池厚度方向,离电池前后表面距离越近,三种机制所释放或吸收的热量越多;在远离表面的电池内部, $Q_J(10^2 \sim 10^3 \text{ W/cm}^3)$ 的量级)、 $Q_C(0 \sim 10^1 \text{ W/cm}^3)$ 的量级)和 $Q_{PT}(-10^1 \sim -10^3 \text{ W/cm}^3)$ 三种机制产生明显的抵消作用,从而使晶硅电池内部温度基本保持在 400 K;在电池上下表面附近区域, Q_{PT} 吸热的量级($10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ W/cm}^3$)大于 Q_J (上表面 $10^{1.5} \sim 10^{2.5} \text{ W/cm}^3$,下表面 $10^3 \sim 10^{3.5} \text{ W/cm}^3$)和 Q_C (小于 10^2 W/cm^3)的量级,所以电池前后表面附近出现一个相对明显的低温区域;在电极附近三种机制均具有加热的效果,所以电极附近的温度最高。

3.2.2 电池前后表面存在 1.5 K 温差情况

1) 晶硅电池输出参数的变化

电池前后表面的温差,将对电池的输出参数产生影响,且这种影响的大小主要取决于这一温差在电池内部产生的温度梯度大小。图 6 给出了前后表面存在 1.5 K 温差时(前表面为环境温度,后表面较环境温度低 1.5 K),电池输出参数的变化情况,其中图 6(a)和(b)为电池输出参数(即 J_{sc} , V_{oc} , FF 和 η)相对于无温差时的偏移情况;图 6(c)为电池输出参数变化的百分比。由图 6(a)和(b)可见:存在 1.5 K 温差时,各温度下的电池输出参数均发生小幅变化,即 J_{sc} 增加幅度为 $(1 \sim 3) \times 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$; V_{oc} 增加的幅度为 $(2 \sim 3) \times 10^{-3} \text{ V}$; FF 增加的幅度为 $-0.75\% \sim 0.4\%$; η 增加的幅度为 $-0.07\% \sim 0.11\%$ 。由图 6(c)可见:与前后表面无温差时的电池输出参数相比,存在 1.5 K 温差时, J_{sc} 值基本不变; V_{oc} 值随温度升高而增加,变化幅度为 $0.25\% \sim 1.2\%$;在温度 400 K 时, FF 呈现先增加后减小的变化趋势,变化幅度为 $-1.3\% \sim 0.5\%$; η 随温度增加而线性增加,增幅为 $0.4\% \sim 1.5\%$ 。由于实际使用条件下,电池的环境温度一般为 400 K(127℃)以下,所以电池前后表面存在的这种小温差,有助于电池输出参数的改善。

2) 晶硅电池内部温场分布情况

电池前后表面的 1.5 K 温差将在电池内部产生 $0.0075 \text{ K}/\mu\text{m}$ (电池厚度为 $200 \mu\text{m}$)的温度梯度。该温度梯度明显大于电池内部三种热产生机制引入的温度梯度($0.0002 \text{ K}/\mu\text{m}$, 图 4),所以该温差是决定电池内温度分布的主要因素。

图 7 给出了电池前后表面存在 1.5 K 温差时,电

图6 (网络版彩图)在电池前后表面存在 1.5 K 温差时,晶硅电池输出参数的变化情况

(a) J_{sc} 和 V_{oc} 值的偏移情况; (b) FF 和 η 值的偏移情况; (c) J_{sc} , V_{oc} , FF 和 η 值的变化百分比情况。 $\delta K=0$ 表示无温差时的输出参数, $\delta K=1.5$ 表示存在 1.5 K 温差时的输出参数

池内部温度的分布情况。由图 7(a)和(b)可见:在 400 和 500 K 时,电池内部的温度分布形式十分相似;与图 4 相比,此时温度分布的特点为前表面温度高后表面温度低,温度最高点出现在前表面。为了清晰表示温度偏离情况,图 7(c)给出了过点(5, $200 \mu\text{m}$),且平行于 Y 轴(图 7(a)和(b))的直线上的温度分布情况,其中 $0.0075 \text{ K}/\mu\text{m}$ 参考线是由电池前后表面温差决定的温度随位置的变化情况。由图 7(c)可见:在 400 和 500 K 时,电池内部温度梯度均较参考线有较大的偏

图7 (网络版彩图)存在 1.5 K 温差时, 电池内部的温度分布情况

(a) 400 K 时的温度分布情况; (b) 500 K 时的温度分布情况; (c) 为(a)和(b)中, 过点(5, 200 μm), 平行于 Y 轴的温度分布曲线

离; 在 400 K 时, 除靠近 $Y > 10 \mu\text{m}$ 附近温度梯度较大外, 电池内部温度梯度基本恒定, 但较 $0.0075 \text{ K}/\mu\text{m}$ 参考线的温度梯度要小; 在 500 K 时, $Y < 10 \mu\text{m}$ 区域的温度梯度很大, $10 \mu\text{m} < Y < 150 \mu\text{m}$ 区域的温场梯度小于 $0.0075 \text{ K}/\mu\text{m}$, $Y > 150 \mu\text{m}$ 区域的温度梯度接近 $0.0075 \text{ K}/\mu\text{m}$.

电池内部温度梯度对 $0.0075 \text{ K}/\mu\text{m}$ 参考线的偏离可由电池内部三种热产生机制给出合理解释. 图 8 给出了 400 K 时, 电池内部三种热产生机制稳态的吸放热情况, 其中标注的含义与图 5 相同. 由图 8 可见: Q_C 的放热量级最小; Q_J 和 Q_C 均为放热过程, 而 Q_{PT} 主要为吸热过程; 在 $Y < 10 \mu\text{m}$ 的区域, 温场主要受 Q_{PT} 的影响, 呈现快速降低的趋势; 在 $Y > 10 \mu\text{m}$ 的区域, Q_{PT} 的量级由 $-10^2 \text{ W}/\text{cm}^3$ 缓慢降低到 $-10^5 \text{ W}/\text{cm}^3$, Q_J 的量级由 $10^{2.5} \text{ W}/\text{cm}^3$ 缓慢增加到 $10^5 \text{ W}/\text{cm}^3$, 但由于大部分区域的 Q_J 量级略大于 Q_{PT} 量级, 二者抵消的结果以放热为主, 所以此区域温场梯度小于 0.0075

$\text{K}/\mu\text{m}$ 的幅度变化.

对比图 8(a)和(c)与图 5(a)和(c)可见: 电池前后表面存在 1.5 K 温差时, Q_J 和 Q_C 基本不变, 但 Q_{PT} 变化却十分明显.

4 总结

针对不同温度下, 晶硅电池的温变特性进行了研究, 主要结论如下.

1) 当电池前后表面温度相同时, 电池的短路电流略有减小, 开路电压和电池效率均线性降低. 受 Q_J , Q_C 和 Q_{PT} 的影响, 电池内部的温度分布与环境温度产生偏离.

2) 电池前后表面存在的 1.5 K 温差, 对电池输出参数具有优化作用. 电池内部的温度分布主要由电池前后表面温差决定, 但受 Q_J , Q_C 和 Q_{PT} 的影响, 温度漂移最明显的区域集中在电池前表面附近.

图 8 (网络版彩图)在 400 K, 且电池前后表面存在 1.5 K 温差时, 电池内部不同机制的吸放热情况

(a) Q_J 的分布情况; (b) Q_{PT} 的分布情况; (c) Q_C 的分布情况. Q 代表每种机制放出的热量

3) 在电池内部的三种热产生机制中, Q_J 和 Q_C 对晶格具有加热的作用, Q_{PT} 对晶格具有冷却的作用. 在电池前后表面出现温差的条件下, Q_J 和 Q_C 基本保持不变, 但 Q_{PT} 却发生较大的变化.

参考文献

- 1 Agarwala A, Tewary V K, Agarwal S K, et al. Temperature effects in silicon solar cells. *Solid State Electron*, 1980, 23: 1021–1028
- 2 Wysocki J J, Rappaport P. Effect of temperature on photovoltaic solar energy conversion. *J Appl Phys*, 1960, 31: 571–577
- 3 Fan J C C. Theoretical temperature dependence of solar cell parameters. *Solar Cells*, 1986, 17: 309–315
- 4 Veissid N, Bonnet D, Richter H. Experimental investigation of the double exponential model of a solar cell under illuminated conditions: Considering the instrumental uncertainties in the current, voltage and temperature values. *Solid State Electron*, 1995, 38: 1937–1943
- 5 Green M A. General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modeling. *Prog Photovoltaics*, 2003, 11: 333–340
- 6 David M R, Paul P H, Jesus G H, et al. Photovoltaic solar cells performance at elevated temperatures. *Solar Energy*, 2005, 78: 243–250
- 7 Singh P, Singh S N, Lal M, et al. Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. *Sol Energ Mat Sol C*, 2008, 92: 1611–1616
- 8 Singh P, Ravindra N M. Temperature dependence of solar cell performance: An analysis. *Sol Energ Mat Sol C*, 2012, 101: 36–45
- 9 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 Energ Mat Sol C*, 2014, 128: 427–434
- 10 Ghani F, Rosengarten G, Duke M, et al. On the influence of temperature on crystalline silicon solar cell characterisation parameters. *Solar Energy*, 2015, 112: 437–445
 - 11 Hosseini R, Hosseini N, Khorasanizadeh H. An experimental study of combining a photovoltaic system with a heating system. In: *World Renewable Energy Congress 2011*, Linköping, Sweden, 2011
 - 12 Lu X, Lun S, Zhou T, et al. A low-cost high-efficiency crystalline silicon solar cell based on one-dimensional photonic crystal front surface textures. *IOP J Optics*, 2013, 15: 075705
 - 13 Deinega A, Eyderman S, John S. Coupled optical and electrical modeling of solar cell based on conical pore silicon photonic crystals. *J Appl Phys*, 2013, 113: 224501
 - 14 Simpson R N, Borda S P A, Asenov A, et al. Enriched residual free bubbles for semiconductor device simulation. *Comput Mech*, 2012, 50: 119–133
 - 15 Ahmad A Z, Gunther B. Comparative study of thermal flows with different finite volume and lattice Boltzmann schemes. *Int J Mod Phys C*, 2004, 15: 307–319
 - 16 Madra S. Carrier depletion effects and heat generation in thermal modeling of GaInP/p-GaAs heterojunction bipolar transistors. In: *The Ninth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, Las Vegas, 2004
 - 17 Slotboom J W. The pn-product in silicon. *Solid State Electron*, 1977, 20: 279–283
 - 18 Albrecht J D, Wang R P, Ruden P P, et al. Electron transport characteristics of GaN for high temperature device modeling. *J Appl Phys*, 1998, 83: 4777–4781
 - 19 Lycoudes N E, Childers C C. Semiconductor instability failure mechanisms review. *IEEE T Reliab*, 1980, R-29: 237–249
 - 20 Veirman J, Martel B, Dubois S, et al. Effect of dopant compensation on the temperature dependence of the transport properties in p-type monocrystalline silicon. *J Appl Phys*, 2014, 115: 1–6
 - 21 Green M. *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*, Chap 5. New Jersey: Prentice Hall, 1982. 85–102
 - 22 陆晓东, 伦淑娴, 周涛. 超薄晶硅太阳能电池的上表面陷光结构研究(I). *光电子·激光*, 2012, 23: 2065–2073
 - 23 Löpera P, Pyschb D, Richtera A, et al. Analysis of the temperature dependence of the open-circuit voltage. *Energy Procedia*, 2012, 27: 135–142

The output parameter and temperature distribution characteristics of crystalline silicon solar cell varying with temperature

LU XiaoDong, WANG ZeLai, ZHAO Yang, ZHANG Peng, WU YuanQing & ZHOU Tao

College of New Energy, Bohai University, Jinzhou 121000, China

The output parameters and temperature distribution of crystalline silicon solar cell with temperature increasing from 250 to 500 K have been analyzed under two different temperature difference conditions by finite difference method. The results shows that: when the temperatures at the front and back surfaces of a c-si solar cell are same and increase at the same time, the short circuit current will be constant, the open circuit voltage will decrease linearly with a rate of 0.02 V/K, the efficiency will reduce linearly with a rate of 0.07%/K and the uneven temperature distribution mainly lies near the front and back surfaces of the solar cell with the maximum temperature gradient equal to ± 0.0002 K/ μm ; when a 1.5 K temperature difference exists between the front and back surfaces of the solar cell, the output parameters will be improved and comparing with no temperature difference, the open circuit voltage will increase with a rate of 0.25%~1.2%, the efficiency will increase with a rate of 0.4%~1.5% and the temperature gradient deviations from 0.0075 K/ μm formed by the temperature difference appear near the front surface of the cell.

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

doi: 10.1360/N092015-00259