

选择性发射极晶体硅太阳电池的二维器件模拟及性能优化*

贾晓洁¹⁾ 艾斌^{1)†} 许欣翔²⁾ 杨江海²⁾ 邓幼俊¹⁾ 沈辉¹⁾

1)(中山大学, 光电材料与技术国家重点实验室, 广东省光伏技术重点实验室, 广州 510006)

2)(南玻集团太阳能事业部研发中心, 东莞 523141)

(2013年11月9日收到; 2013年11月29日收到修改稿)

利用PC2D二维模拟软件对选择性发射极晶体硅太阳电池(SE电池)进行了器件模拟和参数优化的研究. 在对丝网印刷磷浆法制备的SE电池的实测典型电流-电压曲线实现完美拟合的基础上, 全面系统地研究了栅线、基区、选择性发射区和背表面场层等的参数对电池性能的影响. 模拟表明: 基区少子寿命、前表面复合速度和背表面复合速度是对电池效率影响幅度最大的三个参数. 在所研究的参数范围内, 当基区少子寿命从50 μs 上升到600 μs 时, 电池效率从18.53% 上升到19.27%. 低的前表面复合速度是使发射区方块电阻配比优化有意义的前提. 要取得理想的电池效率, 背表面复合速度需控制在500 cm/s 以下. 此外, 对于不同的前表面复合速度, 电池效率的最大值总是在50—90 Ω/\square 的重掺区方阻、110—180 Ω/\square 的轻掺区方阻的范围内取得. 对不同的栅线数目, 重掺区宽度与栅线间距之比为32% 时, 电池的效率最高. 另外, 在主栅结构保持较低面积比率的前提下, 主栅数目的增加也可提高效率. 最后, 通过优化p型SE电池的效率可达到20.45%.

关键词: 选择性发射极, PC2D 器件模拟, 参数优化, 太阳电池

PACS: 88.40.jj, 88.30.gg, 88.40.hj, 88.10.gc

DOI: 10.7498/aps.63.068801

1 引言

选择性发射极(selective emitter, SE)是在电池正面栅线位置形成高掺杂深扩散区, 在其余钝化区域形成低掺杂浅扩散区的结构. 由于SE结构改善了栅线与发射极之间的接触, 并且降低了发射区的俄歇复合, SE太阳电池可以获得更高的填充因子(FF)和短路电流(I_{sc})^[1].

SE电池因其具有与现有晶体硅太阳电池制备技术兼容性好、提升效率明显等优势, 成为国际光伏学界近年来的研究热点, 同时也是光伏工业未来五年进行技术升级改造最现实、最可靠的选择之一. 在众多的制备SE电池的技术中, 丝网印刷磷浆法可能是最有前途的产业化技术之一, 它无须大幅增

加生产成本(只需增加一台印刷磷浆的丝印机)即可在常规均匀发射极(HE)电池的基础上获得0.5%的效率提升. 目前, 南玻公司使用该方法制备的SE电池效率在19.0%左右, 与19.5%^[2]的SE电池效率的国际先进水平仍有一定的差距.

器件模拟因具有大幅缩短研究周期、显著降低研发成本和获得更多电池内部信息等方面的优势, 成为了研发过程中不可或缺的重要技术手段^[3-5]. 由于HE电池仅在垂直于电池平面的方向上具有不均匀性, 因此可以使用例如PC1D等的一维模拟软件来进行器件模拟^[6]. 但是SE电池具有电池平面方向上的不均匀性, 所以必须使用二维或三维器件模拟软件才能对SE电池进行准确的计算机模拟.

研究者们已使用Sentaurus^[7-9]、Comsol^[10,11]

* 国家自然科学基金(批准号: 50802118)、广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目(批准号: 2011A032304001)和中央高校基本研究经费青年教师培育项目(批准号: 111gpy40)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: stsab@mail.sysu.edu.cn

等软件对SE电池进行了二维和三维的模拟研究,但由于存在着数学模型针对性较差、参数选择范围有限、结构设定限制较多等问题,导致模拟结果可信度不高. 针对于此,世界上最通用的晶体硅太阳能电池一维器件模拟软件PC1D的作者P. Basore博士专门开发了晶体硅太阳能电池的二维模拟软件PC2D,它秉承了PC1D易于使用、灵活性强、准确性高等优点.

本文使用PC2D二维模拟软件,首先对由南玻公司使用丝网印刷磷浆法制备的SE电池的实测典型电流-电压(I - V)曲线进行了完美拟合,然后在此基础上对器件的各种参数进行了系统优化. 为了反映多个参数同时变化对电池效率的影响,我们给出了电池效率与其他三个参数的等值线图.

2 PC2D 模拟软件介绍

PC2D是由美国Hanwha Solar公司的Basore和Cabanas-Holmen^[12-14]于2011年发布的一款用于晶体硅太阳能电池二维模拟的软件,它是一个包含宏计算的Excel工作本. 使用Excel作为软件界面,不仅降低了对电脑的硬件要求,而且由于其界面已被大多数用户所熟悉而更宜于操作. PC2D是一个开源软件,所使用的物理和数值模型在工作本中均可见,用户可以根据自己的需要对工作本进行修改. PC2D可输出 I - V 曲线、最大功率曲线、外量子效率(EQE)曲线和激光束诱导电流(LBIC)曲线等,除此之外,还可输出电子和空穴的准费米电势、载流子浓度、复合电流密度等多个物理参数的二维分布图,这些信息对全面分析太阳能电池的性能很有帮助.

使用PC2D定义一个太阳能电池,需要输入电池的结构、光学和电学参数. 需要说明的是,PC2D需要与PC1D结合使用,即二维模型所需要的相关边界条件需要由PC1D计算所得. 因此,PC2D只需对电子与空穴的漂移-扩散方程进行求解,这也使得使用Excel来进行模拟工作成为可能. PC2D在使用过程中已被不断地改进,以获得更快的计算速度和更准确的计算结果. 本文使用的是2012年10月8日推出的PC2D 2.0版本.

PC2D器件模拟所使用的方法是通过将任何大小区域的模拟都采用将其分成 20×20 个相同大小的矩形格子,并对每个格子进行单独定义来实现的,具体可参见文献^[13 15, 16]. 电子与空穴的漂

移-扩散方程主要由电子准费米电势 ϕ_n ,空穴准费米电势 ϕ_p 和静电势 Ψ 来表示,在PC2D中它们被热电压($V_t = kT/q$)归一化. 可以证明,每个格子的四个顶点处的电势可表示为

$$\varphi_p(x, y) = V_t \ln(C_{op} + c_{xp}x + C_{yp}y + c_{xyp}xy), \quad (1)$$

$$\varphi_n(x, y) = -V_t \ln(C_{on} + c_{xn}x + C_{yn}y + c_{xyn}xy), \quad (2)$$

式中, $(c_o, c_x, c_y, c_{xy})_{p,n}$ 表示每个格子四个顶点处的八个常数,它们都可表示成准费米电势 φ_n 和 φ_p 的函数. PC2D假设模拟区域为准中性的,即电子和空穴的浓度之差等于掺杂浓度. 这样的设定使得我们无须求解泊松方程来求得静电势 Ψ ,因为每一点的 Ψ 值本身就是该点的 φ_n 和 φ_p 的函数.

由于半导体方程的非线性,软件需要通过迭代计算最终获得方程的解. 迭代的次数取决于所使用的数值计算方法. 一种方法是每次计算所使用的旧值来自于模拟区域所有的节点;另一种方法是每次计算所使用的旧值只来自于与该点等距离的临近点. PC2D综合使用这两种方法:器件内部节点的更新参照该点所在列所有点和相邻列各最近三个点的旧值,器件表面节点的更新则参照该点所在行所有点和相邻行最近三个点的旧值. 该方法既保证了数值计算结果的合理性,又节省了计算所需的时间和内存空间. 对于28 GHz处理器和64位Excel的典型响应时间为10 s.

3 模拟SE电池的器件结构及参数设置

选择性发射极晶体硅太阳能电池主要由背电极、铝背表面场(back surface field, BSF)层(p^+ 区)、基区(p 区)、重掺杂区(n^{++} 区)、轻掺杂区(n^+ 区)、栅线电极、减反射层组成,具体结构如图1所示. 所模拟的区域为栅线中线到栅线间距中心的部分. 为了使PC2D模拟更符合实际情况,我们首先对由南玻公司使用丝网印刷磷浆法制备的面积为 $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$ 的SE电池的实测典型 I - V 曲线进行了完美拟合,表1列出了拟合该曲线所使用的参数. 需要说明的是,表1中的外部串联电阻(AddRs)仅包括电池平面以外的电阻,即与栅线电极和背电极有关的电阻. 模拟电池面积为 1 cm^2 ;

模拟测试条件为: 25 °C, AM1.5 G 光谱, 光强为 1000 W/m².

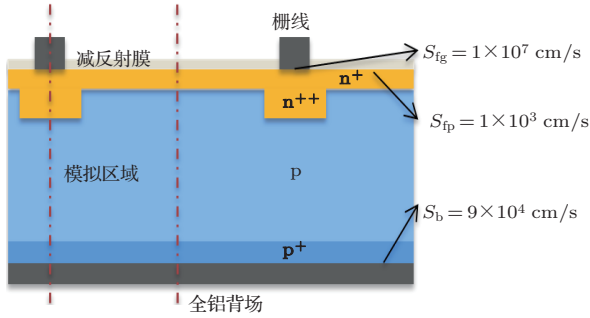


图1 模拟所使用的SE电池的器件结构

图2比较了南玻公司使用丝网印刷磷浆法制备SE电池的实测典型I-V曲线与PC2D的模拟结果, 实测曲线用数据点给出, 模拟结果用连续曲线给出. 由图可知PC2D实现了对实测结果的完美拟合.

4 结果与讨论

表1所列参数定义的电池是我们模拟工作的起点. 在此基础上, 利用PC2D模拟不同参数设置对电池效率的影响, 从而对其参数做进一步的优化.

表1 PC2D完美拟合丝网印刷磷浆法制备的SE电池实测I-V特性曲线所使用的参数

器件结构组成	参数设置描述
BSF层(p ⁺ 区)	方阻 $R_p^+ = 62 \Omega/\square$, 结深 $d_p^+ = 3.6 \mu\text{m}$, 背表面复合速度 $S_b = 9 \times 10^4 \text{ cm/s}$.
基区(p区)	厚度 $D = 170 \mu\text{m}$, 掺杂浓度 $N = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 少子寿命 $\tau = 200 \mu\text{s}$.
重掺杂区(n ⁺⁺ 区)	宽度 $W = 203.51 \mu\text{m}$, 方阻 $R_{n^{++}}^+ = 62 \Omega/\square$, 结深 $d_{n^{++}}^+ = 0.41 \mu\text{m}$.
轻掺杂区(n ⁺ 区)	方阻 $R_n^+ = 82 \Omega/\square$, 结深 $d_n^+ = 0.34 \mu\text{m}$; 钝化区域表面复合速度 $S_{fp} = 1 \times 10^3 \text{ cm/s}$.
栅线	栅线数目 $n = 90$ 根, 栅线宽度 $w = 60.84 \mu\text{m}$, 栅线间距 $d = 1.719 \text{ mm}$, 表面复合速度 $S_{fg} = 1 \times 10^7 \text{ cm/s}$. 主栅数目 $n' = 3$ 根, 面积比率 $r = 3.2\%$.
电路部分	外部串联电阻 $\text{AddRs} = 0.71 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 外部并联电导 $\text{AddGsh} = 0 \text{ S}$.
减反射层	等离子体化学气相沉积蒸镀双层 SiN_X 减反射膜, 实测反射率数据作为外部文件导入.

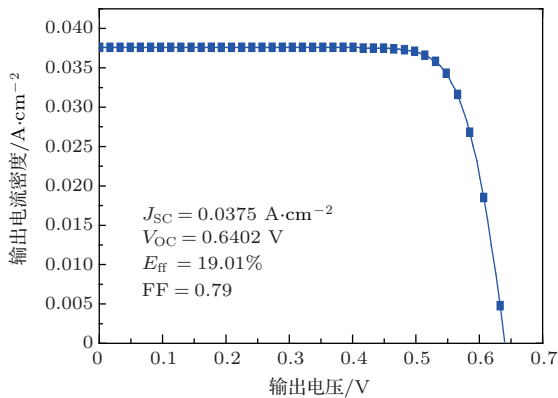


图2 丝网印刷磷浆法制备SE电池的实测典型I-V曲线与PC2D模拟结果的比较(实测曲线用数据点给出, 模拟结果用连续曲线给出)

4.1 栅线宽度与栅线数目对电池效率的影响(栅线参数优化)

栅线参数的优化主要涉及栅线宽度(w)和栅线数目(n)这两个参数. 由于栅线需要准确印刷到重掺杂区的中央, 所以我们以重掺杂区宽度(W)为

第三参数, 利用PC2D模拟了栅线宽度和栅线数目对SE电池效率的影响. 模拟中除了上面三个参数以外, 其他参数设置与表1相同. 需要说明的是, 外部串联电阻(AddRs)包括与栅线有关的电阻和与背电极有关的电阻. 根据文献[17], 与栅线有关的电阻相比, 与背电极有关的电阻可忽略不计, 而与栅线有关的电阻正比于栅线间距 d , 反比于栅线宽度 w . 对于156 mm × 156 mm的硅片, 栅线间距为

$$d = \frac{(156 - 3)}{(n - 1)} = \frac{153}{(n - 1)}, \quad (3)$$

AddRs可由下式计算

$$\text{AddRs} = \frac{B}{(n - 1)w}, \quad (4)$$

式中 B 为常数. 对于表1给出的参数设置, 有

$$\begin{aligned} B &= 0.71 \times (90 - 1) \times 60.84 \\ &= 3844.4796 \Omega \cdot \text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}. \end{aligned} \quad (5)$$

模拟中, 对应于不同栅线宽度和栅线数目情况下的AddRs均由(4)式和(5)式计算得到. 图3给出了

AddRs 随栅线宽度和栅线数目变化的关系图. 由图3可知, 栅线宽度越小, 栅线数目越少, AddRs 越大.

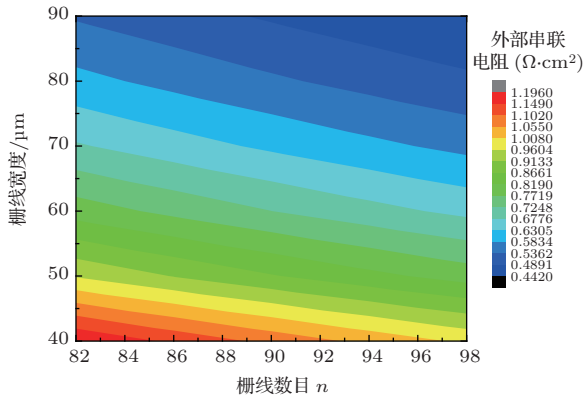


图3 (网刊彩色) 外部串联电阻随栅线宽度和栅线数目变化的二维分布

图4给出了重掺杂区分别取100, 200和300 μm时电池效率随栅线宽度和栅线数目变化的模拟结果, 横轴为栅线数目, 纵轴为栅线宽度. 为了便于比较, 图中同种颜色代表的数值范围相同. 由图4可知, 在所研究的栅线宽度范围(40—90 μm)内, 当栅线宽度较宽时(65—90 μm), 与栅线数目相比, 栅线宽度对电池效率的影响更显著, 电池效率随栅线宽度的增加而下降; 当栅线宽度较窄时(40—65 μm), 栅线数目对电池效率影响明显, 栅线数目越多, 电池效率越高. 相同栅线数目下, 电池效率随栅线宽度的增加而先上升后下降, 这是因为在前半段由于栅线宽度增加带来的电学增益大于光学损失, 所以电池效率随栅线宽度增加而上升, 在后半段栅线宽度增加带来的电学增益小于光学损失, 所以电池效率随栅线宽度增加而下降. 作为比较, 在所研究的栅线数目范围(82—98根)内, 栅线数目较少时, 相对较宽的栅线可获得较高的效率, 栅线数目较多时, 相对较细的栅线可获得较高的效率. 此外, 栅线数目越多, 栅线宽度对电池效率的影响就越显著, 因此需采用细栅结合密栅的方法以实现效率的提升. 在所研究的重掺杂区宽度范围(100—300 μm)内, 随着重掺杂区宽度的增加, SE 电池取得19.02% 以上的范围(图中黑色线条所框区域)有增大的趋势, 并向栅线宽度较窄的方向移动, 向栅线数目较少的方向扩展. 当栅线宽度取55—75 μm, 栅线数目取93—98根时, SE 电池均可取得较为理想的效率(19.00% 以上). 需要指出的是, 对于所研究的三种重掺杂区宽度, SE 电池均在栅线宽度 $w = 60 \mu\text{m}$, 栅线

数目 $n = 98$ 时取得效率最大值, 最大效率分别为19.038%, 19.041% 和19.044%, 对应于重掺杂区宽度为100, 200和300 μm 这三种情况.

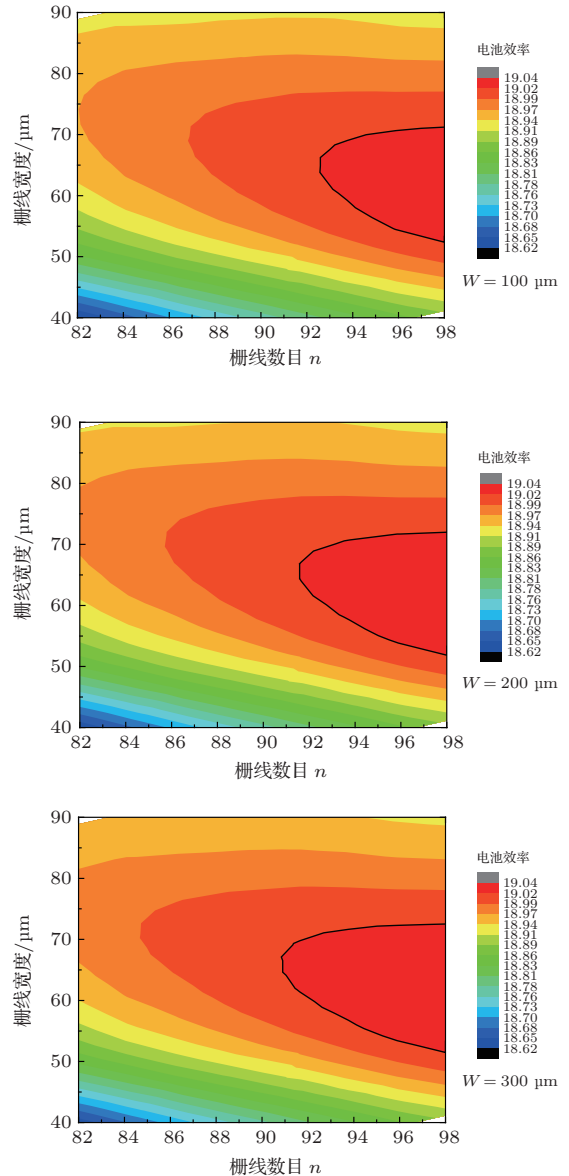


图4 (网刊彩色) SE 电池效率随栅线宽度和栅线数目变化的二维分布(以重掺杂区宽度为第三参数)

为进一步研究重掺杂区宽度 W 对电池效率的影响, 我们在栅线宽度 $w = 60 \mu\text{m}$, 栅线数目 $n = 90, 94$ 和 98 根三种情况下, 利用 PC2D 模拟了重掺杂区宽度对电池效率的影响. 图5给出了模拟结果, 横轴为重掺杂区宽度, 纵轴为电池效率. 由图5可知, 在所研究的重掺杂区宽度范围(100—650 μm)内, SE 电池效率随重掺杂区宽度的增加而先上升后下降. 对于不同的栅线数目, SE 电池取得效率最大值所对应的重掺杂区宽度也不同. 栅线数目越多, 栅线间距越小, 电池取得最

大效率所对应的重掺杂区宽度就越小. 表2列出了不同栅线数目下SE电池取得最大效率时的重掺杂区宽度、栅线间距及二者比率, 在重掺杂区宽度与栅线间距的比值为32%时, 可取得效率最大值. 当栅线宽度 $w = 60 \mu\text{m}$, 栅线数目 $n = 98$ 根, 重掺杂区宽度 $W = 475 \mu\text{m}$, 外部串联电阻 $\text{AddRs} = 0.6652 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 时, 电池可获得理想的性能表现, 效率为19.04496%. 在以下模拟中, 我们将使用优化后的栅线参数.

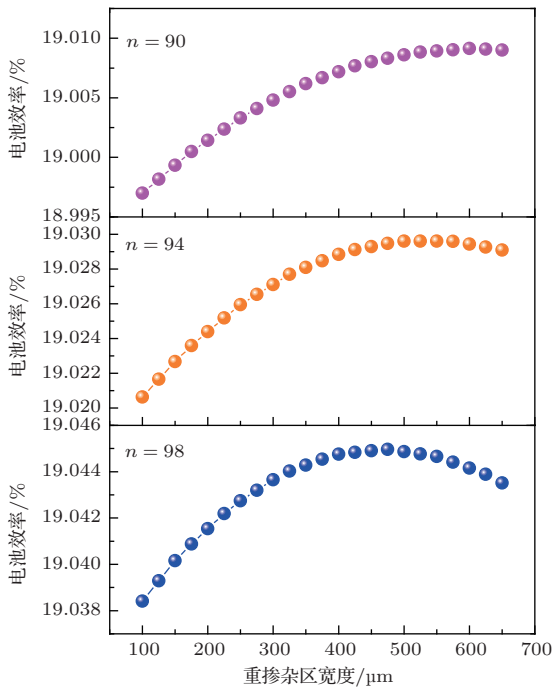


图5 SE 电池效率随重掺杂区宽度变化的PC2D模拟结果 ($w = 60 \mu\text{m}$, $n = 90, 94, 98$)

表2 不同栅线数目 (n) 下SE 电池取得最大效率时的重掺杂区宽度 (W)、栅线间距 (d) 及二者比值 ($m = W/d$) 与比值的平均值 (\bar{m})

n	$W/\mu\text{m}$	d/mm	$m/\%$	$\bar{m}/\%$
90	600	1.719101	34.90196	
94	525	1.645161	31.91176	32.3
98	475	1.561224	30.11438	

4.2 基区厚度与掺杂浓度对电池效率的影响 (基区参数优化)

在基区电学质量 (主要以基区少数寿命 τ 来表征) 一定的前提下, 基区参数的优化主要涉及基区厚度 (D) 和掺杂浓度 (N) 这两个参数, 所以我们以 τ 为第三参数, 利用PC2D模拟了基区厚度和掺杂浓度对电池效率的影响. 除了上面三个参数和已优

化的参数外, 其他模拟参数与表1相同. 需要说明的是, 对于不同的基区掺杂浓度, 通过设定发射区峰值掺杂浓度、发射区掺杂浓度余误差函数 (erfc) 分布的深度因子使发射区的方块电阻和结深保持不变.

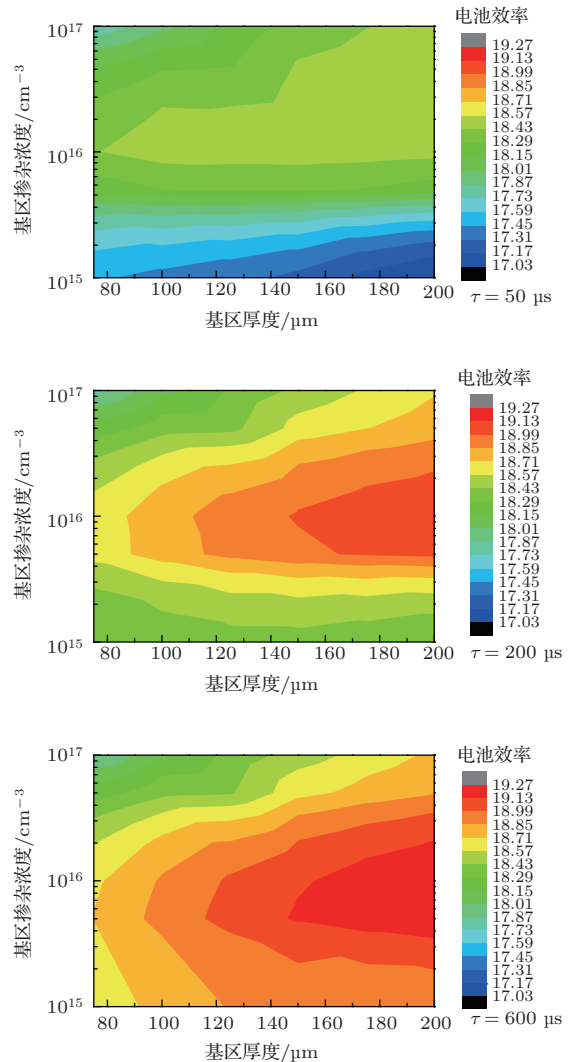


图6 (网刊彩色) SE 电池效率随基区厚度和掺杂浓度变化的二维分布 (以基区少数寿命为第三参数)

图6给出了基区少数寿命取50, 200和600 μs 三种情况下电池效率随基区厚度和掺杂浓度变化的模拟结果, 横轴为基区厚度, 纵轴为基区掺杂浓度, 为了便于比较, 图中同种颜色代表的数值范围相同. 由图6可知, 电池效率受基区少数寿命影响极大, 随着基区少数寿命的增加电池效率提升明显. 当基区少数寿命从50 μs 上升到600 μs 时, 电池的最高效率从18.53% 上升到19.27%, 提高0.74%, 增幅达到4%. 当基区晶体质量较差 ($\tau = 50 \mu\text{s}$) 时, 高的电池效率在基区掺杂浓度较高 ($> 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$) 的情况下获得, 在低掺杂浓度范

围($1 \times 10^{15} - 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), 基区厚度对电池效率影响不明显. 当基区晶体质量较好($\tau = 200 \mu\text{s}$)时, 获得高电池效率的基区范围向低基区掺杂浓度方向扩展. 当基区晶体质量很好($\tau = 600 \mu\text{s}$)时, 电池效率进一步提升, 获得高效率的掺杂浓度范围较广, 且向低掺杂浓度方向扩展明显. 此时基区厚度越大, 电池效率越高, 事实上, 由于铝硅界面并非十分锐利, 导致铝背场光学反射器的效果有限. 为迎合生产过程中成本降低的要求, 在保证一定机械强度的情况下, 总是使用相对较薄的硅片. 在现有铝背场技术条件下, 大多采用 $175 \mu\text{m}$ 的硅片(硅片太薄容易造成烧结翘曲). 本模拟中取基区厚度 $D = 175 \mu\text{m}$ 、基区少数寿命 $\tau = 600 \mu\text{s}$ (扩散系数 $D_n = 31 \text{ cm}^2/\text{s}$, 扩散长度 $L = 1363.8 \mu\text{m}$)、基区掺杂浓度 $N = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (电阻率 $\rho = 2.8 \Omega\cdot\text{cm}$) 作为优化后的基区参数, 在以下的模拟中, 将使用这些参数.

4.3 重掺杂区方块电阻与轻掺杂区方块电阻对电池效率的影响 (选择性发射区参数优化)

在前表面钝化情况(主要以前表面复合速度 S_{fp} 来表征)一定的前提下, 选择性发射区参数的优化主要涉及重掺杂区方块电阻 (R_n^{++}) 和轻掺杂区方块电阻 (R_n^+) 这两个参数, 所以我们以 S_{fp} 为第三参数, 利用 PC2D 模拟了选择性发射区重掺杂区方块电阻和轻掺杂区方块电阻对 SE 电池效率的影响. 除了上面三个参数和已优化的参数外, 其他模拟参数与表 1 相同. 需要说明的是, 对于不同的方块电阻, 通过设定峰值掺杂浓度和掺杂浓度的 erfc 分布的深度因子使结深保持不变.

图 7 给出了前表面复合速度 S_{fp} 取 20, 1000 和 5000 cm/s 三种情况下 SE 电池效率随重掺杂区方块电阻和轻掺杂区方块电阻变化的模拟结果, 横轴为轻掺杂区高方块电阻, 纵轴为重掺杂区低方块电阻. 为了便于比较, 图中同种颜色代表的数值范围相同. 由图 7 可知, 前表面复合速度对电池效率影响显著, 随着 S_{fp} 的上升, 电池效率急剧下降, 电池效率高于 19.3% 的范围(图中黑色线条所框区域)急剧缩小. 然而相同条件下, 取得较高效率的重掺杂区方块电阻和轻掺杂区方块电阻的分布范围却大致相同, 即均是重掺杂区低方阻在 $50 - 90 \Omega/\square$, 轻掺杂区高方阻在 $110 - 180 \Omega/\square$ 的范围内. 尤其

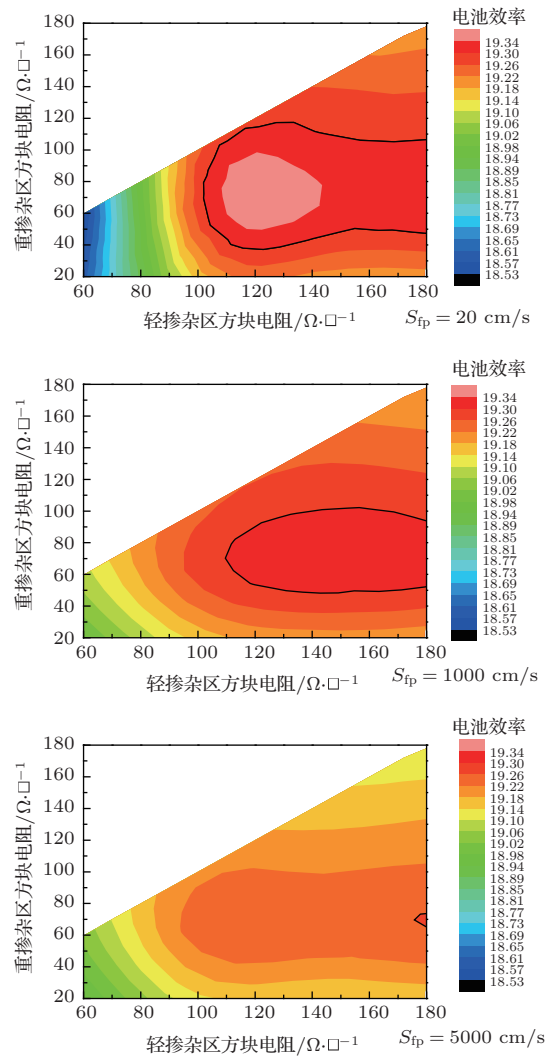


图 7 (网刊彩色) SE 电池效率随选择性发射区重掺杂区方块电阻和轻掺杂区方块电阻变化的二维分布 (以电池前表面复合速度为第三参数)

是当 $S_{fp} = 20 \text{ cm/s}$ 时, 重掺杂区低方阻在 $50 - 90 \Omega/\square$, 轻掺杂区高方阻在 $110 - 145 \Omega/\square$ 的近似圆形的范围内, 电池效率提升明显, 超过 19.34%. 值得注意的是, 前表面复合速度越小, 电池效率对重掺杂区和轻掺杂区的方块电阻大小就越敏感. 当 $S_{fp} = 20 \text{ cm/s}$ 时, 电池效率变化幅度大, 最高与最低效率均出现于此; 当 $S_{fp} = 5000 \text{ cm/s}$ 时, 电池效率变化幅度小. 这说明 SE 电池方阻优化的必备条件是前表面复合速度的降低, 忽略此前提, 任何方阻的优化都收效甚微, 事实上, 前表面复合速度主要与前表面的钝化有关, 如何增强前表面钝化是进一步提高 SE 电池效率必须解决的问题. 模拟显示, 当前表面复合速度 $S_{fp} = 20 \text{ cm/s}$, 重掺杂区方块电阻 $R_n^{++} = 60 \Omega/\square$, 轻掺杂区方块电阻 $R_n^+ = 140 \Omega/\square$ 时, 电池可获得最大效率 19.3426%. 在以下的模拟中, 我们将使用

优化后的选择性发射区参数.

4.4 背表面复合速度与方块电阻对电池效率的影响(BSF层参数优化)

BSF层参数的优化主要涉及背表面复合速度(S_b)和方块电阻(R_{p+})这两个参数. 为对前电极做进一步优化, 我们以主栅数目 n' 为第三参数, 利用PC2D模拟了背表面复合速度和方块电阻对电池效率的影响. 除了上面三个参数和已优化的参数外, 其他模拟参数与表1相同. 需要说明的是, 对于不同的方块电阻, 通过设定峰值掺杂浓度和掺杂浓度的erfc分布的深度因子使结深保持不变. 此外, AddRs会随着主栅数目的变化而变化. 根据文献[17], 与栅线有关的电阻正比于细栅每一节长度 a 的平方. 对于156 mm × 156 mm的硅片, 细栅每一节的长度为

$$a = \frac{156}{2n'}, \quad (6)$$

AddRs可由下式计算

$$\text{AddRs} = \frac{C}{(n')^2}, \quad (7)$$

式中 C 为常数. 根据已优化的参数和表1给出的参数设置, 有




$$C = 0.6652 \times 3^2 = 5.9868 \Omega \cdot \text{cm}^2. \quad (8)$$

模拟中, 对应于不同主栅数目的AddRs均由(7)式和(8)式计算得到. 由于主栅的面积决定着模拟区域的前表面透过率, 对于三根主栅, 面积比率

$r = 3.2\%$, 则对于两根和四根主栅的情况, 计算结果如表3所示.

图8给出了主栅数目 n' 取2根、3根和4根三种情况下SE电池效率随背表面复合速度和方块电阻变化的模拟结果, 横轴为 p^+ 区方块电阻, 纵轴为背表面复合速度, 由图8可知, 背表面复合速度对电池效率的影响显著, 当 S_b 从 $1 \times 10^6 \text{ cm/s}$ 降低到 10 cm/s , 电池效率有接近2个百分点的提升, 当背表面复合速度较小($S_b = 10 \times 10^2 - 5 \times 10^2 \text{ cm/s}$)时, 电池均可获得较高的效率, 且电池效率不受 p^+ 区方块电阻的影响. 当背表面复合速度较大($S_b = 10^4 - 10^6 \text{ cm/s}$)时, 电池效率随 p^+ 区方块电阻升高而下降. 主栅数目对电池效率影响明显, 电池效率随主栅数目的增加而上升, 当主栅数目从2根变到4根时, 电池的最高效率从19.385%上升到20.451%, 提高了1.66个百分点, 增幅达5.5%, 但是主栅数目对电池效率随 p^+ 区方块电阻和背表面复合速度变化的整体分布影响不大. 需要说明的是, 由于PC2D模拟电池面积的限制(1 cm^2), 对主栅的优化仅涉及主栅面积与由主栅分割所导致的细栅宽度的变化两方面, 并不涉及主栅自身所引起的串联电阻和接触电阻等的变化, 因此模拟结果与实际情况可能存在一定的偏差, 但是大致趋势相同. 尤其是当主栅结构具有较低的面积比率和串联电阻时, 增加主栅数目不失为一种可行的方案. 特别地, 当主栅数目 $n' = 4$ 根, p^+ 方块电阻 $R_{p+} = 120 \Omega/\square$, 背表面复合速率为 $S_b = 10 \text{ cm/s}$ 时, 电池可获得20.45%的转换效率.

表3 不同主栅数目(n')时AddRs和主栅面积比率(r)的计算结果及主栅图示

n'	2	3	4
AddRs/ $\Omega \cdot \text{cm}^2$	1.4967	0.6652	0.3742
$r/\%$	2.13	3.20	4.27
图示			

4.5 参数优化前后电池对比

经模拟优化的参数有: 细栅栅线宽度($w = 60 \mu\text{m}$), 细栅栅线数目($n = 98$), 重掺杂区宽度($W = 475 \mu\text{m}$), 基区厚度($D = 175 \mu\text{m}$), 基区掺杂浓度($N = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), 基区少子寿命($\tau = 600 \mu\text{s}$), 重掺杂区方块电阻($R_n^{++} = 60 \Omega/\square$), 轻

掺杂区方块电阻($R_n^+ = 140 \Omega/\square$), 前表面复合速度($S_{fp} = 20 \text{ cm/s}$), BSF层 p^+ 区方块电阻($R_{p+} = 120 \Omega/\square$), 背表面复合速度($S_b = 10 \text{ cm/s}$), 主栅数目($n' = 4$, 面积比率 $r = 4.27\%$), 外部串联电阻($\text{AddRs} = 0.3742 \Omega \cdot \text{cm}^2$). 由以上优化参数(其他参数与表1相同)定义的选择性发射极晶体硅太阳能电池的效率可达到20.45%, 与优化前电池的 $I-V$ 曲

线的对比如图 9 所示.

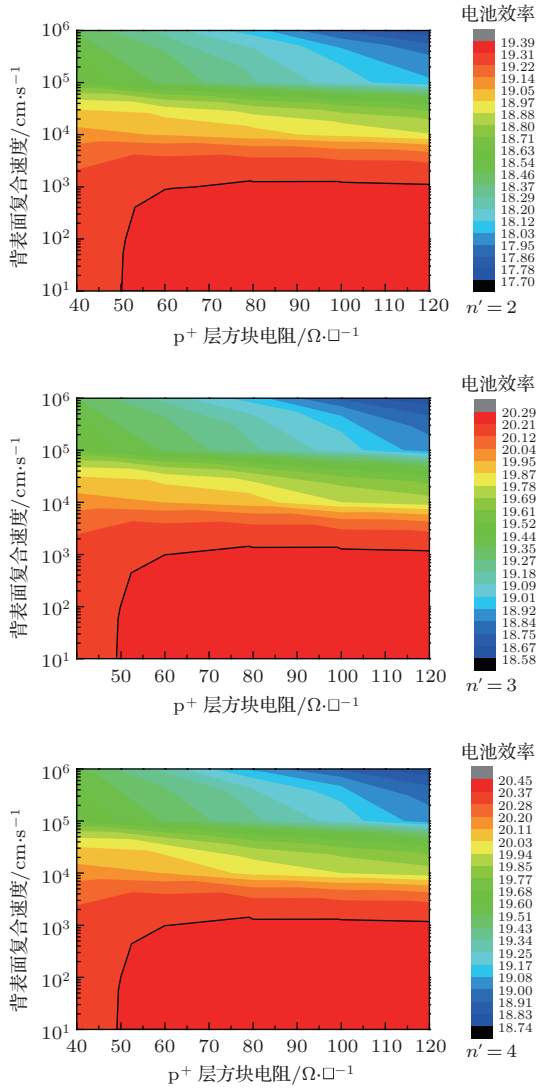


图 8 (网刊彩色) SE 电池效率随背表面复合速度和方块电阻变化的二维分布 (以主栅数目为第三参数)

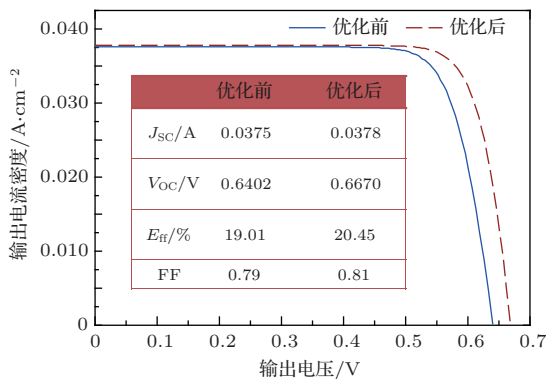


图 9 选择性发射极晶体硅太阳能电池性能优化前后 $I-V$ 曲线和最大功率曲线对比图选择性发射极晶体硅太阳能电池性能优化前后 $I-V$ 曲线和最大功率曲线对比

5 结 论

本文利用 PC2D 二维模拟软件对 SE 电池进行了器件模拟和参数优化. 将 SE 电池分为了铝 BSF

层 (p^+ 区)、基区 (p 区)、重掺杂区、(n^{++} 区)、轻掺杂区 (n^+ 区)、栅线电极等五个区域, 并在对南玻公司使用丝网印刷磷浆法制备的 SE 电池的实测典型 $I-V$ 特性曲线实现完美拟合的基础上, 依次对栅线区域、基区、选择性发射区和 BSF 层参数进行了优化. 模拟表明: 相对于基区掺杂浓度、发射区方块电阻配比、BSF 层 p^+ 区方块电阻而言, 基区少数寿命、前表面复合速度和背表面复合速度对电池效率的影响更显著. 在所研究的参数范围内, 当基区少数寿命从 $50 \mu s$ 上升到 $600 \mu s$ 时, 电池的最高效率从 18.53% 上升到 19.27%, 提高了 0.74%, 增幅达到 4%. 低的前表面复合速度不仅可以显著提高电池的效率, 而且也是使发射区方块电阻配比优化有意义的前提. 要取得理想的电池效率, 背表面复合速度需控制在 500 cm/s 以下. 此外, 对于不同的前表面复合速度, 电池的最高效率在重掺杂区低方阻 $R_n^{++} = 50-90 \Omega/\square$ 、轻掺杂区高方阻 $R_n^+ = 110-180 \Omega/\square$ 的近似椭圆形区域内取得. 对于不同的栅线数目, 取得最高效率的重掺杂区宽度也不同. 特别地, 当重掺杂区宽度与栅线间距之比为 32% 时, 电池取得效率最大值. 另外, 在主栅结构具有较低的面积比率的前提下, 主栅数目的增加也可对电池效率提供增益. 最后, 通过优化 p 型 SE 电池的效率可达到 20.45%.

感谢 PC2D 的开发者 Paul Basore 和 Kirsten Cabanas-Holmen, 并特别感谢 Cabanas-Holmen 女士在模拟过程中给予的帮助.

参考文献

- [1] Kerr M J, Cuevas A 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 2473
- [2] Kopecek R, Libal J 2012 *Proceedings of the 22nd International Photovoltaic Science and Engineering Conference* Hangzhou, China, November 5-9, 2012 1-1-6
- [3] Hu Z Z, Liao X B, Diao H W, Xia C F, Xu L, Zeng X B, Hao H Y, Kong G L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2302 (in Chinese)[胡志华, 廖显伯, 刁宏伟, 夏朝凤, 许玲, 曾湘波, 郝会颖, 孔光临 2005 物理学报 **54** 2302]
- [4] Hu Z Z, Liao X B, Zeng X B, Xu Y Y, Zhang S B, Diao H W, Kong G L 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 217 (in Chinese)[胡志华, 廖显伯, 曾湘波, 徐艳月, 张世斌, 刁宏伟, 孔光临 2003 物理学报 **52** 217]
- [5] Huang Z H, Zhang J J, Ni J, Cao Y, Hu Z Y, Li C, Geng X H, Zhao Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 098803
- [6] Ai B, Zhang Y H, Deng Y J, Shen H 2012 *Sci. China E* **55** 3187

- [7] Nijss J, Demesmaekera E, Szlufcika J, Poortmansa J, Frissona L, De Clercq K, Ghannamb M, Mertensa R, van Overstraetena R 1996 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **41** 101
- [8] de Rose R, Zanucoli M, Magnone P, Tonini D, Galiazzo M, Cellere G, Frei M, Guo H W, Fiegna C, Sangiorgi E 2011 *Proceedings of Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* Seattle, USA, January 19–24, 2011 p002556
- [9] Zanucoli M, Bresciani P F, Frei M, Guo H W, Fang H, Agrawal M, Fiegna C, Sangiorgi E 2010 *Proceedings of Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* Honolulu, HI, USA, June 20–25, 2010 p002262
- [10] Rapolu K, Singh P, Shea S P 2009 *Proceedings of Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Philadelphia PA, USA, June 7–12, 2009 p001048
- [11] Rapolu K, Singh P, Shea S P 2010 *Proceedings of Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Honolulu HI, USA, June 20–25, 2010 p002227
- [12] Basore P, Cabanas-Holmen K 2012 *PC2D Help Index* 2013 p0609
- [13] Basore P, Cabanas-Holmen K 2011 *The IEEE J. Photovolt.* **1** 72
- [14] Basore P, Cabanas-Holmen K <http://www.pc2d.info/home>. 20130609
- [15] Cabanas-Holmen K, Basore P 2012 *Proceedings of 7th European Photovoltaic Solar Energy Conference* Frankfurt, September 25, 2012 2BV.5.42
- [16] Cabanas-Holmen K, Basore P 2011 *Proceedings of Silicon PV* Leuven, Belgium
- [17] Meier D, Good E, Garcia R, Bingham B, Yamanaka S, Chandrasekaran V, Bucher C 2006 *Proceedings of Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference* Waikoloa HI, May 7–12, 2006 p1315

Two-dimensional device simulation and performance optimization of crystalline silicon selective-emitter solar cell*

Jia Xiao-Jie¹⁾ Ai Bin^{1)†} Xu Xin-Xiang²⁾ Yang Jiang-Hai²⁾
Deng You-Jun¹⁾ Shen Hui¹⁾

1) (*Guangdong Provincial Key Laboratory of Photovoltaic Technologies, State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China*)

2) (*CSG R&D Center of Solar Energy Division, CSG Holding Co. Ltd, Dongguan 523141, China*)

(Received 9 November 2013; revised manuscript received 29 November 2013)

Abstract

In this paper, device simulation and parameter optimization on crystalline silicon (c-Si) selective-emitter (SE) solar cell are performed by using PC2D two-dimensional simulator. On the basis of achieving perfect fitting to the measured I - V curve of a typical c-Si SE solar cell fabricated by screen printing phosphoric paste method, the effects of physical parameters of gridlines, base, selective emitter and back surface field layer on the optoelectronic performance of the SE solar cell are comprehensively and systematically investigated. Simulation results show that the base minority carrier lifetime, the front surface recombination velocity and the back surface recombination velocity are the three largest efficiency-affecting parameters. In the studied parameter range, when the base minority carrier lifetime rises from 50 μ s to 600 μ s, the cell efficiency increases from 18.53% to 19.27%. Low front surface recombination velocity is the premise of making the optimization of selective emitter sheet resistance meaningful. To obtain an ideal efficiency, the back surface recombination velocity should be controlled to be under 500 cm/s. In addition, under different front surface recombination velocities, the maximum of cell efficiency is always achieved in a range of 50–90 Ω/\square heavily doped region sheet resistance and 110–180 Ω/\square lightly doped region sheet resistance. For different numbers of gridlines, when the ratio of heavily doped region width to the gridline pitch equals 32%, the solar cell has the highest efficiency. Moreover, under the condition of low area ratio of bus bar, increasing bus bar number appropriately can improve the efficiency. The efficiency of p-type SE solar cell reaches 20.45% after optimization.

Keywords: selective emitter, PC2D device simulation, parameters optimization, solar cell

PACS: 88.40.jj, 88.30.gg, 88.40.hj, 88.10.gc

DOI: 10.7498/aps.63.068801

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50802118), the Strategic Emerging Industries Core Technology Research Projects of Guangdong Province, China (Grant No. 2011A032304001), and the Central Universities Nurture Young Teachers of Basic Research Funding Projects, China (Grant No. 11lgpy40).

† Corresponding author. E-mail: stsab@mail.sysu.edu.cn