

# 叉指背接触晶硅太阳能电池背面掺杂区和金属电极图形结构的优化

胡凡<sup>1,2,3</sup>, 曹双迎<sup>1,2</sup>, 殷敏<sup>1</sup>, 陈小源<sup>1</sup>, 李东栋<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海高等研究院薄膜光电工程技术研究中心, 上海 201210;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210

**摘要** 通过数值模拟对叉指背接触(IBC)晶硅太阳能电池的结构参数进行了系统研究,详细分析了硅片厚度,电池背面发射区、隔离区、背表面场的面积比以及发射区金属接触线的分布和线宽对电池开路电压、短路电流密度、填充因子和电池转换效率的影响。结果表明:增大发射区面积占比、减小金属接触线的线宽均有利于提高电池转换效率;当电池硅片厚度为220 μm,背面发射区、隔离区和背表面场的面积比为8:1:1,且发射区的2个金属接触线总线宽为10 μm时,IBC电池的光电转换效率最优值为24.19%。

**关键词** 探测器; 硅太阳能电池; 叉指背接触; 图形化结构; 能量损失; 性能优化; 电流空间分布

**中图分类号** TM914.4      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.080401

## Optimization of Doped Region and Metal Electrode Patterned Structure on Rear Side of Interdigitated Back Contact Crystalline Silicon Solar Cell

Hu Fan<sup>1,2,3</sup>, Cao Shuangying<sup>1,2</sup>, Yin Min<sup>1</sup>, Chen Xiaoyuan<sup>1</sup>, Li Dongdong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Thin Film Optoelectronic Technology Center, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

**Abstract** Structural parameters of interdigitated back contact (IBC) crystalline silicon solar cell are investigated systematically by numerical simulation. The influences of the Si wafer thickness, the area ratio of emitter, gap and back surface field, and the distribution and linewidth of metal contact lines in emitting region on the open-circuit voltage, short-circuit current density, filling factor and conversion efficiency of solar cell are analyzed in detail. Results show that the conversion efficiency of solar cell increases with the increasing of area ratio and the decreasing of metal contact's linewidth. When the bulk thickness of Si is 220 μm, the area ratio of emitting region, gap and back surface field is 8:1:1, the total linewidth of two metal contact lines in emitting region is 10 μm, and an optimum photoelectric conversion efficiency of 24.19% can be achieved for IBC solar cell.

**Key words** detectors; silicon solar cells; interdigitated back contact; patterned structure; energy loss; performance optimization; spatial distribution of current

**OCIS codes** 040.5350; 040.6040

## 1 引言

由 Schwartz 等<sup>[1-2]</sup>提出的 n 型叉指状背接触(IBC)太阳能电池是一种高效太阳能电池。IBC 晶硅太阳能电池

**收稿日期:** 2017-02-22; **收到修改稿日期:** 2017-03-23

**基金项目:** 国家自然科学基金(61474128)、国家优秀青年科学基金(61622407)

**作者简介:** 胡凡(1991—),男,硕士研究生,主要从事高效晶硅太阳能电池方面的研究。E-mail: huf@sari.ac.cn

**导师简介:** 李东栋(1980—),男,博士,研究员,主要从事光电材料与器件方面的研究。

E-mail: lidd@sari.ac.cn(通信联系人)

的正负金属电极交叉排列在电池的背面,有效避免了电极在电池正面造成的遮光损失,同时赋予电池更多的空间去进一步优化电极,以提升电池性能。IBC 晶硅太阳能电池具有独特的结构特征和优异的光电转化效率,一直是高效率太阳电池领域的研究热点之一<sup>[3-5]</sup>。经过数十年的发展,IBC 晶硅太阳能电池的转换效率达 25.2%<sup>[6]</sup>,已经非常接近单结太阳电池的极限效率<sup>[7]</sup>。

目前,IBC 太阳电池的研究主要集中在优化前后表面掺杂分布、背面掺杂区和金属电极图形结构,以及减少生产工艺步骤<sup>[8]</sup>等方面。通过数值仿真可直观地研究内部光生载流子的产生、输运和复合特性,以及电池各功能层特性和几何参数对电池的电流-电压输出特性的影响,从而有效指导电池制备实验<sup>[9]</sup>。Granek 等<sup>[10]</sup>指出,制备高效率 IBC 电池的关键在于优化前表面场、发射区的表面掺杂和离子浓度分布;Gong 等<sup>[11]</sup>指出,合适的发射区掺杂分布和优异的背表面钝化有助于提升 IBC 电池性能和提高电池转换效率。Chen 等<sup>[12]</sup>模拟了不同周期下电池的发射区和背表面场面积占比对短路电流密度的影响,发射区面积占比的增大有助于太阳电池的短路电流密度的增大。Zanuccol 等<sup>[13]</sup>模拟了不同硅片厚度及背面金属电极占比对电池性能的影响,指出合适的硅片厚度和电极面积占比对电池性能有较大影响。但是,针对电池背面钝化层开槽中金属电极结构与分布对电池性能影响的研究鲜有报道。本文研究并分析了发射区钝化层开槽中的电极分布和条形接触线的线宽对电池内部自由能损失(FELA)<sup>[14-15]</sup>和电池性能的影响,为 IBC 高效电池的制备提供了参考。

## 2 模拟参数

图 1 为 IBC 晶硅太阳电池单个模拟单元的二维剖面图。电池的表面积为规则的金字塔绒面结构,金字塔底部宽度为 5  $\mu\text{m}$ ,侧壁与水平方向的夹角为 54.7°,电池上表面自上而下依次为厚度为 65 nm 的氮化硅( $\text{SiN}_x$ )和厚度为 10 nm 的二氧化硅( $\text{SiO}_2$ ),二者分别作为抗反射层和钝化层。在金属电极与硅片之间还尝试使用了局部开槽的钝化层,通过减小背电极与发射区和背表面场之间的接触面积来降低载流子复合几率。

利用 OPAL2 软件<sup>[16]</sup>模拟得到电池的光学特性及光生载流子生成速率,其中  $\text{SiN}_x$  和  $\text{SiO}_2$  材料的光学参数源自文献<sup>[17-18]</sup>。采用 Quokka2 软件<sup>[19-21]</sup>仿真材料的电学特性;IBC 电池的模拟周期设为 1000  $\mu\text{m}$ ;n 型硅片厚度的变化范围设为 150~250  $\mu\text{m}$ ,变化间隔设为 10  $\mu\text{m}$ ;环境温度设为 300 K;入射光(AM1.5G 光谱)由垂直于电池上表面的方向入射,强度为 100  $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;其余电学参数如表 1 所示<sup>[22-24]</sup>。表中  $J_{0F}$ 、 $J_{0E}$ 、 $J_{0\text{Gap}}$  和  $J_{0\text{BSF}}$  分别为前表面场、发射区、隔离区和背表面场的饱和电流密度,下标 passivated 和 contacted 分别表示钝化和接触的区域。

表 1 用于建模的电学模拟参数

Table 1 Electrical simulation parameters used in modeling

Parameter	Value
Cell pitch / $\mu\text{m}$	1000
$n^+$ FSF (Front Surface Field) sheet resistance /( $\Omega\cdot\text{sq}^{-1}$ )	120
$n^+$ FSF $J_{0F}$ /( $\text{fA}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	5
n- type bulk resistivity /( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	1.5
Bulk lifetime / $\mu\text{s}$	5000
$p^+$ emitter sheet resistance /( $\Omega\cdot\text{sq}^{-1}$ )	166
$p^+$ emitter $J_{0E\text{-passivated}}$ /( $\text{fA}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	36
$p^+$ emitter $J_{0E\text{-contacted}}$ /( $\text{fA}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	810
$p^+$ emitter contact resistance /( $\Omega\cdot\text{cm}^2$ )	$1.5\times 10^{-5}$
Gap area $J_{0\text{Gap-passivated}}$ /( $\text{fA}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	21
$n^+$ BSF (Back Surface Field) sheet resistance /( $\Omega\cdot\text{sq}^{-1}$ )	19
$n^+$ BSF $J_{0\text{BSF-passivated}}$ /( $\text{fA}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	190
$n^+$ BSF $J_{0\text{BSF-contacted}}$ /( $\text{fA}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	280
$n^+$ BSF contact resistance /( $\Omega\cdot\text{cm}^2$ )	$1\times 10^{-5}$
External series resistance /( $\Omega\cdot\text{cm}^2$ )	0.2
Shunt resistance /( $\Omega\cdot\text{cm}^2$ )	$1\times 10^5$

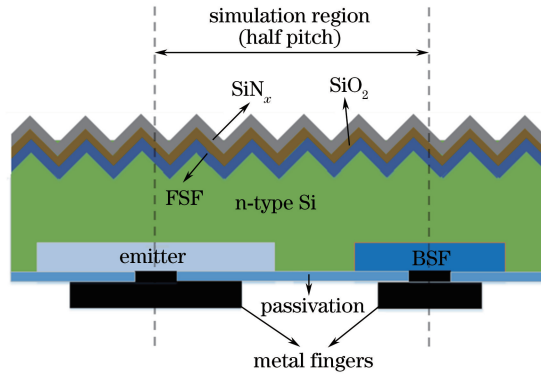


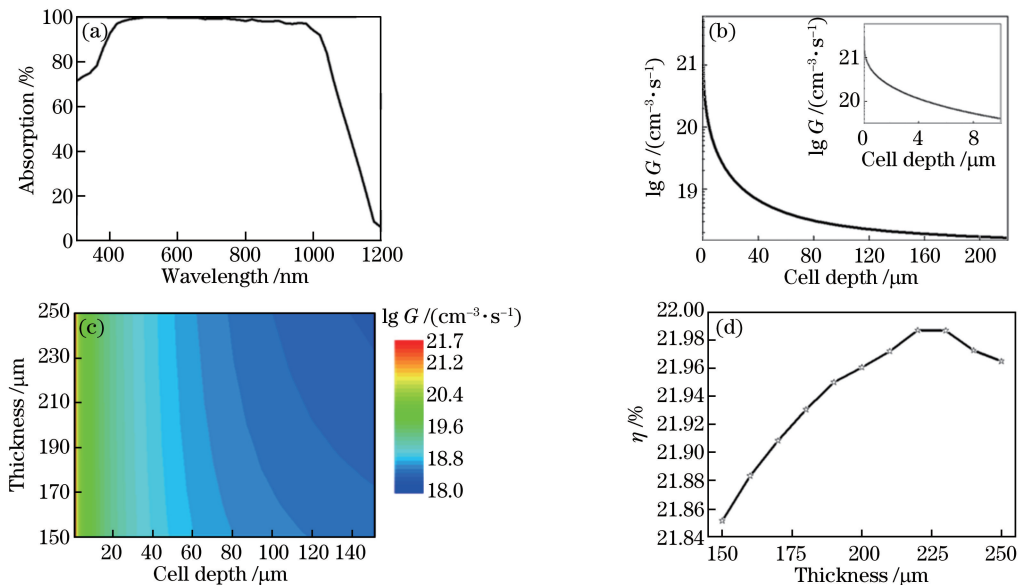
图1 IBC 晶硅太阳能电池单个模拟单元的二维剖面图

Fig. 1 Two-dimensional profile of single simulation unit of IBC crystalline silicon solar cell

### 3 结果与讨论

#### 3.1 n 型硅片厚度与电池转换效率的关系

图 2(a)、(b) 分别为硅片厚度为  $220\ \mu\text{m}$  时的光吸收曲线及垂直于硅片方向的光生载流子生成速率 ( $G$ ) 分布, 电池在  $440\sim 900\ \text{nm}$  之间的吸收率均在  $98\%$  以上。图 2(b) 中, 靠近前表面减反射层的硅片光生载流子生成率较高,  $G$  在  $10^{21}\ \text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$  数量级附近, 随着硅片纵向深度的增加, 短波长段入射光随之减少, 光生载流子生成率急剧降低。图 2(c) 为改变电池片厚度 ( $150\sim 250\ \mu\text{m}$ ) 时,  $G$  在距离电池表面  $150\ \mu\text{m}$  范围内的分布。从图中可以看出, 光生载流子主要在距离电池前表面  $20\ \mu\text{m}$  处产生, 随着光子进入电池硅片深度的增加, 光生载流子生成率不断减小。同时, 随着 n 型硅片厚度的减小, 背部电极的反射作用更加明显,  $G$  的减小速度变得相对缓慢。

图2 (a) 厚度为  $220\ \mu\text{m}$  硅片的光吸收曲线; (b) 厚度为  $220\ \mu\text{m}$  硅片的光生载流子分布;

(c) 不同厚度硅片的光生载流子生成率与深度的关系; (d) IBC 电池转换效率与硅片厚度的关系

Fig. 2 (a) Optical absorption curve of Si substrate with thickness of  $220\ \mu\text{m}$ ; (b) photon-generated carrier distribution of Si substrate with thickness of  $220\ \mu\text{m}$ ; (c) relationship between generation rate of photon-generated carrier and depth under different thicknesses of Si substrate; (d) relationship between IBC solar cell conversion efficiency and thickness of Si substrate

将 OPAL2 得到的光生载流子生成率导入 Quokka2 软件中进行电学性能的模拟。根据 Quokka2 软件中硅电池内部电荷载流子传输模型<sup>[25]</sup>, 得到简化的连续性方程<sup>[26]</sup>为

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_n = q\mu_n \frac{d}{dx}(nE) - qD_n \frac{d^2 n}{dx^2} = q(R - G), \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_p = q\mu_p \frac{d}{dx}(pE) - qD_p \frac{d^2 p}{dx^2} = q(G - R), \quad (2)$$

式中 $\nabla$ 为 Nabla 算子,  $\mathbf{J}_n$ 、 $\mathbf{J}_p$  分别为电子和空穴的电流密度,  $\mu_n$ 、 $\mu_p$  分别为电子和空穴的载流子迁移率,  $n$  和  $p$  分别为电子和空穴的浓度,  $D_n$ 、 $D_p$  分别为电子和空穴的扩散系数,  $E$  为电子电势能,  $q$  为基本电荷,  $G$  为光生载流子生成率,  $R$  为载流子净复合速率。泊松方程式可简化为

$$\nabla \cdot \epsilon \mathbf{E} = \epsilon \frac{dE}{dx} = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) = 0, \quad (3)$$

式中 $\epsilon$ 为介电常数,  $N_D^+$ 、 $N_A^-$  分别为施主和受主杂质离子浓度。

通过求解(1)~(3)式,可以进一步推导出太阳能电池电流-电压特性,即

$$I = I_{SC} - I_{S1} \{ \exp [qV_a / (KT)] - 1 \} - I_{S2} \{ \exp [qV_a / (2KT)] - 1 \}, \quad (4)$$

式中 $I_{SC}$ 为短路电流,  $I_{S1}$ 为发射区和背面场中的暗电流饱和值,  $I_{S2}$ 为耗尽区的复合电流饱和值,  $V_a$ 为太阳能电池两端的电位,  $K$ 为玻尔兹曼常量,  $T$ 为热力学温度。利用(4)式可以得到

$$V_{OC} = \frac{KT}{q} \ln \frac{I_{SC} + I_{S1}}{I_{S1}}. \quad (5)$$

结合(4)、(5)式,得到太阳能电池的填充因子 $F_F$ 和太阳能电池转换效率 $\eta$ 分别为

$$F_F = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}}, \quad (6)$$

$$\eta = \frac{F_F V_{OC} I_{SC}}{P_{in}}, \quad (7)$$

式中 $P_{in}$ 为单位面积入射功率,  $V_{MP}$ 为最大功率电压,  $I_{MP}$ 为最大功率电流,  $V_{OC}$ 为开路电压,  $P_{in}$ 为单位面积入射光的功率。

图2(d)是用 Quokka2 软件模拟得到的电池转换效率随硅片厚度的变化曲线,掺杂区域与电极采用全接触方式。由图可见,随着电池片厚度从 100  $\mu\text{m}$  增加到 220  $\mu\text{m}$ ,电池转换效率逐渐增大,当硅片厚度为 220  $\mu\text{m}$  时电池转换效率最高,达到 21.99%。硅片厚度进一步增加,则电池转换效率逐渐减小,少数载流子寿命是其中的主要影响因素,只有当载流子扩散长度大于或等于其迁移至发射区的长度时,载流子才有可能被电极收集。当电池中硅片厚度较薄时,载流子能够从前表面到达后表面发射区,此时电池转换效率取决于能被有效吸收的光子数,因此能吸收更多光子的厚硅片具有更高的效率。然而,随着硅片厚度的增加,载流子在硅片中复合的几率增大,部分少数载流子无法到达发射区而被收集,因此电池转换效率逐渐降低。

### 3.2 发射区、隔离区以及背表面场面积占比与电池性能的关系

在上述电池结构中,硅片厚度为 220  $\mu\text{m}$  时电池转换效率最高。在此设计基础上,将 IBC 电池背面的发射区、隔离区以及背表面场按照一定比例进行条形划分,每个区域面积占总背面区域面积的 10%~80%,以 100  $\mu\text{m}$  的步长进行计算。掺杂区域与电极仍采用全接触方式。

图3为开路电压 $V_{OC}$ 、短路电流密度 $J_{SC}$ 、填充因子 $F_F$ 和电池转换效率 $\eta$ 与发射区、隔离区以及背表面场面积占比的关系。由图3(a)可知, $V_{OC}$ 受隔离区影响较大,隔离区域面积占比越大,开路电压越大; $J_{SC}$ 受发射区和背表面场面积占比影响较大[图3(b)],当发射区占比增大而背表面场占比减小时, $J_{SC}$ 增大,这是由于随着发射区面积占比的增大,少数载流子空穴到达发射区的距离缩短,发射区收集空穴的效率提升,因此 $J_{SC}$ 随之增大。

$F_F$ 随背表面场面积占比的增大而增大,随发射区面积占比的增大而减小[图3(c)],与 $J_{SC}$ 的变化趋势相反,这可能是由于发射极单位面积的复合几率大于背表面场单位面积的复合几率,当发射区面积占比增大时,复合所导致的能量损失也随之增大, $F_F$ 因此而减小。

图3(d)为 $\eta$ 与这3个区域面积占比的关系图,其大小由 $V_{OC}$ 、 $J_{SC}$ 和 $F_F$ 共同确定,可表示为

$$\eta = \frac{V_{OC} J_{SC} F_F}{P_{in}} \times 100\%. \quad (8)$$



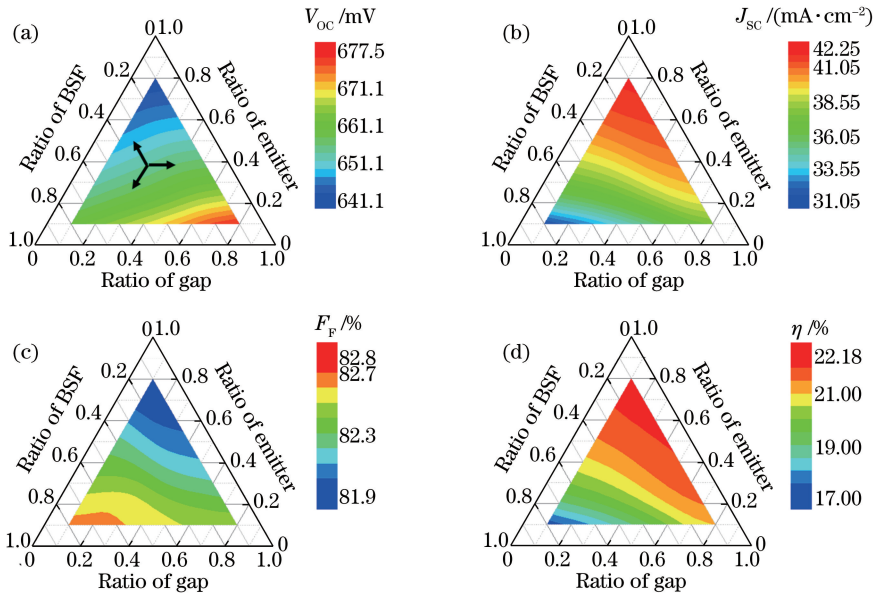


图3 IBC电池的(a)  $V_{oc}$ 、(b)  $J_{sc}$ 、(c)  $F_f$ 和(d)  $\eta$ 与发射区、隔离区以及BSF面积占比的关系

Fig. 3 Relationship among (a)  $V_{oc}$ , (b)  $J_{sc}$ , (c)  $F_f$  and (d)  $\eta$  of IBC solar cell on area ratio of emitter, gap and BSF

由图3(d)可知,在 $V_{oc}$ 、 $J_{sc}$ 和 $F_f$ 的共同影响下,发射区面积占比越大,电池转换效率越高。图中电池转换效率最低为17.01%,最高为22.17%,电池转换效率最高时发射区、隔离区和背表面场的面积比为8:1:1。在此范围之外,通过进一步减小隔离区和背表面场的尺寸,发射区、隔离区和背表面场的面积比变为18:1:1,此时电池转换效率为22.19%,提升了0.02%,但是在工艺生产中,加工难度也会相应增加。

FELA将电池内部的电阻损失和复合损失进行量化处理,为分析电池内部物理图像提供了更多信息,有助于对电池进行深入优化。图4是发射区、隔离区和背表面场在不同面积占比下的电池内部能量损失。随着发射区面积占比的增大,总的能量损失不断减小,从 $6.85 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 降到 $3.94 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。其中,体电阻损失与晶体硅材料的质量相关,受图形结构变化的影响不大,电阻损失数值基本不变,维持在 $2.13 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 左右。随着发射区面积占比增大,IBC电池的接触复合损失、边界的电阻和复合损失以及体复合损失[SRH(Shockley-Read-Hall)复合损失和俄歇复合损失]显著减小。这是由于随着发射区的面积占比增大,基体中能够到达发射区被收集的少数载流子空穴数量增多,发射区收集空穴载流子电池转换效率提高,从而使接触复合几率减小。边界损失主要由前表面复合损失和隔离区复合损失决定,其中前表面损失受图形结构变化的影响很小,隔离区复合损失随着发射区面积占比的增大(隔离区面积占比的减小)而减小。体复合主要受SRH复合和俄歇复合影响,随着发射区面积占比的增大,少数载流子到达发射区的路径变短,更容易被发射区收集,因此体复合损失减小。此外还发现,外部电阻损失随着发射区面积的增大有所增大,这是由于逐渐增大的发射区面积会引起电流密度的增大,从而导致串联电阻损失的增大,使得外部电阻损失增大。

### 3.3 IBC电池背面金属接触线数量与线宽对电池性能的影响

由图4可知,体电阻损失在8:1:1(背表面发射区:隔离区:背表面场)结构的电池中占比最大,可通过提高电池片质量来减少硅片内部杂质和缺陷,从而提高电池转换效率。尽管接触复合损失随着发射区的增大而减小,但仍有 $1.14 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的损失。通过在掺杂区域与电极之间引入钝化层,采用条形局部接触减小电极接触面积,可以一定程度地抑制接触复合损失,但由于开槽中金属电极与发射区接触面积的减小,电池串联电阻损失可能会相应提高,因此需要系统地考察接触面积和形状对IBC电池各项电学性能的影响。在背表面发射区、隔离区和背表面场面积占比为8:1:1,掺杂区域与金属电极之间引入 $\text{SiO}_2$ 钝化层并局部开槽形成金属/掺杂区的局部条形接触,背表面场的接触宽度固定为 $50 \mu\text{m}$ ,重点考察背面发射区金属接触线的线宽和数量。如图5所示,发射区金属接触线的线宽的变化范围为 $10\sim 400 \mu\text{m}$ ,变化间隔为 $20 \mu\text{m}$ ,电极数量分别为1,2,4,电极等间距地分布在发射区中。对于发射区多条金属接触线的情况,接触线线宽定义为多条金属接触线的线宽之和。

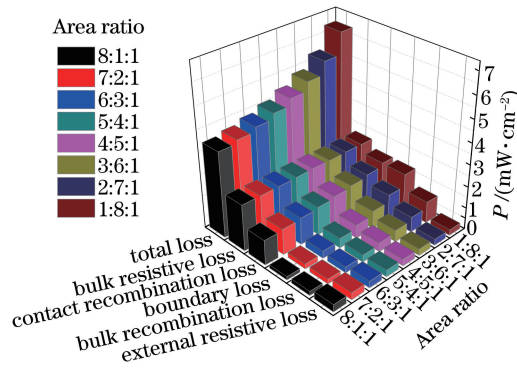


图4 IBC 太阳能电池背表面发射区、隔离区、背表面场不同面积占比下的能量损失

Fig. 4 Energy loss of IBC solar cell with different area ratios of emitter, gap and BSF

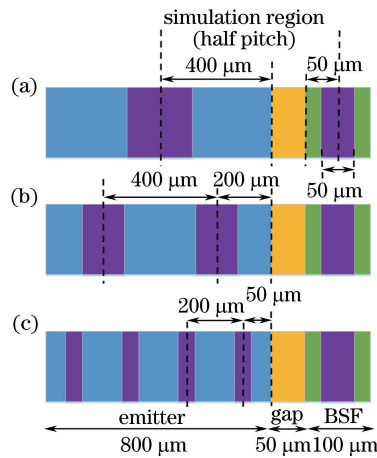


图5 金属接触线数量分别为(a) 1; (b) 2 和(c) 4 时的 IBC 太阳能电池背部金属接触示意图

Fig. 5 Contact schematic of rear side metal of IBC solar cell with (a) one, (b) two and (c) four metal contact lines

图6是在发射区中有1,2,4条接触线情况下的电子电流和空穴电流的矢量分布,此时金属接触线总线宽为 $300\ \mu\text{m}$ 。如图6(a1)、(b1)、(c1)所示,由于背表面场面积占比较小,多数载流子电子需要穿越较长的距离才能到达背表面场,因此电子的传输以横向传输为主。在发射区及其上方区域,电子电流密度较小;在靠近隔离区的背表面场上方,电子电流密度明显高于其他区域。电子电流密度受前表面场、背表面场和背表面场电极等因素的影响较大,而受发射区接触图形的影响不大,因此改变发射区接触结构对电子电流密度的空间分布影响不大。从图6(a2)、(b2)、(c2)中可以看出,由于发射区面积占比较大,拥有足够的空间来收集少数载流子空穴,因此空穴的传输以纵向传输为主。此外,同样很难观察到发射区接触线数量对电流密度的影响。

图7是金属接触线数量和线宽与IBC电池的 $V_{OC}$ 、 $J_{SC}$ 、 $F_F$ 、 $\eta$ 等电学参数的关系。由图7(a)可知, $V_{OC}$ 对接触线线宽比较敏感,随着金属接触线线宽的增加而逐渐减小;总接触线线宽一定时, $V_{OC}$ 对不同接触线数量的条件不敏感。 $J_{SC}$ 受接触线线宽和数量的影响不大,与图6的分析结果一致。由图7(c)可知, $F_F$ 受接触线线宽的影响较大,随着线宽的增加, $F_F$ 呈下降趋势,金属接触线数量的增加有助于 $F_F$ 的改善。综合上述因素,随着金属接触线线宽的增大,太阳能电池转换效率不断减小。同时,在相同接触总面积的情况下,窄线宽、多区域接触有助于提高电池转换效率[图7(d)]。例如,在总接触电极线宽均为 $40\ \mu\text{m}$ 的情况下,具有1,2,4条金属接触线的电池转换效率分别为23.93%、24.04%和24.07%,接触复合损失也分别减小到 $0.652$ ,  $0.658$ ,  $0.659\ \text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。当金属接触线的线宽为 $10\ \mu\text{m}$ 时,具有2个金属接触电极的电池转换效率为24.19%,略高于具有1个金属接触电极(24.12%)和4个金属接触电极(24.07%)的电池转换效率。在此范围之外,继续减小金属接触电极线宽,当金属接触电极为2个、金属接触电极线宽为 $5\ \mu\text{m}$ 时,电池转换效率可达到24.27%,接触复合损失降为 $0.511\ \text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,但是在实际生产工艺中实现难度较大。

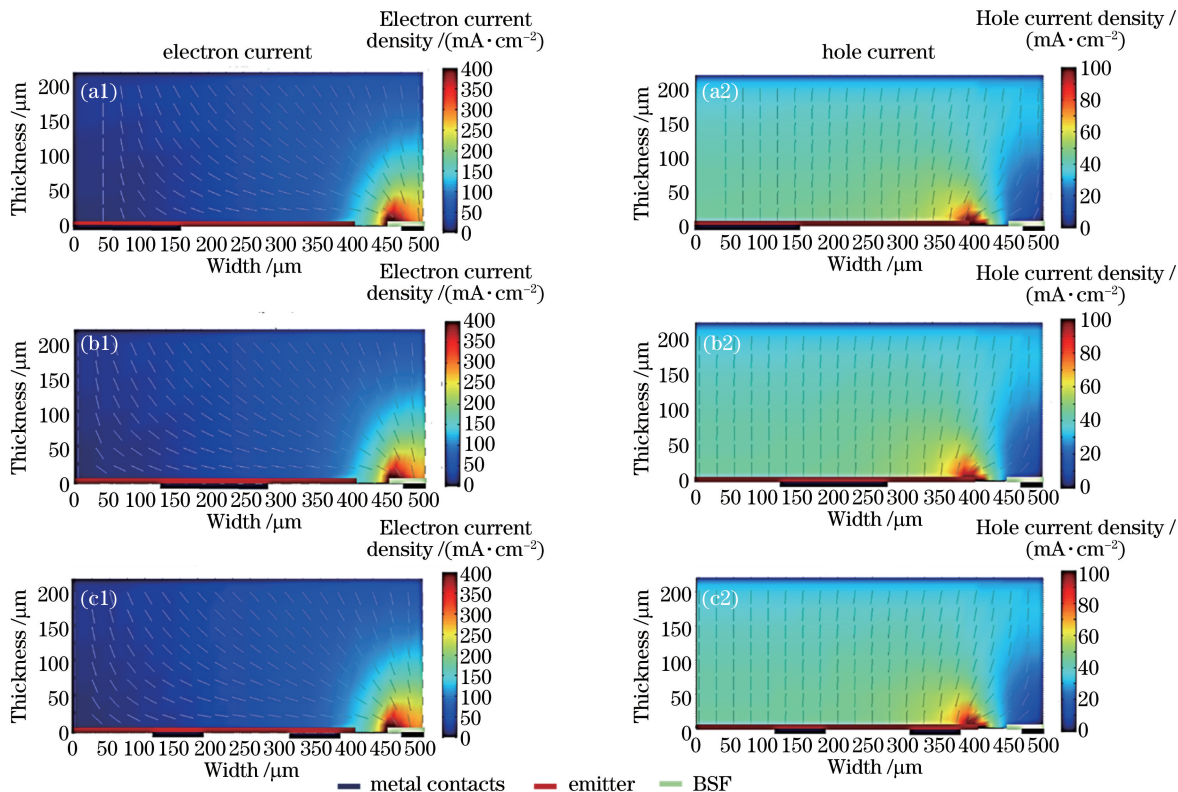


图6 发射区中有(a1)(a2) 1;(b1)(b2) 2 和(c1)(c2) 4条金属接触线情况下电子电流和空穴电流的矢量分布(金属接触线总线宽为  $300\ \mu\text{m}$ )

Fig. 6 Vector distributions of electron current and hole current with (a1) (a2) one, (b1) (b2) two and (c1) (c2) four metal contact lines (total width of metal contact lines is  $300\ \mu\text{m}$ )

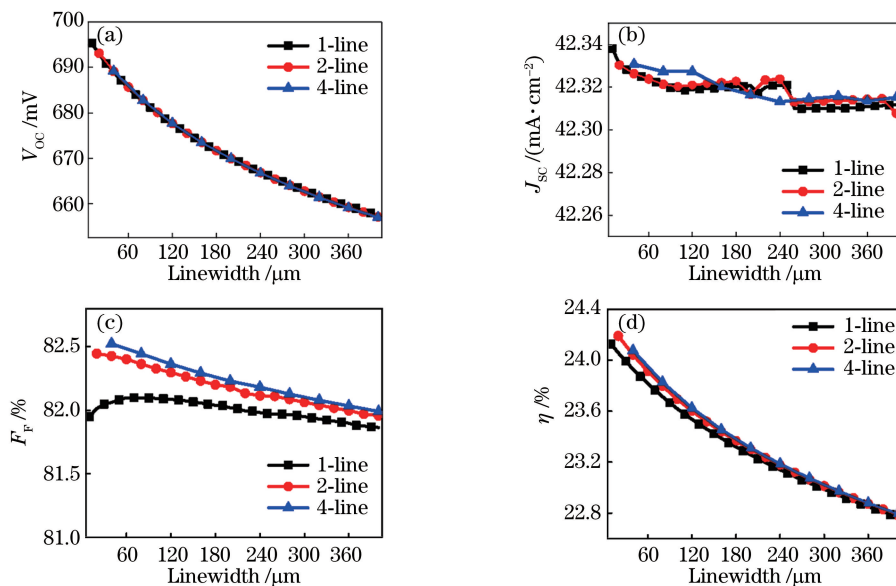


图7 发射区金属接触线数量及线宽对 IBC 太阳能电池 (a)  $V_{oc}$ , (b)  $J_{sc}$ , (c)  $F_p$  和 (d)  $\eta$  的影响

Fig. 7 Influences of metallic contact line number and linewidth in emitting region on (a)  $V_{oc}$ , (b)  $J_{sc}$ , (c)  $F_p$  and (d)  $\eta$  of IBC solar cell

## 4 结 论

利用数值模拟软件,分析了 n 型 IBC 晶硅太阳能电池中吸收层厚度、背面发射区、隔离区与背表面场面积占比、背面发射区金属接触线的数量及分布与太阳电池的  $V_{OC}$ 、 $J_{SC}$ 、 $F_F$  和  $\eta$  等电学参数的关系。吸收层厚度为  $220\ \mu\text{m}$ 、周期为  $1000\ \mu\text{m}$  时,背面发射区、隔离区和背表面场面积比为 8:1:1;发射区金属接触线为 2 条、总线宽为  $20\ \mu\text{m}$  时,IBC 电池转换效率最优值为 24.19%。由计算结果可知,减小金属/掺杂区的接触面积可以进一步提高电池转换效率。由于加工方式在图形精度上的限制,条形金属接触线的线宽难以进一步减小,可通过点状掺杂和点状接触的方式来降低接触复合损失,从而获得更高的电池转换效率。

## 参 考 文 献

- [1] Schwartz R J, Lammert M D. Silicon solar cells for high concentration applications[C]. International Electron Devices Meeting, 1975: 188896.
- [2] Lammert M D, Schwartz R J. The interdigitated back contact solar cell: A silicon solar cell for use in concentrated sunlight[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1977, 24(4): 337-342.
- [3] Masuko K, Shigematsu M, Hashiguchi T, *et al.* Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(6): 1433-1435.
- [4] Benabadji B, Zerga A. Optimal design of buried emitter of EWT silicon solar cells type by numerical simulation[J]. Energy Procedia, 2014, 44: 126-131.
- [5] Smith D D, Cousins P J, Masad A, *et al.* SunPower's Maxeon Gen III solar cell: High efficiency and energy yield[C]. Photovoltaic Specialists Conference, 2013: 14116288.
- [6] Green M A, Emery K, Hishikawa Y, *et al.* Solar cell efficiency tables (version 47)[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2016, 24(1): 3-11.
- [7] Swanson R M. Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells[C]. Photovoltaic Specialists Conference, 2005: 8478952.
- [8] Granek F. High-efficiency back-contact back-junction silicon solar cells[D]. Freiburg: Universität Freiburg, 2009.
- [9] Huang Z H, Zhang J J, Ni J, *et al.* Numerical simulation of a triple-junction thin-film solar cell based on  $\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ : H[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(9): 098803.
- [10] Granek F, Hermle M, Huljić D M, *et al.* Enhanced lateral current transport via the front  $\text{N}^+$  diffused layer of n-type high-efficiency back-junction back-contact silicon solar cells[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2009, 17(1): 47-56.
- [11] Gong C, Singh S, Robbelein J, *et al.* High efficient n-type back-junction back-contact silicon solar cells with screen-printed Al-alloyed emitter and effective emitter passivation study[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2011, 19(7): 781-786.
- [12] Chen P, Liang S W, Lee J G, *et al.* Modeling and analysis of geometry design of n-type interdigitated back-contact silicon solar cell[C]. 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Cell Conference and Exhibition, 2012: 1296-1298.
- [13] Zanucoli M, Magnone P, Sangiorgi E, *et al.* Analysis of the impact of geometrical and technological parameters on recombination losses in interdigitated back-contact solar cells[J]. Solar Energy, 2015, 116: 37-44.
- [14] Brendel R, Dreissigacker S, Harder N-P, *et al.* Theory of analyzing free energy losses in solar cells[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(17): 173503.
- [15] Greulich J, Höffler H, Würfel U, *et al.* Numerical power balance and free energy loss analysis for solar cells including optical, thermodynamic, and electrical aspects[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(20): 204504.
- [16] McIntosh K R, Baker-Finch S C. OPAL 2: Rapid optical simulation of silicon solar cells[C]. Photovoltaic Specialists Conference, 2012: 13045723.
- [17] Baker-Finch S C, McIntosh K R. Reflection of normally incident light from silicon solar cells with pyramidal texture [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2011, 19(4): 406-416.
- [18] Palik E D. Handbook of optical constants of solids[M]. New York: Academic Press, 1998: 759-763.
- [19] Fell A. A free and fast three-dimensional/two-dimensional solar cell simulator featuring conductive boundary and quasi-neutrality approximations[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(2): 733-738.

- [20] Fell A, Fong K C, McIntosh K R, *et al.* 3-D simulation of interdigitated-back-contact silicon solar cells with quokka including perimeter losses[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(4): 1040-1045.
- [21] Fell A, McIntosh K R, Abbott M, *et al.* Quokka version 2: Selective surface doping, luminescence modeling and data fitting[C]. 23<sup>rd</sup> Photovoltaic Science and Engineering Conference, 2013.
- [22] Franklin E, Fong K, McIntosh K, *et al.* Design, fabrication and characterisation of a 24.4% efficient interdigitated back contact solar cell[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2016, 24(4): 411-427.
- [23] Yang X B, Bullock J, Xu L J, *et al.* Passivated contacts to laser doped p<sup>+</sup> and n<sup>+</sup> regions[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 140: 38-44.
- [24] Fell A, Surve S, Franklin E, *et al.* Characterization of laser-doped localized p-n junctions for high efficiency silicon solar cells[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(6): 1943-1949.
- [25] Brendel R. Modeling solar cells with the dopant-diffused layers treated as conductive boundaries [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2012, 20(1): 31-43.
- [26] Pierret R F. Semiconductor device fundamentals[M]. India: Pearson Education, 1996: 83-84.