

前表面场结构参数对 IBC 太阳电池电学性能的影响^①

夏婷婷^② 周 涛

(渤海大学大学外语教研部 锦州 121000)

摘 要 利用 TCAD 半导体器件仿真软件详细地分析了前表面场(FSF)表面浓度及扩散深度对 N 型插指背接触(IBC)太阳电池电学性能的影响。分析和评价了在不同的前表面复合速率(*FSRV*)、发射区覆盖比例(*FE*)及衬底电阻率(ρ)情况下,用 FSF 结构改善 IBC 太阳电池电学性能的效果,并给出了在各种情况下优化的 FSF 结构参数。仿真结果表明:IBC 太阳电池 FSF 结构具有改善电池电学性能的作用。在不同的前表面复合速率、发射区覆盖比例及衬底电阻率情况下,前表面场结构对 IBC 太阳电池电学性能的改善效果不同。在较高的前表面复合速率情况和较低的发射区覆盖比例情况下,前表面场对电池电学性能的改善效果更加显著,对于较高的衬底电阻率情况,前表面场对电池电学性能的改善效果略优于较低的衬底电阻率情况。

关键词 背接触,太阳电池,前表面场(FSF),表面浓度,扩散深度,转换效率

0 引 言

N 型插指背接触(interdigitated back contact, IBC)太阳电池是目前转换效率最高的产业化太阳电池之一。N 型 IBC 太阳电池在光吸收、电极收集效率及电极接触特性方面的性能均优于传统 P 型前结双面接触单晶硅太阳电池,因而已成为单晶硅电池领域的研究热点^[1,2]。美国 Sunpower 公司可进行 IBC 太阳电池的大规模生产,目前产业化 IBC 电池的转换效率可达到 22%^[3]。截至目前,关于 IBC 太阳电池结构设计及工艺优化的文献报道较多。如:Carrió 等研究了在不同衬底电阻率和表面钝化效果的情况下,单元电池尺寸对背面局部点接触 IBC 单晶硅太阳电池电学性能的影响^[4],Mughal 等提出了一种制备 IBC 太阳电池的新工艺,该工艺通过在太阳能级硅衬底上采用激光刻蚀槽型接触结构降低了电池的制备成本^[5]。Li 等利用低温等离子

增强化学气相淀积和低温外延技术制备 SiO₂ 钝化层及发射区、背表面场,简化了 IBC 太阳电池的制备工艺^[6]。Zanuccoli 等研究了 IBC 太阳电池的复合损耗,深入分析了电池厚度、发射区接触孔面积以及发射区和背表面场间的钝化效果对饱和电流密度和载流子收集效率的影响^[7]。

前表面场(front surface field, FSF)是用于改善 IBC 太阳电池电学性能的一种电学增效结构。FSF 形成的 N⁺/N 高低结结构,可产生空穴势垒,对衬底中的光生少子空穴具有一定的反射作用,从而降低了光生少子空穴在电池前表面的复合损耗。提高 FSF 表面浓度及扩散深度虽有利于增强对衬底中光生少子空穴的反射作用,但同时会减小 FSF 中光生载流子扩散长度,增大 FSF 中光生载流子的复合损耗。因此,为进一步提高 IBC 太阳电池效率,必须对 FSF 结构参数进行精细的设计和优化。尽管关于 N 型 IBC 太阳电池结构设计及制备工艺研究的文献报道有很多,但是针对 FSF 结构参数优化及其

① 国家自然科学基金(11304020)资助项目。

② 女,1983 年生,硕士,实验师;研究方向:电子技术及电子产品微组装技术研究;联系人, E-mail: bhuxt@163.com (收稿日期:2017-10-09)

对 IBC 太阳能电池电学性能影响的详细分析尚报道较少。基于此,本文利用 TCAD 半导体器件仿真软件对 FSF 结构参数对 IBC 太阳能电池电学性能的影响进行了研究。首先在一定前表面复合速率(与制造工艺相关)、发射区覆盖比例(与结构设计相关)及衬底电阻率 ρ (与材料选择相关)的情况下,详细分析了 FSF 表面浓度及扩散深度对 IBC 太阳能电池短路电流密度、开路电压、填充因子及转换效率的影响。然后在不同的前表面复合速率、发射区覆盖比例及衬底电阻率情况下,针对 FSF 结构对 IBC 太阳能电池电学性能的改善效果进行分析和评价,并优化得到了不同情况下的峰值转换效率所对应的最优的 FSF 结构参数。

1 IBC 太阳能电池结构参数及物理模型选择

利用 TCAD 仿真软件建立了 IBC 太阳能电池单元结构,如图 1 所示。具体参数为^[8-10]:N 型单晶硅衬底厚度为 $180\mu\text{m}$,少子寿命为 1ms ,衬底电阻率分别选择 $2\Omega\cdot\text{cm}$ 和 $5\Omega\cdot\text{cm}$ 进行研究。电池单元宽度(相邻阳极与阴极中点之间的距离)为 $1000\mu\text{m}$ 。N 型背表面场表面浓度为 $3\times 10^{19}/\text{cm}^3$,扩散深度为 $1\mu\text{m}$,杂质分布呈高斯分布。 P^+ 发射区表面浓度 $5\times 10^{19}/\text{cm}^3$,结深为 $1\mu\text{m}$,杂质分布呈高斯分布。发射区与背表面场间隔为 $50\mu\text{m}$ 。IBC 太阳能电池发射区覆盖比例分别选择 50% (发射区半宽度 $W_E = 500\mu\text{m}$) 和 80% (发射区半宽度 $W_E = 800\mu\text{m}$) 进行研究。阴极和阳极接触孔半宽度均为 $20\mu\text{m}$ 。N 型

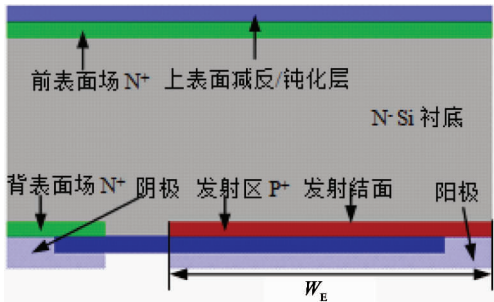


图 1 IBC 太阳能电池单元结构

前表面场表面掺杂浓度为变量,变化范围为 $1\times 10^{17} \sim 1\times 10^{19}/\text{cm}^3$,扩散深度为变量,变化范围为 $0 \sim 2\mu\text{m}$,杂质分布呈高斯分布。IBC 太阳能电池上表面采用 Si_3N_4 钝化-减反射膜, Si_3N_4 厚度为 79nm 。在仿真过程中假设金属电极的接触电阻为 0。电池前表面复合速率分别选择 100cm/s 和 $1\times 10^4\text{cm/s}$ 进行研究,背面非金属接触区表面复合速率为 $1\times 10^3\text{cm/s}$,金属电极接触区域表面复合速率为 $1\times 10^7\text{cm/s}$ 。

载流子迁移率和复合率是影响载流子运输的两个重要参数,其物理模型选择对仿真结果影响较大。迁移率模型考虑了与掺杂浓度相关的迁移率模型和与平行电场相关的迁移率模型。载流子迁移率与温度、掺杂浓度之间的关系可表示为^[11,12]:

$$\mu_{n1} = 55.24 + \frac{1429.23\left(\frac{T_L}{300}\right)^{-2.3} - 55.24}{1 + \left(\frac{T_L}{300}\right)^{-3.8} \cdot \left(\frac{N}{1.072 \times 10^{17}}\right)^{0.73}} \quad (1)$$

$$\mu_{p1} = 49.7 + \frac{479.37\left(\frac{T_L}{300}\right)^{-2.2} - 49.7}{1 + \left(\frac{T_L}{300}\right)^{-3.7} \cdot \left(\frac{N}{1.072 \times 10^{17}}\right)^{0.7}} \quad (2)$$

式中, N 为半导体材料掺杂浓度, T_L 是晶格温度。

载流子迁移率与横向电场之间的关系可表示为^[11,12]:

$$\mu_{n2} = 1000\left(\frac{T_L}{300}\right)^{-1.5} \left[1/1 + \left(\frac{1000\left(\frac{T_L}{300}\right)^{-1.5} \cdot E}{1.03 \times 10^7} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\mu_{p2} = 500\left(\frac{T_L}{300}\right)^{-1.5} \left[1/1 + \left(\frac{500\left(\frac{T_L}{300}\right)^{-1.5} \cdot E}{1.03 \times 10^7} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

复合模型考虑了与掺杂浓度相关的 SRH (Shockley-Read-Hall) 复合和俄歇复合。少子寿命与掺杂浓度相关的 SRH 复合模型的表达式为^[13-15]:

$$R_{\text{SRH}} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p \left[n + n_i \exp\left(\frac{ET_{\text{RAP}}}{kT_L}\right) \right] + \tau_n \left[p + n_i \exp\left(\frac{-ET_{\text{RAP}}}{kT_L}\right) \right]} \quad (5)$$

式中, n 为电子浓度, p 为空穴浓度, n_i 为本征载流子浓度。ETRAP 是本征费米能级与复合中心能级之差。与掺杂浓度有关的电子寿命 τ_n 和 τ_p 表示为:

$$\tau_n = \frac{\tau_{n0}}{1 + \frac{N}{5 \times 10^{16}}} \quad (6)$$

$$\tau_p = \frac{\tau_{p0}}{1 + \frac{N}{5 \times 10^{16}}} \quad (7)$$

式中: N 是掺杂浓度, τ_{n0} 和 τ_{p0} 分别是 300K 时无掺杂半导体中的电子寿命和空穴寿命。

俄歇复合模型的表达式为^[13-15]:

$$R_{AUGER} = 8.3 \times 10^{-32} (pn^2 - nn_i^2) + 1.8 \times 10^{-31} (np^2 - pn_i^2) \quad (8)$$

另外还考虑了重掺杂引起的禁带变窄 (band-

gap narrowing, BGN) 效应和能带简并效应 (FERMI)。

2 仿真结果与分析

图 2 为仿真得到的当 IBC 太阳能电池前表面复合速率 (front surface recombination velocity, FSRV) 为 100cm/s, 发射区覆盖比例 (FE) 为 80% 且衬底电阻率 (ρ) 为 $2\Omega \cdot \text{cm}$ 时, 前表面场 (FSF) 表面浓度 (C_{FSF}) 及扩散深度 (d_{FSF}) 对 IBC 太阳能电池电学性能的影响。模拟测试条件选择地面用太阳能电池标准的测试条件, 即: 环境温度 25℃, AM1.5G 光谱 (地面用光谱), 入射光垂直电池上表面入射, 光强为 $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ 。

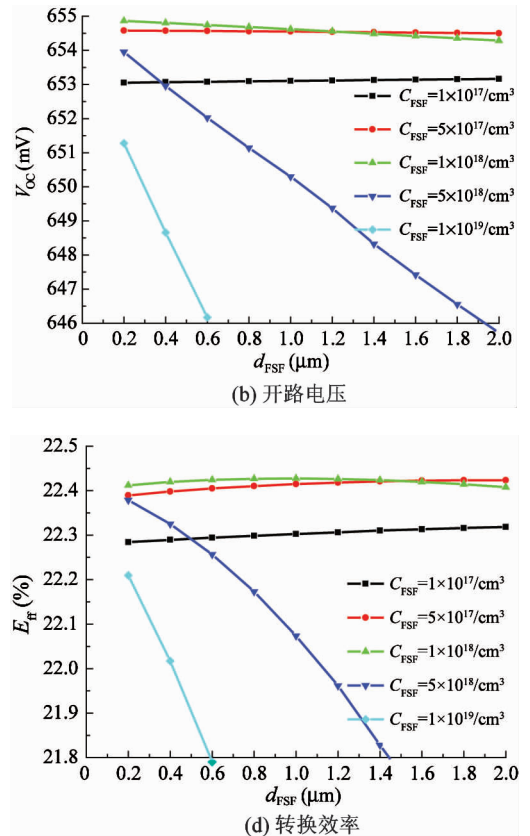
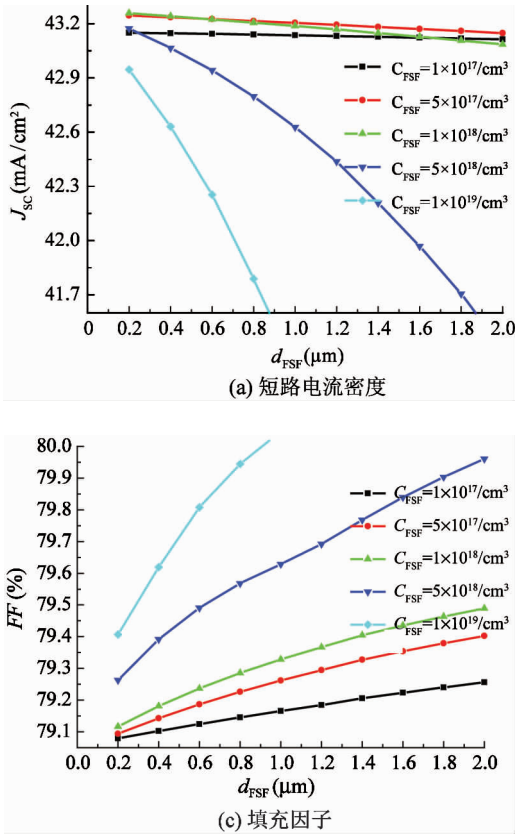


图 2 前表面场结构对 IBC 太阳能电池电学性能的影响

由图 2(a) 可见: 当 C_{FSF} 一定时, 随着 d_{FSF} 的增大, IBC 太阳能电池短路电流密度 (J_{sc}) 随之降低。 C_{FSF} 越高, FSF 中光生载流子 SRH 复合损耗越大, 随着 d_{FSF} 的增大, J_{sc} 降低越显著。当 C_{FSF} 较低 ($C_{\text{FSF}} \leq$

$5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$) 时, 相比于 FSF 高低结对衬底中光生少子空穴的反射作用, FSF 内部光生载流子的复合损耗对 J_{sc} 的影响较小。因此, d_{FSF} 在 $0.2 \sim 2\mu\text{m}$ 范围内, C_{FSF} 越高, 高低结对少子空穴的反射作用越显

著, J_{SC} 越高。当 C_{FSF} 增大到 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 时, FSF 内部光生载流子的复合损耗对 J_{SC} 的影响增大。当 $d_{FSF} < 0.5 \mu\text{m}$ 时, FSF 对光生少子空穴的反射作用对电池 J_{SC} 的影响起主要作用。而随着 d_{FSF} 的进一步增大, 光生载流子的复合损耗成为影响 J_{SC} 的主要因素。当 C_{FSF} 进一步增大 ($C_{FSF} > 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$) 时, 光生载流子在 FSF 内部的复合损耗较严重, 随着 d_{FSF} 的增大, J_{SC} 显著降低。

由图 2(b) 可见: 当 C_{FSF} 较低 ($C_{FSF} = 1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$) 时, 随着 d_{FSF} 的增大, IBC 太阳能电池开路电压 (V_{OC}) 随之略有增大。而当 $C_{FSF} \geq 5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 时, 随着 d_{FSF} 的增大, V_{OC} 随之降低, C_{FSF} 越大, V_{OC} 降低越显著。原因为: 太阳能电池 V_{OC} 可表示为^[16]:

$$V_{OC} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (9)$$

式中, I_0 为太阳能电池反向饱和电流; I_L 为太阳能电池光生电流; n 为与发射区掺杂浓度相关的常数。由式 (9) 可知, V_{OC} 主要由光生电流与反向饱和电流的比值决定, I_L/I_0 越大, V_{OC} 越大。IBC 太阳能电池反向饱和电流由发射区少子电子饱和电流 I_{0n} 和衬底少子空穴饱和电流 I_{0p} 构成, 当衬底和发射区结构参数不变时, IBC 太阳能电池反向饱和电流不变。当 C_{FSF} 较低 ($C_{FSF} = 1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$) 时, 其内部光生载流子复合损耗较小。而随着 d_{FSF} 的增大, 在一定程度上增强了对衬底少子空穴的反射作用, 提高了光生电流 I_L , 因此, 当 $C_{FSF} = 1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 时, 随着 d_{FSF} 的增大, V_{OC} 略有增大。而当 $C_{FSF} \geq 5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 时, FSF 内部光生载流子的复合损耗增大, 随着 d_{FSF} 的增大, 光生电流降低, V_{OC} 随之降低。

由图 2(c) 可见: 当 d_{FSF} 一定时, 随着 C_{FSF} 的增大, IBC 太阳能电池填充因子 (FF) 随之增大。当 C_{FSF} 一定时, 随着 d_{FSF} 的增大, FF 随之增大。 C_{FSF} 越高, 随着 d_{FSF} 的增大, FF 增大越显著。原因是填充因子 FF 主要与太阳能电池的串联电阻损耗有关^[16], 串联电阻损耗越大, 填充因子越小。对于较大面积的单元 IBC 太阳能电池, 产生于电池上表面的光生载流子需要传输较长距离才能到达电池背面被收集, 由光生载流子传输引起的串联电阻损耗较大。FSF 结构可视为光生载流子的低阻导电通道。光生载流子可

先经低阻 FSF 水平传输, 然后再垂直传输至电池背面被收集。因此, FSF 结构可显著降低光生载流子在高阻电池体区中的传输距离, 从而降低由光生载流子传输引起的串联电阻损失。 C_{FSF} 越高, d_{FSF} 越深, 所形成的光生载流子传输通道电导率越高、横截面积越大, 串联电阻损失越小, FF 越大。

太阳能电池转换效率 (E_{ff}) 可表示为^[16]:

$$E_{ff} = \frac{J_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{P_{in}} \quad (10)$$

其中: P_{in} 为光强。IBC 太阳能电池的短路电流密度、开路电压和填充因子的乘积越大, 电池转换效率越高。由图 2(d) 可见: 当 C_{FSF} 较低 ($C_{FSF} \leq 5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$) 时, d_{FSF} 在 $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 范围内, 随着 d_{FSF} 的增大, E_{ff} 随之增大。当 C_{FSF} 增大到 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 时, 随着 d_{FSF} 的增大, E_{ff} 呈现先增大后减小的变化特点。当 C_{FSF} 进一步增大 ($C_{FSF} \geq 5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) 时, 随着 d_{FSF} 的增大, E_{ff} 随之降低。 C_{FSF} 越高, E_{ff} 随 d_{FSF} 的增大降低越显著。当 C_{FSF} 在 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3 \sim 1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 内变化时, E_{ff} 均在 22.38% 以上。峰值转换效率为 22.43%, 对应的 C_{FSF} 为 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, d_{FSF} 为 $1 \mu\text{m}$ 。

通过分别改变 $FSRV$ 、 FE 及 ρ , 针对 FSF 对 IBC 太阳能电池电学性能的改善效果进行分析。模拟测试条件选择地面用太阳能电池标准的测试条件。

图 3(a) 为仿真得到的当前表面钝化效果较差 ($FSRV = 1 \times 10^4 \text{cm/s}$) 时, C_{FSF} 及 d_{FSF} 对 IBC 太阳能电池 E_{ff} 的影响。由图 3(a) 可见: 由于较高的 $FSRV$ 显著增大了光生载流子在电池上表面的复合损耗, 因此, 与图 2(d) 相比, E_{ff} 较低。当 C_{FSF} 较高 ($C_{FSF} \geq 5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) 且 d_{FSF} 较浅 ($d_{FSF} \leq 0.2 \mu\text{m}$) 时, E_{ff} 较高, 峰值 E_{ff} 对应的前表面场 $C_{FSF} = 1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, $d_{FSF} = 0.2 \mu\text{m}$ 。原因为: 当 $FSRV$ 较高时, 需在一定程度上增大 C_{FSF} , 从而增强对衬底中光生少子空穴的反射作用, 降低光生少子空穴在电池上表面的复合损耗。当 C_{FSF} 较高时, d_{FSF} 越大, 前表面场中复合损耗掉的光生载流子数量越多, E_{ff} 越低。因此, 当前表面复合速率较高时, 峰值 E_{ff} 对应的 C_{FSF} 较高且 d_{FSF} 较小。图 3(b) 为仿真得到的当 IBC 太阳能电池发射区覆盖比例较低 ($FE = 50\%$) 时, C_{FSF} 及 d_{FSF} 对电池 E_{ff} 的影响。由图 3(b) 可见: 当 FE 降低到 50% 时, E_{ff} 降低,

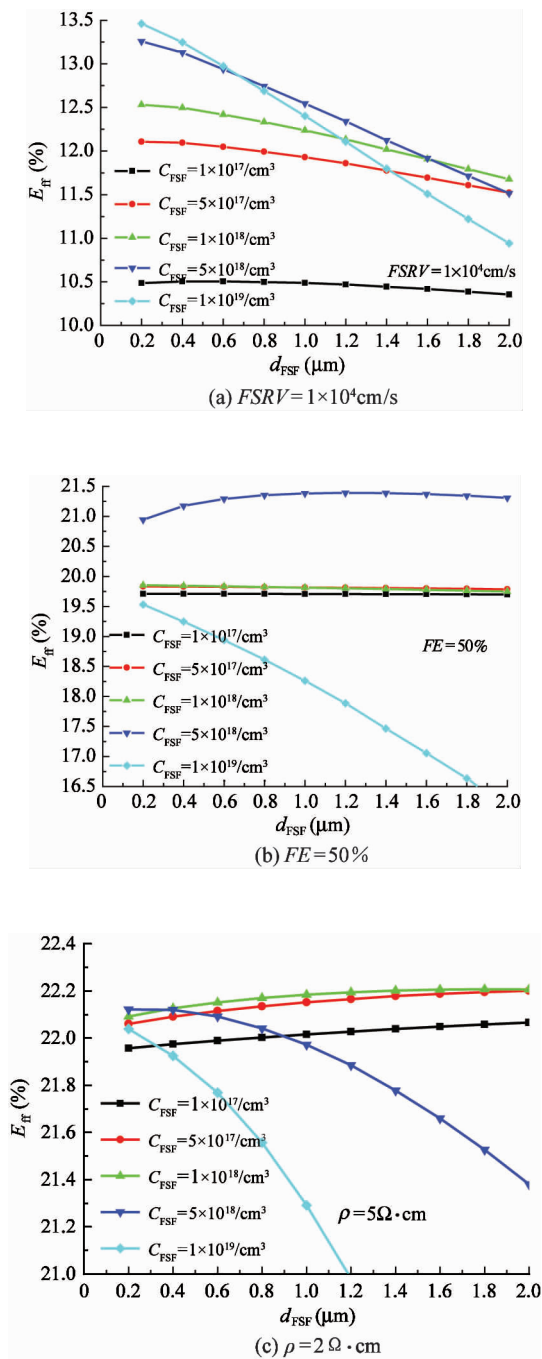


图3 前表面场结构对 IBC 太阳能电池转换效率的影响

最优的 C_{FSF} 和 d_{FSF} 均增大,最优的 C_{FSF} 为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 最优的 d_{FSF} 为 $1.2 \mu\text{m}$ 。原因:当 FE 减小时, J_{sc} 显著降低,从而制约了 E_{ff} 的提高。随着 FE 减小,背表面上方光生载流子的数量占光生载流子总数量的比例增大。相比于发射结上方的光生载流子,背表面上方的光生载流子需要扩散输运更长的距离才能到达发射结空间电荷区边缘,因此该部分光生载流子的复合损耗较大,不利于 E_{ff} 的提高。增大 C_{FSF} 和

d_{FSF} , 可增强前表面场对衬底中光生少子空穴的反射能力,并压缩了光生少子空穴在电池衬底纵向的扩展区域,有利于背表面上方光生载流子的输运和收集。但增大 C_{FSF} 会增大光生载流子在 FSF 内部的复合损耗,因此,与图 2(d) 对比,当 FE 减小到 50% 时,最优的 C_{FSF} 和 d_{FSF} 仅在一定程度上有所增大。图 3(c) 为仿真得到的当 IBC 太阳能电池衬底电阻率较高 ($\rho = 5 \Omega \cdot \text{cm}$) 时, C_{FSF} 及 d_{FSF} 对 E_{ff} 的影响。由图 3(c) 可见:当 $C_{FSF} \leq 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,随着 d_{FSF} 的增大, E_{ff} 随之略有增大。峰值 E_{ff} 对应的 C_{FSF} 为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, d_{FSF} 为 $1.8 \mu\text{m}$ 。当 C_{FSF} 增大到 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 在较浅的扩散深度范围内 ($d_{FSF} < 0.6 \mu\text{m}$), E_{ff} 仍较高。原因:当 ρ 增大时,电池衬底中光生载流子的复合损耗降低, J_{sc} 增大。但随着 ρ 增大,电池体区等效串联电阻增大,从而导致电池串联电阻损耗显著增大, FF 降低。当 C_{FSF} 较低 ($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 且 d_{FSF} 较深 ($1.8 \mu\text{m}$) 时,不仅不会明显增大前表面场中光生载流子的复合损耗,而且可为光生载流子的输运提供有效的低阻通路。

表 1 为仿真得到的在不同的 $FSRV$ 、 FE 及 ρ 情况下,采用 FSF 结构参数前后, IBC 太阳能电池电学参

表 1 不同 $FSRV$ 、 FE 及 ρ 况下,前表面场对 IBC 太阳能电池电学性能的影响

$FSRV = 100 \text{ cm/s}, FE = 80\%, \rho = 2 \Omega \cdot \text{cm}$				
电参数	$J_{sc} (\text{mA/cm}^2)$	$V_{oc} (\text{mV})$	$FF (\%)$	$E_{ff} (\%)$
无 FSF	38.49	632.41	78.60	19.13
采用 FSF	43.18	654.61	79.32	22.42
$FSRV = 1 \times 10^4 \text{ cm/s}, FE = 80\%, \rho = 2 \Omega \cdot \text{cm}$				
电参数	$J_{sc} (\text{mA/cm}^2)$	$V_{oc} (\text{mV})$	$FF (\%)$	$E_{ff} (\%)$
无 FSF	5.40	513.81	79.89	2.21
采用 FSF	29.46	573.31	79.68	13.46
$FE = 50\%, FSRV = 100 \text{ cm/s}, \rho = 2 \Omega \cdot \text{cm}$				
电参数	$J_{sc} (\text{mA/cm}^2)$	$V_{oc} (\text{mV})$	$FF (\%)$	$E_{ff} (\%)$
无 FSF	31.86	630.66	79.87	16.05
采用 FSF	36.88	646.07	80.56	21.39
$\rho = 5 \Omega \cdot \text{cm}, FSRV = 100 \text{ cm/s}, FE = 80\%$				
电参数	$J_{sc} (\text{mA/cm}^2)$	$V_{oc} (\text{mV})$	$FF (\%)$	$E_{ff} (\%)$
无 FSF	39.95	630.33	74.80	18.83
FSF	43.91	653.62	77.36	22.20

数的变化。由表 1 可见,当 $FSRV$ 由 100cm/s 增大到 $1 \times 10^4\text{cm/s}$ 时,对于无 FSF 的情况,除 FF (J_{sc} 显著降低,导致串联电阻功率损耗减小) 外,其余各电学参数均显著降低, E_{ff} 由 19.13% 降低到 2.21% 。在不同的 $FSRV$ 情况下采用优化的 FSF 结构, E_{ff} 分别增长 17.19% 和 506.77% 。由此可见,在 $FSRV$ 较高情况下,FSF 大大降低了光生载流子在前表面的复合损耗 (J_{sc} 增大 445.23%),对 IBC 太阳电池电学性能的改善效果更加显著。当 FE 由 80% 减小到 50% 时,对于无 FSF 的情况,除 FF 外,其余各电学参数均明显减小, E_{ff} 由 19.13% 降低到 16.05% 。在不同的 FE 情况下采用优化的 FSF 结构, E_{ff} 分别增长 17.19% 和 33.26% 。由此可见,在 FE 较低情况下,FSF 结构有利于光生载流子的输运和收集,对电池电学性能的改善效果更加显著。当 ρ 由 $2\Omega \cdot \text{cm}$ 增大到 $5\Omega \cdot \text{cm}$ 时,对于无 FSF 的情况,除 J_{sc} 外,其余各电学参数均有小幅度的降低,电池 E_{ff} 由 19.13%

降低到 18.83% 。在不同 ρ 情况下采用优化的 FSF 结构, E_{ff} 分别增长 17.19% 和 17.88% 。由此可见,对于不同衬底电阻率情况,FSF 结构在改善电池电学性能方面的差别较小,可在一定程度上提高电池转换效率。在 ρ 较高的情况下,FSF 结构通过在电池内部为光生载流子提供有效的低阻通路,使得电池 FF 增大 3.42% (在较低的 ρ 情况下, FF 增大 0.93%)。综上所述,在不同的 $FSRV$ 、 FE 及 ρ 情况下,FSF 对 IBC 太阳电池电学性能的改善效果不同,峰值转换效率对应的 C_{FSF} 和 d_{FSF} 不同。

为全面评价 FSF 在改善 IBC 太阳电池电学性能方面的作用,需要考虑不同的测试条件。图 4 为仿真得到的在不同的测试条件下,FSF 对 IBC 太阳电池电学性能的影响 ($FSRV = 100\text{cm/s}$, $FE = 80\%$, $\rho = 2\Omega \cdot \text{cm}$, $C_{FSF} = 1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, $d_{FSF} = 1\mu\text{m}$)。由图 4(a) 可见,当环境温度为 25°C (300K)、光强为 $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ 及光入射角度为 90° (垂直入射) 时,在 AM0

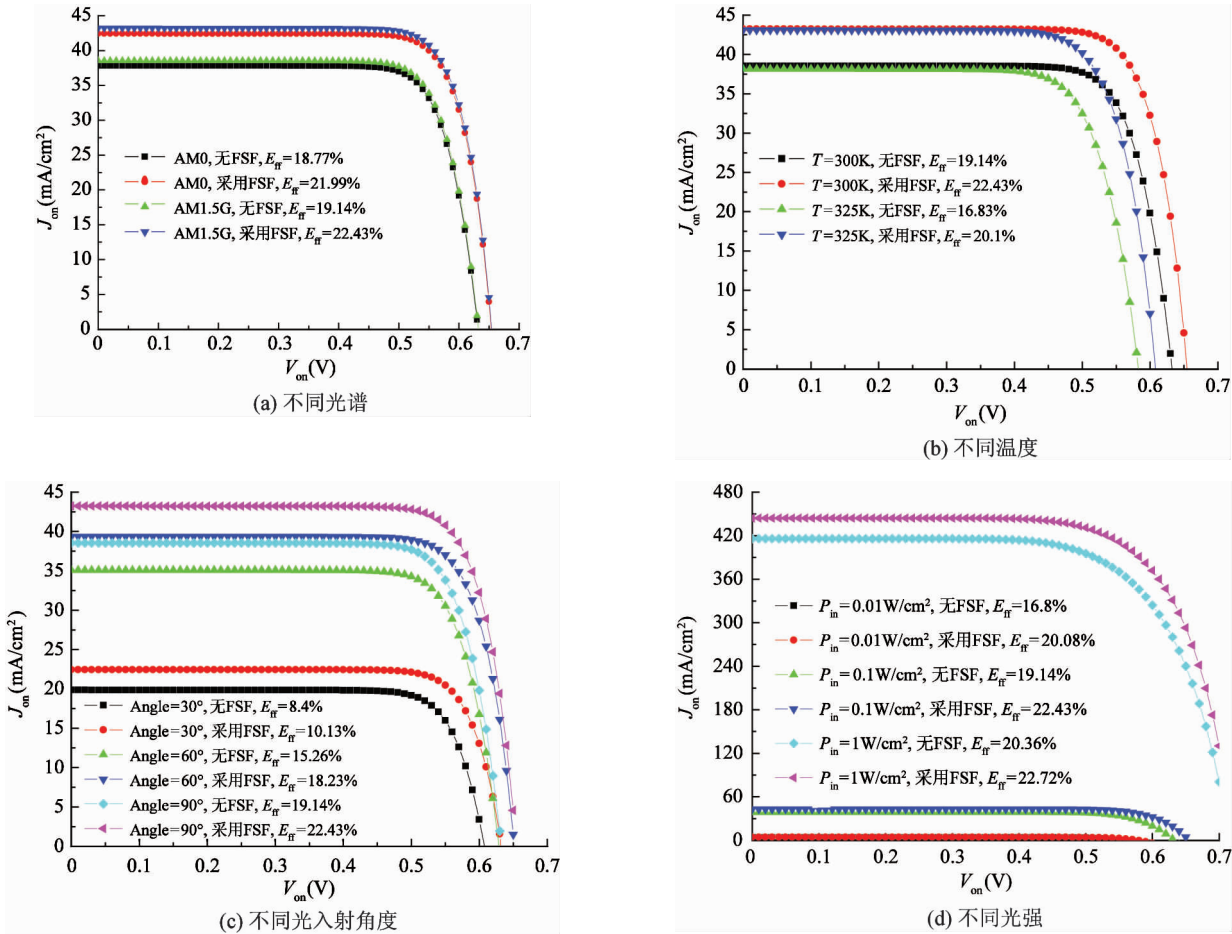


图 4 在不同测试条件下,前表面场结构对 IBC 太阳电池输出特性的影响

(太空用光谱)和 AM1.5G(地面用光谱)两种光谱条件下,FSF 均可显著地改善 IBC 太阳能电池短路电流密度、开路电压及转换效率。由图 4(b)可见,当光谱为 AM1.5G,光强为 $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ 及光入射角度为 90° 时,在 300K 和 325K 两种环境温度下,FSF 均可显著地改善 IBC 太阳能电池短路电流密度、开路电压及转换效率。随着环境温度的升高,开路电压和转换效率降低较明显。由图 4(c)可见,当环境温度为 25°C ,光谱为 AM1.5G 及光强为 $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ 时,在 30° 、 60° 及 90° 三种不同光入射角度情况下,FSF 可显著改善 IBC 太阳能电池转换效率,在光入射角度较小时,FSF 对短路电流密度和开路电压均有明显的改善效果。光垂直入射时,电池转换效率最高。由图 4(d)可见,当环境温度为 25°C ,光谱为 AM1.5G 及光入射角度为 90° 时,在不同光强情况下,FSF 均可改善 IBC 太阳能电池短路电流密度、开路电压及转换效率。光强越小,FSF 对电池转换效率的改善效果越显著。综上可知,在不同的测试条件下,FSF 均具有提高 IBC 太阳能电池电学性能的作用。

3 结 论

本文利用 TCAD 半导体器件仿真软件对 FSF 结构参数对 IBC 太阳能电池电学性能的影响进行了深入研究。首先在一定前表面复合速率、发射区覆盖比例及衬底电阻率的情况下,全面分析了 FSF 表面浓度及扩散深度对 IBC 太阳能电池短路电流密度、开路电压、填充因子及转换效率的影响。然后围绕与工艺制备相关的前表面复合速率、与结构设计相关的发射区覆盖比例及与材料选择相关的衬底电阻率三个关键参数,针对前 FSF 结构对 IBC 太阳能电池电学性能的改善效果进行分析和评价,并优化得到不同情况下的峰值转换效率所对应的前表面场表面浓度和扩散深度。本文仿真结果可为 IBC 太阳能电池结构参数设计及工艺制备提供一定的参考信息。

参考文献

[1] Batoul B, Abdellatif Z. Optimal design of buried emitter of EWT silicon solar cells type by numerical simulation [J]. *Energy Procedia*, 2014 (44): 126-131

[2] Giuseppe G, Valentin D, Razvan R, et al. Large-area back-contact back-junction solar cell with efficiency exceeding 21% [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2013, 3 (1): 560-565

[3] Green M A, Emery K, Hishikawa Y, et al. Solar cell efficiency tables (version 44) [J]. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 2014, 22(7): 701-710

[4] Carrió D, Ortega P, Martín I, et al. Rear contact pattern optimization based on 3D simulations for IBC solar cells with point-like doped contacts [J]. *Energy Procedia*, 2014, 55: 47-52

[5] Mughal W J, Mughal H A, Laffoley A G, et al. HELICS cell: Laser-cut grooves to create a high-efficiency, low-cost IBC solar cell [C]. In: *Proceedings of the Photovoltaic Specialist Conference*, Denver, USA, 2014. 2514-2518

[6] Li Y, Recaman-Payo M, Zielinski B, et al. Process simplification and improvement of rear side of IBC cells by means of PECVD SiO_x and epitaxy [C]. In: *Proceedings of the European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Hamburg, Germany, 2015. 466-469

[7] Zanuccoli 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

[8] Renshaw J, Rohatgi A. Device optimization for screen printed interdigitated back contact solar cells [C]. In: *Proceedings of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle, USA, 2011. 2924-2927

[9] Padilla M, Hoffler H, Reichel C, et al. Surface recombination parameters of interdigitated-back-contact silicon solar cells obtained by modeling luminescence images [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2014, 120 (1): 363-375

[10] Franklin E, Fong K, McIntosh K, et al. Design, fabrication and characterisation of a 24.4% efficient interdigitated back contact solar cell [C]. In: *Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Amsterdam, Netherlands, 2014. 2556-2572

[11] Caughey D M, Thomas R E. Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1967, 55 (12): 2192-2193

[12] Selberherr S. Process and device modeling for VLSI [J].

Microelectronics Reliability, 1984, 24(2):225-257

[13] Shockley W, Read W T. Statistics of the recombinations of holes and electrons[J]. *Physical Review*, 1952, 87(5):835-842

[14] Hall R N. Electron-hole recombination in germanium[J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1953, 24(1):

221-229

[15] Dzierwior J, Schmid W. Auger coefficients for highly doped and highly excited silicon[J]. *Applied Physics Letters*, 1977, 31(5):346-348

[16] 熊绍珍,朱美芳. 太阳能电池基础与应用[M]. 北京: 科学出版社,2009. 95-98

Influences of front surface field structural parametrs on IBC solar cells’ electrical performance

Xia Tingting, Zhou Tao
(Teaching and Research Institute of Foreign Languages , Bohai University, Jinzhou 121000)

Abstract

The influences of front surface field (FSF) ’s surface concentration and diffusion depth on N-type interdigitated back contact (IBC) mono-crystalline silicon solar cells’ electrical properties are studied in detail by using the TCAD semiconductor device simulation software. The effect of improving IBC solar cells’ electrical properties by using FSF structures is analyzed and evaluated under different conditions of surface recombination rate, emitter area coverage ratio and substrate resistivity, and the optimal FSF structural parameters are given under different conditions. The simulation results show that IBC solar cells’ FSF structure improves solar cells’ electrical performance. The effect of FSF structure’ s improving IBC solar cells’ electrical properties is different under different surface recombination rate, emitter area coverage ratio and substrate resistivity. The improvement effect is more significant under higher front surface recombination rate and lower emitter area coverage ratio. Under the lower substrate resistivity, the effect of improvement of front surface field structure on the electrical propertie is slightly better than that under higher substrate resistivity.

Key words: back contact, solar cell, front surface field (FSF), surface concentration, diffusion depth, conversion efficiency