

T 型发射区单晶硅太阳能电池的输出特性研究^①

周 涛^② 陆晓东 吴元庆 李 媛

(渤海大学新能源学院 锦州 121000)

摘 要 利用 TCAD 半导体器件仿真软件对具有 T 型发射区结构的单晶硅太阳能电池进行了仿真研究。全面系统地分析了在不同衬底少子寿命情况下,不同 T 型发射区深度对太阳能电池外量子效率、短路电流密度、开路电压、填充因子及转换效率的影响。仿真结果表明:采用 T 型发射区结构可在一定程度上提高常规均匀发射区太阳能电池的电学性能;T 型发射区结构对 700 ~ 1200nm 长波段入射光的外量子效率具有明显的改善作用;当衬底少子寿命一定时,太阳能电池短路电流密度、填充因子均随 T 型发射区深度的增大而增大,而开路电压随 T 型发射区深度的增大而减小;当 T 型发射区深度大于 80 μm 时,对于低衬底少子寿命的单晶硅太阳能电池,T 型发射区结构对其转换效率的改善效果最为显著。

关键词 单晶硅, 太阳能电池, 发射区, 深度, 少子寿命, 转换效率, 量子效率

0 引 言

提高太阳能电池转换效率是长期以来人们一直努力解决的问题^[1,2]。目前,市场上销售的太阳能电池大部分是单晶硅和多晶硅太阳能电池,产业化 P 型单晶硅太阳能电池的最高转换效率已经达到 20.3%^[2],如果想进一步提高单晶硅太阳能电池的转换效率,必须对单晶硅太阳能电池的结构参数和工艺条件进行精细的设计和优化^[3-10]。由于发射区结构参数对单晶硅太阳能电池的光生载流子复合损耗及串联电阻损耗均具有较大的影响,因而从理论上深入研究发射区结构参数对太阳能电池输出特性的影响,对提高电池转换效率具有重要意义。

目前在晶硅太阳能电池研究领域广泛使用的模拟软件(如 PC1D、AMPS1D 等)只能对太阳能电池进行一维器件仿真,无法对选择性发射极电池、背接触太阳能电池、金属环绕穿通电池、发射极环绕穿通电池等复杂结构的高效电池进行精确仿真。在半导体器件研究领域广泛应用的计算机辅助设计(technology

computer aided design, TCAD)仿真软件具有物理模型准确且针对性好、器件结构设定精细等优点^[3],已经越来越多地应用于晶硅太阳能电池工艺和器件性能的仿真研究。本文利用 TCAD 半导体器件仿真软件对一种较为新颖的 T 型发射区单晶硅太阳能电池结构进行了仿真研究。T 型发射区单晶硅太阳能电池结构与选择性发射极太阳能电池相似。目前,关于该特殊发射区结构太阳能电池的研究鲜见报道。本文通过 T 型发射区太阳能电池与常规均匀发射区太阳能电池输出特性的对比,全面系统地分析了在不同衬底少子寿命情况下,不同 T 型发射区深度对单晶硅太阳能电池外量子效率、短路电流密度、开路电压、填充因子及转换效率的影响。本文仿真结果可为单晶硅太阳能电池结构设计及优化提供有意义的参考信息。

1 T 型发射区单晶硅太阳能电池结构的计算模型及参数选择

产业化 $\text{N}^+ - \text{P} - \text{P}^+$ 型单晶硅太阳能电池的一维短路电流可表示为^[11]

① 国家自然科学基金(11304020)资助项目。
② 男,1983 年生,硕士,讲师;研究方向:晶硅太阳能电池和功率半导体器件相关技术方面的研究;联系人,E-mail: bhuzhoutao@163.com (收稿日期:2015-12-14)

$$I_{SCp} = qA_E D_p \left[\frac{\Delta p'(-x_n) T_{p1} - S_F \Delta p'(-W_n) + D_p \frac{d\Delta p'}{dx} \Big|_{x=-W_n}}{L_p T_{p2}} - \frac{d\Delta p'}{dx} \Big|_{x=-x_n} \right] \quad (1)$$

$$I_{SCn} = qA_E D_n \left[\frac{\Delta n'(x_p) T_{n1} - S_B \Delta n'(W_p) + D_p \frac{d\Delta n'}{dx} \Big|_{x=W_p}}{L_n T_{n2}} - \frac{d\Delta n'}{dx} \Big|_{x=x_p} \right] \quad (2)$$

式中, I_{SCp} 表示 N^+ 发射区中少子空穴的短路电流, I_{SCn} 表示 P 型衬底中少子电子的短路电流。 A_E 表示发射结面积。 L_p 和 L_n 分别表示发射区和衬底中的少子扩散长度, D_p 和 D_n 分别表示发射区和基区中的少子扩散系数。 S_F 和 S_B 分别表示上、下表面复合速率。 x_n 表示发射结空间电荷区在发射区一侧的展宽, x_p 表示发射结空间电荷区在衬底一侧的展宽。 W_n 为发射结结深, W_p 为衬底厚度。其余参数在分析过程中可认为是常量。太阳电池总的短路电流 I_{SC} 为 I_{SCn} 与 I_{SCp} 两者之和。由式(1)、(2)可见, 电池短路电流与发射结面积成正比, 因此, 为增大短路电流, 可提高太阳电池的发射结面积。

太阳电池开路电压 V_{OC} 可表示为^[11]

$$V_{OC} = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (3)$$

$$I_{0n} = qA_E \frac{n_i^2}{N_E} \frac{D_n}{(W_p - x_p)} \frac{S_B}{S_B + D_n/(W_p - x_p)} \quad (4)$$

$$I_{0p} = qA_E \frac{n_i^2}{N_B} \frac{D_p}{(W_n - x_n)} \frac{S_F}{S_B + D_p/(W_n - x_n)} \quad (5)$$

式中, I_0 为太阳电池反向饱和电流。 I_L 为太阳电池光生电流。 n 为与发射区掺杂浓度相关的常数。 I_{0n} 为 P 型衬底中少子饱和电流, I_{0p} 为 N^+ 发射区中少子饱和电流。太阳电池总的反向饱和电流为 I_{0n} 与 I_{0p} 两者之和。由式(3)可知, 电池开路电压受到电池的反向饱和电流影响, 反向饱和电流越大, 电池开路电压越小。由式(4)和式(5)可见, 发射结面积 A_E 越大, 电池反向饱和电流越大。因此, 增大发射结面积, 会对电池开路电压产生不利影响。

T 型发射区单晶硅太阳电池的二维结构如图 1 所示。为了使仿真结果具有实际参考意义, T 型发射区单晶硅太阳电池制备工艺应与产业化低成本太阳电池工艺(如热扩散工艺、丝网印刷工艺等)兼

容。电池结构参数如下^[2-6,12,13]: 单元电池(栅电极中点到相邻的发射区中点)尺寸为 $1000\mu\text{m}$; 为降低电池上表面入射光的反射损耗, 电池上表面采用金字塔绒面结构和氮化硅单层减反射膜。金字塔绒面高为 $3\mu\text{m}$, 金字塔侧面与底面夹角为 54.7° , 减反射膜厚度为 79nm , 中心波长(550nm)折射率为 2.05。为降低电池背表面复合速率, 同时提高光生载流子的收集效率, 在太阳电池中采用背表面场(P^+)结构。背表面场表面峰值浓度为 $8.15 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 扩散深度为 $3.6\mu\text{m}$, 背表面复合速度为 $9 \times 10^4 \text{cm/s}$; 为保证电池片的机械强度及长波段入射光的吸收效果, 基片采用厚度为 $170\mu\text{m}$ 的 P 型单晶硅片, 掺杂浓度为 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$, 少子寿命为变量, 变化范围为 $10 \sim 1000\mu\text{s}$ 。综合考虑栅线电极—发射区的接触电阻及电池的短波响应, 发射区(N^+)表面浓度为 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, 结深为 $0.3\mu\text{m}$ 。借鉴产业化选择性发射极太阳电池结构及制备工艺, 将 T 型发射区设置于细栅电极正下方。T 型发射区半宽度为 $0.3\mu\text{m}$, 深度(d_e)为变量, 变化范围为 $0 \sim 160\mu\text{m}$ 。栅电极半宽度为 $30\mu\text{m}$; 金属电极-发射区接触电阻率(ρ_c)与发射区表面浓度有关^[11], ρ_c 值取为 $4.63 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。假设外部并联电导为 0S。电池非金属接触区表面复合速率与减反射膜的钝化效果直接相关^[12], 电池非金属接触区表面复合速率为 $1.5 \times 10^3 \text{cm/s}$ 。前表面电极与硅接触区域假设其复合速度为 $1 \times 10^7 \text{cm/s}$ 。在器件仿真过程中, 物理模型选择漂移-扩散模型, 该模型由泊松方程及电子空穴的连续性方程组成。载流子复合模型采用与掺杂浓度相关的俄歇复合模型和 Shockley-Read-Hall 复合模型。迁移率模型采用与掺杂浓度相关的迁移率模型。有效本征态密度采用重掺杂导致的带隙变窄模型。模拟测试条件为: 25°C , AM1.5G 光谱, 入射光垂直电池上表面入射, 光强为 1000W/m^2 。

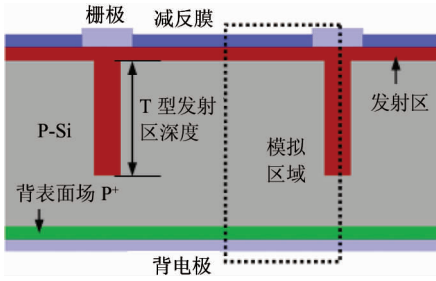


图1 T型发射区单晶硅太阳能电池结构

2 T型发射区结构参数对太阳电池输出特性的影响

图2为计算得到的在不同衬底少子寿命的情况下, T型发射区太阳电池与常规均匀发射区太阳电池(结构参数取值与T型发射区太阳电池相同)外量子效率的差值。由图2可见:当衬底少子寿命一定时, T型发射区结构对700~1200nm的长波段入射光的外量子效率具有明显的改善作用。T型发射区深度越大, 改善效果越显著。随着衬底少子寿命的增大, T型发射区结构对常规均匀发射区太阳电池长波段外量子效率的改善效果减弱。原因是:由于不同波长的入射光在晶硅电池中的吸收深度不一样, 晶硅电池对短波长光的吸收系数较大, 吸收深度较浅。对于波长较短($< 700\text{nm}$)的可见光波段, 吸收深度为 $0.1 \sim 10\mu\text{m}$ 。这一范围与目前常规均匀发射结太阳电池的内建电场范围对应, 因此, T型发射区结构对常规均匀发射区太阳电池短波段入射光外量子效率的改善作用较小。对于波长在 $700\text{nm} < \lambda \leq 1200\text{nm}$ 范围的长波段入射光, 吸收深度为 $10\mu\text{m} \sim 1\text{m}$ 。采用T型发射区结构可缩短光生载流子输运至发射结势垒区边界的路径长度, 增强了光生载流子的收集效率。因此, T型发射区结构对常规均匀发射区太阳电池长波段入射光外量子效率的改善作用较明显。T型发射区深度越大, 对常规电池长波段外量子效率的改善效果越显著。随着衬底少子寿命的增大, 少子扩散长度(L_n)随之增大(当 $\tau_n = 10\mu\text{s}$ 时, $L_n = 159.8\mu\text{m}$; 当 $\tau_n = 1000\mu\text{s}$ 时, $L_n = 1443\mu\text{m}$), 当少子扩散长度达到或超过光生载流子的输运路径长度时, 将大大降低光生载流子在输运过程中的复合损耗。因此, 当衬底少子寿命较高时,

T型发射区结构对常规电池长波段外量子效率的改善效果明显减弱。

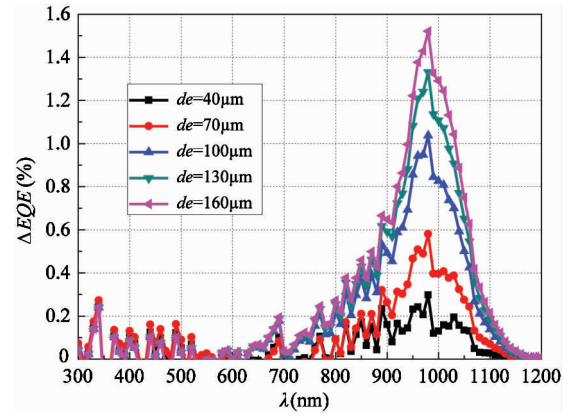
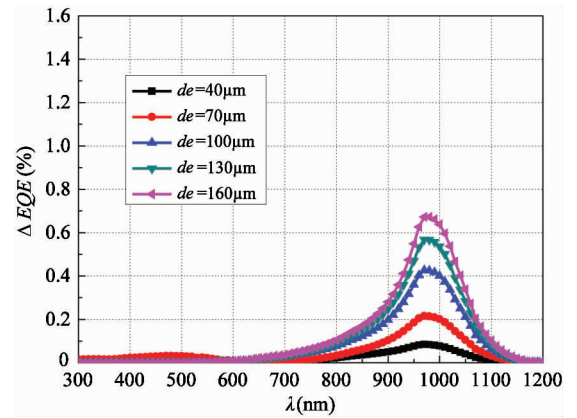
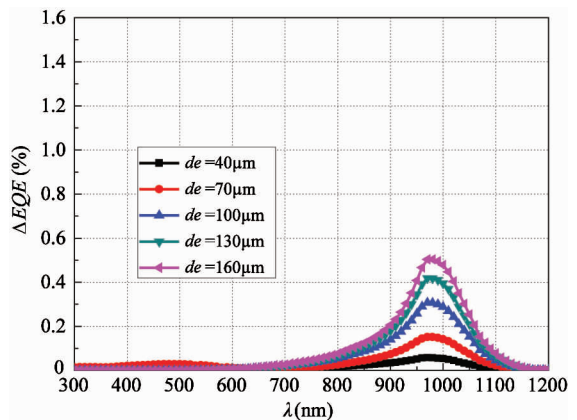
(a) $\tau_n = 10\mu\text{s}$ (b) $\tau_n = 100\mu\text{s}$ (c) $\tau_n = 1000\mu\text{s}$

图2 在不同衬底少子寿命情况下, 不同T型发射区深度对常规均匀发射区太阳电池外量子效率的影响

由于短路电流密度是全部入射光波段贡献的总和, 且T型发射区结构改善了常规均匀发射区太阳

电池的长波段外量子效率,因此,T 型发射区结构可提高常规电池的短路电流密度。图 3 为计算得到的在不同衬底少子寿命情况下,T 型发射区太阳电池与常规均匀发射区太阳电池短路电流密度的差值,常规均匀发射区太阳电池短路电流密度表示为 J_{sc0} 。由图 3 可见:当衬底少子寿命一定时,T 型发射区深度越大,T 型发射区结构对常规电池短路电流密度的改善效果越显著。随着衬底少子寿命的增大,T 型发射区结构对常规电池短路电流密度的改善效果减弱。

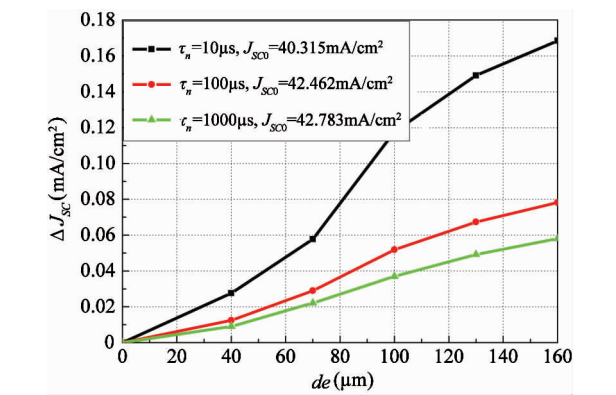


图 3 在不同衬底少子寿命情况下,不同 T 型发射区深度对常规均匀发射区太阳电池短路电流密度的影响

图 4 为计算得到的在不同衬底少子寿命的情况下,T 型发射区太阳电池与常规均匀发射区太阳电池开路电压的差值,常规均匀发射区太阳电池开路电压表示为 V_{oc0} 。表 1 为计算得到的在不同衬底少子寿命和 T 型发射区深度的情况下,电池开路电压值。由图 4 可见,当衬底少子寿命一定时,随着 T 型发射区深度的增大,电池开路电压减小。衬底少子寿命越小,T 型发射区结构对常规电池开路电压的影响越显著。原因是:影响太阳电池开路电压的主要因素之一是反向饱和电流 I_0 。当太阳电池材料及光照条件确定时,开路电压随着反向饱和电流的增加而减小。当衬底少子寿命一定时,T 型发射区深度越大,发射结有效面积越大,反向饱和电流随正向电压的变化增加得越迅速,从而导致电池 V_{oc} 越小;当 T 型发射区深度一定时,反向饱和电流与少数载流子在太阳电池中的复合速率有关。衬底少子寿命越小,光生载流子在输运过程中的复合损耗越大,电

池反向饱和电流随正向电压的变化增加得越迅速。因此,衬底少子寿命越小,T 型发射区结构对开路电压的影响越显著。

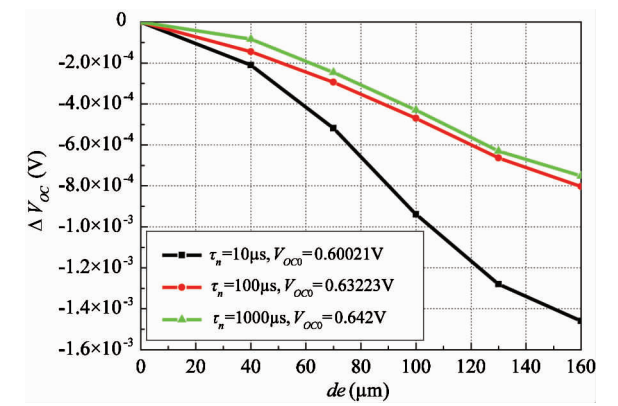


图 4 在不同衬底少子寿命情况下,不同 T 型发射区深度对常规均匀发射区太阳电池开路电压的影响

表 1 在不同少子寿命情况下,不同 T 型发射区深度对太阳电池开路电压的影响

$d_e (\mu\text{m})$	$Eff_1 (V)$	$Eff_2 (V)$	$Eff_3 (V)$
	$(\tau_n = 10 \mu\text{s})$	$(\tau_n = 100 \mu\text{s})$	$(\tau_n = 1000 \mu\text{s})$
0	0.60021	0.63223	0.64200
40	0.59999	0.63214	0.64185
70	0.59969	0.63198	0.64170
100	0.59927	0.63180	0.64153
130	0.59893	0.63160	0.64133
160	0.59875	0.63147	0.64119

图 5 为计算得到的在不同衬底少子寿命的情况下,T 型发射区太阳电池与常规均匀发射区太阳电池填充因子的差值,常规均匀发射区太阳电池填充因子表示为 FF_0 。由图 5 可见:当衬底少子寿命一定时,T 型发射区深度越大,T 型发射区太阳电池的填充因子越大。原因是:填充因子 FF 主要与太阳电池的串联电阻损耗有关,串联电阻损耗越大,填充因子越小。由于产业化常规均匀发射区单晶硅太阳电池的单元面积较大,电池片较厚,因此,对于长波段 ($>700\text{nm}$) 入射光激发产生的光生载流子,需要扩散输运较长的距离才能到达电池上表面发射结势垒区边界(如图 6 中路径①所示)。太阳电池单元面积越大,晶硅材料电阻率越高,由光生载流子传输引起的串联电阻损耗越大。而对于 T 型发射区单

晶硅太阳能电池,T 型发射区结构可视为光生载流子的低阻导电通道,一部分光生载流子可经由低阻 T 型发射区输运至电池上表面被收集(如图 6 中路径②所示)。因此,T 型发射区结构可减小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输运引起的串联电阻损耗。T 型发射区深度越大,太阳能电池串联电阻损失越小,对常规均匀发射区太阳能电池填充因子的改善效果越显著。

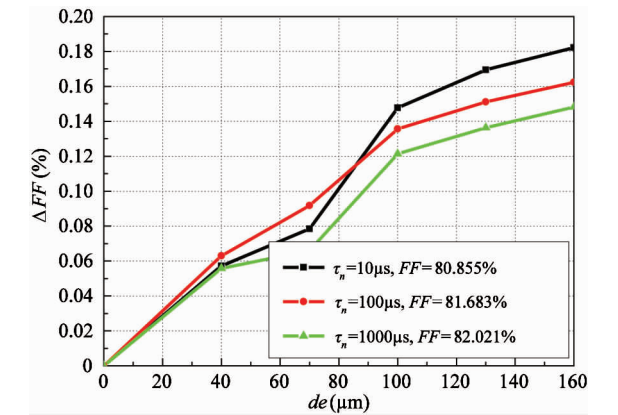


图 5 在不同衬底少数寿命情况下,不同 T 型发射区深度对常规均匀发射区太阳能电池填充因子的影响

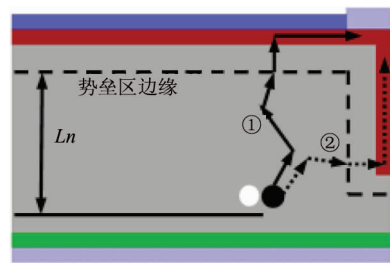


图 6 具有 T 型发射区结构的晶硅太阳能电池衬底中光生载流子传输路径示意图

当 T 型发射区深度一定时,令短路电流密度、开路电压、填充因子相比于常规电池情况的变化量分别为 ΔJ_{sc} 、 ΔV_{oc} 及 ΔFF ,则 T 型发射区太阳能电池的转换效率可表示为^[14]

$$Eff = \frac{(J_{sc0} + \Delta J_{sc}) \cdot (V_{oc0} - \Delta V_{oc}) \cdot (FF_0 + \Delta FF)}{P_{in}} \tag{6}$$

其中: J_{sc0} 、 V_{oc0} 及 FF_0 分别表示常规电池的短路电流密度、开路电压及填充因子。 P_{in} 为单位面积入射

光的功率。T 型发射区太阳能电池 Eff 由 $(J_{sc0} + \Delta J_{sc})$ 、 $(V_{oc0} - \Delta V_{oc})$ 及 $(FF_0 + \Delta FF)$ 三者的乘积决定,乘积越大, Eff 越大。表 2 为计算得到的在不同衬底少数寿命情况下,T 型发射区结构对太阳能电池转换效率(Eff)的影响。由表 2 可知,在不同衬底少数寿命的情况下,电池效率随着 T 型发射区深度的变化呈现出相同的变化特点:当 T 型发射区深度较小($<40\mu\text{m}$)时,随着 T 型发射区深度的增加, Eff 增大;当发射区深度在 $40\mu\text{m} < d_e < 70\mu\text{m}$ 的范围时,随着 T 型发射区深度的增加, Eff 减小;当发射区深度在 $70 < d_e < 160\mu\text{m}$ 的范围时,随着 T 型发射区深度的增加, Eff 再次增大。从对常规均匀发射区太阳能电池转换效率的改善效果考虑(如图 7 所示),当 T 型发射深度大于 $80\mu\text{m}$ 时,对于低衬底少数寿命($\tau_n = 10\mu\text{s}$)的单晶硅太阳能电池,T 型发射区结构对其转换效率的改善效果最为显著。

表 2 在不同少数寿命情况下,不同 T 型发射区深度对太阳能电池转换效率的影响

$d_e(\mu\text{m})$	Eff_1 ($\tau_n = 10\mu\text{s}$)	Eff_2 ($\tau_n = 100\mu\text{s}$)	Eff_3 ($\tau_n = 1000\mu\text{s}$)
0	19.576%	21.935%	22.530%
40	19.585%	21.953%	22.548%
70	19.584%	21.949%	22.543%
100	19.627%	21.977%	22.565%
130	19.636%	21.982%	22.568%
160	19.643%	21.986%	22.571%

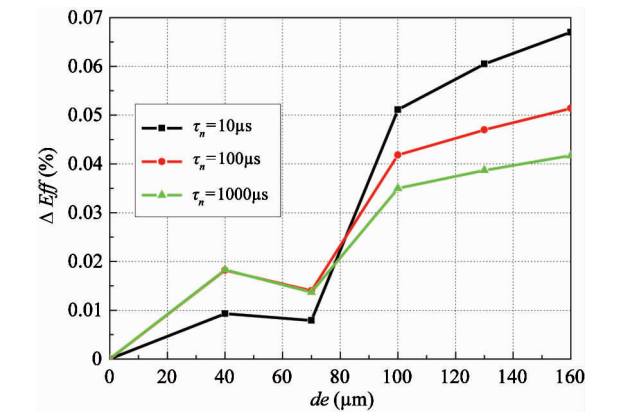


图 7 在不同衬底少数寿命情况下,不同 T 型发射区深度对常规均匀发射区太阳能电池转换效率的影响

综上所述,在常规均匀发射区太阳电池结构的基础上,采用T型发射区结构会对电池电学性能产生重要影响:

(1) 采用T型发射区结构有利于常规电池长波段量子效率的提升,从而提高电池短路电流。

(2) 采用T型发射区结构有利于常规电池串联电阻损耗的降低,从而提高电池填充因子。

(3) 采用T型发射区结构有利于常规电池转换效率的提高。

(4) 单元电池平面发射结面积越大(T型发射区结面积占总发射结面积的比值越小),T型发射区对电池反向饱和电流的贡献越小,对电池开路电压的影响越小。

3 结 论

本研究利用 TCAD 半导体器件仿真软件对具有T型发射区结构的单晶硅太阳电池进行了仿真研究,全面系统地分析了在不同衬底少子寿命情况下,不同T型发射区深度对太阳电池外量子效率、短路电流密度、开路电压、填充因子及转换效率的影响。仿真结果表明:T型发射区结构对700~1200nm长波段入射光的外量子效率具有明显的改善作用。T型发射区深度越大,衬底少子寿命越小,T型发射区结构对常规均匀发射区太阳电池短路电流密度、开路电压及填充因子的影响越显著。当衬底少子寿命一定时,太阳电池短路电流密度、填充因子均随T型发射区深度的增大而增大,而开路电压随T型发射区深度的增大而减小。当T型发射深度大于80 μm 时,随着T型发射区深度的增大,T型发射区结构对由低少子寿命的单晶硅衬底材料制备得到的太阳电池转换效率的改善效果最为显著。

参考文献

[1] 宋登元,熊景峰. 高效率n型Si太阳电池技术现状及发展趋势. 半导体光电,2013,34(3):351-354

[2] 邢宇鹏,韩培德,范玉杰等. 利用工艺和器件仿真优化发射极提高单晶硅电池转换效率. 太阳能学报,2014,

35(10):1999-2003

[3] 贾晓洁,艾斌,许欣翔等. 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. 物理学报,2014,63(6):68801-068801

[4] 李幼真,陈勇民. 晶硅衬底参数对太阳电池输出特性的影响. 中国有色金属学报,2012,22(8):2401-2406

[5] 艾斌,张勇慧,邓幼俊等. 外延晶体硅薄膜太阳电池的器件模拟及性能优化的研究. 中国科学:技术科学,2012,42(11):1318-1329

[6] 赵雷,周春兰,李海玲等. 单晶硅太阳电池发射极的模拟优化. 太阳能学报,2009,30(12):1587-1591

[7] Hilali M M, Hacke P, Gee J M. Two-dimensional modeling of EWT multicrystalline silicon solar cells and comparison with the IBC solar cell. In: Proceedings of the IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, Waikoloa, USA, 2006, 2: 1299-1303

[8] Zhang W, Chen C, Jia R, et al. Optimization of metal coverage on the emitter in n-type interdigitated back contact solar cells using a PC2D simulation. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(7): 078801

[9] Franklin E, Fong K, McIntosh K, et al. Design, fabrication and characterisation of a 24.4% efficient interdigitated back contact solar cell. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 2014, 24(4): 160-163

[10] Zenshaw J, Rohatgi A. Device optimization for screen printed interdigitated back contact solar cells. In: Proceedings of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Seattle, USA, 2011. 002924 - 002927

[11] 熊绍珍,朱美芳. 太阳能电池基础与应用. 北京:北京科学技术出版社,2009. 97-98

[12] Schroder D K, Meier D L. Solar cell contact resistance - A review. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1984, 31(5):637 -647

[13] Duttagupta S, Lin F, Shetty K D, et al. Excellent boron emitter passivation for high-efficiency Si wafer solar cells using AlOx/SiNx dielectric stacks deposited in an industrial inline plasma reactor. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2013, 21(4):760-764

[14] Tom Markvart, Luis Castaner. 太阳电池:材料、制备工艺及检测. 梁骏吾译. 北京:机械工业出版社,2010. 4-7

Output characteristic of mono-crystalline silicon solar cells with T-type emitter structure

Zhou Tao, Lu Xiaodong, Wu Yuanqing, Li Yuan

(School of New Energy, Bohai University, Jinzhou 121000)

Abstract

The simulation study of mono-crystalline silicon solar cells with the T-type emitter structure was carried out by using the TCAD semiconductor device simulation software. The influences of the T-type emitter's depth on the external quantum efficiency, short circuit current density, open-circuit voltage, fill factor and conversion efficiency of the solar cells under different substrate minority carrier lifetimes were analyzed comprehensively and systematically. The simulation results show that the electrical properties of a conventional solar cell using uniform emitter can be improved to a certain extent by using the T-type emitter structure, and the T-type emitter structure can significantly improve the external quantum efficiency of the long wave incident light of $700 \sim 1200\text{nm}$. When the substrate minority carrier has a certain lifetime, the short circuit current density and the fill factor of a solar cell increase with the increase of T-type emitter structure's depth, while the open circuit voltage decreases with the increase of T-type emitter structure's depth. When the depth of the T-type emitter structure is greater than $80\mu\text{m}$, the T-type emitter structure can improve the conversion efficiency of the mono-crystalline silicon solar cell with the lower substrate minority carrier lifetime most significantly.

Key words: mono-crystalline silicon, solar cell, emitter, depth, minority carrier lifetime, conversion efficiency, quantum efficiency