

缺陷辅助隧穿对TOPCon太阳能电池性能的影响

徐嘉玉^{1*}, 胡波^{1,2}, 黄仕华^{1#}

¹浙江师范大学, 物理与电子信息工程学院, 浙江 金华

²河南科技学院, 机电学院, 河南 新乡

收稿日期: 2024年4月15日; 录用日期: 2024年5月25日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

TOPCon太阳能电池超薄氧化硅层中的载流子的直接隧穿和针孔传输是两种当前被广泛探讨的机制, 在实际电池制造过程中, 超薄氧化硅层在高温诱导应力下在产生针孔的同时, 也可能伴随大量缺陷的出现, 这些缺陷有助于载流子通过缺陷辅助隧穿进行传输。本文通过数值求解漂移扩散输运方程, 理论模拟了光照下TOPCon太阳能电池的性能在氧化层厚度为2.0 nm的情况下, 综合考虑直接隧穿和缺陷辅助隧穿作为两种主要的输运机制, TOPCon太阳能电池效率将会提高。研究了电池填充因子随氧化层电子有效质量的依赖关系。接着讨论了从晶体硅体寿命和背面多晶硅浓度对TOPCon太阳能电池性能的影响。本文的研究结果不仅有助于加深人们对TOPCon太阳能电池载流子输运机制的理解, 还为优化电池结构设计提供了有益的理论指导。

关键词

TOPCon太阳能电池, 超薄氧化硅, 缺陷辅助隧穿, 载流子输运

The Effect of Trap-Assisted Tunneling on the Performance of TOPCon Solar Cells

Jiayu Xu^{1*}, Bo Hu^{1,2}, Shihua Huang^{1#}

¹College of Physics and Electronic Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

²School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang Henan

Received: Apr. 15th, 2024; accepted: May 25th, 2024; published: May 31st, 2024

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 徐嘉玉, 胡波, 黄仕华. 缺陷辅助隧穿对 TOPCon 太阳能电池性能的[J]. 应用物理, 2024, 14(5): 328-338.
DOI: 10.12677/app.2024.145038

Abstract

The direct tunneling and pinhole transport of charge carriers in the ultra-thin silicon oxide layer of TOPCon solar cells are two widely discussed mechanisms. In the actual solar cell manufacturing process, the ultra-thin silicon oxide layer may generate pinholes under high-temperature induced stress, which may also be accompanied by a large number of traps. These traps help transport charge carriers through trap-assisted tunneling. This article numerically solves the drift diffusion transport equation and theoretically simulates the performance of TOPCon solar cells under illumination. With an oxide layer thickness of 2.0 nm, considering direct tunneling and trap-assisted tunneling as the two main transport mechanisms, the efficiency of TOPCon solar cells will be improved. The dependence of filling factor on the effective mass of oxide layer electrons was studied. Subsequently, the effects of crystal silicon lifetime and impurity concentration in the backside polycrystalline silicon on the performance of TOPCon solar cells were discussed. The research results presented in this paper not only deepen our understanding of the carrier transport mechanisms in TOPCon solar cells but also provide valuable theoretical guidance for optimizing the design of cell structures.

Keywords

TOPCon Solar Cells, Ultra-Thin Silicon Oxide, Trap-Assisted Tunneling, Carrier Transport

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

晶硅太阳能电池兼具光电转换效率高、成本低、稳定性高、技术成熟等优点，一直是光伏发电的主流技术，占据 95% 的市场份额。在目前其他太阳能电池技术尚未取得重大突破的情况下，晶硅太阳能电池仍将长期保持主导地位。坚持高性能晶硅太阳能电池的研发，推动太阳能电池产业技术升级换代，对增强光伏发电竞争力、促进中国及世界能源结构转型具有重要意义。隧穿氧化层钝化接触(TOPCon)技术是近年来快速发展的新型晶硅太阳能电池技术，可以避免钝化发射极及背面接触(PERC)技术中的背面金属接触复合损失，有效提升钝化效果及太阳能电池的光电转换效率[1] [2]。

TOPCon 太阳能电池制造过程中需要进行高温烧结工序，这使得超薄氧化硅层在高温诱导的应力下容易产生针孔[3]-[7]。对于氧化硅层厚度超过 2 nm 的情况，针孔传输通常被认为是主导的载流子输运机制。但是，高温退火过程中氧化硅层在高温产生的应力诱导下也会产生大量缺陷[8] [9]。这些存在于氧化硅薄膜中的缺陷可能会辅助载流子的隧穿，并成为主要的载流子输运方式。因此，在 TOPCon 太阳能电池中，缺陷辅助隧穿(TAT)也可能是一种主要的载流子输运机制，尤其是在氧化层厚度大于 2 nm 以及高缺陷浓度的器件中。

本文通过数值求解漂移扩散输运方程，理论模拟了光照下 TOPCon 太阳能电池的性能在氧化层厚度为 2.0 nm 的情况下，综合考虑直接隧穿和缺陷辅助隧穿作为两种主要的输运机制。详细探讨了氧化层电子有效质量、晶硅体寿命、背面多晶硅浓度等因素对 TOPCon 太阳能电池性能的影响。本文的研究结果这对于更深入地理解 TOPCon 太阳能电池载流子输运机制以及如何提高电池光电转换效率具

有重要意义。

2. 理论模型

本文研究的硼(B)掺杂 p 型发射极/n 型晶体硅/超薄氧化硅/n 型重掺杂多晶硅(B-doped p⁺ emitter/n-c-Si/SiO_x/n⁺-poly-Si)结构的 n 型 TOPCon 太阳能电池结构示意图如图 1 所示。通过模拟,得到了光照下、外加偏压作用下的 $J-V$ 特性曲线,并提取出短路电流密度(J_{sc}),开路电压(V_{oc}),填充因子(FF)和光电转换效率(PCE)等关键性能参数。其中,光电转换效率是开路电压、短路电流密度和填充因子三者的乘积,这四个关键性能参数越大,则表明器件性能越好。

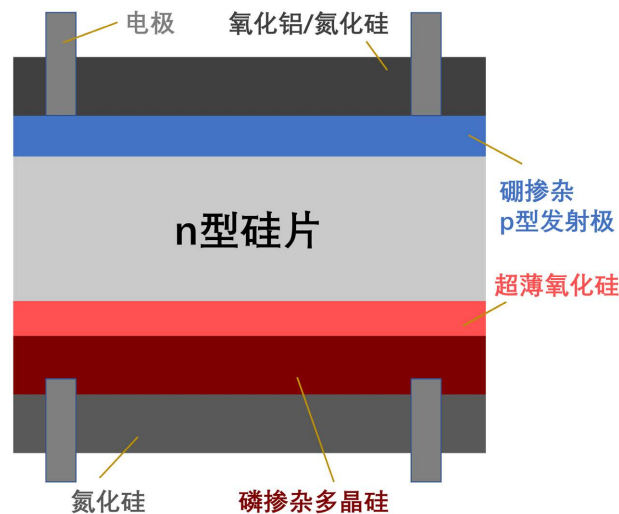


Figure 1. Structural schematic diagram of TOPCon solar cell simulation

图 1. TOPCon 太阳能电池模拟的结构示意图

图 1 的背面结构即为 n 型重掺杂多晶硅/超薄氧化硅/n 型晶体硅(n⁺-poly-Si/SiO_x/n-c-Si)结构的 POLO 结,其能带图如图 2 所示。

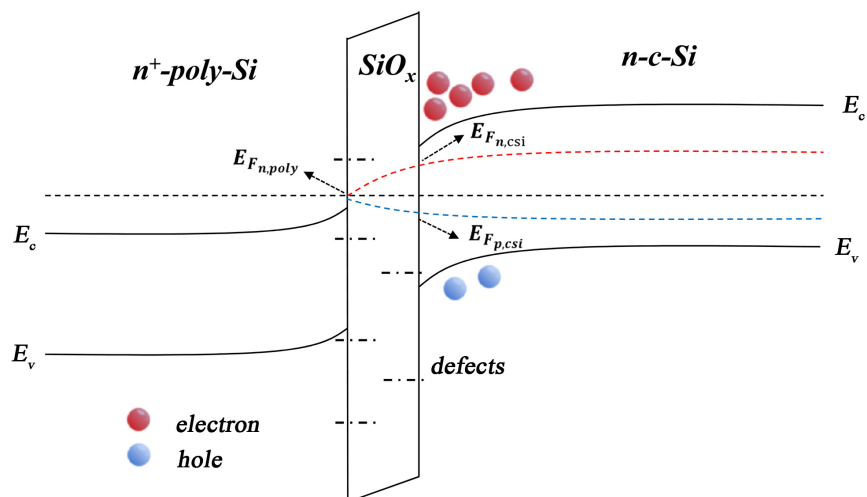


Figure 2. Energy band diagram of rear structure of TOPCon solar cell

图 2. TOPCon 太阳能电池背部结构能带图

本文采用了漂移扩散理论模型，该模型包括泊松方程和载流子连续性方程，其中泊松方程用于确定电势的分布，而连续性方程则描述了在电场、浓度梯度等作用下的载流子浓度分布[10] [11] [12]。

3. 结果与讨论

3.1. 缺陷辅助隧穿

考虑 DT 和 TAT 作为两种主要载流子运输机制，模拟了外加偏压作用下 n 型 POLO 结在暗态下的 I - V 特性曲线，以及相应的接触电阻率，所采用的材料参数如表 1 所示。

Table 1. Parameters used for numerical simulations (m_0 is the free electron mass)

表 1. 数值模拟计算采用的材料参数(m_0 为自由电子质量)

物理量	符号/单位	参数值
温度	T/K	300
硅禁带宽度	$E_{g,Si}/eV$	1.12
氧化硅禁带宽度	$E_{g,ox}/eV$	9.0
硅相对介电常数	ϵ_{Si}	11.9
氧化硅相对介电常数	ϵ_{ox}	3.9
硅导带有效状态密度	N_c/cm^{-3}	2.8×10^{19}
硅价带有效状态密度	N_v/cm^{-3}	1.1×10^{19}
硅电子有效质量	m_n^*	$1.18m_0$ [13]
硅空穴有效质量	m_p^*	$0.81m_0$ [13]
氧化硅电子有效质量	$m_{e,ox}$	$0.50m_0$ [13] [14]
氧化硅空穴有效质量	$m_{h,ox}$	$0.32m_0$ [15]
衬底单晶硅掺杂浓度	$N_{d,csi}/cm^{-3}$	5×10^{15}
间接复合寿命最大值	τ_{max}/ms	7 [16]

为了验证提出的理论模型，我们首先对模拟的 I - V 特性与已报道的实验结果[17]进行了定量对比。考虑到 DT 和 TAT 是两种主要的运输机制，当 n 型 POLO 结氧化层厚度为 1.4 nm 时，我们模拟并提取了实验测得的暗态 I - V 特性曲线，如图 3 所示。为了对比分析，图 3 还展示了仅考虑 DT 和仅考虑 TAT 作为单一运输机制时计算得到的 I - V 特性。在模拟计算中，我们采用了通过电子化学电容 - 电压(ECV)方法测定的杂质分布，来确定从多晶硅内扩散进入衬底硅中的杂质分布。重掺杂多晶硅的浓度为 $4.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ，电极直径为 1 mm，由衬底引起的残余电阻或背面接触的接触电阻 R_0 为 3.01 Ω ，这些参数均与实验相同[17]。

如果只考虑 DT 运输机制，计算得到的 I - V 曲线(绿色实线)显然不符合实验结果。在考虑的电压范围内， I - V 曲线是非线性的，并且与实验上近线性曲线不符。然而，当结合 TAT 运输机制，并通过拟合得到自由的 TAT 参量 $\sigma_i N_i = 1.27 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 时，发现在考虑的电压范围内计算的 I - V 特性曲线(红色实线)与实验结果定量符合。此外，提取的相应接触电阻率 $\rho_c = 7.68 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 也与实验结果一致。

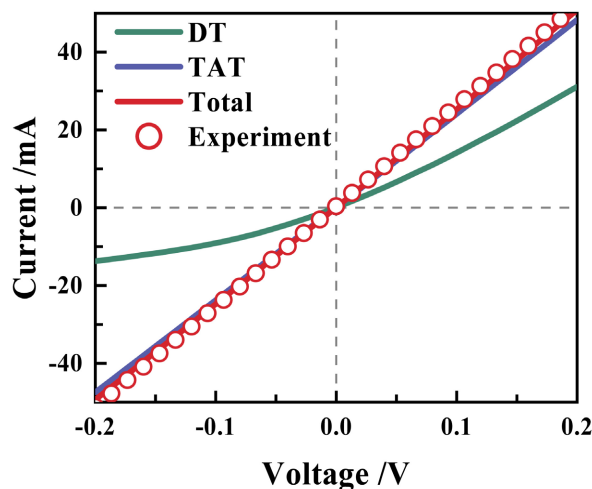


Figure 3. I - V characteristic curve for n-type POLO junction with 1.4 nm oxide layer

图 3. n 型 POLO 结氧化层厚度为 1.4 nm 时 I - V 特性曲线

尽管在以前关于 TOPCon 太阳能电池的研究中, 针孔传输一直被认为是一种重要的运输机制来解释观察到的实验结果, 但本文的计算结果也暗示了热应力诱导的 TAT 可能也是一种很重要的运输机制, 它是不应该被忽略的。

为了模拟考虑 TAT 的 TOPCon 太阳能电池的性能, 基于暗态 POLO 结模型的基本框架进行了拓展, 加入了光照等因素, 构建了完整的 TOPCon 太阳能电池模型。模拟计算了外加偏压作用下结构的 n 型 TOPCon 太阳能电池, 其结构如图 1 所示。考虑 DT 和 TAT 作为两种主要的运输机制, 对 n 型 TOPCon 太阳能电池氧化层厚度为 2.0 nm 时模拟的光照下 J - V 特性曲线进行了模拟, 并通过数值计算提取了相应关键性能参数, 包括 V_{oc} , J_{sc} , FF 和 PCE , 结果如图 4 所示。在 n 型 TOPCon 太阳能电池的数值模拟计算中, 同样考虑了重掺杂多晶硅杂质从多晶硅内扩散进入衬底硅中, 其中峰值杂质浓度 $C_p = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 扩散长度参量 $\delta = 50 \text{ nm}$, 模拟计算过程中所采用的其他材料参数若无明确说明, 都采用表 2 和表 3 所示的参数。TAT 参量 $\sigma_t N_t$ 与图 3 拟合参量相同, 在后续讨论过程中保持不变。

Table 2. Parameters of Si used in numerical simulations of TOPCon solar cells

表 2. TOPCon 太阳能电池的数值模拟计算中采用的 Si 材料参数

物理量/单位	p ⁺ emitter	n-c-Si	n ⁺ -poly-Si
厚度/nm	150	1.8×10^{15}	30
禁带宽度/eV	1.12	1.12	1.12
相对介电常数	11.9	11.9	11.9
电子亲和能/eV	4.05	4.05	4.05
浓度/cm ⁻³	2×10^{19}	5×10^{15}	2×10^{20}

Table 3. Other parameters used for numerical simulations of TOPCon solar cells (m_0 is the free electron mass)

表 3. TOPCon 太阳能电池的数值模拟计算中采用的其他参数(m_0 为自由电子质量)

物理量	符号/单位	参数值
温度	T/K	300
氧化硅禁带宽度	$E_{g,ox}/\text{eV}$	9.0

续表

氧化硅相对介电常数	ϵ_{ox}	3.9
硅导带有效状态密度	N_c/cm^{-3}	2.8×10^{19}
硅价带有效状态密度	N_v/cm^{-3}	1.1×10^{19}
硅电子有效质量	m_n^*	$1.18m_0$ [13]
硅空穴有效质量	m_p^*	$0.81m_0$ [13]
氧化硅电子有效质量	$m_{e,ox}$	$0.50m_0$ [14] [15]
氧化硅空穴有效质量	$m_{h,ox}$	$0.32m_0$ [15]
间接复合寿命最大值	τ_{\max}/ms	7 [16]

如图 4 所示, 红色曲线表示同时考虑 DT 和 TAT 作 n 型 TOPCon 太阳能电池的主要运输机制, 而黑色曲线则表示仅考虑 DT 作为运输机制。从图中可以看出, 两者的 V_{oc} 和 J_{sc} 非常接近, V_{oc} 达到了 725 mV 左右。然而, 同时考虑 DT 和 TAT 作为两种主要运输机制的 FF 更高, 这也使得其 PCE 也更高, 达到了 26.13%。这说明, 在 n 型 TOPCon 太阳能电池氧化层厚度为 2.0 nm 时, 同时考虑 DT 和 TAT 作为两种主要运输机制可以使效率达到更高水平。

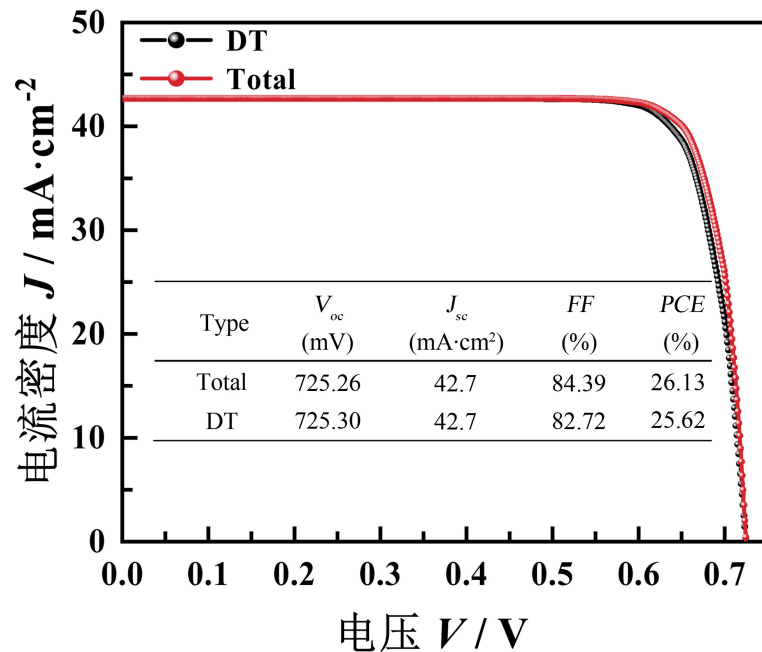


Figure 4. J - V characteristic curve and corresponding performance parameters of an n-type TOPCon solar cell with 2.0 nm oxide layer

图 4. 氧化层厚度为 2.0 nm 时的 n 型 TOPCon 太阳能电池的 J - V 特性曲线以及对应的性能参数

3.2. 氧化层电子有效质量

图 5 展示了在氧化层厚度为 1.0~2.0 nm 范围内, TOPCon 太阳能电池的填充因子 FF 如何依赖于氧化层电子有效质量。在模拟计算中, 重掺杂多晶硅掺杂浓度和从多晶硅内扩散进入衬底硅中的杂质分布与图 4 相同。观察图 5, 可以发现, 当氧化层电子的有效质量较小时, FF 对氧化层厚度的依赖关系比较轻

微, 且呈现下降的趋势。然而, 在氧化层电子有效质量较大的情况下, 特别是在氧化层厚度为 $0.5 m_0$ 时, FF 对氧化层厚度的变化变得极为敏感, 下降幅度也更大。这表明, 在不同的氧化层厚度下, 氧化层电子有效质量的变化对 FF 的影响不同。具体来说, 当氧化层厚度较小时, 氧化层电子有效质量的变化对 FF 的影响较小, FF 几乎保持不变; 而随着氧化层厚度的增大, FF 对氧化层电子有效质量的敏感度逐渐增强, 下降速度也越来越快。

事实上, 氧化层电子有效质量和氧化层厚度都可以直接影响单步 DT 隧穿概率和两步 TAT 隧穿概率, 但根据模拟结果可以发现两者对 FF 的影响程度并不同。

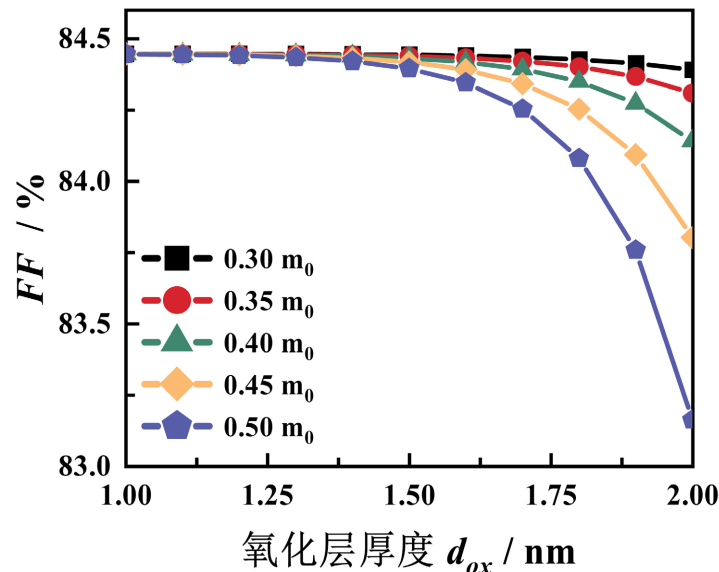


Figure 5. Dependence of FF on the effective electrons mass for oxide with 1.0 - 2.0 nm oxide layer

图 5. 氧化层厚度为 1.0~2.0 nm 时, FF 对氧化层电子有效质量的依赖关系

3.3. 衬底硅寿命

图 6 展示了当考虑 DT 和 TAT 作为两种主要的运输机制时, TOPCon 太阳能电池的性能参数(a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF 和(d) PCE 与体寿命 τ_{bulk} 之间的依赖关系。在模拟计算中, 重掺杂多晶硅掺杂浓度和从多晶硅内扩散进入衬底硅中的杂质分布同样与图 4 相同。观察图 6 可以发现, V_{oc} 对衬底硅体寿命 τ_{bulk} 非常敏感, 随着体寿命 τ_{bulk} 的增大, V_{oc} 呈现出明显的上升趋势, 这说明 τ_{bulk} 的增大有助于加强场效应钝化, 从而对钝化效果产生正面影响。相比之下, 体寿命 τ_{bulk} 的变化对 J_{sc} 的影响很小, J_{sc} 几乎保持水平不变, 当 $\tau_{bulk} < 2$ ms 时, J_{sc} 甚至呈现出轻微的上升趋势; FF 则稍微单调依赖于体寿命 τ_{bulk} ; 由于 PCE 与 V_{oc} , J_{sc} , FF 成正比, 因此随着 τ_{bulk} 的增大, PCE 也呈现出升高的趋势。从 SRH 复合的角度来看, 随着体寿命 τ_{bulk} 的不断增大, SRH 复合会逐渐减弱, 从而导致收集到的光生载流子增多, 这最终使得 TOPCon 太阳能电池的光电转换效率增大。

在图 7 中, 绘画了间接复合寿命最大值分别为 0.5 ms 和 10 ms 时的 $J-V$ 特性曲线, 分别用黑色和红色曲线表示。同时, 红色圆圈表示不考虑 SRH 复合时的 $J-V$ 特性曲线。通过对比可以发现, 不考虑 SRH 复合时的 $J-V$ 特性曲线几乎与红色曲线重合, 这进一步证明了体寿命 τ_{bulk} 的增大会导致 SRH 复合逐渐减弱。当 $\tau_{max} = 10$ ms 时, SRH 复合的影响变得非常微弱, 几乎可以忽略不计。

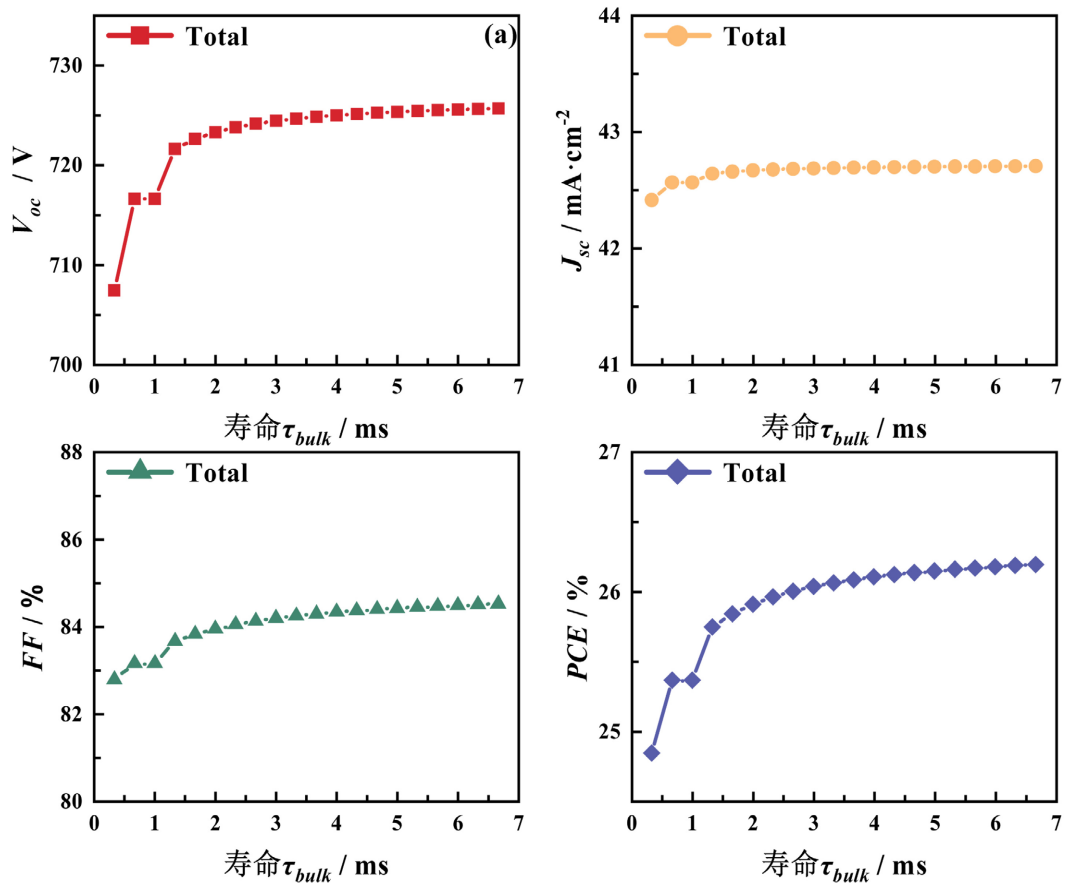


Figure 6. Dependence of TOPCon solar cell performance parameters (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF and (d) PCE on bulk lifetime τ_{bulk}

图 6. TOPCon 太阳能电池性能参数(a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF 和(d) PCE 对体寿命 τ_{bulk} 的依赖关系

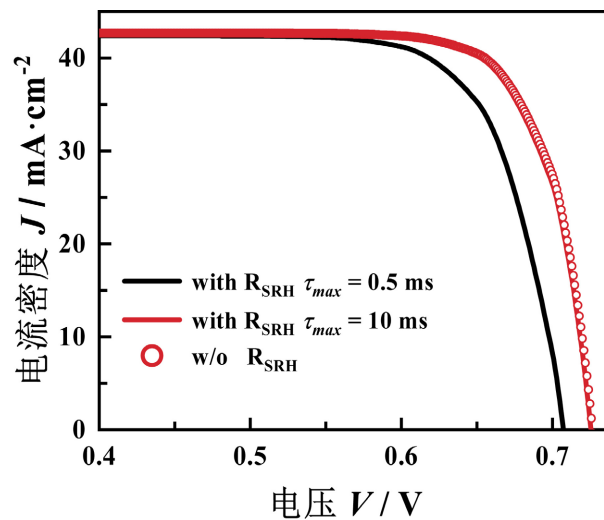


Figure 7. Dependence of $J-V$ characteristic curves on SRH recombination when the maximum indirect recombination lifetimes are 0.5 ms and 10 ms

图 7. 间接复合寿命最大值为 0.5 ms 和 10 ms 时, $J-V$ 特性曲线对 SRH 复合的依赖关系

3.4. 背面多晶硅浓度

图 8 展示了 TOPCon 太阳能电池的性能参数(a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF 和(d) PCE 对 n^+ 多晶硅浓度的依赖关系。值得注意的是, 在计算 n^+ 多晶硅浓度的依赖关系时, 由于 n^+ 多晶硅浓度在一定范围内变化, 而峰值杂质浓度 C_p 要低于 n^+ 多晶硅浓度, 因此设定峰值杂质浓度 C_p 为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 扩散长度参量 δ 设定为 50 nm, 同时此时的间接复合最大寿命为 1 ms。从图中可以看出, V_{oc} 随着 n^+ 多晶硅浓度的增加而增长, 且始终保持较高水平, 钝化效果也持续提高。而 J_{sc} 与光吸收紧密相关, 实际中的 TOPCon 太阳能电池包含光寄生吸收作用, 多晶硅浓度增大会显著增加对红外波长光的寄生吸收, 导致电流损耗[18], 这里不考虑光吸收作用, 所以 J_{sc} 基本保持稳定。而在 n^+ 多晶硅浓度增大时, FF 则在较大范围内持续上升, 这表明 FF 高度依赖于高 n^+ 多晶硅浓度。 PCE 随着 n^+ 多晶硅浓度的大加则单调递增。这是因为随着 n^+ 多晶硅浓度的增大, 掺杂原子在多晶硅与硅中的浓度差所导致的电场差异产生了场效应钝化, 这会使多数载流子快速通过界面而少数载流子则不易到达界面, 从而减少电子-空穴对在界面处的复合。并且, 此时的峰值杂质浓度 C_p 较低, 所以随着 n^+ 多晶硅浓度的增大, 内建电势也不断增大, 电子也更容易被收集, TOPCon 太阳能电池效率不断提升。

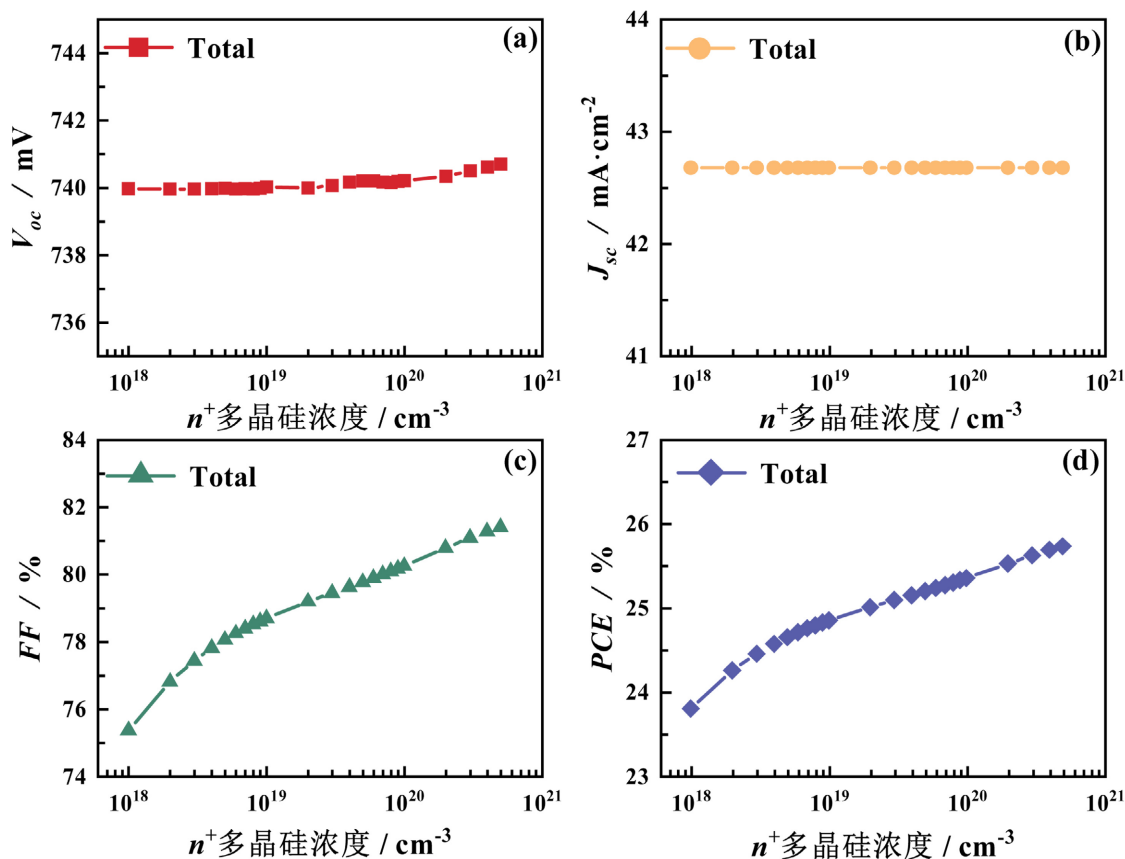


Figure 8. Dependence of TOPCon solar cell performance parameters (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF and (d) PCE on the concentration of n^+ -polysilicon

图 8. TOPCon 太阳能电池性能参数(a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF 和(d) PCE 对 n^+ 多晶硅浓度的依赖关系

4. 结论

本文模拟计算了 n 型 POLO 结暗电流的电压特性以及相应的接触电阻率, 通过拟合自由 TAT 参数 $\sigma_i N_i$,

计算结果与实验结果高度吻合,这表明 TAT 运输机制在 TOPCon 太阳能电池中也可能是一种非常重要的载流子运输机制。接着构建了考虑 TAT 的完整 TOPCon 太阳能电池模型,并模拟了 n 型 TOPCon 太阳能电池在氧化层厚度为 2.0 nm 时的 $J-V$ 特性曲线以及关键性能参数。此外还探讨了缺陷辅助隧穿、氧化层电子有效质量、寿命和背面 n^+ 多晶硅浓度对 TOPCon 太阳能电池性能的影响。这些研究结果不仅有助于更全面地理解 TOPCon 太阳能电池的工作原理和性能表现,而且为进一步优化其设计提供了重要的参考依据。

基金项目

浙江省重点研发计划(批准号: 2021C01006)资助的课题。

参考文献

- [1] Feldmann, F., Bivour, M., Reichel, C., *et al.* (2014) Passivated Rear Contacts for High-Efficiency n-Type Si Solar Cells Providing High Interface Passivation Quality and Excellent Transport Characteristics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **120**, 270-274. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.09.017>
- [2] Richter, A., Müller, R., Benick, J., *et al.* (2021) Design Rules for High-Efficiency Both-Sides-Contacted Silicon Solar Cells with Balanced Charge Carrier Transport and Recombination Losses. *Nature Energy*, **6**, 429-438. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00805-w>
- [3] Lancaster, K., Großer, S., Feldmann, F., *et al.* (2016) Study of Pinhole Conductivity at Passivated Carrier-Selected Contacts of Silicon Solar Cells. *Energy Procedia*, **92**, 116-121. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.040>
- [4] Peibst, R., Römer, U., Larionova, Y., *et al.* (2016) Working Principle of Carrier Selective Poly-Si/C-Si Junctions: Is Tunnelling the Whole Story? *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **158**, 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.05.045>
- [5] Tetzlaff, D., Krügener, J., Larionova, Y., *et al.* (2017) A Simple Method for Pinhole Detection in Carrier Selective POLO-Junctions for High Efficiency Silicon Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **173**, 106-110. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.05.041>
- [6] Wietler, T.F., Tetzlaff, D., Krügener, J., *et al.* (2017) Pinhole Density and Contact Resistivity of Carrier Selective Junctions with Polycrystalline Silicon on Oxide. *Applied Physics Letters*, **110**, Article ID: 253902. <https://doi.org/10.1063/1.4986924>
- [7] Feldmann, F., Nogay, G., Löper, P., *et al.* (2018) Charge Carrier Transport Mechanisms of Passivating Contacts Studied by Temperature-Dependent J-V Measurements. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **178**, 15-19. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.01.008>
- [8] Hofmann, K., Wrubloff, G. and McCorkle, R.A. (1986) Defect Formation in Thermal SiO₂ by High-Temperature Annealing. *Applied Physics Letters*, **49**, 1525-1527. <https://doi.org/10.1063/1.97322>
- [9] Feng, M., Zeng, Y., Yang, Z., *et al.* (2021) Rapid-Thermal-Annealing-Induced Passivation Degradation and Recovery of Polysilicon Passivated Contact with Czochralski and Cast Multicrystalline Silicon Substrates. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, **218**, Article ID: 2100344. <https://doi.org/10.1002/pssa.202100344>
- [10] Stangl, R., Leendertz, C. and Haschke, J. (2010) Numerical Simulation of Solar Cells and Solar Cell Characterization Methods: The Open-Source on Demand Program AFORS-HET. In: Rugescu, R.D., eds., *Solar Energy*, IntechOpen, 319-354. <https://doi.org/10.5772/8073>
- [11] Liu, Y., Ahmadpour, M., Adam, J., *et al.* (2018) Modeling Multijunction Solar Cells by Nonlocal Tunneling and Sub-cell Analysis. *IEEE Journal of Photovoltaics*, **8**, 1363-1369. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2851308>
- [12] Tessler, N. and Vaynzof, Y. (2020) Insights from Device Modeling of Perovskite Solar Cells. *ACS Energy Letters*, **5**, 1260-1270. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.0c00172>
- [13] Rana, F., Tiwari, S. and Buchanan, D.A. (1996) Self-Consistent Modeling of Accumulation Layers and Tunneling Currents through Very Thin Oxides. *Applied Physics Letters*, **69**, 1104-1106. <https://doi.org/10.1063/1.117072>
- [14] Gehring, A. and Selberherr, S. (2004) Modeling of Tunneling Current and Gate Dielectric Reliability for Nonvolatile Memory Devices. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, **4**, 306-319. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2004.836727>
- [15] Lee, W.C. and Hu, C. (2001) Modeling CMOS Tunneling Currents through Ultrathin Gate Oxide Due to Conduction and Valence-Band Electron and Hole Tunneling. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **48**, 1366-1373. <https://doi.org/10.1109/16.930653>

- [16] Steinkemper, H., Feldmann, F., Bivour, M., *et al.* (2015) Numerical Simulation of Carrier-Selective Electron Contacts Featuring Tunnel Oxides. *IEEE Journal of Photovoltaics*, **5**, 1348-1356. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2455346>
- [17] Guo, X., Liao, M., Rui, Z., *et al.* (2020) Comparison of Different Types of Interfacial Oxides on Hole-Selective p⁺-Poly-Si Passivated Contacts for High-Efficiency c-Si Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **210**, Article ID: 110487. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110487>
- [18] Chen, W., Liu, X., Liu, W., *et al.* (2023) Optimization of Activated Phosphorus Concentration in Recrystallized Polysilicon Layers for the n-TOPCon Solar Cell Application. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **252**, Article ID: 112206. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112206>