

隧穿氧化物钝化接触太阳能电池的研究进展

徐嘉玉

浙江师范大学物理与电子信息工程学院, 浙江 金华

收稿日期: 2024年4月2日; 录用日期: 2024年4月30日; 发布日期: 2024年5月8日

摘要

随着全球对可再生能源需求的不断增长, 太阳能电池作为一种高效、清洁的能源转换方式, 受到了广泛关注。隧穿氧化物钝化接触(Tunnel Oxide Passivated Contact, TOPCon)太阳能电池作为一种新型的太阳能电池技术, 以其高效率、低成本和易于大规模生产的优势, 成为了当前研究的热点。该技术通过在电池背面引入一层超薄隧穿氧化层和一层多晶硅层, 有效降低了界面复合损失, 提高了电池的开路电压和填充因子, 从而提升了电池的光电转换效率。本文首先介绍TOPCon太阳能电池的研究背景, 然后对其工作原理进行详细的理论分析, 之后介绍了TOPCon太阳能电池的关键结构及其制备技术, 并讨论了TOPCon太阳能电池的研究现状与关键问题, 最后进行了总结和展望, 为TOPCon太阳能电池的未来研究提供参考和借鉴。

关键词

隧穿氧化物钝化接触太阳能电池, 载流子选择性, 超薄氧化硅, 研究进展

Research Progress in Tunnel Oxide Passivated Contact Solar Cells

Jiayu Xu

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

Received: Apr. 2nd, 2024; accepted: Apr. 30th, 2024; published: May 8th, 2024

Abstract

As the global demand for renewable energy continues to grow, solar cells have received widespread attention as an efficient and clean energy conversion method. Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon) solar cells, as a new type of solar cell technology, have become a research hotspot due to their advantages of high efficiency, low cost, and ease of large-scale production. This technology effectively reduces interface recombination losses and improves the open-circuit vol-

tage and fill factor of the solar cell by introducing an ultra-thin tunnel oxide layer and a polysilicon layer on the back of the cell, thus enhancing the photoelectric conversion efficiency of the solar cell. This article first introduces the research background of TOPCon solar cells, then provides a detailed theoretical analysis of their working principle, followed by a description of the key structures and preparation techniques for TOPCon solar cells. It also discusses the current research status and key issues of TOPCon solar cells, and finally summarizes and forecasts, providing reference and insight for future research on TOPCon solar cells.

Keywords

Tunnel Oxide Passivated Contact Solar Cells, Carrier Selectivity, Ultrathin Silicon Oxide, Research Progress

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

能源是驱动世界经济和社会发展的核心动力。然而，随着传统化石能源的日益枯竭，以及全球气候变化问题日益严重，寻求清洁、可再生的能源已成为各国政府的共识。大力推进新能源的使用有助于我国早日实现“双碳”目标，太阳能作为新能源中的佼佼者，其应用范围不断扩大，从光伏发电到太阳能热水器等，都展现出了巨大的发展潜力，是最早将新能源进行利用的设备之一[1] [2] [3] [4]。

近年来，全球光伏市场的迅猛增长，极大地推动了总装机容量的提升。晶硅(c-Si)电池技术因其高效率和相对较低的制造成本，长期占据了光伏市场超过 95% 的份额[5]。这不仅证明了晶硅电池技术的成熟与稳定，也反映出其在满足市场需求方面的巨大优势。高效且稳定的晶硅电池主导着光伏市场，其理论最高光电转换效率可达 29.4% [6]。随着研究者对晶硅电池持续的深入研究以及效率被不断刷新，高效单晶硅电池效率提升的空间被不断压缩。作为有前景的晶体硅技术之一，隧穿氧化物钝化接触(TOPCon)太阳能电池在设备效率和成本方面具有巨大优势，因此在光伏界和学术界都引起了广泛的关注[7]。其表现出优异的钝化特性，并且有着低接触电阻，使得实验上 TOPCon 太阳能电池的光电转换效率已能实现高达 26.0% [8]。

2. TOPCon 太阳能电池的基本原理

当太阳光照射到 TOPCon 太阳能电池的表面时，光子会与电池内部的半导体材料发生相互作用。这种相互作用导致半导体材料中的电子受到激发，从原子中被释放出来，形成光生电子 - 空穴对。光生电子 - 空穴对被分离并向正负电极移动。光生电子会被负极收集，而光生空穴则会被正极收集，从而形成电流。n 型 TOPCon 太阳电池的隧穿氧化层钝化接触结构的能带图如图 1 所示。

TOPCon 电池是一种基于载流子选择性收集钝化接触结构的高效电池，其通过在电池背面制备由隧穿氧化硅层(SiO_x)和重掺杂硅薄膜层(poly-Si)组成的叠层来实现。具体来说，氧化层薄膜可以提供高质量的化学钝化来钝化晶硅衬底的表面缺陷，掺杂的多晶硅层可以诱导能带弯曲，从而提供场钝化。对于氧化层，氧化层的厚度、密度和均匀性都会改变钝化质量。对于掺杂的多晶硅层，经高温退火后，杂质扩散进入衬底硅区域，氧化层下方形成的扩散区对载流子输运和复合行为起着重要的调节作用[9]。随着扩散层的引入，形成了与掺杂多晶硅诱导方向一致的有利电场，这种有利电场的存在可以在硅表面起到排

斥少数载流子而吸引多数载流子的作用，从而可以减少少数载流子的表面复合速率提升钝化效果同时加速多数载流子的迁移和提取提升电学接触性能。然而，过度的内扩散也会导致俄歇复合的损失，从而降低了钝化水平[10] [11] [12] [13]。

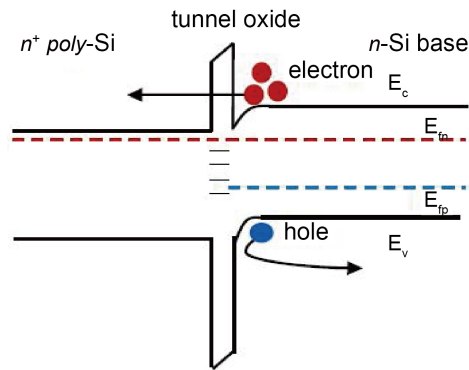


Figure 1. Band diagram of the tunnel oxide passivated contact structure for TOPCon solar cell [14]

图 1. n 型 TOPCon 太阳能电池隧穿氧化层钝化接触结构能带图[14]

3. TOPCon 太阳能电池的关键结构及制备技术

TOPCon 太阳能电池是一种高效的光伏器件，其结构精心设计，旨在最大化太阳能转换效率。其构造包含多个关键组件，每个组件都扮演着不可或缺的角色，n-TOPCon 太阳能电池的结构示意图如图 2 所示。

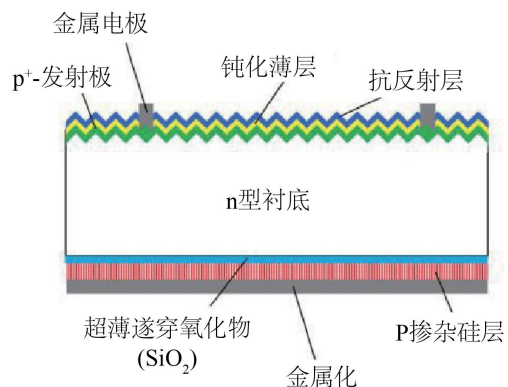


Figure 2. Schematic diagram of n-TOPCon solar cell structure [2]

图 2. n-TOPCon 太阳能电池结构示意图[2]

掺杂多晶硅在结构中主要是为了输运载流子，提供与金属之间低的接触电阻率[10] [15] [16]。而高掺杂浓度是保障低接触电阻率的基础，因此一般采用重掺杂多晶硅，这会导致能带在界面处发生高度弯曲，改变界面处的电场分布，从而在界面处产生场钝化效果。同时，由于高温退火时掺杂原子会发生扩散，进入硅体，高的掺杂浓度也可能增加硅体中杂质原子的量，从而增加硅体中载流子的俄歇复合，可能对钝化产生负面影响。隧穿氧化层位于硅衬底之上，这一层薄而坚固的氧化层起着至关重要的作用。它能够有效阻止电子和空穴的复合，从而提高电流的收集和传输效率。

超薄氧化硅层的氧化处理是 TOPCon 太阳能电池的关键制备技术之一[17]-[25]。Tong 等人报道了一种使用 3:1 比例的 HNO_3 和 H_2SO_4 酸性混合物来生长高质量隧道氧化硅层的方法,并将其应用于 n-TOPCon 太阳能电池作为钝化隧道接触[26]。这种方法制备的氧化层已经被证明具有非常低的界面缺陷态密度和优异的钝化效果[27]。Huang 等人开发了一种等离子体辅助 N_2O 气体氧化法制备超薄 SiO_x 层,该方法在 n 型晶体硅晶片上显示出良好的表面钝化效果,可应用于 n-TOPCon 太阳能电池[28]。该方法有效地利用了非平衡等离子体的反应特征,从根本上改变了反应体系的能量供给方式,从而通过反应气体放电来制备薄膜。Vossen 等人对不同生长方式的隧道氧化层进行了比较分析,并深入研究了接触电阻率和表面钝化情况[29]。

氧化硅的制备方法和制备条件会对其质量产生重要影响,因此选择合适的氧化硅制备方法、制备条件是得到高钝化效果的基础。Nabin 等人研究了热氧化法(TO)、化学氧化法(CO)和等离子体辅助氧化法(PO)三种不同制备超薄氧化层的制备方法[30]。为了衡量各氧化层的钝化质量,通过瞬态电光响应方法测量少数载流子寿命,通过电容-电压测试(CV)得到了界面态密度(N_{ss})。结果表明,与使用 CO、PO 制备相比,采用 TO 制备氧化层的 p 型和 n 型 TOPCon 太阳能电池,在氧化硅/硅的界面上产生的界面态密度都非常低,且寿命和隐含开路电压(iV_{oc})都是最高的。图 3 为界面缺陷态密度对寿命的依赖关系,使用 TO 氧化层的 n 型、p 型 TOPCon 太阳能电池的最高寿命分别为 $170 \mu\text{s}$ 和 $102.74 \mu\text{s}$ 。另外使用 X 射线光电子能谱(XPS)研究了氧化硅/硅界面的硅氧化态,结果证实 TO 氧化层中形成的稳定氧化物(SiO_2)更多。对于所有不同的晶体硅表面,TO 氧化层在三种氧化层中更胜一筹。

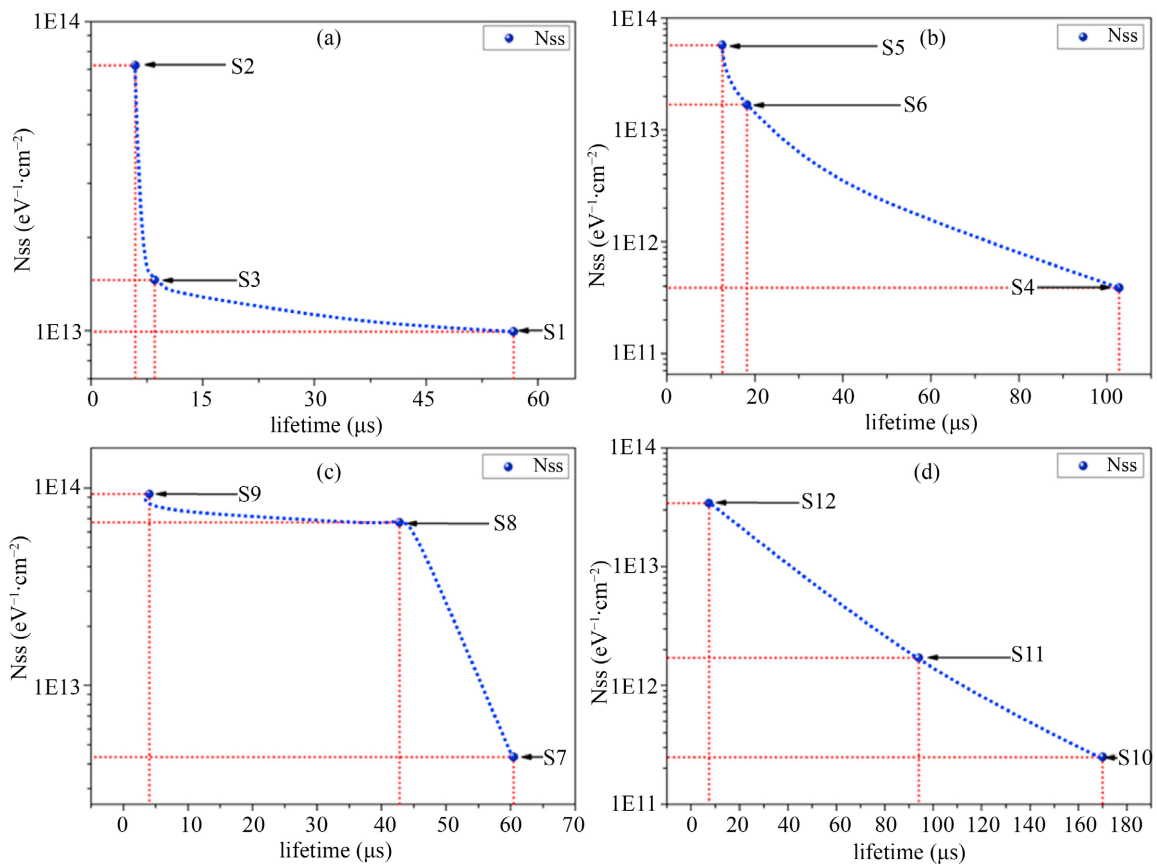


Figure 3. The dependency of interface trap state density on lifetime [30]

图 3. 界面缺陷态密度对寿命的依赖关系[30]

4. TOPCon 太阳能电池的研究现状与关键问题

TOPCon 太阳能电池由德国 Fraunhofer 研究所于 2013 年的 28th 欧洲 PVSEC 光伏大会上首次提出[31], 其由超薄隧穿氧化层和高浓度掺杂的多晶硅薄膜构成的结构可以提供良好的界面钝化, 最终电池 iV_{oc} 达到 690.4 mV, 填充因子(FF)也达到 81.9%。TOPCon 电池其采用多晶硅层, 需经过高温退火工艺使其晶化扩散。相比硅异质结电池(Heterojunction with Intrinsic Thin-layer, HIT)电池, TOPCon 电池还可以耐受高温工艺。TOPCon 太阳能电池的氧化层厚度约为 1~2 nm, 由于其键密度低, 缺陷态少, 能够在硅表面更好地饱和悬挂键。而在掺杂多晶硅中, 通过高温下的隧穿或针孔效应将掺杂源硼或磷经过超薄氧化硅层, 在硅中形成扩散场, 在场效应下抑制少子在表面聚集, 从而降低复合。TOPCon 太阳能电池还具有工艺窗口宽、工艺路线广等特点, 非常适合用来制备高效电池产品。

2014 年, Frank Feldmann 等人对 TOPCon 太阳电池进行了优化研究[7]。他们采用 Ag 电极替代 Ti 电极作为背电极, 解决了由于 Ti 电极强光寄生吸收导致短路电流密度(J_{sc})下降的问题。同时, 他们还将前金属电极与表面接触面积从 3%减少到 1.1%。在此基础上, 用 Pd/Ag 叠层替换原先的 Ti/Pd/Ag 叠层作为前金属电极, 显著降低了接触电阻, 从而减轻了高串阻对填充因子的影响[32]。最后, 在前金属电极区下方增加重掺杂发射极以阻挡少数载流子。尽管这增加了俄歇复合, 但同时也显著减少了金属-半导体接触的复合, iV_{oc} 提高到 714 mV, TOPCon 太阳电池的转换效率最终达到了 24.4%。2015 年, Fraunhofer ISE 公布了一项研究, 他们开发出面积为 4cm², 转换效率高达 25.1%的 TOPCon 电池[33]。电池背面采用了 TOPCon 结构和全面积的 Ag 电极, 正面采用选择性硼发射极结构, 并使用 ALD 沉积的氧化铝和 PECVD 沉积的 SiN_x 以钝化表面, 减少光反射。研究发现, TOPCon 电池的效率与衬底电阻率无关, 这意味着基于 TOPCon 结构具有更宽的起始材料掺杂浓度范围, 使 TOPCon 太阳能电池在工业生产中更具优势。一年半后, 他们基于 TOPCon 技术实现了双面接触单晶硅太阳能电池 25.7%的效率。2017 年有研究使用隧穿氧化层和丝网印刷结合的方法[34], 实现更高的硼发射极表面钝化, 最终在 239cm² 的商用级 n 型 Cz 晶圆上获得了 21.4%的电池效率。

2021 年 11 月, 中国科学院宁波研究所开发出一种新型多晶硅结构, 用于制作效率为 25.53% ($iV_{oc} = 700.7$ mV, $J_{sc} = 43.04$ mA/cm², $FF = 84.64\%$)的 TOPCon 概念验证电池, 突破了晶科能源和中来股份 2021 年 10 月份分别发布的 25.4%的国内效率纪录。该结构具有降低寄生吸收、增加钝化等优势, 展现出了巨大的产业应用潜力[35]。2022 年 12 月, 晶科能源采用渐变多晶硅膜层, 并利用其自主开发的体缺陷钝化技术及金属界面复合抑制技术等制备出面积大于 182 cm² 的 n 型高效单晶硅电池, 效率高达 26.4%, 并突破 TOPCon 转换效率记录[36]。

尽管 TOPCon 太阳能电池在研究中取得了显著成果, 但仍存在一些亟待解决的问题。学术界广泛讨论的有两种载流子传输理论, 即量子隧穿效应[37] [38] [39]和针孔(pinhole)理论[40] [41] [42] [43]。当微观粒子的能量小于势垒高度时, 这些粒子仍能以一定概率穿越势垒到达其另一侧。在微观尺度上, 粒子的位置和动量不能同时被精确测定。这意味着, 即使一个粒子的能量在经典力学中看来不足以穿越势垒, 由于在量子力学中粒子的能量具有一定的不确定性, 它仍有可能以一定的概率隧穿势垒。因此, 即使粒子的平均能量小于势垒高度, 但在极短的时间内, 粒子仍然有可能以一定的概率处于高能状态, 从而超过势垒高度并穿越势垒。当超薄隧穿氧化层的势垒空间跨度较小时, 这种量子隧穿效应的概率会相应增大。

另一种载流子传输理论是针孔理论。当隧穿氧化层的厚度超过 2 nm 时, 量子隧穿效应的概率会大大降低, 此时载流子主要通过针孔来进行传输。针孔是氧化层中的微小缺陷, 它们可以作为载流子的通道。然而, 当针孔数量过少时, 载流子的传输会受到限制, 导致电池性能下降。另一方面, 如果针孔数量过多, 则意味着氧化层的缺陷过多, 这会导致氧化层的化学钝化效果降低。因此, 在这种传输机制下, 对氧化硅的质量要求非常高, 以确保针孔的数量和分布能够满足电池性能的需求。

另一方面，高温处理过程中，掺杂原子会穿越氧化层进入硅片，形成一个近表面重掺杂区。然而，该区域对载流子的输运、分离与收集的影响规律至今仍不清楚。最后，如何进一步优化隧穿氧化层和多晶硅层的材料结构和制备工艺，以提高界面的稳定性和钝化效果，以及如何进一步提升 TOPCon 太阳能电池的光电转换效率和长期稳定性，以满足实际应用的需求，也是需要解决的问题。针对这些问题，未来的研究可以从以下几个方面展开：

1) 深入研究量子隧穿效应和针孔传输机制，以揭示它们在 TOPCon 太阳能电池中的具体作用，为电池性能的优化提供理论依据。

2) 探索高温处理过程中掺杂原子对近表面重掺杂区的影响，明确其对载流子输运规律，为电池的制备工艺提供指导。

3) 优化隧穿氧化层和多晶硅层的材料结构和制备工艺，提高界面的稳定性和钝化效果，为提升 TOPCon 太阳能电池的光电转换效率和长期稳定性奠定基础。

4) 开展综合性实验研究，结合理论分析和模拟计算，全面评估 TOPCon 太阳能电池的性能表现，为实际应用提供可靠的技术支持。

5) 研究新的制备工艺技术，以降低生产成本并提高电池性能。

6) 建立更加完善的评价体系，对 TOPCon 电池的长期稳定性和可靠性进行全面评估。

通过深入研究载流子传输机制、高温处理过程以及材料结构和制备工艺的优化等方面，有望为 TOPCon 太阳能电池的性能提升和实际应用提供有力的支撑。

5. 总结与展望

TOPCon 太阳能电池可以有效减少光生载流子的复合损失，提升电池的光电转换效率，有着优良的钝化特性以及产业兼容性。TOPCon 太阳能电池在科研探索中展现出了令人瞩目的成果，然而，仍然存在一些物理机制问题需要我们去面对和解决。另外，在生产过程中的工艺复杂性和设备成本较高以及在实际应用中的长期稳定性仍需进一步提高。为了解决这些问题，需要不断深入研究，探索新的工艺、材料和结构，以推动 TOPCon 太阳能电池技术的进一步发展和应用。此外，钙钛矿电池作为一种新兴的太阳能电池技术[44] [45] [46]，同样具有极高的光电转换效率和巨大的发展潜力，TOPCon 电池的全区域钝化特性使其能够与钙钛矿电池实现优异的结合，形成高效叠层电池[47] [48]。这种叠层电池能够充分利用两种电池技术的优势，实现光电转换效率的大幅提升。通过精确控制叠层电池的结构和工艺参数，可以进一步优化电池性能，提高太阳能电池的整体效率。这一技术革新在未来的太阳能电池效率提升中扮演着至关重要的角色，将为 TOPCon 太阳能电池技术的发展和实际应用提供强有力的支持，推动其在可再生能源领域的广泛应用，为实现绿色、可持续的能源未来贡献力量。

参考文献

- [1] 姚玉璧, 郑绍忠, 杨扬, 等. 中国太阳能资源评估及其利用效率研究进展与展望[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 524-535.
- [2] 张云龙, 陈新亮, 周忠信, 等. 晶体硅太阳能电池研究进展[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 49-60.
- [3] 陈俊帆, 赵生盛, 高天, 等. 高效单晶硅太阳能电池的最新进展及发展趋势[J]. 材料导报, 2019, 33(1): 110-116.
- [4] 任程超, 周佳凯, 张博宇, 等. 基于隧穿氧化物钝化接触的高效晶体硅太阳能电池的研究现状与展望[J]. 物理学报, 2021, 70(17): 294-304.
- [5] Yan, D., Cuevas, A., Michel, J.I., *et al.* (2021) Polysilicon Passivated Junctions: The Next Technology for Silicon Solar Cells? *Joule*, **5**, 811-828. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.013>
- [6] Richter, A., Hermle, M. and Glunz, S.W. (2013) Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, **3**, 1184-1191. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2270351>

- [7] 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>
- [8] 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>
- [9] Steinkemper, H., Feldmann, F., Bivour, M., *et al.* (2015) Theoretical Investigation of Carrier-Selective Contacts Featuring Tunnel Oxides by Means of Numerical Device Simulation. *Energy Procedia*, **77**, 195-201. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.027>
- [10] Wagner, H., Dastgheib-Shirazi, A., Min, B., *et al.* (2016) Optimizing Phosphorus Diffusion for Photovoltaic Applications: Peak Doping, Inactive Phosphorus, Gettering, and Contact Formation. *Journal of Applied Physics*, **119**, Article 185704. <https://doi.org/10.1063/1.4949326>
- [11] Nogay, G., Stuckelberger, J., Wyss, P., *et al.* (2017) Interplay of Annealing Temperature and Doping in Hole Selective Rear Contacts Based on Silicon-Rich Silicon-Carbide Thin Films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **173**, 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.06.039>
- [12] Nemeth, B., Young, D.L., Page, M.R., *et al.* (2016) Polycrystalline Silicon Passivated Tunneling Contacts for High Efficiency Silicon Solar Cells. *Journal of Materials Research*, **31**, 671-681. <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.77>
- [13] He, J., Wang, W., Cai, L., *et al.* (2020) Stable Electron-Selective Contacts for Crystalline Silicon Solar Cells Enabling Efficiency over 21.6%. *Advanced Functional Materials*, **30**, Article 2005554. <https://doi.org/10.1002/adfm.202005554>
- [14] Tao, Y., Upadhyaya, V., Jones, K., *et al.* (2016) Tunnel Oxide Passivated Rear Contact for Large Area *n*-Type Front Junction Silicon Solar Cells Providing Excellent Carrier Selectivity. *AIMS Materials Science*, **3**, 180-189. <https://doi.org/10.3934/mat.2016.1.180>
- [15] Feldmann, F., Schön, J., Niess, J., *et al.* (2019) Studying Dopant Diffusion from Poly-Si Passivating Contacts. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **200**, Article 109978. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109978>
- [16] Wu, H., Nguyen, H.T., Yan, D., *et al.* (2020) Micro-Photoluminescence Studies of Shallow Phosphorus Diffusions below Polysilicon Passivating Contacts. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **218**, Article 110780. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110780>
- [17] Himpsel, F.J., Mcfeely, F.R., Taleb-Ibrahimi, A., *et al.* (1988) Microscopic Structure of the SiO₂/Si Interface. *Physical Review B*, **38**, 6084-6096. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.38.6084>
- [18] Grunthaner, F.J. and Grunthaner, P.J. (1986) Chemical and Electronic Structure of the SiO₂/Si Interface. *Jet Propulsion*, **86**, 65-153. [https://doi.org/10.1016/S0920-2307\(86\)80001-9](https://doi.org/10.1016/S0920-2307(86)80001-9)
- [19] Hirose, K., Nohira, H., Azuma, K., *et al.* (2007) Photoelectron Spectroscopy Studies of SiO₂/Si Interfaces. *Progress in Surface Science*, **82**, 3-54. <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2006.10.001>
- [20] Jahanshah Rad, Z., Lehtiö, J.P., Chen, K., *et al.* (2022) Effects of Post Oxidation of SiO₂/Si Interfaces in Ultrahigh Vacuum below 450°C. *Vacuum*, **202**, Article 111134. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111134>
- [21] Stegemann, B., Gad, K.M., Balamou, P., *et al.* (2017) Ultra-Thin Silicon Oxide Layers on Crystalline Silicon Wafers: Comparison of Advanced Oxidation Techniques with Respect to Chemically Abrupt SiO₂/Si Interfaces with Low Defect Densities. *Applied Surface Science*, **395**, 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.06.090>
- [22] Grant, N.E. and McIntosh, K.R. (2009) Passivation of a (100) Silicon Surface by Silicon Dioxide Grown in Nitric Acid. *IEEE Electron Device Letters*, **30**, 922-924. <https://doi.org/10.1109/LED.2009.2025898>
- [23] Fukaya, Y., Yanase, T., Kubota, Y., *et al.* (2010) Low Temperature Fabrication of 5-10 nm SiO₂/Si Structure Using Advanced Nitric Acid Oxidation of Silicon (NAOS) Method. *Applied Surface Science*, **256**, 5610-5613. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.03.032>
- [24] Stegemann, B., Balamou, P., Lussy, T., *et al.* (2018) Passivation of Crystalline Silicon Wafers by Ultrathin Oxide Layers: Comparison of Wet-Chemical, Plasma and Thermal Oxidation Techniques. 2018 *IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, Waikoloa, 10-15 June 2018, 2779-2782. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8548154>
- [25] Gao, M., Kumar, V., Schoenfeld, W., *et al.* (2023) UV-Ozone Oxide for Surface Clean, Passivation, and Tunneling Contact Applications of Silicon Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, **13**, 385-390. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2023.3244370>
- [26] Tong, H., Liao, M., Zhang, Z., *et al.* (2018) A Strong-Oxidizing Mixed Acid Derived High-Quality Silicon Oxide Tunneling Layer for Polysilicon Passivated Contact Silicon Solar Cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **188**, 149-155. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.09.001>
- [27] Baek, J.H., Jeong, M.J., Hu, W., *et al.* (2019) Passivation Improvement of Nitric Acid Oxide by Ozone Post-Treatment

- for Tunnel Oxide Passivated Contacts Silicon Solar Cells. *Applied Surface Science*, **489**, 330-335. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.369>
- [28] Huang, Y., Liao, M., Wang, Z., *et al.* (2020) Ultrathin Silicon Oxide Prepared by In-Line Plasma-Assisted N₂O Oxidation (PANO) and the Application for N-Type Polysilicon Passivated Contact. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **208**, Article 110389. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110389>
- [29] Van Der Vossen, R., Feldmann, F., Moldovan, A., *et al.* (2017) Comparative Study of Differently Grown Tunnel Oxides for p-Type Passivating Contacts. *Energy Procedia*, **124**, 448-454. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.273>
- [30] Chandra Mandal, N., Biswas, S., Acharya, S., *et al.* (2020) Study of the Properties of SiO_x Layers Prepared by Different Techniques for Rear Side Passivation in TOPCon Solar Cells. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **119**, Article 105163. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105163>
- [31] Feldmann, F., Bivour, M., Reichel, C., *et al.* (2013) A Passivated Rear Contact for High-Efficiency n-Type Silicon Solar Cells Enabling High V_{ocs} and FF > 82%. *28th European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Paris, 30 September-4 October 2013, 988-992.
- [32] Benick, J., Hoex, B., Van de Sanden, M.C.M., *et al.* (2008) High Efficiency N-Type Si Solar Cells on Al₂O₃-Passivated Boron Emitters. *Applied Physics Letters*, **92**, 3-6. <https://doi.org/10.1063/1.2945287>
- [33] Glunz, S.W., Feldmann, F., Richter, A., *et al.* (2015) The Irresistible Charm of a Simple Current Flow Pattern-25% with a Solar Cell Featuring a Full-Area Back Contact. *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Hamburg, 259-263. <https://userarea.eupvsec.org/proceedings/EU-PVSEC-2015/2BP.1.1/>
- [34] Larionova, Y., Turcu, M., Reiter, S., *et al.* (2017) On the Recombination Behavior of p⁺-Type Polysilicon on Oxide Junctions Deposited by Different Methods on Textured and Planar Surfaces. *Physica Status Solidi*, **214**, Article 1700058. <https://doi.org/10.1002/pssa.201700058>
- [35] 宁波材料所开发出效率 25.53% 的新型隧穿氧化硅钝化接触(TOPCon)晶硅太阳能电池[EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/ObynSRtllRz-chTKg4rmMw>, 2024-04-29
- [36] 26.4%! Jinkosolar 182TOPCon Battery Conversion Efficiency Reached a New High. <https://www.jinkosolar.com/site/newsdetail/1387>
- [37] Feldmann, F., Bivour, M., Reichel, C., *et al.* (2014) Tunnel Oxide Passivated Contacts as an Alternative to Partial Rear Contacts. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **131**, 46-50. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.06.015>
- [38] Feldmann, F., Simon, M., Bivour, M., *et al.* (2014) Efficient Carrier-Selective p- and n-Contacts for Si Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **131**, 100-104. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.05.039>
- [39] Tao, Y., Madani, K., Cho, E., *et al.* (2017) High-Efficiency Selective Boron Emitter Formed by Wet Chemical Etch-Back for N-Type Screen-Printed Si Solar Cells. *Applied Physics Letters*, **110**, Article 021101. <https://doi.org/10.1063/1.4973626>
- [40] 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>
- [41] 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>
- [42] 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>
- [43] 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 253902. <https://doi.org/10.1063/1.4986924>
- [44] 杨航, 赵建红, 张瑾, 等. 钙钛矿太阳能电池中电子传输层研究进展[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2023, 45(2): 465-474.
- [45] Cheng, W., Zhou, R., Peng, S., *et al.* (2024) Research on Passivation of Perovskite Layer in Perovskite Solar Cells. *Materials Today Communications*, **38**, Article 107879. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107879>
- [46] Xiong, S., Chu, J. and Bao, Q. (2023) Modulation of Perovskite Surface Energetics for State-of-the-Art Solar Cells. *Solar RRL*, **7**, Article 2300458. <https://doi.org/10.1002/solr.202300458>
- [47] Liu, N., Wang, L., Xu, F., *et al.* (2020) Recent Progress in Developing Monolithic Perovskite/Si Tandem Solar Cells. *Frontiers in Chemistry*, **8**, Article 603375. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.603375>
- [48] Zhu, Z., Mao, K. and Xu, J. (2021) Perovskite Tandem Solar Cells with Improved Efficiency and Stability. *Journal of Energy Chemistry*, **58**, 219-232. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.09.022>