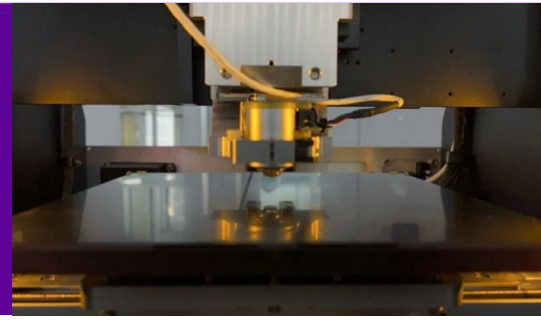


TOPCon 太阳能电池片的方阻测试

KLA Instruments™ Filmetrics® R54® 系列



简介

在全球各国努力减少碳足迹与追寻可持续能源的大背景下，太阳能行业经历了显著增长。在基于晶体硅 (c-Si) 的多种工艺路线中，隧穿钝化接触太阳能电池 (TOPCon) 因其高光伏转换效率 (PCE) 和高性价比而脱颖而出。目前工业 TOPCon 电池的最高 PCE 已达到 25.42% (2024 年 6 月 JinkoSolar 公开数据)，接近约 29% 的理论极限。对于更高 PCE 的追求同时对工艺控制和监测也是新的挑战。

太阳能电池的性能表现取决于导电性、接触电阻和复合速率之间的精细平衡，而这些参数都受到掺杂浓度的高度调控，因此监控掺杂浓度对于控制 TOPCon 工艺质量至关重要。一些测试方法诸如载流子寿命测量和荧光成像技术，都可将微波或光学信号转换为载流子浓度信息。然而，这些间接测试方法需要复杂的校准步骤，且容易受到外部干扰的影响。相比之下，四探针 (4PP) 测量的方块电阻 (R_s) 可以直接提供载流子迁移率和接触电阻等电学特性，这使其成为 TOPCon 工艺中不可或缺的监控手段。

自 1984 年推出首个四探针系统以来，KLA 在电阻率测量方面积累了超过 40 年的创新经验，其方块电阻测量系统在半导体行业中广受认可。来自 KLA Instruments™ Filmetrics® 的 R54 方块电阻测绘仪是一种桌面式方阻测量系统，配备了 KLA 最新的方阻测试探头和测试电路。本文将介绍四探针测量技术和最新的 TOPCon 太阳能电池工艺，多种 TOPCon 工艺中实测的方阻结果都揭示了 R54 是 TOPCon 工艺监测的优秀解决方案。

太阳能电池片的四探针方阻测试

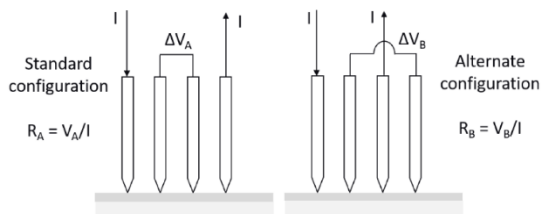


图 1. 标准配置 (左) 与交叉配置 (右) 的测试探头分布示意图。

四探针方阻测试技术因其简单的测试原理和高度的准确性而广受欢迎，已有超过 100 年的使用历史。在四探针测试过程中，电流经过两个与样品界面接触的针脚流入样品，由另外两个与样品表面接触

的针脚测试电压，如图 1 所示。标准测量配置 (图 1 左) 适用于远离样品边缘的测试区域，对于靠近样品边缘区域的测量，可以在标准测试配置的基础上额外进行交叉测试配置 (图 1 右) 的测量。边缘效应可通过对两种测试配置下获得的电阻 R_A 和 R_B 添加校准系数来消除。

除了常见的四探针配置外，R54 还配备了额外几项关键功能，使其在测试太阳能电池时具有显著优势，包括：

- 不透光的测试腔体 (图 2.a) 抑制了光电流的产生。
- 特殊设计的方形载物台 (图 2.b) 可适配方形太阳能电池片。
- 兼容所有 KLA 方阻测试探头。
- 基于给定目标电压的自动电流调节功能。
- 对边缘效应与探头形状因子的动态校准。

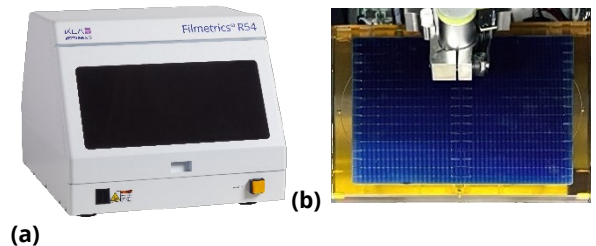


图 2 (a) R54 方阻测绘系统 (b) 专为太阳能电池片设计的方形载物台

TOPCon 太阳能电池---结构与工艺

TOPCon 太阳能电池由 n 型掺杂单晶硅制备而来，在硅片两面均分布有多层结构 (图 3)。在 TOPCon 电池正面的制绒硅表面上制备有 p 型发射极，用于产生光生载流子；发射极被复合钝化层覆盖，以减少复合速率，TOPCon 电池的正面涂覆有 SiN_x 减反 (AR) 层，印有金属电极。TOPCon 的背面制备有 SiO_x/n 型多晶硅界面的钝化

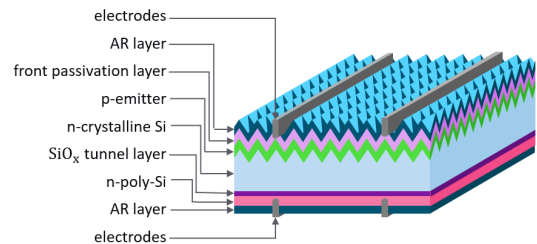


图 3. TOPCon 太阳能电池的结构

层，该层可增加特定载流子的隧穿机率并屏蔽另一种载流子。钝化层可减少界面符合率并提高开路电压，从而提高电池效率。

图 4 展示了目前的 TOPCon 工艺流程。n 型单晶硅电池片的表面先经过碱制绒过程形成金字塔结构，硼掺杂发射极被制备于制绒表面，形成 n 型衬底的 p-n 结，随后的氧化过程进一步增强硼原子注入并调整结深。硅片的背面经过酸洗和碱抛的过程，形成平整的硅表面。在清理完残液后，超薄的氧化隧穿层(SiO_x)被通过热蒸镀的过程制备在电池片的背面，随后磷掺杂的多晶硅被制备与隧穿层上，形成钝化接触结构，最终通过退火工艺稳定杂质分布并锁定诸如钠或钾等有害离子。TOPCon 工艺的剩余步骤与 PERC 或其他基于单晶硅的太阳能片制备技术类似：通过缓冲氧化物刻蚀工艺(BOE)去除多余的氧化层并暴露出硅片两侧新鲜的硅表面，之后依次制备正面钝化接触层与减反层。TOPCon 工艺的最后需要完成正面的金属化，通过激光辅助烧结的技术可以增强银浆在表面的附着，同时可以提高电极区域掺杂浓度以减少接触电阻，这一过程被称为“激光辅助接触优化”。

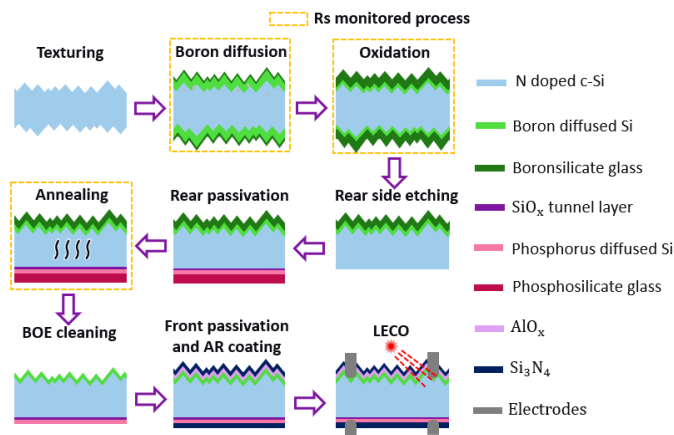


图 4. TOPCon 工艺流程图

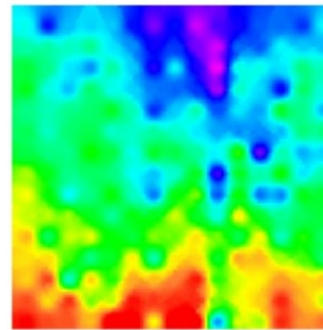
基于 KLA R54 的方阻监控

在 TOPCon 产线上中，硼扩散、氧化和退火工艺均涉及直接掺杂或热处理过程，这些过程会改变样品的掺杂水平，因此对这些阶段的精准方阻监控至关重要。KLA R54 方阻测绘系统可胜任这三项工艺中的方阻监控任务。

TOPCon 太阳能电池的方阻测绘

方阻测绘可以直观地提供掺杂均匀性的空间分布信息，通过对整个晶圆的方阻分布进行测绘，制造商能够识别掺杂非均匀区域、缺陷、以及计划外的绕镀。

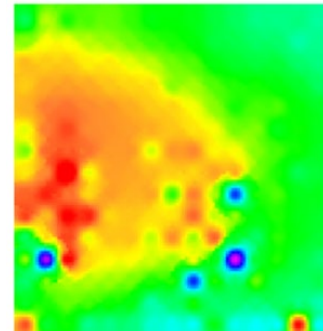
R54 可在 200x200mm 的测试范围内自定义测试图案。图 5 展示了硼扩、氧化和退火工艺后的 TOPCon 电池片的 225 点方阻测绘结果。测试探头可刺破表面氧化层以准确测量方阻。硼掺杂过程比磷扩散过程更加复杂，因此硼扩与氧化片的方阻分布范围较退火片更大。



Boron Diffusion

Rs: 100~250 Ohm/sq.

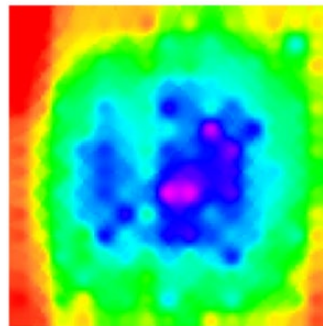
Std.Dev:	3.8577
Range:	19.205
Uniformity:	+/- 4.5898 %
CTE:	2.0014
Wedge:	14.289
Wedge Ang:	-100.71°
Valid:	225/225
Alarmed:	N/A



Oxidation

Rs: 250~450 Ohm/sq.

Std.Dev:	6.5941
Range:	49.76
Uniformity:	+/- 5.7578 %
CTE:	-9.6781
Wedge:	15.001
Wedge Ang:	160.82°
Valid:	225/225
Alarmed:	N/A



Annealing

Rs: 40~100 Ohm/sq.

Std.Dev:	1.4306
Range:	6.9907
Uniformity:	+/- 7.0877 %
CTE:	5.1016
Wedge:	1.7303
Wedge Ang:	165.55°
Valid:	225/225
Alarmed:	N/A

图 5 在 (a) 硼扩 (b) 氧化 (c) 退火工艺中的 225 点方阻测绘图。

在方阻测绘完成后，R54 的软件界面可显示方阻的统计值。对于工艺控制而言，平均值和均匀性是工艺控制中最重要的两项统计参数。R54 软件显示的均匀性定义为太阳能产业内广泛使用的版本

$$\left[\frac{\text{方阻最大值} - \text{方阻最小值}}{2 * \text{方阻平均值}} \right]$$

方阻测试可靠性

大多数 TOPCon 生产线已经集成了在线方阻监控工具，这边要求用高度精准且稳定的离线标准机台来确保所有在线监控设备的精准校准和匹配。R54 的测量可靠性已经由重复性数据与长期稳定性数据验证，使其成为了太阳能行业最具竞争力的方阻标准测试设备之一。

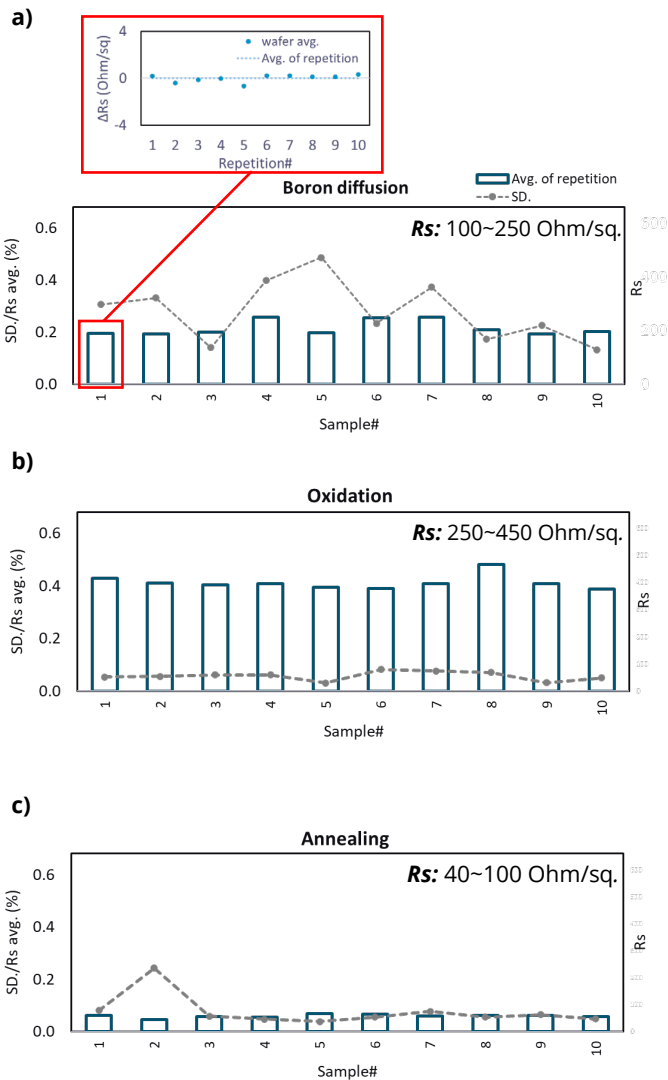


图 6 (a) 硼扩, (b) 氧化, 和 (c) 退火样品上测试的测量重复性。图 6. a 中的放大视图展现了 10 次连续测量过程中的方阻波动。

在 R54 方阻测量的重复性测试中, 我们对各工艺阶段的 10 片晶圆进行 10 次重复测试, 并计算每次测量的晶圆平均方阻。重复性通过单片平均方阻值的标准差来表示 (图 6.a 中的放大视图展示了重复测试中的方阻波动情况)。硼扩工艺中 (图 6.a) 的方阻测试重复性值低于方阻均值的 0.5%, 氧化 (图 6.b) 和退火 (图 6.c) 工艺的方阻测试重复性值均低于平均方阻的 0.3%。这些值均远优于工艺的监控阈值。

R54 的长期稳定性测试对不同工艺阶段的样品进行了为期 4 周的方阻监控。结果如图 7 所示。来自 3 种工艺的 15 个样品显示, 4 周内方阻的变化均低于晶圆平均值的 1%, 测得的长期稳定在样品自然方阻波动范围内。重复性和长期变化的数据总结如表 1 所示:

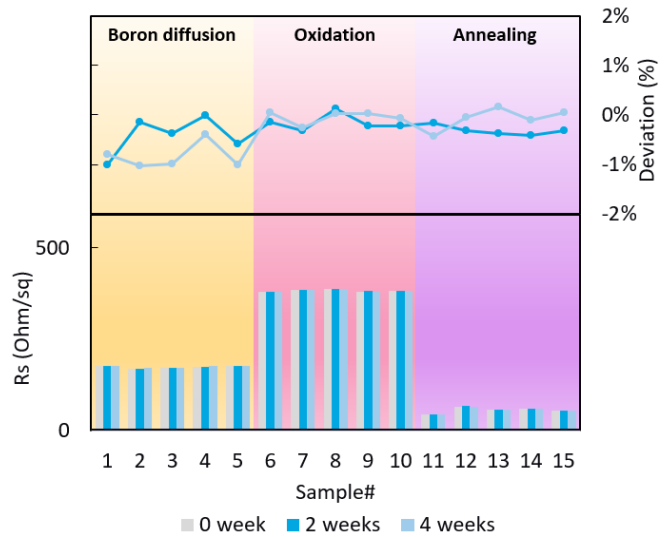


图 7. 太阳能电池片方阻测试的长期稳定性

表 1. R54 在工艺过程中测得的方阻重复性和长期变化

工艺过程	重复性	长期波动
硼扩	0.3%	1.0%
氧化	0.1%	0.2%
退火	0.1%	0.1%

结论

TOPCon 技术正在不断突破晶硅光伏效率的极限, 而精准的方阻监控对于高质量工艺控制至关重要。KLA Instruments™ Filmetrics® 的 R54 方块电阻测绘仪提供了全面的方阻测试功能, 并具有优异的重复性和长期稳定性。该设备可完全满足 TOPCon 太阳能电池方阻测量的需求, 其性能已在实际生产中得到验证。

参考文献

- [1] F. Feldmann, M. Bivour, C. Reichel, M. Hermle, and S. W. Glunz, "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*, vol. 120, pp. 270-274, Jan. 2014.
- [2] A. Richter, M. Hermle, and S. W. Glunz, "Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 3, no. 4, pp. 1184-1191, Oct. 2013.