

同时实现高效双面硅太阳能电池的最高生产率和最高精度伏安 (IV) 测量

摘要：我们使用太阳模拟器分析了以最高生产率生产硅太阳能电池时可用的测量时间，并阐述了该时间在确定太阳能电池特性所必需执行的不同测量之间的分布方式。针对高效太阳能电池，我们详细说明了“如何减少确定其 IV 特性所需的测量时间以便在所有情况下皆满足生产率要求”。我们发现，通过结合使用电压扫描速度自适应和增强型磁滞评估，可在不牺牲测量精度的同时获得最高生产率，即便对于容量最高的异质结 (HJ) 电池也是如此。

简介

现代太阳能电池生产线生产率极高，生产周期低至 1 秒或不到 1 秒。在不久的将来，单条太阳能电池测试仪和分选机生产线上须实现低至 800 毫秒的生产周期（相当于高达 4500 片电池/小时的生产率）。

为实现如此短的生产周期，传输和测量时间需满足严格要求。

同时，随着硅太阳能电池效率的不断提

高，有效电荷载流子寿命日益变长，使得电池容量不断增大。由此，设备由于工作条件改变后达到准稳态条件所需的时间也随之增加，这是精确测量太阳能电池额定功率的先决条件。在 IV 测量期间，施加的电压从 0 V 变为开路电压甚至更高，即工作条件发生巨大改变。

因此，在 n 型材料上测量高开路电压电池（如 HJ 电池或 TopCon 电池）之稳态 IV 曲线所需的时间可能会达几秒钟。而

双面太阳能电池技术的最新突破还带来另一个挑战。除标准测试条件下 (STC 前侧) 进行的亮场 IV 测量之外，太阳能电池生产中例行执行的测量进一步涵盖了 STC 后侧和真正的双面测量，从而使得亮场 IV 测量时间增至三倍。

所需测量时间长、所需测量类型越来越多及所需生产率高这三大要求彼此呈现出目标上的冲突。而牺牲测量精度的解决方案并不可取。因此，只有使用更先进的解

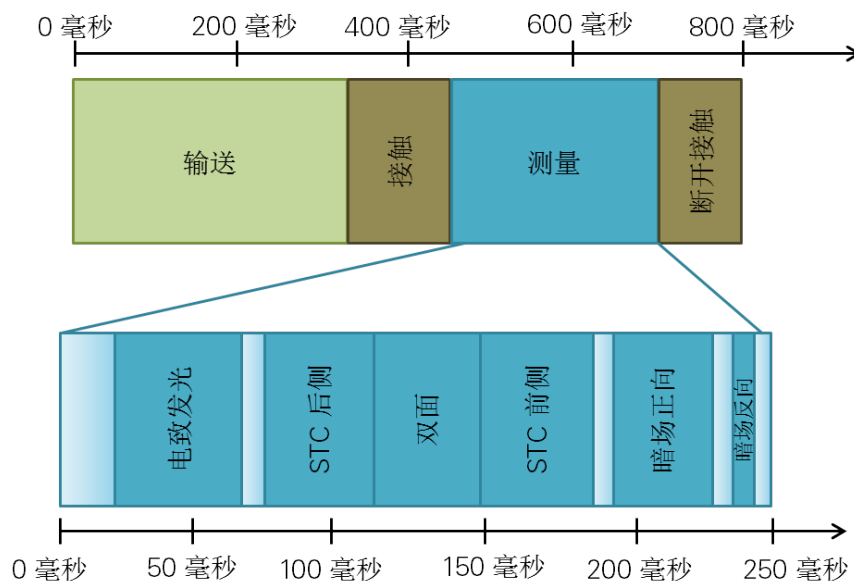
决方案才能解决这种目标上的冲突。

我们分析了现代双面设备以最高生产率生产时可用的亮场 IV 测量时间，并阐释了能在可用时间内获得精确稳态 IV 曲线的测量策略（即使是容量最大的 HJ 电池，该等策略依旧适用）。

时序分析

图 1 显示了一个完整的测量周期，包括在典型的太阳模拟器工作台上进行 IV、电致发光 (EL) 或热斑测量等电性测量所需的处理时间。该周期分为不同的任务，需依次执行。首先，需将电池输送到测量位置，随后需闭合接触元件，以实现测量所需的电接触。

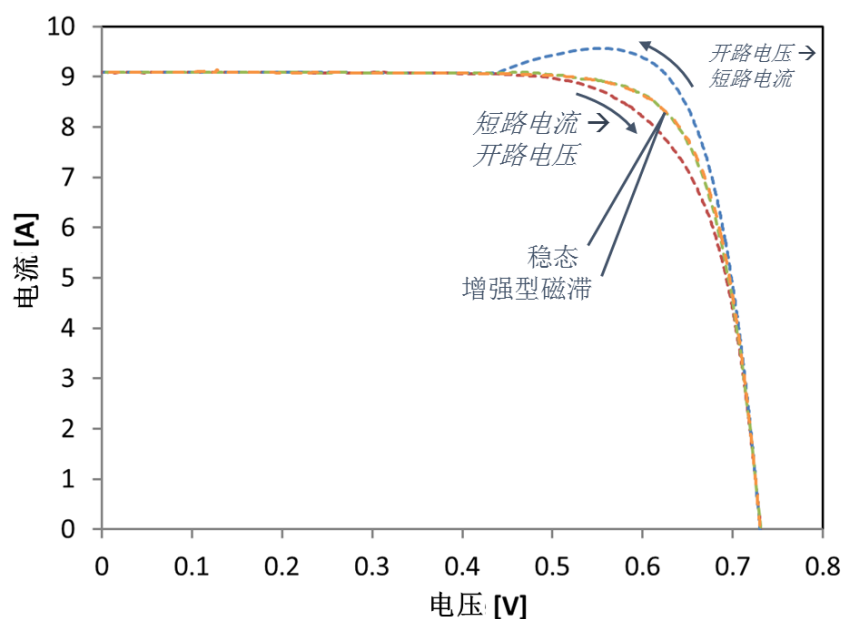
实际测量需在测量时间（接触元件闭合、电池保持不动）内完成。最后，再次打开接触元件。当下一个电池被输送至测量位置时，下一个周期随之启动。由于机械限制，电池的输送和接触时间无法无休止地缩短。在现代生产线中，就尺寸为 210 毫米的电池而言，在 550 毫秒内完成这三个步骤已经是机械可行性范围内能实现的最好结果。



© halm

图 1: a) 生产中太阳能电池 IV 测量周期的时间分解。一个周期包括输送、接触、测量和断开接触步骤。

b) 底部草图显示了测量步骤经拆分后的不同测量类型。深蓝色标记的时间跨度代表净测量时间，而浅蓝色标记的时间跨度则表示在不同测量类型之间切换所需的额外时间。



© halm

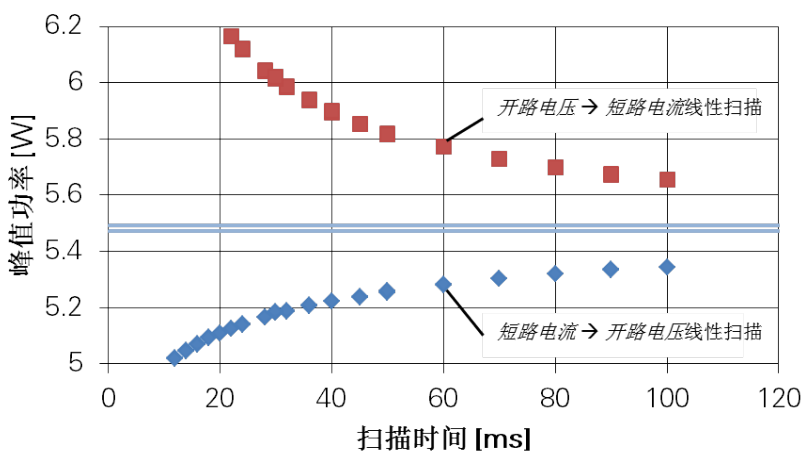
图 2: 高效太阳能电池（开路电压为 734 mV）的电流-电压特性。短路电流 → 开路电压和开路电压 → 短路电流扫描在 28 毫秒内执行。正文中解释了该等曲线相较于稳态曲线发生偏离的根本原因。

步骤	时间 [毫秒]
输送	330
接触	120
测量	250
断开接触	100
总计	800

表 1: 太阳能电池测量周期的时间分解示例。处理时间总计长达 550 毫秒，留给实际测量的时间为 250 毫秒。假定总生产周期为 800 毫秒（4500 片电池/小时）。

电池被输送需要 330 毫秒，接触需要 120 毫秒，断开接触需要 100 毫秒。这给所有测量留出长达 250 毫秒的时间。请注意，550 毫秒的处理时间只是一个假定的最佳值。

250 毫秒的测量时间实现的生产率为 4500 片电池/小时。显然，测量时间越长，生产率就越低，而测量时间缩短则会提高生产率。



© halm

图 3：使用线性电压斜升扫描长达 100 毫秒得到的 HJ 太阳能电池 IV 测量结果。

在确定双面太阳能电池特性所必需的测量中，最为先进且允许实施过程和质量控制的测量包括：

- 双面电池的 3 级亮场 IV (STC 后侧、真正双面、STC 前侧) 测量，
- 暗场正向 IV 测量，
- 暗场反向 IV 测量，以及
- 电致发光测量。

由于总测量时间仅有 250 毫秒，留给三级亮场 IV 测量和暗场正向测量 (该等测量受到电池容量的影响) 的时间不超过约 40 毫秒。这为反向 IV 和 EL 测量、不同测量之间的切换以及握手式通信留出了大约 90 毫秒的时间。

图 1b 显示了 250 毫秒的总测量时间在不同单项测量以及切换时间和通信时间之间的分布情况。由于数据评估是与处理过程并行执行的，因此图中并未显示数据评估时间。

测量策略

在下文中，我们将重点阐述如何优化亮场和暗场正向 IV 测量的测量时间。高效太阳能电池的电流-电压特性如图 2 所示。该图显示了以 0 V 至开路电压的正向电压扫描 (短路电流 → 开路电压) 和开路电压至 0 V 的反向电压扫描 (开路电压

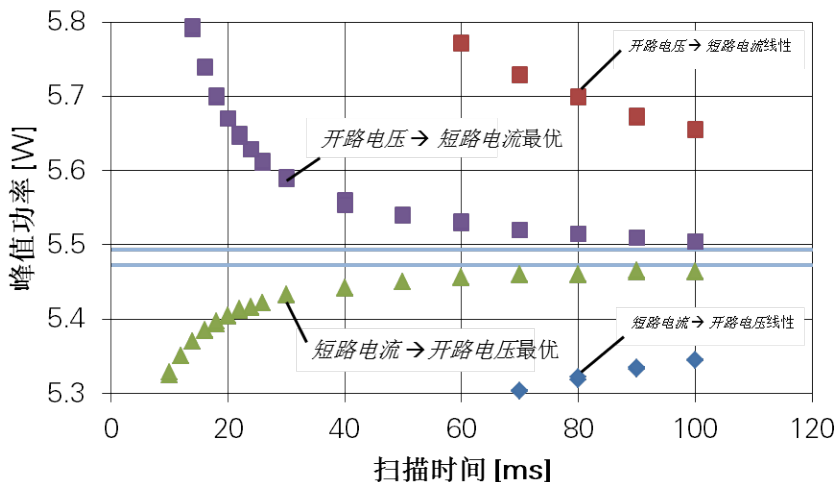
→ 短路电流) 进行测量时的 IV 曲线。

此外，其还显示了稳态 IV 曲线。与稳态曲线相比，短路电流 → 开路电压曲线显示出较低的填充因子 (FF)，开路电压 → 短路电流曲线显示出较高的填充因子 (FF)。这可归因于存储在硅体积中的少数电荷

载流子，通常称为电池电容。因此，该电池电容不是恒定的，而是会随电池电压而变化。在电压扫描期间，当电压增加时，该电容会随之充电，故而，该电池电容充电所需的电流就不会传递到电池端子。类似地，当电压降低时，该电池电容也会随之放电。

放电电流会另行传递到电池端子，故而在相同工作条件下测量到的电流值便会高于稳态值。由于这种影响可归因于电池电容，因此，随着电池电容的增加和扫描速度的加快，测得的 IV 曲线与稳态曲线之间的差异也会增大。由于高生产率测量所需的扫描速度很快，因此，需要通过一种先进的解决方案来实施高效太阳能电池的精确 IV 测量。

为分析上述时间限制下的测量精度，我们在短路电流 → 开路电压扫描和开路电压 → 短路电流扫描这两种情况下对 HJ 电池进行了 IV 测量，并将测量结果作为 IV 测量时间的函数。该电池的开路电压为 734 mV，因此具有很高的电容。测量结果如图 3 所示。两条水平线代表所需的精度水平，即在稳态效率附近按 +/- 0.2 % 波动。



© halm

图 4：使用最佳非线性和线性扫描设置在单扫描测量中测得的峰值功率值。即使在扫描时间为 100 毫秒时，依旧无法达到所需的精度，而在扫描时间为 40 毫秒时，偏差仍大于 1%。

理想情况下，测量结果应位于这两条线之间。否则，将无法满精度要求。从图中显然可以看出，即使测量时间长达 100 毫秒，所有测量结果也都远在这两条线之外。而当测量时间为 40 毫秒（即上述确定的测量时间限值）时，观察到的与稳态值之间的偏差则大于了 4.5%，远不符合任何精度要求。

有时，建议可在测量期间调整电压扫描速度，以获得更精确的测量结果。建议首先在接近峰值电压时降低扫描速度，以减少瞬态效应，随后在低电压时提高扫描速度。这种方法可以减小稳态测量结果与瞬态结果之间的偏差，如图 4 所示。

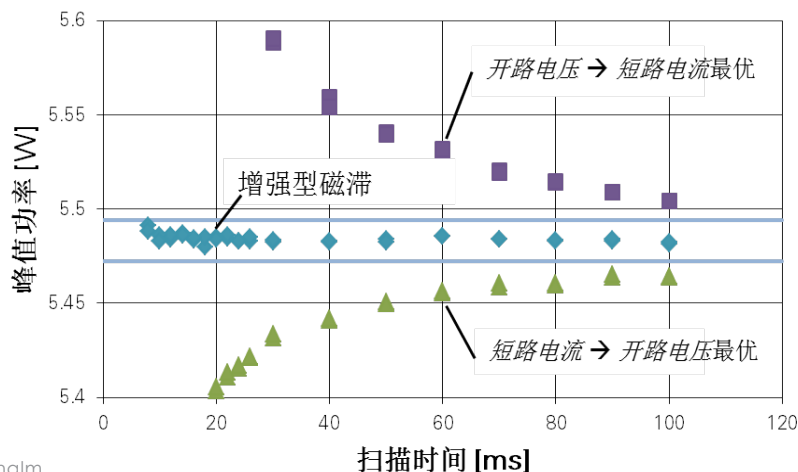
然而，即使使用最佳设置，在扫描时间为 40 毫秒时，测量结果与稳态值的偏差依旧大于 1%，而在扫描时间为 100 毫秒时，测量结果与稳态值的偏差仍有 0.5%。

为在较短的测量时间内实现所需精度，可用的解决方案是在一次单闪光中同时执行两次扫描，先执行短路电流 → 开路电压扫描，再反过来，执行开路电压 → 短路电流扫描。这种方式可测得两条 I/V 曲线。两条曲线之间的差异是电池瞬态行为所特有的特征。因此，可根据测得的曲线以及对所观察到的偏差之物理原理的了解，使用上述差异来计算真实的稳态 I/V 曲线。

上述过程乃通过 h.a.l.m. 增强型磁滞法来实现。请注意，由于每次测量都需要两次扫描，因此 40 毫秒闪光段中的可用扫描时间会减少到每次扫描约 17 毫秒。图 5 显示了联合使用增强型磁滞评估和最优电压扫描斜升获得的测量结果，以及图 4 中已经显示的单扫描结果。

从 2x8 毫秒到两个 2x100 毫秒的所有测量时间，结果都与稳态值密切吻合，并落在所需精度范围内。这充分说明，使用增强型磁滞分析可切实提高高电容器件的快速测量精度。在这种分析下，与所需稳态值的偏差仅在非常短的测量时间内可观察到。在该等条件下，我们会在低于峰值电压时观察到高电容器件 I/V 曲线的扭曲，因此，h.a.l.m. 不建议在该等测量中使用非常短的扫描时间。

因此，我们建议客户使用整个 40 毫秒的测量时间来测量最高电容太阳能电池。这一方面可确保获得精确的测量结果，另一方面还可既提供稳态输出功率又提供整个稳态 I/V 曲线。由此，重要的电池参数得以精确确定，例如串联电阻或二极管饱和电流。双面太阳能电池的三级亮场 I/V 测量时序图参见图 6。从图中可看出，双面太阳能电池的所有亮场 I/V 测量都可在 120 毫秒内执行。



© halm

图 5: 测量结果，包括增强型磁滞分析（蓝色菱形方块）。即使在非常短的测量时间内，所有效率值也都落在了所需精度范围内。注意：线性扫描结果未落入该图中显示的范围。

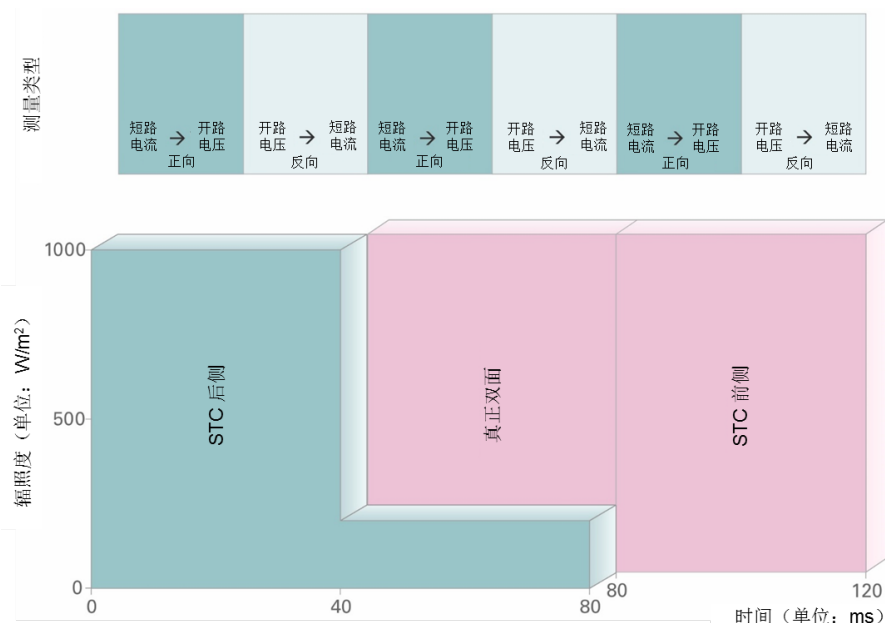
结论

现代高生产率太阳能电池生产要求在不超过约 250 毫秒的时间内执行快速测量。由于太阳能电池（尤其是双面设备）的特征确定需要多次测量，因此，一次 I/V 测量允许的最长测量时间约为 40 毫秒。

我们已经证明，通过联合使用增强型磁滞扫描形式，可在不牺牲测量精度的情况下

满足这一要求。在双面太阳能电池的各种测量条件（STC 前侧、真正双面、STC 后侧）下，所需的闪光脉冲长度皆为 40 毫秒，因此，可通过双电压扫描来确定短路电流 → 开路电压和开路电压 → 短路电流曲线。同时使用这两条曲线与物理模型进行复杂的算法，可生成与稳态 I/V 曲线精确匹配的 I/V 曲线。

www.halm.de



© halm

图 6: 在三级亮场 I/V 测量中使用单闪光磁滞时，双面太阳能电池的亮场 I/V 测量顺序图。底部的图显示了在前侧和后侧闪光时，辐照度与时间的关系。可以看出，第一次测量是在 STC 后侧处进行的，第二次测量为真正双面测量，第三次测量是在 STC 前侧处进行的。在每个闪光级别，I/V 特性皆通过正向（短路电流 → 开路电压）和反向（开路电压 → 短路电流）扫描（单闪光）予以确定。