

IV测试仪原理培训

(培训资料)

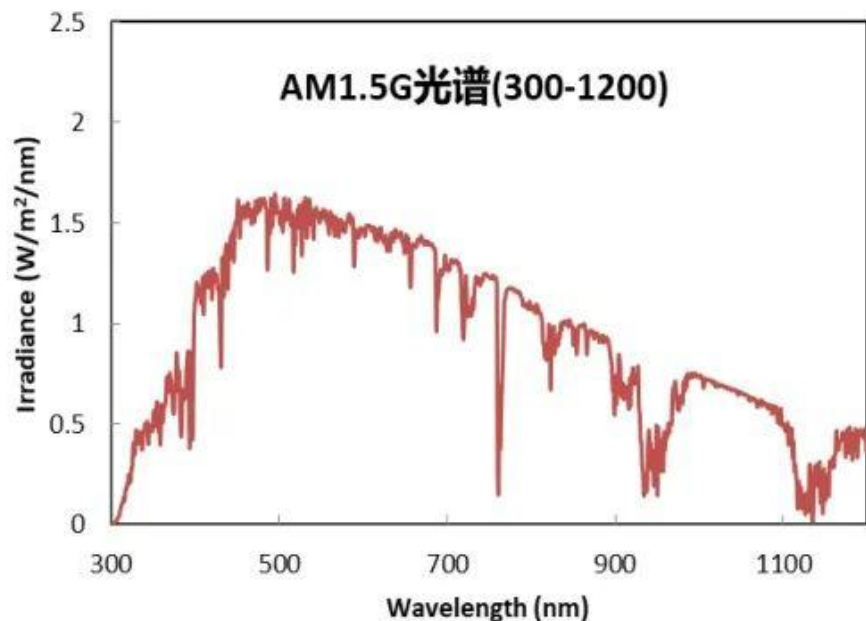
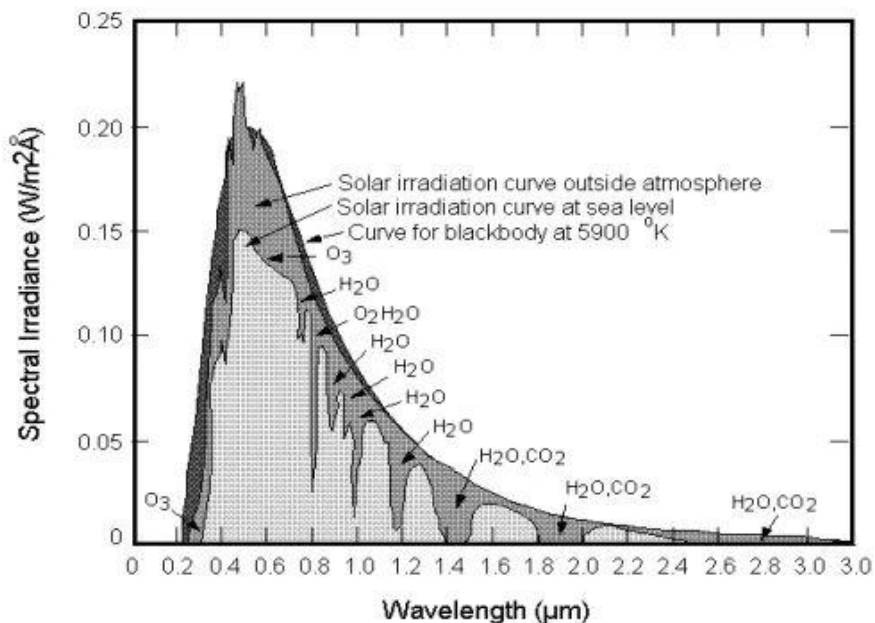
太阳光模拟器概念

- 为什么要用太阳光模拟器

要比较不同电池的好坏，需要将测试条件标准化。在标准测试条件下，即模拟太阳光照射到地表的强度，并符合此时的光谱，统一采用AM1.5，电池温度25°C

- 标准测试条件 (STC)

1. 光谱 AM1.5: 太阳光通过1.5个大气层后，到达地表的光谱。
2. 光强 $1000\text{W}/\text{m}^2$: 在全光谱范围，辐照度对波长的积分值。
3. 室温 25°C : 电池达到热平衡时的温度。



- 稳态光

优点：连续光照，可用于高效电池的准确测试，常用于认证机构的精准测量

缺点：高耗能，发热量大需要冷却，光源寿命短，不适合工业化

- 脉冲光

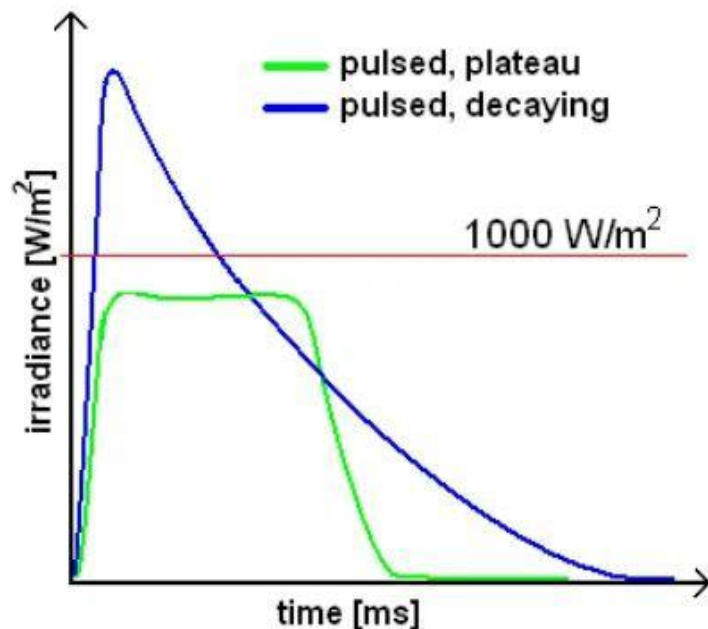
优点：快速测试

缺点：对高效电池的测试需要借助算法修正

- 脉冲光，衰减式

优点：容易达到较高光强

缺点：光强不能稳定输出



- 太阳光模拟器需要符合国际标准的规范

1. simulator performance requirement: IEC 60904-9

A级标准范围	
AM1.5光谱匹配度	±25% (0.75-1.25)
辐照不均匀度	< 2%
辐照长期不稳定性	< 2%

2. measurement procedure: IEC 60904-1

3. Irradiance and temperature correction procedures and coefficients: IEC 60891

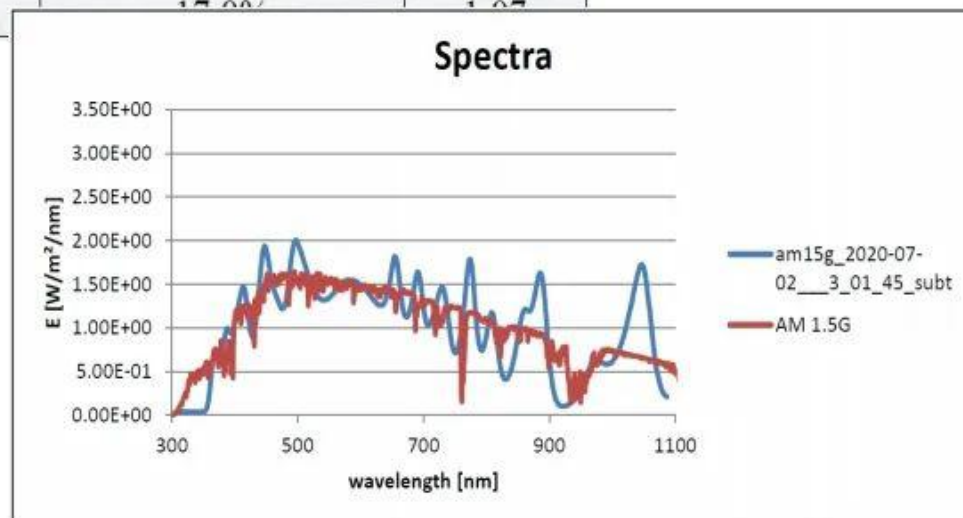
4. Requirements for reference solar cells: IEC 60904-2

IEC网址: <http://webstore.iec.ch/>

AM1.5光谱匹配度

- A. 计算模拟器实际光谱中400-1100nm波长范围，每段波长范围内的辐照度占整体辐照度(400-1100nm)的比例。
- B. 对比AM1.5在400-1100nm波长范围，各波段占整体比例
- C. 若上面两个数据比值A/B = 0.75~1.25，即满足A级光谱

	波长范围 (nm)	AM1.5G 条件有效波段内积分辐照度的百分比 B	太阳模拟器有效波段内积分辐照度的百分比 A	光谱匹配度
1	400-500	18.4%	18.6%	1.01
2	500-600	19.9%	19.5%	0.98
3	600-700	18.4%	17.7%	0.96
4	700-800	14.9%	14.6%	0.98
5	800-900	12.5%	12.5%	1.00
6	900-1100	15.9%	15.0%	1.07



- 辐照不均匀度是通过计算有效光斑面积内的光强的不均匀性

$$\Delta E = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \cdot 100\%$$

- 实际操作中，通常是测试同一片电池的短路电流(下图的数据是中国计量院在测试时将电流经I-V转换器转化为电压信号)，从而得到辐照度变化。

辐照不均匀度测量数据如下(单位：mV)：

	1	2	3	4	5	6	7	8
A	131.6	132.3	131.5	131.0	131.1	131.8	132.7	132.1
B	132.5	132.3	131.7	131.5	131.5	131.8	132.5	132.3
C	131.8	131.9	131.7	131.8	131.7	131.7	131.9	131.6
D	131.5	132.0	132.2	132.4	132.3	132.0	131.8	131.3
E	131.7	132.2	132.4	132.7	132.7	132.4	132.1	131.3
F	132.3	132.7	132.8	132.9	132.9	132.7	132.7	132.1
G	132.8	133.4	133.1	132.9	132.9	133.1	133.4	132.8
H	132.4	133.7	133.0	132.2	132.5	132.8	133.0	132.1

其中，最大值 $V_{U_{\max}} = 133.7$ mV，最小值 $V_{U_{\min}} = 131.0$ mV；

辐照不均匀度(%): $(V_{U_{\max}} - V_{U_{\min}}) / (V_{U_{\max}} + V_{U_{\min}}) \times 100\% = 1.0\%$ 。

- 辐照度在单次IV测量过程中，波动幅度在2%以内即满足A级要求

100 ms 采样时间内，输出信号最大值： $V_{S_{max}} = 197.3\text{mV}$ ，最小值： $V_{S_{min}} = 196.1\text{mV}$ ；

辐照长期不稳定性(%)： $(V_{S_{max}} - V_{S_{min}}) / (V_{S_{max}} + V_{S_{min}}) \times 100\% = 0.3\%$ 。

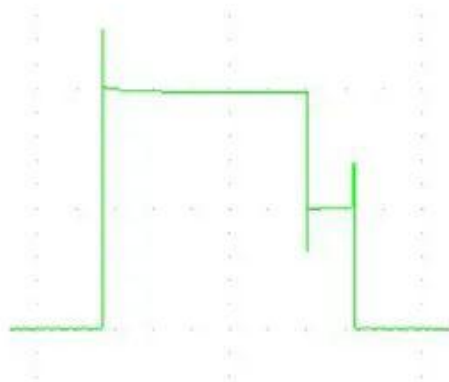


图3 单闪脉冲采样波形

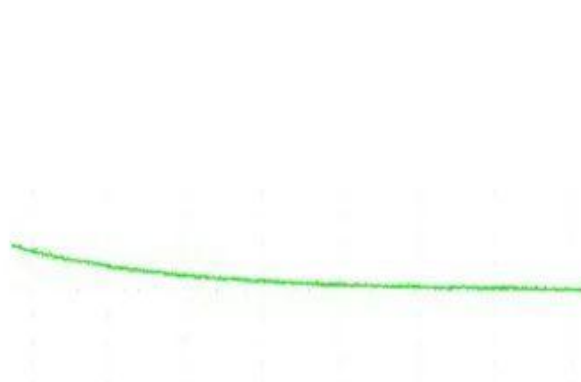
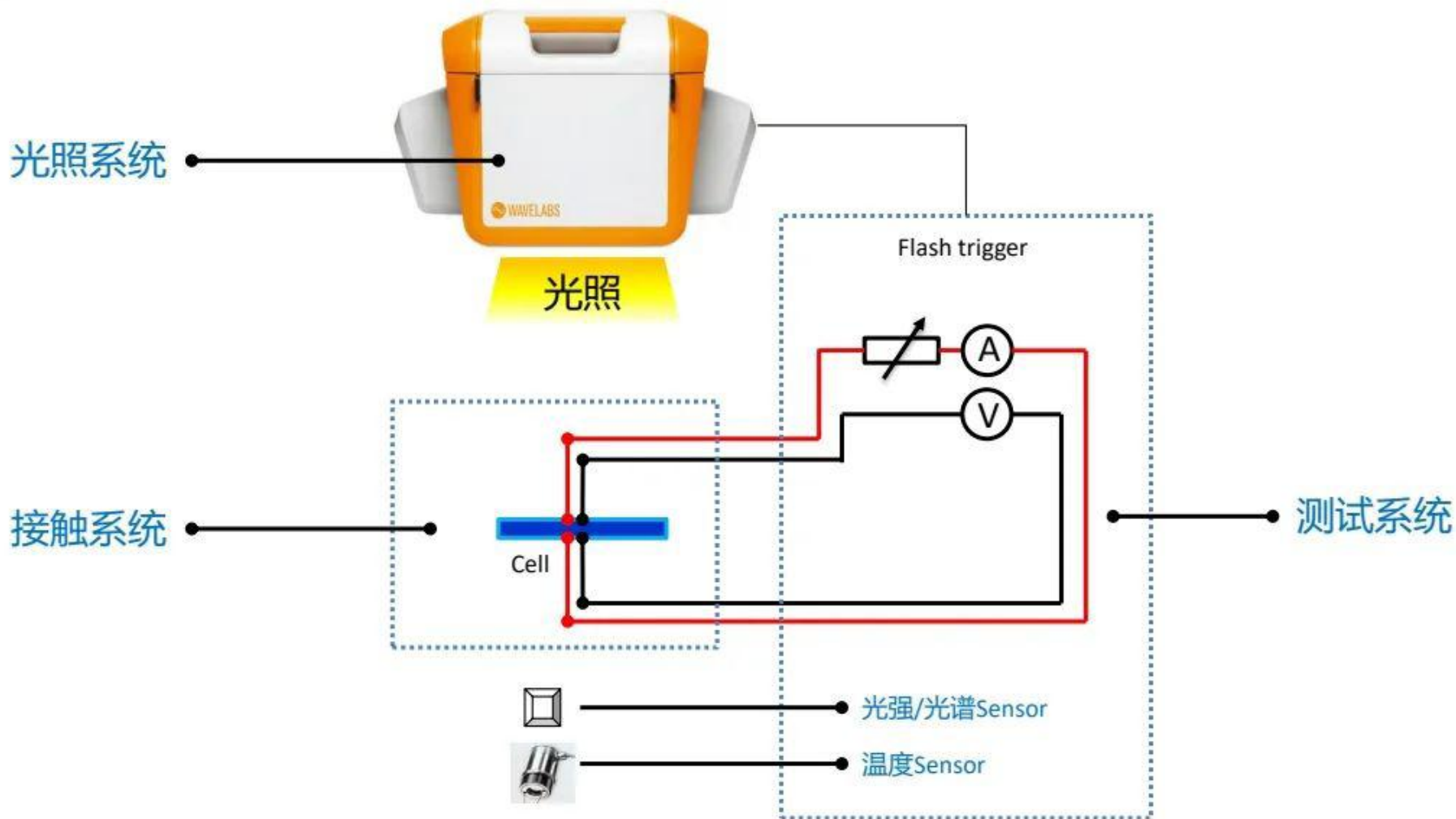


图4 长期不稳定性(在 100 ms 范围内)

IV电性能测试的原理

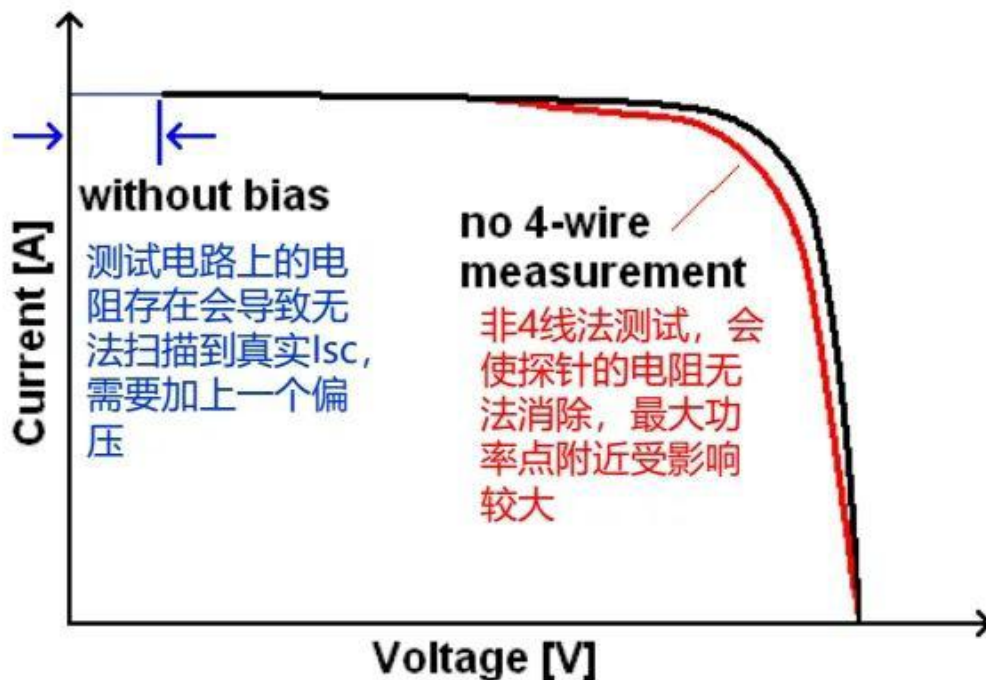
IV测试原理



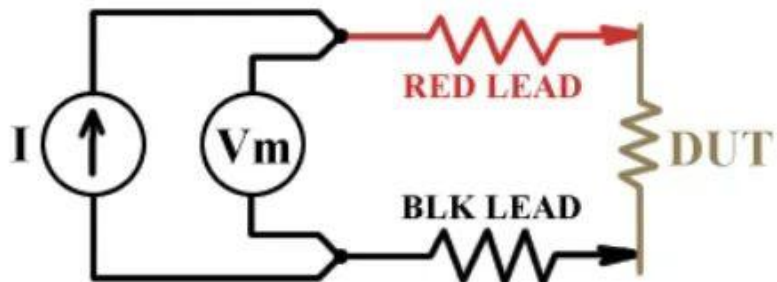
- 测试启动后，测试系统触发闪光，电池片和光强/光谱Sensor被照射
- 光强/光谱Sensor会记录光强和光谱
- 温度Sensor会记录电池片的温度
- 电子负载会将电池从短路状态扫描到开路状态，得到I-V曲线。通常会获取3条曲线（1sun曲线，0.5sun曲线，暗电流曲线）
- 测量得到的数据需要根据光强和温度进行修正
- 从修正后的曲线可以计算出电池的电性能参数： I_{sc} ， V_{oc} ， FF ， η ， P_{mpp} ， R_s ， R_p ， I_{rev} 等

IV测量的注意事项

- measurement procedure: IEC60904-1做出了规范, 其中在实际操作中易被忽视的一些问题如:
 1. 需要用“4线法”测试
 2. 测试温度在 $25 \pm 2^\circ\text{C}$, 否则就需要对结果进行修正。
 3. 需要加偏压确保能测量到真实的短路电流 I_{sc} 。

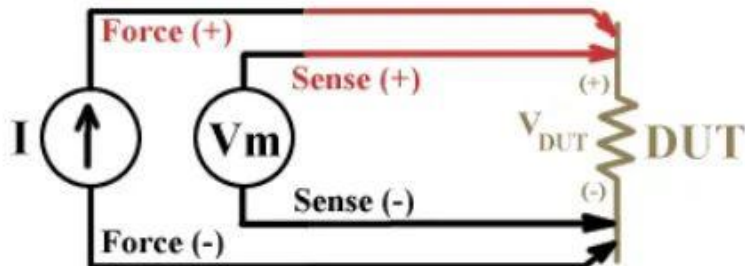


- 两线法测试



- 即使待测电阻很小(通常为 $m\Omega$ 级),但是由于所测得的阻抗为馈线电阻,探针电阻,接触电阻和待测电阻之和,因此无法实现精密测量。

- 四线法测试



- 要求1: 电流供给回路(Force lead)与电压测量回路(Sense lead)必须完全独立。
- 要求2: 检测线(Sense lead)必须接到一个有极高输入阻抗的回路上,使流过的电流极小,近似为零。
- 因为电流和电压两回路各自独立,共有四个端子,故称四线测试。
- 由于电压测定计内部阻抗极高,故回路中馈线电阻,探针电阻与接触电阻可完全忽略,所测得的阻值即是待测线路位置的阻值。可以精确测量微小阻值。

- 电池的IV测试结果是否准确首先由校准决定。因为标准电池(标片)数据被看作绝对正确的值，所以一级标片都来自于各个认证机构。
- 修正公式参见 IEC 60891中规范

□ 电流:
$$I_2 = I_1 + I_{SC} \left[\frac{E_2}{E_1} - 1 \right] + \alpha(T_2 - T_1)$$

光强修正 温度修正

□ 电压:
$$V_2 = V_1 + \beta(T_2 - T_1) - R_S(I_2 - I_1) - KI_2(T_2 - T_1)$$

温度修正 串阻 曲线修正

- ① I_1, V_1, E_1, T_1 为实际测量的电流, 电压, 光强, 温度
- ② I_2, V_2, E_2, T_2 为修正后特性, 其中光强 $E_2=1000\text{w/m}^2$, 温度 $T_2=25^\circ\text{C}$
- ③ α 和 β 分别为电流和电压的温度系数
- ④ R_S 为串联电阻
- ⑤ K 为曲线修正因子

三象限测试

Q2: dark backward
measurement

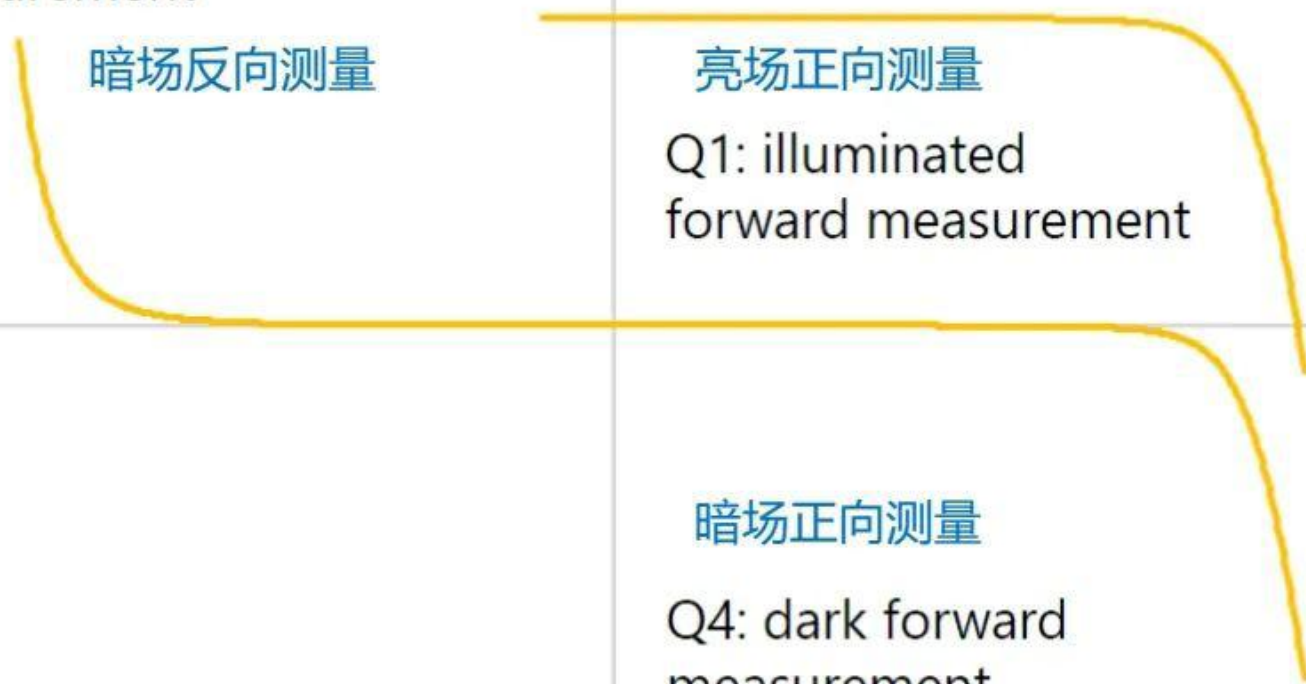
暗场反向测量

亮场正向测量

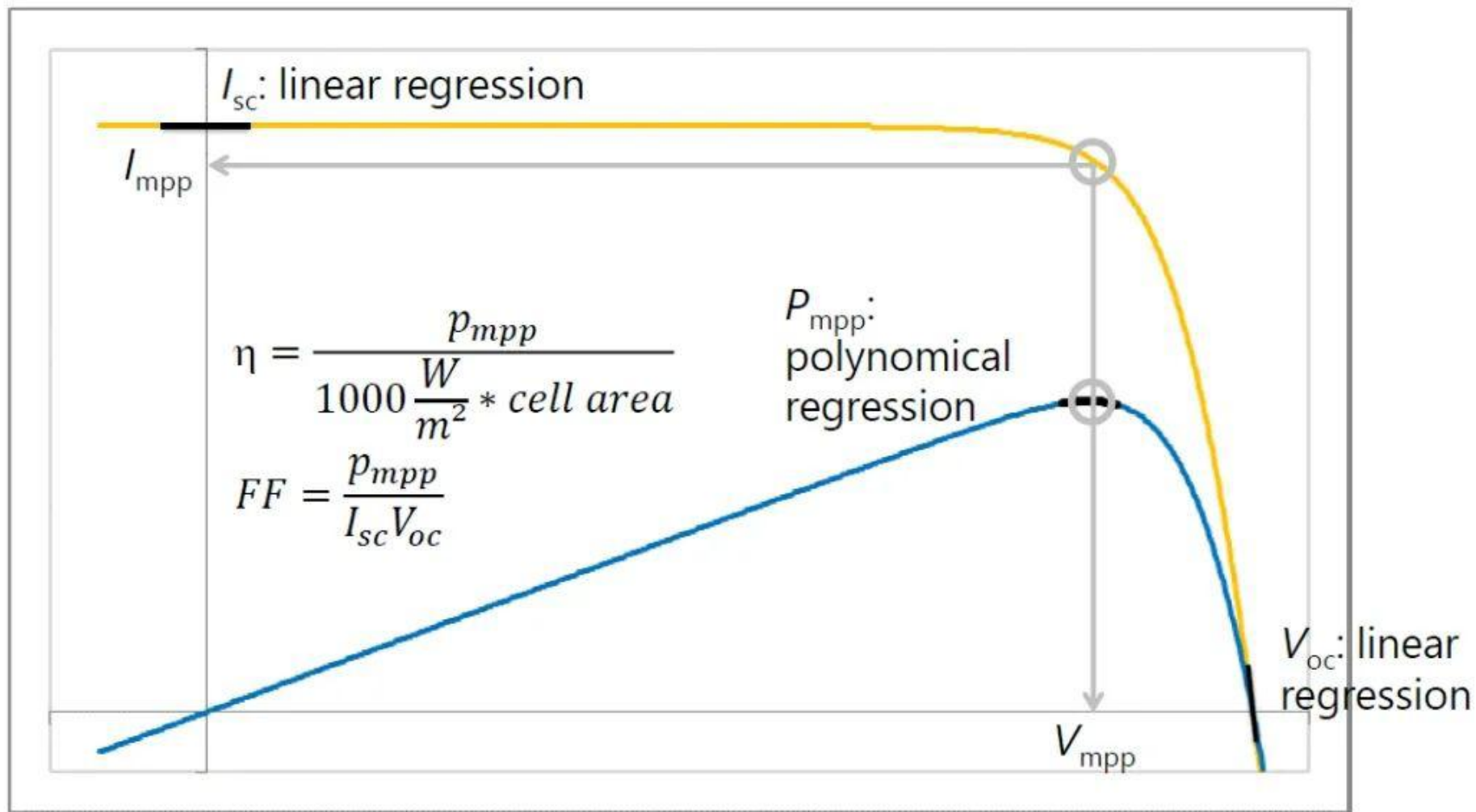
Q1: illuminated
forward measurement

暗场正向测量

Q4: dark forward
measurement



Q1: 亮场正向测量

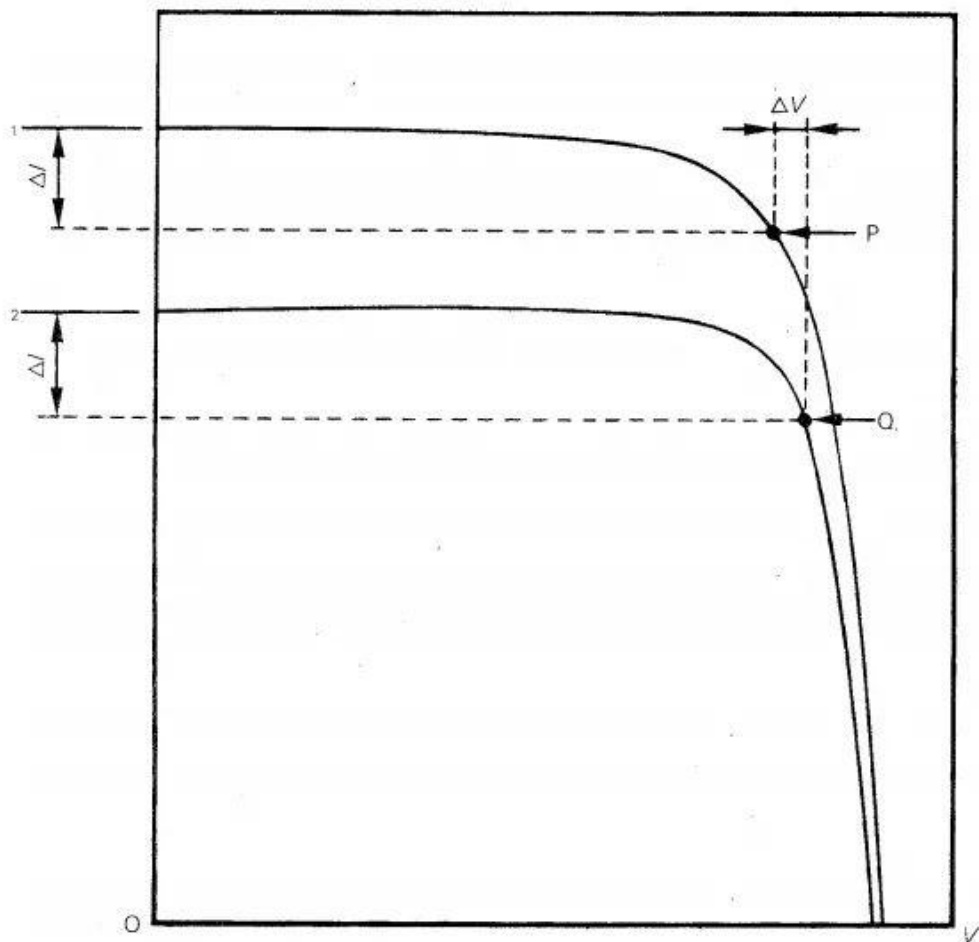


串联电阻Rs

- 依据IEC 60891规范，串阻测试推荐用双光强或多光强法测试。
- P点取值为靠近最大功率点附近的点

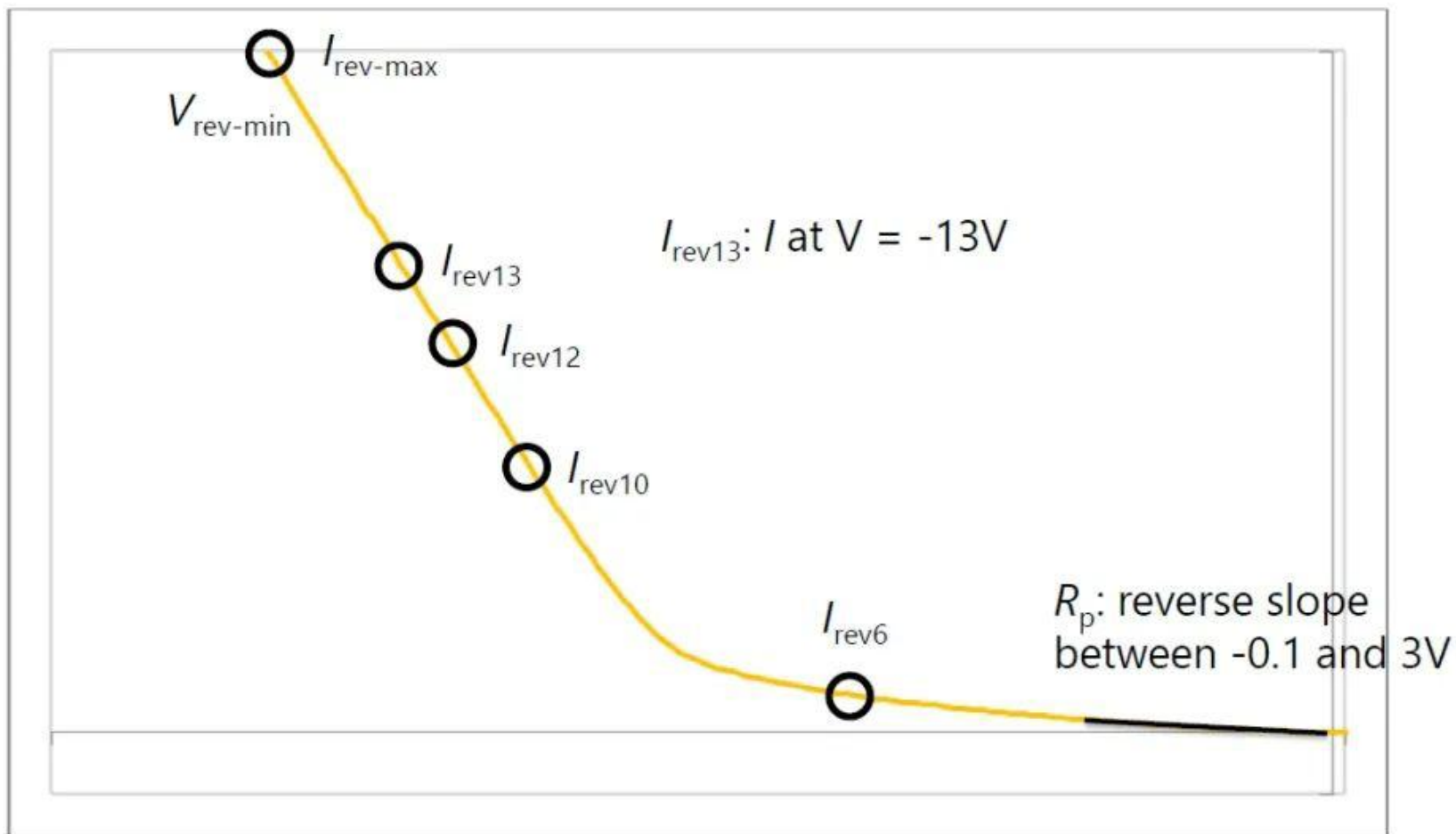
$$V_{oc} - V_p = (I_{sc1} - I) R_s$$
$$V_{oc} - V_o = (I_{sc2} - I) R_s$$

$$R_{s1} = \frac{\Delta V}{I_{SC1} - I_{SC2}}$$



并联电阻 R_p 及 I_{rev}

- 依据暗场反向曲线读取

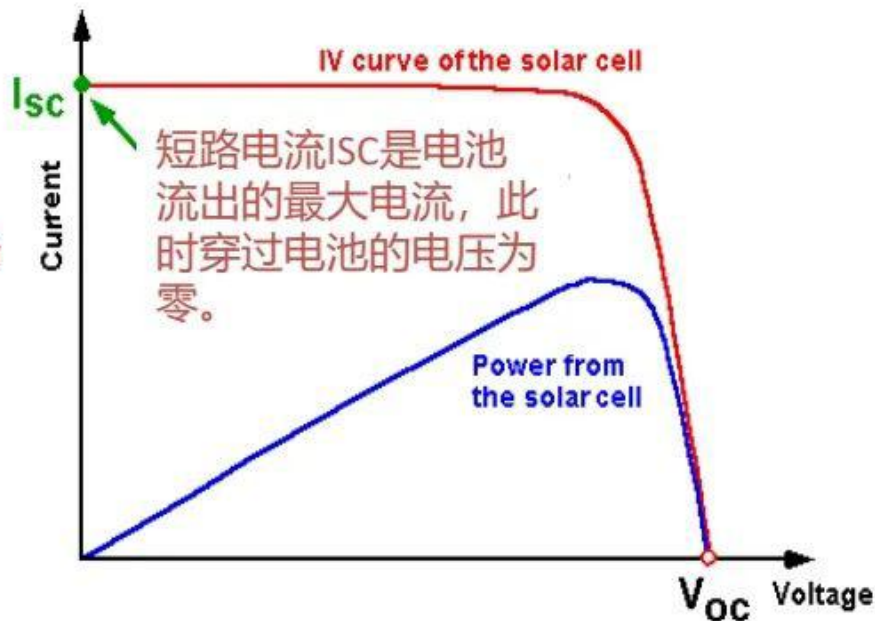


主要电性能参数介绍

- **短路电流 I_{sc}** 是指当穿过电池的电压为零时流过电池的电流（或者说电池被短路时的电流）
- 短路电流源于电池产生的光生载流子的收集，是电池能输出的最大电流

- 短路电流的大小取决于：

- 电池的表面积
- 光子的数量（即入射光强度）
- 入射光的光谱（常用AM1.5）
- 电池的光学特性（吸收和反射）
- 电池的收集概率，主要取决于表面钝化和基区的少子寿命
- 电池温度， T 越高， I_{sc} 越大
- 串阻太大， I_{sc} 变小

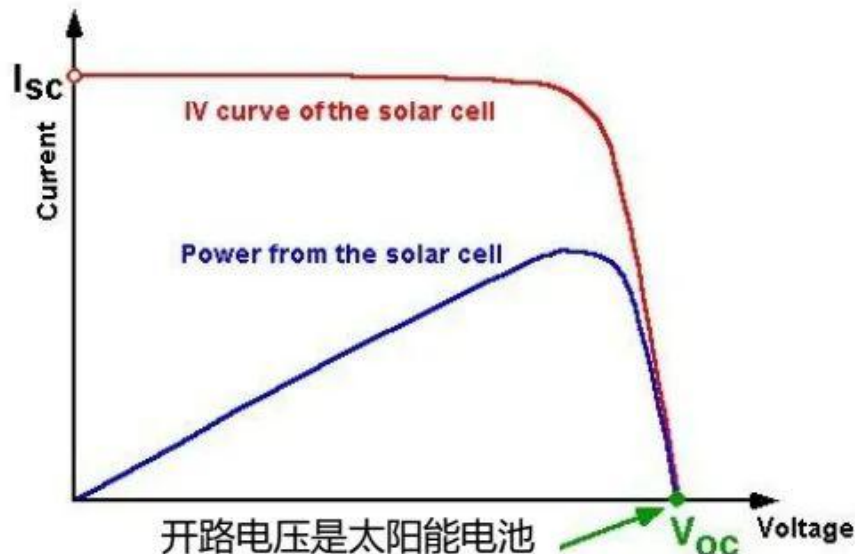


- **开路电压 V_{oc}** 是太阳能电池能输出的最大电压，此时输出电流为零。开路电压的大小相当于光生电流在电池两边加的前置偏压

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right)$$

- 开路电压的大小取决于：

- 电池温度，T越高， V_{oc} 越小
- 饱和电流 I_0 (少子复合造成的电流)，复合效应越小， V_{oc} 越大
- 并联电阻 R_p ，并联太小， V_{oc} 变小

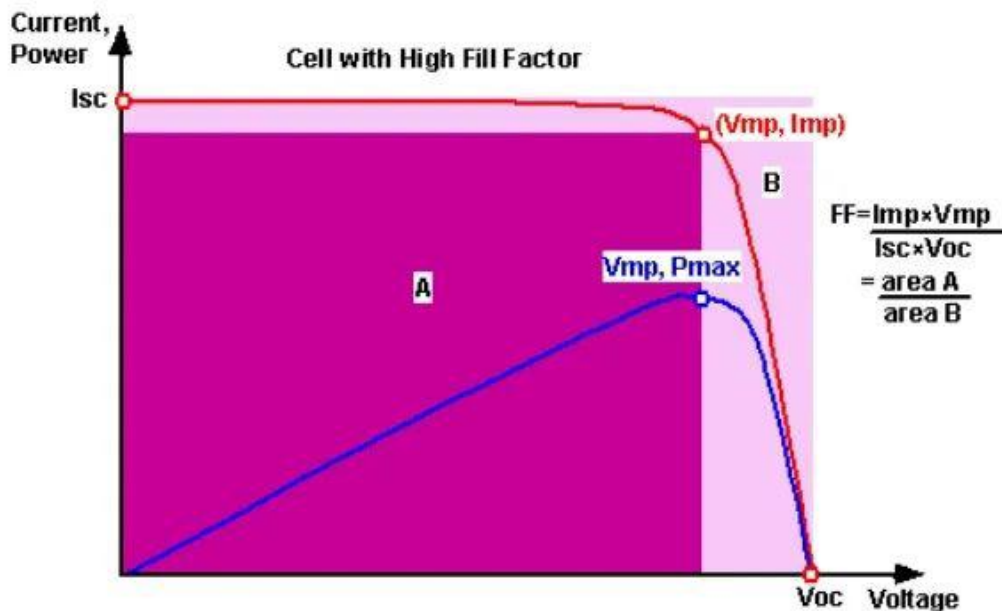


开路电压是太阳能电池的最大电压，当净电流为零时出现。

- **填充因子FF** 被定义为电池的最大输出功率与开路 V_{OC} 和 I_{SC} 的乘积的比值

$$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} * I_{sc}}$$

- 由填充因子的公式可知，其影响因素较多，包括了温度， R_s ， R_p ，少子寿命，饱和电流，掺杂浓度等



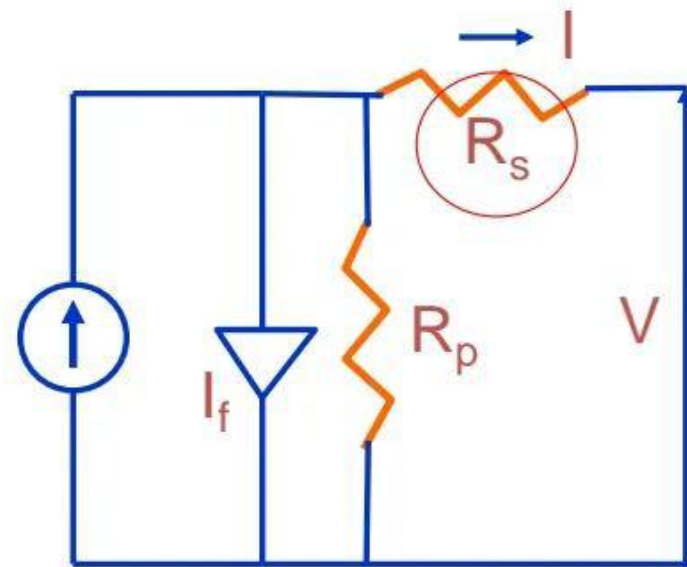
- **转换效率 Eta** 定义为电池输出的电能与射入电池的光能的比例。
- 除了反映太阳能电池的性能之外，效率还决定于入射光的光谱和光强以及电池本身的温度。所以在比较两块电池的性能时，必须严格控制其所处的环境。
- 下面公式为计算发电效率的方程：

$$P_{\max} = V_{\text{oc}} * I_{\text{sc}} * FF$$

$$\text{Eta} = P_{\max} / P_{\text{in}} = V_{\text{oc}} * I_{\text{sc}} * FF / P_{\text{in}}$$

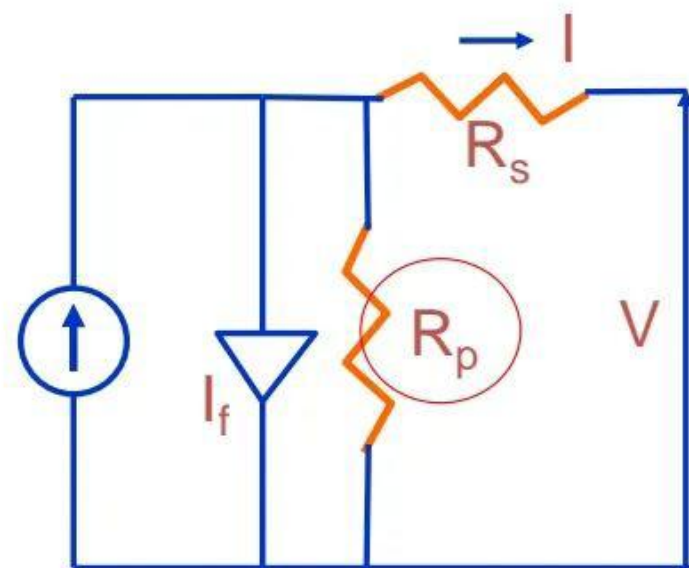
串联电阻 R_s

- 串阻不可避免，但是越小越好
- 串阻会导致输出电流变小，效率降低
- 串阻主要的来源：
 - 掺杂浓度太低
 - 浆料是材质和印刷图形
 - PN结深度太深
 - 烧结温度太低或时间太短，金-半接触不良

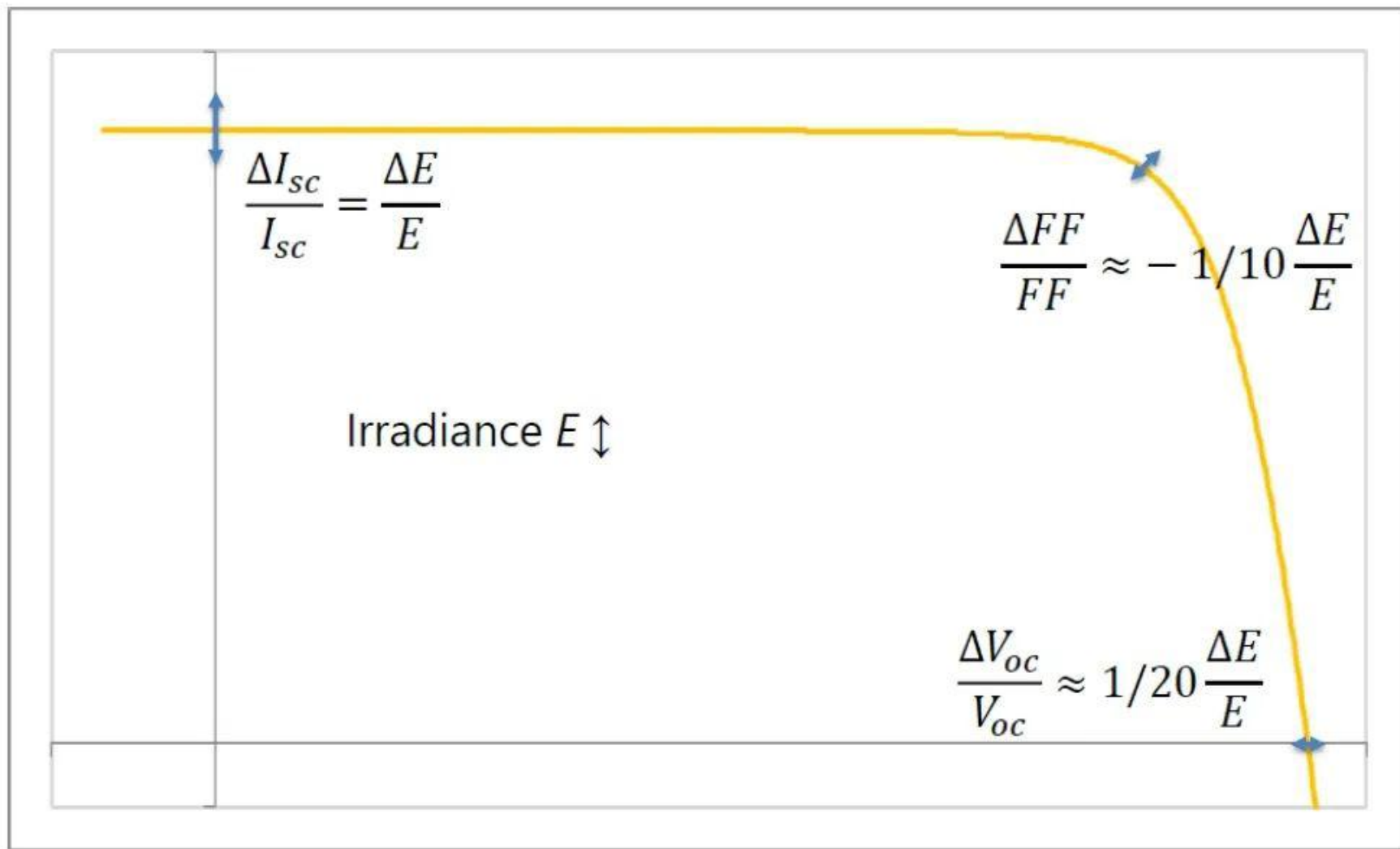


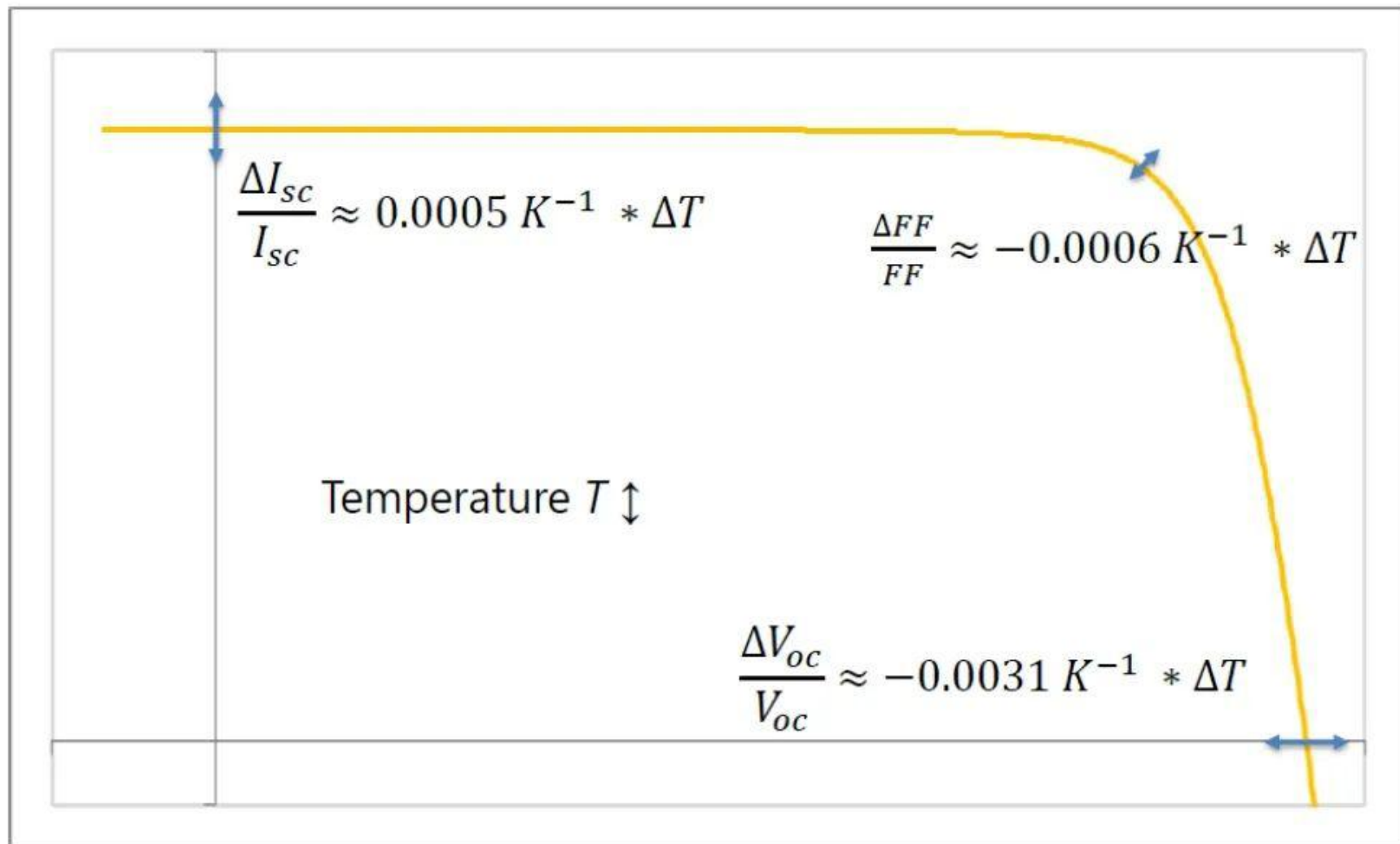
并联电阻 R_p

- 并联电阻越大越好
- 并阻太小会导致漏电变大, V_{oc} 变小, η 降低
- 并阻主要的来源:
 - 边缘刻蚀不彻底
 - 烧结时过烧
 - 硅基体内部缺陷
 - 丝印时有漏浆或污染
 - 隐裂

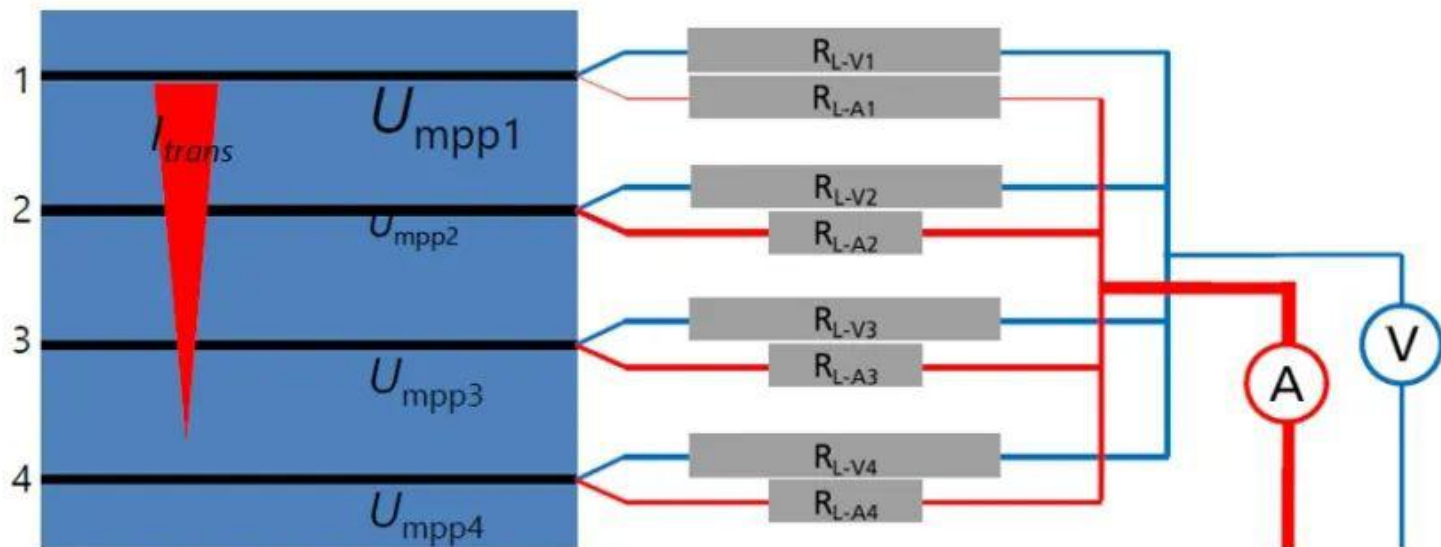


影响电性能参数的因子

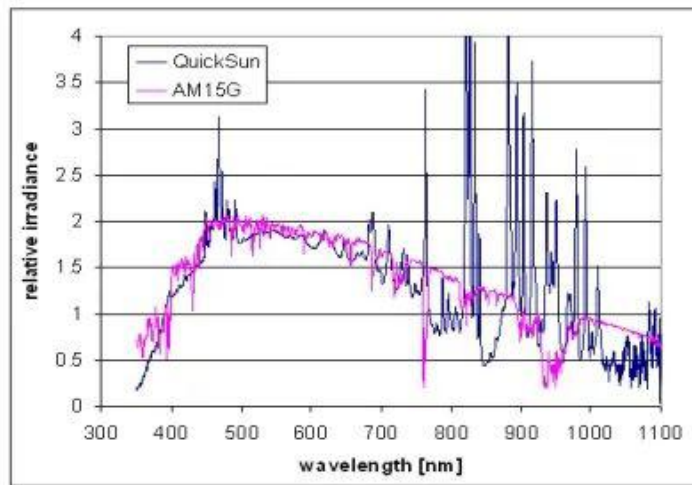
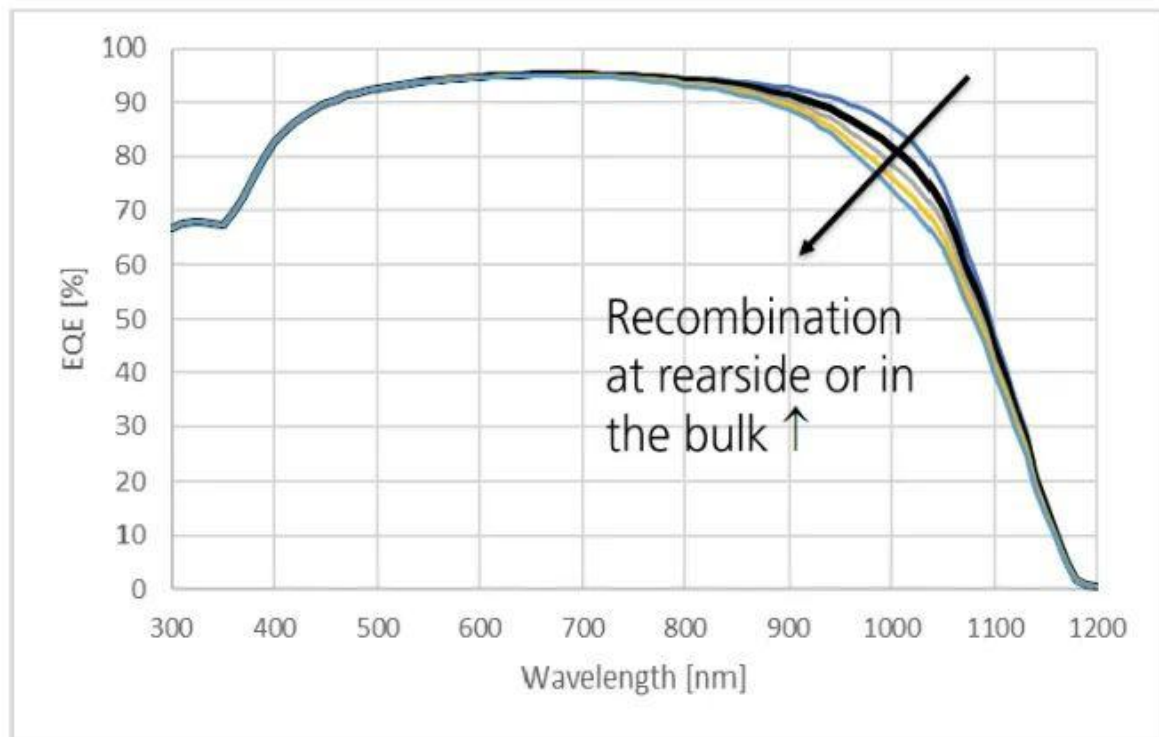




- 虽然用4线法测试能避免测试回路上的电阻影响，但是在探针排之间的接触电阻不均匀也会导致FF不稳定
- 不均匀的接触电阻可能来自于
 - 探针寿命过期
 - 香蕉插头接触不良
 - 导线焊接不良或损坏
 - 探针未压准栅线



- 不同硅片和加工工艺生产的电池，其量子效率EQE也不相同
- 由于实际光谱与标准AM1.5光谱间的差异会带来额外的测试误差



测试时间的影响

- 电池的电容效应的存在，使高效电池需要的测试时间更长
- P型PERC电池在50ms即可达到稳定，而N型PERC则需要更长时间

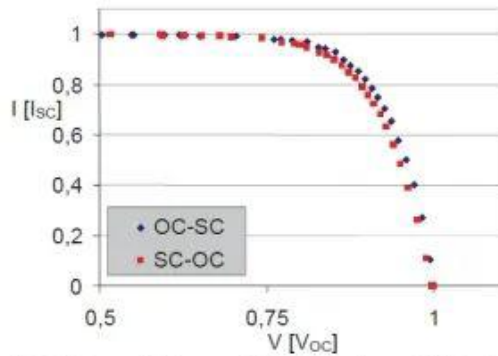


Fig. 1. Measured IV curves of PERC Cz-p-type cell ($2\Omega\text{cm}$) with different sweep directions. FF ranges between 76.84% and 78.44%

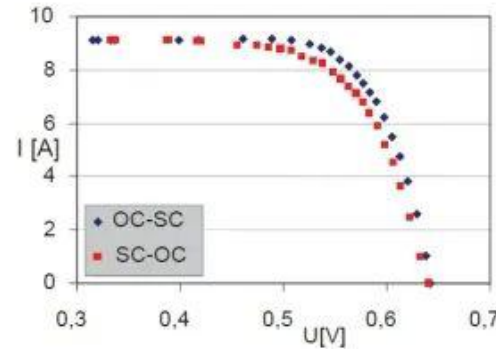


Fig. 2. Measured IV curves of PERT Cz-n-type cell ($6\Omega\text{cm}$) with different sweep directions. FF ranges between 75.25% and 80.11%

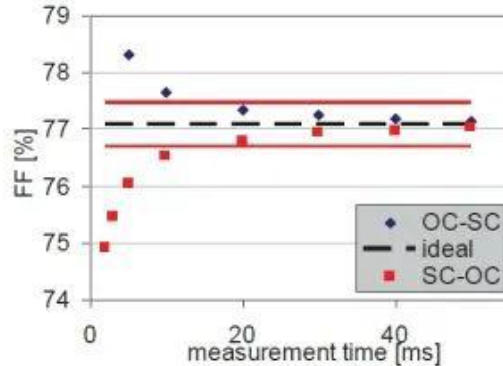


Fig. 3. FF deviation as compared to a steady state measurement for a Cz-p-type cell employing a linear voltage ramp and various measurement times

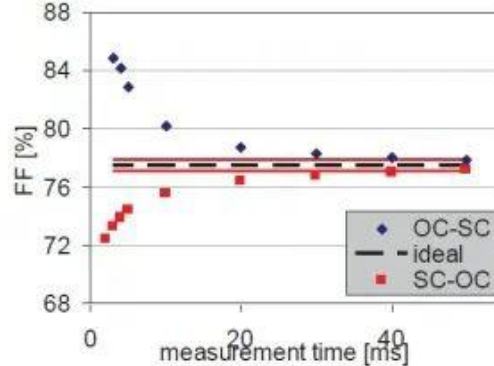


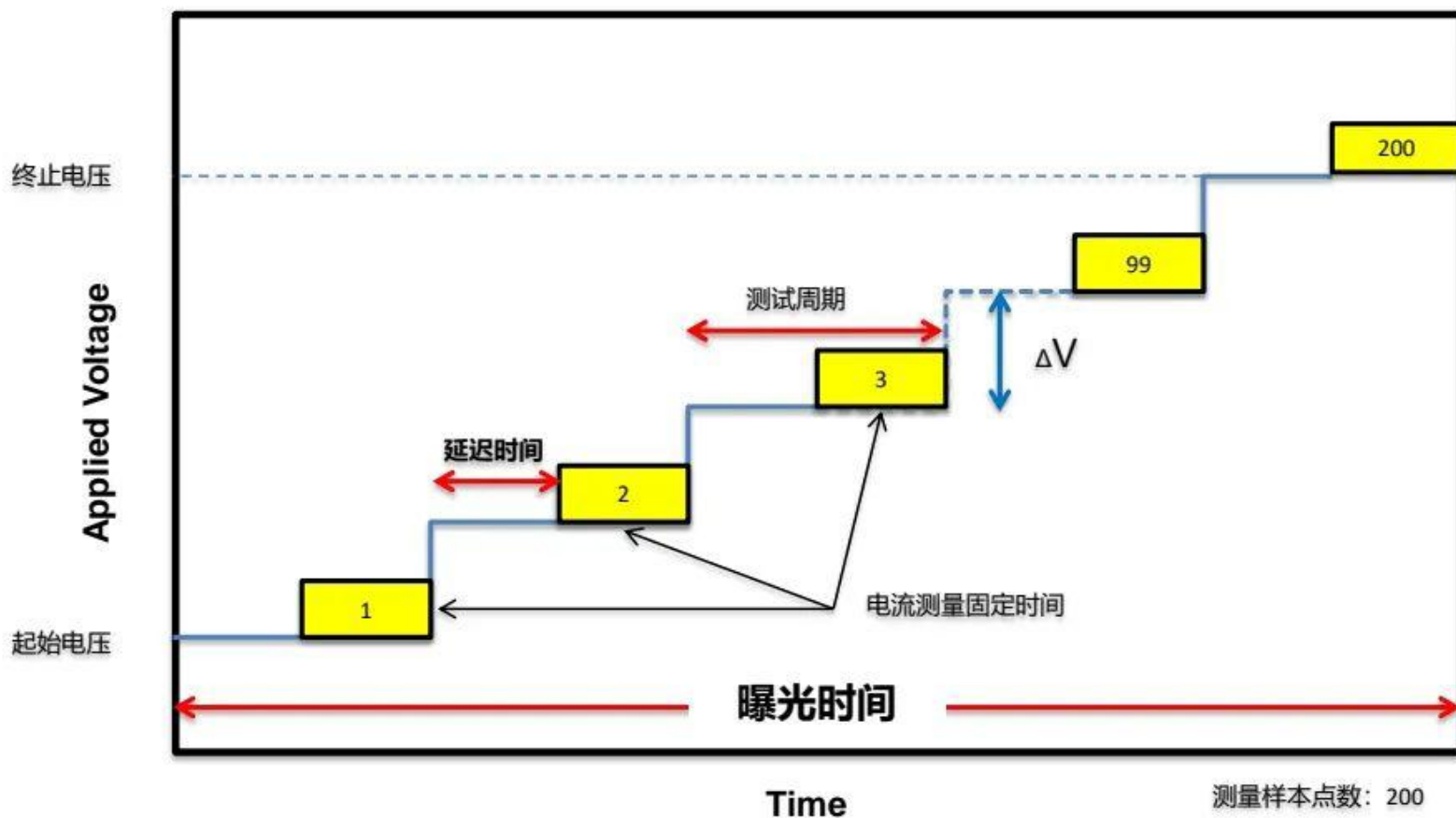
Fig. 4. FF deviation as compared to a steady state measurement for a Cz-n-type cell employing a linear voltage ramp and various measurement times

电容效应

- 对于PERC、HIT等高效电池，其电容较大，一般可以达到几十到数百 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ ，较大的电容意味着太阳电池中存在大量的过剩电荷，而在改变外加电压或光强后太阳电池中的电荷要重新达到平衡分布所需要的时间也较长，即时间响应也较慢
- 现有的普通短脉冲（5-20ms）瞬态模拟器测试时，由于时间延迟不够消除这种电容效应，造成测量结果偏离真实值。
- 为了避免电容效应对测试结果带来的影响，需要增加曝光时间来获取稳定的IV曲线，从而获取准确的电性能参数。

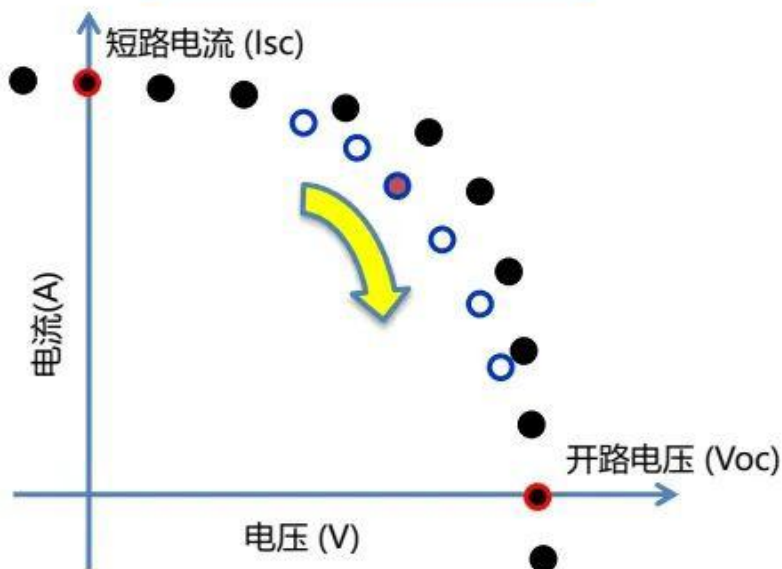
曝光时间

- 整个曝光时间内，系统会快速测试大量样本点以完成IV曲线扫描
- 曝光时间越长，留给每个样本点的延迟时间也越长，有利于消除电容效应



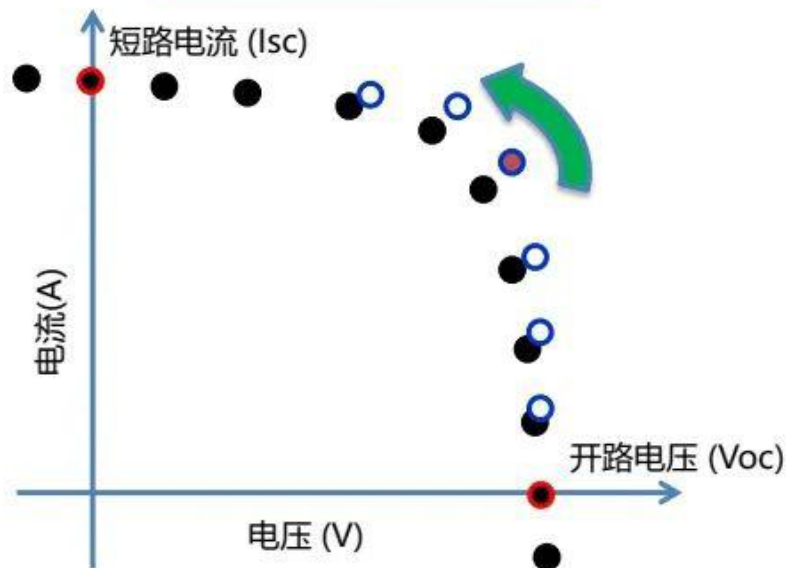
- 对IV曲线的扫描，可以用正扫和反扫两种模式

Isc → Voc : 正扫



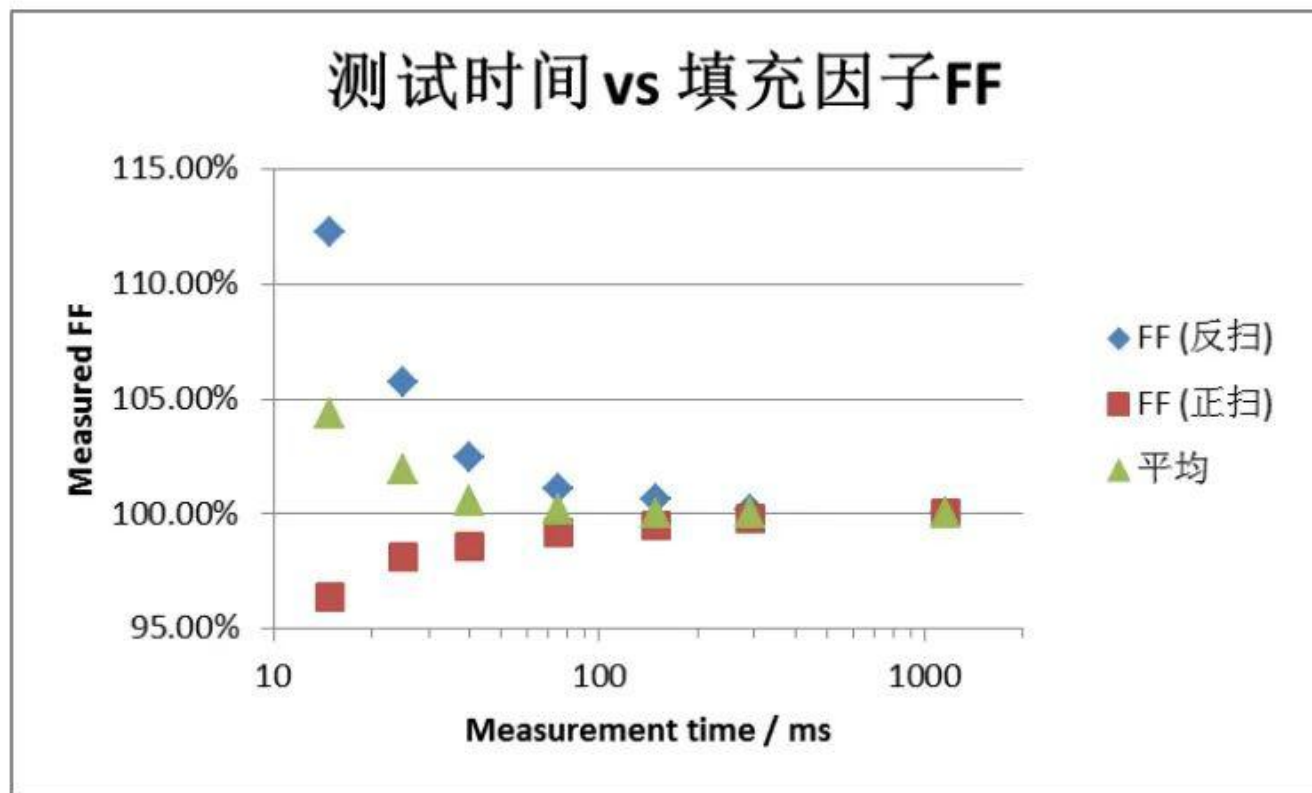
从Isc-Voc，外电压从0快速上升至Voc，载流子浓度增加，电荷的重新分布相当于给电容充电，会消耗一部分光生电流，引起外部测量电流的减少，电池的FF和Pmax测量值偏小，被低估。

Voc → Isc : 反扫



从Voc-Isc，外电压从Voc快速下降至0，载流子浓度减少，电荷的重新分布相当于给电容放电，增加光生电流，引起外部测量电流的增大，电池的FF和Pmax测量值偏大，被高估。

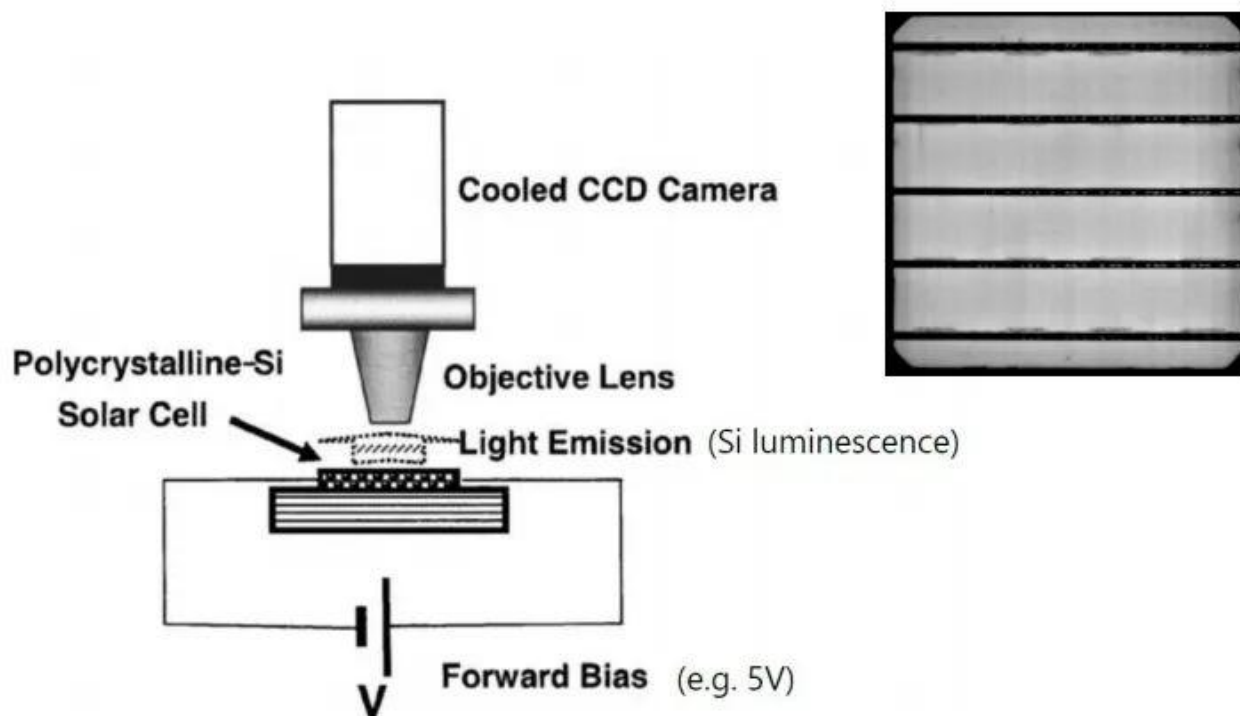
- 通过改变加压方向并逐渐增加测试时间来观察FF值变化，当某个测试时间下，正反向测量得到的FF值一致(电容效应可忽略)，此测试时间即为合理的测试时间



EL成像与识别

电致发光(EL)原理

- 利用光生伏特效应的逆过程，给太阳电池加正向偏压，电子在太阳电池内部与空穴复合，复合过程发射光子，即电致发光。太阳电池电致发光的波长范围在950nm-1200nm
- 电致发光亮度正比于少数载流子扩散长度，正比于电流密度，因此通过其成像可以有效分析电池可能存在的问题，对工艺分析和质量控制有重要作用

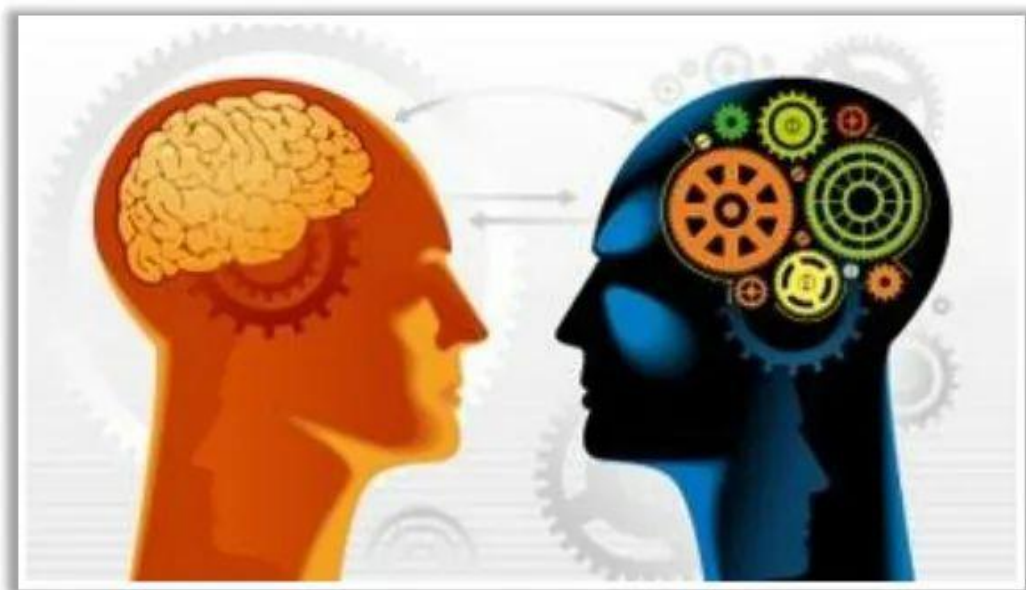


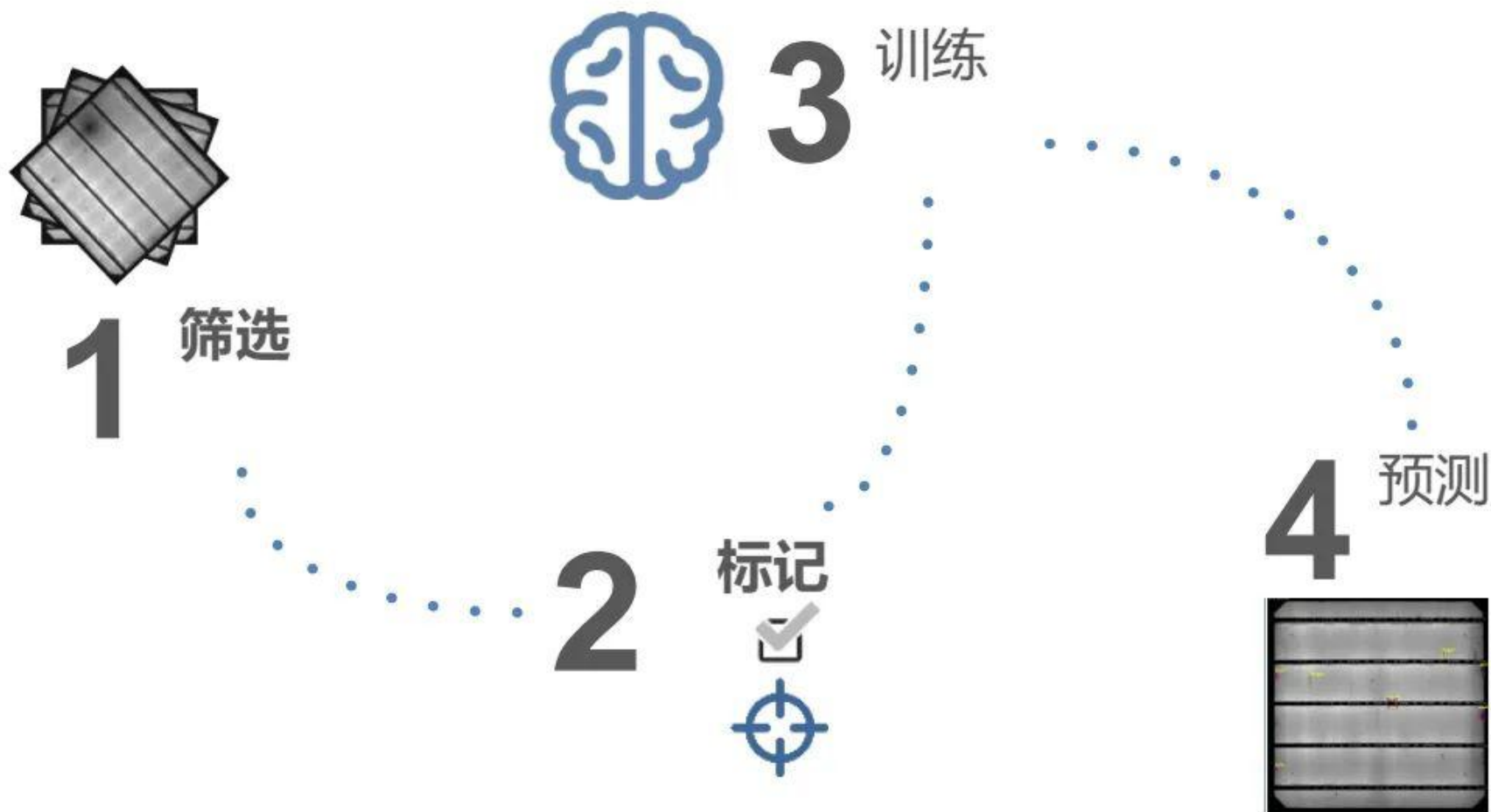
- 传统算法:

将图像转化为数字信息，通过灰度值信息过滤，然后根据过滤后的特征判断缺陷类型。这种方法自适应能力弱：无法区分灰度值差异小的特征，对于类似特征区分度很弱。

- 人工智能算法:

与数字计算机相比，人工智能的深度学习算法在构成原理和功能特点等方面更加接近人脑，它不是按给定的程序一步一步地执行运算，而是能够自身适应环境、总结规律、完成某种运算、识别或过程控制。深度学习算法首先要以一定的学习准则进行学习，然后才能工作





- 像素分割

在像素级别标记缺陷。适用于形状不固定的对象检测。

例如：断栅，隐裂，黑斑等

- 对象定位

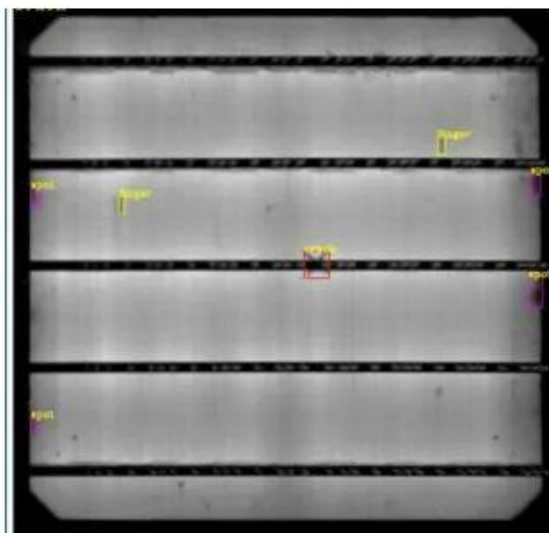
具有很好的定位和分类能力。适用于具有固定形状的对象定位和分类。

例如：同心圆，滚轮印

- 场景分类

具有非常强的分类能力。适用于对类别识别率要求很高的分类。

例如：烧结不良



谢谢观看