

SOLAR EYE

发光成像分析平台

用户手册

翻译 李梦杰

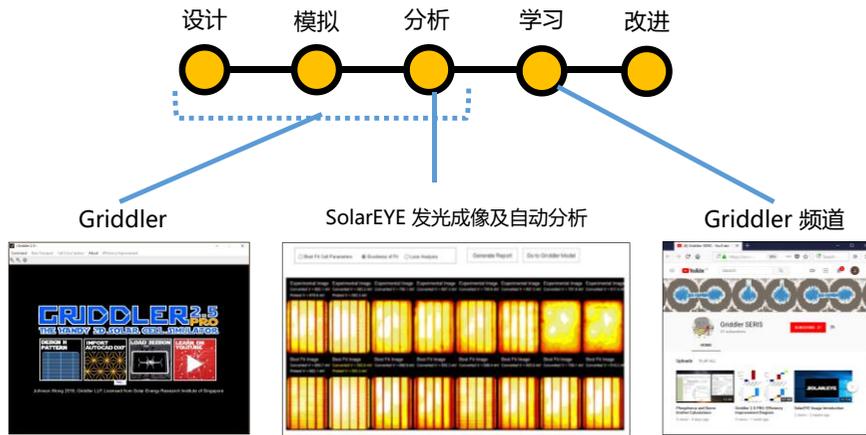
目录

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1.1 | 简介 | 3 |
| 1.2 | SolarEYE 主要模型 | 3 |
| 2.1 | 安装和首次使用 | 5 |
| 2.2 | SolarEYE 首页 | 7 |
| 2.3 | SolarEYE 更新通知 | 9 |
| 3 | SolarEYE 软件使用分部指南 | 10 |
| 3.1 | 路径和样品列表 | 10 |
| 3.2 | 电池和样品类型选择器 | 12 |
| 3.3 | 发光成像图像展示页面和手动校直 | 13 |
| 3.4 | 拟合条件,用于拟合的模型 | 14 |
| 3.5 | (此步骤可省略) 用样品发光成像数据画 Suns-PL | 16 |
| 3.6 | (此步骤可省略) 复合电流和阻分布图 | 17 |
| 3.7 | (此步骤可省略) 显示工作目录中所有接近 1-Sun 样本的 PL 图像的平均值 (标准化为太阳和曝光时间) | 18 |
| 3.8 | 运行 (Run job) 或者加入队列 (Queue job) | 18 |
| 3.9 | 保存和打开会话 | 23 |
| 4 | 支持的 SolarEYE 测量和分析流程 | 24 |
| 4.1 | 双面太阳能电池 | 24 |
| 4.2 | PERC 太阳能电池 | 27 |
| 4.3 | 单片太阳能电池 | 30 |

1.1 简介

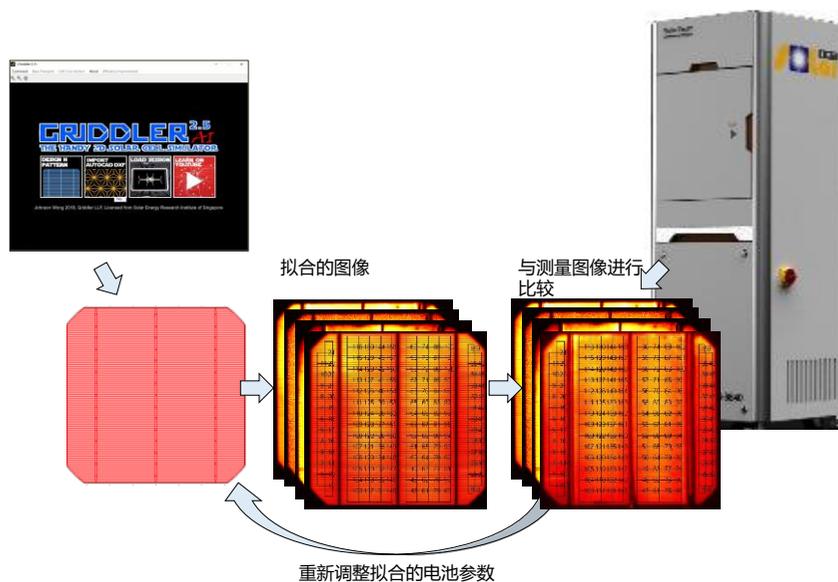
SolarEYE 是一个集成的发光成像硬件+软件分析平台，它自动化了发光成像+ Griddler AI 自动拟合和电池参数提取+Griddler 模型建立+损耗分析的工作流程。本手册将涵盖软件的方面。

SolarEYE 的研发始于 2017 年，新加坡太阳能研究所 (SERIS)。它自动化了分析硅太阳能电池和相关样品的许多重要步骤，并在 SERIS 太阳能电池的研发周期中起了重要作用。下图展示了它在太阳能电池研发周期中的作用：

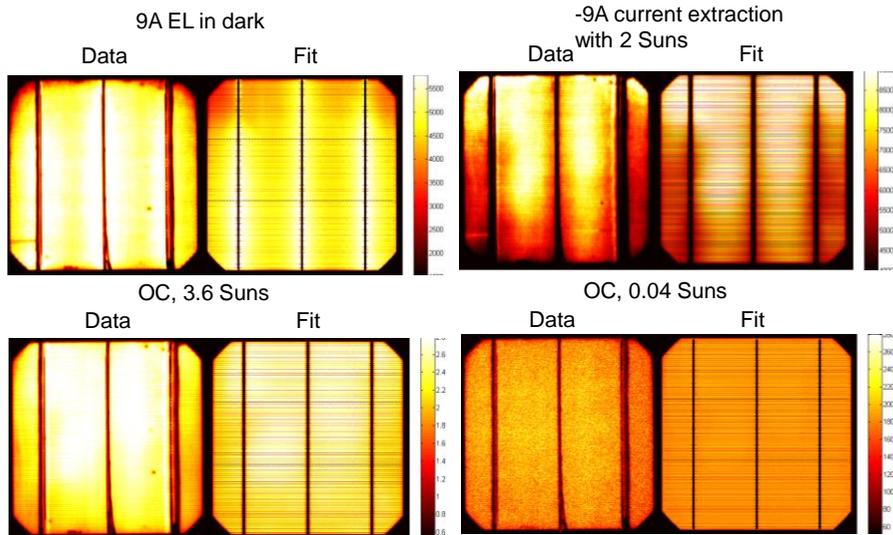


1.2 SOLAREYE 主要模型

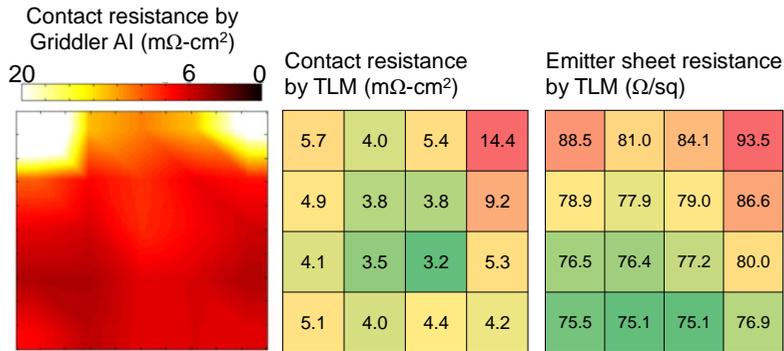
SolarEYE 结合 Griddler (有限元模型太阳能电池模拟器, 详情参见 Griddler 用户手册), 以及专属多元回归技术, 以通用的计算流程, 提取用于解析发光成像数据的电池参数。下图展示了提取电池参数的拟合过程的流程图。



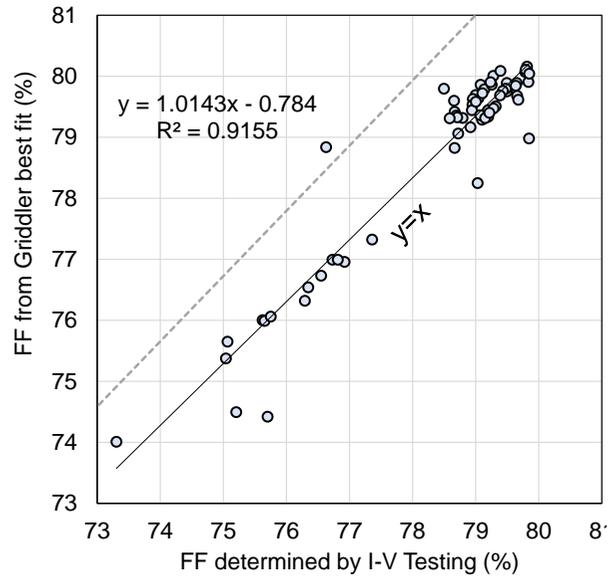
下图展示了一些电池的发光成像图及其相应的 SolarEYE 模拟图。



自动拟合的过程可以提取详细的电池参数，以便用户可以分离出限制太阳能电池效率的不同因素。例如，通过上面的拟合，SolarEYE 描绘出了电池的正面金属栅线接触电阻的空间分布，如下图所示（左图）所示。通过与相比来说测量耗时更长且具破坏性的 TLM 方法测量的接触电阻值以及发射极薄层电阻进行比较，两者基本吻合，但 SolarEYE 预测的接触电阻稍高。SolarEYE 预测的接触电阻和发射极薄层电阻之间也有很好的相关性，在合理的预期范围内的。

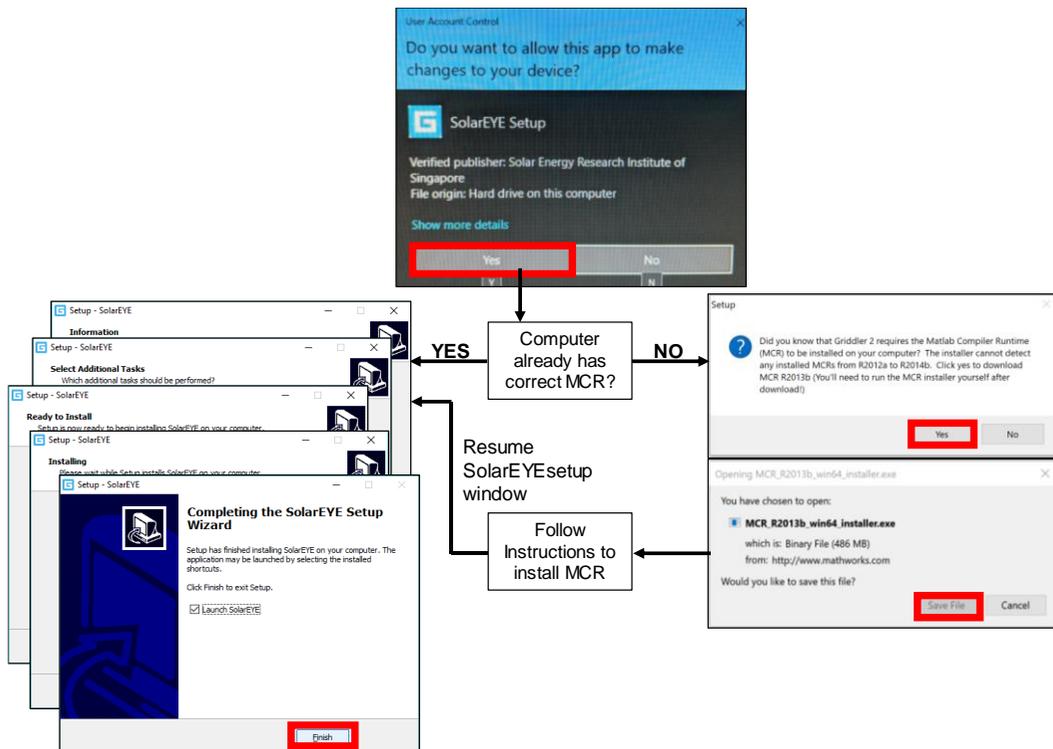


在一个 2017 年的研究中(J. Wong, P. Teena, D. Inns, “Griddler AI: New Paradigm in Luminescence Image Analysis Using Automated Finite Element Methods” , 44th IEEE PVSC, Washington (2017)), SolarEYE 的自动拟合功能被用于提取 80 片太阳能电池的接触电阻和复合电流，将其输入 Griddler，其计算的 I-V 曲线，填充因子很好的吻合了实验数据。

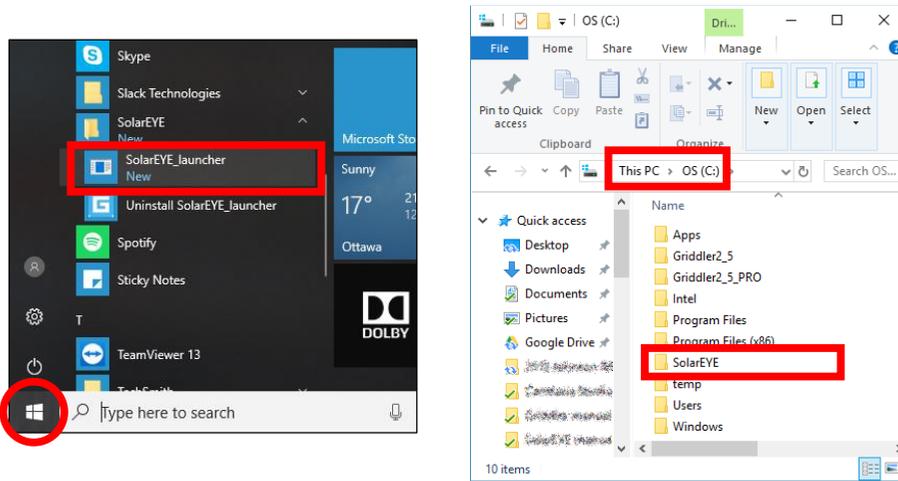


2.1 安装和首次使用

SolarEYE 预装了发光成像工具，如需更新，您可以下载 64 位 Windows 电脑的 SolarEYE 安装包。安装过程是自动的，非常简单。下图展示了安装流程。SolarEYE 是用 MATLAB 编写的，运行需要安装 Matlab compiler runtime (MCR R2013b)。安装包会自动检测是否安装了正确的 MCR 版本，若没有，则自动下载。



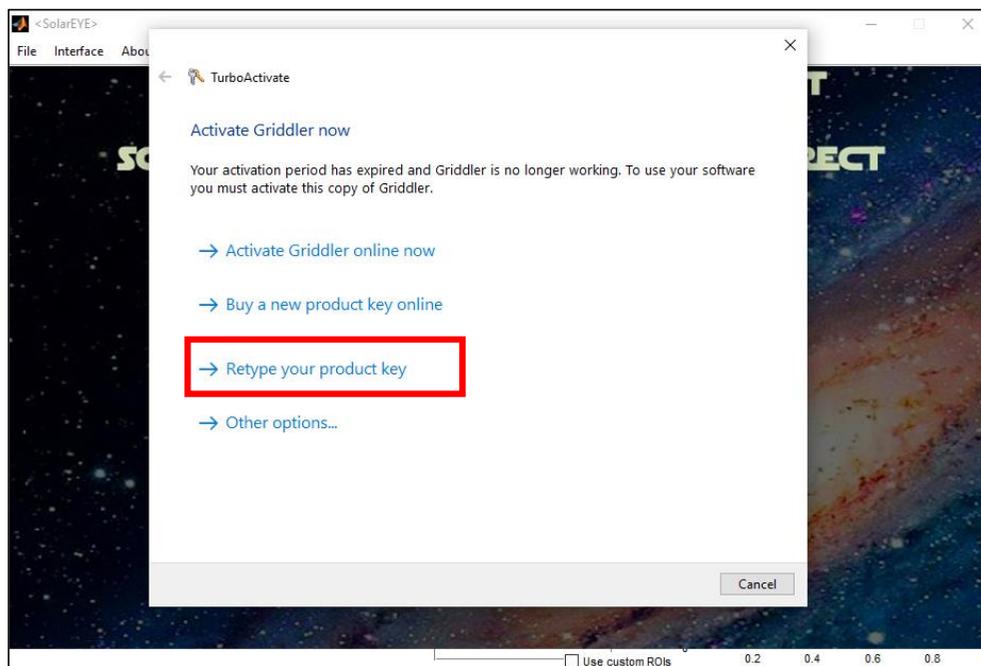
默认情况下，您可以从开始菜单（下图），或者从 C 盘，C:\SolarEYE\SolarEYE.exe 启动 SolarEYE。



SolarEYE 需要我们提供的加密 USB 或在线激活才能运行。两种方法都需要定期的 Internet 连接(加密 USB 大约每月一次；在线激活大约每天一次)。USB 加密狗的外观如下图所示，需要在程序运行时将其插入计算机。

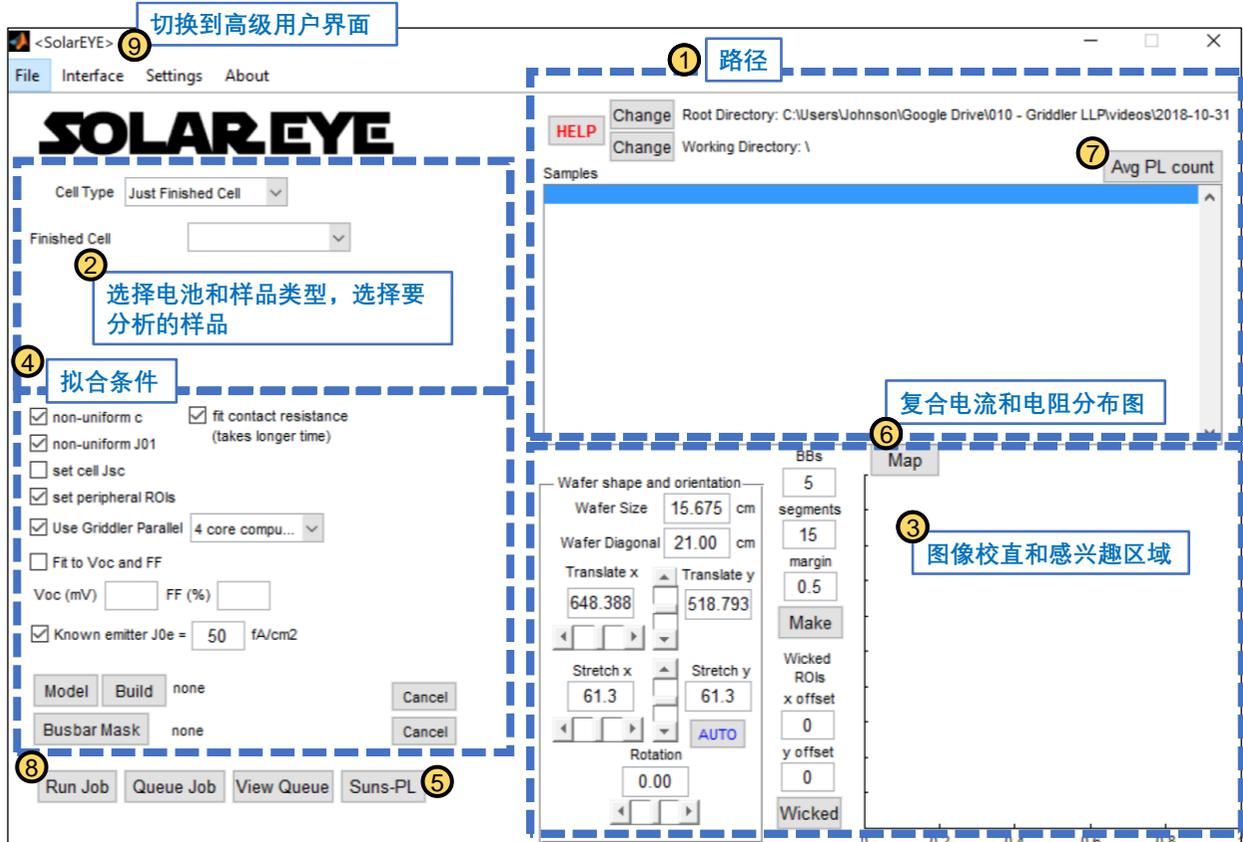


首次运行软件时，如果未检测到加密 USB，则会弹出一个屏幕，其中包含输入产品密钥的选项。使用提供给您的密钥，然后您就可以继续使用软件。



2.2 SOLAREYE 首页

运行 SolarEYE 之后，会出现一个启动画面。请耐心等待程序启动，首次运行将会需要大概半分钟时间来加载 MCR。下图展示了 SolarEYE 首页。



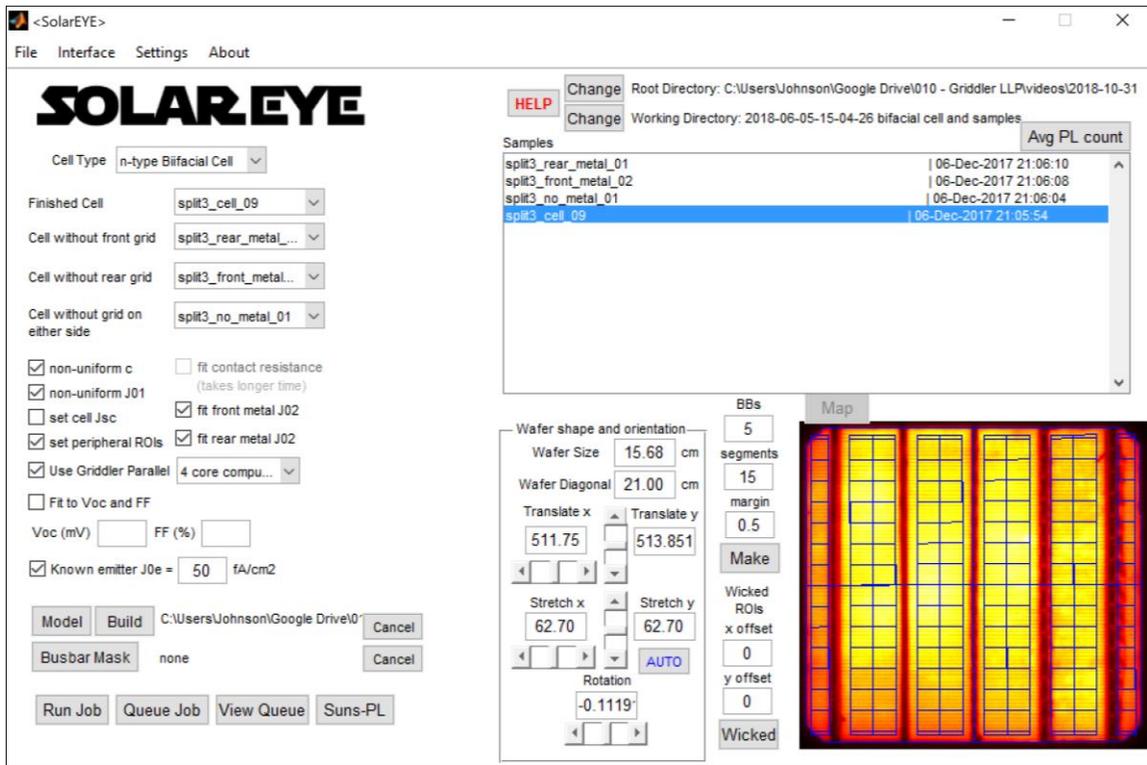
如上图所示，首页可大致分为下列分区：

1. 路径和样品列表窗口（参见 3.1）；
2. 电池和样品类型选择器（参见 3.2）；
3. 发光成像图像展示界面及手动校直（参见 3.3）；
4. 拟合条件，用于拟合的模型（参见 3.4）；
5. (此步骤可省略) 用样品发光成像数据画 Sun-PL（参见 3.5）；
6. (此步骤可省略) 复合电流和电阻分布图（参见 3.6）；
7. (此步骤可省略) 显示工作目录中所有接近 1-Sun 样本的 PL 图像的平均值（标准化为太阳和曝光时间）

(见 3.7)

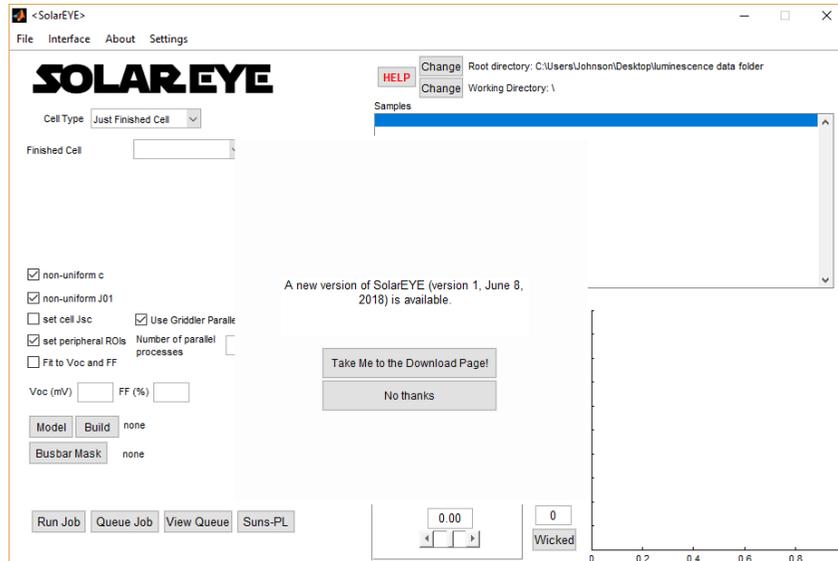
- 8. 运行或者加入队列 (参见 3.8);
- 9. 在简易和高级用户界面之间切换 (此手册并未包含);

下图展示了列举了样品路径, 选择了电池和样品类型, 并规定了拟合条件之后的 SolarEYE 首页。

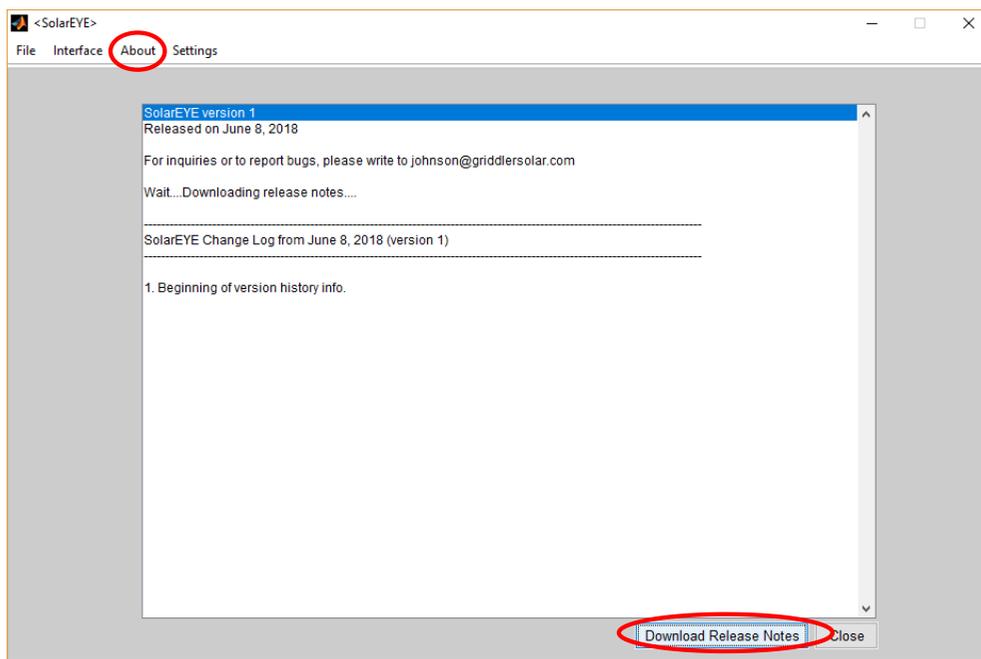


2.3 SOLAREYE 更新通知

我们定期推出 SolarEYE 的更新。您会在下图所示的 SolarEYE 模拟页面接收更新通知。我们建议您及时更新，点击“Take Me to the Download Page”，下载最新的安装包。当您运行安装包，它会自动覆盖您电脑上的旧版 SolarEYE。



您可以点击顶部菜单栏的“About”查看版本号。点击“Download Release Notes”可以查看每一个 SolarEYE 版本所做的更改。

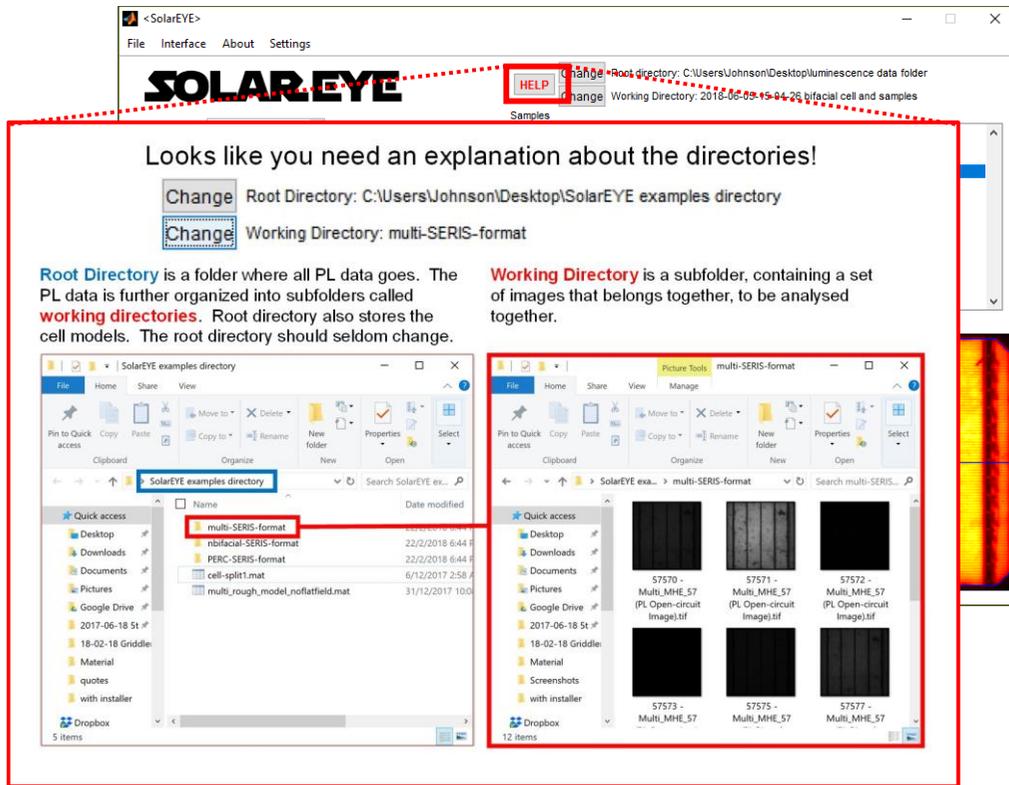


3 SOLAREYE软件使用分部指南

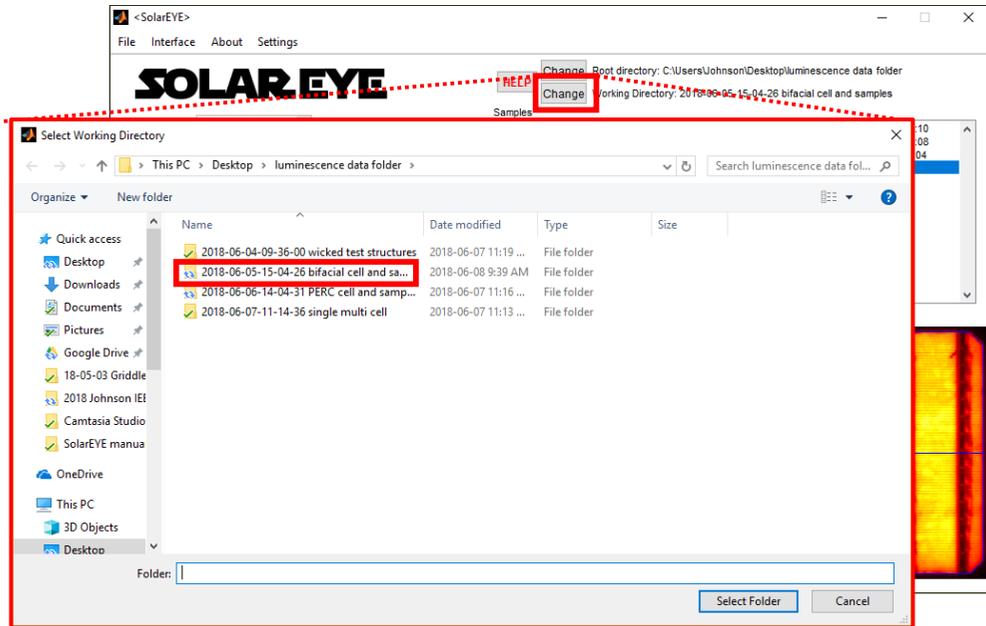
SolarEYE 集成了发光成像硬件，常规测量流程以及 SolarEYE 软件来进行图像解析和分析。希望您可以在电脑上使用 SolarEYE 软件来收集和储存发光成像图像。

3.1 路径和样品列表

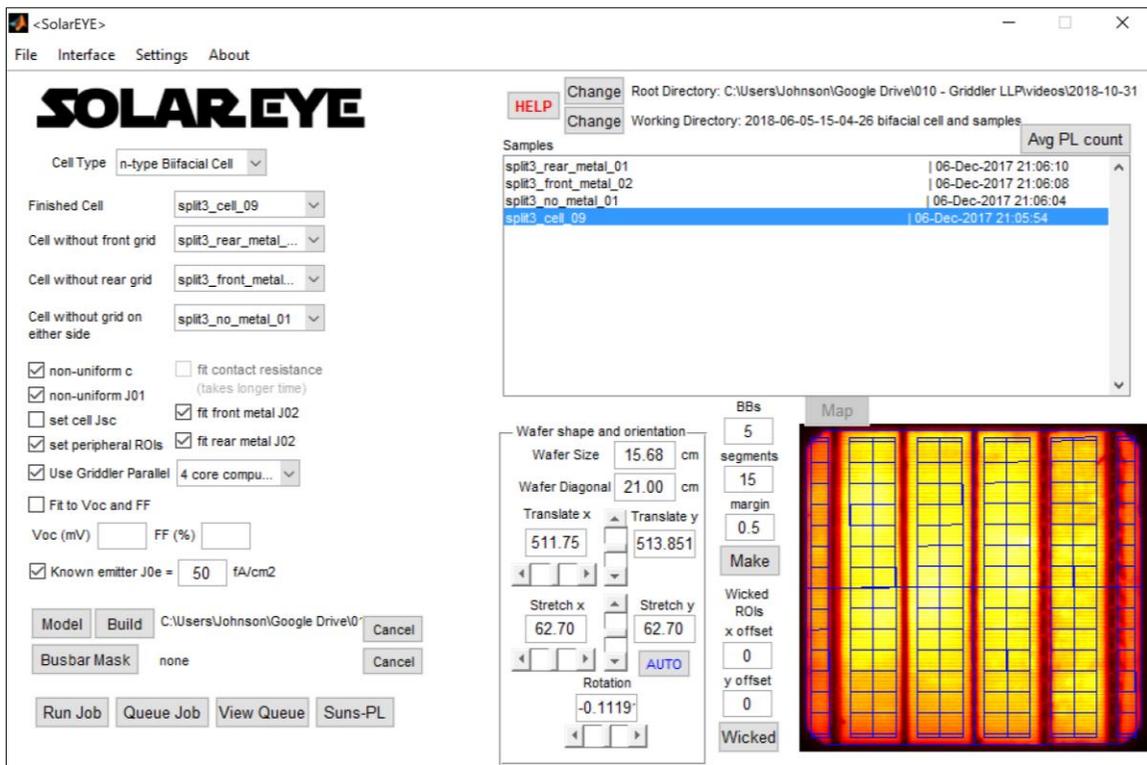
SolarEYE 发光成像测量流程将所有的数据存放在同一个根目录文件夹，并将属于每一组的样品的数据存放在单独的子文件夹中。您可以点击 HELP 按钮来获取文件结构的解释。



要选择分析某一组样品，单击“Change”工作路径来选择包含这组样品的发光成像图像的文件夹。



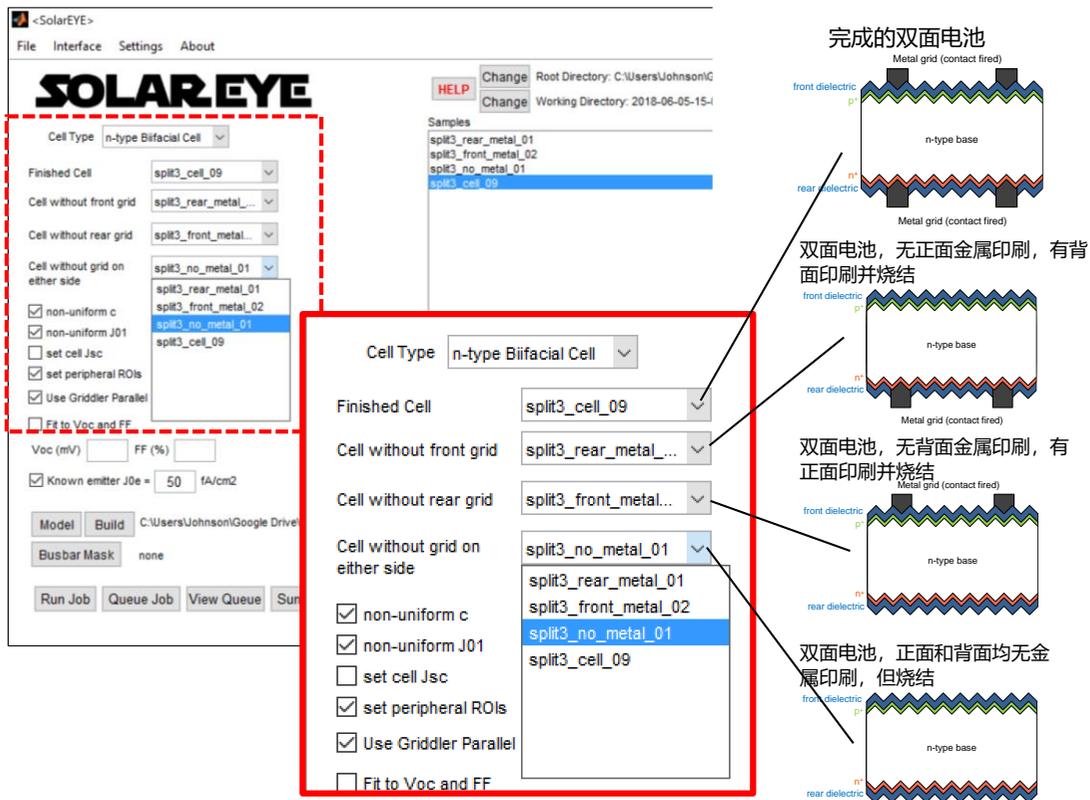
当您选择这个工作路径时，SolarEYE 会在文件夹中搜索并提取每一张图的样品名称，发光成像条件。然后，它将列出这一工作路径中包含的所有不同样品的名称。



3.2 电池和样品类型选择器

现在这个版本的 SolarEYE 硬件支持三种不同的常规测量流程（取决于您分析的电池类型和您想提取的电池参数）。详情参见第 4 节。

在当前的工作路径，这些样品属于流程 1（双面电池）。下面让我们来看看设置相关分析的流程。在下图展示红色方框内，选择“Cell Type” = n-type Bifacial Cell。这样，相关样品类型名称将出现。您必须选择正确的样品类型。在下面的例子中，我们有“Finished Cell”（“完成的双面电池”）= split2_cell_09，“Cell without front grid”（“双面电池，无正面金属印刷，有背面印刷并烧结”）= split3_rear_metal_01，“Cell without rear grid”（“双面电池，无背面金属印刷，有正面印刷并烧结”）= split3_front_metal_02，“Cell without grid on either side”（“双面电池，正面和背面均无金属印刷，但烧结”）= “split3_no_metal_01”。



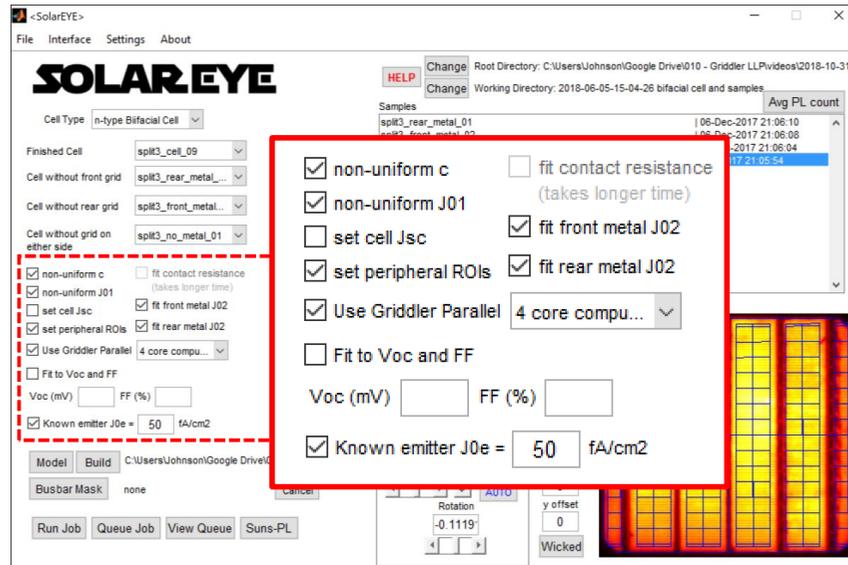
3.3 发光成像图像展示页面和手动校直



当您点击路径列表中的一个样品时，该样品的一幅发光成像图展示在下图所示的页面上。同时在晶片图像的边缘应该出现一个蓝色的边框，大致和晶片边缘重合。这个边框定义了 Griddler 模型中的坐标，用于在之后的拟合过程中模拟发光成像图。SolarEYE 会自动尝试校准每一幅图的边框，使其吻合。但是，仔细检查是否吻合总不失为一个好主意。如果不吻合，您可以给上图所示的“Translate x”，“Translate y”，“Rotation”不同的值，来使蓝色边框更好的吻合晶片边缘。

还是来看上面的图，SolarEYE 也定义一些 region of interests (ROIs, 感兴趣区域)。在这些 ROI 中，实验和模拟的发光成像图的光强会被平均并进行比较。点击上图中的“Make”来展示这些感兴趣区域。在“BBs”这一格中，填写正确的主栅数量是非常重要的。如果您输入错误的主栅数量，有些 ROI 将会落在主栅上，这些区域不适合用来分析和比较发光成像图的光强。

3.4 拟合条件，用于拟合的模型

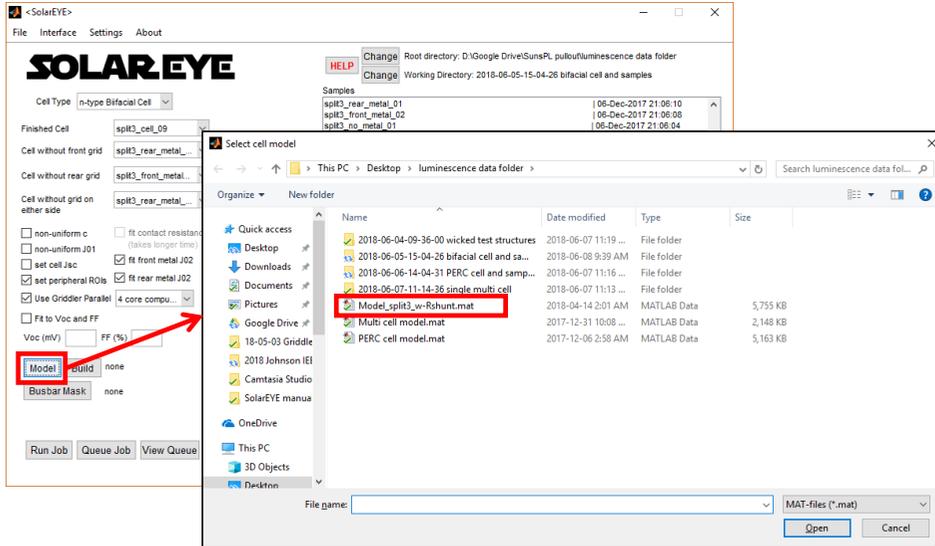


在这一节，最好是先用默认设置。如果您的样品是多晶硅电池，我们推荐您勾选 “non-uniform c” 和 “non-uniform J_{01} ”。如果您知道预期的开路电压(V_{oc})和填充因子(FF)，并且您想通过拟合来解释这些 I-V 参数，点击 “Fit to Voc and FF”，然后在相应的框中输入预期的 V_{oc} 和 FF

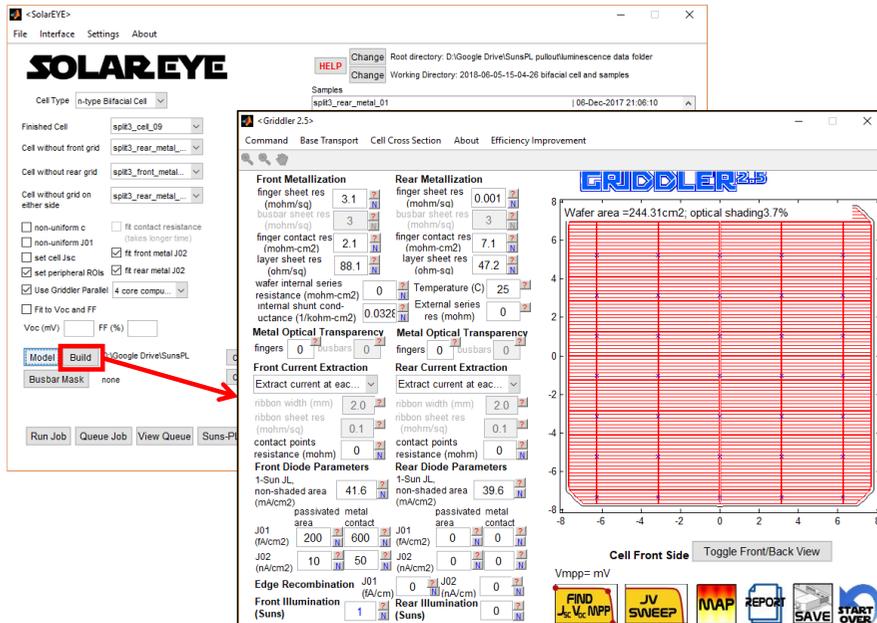
自版本 3 更新：如果太阳能电池图像包含接触电阻分析所需的发光图像，你就可以选择 (“fit contact resistance”) 复选框。选中此框可使 SolarEYE 自动调谐接触电阻。取决于电池类型 (双面，或 PERC，或 Al-BSF 电池)，接触电阻表示代表不同电阻的总和。对于双面电池，接触电阻将是前后金属栅极接触电阻的总和。对于 PERC 电池，接触电阻将是前金属栅极接触电阻和后局部接触电流拥挤的总和。

从版本 8 更新：有一个名为 “Known emitter J_{0e} ” (已知发射极 J_{0e}) 的新框。如果用户从实验中知道太阳能电池的发射极 J_{0e} ，选中此框并填写已知的 J_{0e} 值，SolarEYE 将钝化区域内的拟合 J_0 分成两部分：已知的发射极 J_{0e} 将成为最佳拟合模型中的前钝化区域 J_{01} ，其余部分将成为最佳拟合模型中的 base J_{01} 。如果电池类型是 PERC，则通过调整后部接触的 SRV 值，将在 rear local contact calculator 页面中尝试通过局部接触和后部钝化区域将 base J_{01} 再仔细的区分。请参见 Griddler 手册 v1, P.46。

下面，点击 “Model” 来选择您想用于拟合的 Griddler 电池模型。选中的 Griddler 模型应该和要拟合的电池具有相同的晶片形状和金属图案。如果您没有已经设置好的模型，点击 “Build” 来从零开始创建。



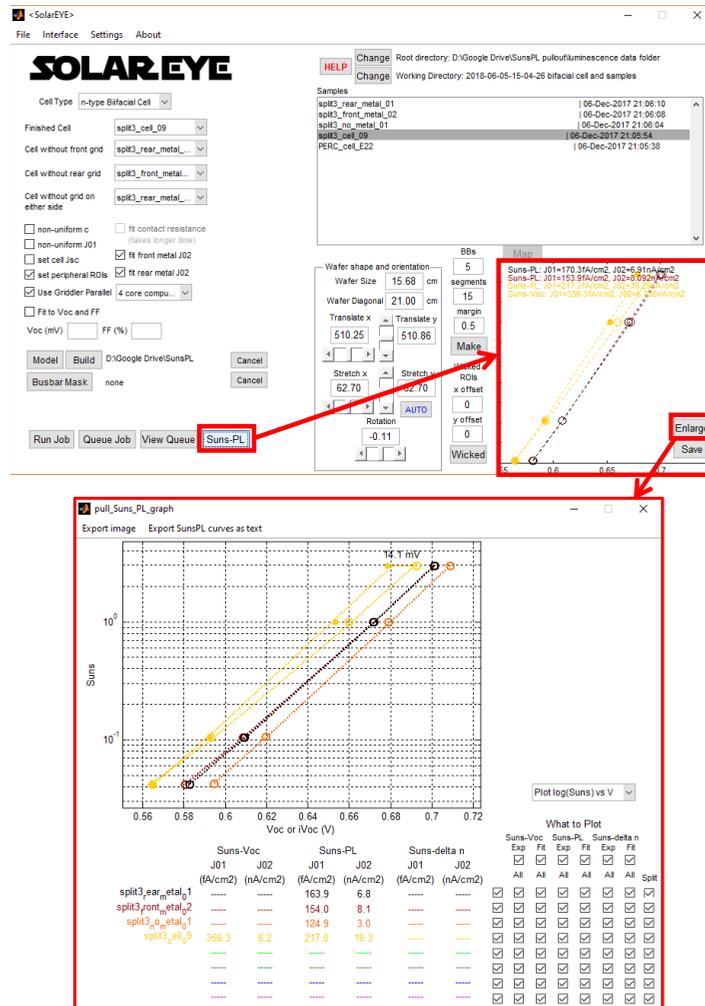
如果您点击“Build”，并没有导入模型，Griddler 将会打开，以便您从零开始创建电池模型。如果您已经选好模型，点击“Build”将会打开 Griddler，并且 Griddler 将会打开已选模型供您编辑。



3.5 (此步骤可省略) 用样品发光成像数据画 Suns-PL

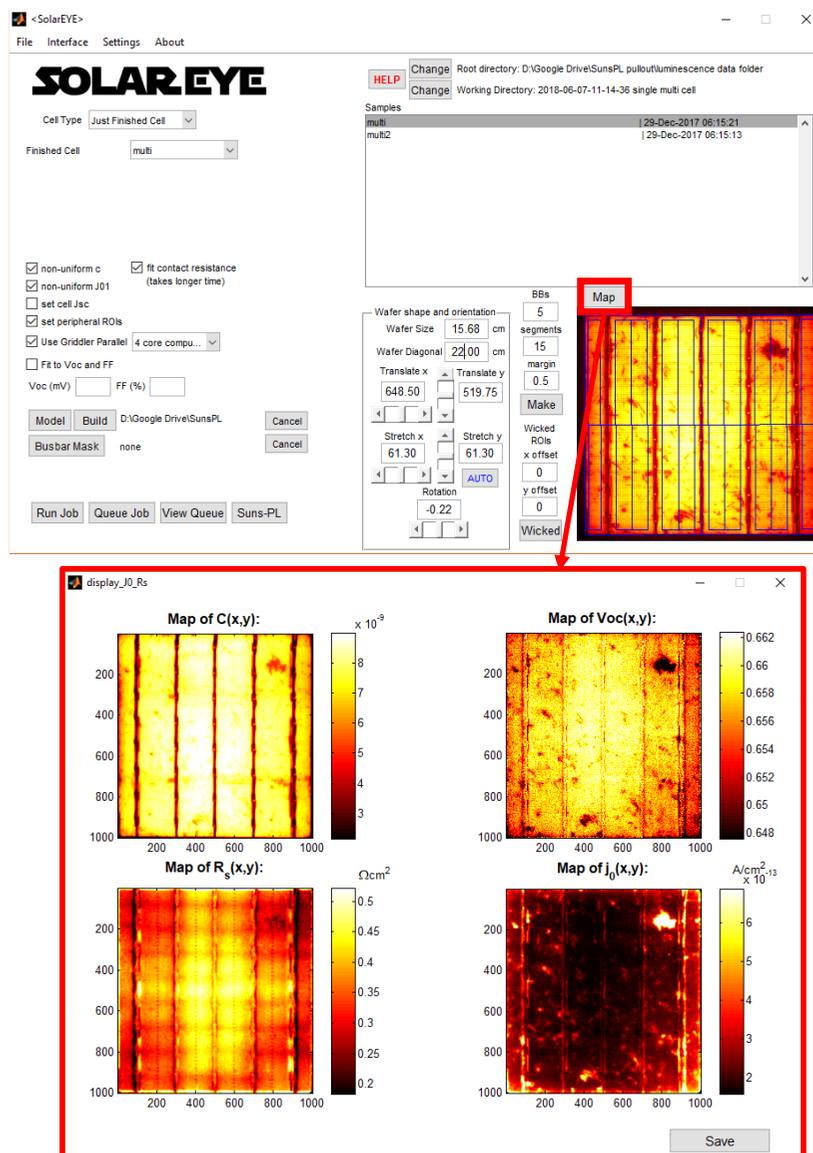
Suns-PL 和 Suns-Voc 是用来画样品开路光致发光 (photoluminescence, PL) 数据的特殊图像。它是可视化电池质量的一种方式。这是一个可选步骤。

点击“Suns-PL”，SolarEYE 将会收集属于每一种样品的 PL 图像，并展示所画图像。点击“Enlarge”在一个大窗口中展示图像。在这个例子中，黄色，黑色，红色，橙色数据点分别对应四中不同样品（完成的双面电池，双面电池，无正面金属印刷，有背面印刷并烧结，双面电池，无背面金属印刷，有正面印刷并烧结，双面电池，正面和背面均无金属印刷，但烧结）的电压和光照强度。无需关注细节，您也可以看到没有金属印刷的电池的电压最高，完成的电池的电压最低。这表明金属化的过程通常会引入复合损耗。图像窗口提供了根据 Suns-PL 曲线提取的每一个样品的 J_{01} , J_{02} (详情参见 Griddler 用户手册 2.7.5)。这给您一个对复合电流中金属化所占比重的大概预估。这里我们不对这些图像进行算法分析。SolarEYE 用 Griddler 进行自动拟合的方法是提取复合参数的更加缜密的方法。



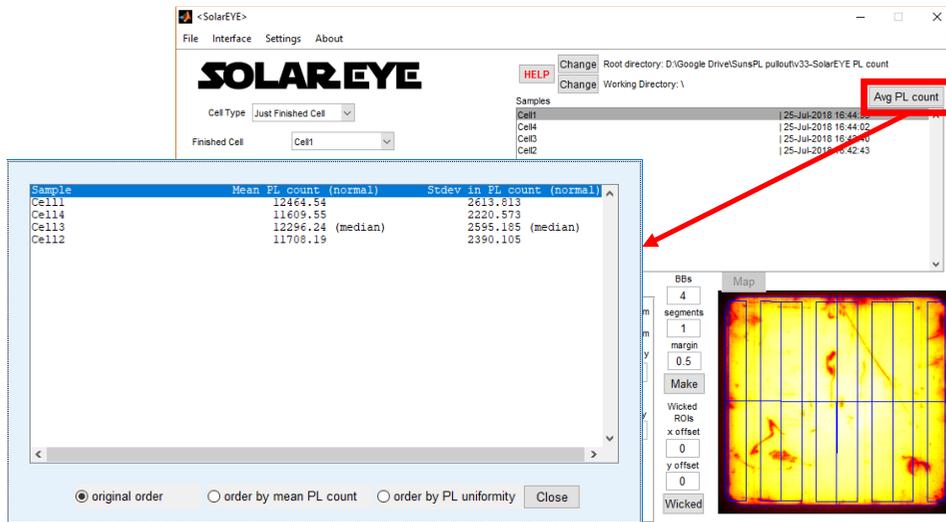
3.6 (此步骤可省略) 复合电流和电阻分布图

为了非常快速地评估复合电流和电阻的分布的均匀性，可以在列表框中选择具有用于辨别 J_0 和 R_s 的发光图像的样品。此时，图像上方的“Map”按钮就可启用。按下此按钮，将弹出一个单独的窗口，显示四个空间图： $C(x,y)$, $V_{oc}(x,y)$, $R_s(x,y)$, $J_0(x,y)$ 。第一种不用于普通工作。第二个 (V_{oc}) 是 1 太阳时的开路电压图。第三个 (R_s) 是电阻的分布，第四个 (J_0) 是饱和电流密度的分布，其表示复合电流的均匀性。作为一个粗略的指南， $R_s \leq 0.5 \text{ ohm-cm}^2$ 是一个理想的参数。 $R_s \leq 1 \text{ ohm-cm}^2$ 不错，但还有改进的余地。具有异常高的 R_s (大于 5ohm-cm^2) 的区域的电池表明接触不均匀。 J_0 和 V_{oc} 图的大小因太阳能电池类型而异。通常可以观察整体的均匀性，以辨认制造过程相关的问题。



3.7. (此步骤可省略) 显示工作目录中所有接近 1-Sun 样本的 PL 图像的平均值 (标准化为太阳和曝光时间)

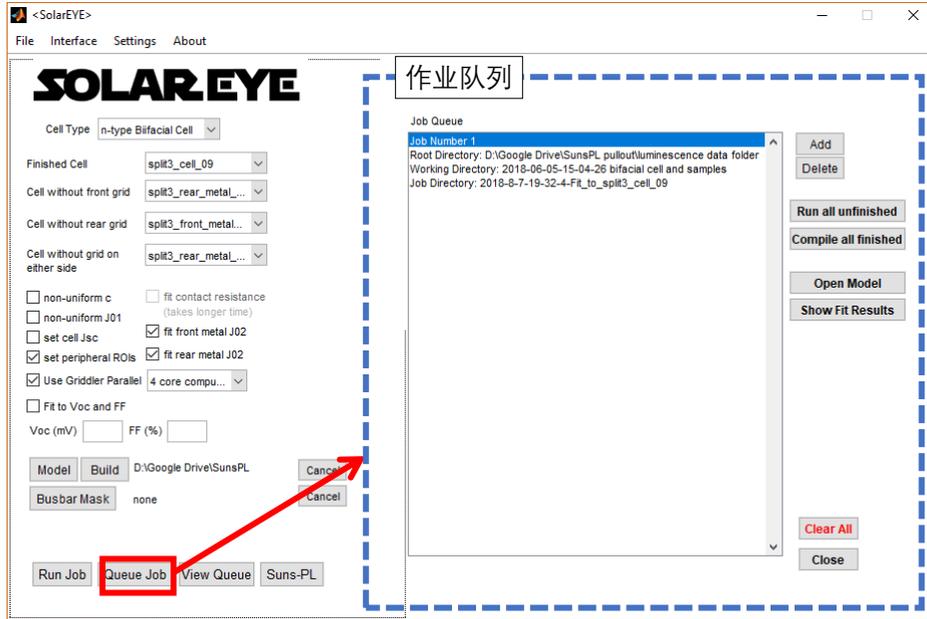
对于工作目录中的所有样本, 此按钮允许您列出感兴趣区域中的平均 PL 值 (请参见下图中的蓝色框)。每个样本所选择的都为最接近 1 Sun 的 P L 图像, 标准化为太阳和曝光时间。这样, 您可以比较目录中所有样本的相对亮度 (代表电压)。我们鼓励用户在準備樣本的过程中, 每種不同類型的樣本各製造最小 5 片, 并在 SolarEYE 中利用此功能首先预先选择中位数值の樣本, 去完成整個 SolarEYE 发光成像和自动拟合程序。



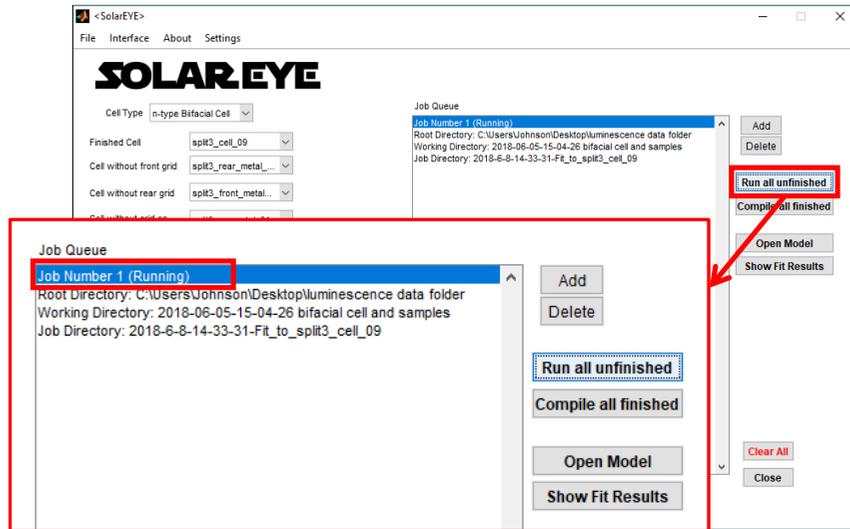
3.8 运行 “Run Job” 或者加入队列 “Queue Job”

最后, 我们已经准备好来做自动拟合发光成像图, 并提取电池参数了。我们可以点击 “Run Job” 或者 “Queue Job” 来做这件事。“Run Job” 会在当前工作路径中运行并分析。“Queue Job” 允许您将这些分析指令加入一个队列, 以便您之后用同一设定来拟合很多文件夹中的数据, 并用 SolarEYE 一个接一个地拟合这些文件夹。取决于计算机的运行速度, 分析一个文件夹可能会花费 30 分钟的时间。加入队列功能的优势在于所有的分析可以集中在计算机不忙的一整块时间内完成 (比如说, 晚上的时间)。

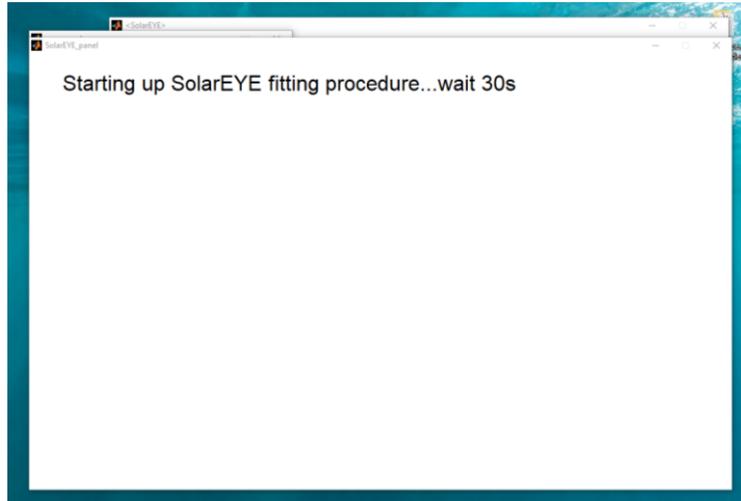
我们来选择 “Queue Job”, 现在加入队列的作业显示在右侧。当前列出的工作路径中, 我们只有一项作业。



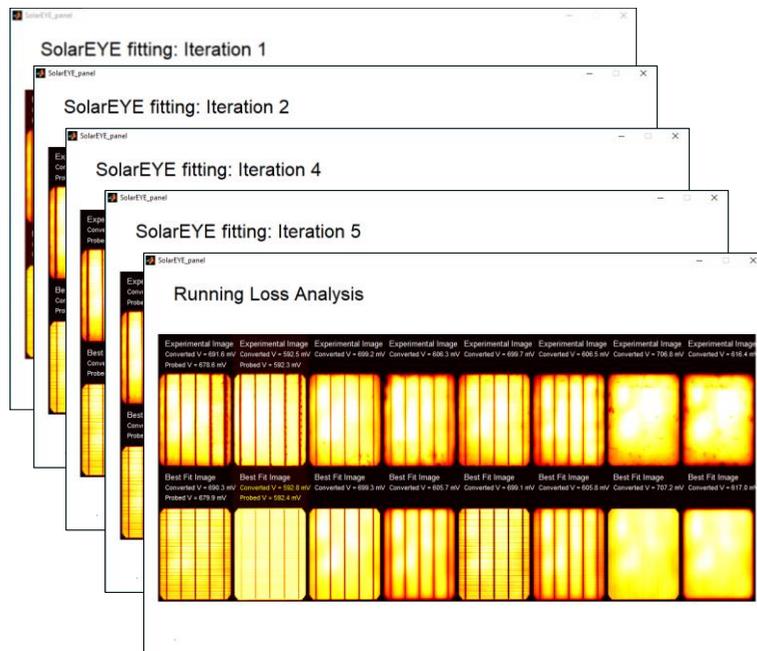
接下来，我们不再创建新的作业了，点击“Run all unfinished”。这将会使 SolarEYE 分析工作路径中我们已经设置好的双面电池的数据。当您点击“Run all finished”，队列中的提一个作业将显示正在运行。请耐心等待，因为显示新的信息会需要一些时间。



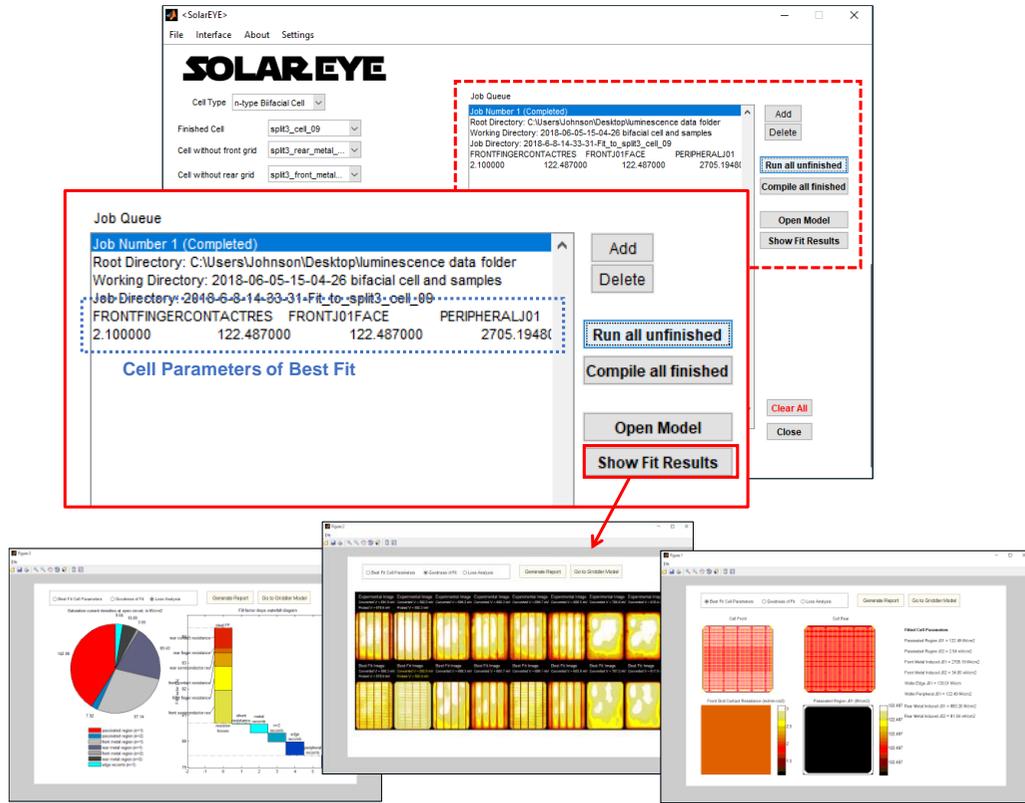
在 SolarEYE 开始分析工作的时候，您可以看到屏幕将显示“Starting up SolarEYE fitting procedure...wait 30s”。



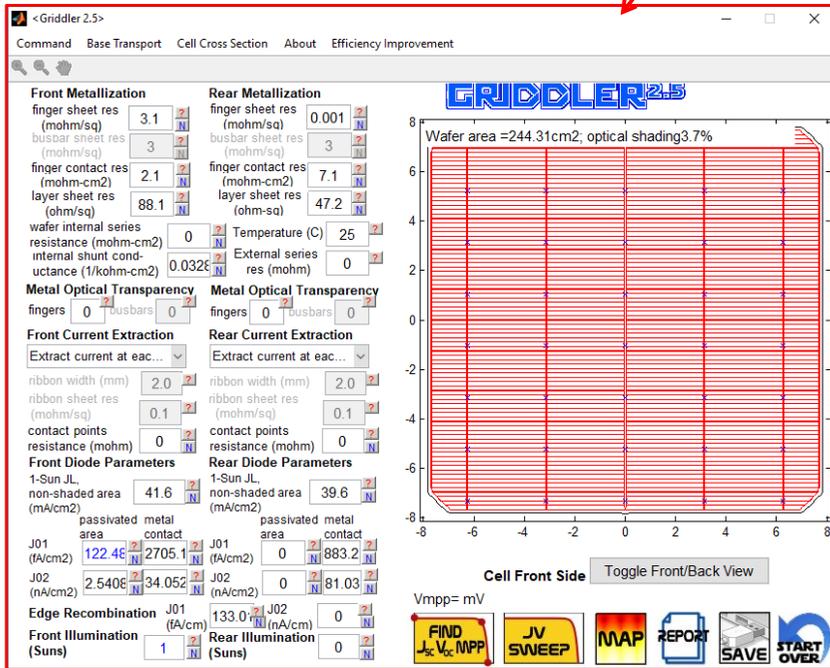
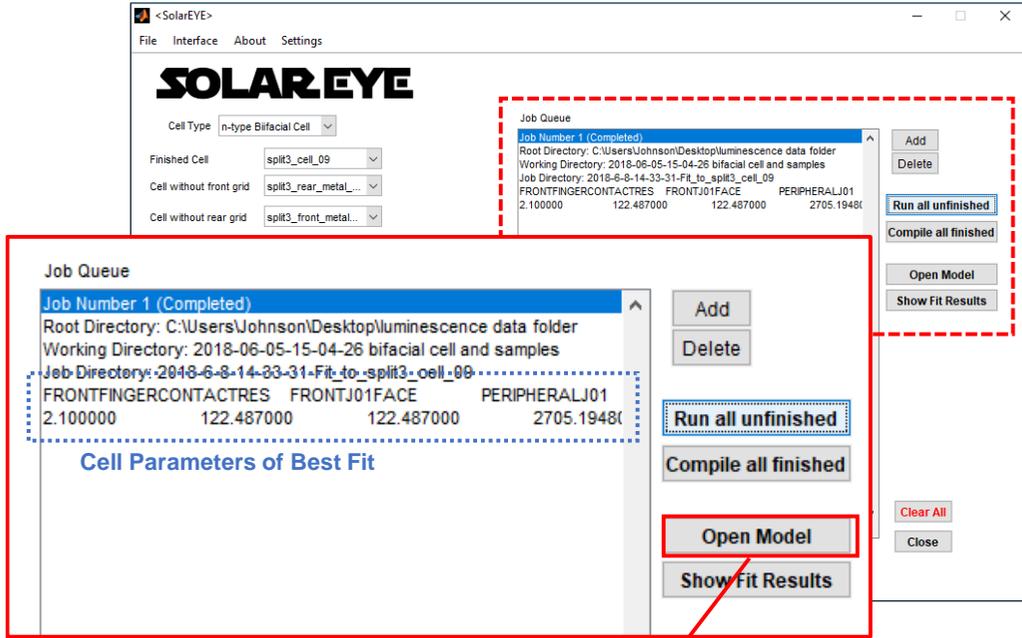
在之后 5-30 分钟之内，您可以看到 SolarEYE 将迭代展示实验发光成像图及其相应的模拟图像。在得到比较好的拟合结果之后，SolarEYE 会把拟合所得电池参数输入 Griddler 进行损耗分析。当 SolarEYE 完成分析时，拟合窗口将关闭。



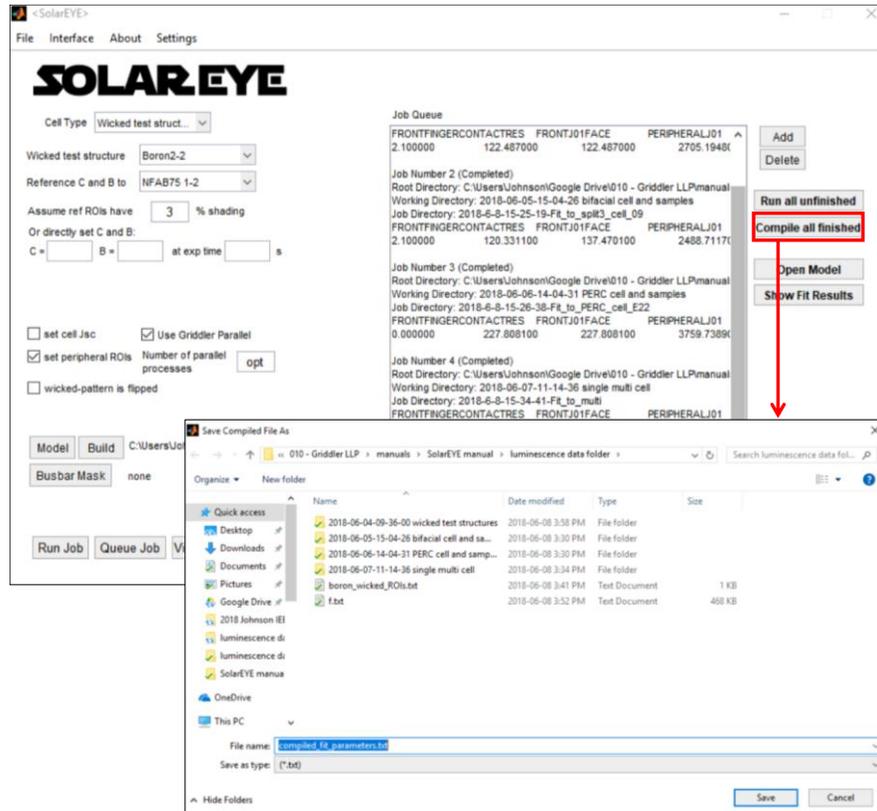
当 SolarEYE 完成分析时，拟合窗口将关闭。然后您可以看见在作业队列中，完成的作业显示 Completed，并列出了最优拟合所得的电池参数。现在，您可以点击“Show Fit Results”，SolarEYE 将显示损耗分析窗口（详情参见 Griddler 用户手册 2.8），拟合度和最优拟合的电池参数。



在作业队列中，点击“Open Model”来打开 Griddler 模型及最优拟合的电池参数。

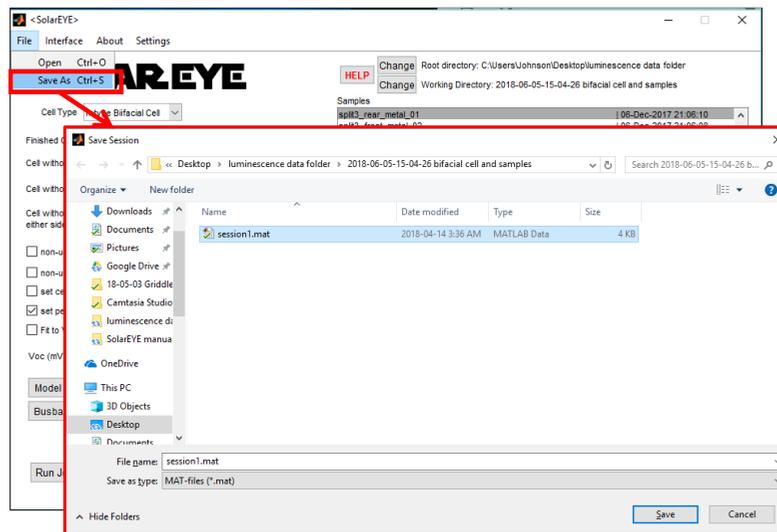


如果您运行了多个作业，如图所示，您可以将所有作业所得最优拟合的电池参数编译成表，以方便比较。



3.9 保存和打开会话

你可以随时保存会话并在之后从 File 菜单打开并导入路径，设置和队列



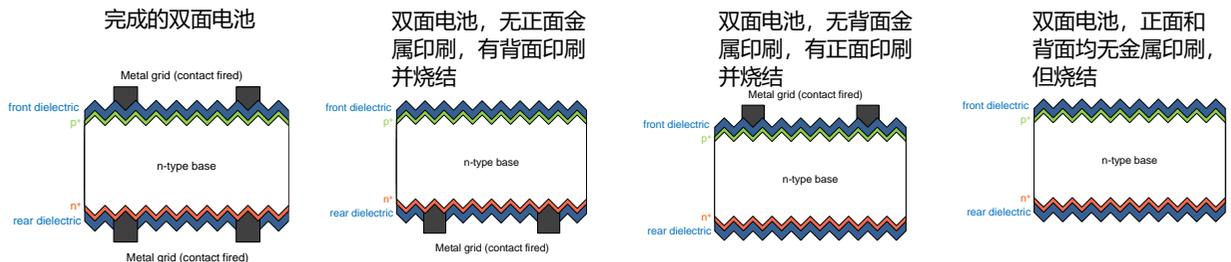
4 支持的 SolarEYE 测量和分析流程

当前的 SolarEYE 硬件支持三种测量流程（取决于您想分析的电池类型和您想提取的电池参数）。

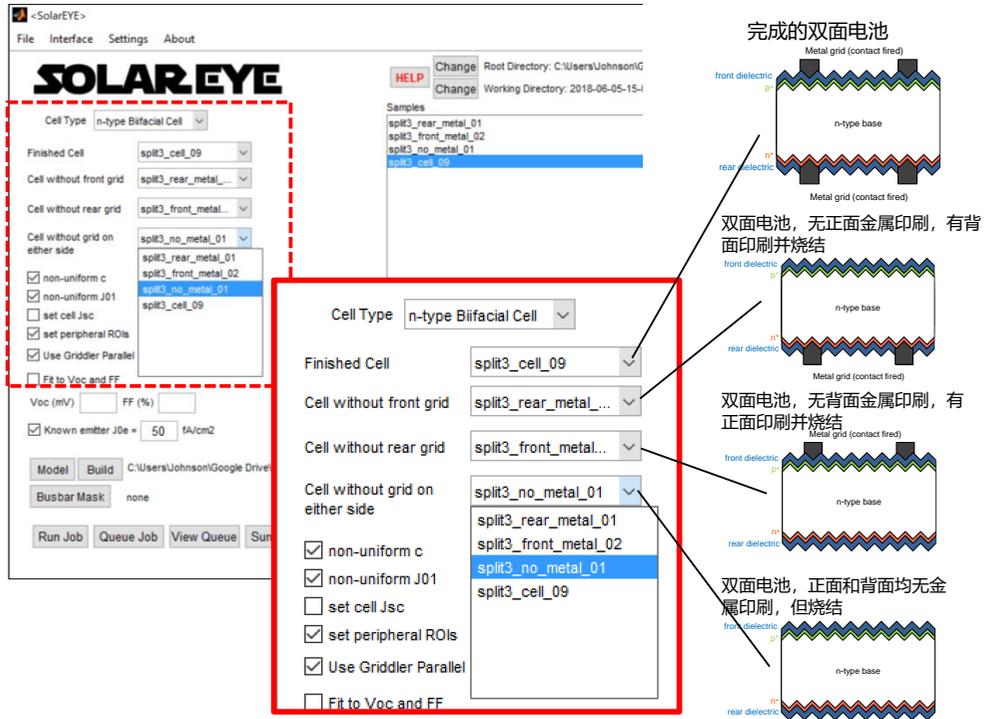
4.1 双面太阳能电池

双面太阳能电池，对应 SolarEYE 中的第一个分析流程，需要如下四种样品：1) 完成的双面电池，2) 双面电池，无正面金属印刷，有背面印刷并烧结，3) 双面电池，无背面金属印刷，有正面印刷并烧结，4) 双面电池，正面和背面均无金属印刷，但烧结。我们推荐每一类样品至少准备五片样品，测量每一片样品的 1Sun PL 图，并选择每一组中具有平均 PL 强度中位数的样品进行分析（参见 3.6）。SolarEYE 软件将会分析这四种样品的发光成像图并提取钝化区 J_{01} , J_{02} ，正面金属 J_{01} , J_{02} ，背面金属 J_{01} , J_{02} 和边缘复合 J_{01} （详情参见 Griddler 用户手册 2.7.5）。它也会提取一个叫做外围 J_{01} 的参数，它代表了靠近晶片边缘的非均匀 J_{01} 。**自版本 3 更新**：如果完成的双面太阳能电池具有适合辨别电阻的图像，则可以启用“fit contact resistance”复选框。SolarEYE 会首先运行完成的电池分析流程（见 4.3）以提取前后金属接触电阻，然后保留该电阻以完成双面分析流程以获得复合电流密度。这样，提取的参数也包括接触电阻的分布图。

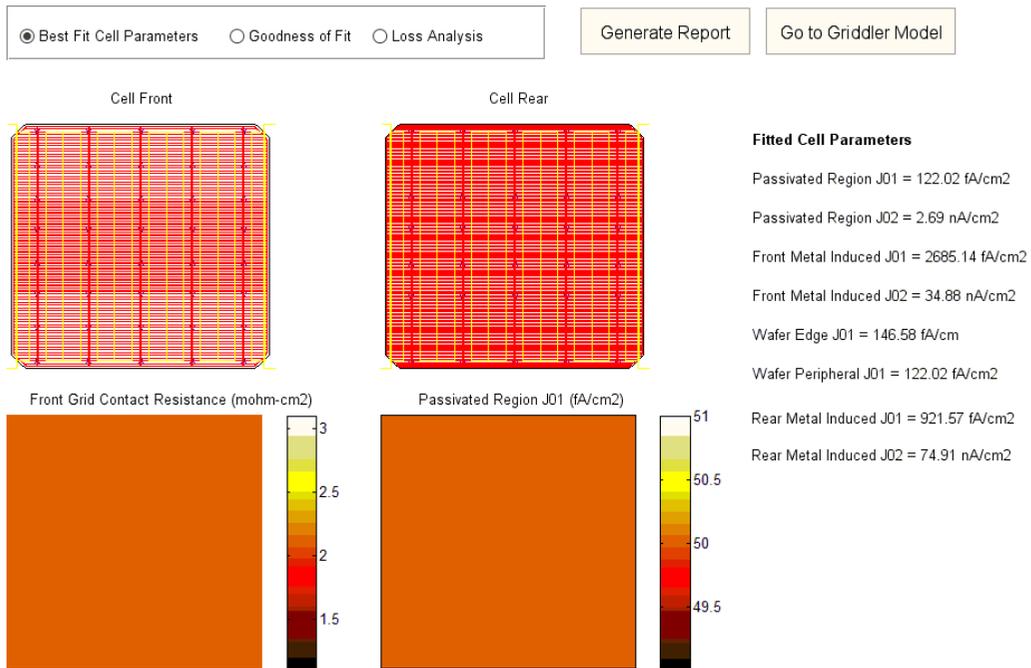
从版本 8 更新：有一个名为“Known emitter J_{0e} ”（已知发射极 J_{0e} ）的新框。如果用户从实验中知道太阳能电池的发射极 J_{0e} ，选中此框并填写已知的 J_{0e} 值，SolarEYE 将钝化区域内的拟合 J_0 分成两部分：已知的发射极 J_{0e} 将成为最佳拟合模型中的前钝化区域 J_{01} ，其余部分将成为最佳拟合模型中的 base J_{01} 。在下面的示例中，已知发射极 J_{0e} 设置为 50 fA / cm²。

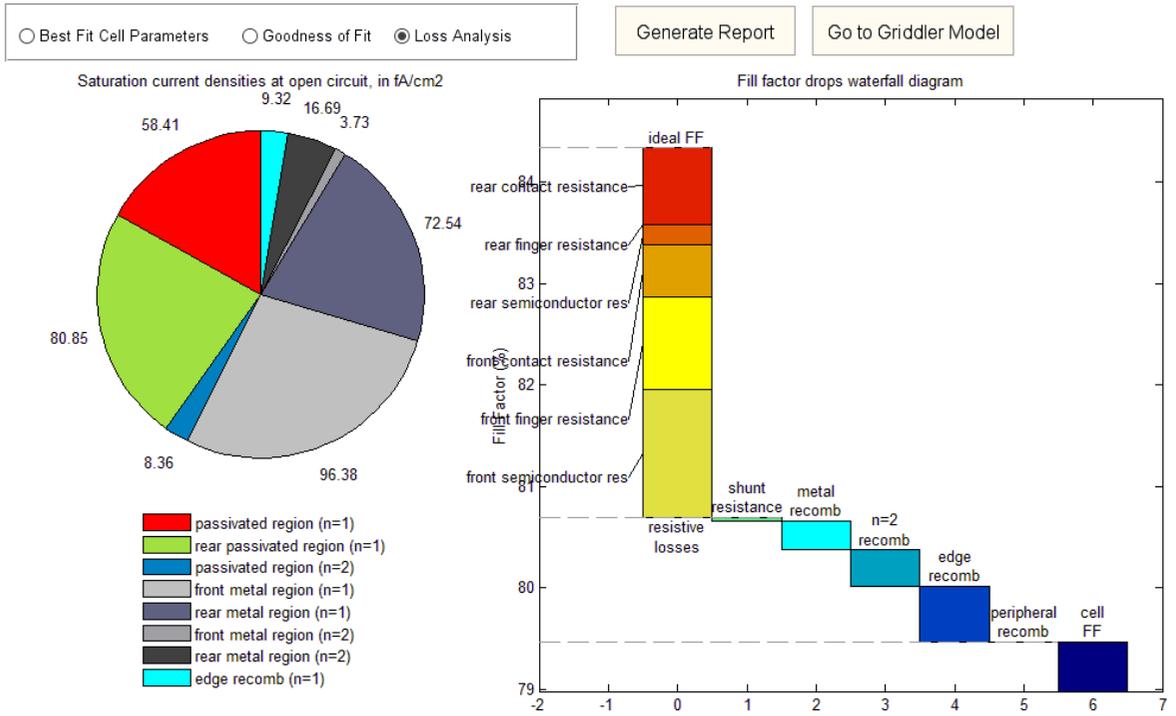


下图展示了电池和样品选择窗口（参见 3.2）。您需要选择“Cell Type” = n-type bifacial cell，然后，相应的样品类型会出现。您需要根据您的样品，选择正确的样品类型。

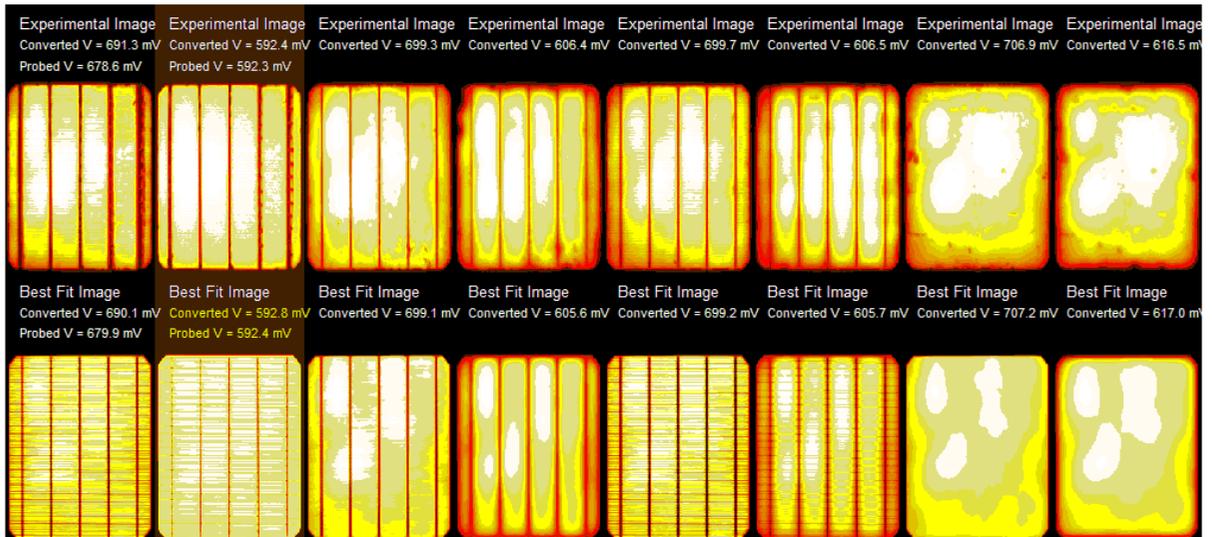


下图所示为一个典型的双面太阳能电池分析流程对应的损耗分析图表，拟合度展示，以及最优拟合电池参数页面。





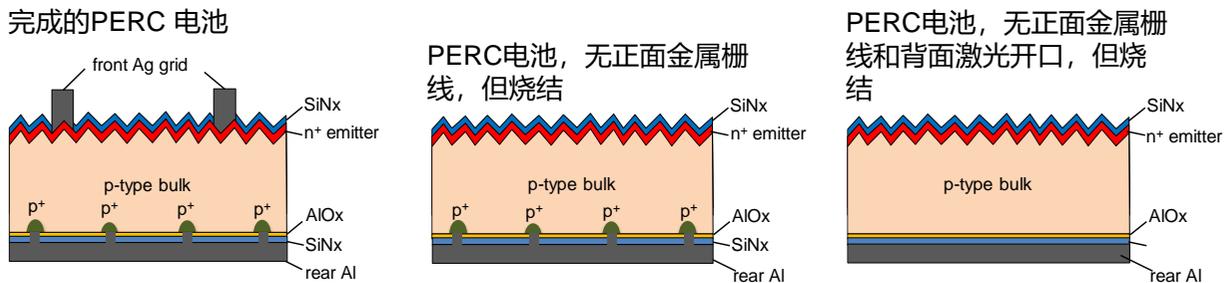
SolarEYE fitting: Iteration 5



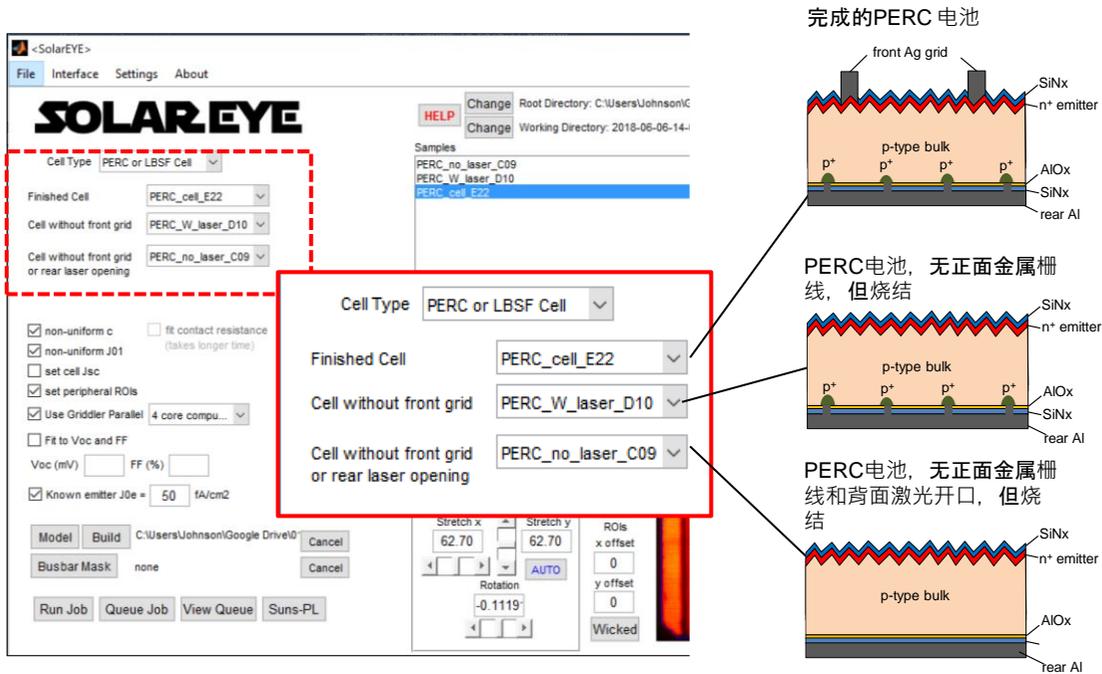
4.2 PERC 太阳能电池

PERC 电池，对应 SolarEYE 中的第二种分析流程，需要如下三种样品：1) 完成的 PERC 电池；2) PERC 电池，无正面金属栅线，但烧结；3) PERC 电池，无正面金属栅线和背面激光开口，但烧结。我们仍然推荐每种样品至少准备 5 片样品，测量每一片样品的 1Sun PL 图，并取每一组中具有平均 PL 强度中位数的样品进行分析（参见 3.6）。SolarEYE 软件将会分析这四种样品的发光成像图并提取钝化区 J_{01} ， J_{02} ，正面金属 J_{01} ， J_{02} ，背面金属 J_{01} ， J_{02} 和边缘复合 J_{01} （详情参见 Griddler 用户手册 2.7.5）。它也会提取一个叫做外围 J_{01} 的参数，它代表了靠近晶片边缘的非均匀 J_{01} 。自版本 3 更新：如果完成的 PERC 太阳能电池具有适合辨别电阻的图像，则可以启用“fit contact resistance”复选框。SolarEYE 会首先运行完成的电池分析流程（见 4.3）以提取前后金属接触电阻，然后保留该电阻以完成 PERC 分析流程以获得复合电流密度。这样，提取的参数也包括接触电阻的分布图。

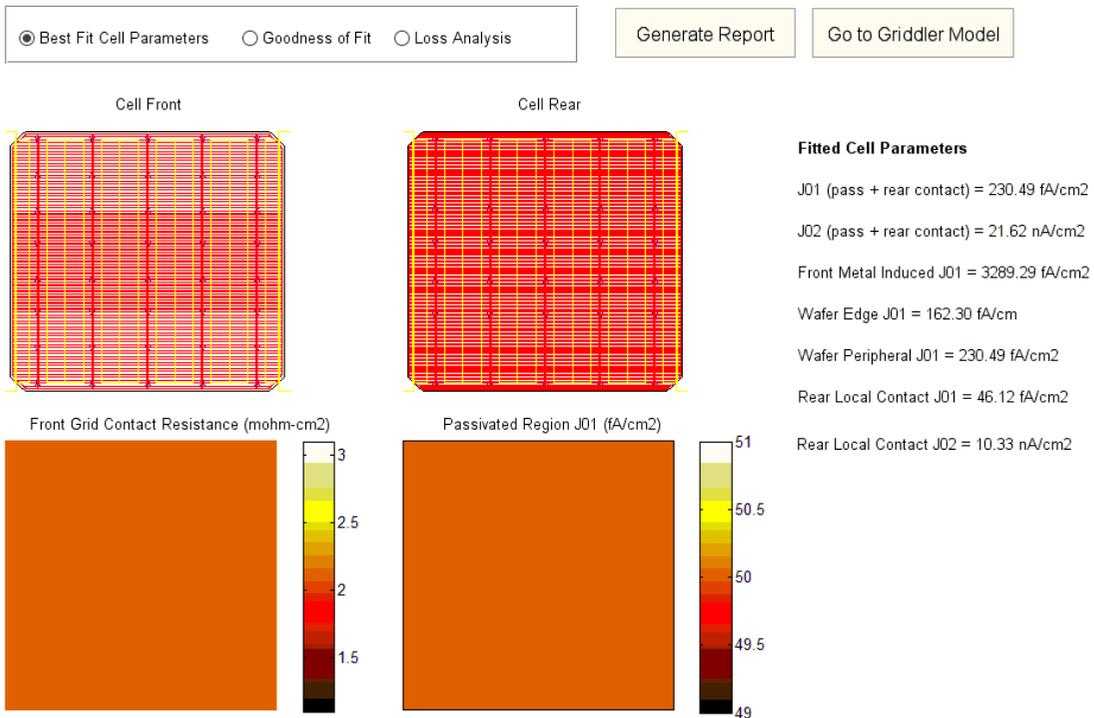
从版本 8 更新：有一个名为“Known emitter J_{0e} ”（已知发射极 J_{0e} ）的新框。如果用户从实验中知道太阳能电池的发射极 J_{0e} ，选中此框并填写已知的 J_{0e} 值，SolarEYE 将钝化区域内的拟合 J_0 分成两部分：已知的发射极 J_{0e} 将成为最佳拟合模型中的前钝化区域 J_{01} ，其余部分将成为最佳拟合模型中的 base J_{01} 。在下面的示例中，已知发射极 J_{0e} 设置为 $50 \text{ fA} / \text{cm}^2$ 。



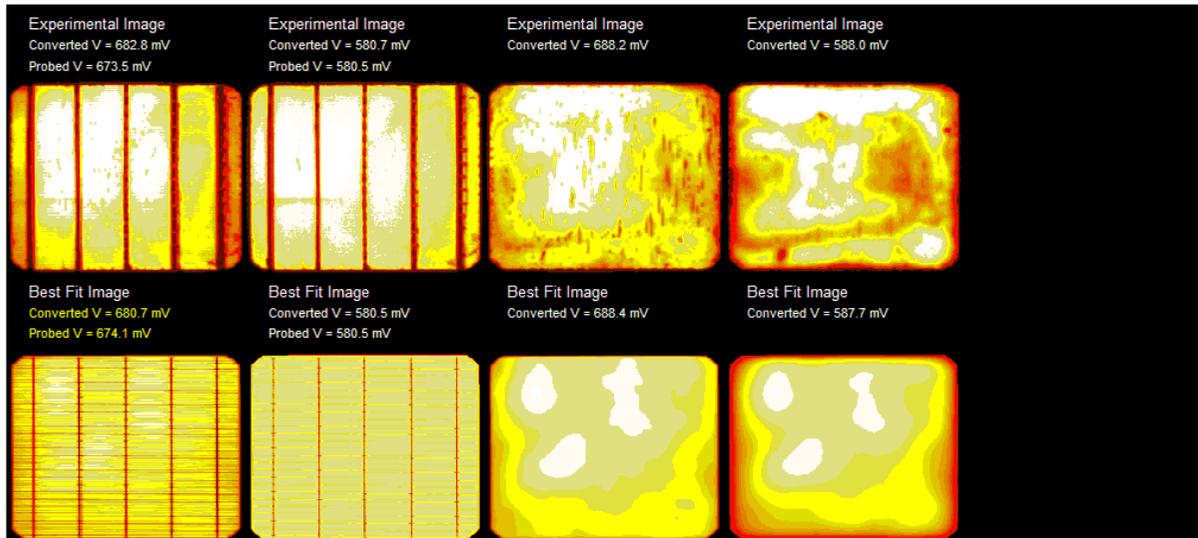
下图展示了电池和样品选择窗口（参见 3.2）。您需要选择“Cell Type” = PERC or LBSF cell，然后，相应的样品类型会出现。您需要根据您的样品，选择正确的样品类型。



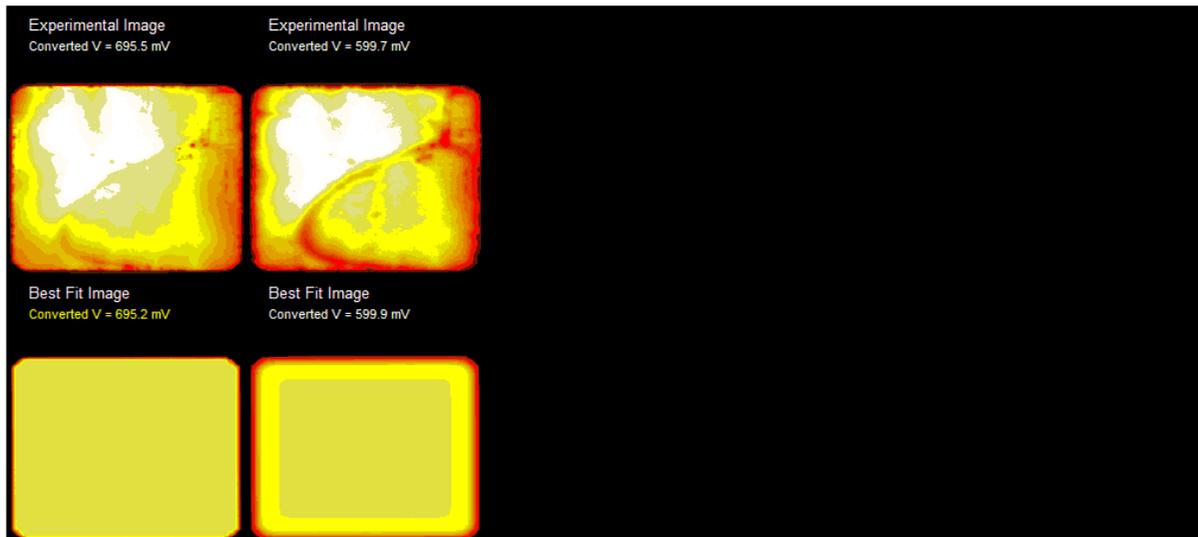
下图展示了一个典型 PERC 电池分析流程的损耗分析图表，拟合度展示和最优拟合电池参数页面。

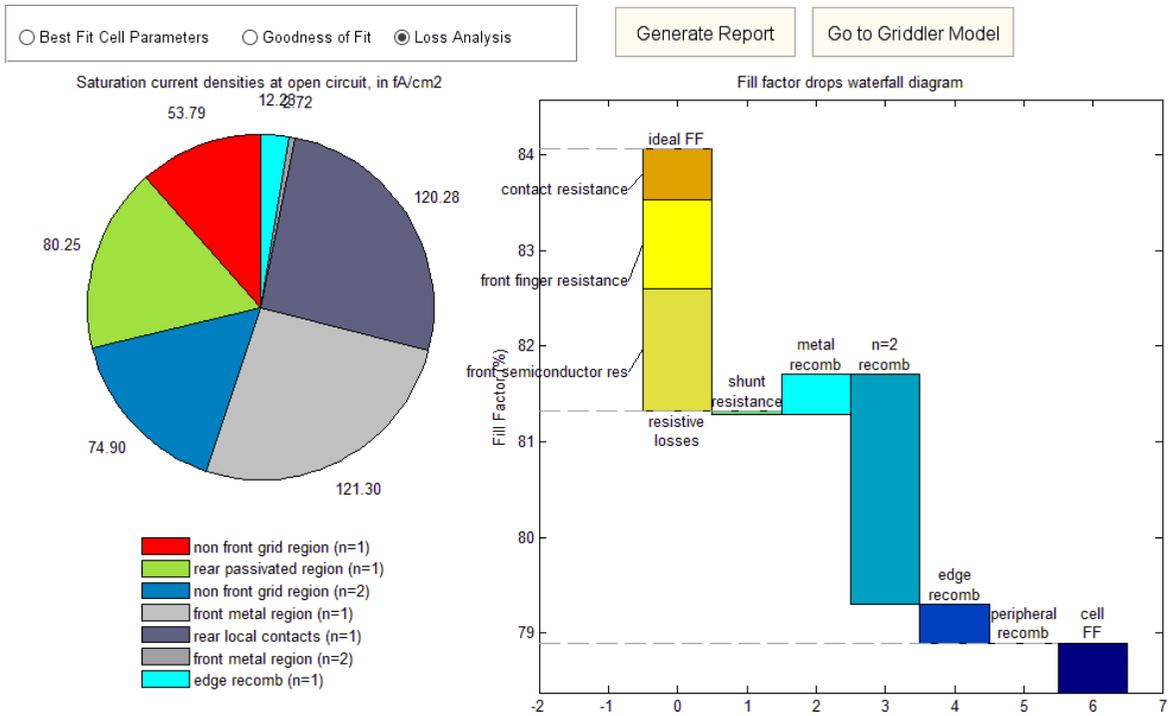


SolarEYE fitting: Iteration 7



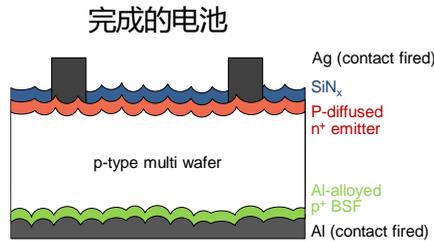
SolarEYE fitting: Iteration 4





4.3 单片太阳能电池

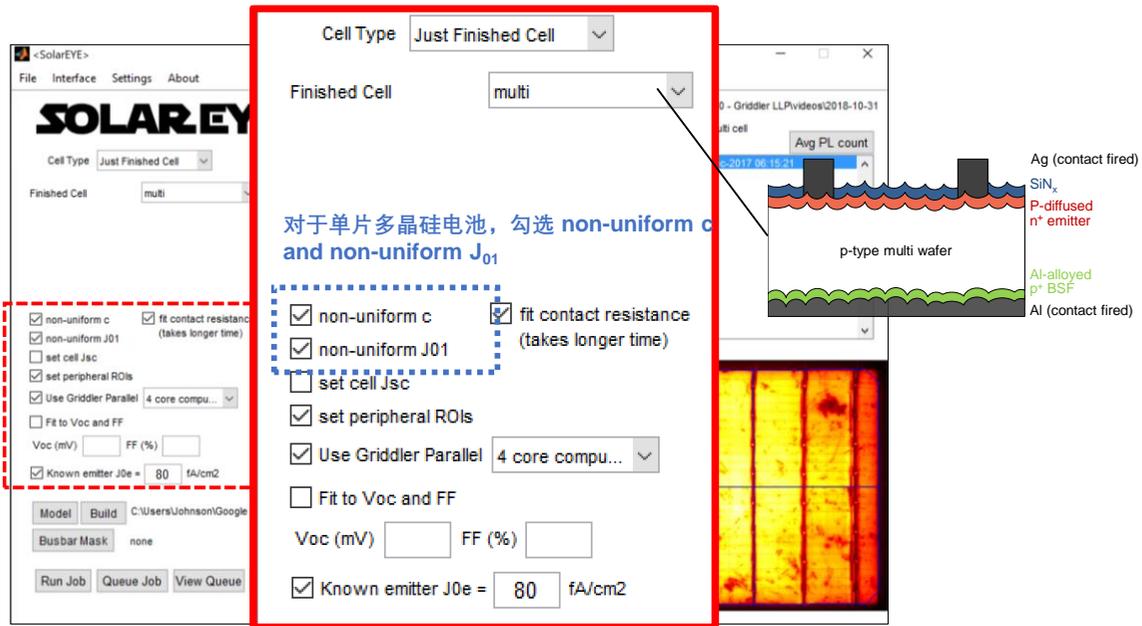
AI-BSF 电池, 或者您只有一片太阳能电池作为样品, 这对应 SolarEYE 中的第三种分析流程, 仅仅需要完成的电池。SolarEYE 会分析其发光成像图并提取钝化区 J_{01} , J_{02} , 正面金属 J_{01} , J_{02} 和边缘复合 J_{01} (详情参见 Griddler 用户手册 2.7.5)。它也会提取一个叫做外围 J_{01} 的参数, 它代表了靠近晶片边缘的非均匀 J_{01} 。它也会提取栅线接触电阻的空间分布。



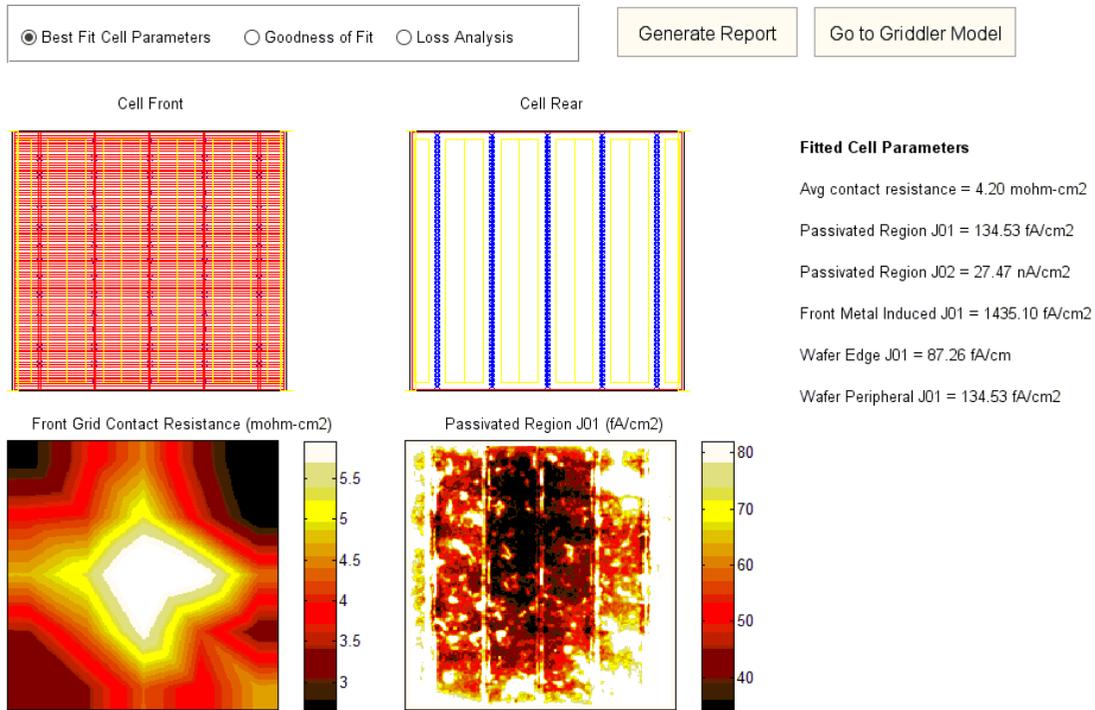
下图展示了电池和样品选择窗口 (参见 3.2)。您需要选择 "Cell Type" = Just finished cell, 然后, 相应的样品类型会出现。您需要根据您的样品, 选择正确的样品类型。如果您的样品是多晶硅, 我们推荐您勾选 "non-uniform C" 和 "non-uniform J_0 ", 以便非均匀空间分布的发光成像图校准常数和复合电流可用于拟合。

从版本 8 更新: 有一个名为 "Known emitter J_{0e} " (已知发射极 J_{0e}) 的新框。如果用户从实验中知道太阳能电池的发射极 J_{0e} , 选中此框并填写已知的 J_{0e} 值, SolarEYE 将钝化区域内的拟合 J_0 分成两部分: 已知的

发射极 J_{0e} 将成为最佳拟合模型中的前钝化区域 J_{01} ，其余部分将成为最佳拟合模型中的 base J_{01} 。在下面的示例中，已知发射极 J_{0e} 设置为 80 fA/cm^2 。



下图展示了单片电池分析流程的损耗分析图表，拟合度以及最优拟合电池参数。



SolarEYE fitting: Iteration 8

