

GRIDDLER^{2.5}_{PRO}

工业与双结叠层电池模拟器

用户手册

目录

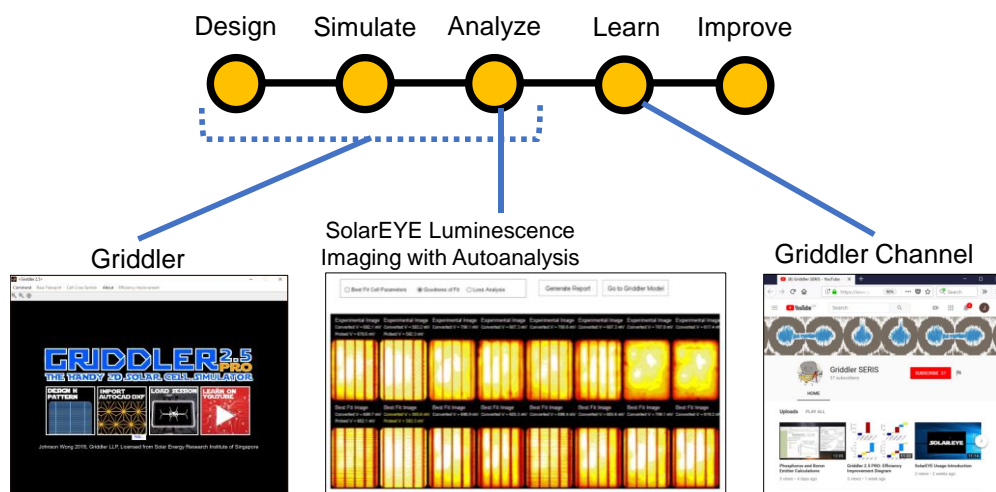
1.1	简介	4
1.2	Griddler 主要模型	5
2.1	安装和首次使用	7
2.2	Griddler 快速指南	9
2.3	Griddler 2.5 PRO 更新通知	11
2.4	Design H-Pattern 页面	13
2.5	Meshing 页面	22
2.6	导入 Autocad.dxf	25
2.7	Simulation 页面	26
2.8	损耗分析图表	38
2.9	Load session 功能	41
2.10	在 YouTube/ Youku 上学习	42
3.1	非均匀电池参数	42
3.2	电池参数数据库 (PRO 版本)	47
4	电池二极管参数计算 (PRO 版本)	50
4.1	概述	50
4.2	Cell Cross Section Diagram 页面 (PRO 版本)	51
4.3	Base Transport Calculator 页面 (PRO 版本)	52
4.4	Illumination Optics 页面 (PRO 版本)	55
4.5	掺杂层的相关计算 (PRO 版本)	60
4.6	将计算的值应用到 Griddler Simulation (PRO 版本)	62
5	效率提升以及 Command 窗口 (PRO 版本)	63
5.1	效率改进图 (PRO 版本)	63
5.2	Command 窗口 (PRO 版本)	70
5.2.1	怎样使用 command 窗口	70
5.2.2	常用命令	73
5.2.3	FOR LOOPS 及相关命令	76
5.2.4	并行 FOR LOOPS	79
6	Griddler 2.5 PRO 的其他应用	79
6.1	计算 luminescence 图形数据	79
6.2	模拟小信号 AC 响应	85
6.3	精确模拟四线 I-V 测量	89
6.4	叠瓦和切片电池	91

6.5	模拟太阳能电池裂缝	94
6.6	模拟瞬态太阳能电池特性	96
6.7	模拟光致发光线扫描	97
6.8	模拟热点和硅片边缘的反向偏压击穿	100
7	模拟双结叠层电池 (PRO 版本)	104
7.1	概述	104
7.2	快速指南	105
A	附录 A: 在 Cell Cross Sectional Diagram 和 Base Transport Calculator 页面中使用的数学公式	111
A.1	限制条件	112
A.2	非金属区域的光致电流	113
A.3	基区饱和复合电流密度	115
A.4	Auger 和辐射复合	117
A.5	局部电极区域由于电流集边效应, 横向电流和接触电阻引起的基区电阻	117
B	附录 B: 比较 Griddler 2 和 Gridsim 以及双二极管模型	121
B.1	比较用 Griddler 2 和 GridSim 5.3 计算欧姆功率消散	122
B.2	比较用 Griddler 2 和双二极管模型计算开路电压	123
C	附录 C: 比较 Griddler2.5 PRO(v2.50021) cmd-PC1D-6.2 Caller 和 EDNA2 (v2.5.5)对硼和磷发射极的计算	120
C.1	背景	124
C.2	硼发射极计算	125
C.3	磷发射极计算	127

1.1 简介

如果您是首次使用 Griddler 的用户, 恭喜您! Griddler 是一个简单易用的太阳能电池模拟程序, 这本手册可以在您使用过程中用以随时参考。如果您已经使用 Griddler 有一段时间了, 我们将不断努力, 确保它持续满足您的实际需要。自研发以来, 我们不仅在不断加入新的功能 (例如: 2016 年 6 月的 PRO 版本中, 新加入了背面电极计算器, 以及电池参数数据库; 2017 年 10 月的 PRO 版本中, 新加入了 cell cross sectional diagram 界面, 并搭载了 cmd-PC1D 发射极计算器), 同时我们也致力于使其他的功能更易于使用, 更标准化 (例如: 在 2018 年 4 月发行的 PRO 版本中, 加入了自动生成效率改进图表的功能; 2018 年 5 月的 PRO 版本, 基于 EDNA2 校准了用 cmd-PC1D 界面计算发射极薄层电阻, J_{0e} 和 IQE 的功能)。我们致力于使 Griddler 简单易用, 但功能强大, 足以满足我们的日常工作中设计, 模拟和理解太阳能电池的限制因素的需求。同时, 我们也希望它在您的具体工作需求中同样的易于使用。

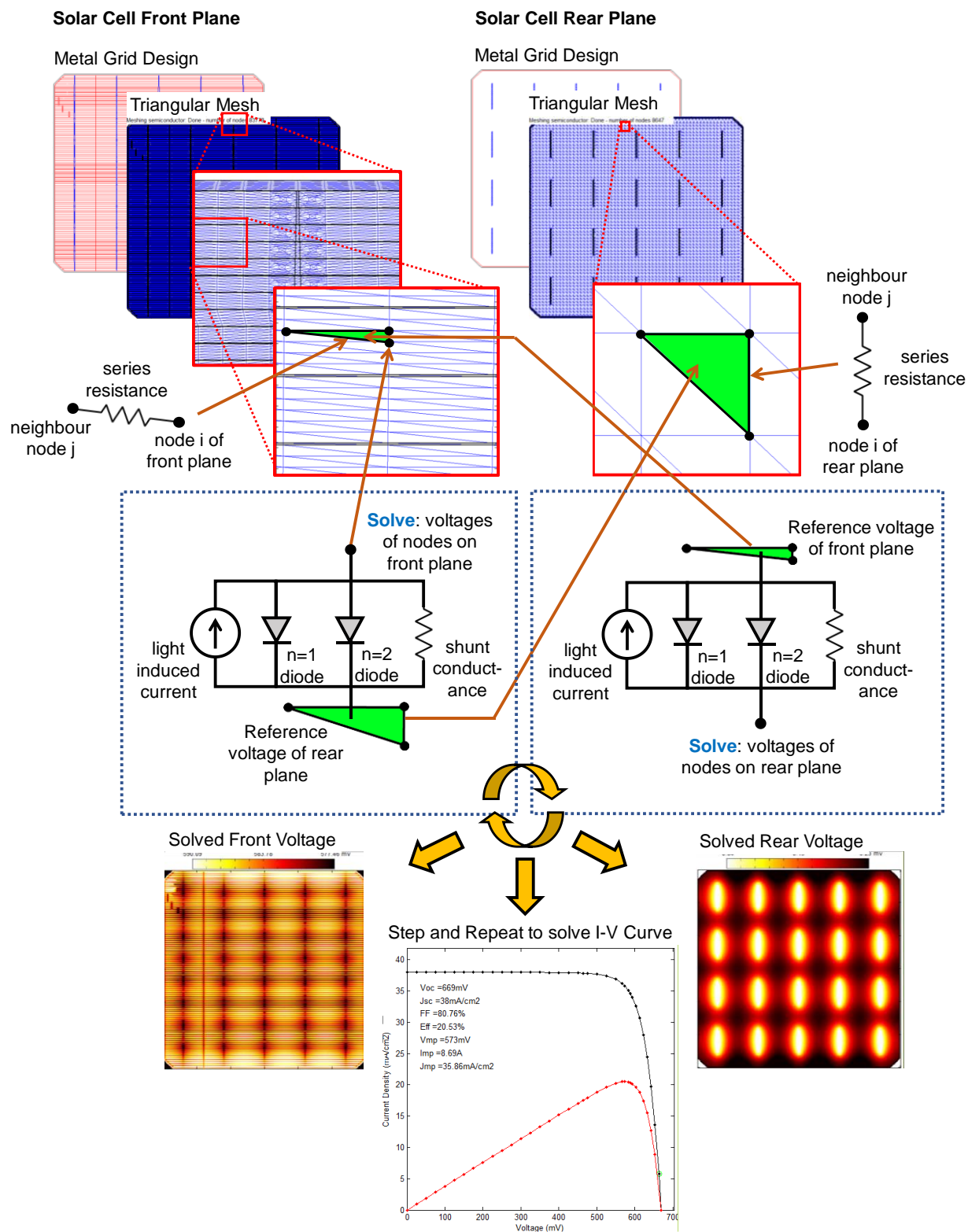
Griddler 的研发始于 2013 年的新加坡太阳能研究所 (SERIS)。在过去的几年中, 它不断地完善并帮助了许多公司改进了他们的太阳能电池。下图展示了在这样一个研发周期中, Griddler 的应用。



随着时间的推移, 我们使 Griddler 成为了一个设计太阳能电池, 计算太阳能电池效率, 量化限制因素, 存储从世界各地收集的已发表的电池参数, 并预测采用不同设计带来的效率提升空间的平台。它同时与 SolarEYE 无缝衔接, 从而使研究人员能够了解在工厂环境下, 太阳能电池实际生产中可以改进的主要方面。SolarEYE 是一个光致发光成像平台, 用于对实验室的电池和晶片样品进行成像和分析,

为了使 Griddler 严谨, 实用, 易于使用, 功能强大, 我们做出了很多努力。我们衷心的希望 Griddler 可以满足您的需求。

1.2 GRIDDLER 主要模型



Griddler 的核心是如上所示的对太阳能电池平面的有限元模型 (FEM) 表示。通常可以有 1 到 8 个平面：最简单的情况是用 1 个平面来描述正面电极的金属栅线，假定背面接地，并没有横向电阻，如果用户在 simulation 页面的 Rear Current Extraction 选项下选择 “Full Area Rear Chuck Contacting”，就是这样的情况，参见 2.7.4；最复杂的情况是，正面和背面分别有半导体平面、金属栅线平面（如果栅线和半导体之间存在接触电阻）、金属主栅平面（如果用户使用分次印刷，非烧穿主栅，使主栅 “悬浮”）和焊带平面（如果用户在 Current Extraction 选项下选择 “Solder ribbons at probe points”）。在有限元模型中，这些平面（除了焊带平面）被精细地分解成三角形网格，以实现太阳能电池的网络化模型。上图中的绿色三角显示了在网格化之后，电池正面和背面半导体平面中的一个三角形元素。三角形的一个角被称为一个节点 (node)，每个节点都有一个电压。三角形的边缘 (edge) 通过电阻将节点连接在一起，电阻的值取决于该区域的薄层电阻（例如，半导体的值会相对较高，金属栅线和主栅的值会相对较低）；并且基于伽辽金法，电阻的值也取决于三角形的形状。

在每个电池正面和背面平面中，如果定义了焊带，那么焊带与下层平面有焊点/探针点的地方相连接（参见 2.7.4）。如果用户选择非零接触电阻（见 2.7.1），则焊带与下层平面通过电阻连接；如果没有，则焊带与下层平面直接连接，没有压降。如果主栅是悬浮的，那么主栅平面与金属栅线平面形成的指状交叉节点将作为连接点。如果存在非零的金属-半导体接触电阻，那么金属栅线平面上的每个节点通过接触电阻连接到半导体平面上相同位置的节点。如果没有金属-半导体接触电阻，则将栅线和半导体平面合并为一个。

在正面和背面半导体平面之间是一个夹层，这个夹层定义了太阳能电池的光伏特性。这种夹层结构提供了一个小的等效电路，连接到半导体层的每个节点，如上图蓝色虚线框内所示。这个等效电路也称为双二极管模型，因为它用两个具有不同 I-V 特性的二极管来描述节点内发生的复合电流。与这些二极管并联的电流源用以描述光感应电流，并联的分流电导用于描述分流电流（如果有的话）。这个等效电路的 I-V 特性是：

$$I(V_{diode,i}) = I_{L,i} - I_{01,i} \exp\left(\frac{qV_{diode,i}}{kT}\right) - I_{02,i} \exp\left(\frac{qV_{diode,i}}{2kT}\right) - G_{shunt,i} V_{diode,i}$$

$$V_{diode,i} = V_{node,i} - V_{ref,i}$$

其中 $V_{diode,i}$ 是等效电路上的电压， q 是基本电荷， k 是玻尔兹曼常数， t 是电池温度，以开尔文为单位。 $I_{L,i}$ 是光感应电流， $I_{01,i}$ 和 $I_{02,i}$ 是 $n=1$ 和 $n=2$ 二极管的饱和电流， $G_{shunt,i}$ 是分流电导。 $V_{diode,i}$ 由 $V_{node,i} - V_{ref,i}$ 给出的，其中 $V_{node,i}$ 是对应节点 i 的电压， $V_{ref,i}$ 是在节点位置相对的半导体平面上的电压的内插值。由此，我们可以利用基尔霍夫节点定律得出在节点 i 的电流连续性条件：

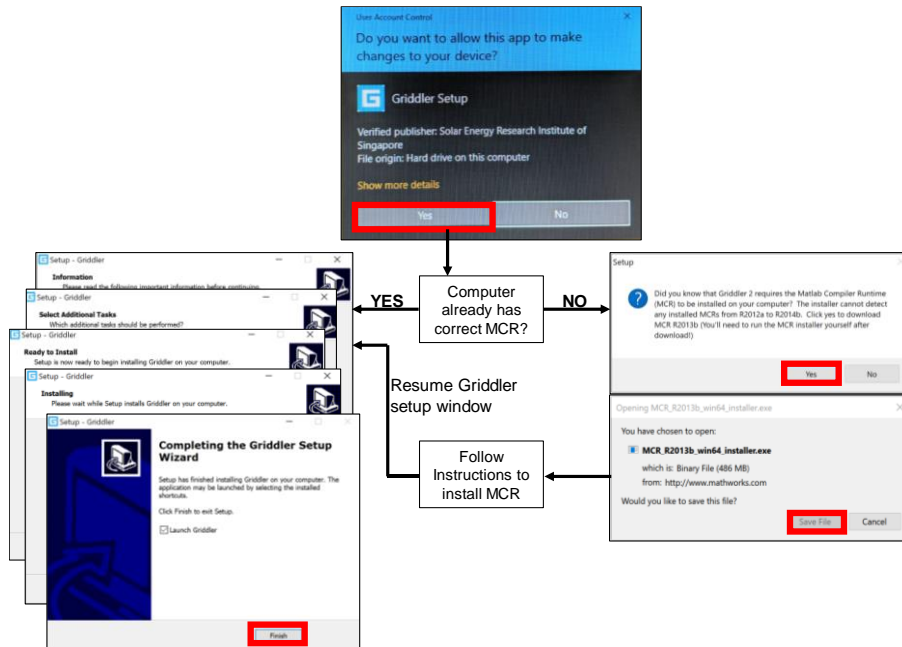
$$\sum_{\substack{\text{neighbour} \\ \text{nodes } j}} \frac{V_{\text{node},j} - V_{\text{node},i}}{R_{\text{series},i,j}} + I(V_{\text{diode},i}) = 0$$

由此我们可以建立一组系统的节点电压的方程组，并进行迭代求解。一旦半导体节点电压在每个平面上被求解， $V_{\text{diode},i}$ 和 $I(V_{\text{diode},i})$ 也可以被同时确定。然后，太阳能电池的总电流则是在正面或背面半导体平面上所有节点上 $I(V_{\text{diode},i})$ 的总和，而太阳能电池的总电压则是提取电流的节点处，正面节点和背面节点电压之间的差值。

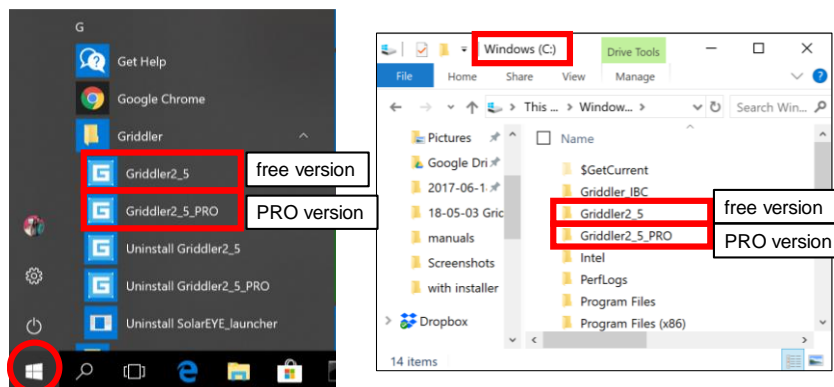
太阳能电池的操作点由光照强度 $I_{L,i}$ 和终端电压定义。该终端电压定义了提取电流处的正面节点的边界条件。提取电流处的背面节点的电压通常被设置为零（接地）。通过不断设置终端电压并不断重复这一过程，然后解电池电压，我们就可以得到太阳能电池的整体 I-V 特性。

2.1 安装和首次使用

32 位或 64 位的 Windows 计算机都有相应的 Griddler 2.5 免费版和 PRO 版的安装程序可供下载和安装。安装过程是自动的，非常易于操作，请参见下图。Griddler 是用 MATLAB 编写的，需要用 Matlab compiler runtime (MCR R2013B) 运行。安装程序将自动检测是否存在正确的 MCR 版本，如果没有则自动下载。



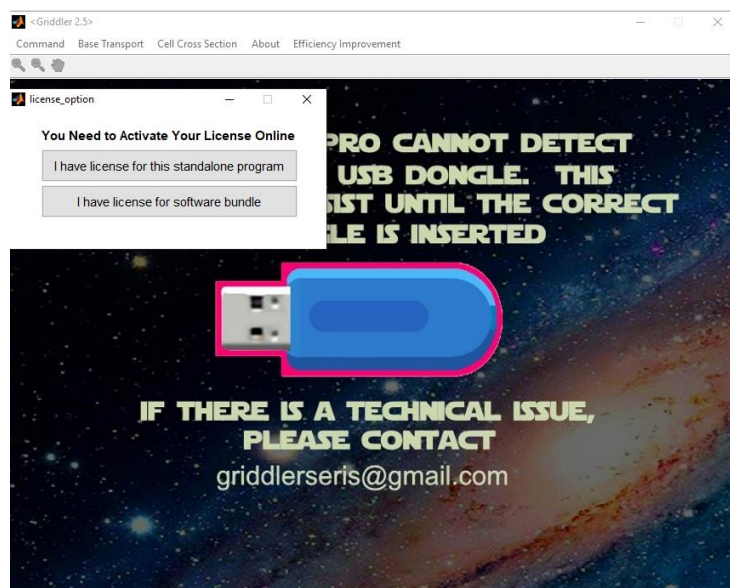
默认情况下, 您应该能够从开始菜单 (参见下图) 或从 C:\Griddler2_5 \Griddler2_5.exe (free version) C:\Griddler2_5_PRO\Griddler2_5_PRO.exe (PRO version) 启动 Griddler。



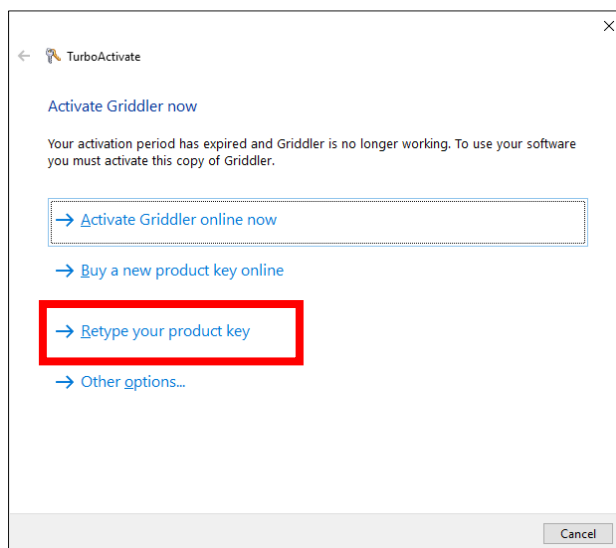
如果您使用 PRO 版本, 则 Griddler 2.5 PRO 需要我们提供的加密 USB 或在线激活才能运行。两种方法都需要定期的 Internet 连接 (加密 USB 大约每月一次; 在线激活大约每天一次)。USB 加密狗的外观如下图所示, 需要在程序运行时将其插入计算机。



首次运行软件时, 如果未检测到加密 USB, 则会弹出一个带有以下选项的屏幕。选择适当的软件包 (software bundle = Griddler 2.5 PRO + Griddler IBC + Module 程序购买; standalone = 独立 Griddler 2.5 PRO)。

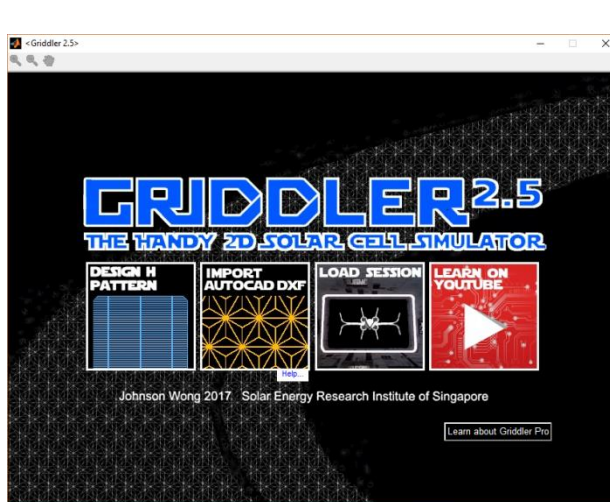


使用提供给您的密钥，然后您就可以继续使用软件。

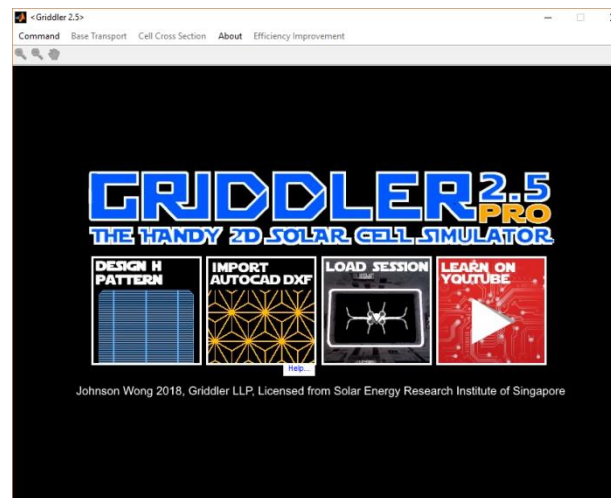


2.2 GRIDDLER 快速指南

运行 Griddler 的时候，应该会出现一个启动画面。请耐心等待程序启动，因为第一次可能需要半分钟左右的时间来加载 MCR。Griddler 2.5 免费版和 PRO 版的首页非常相似，并有 4 个主要选项。

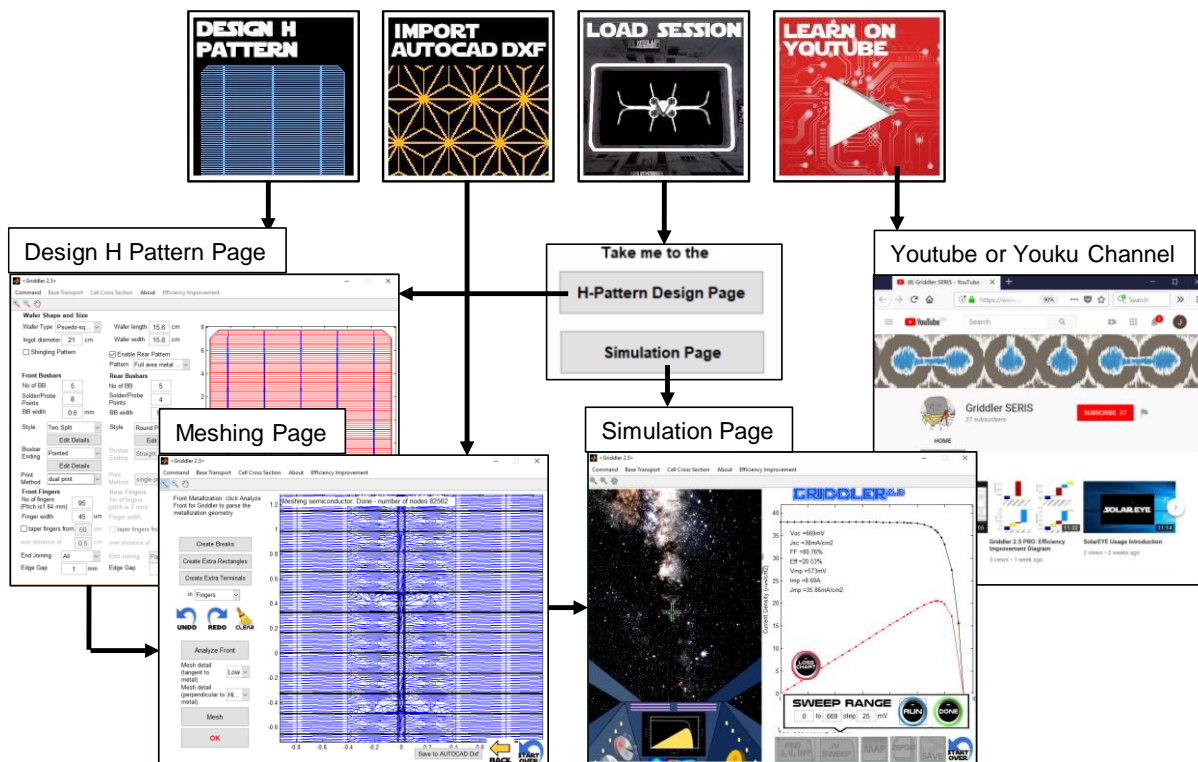


Griddler 2.5 免费版本首页



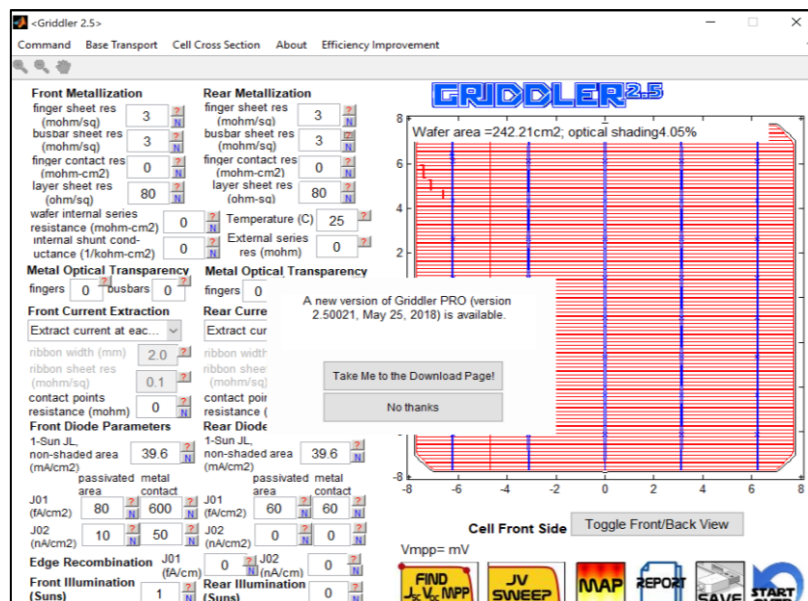
Griddler 2.5 PRO 首页

Griddler 的模块之间的连接非常简单和清晰:

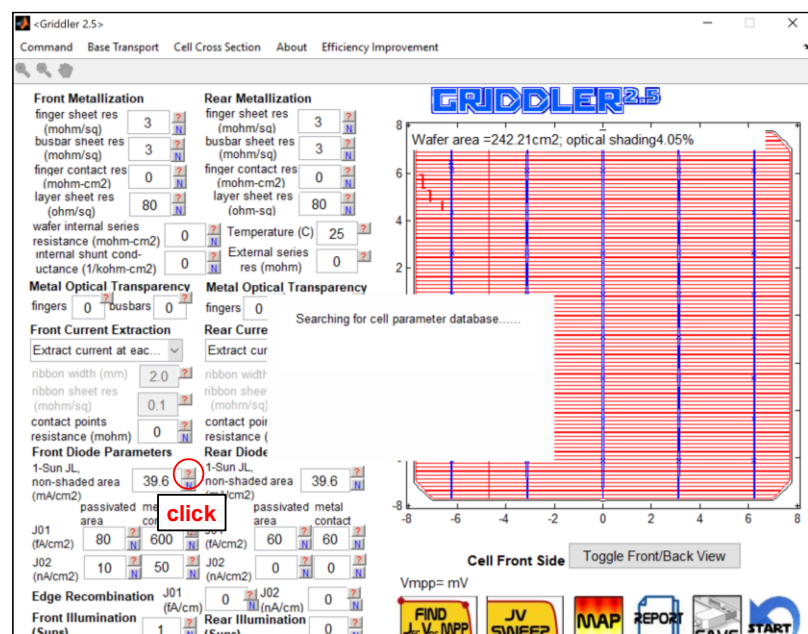


2.3 GRIDDLER 2.5 PRO 更新通知

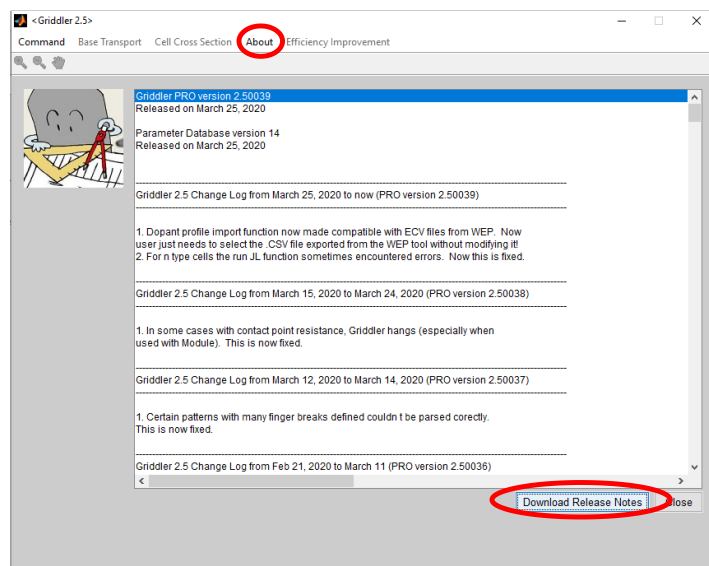
对于 Griddler2.5 PRO, 我们定期推出更新, 您会在 simulation 页面 (下图所示) 得到通知。我们推荐您定期更新, 点击 “Take Me to the Download Page”, 下载最新的安装程序。当您运行安装程序, 它将覆盖您计算机上的较旧的 Griddler 版本。



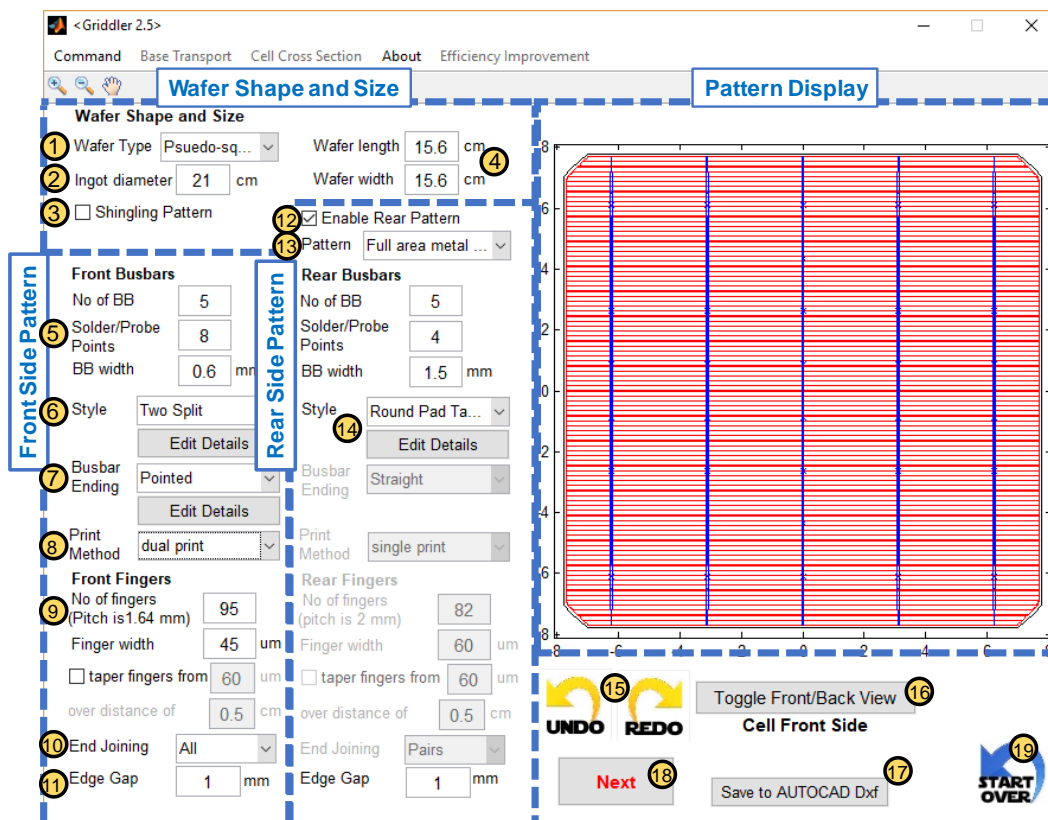
电池的参数数据库 (见 3.2) 也会定期更新, 大约每个月更新一次。程序启动后, 当您首次访问数据库时, Griddler 2.5 PRO 将自动搜索和下载更新 (参见下图)。



您可以通过点击顶部菜单栏上的“About”来检查您的版本号。点击“Download Release Notes”，查看每个版本的 Griddler 2.5 PRO 之间的区别。



2.4 Design H Pattern 页面



在 Griddler 中，太阳能电池的设计阶段通常是从的 H-Pattern 的设计页面开始。由于大多数电池都有 H-Pattern 的金属栅线，所以这个页面对于大多数电池的设计来说是足够的。对于非 H-Pattern 的电池，如金属缠绕式 (metal wrap through, MWT) 结构，您可以在 AutoCAD 中设计一个任意形状的金属图案，然后将该图案导入到 Griddler 中 (见 2.6)。上图是 Design H-Pattern 的页面，下面我们说明各种选项的使用。

① Wafer Type

Wafer Shape and Size

Wafer Type Pseudo-sq...

Ingot diameter Square

☒ Shingling Pseudo-square

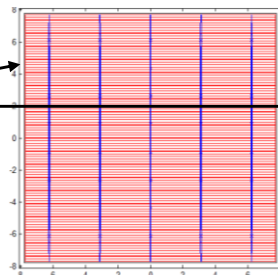
☐ Circular

W

W

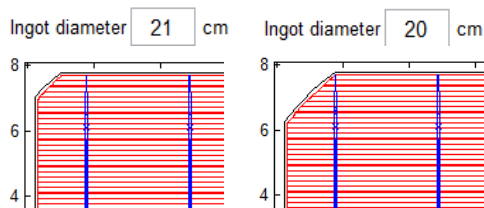
☒ E

Patt



硅片类型一般是常见的形状：多晶硅一般是正方形；单晶硅一般是准正方形。实验室用的晶片一般是圆形。

② Ingot Diameter



对于准方形的单晶硅来说，圆柱硅锭的直径限定了晶片的对角线。

③ Shingling Pattern

Wafer Shape and Size

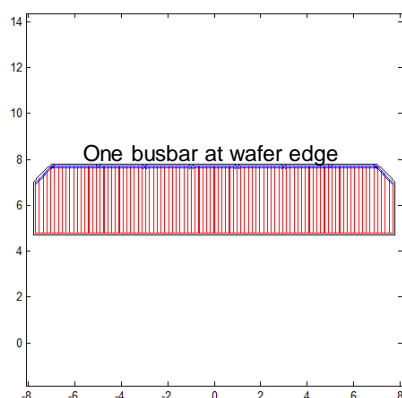
Wafer Type Psuedo-sq...

Wafer length 3.1 cm

Ingot diameter 21 cm

Wafer width 15.6 cm

☒ Shingling Pattern



Wafer Shape and Size

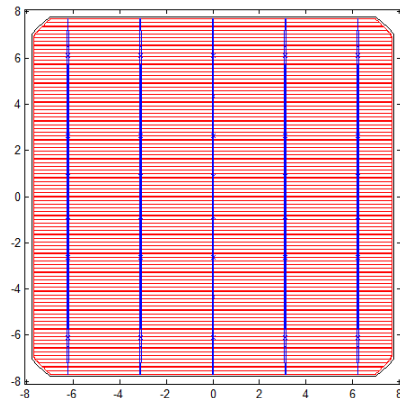
Wafer Type Psuedo-sq...

Wafer length 15.6 cm

Ingot diameter 21 cm

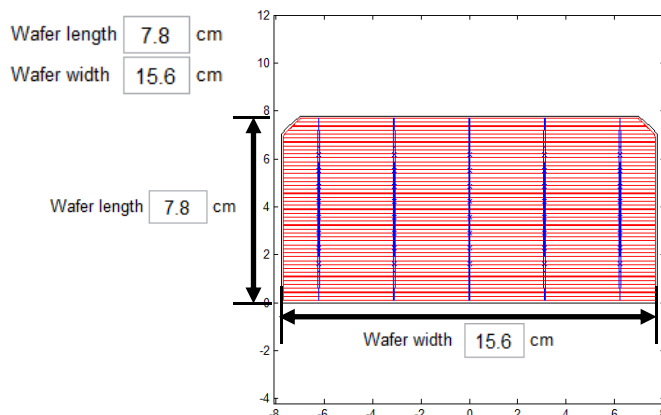
Wafer width 15.6 cm

☐ Shingling Pattern



如果您选择叠瓦结构，则该电池的正面和背面上分别只有一条主栅，沿晶片边缘放置。通常，叠瓦电池是从正方形或准正方形晶圆上切下的带状电池，所以晶片的长度要比晶片宽度短，如左上方所示。右上图是一个没有叠瓦结构的电池设计。

④ Wafer Length and Width



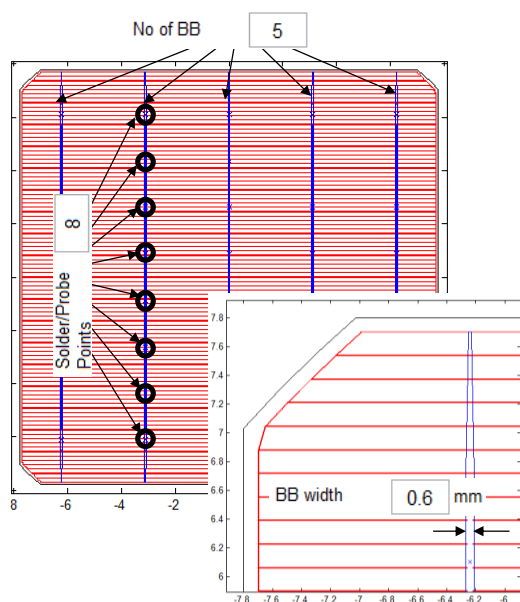
⑤ Number of Busbars, solder/probe points, and busbar width

Front Busbars

No of BB 5

Solder/Probe Points 8

BB width 0.6 mm

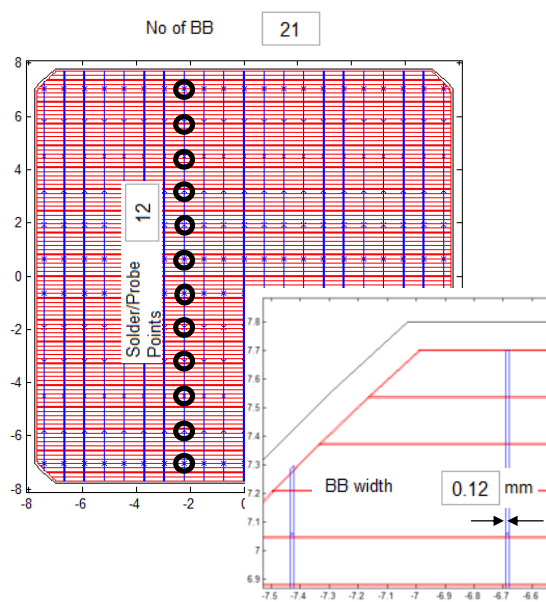


Front Busbars

No of BB 21

Solder/Probe Points 12

BB width 0.12 mm

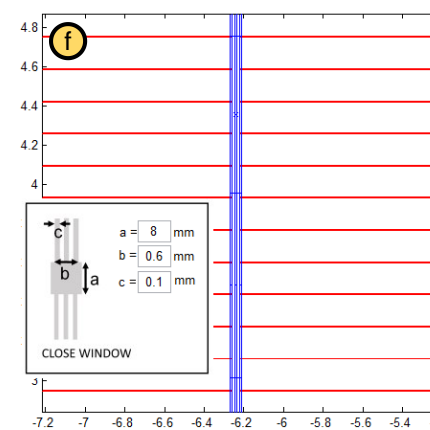
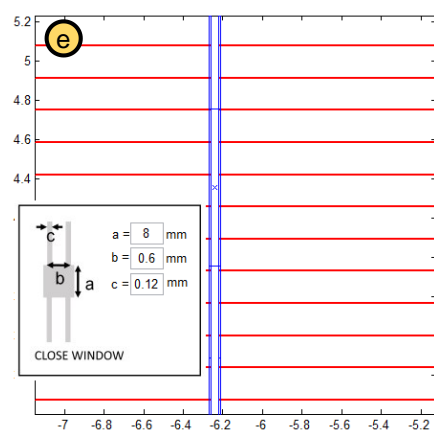
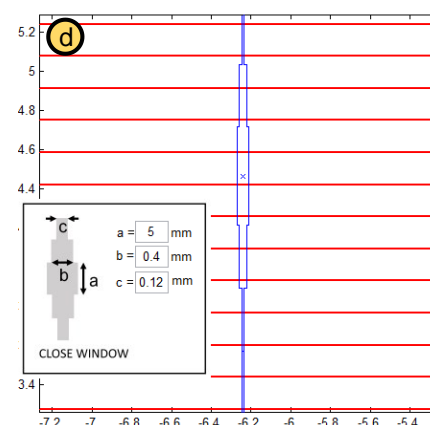
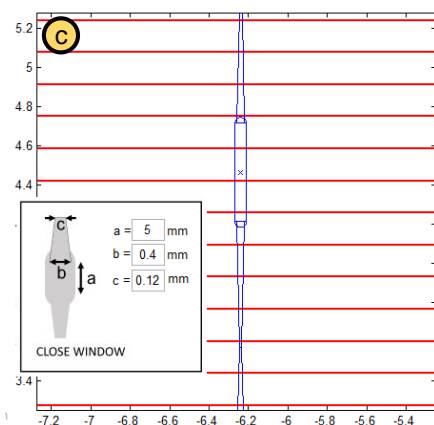
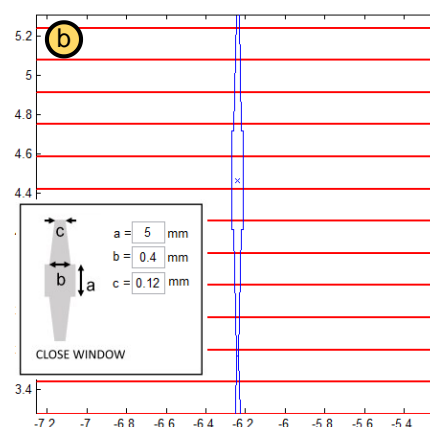
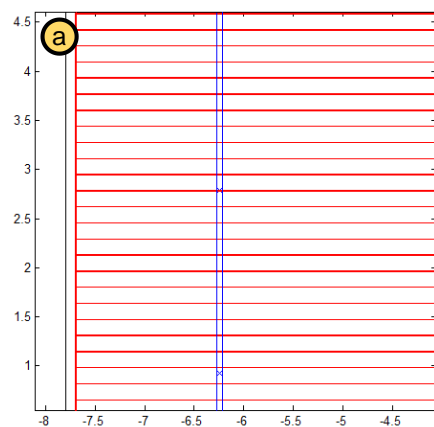
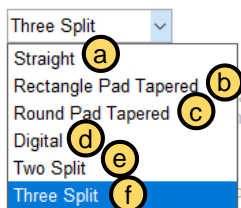


H-Pattern 是由主栅和栅线构成的。改变 “No of BB” 和 “BB width” 可以改变主栅的数量和宽度。

“Solder/Probe Points” 指的是每条主栅上的接触点的数量。在 I-V 测试中（通过在 simulation 页面中选择 “Extract Current at Each Probe Point” 来模拟，参见 2.7.4），这些接触点被称为探针点，表示 I-V 测试中探针与主栅接触的点。在组件中（通过选择 “Solder ribbons at probe points, extract current at ribbon ends” 来模拟，参见 2.7.4），这些接触点被称为焊点，表示组件中的焊带与主栅接触的点。

6 Busbar Style

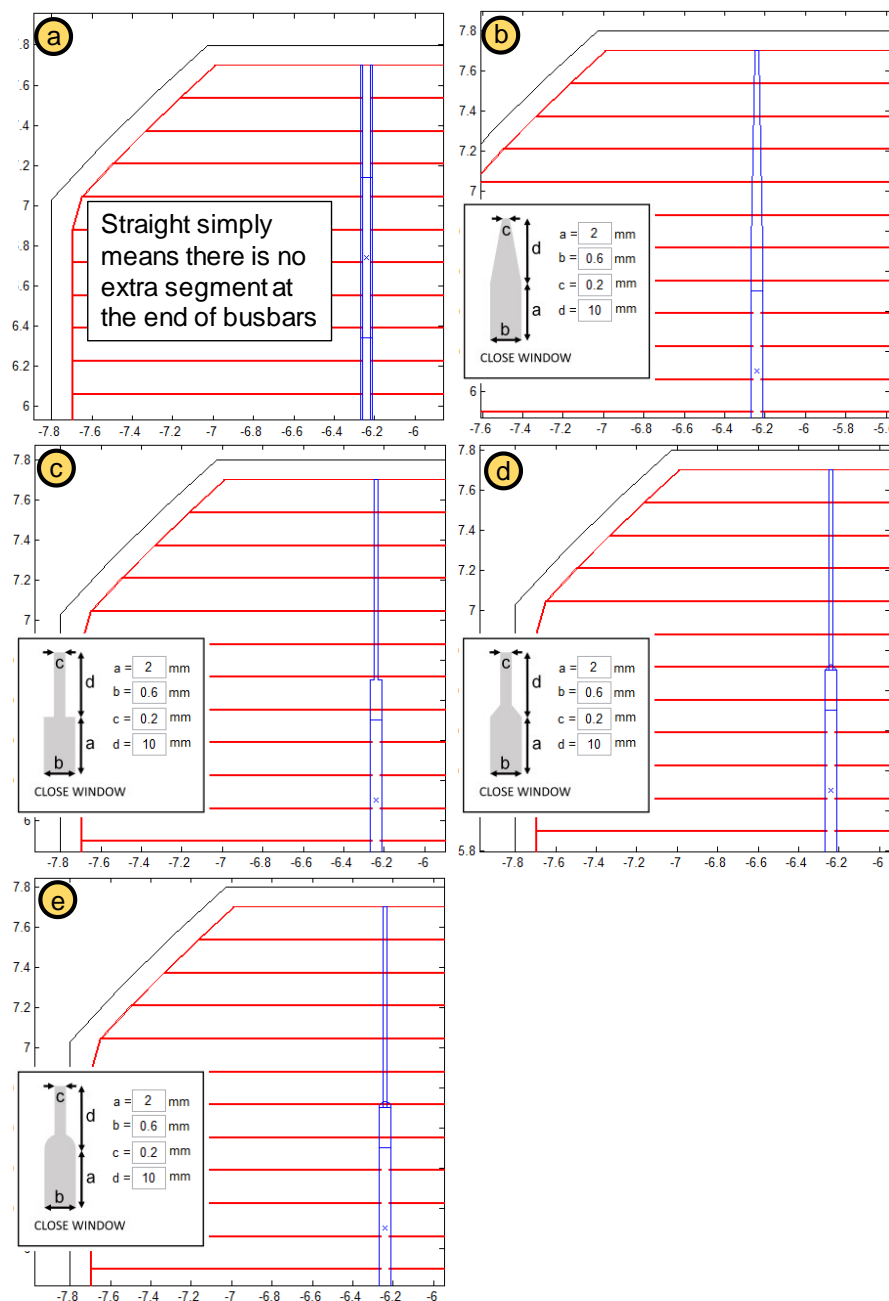
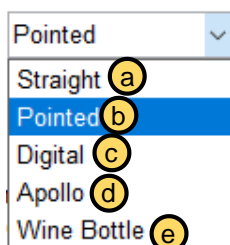
Style



每个主栅被分为若干个单元段, 每一段包含一个焊点/探针点。主栅的式样决定了单元段的形状。在 Griddler 2.5 PRO 中有 6 种样式可供选择, 每种样式, 程序中都有相应的绘图和尺寸描述。在 Griddler 2.5 免费版中, 有 3 种样式可供选择, 但是与单元段相关的尺寸不能调整。

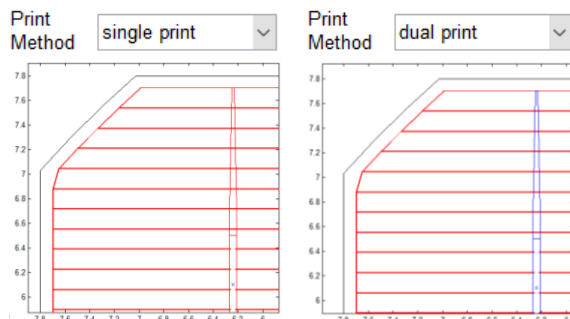
7 Busbar Ending

Busbar
Ending



每条主栅可以具有不同于单元段的结束段。选择“Straight”主栅结束段，表示没有额外的结尾部分。除此之外，在 Griddler 2.5 PRO 中有 4 种结束段样式可供选择，每一种样式，程序中也都有相应的绘图和尺寸标明。在 Griddler 2.5 免费版本中，您不能选择额外的结尾段。

⑧ Print Method



单次印刷的意思是说主栅和栅线位于同一金属层中。整个金属层与太阳能电池半导体（发射极）接触，并且在金属主栅和栅线下都存在金属诱导的复合，由金属触点 J_{01} 定义（参见 2.7.5）。分次印刷意味着只有栅线与太阳能电池半导体接触，并存在金属诱导复合；如果说主栅是“悬浮”的，即主栅只与栅线接触，而并不接触半导体。

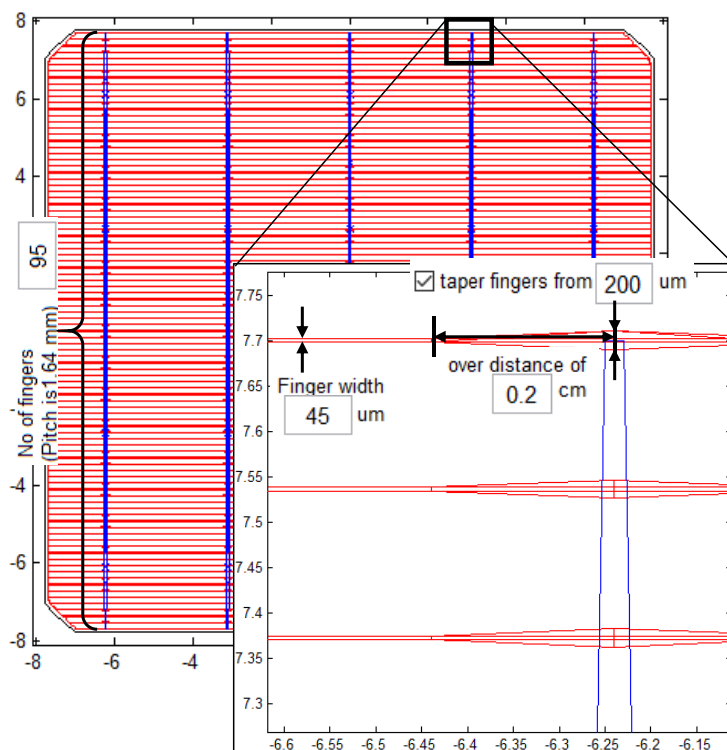
⑨ Fingers Definition

Front Fingers

No of fingers
(Pitch is 1.64 mm)

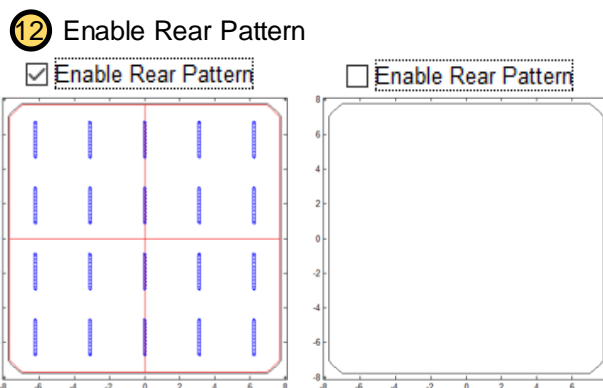
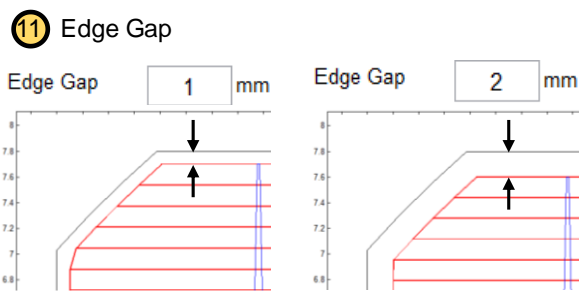
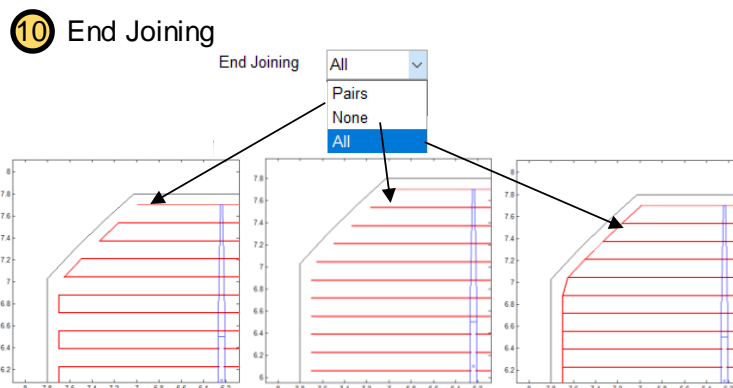
Finger width μm

☒ taper fingers from μm
over distance of cm



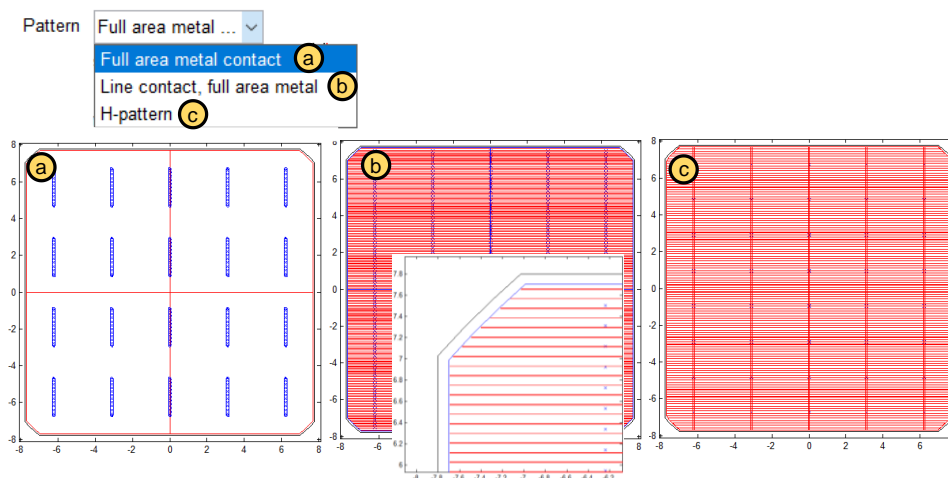
H Pattern 是由主栅和栅线构成的。改变 “No of fingers” 和 “Finger width”，以改变栅线的数量和宽度。您还可以通过使用 “taper fingers” 选项，使栅线靠近主栅的节段更宽。“taper fingers from” 指栅线最宽处

的宽度, “over distance of” 定义了栅线从最宽处到正常宽度的单元段的长度。



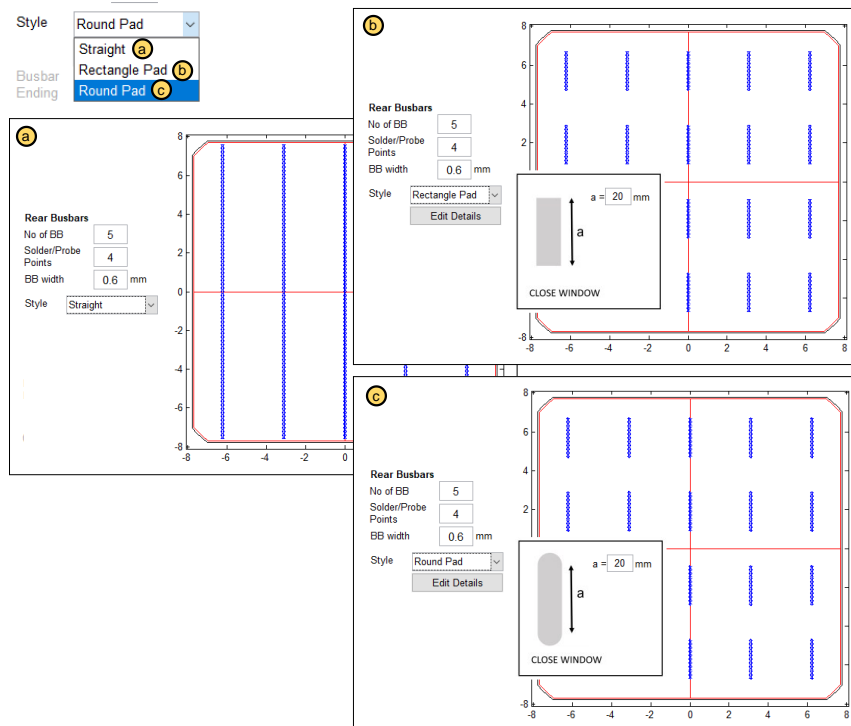
勾选 Enable Rear Pattern, 可以定义电池背面的金属栅线和“主栅”。即使背面的金属图案大多是均匀的, 您可能仍然需要定义“栅线”层(背面铝层)的大小和“主栅”(焊盘)的位置。如果不勾选 Enable Rear Pattern, 则电池背面被认为是接地的, 因为这种情况下, 我们假设电池背面没有横向电阻。

13 Rear Metal Pattern



勾选 Enable Rear Pattern, 您可以选择三种不同的模式: a) Full area metal contact, 代表 Al-BSF 电池; b) Line contact, 代表 PERC 或 LBSF (背面有全区域金属覆盖) 电池, 但金属-半导体的接触是由周期性的线形开口形成的。所以这个选项可以用来模拟 PERC 或 LBSF 电池。但现在更常见的是使用“full area metal contact”选项, 并用 local contact calculator (请参见 4.3) 来计算等效参数的方式来模拟 PERC 或 LBSF 电池; c) H Pattern, 用于双面太阳能电池的模拟。

14 Rear busbar style (for full area metal contact)

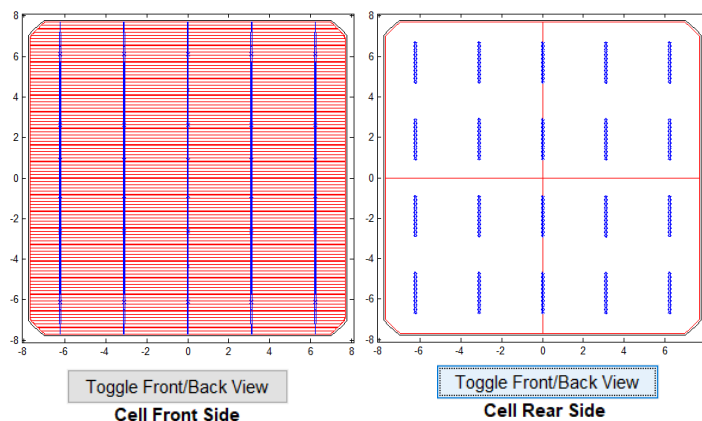


如果勾选 Enable Rear Pattern, 并选择 “full area metal contact”, 那么在电池背面主栅式样处, 您可以

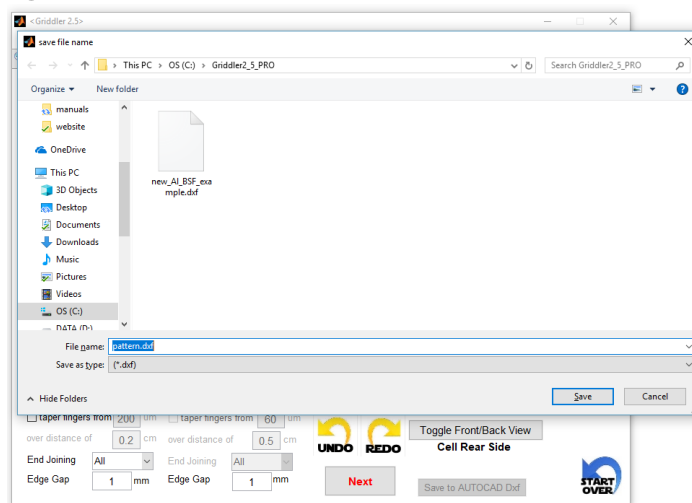
选择焊料垫的位置。如果选择 “H Pattern”, 则电池背面主栅样式的选项与电池正面相同 (请参见第 6 点)。

15 恢复/撤销选项

16 Toggle Front/Back View



17 Save to Autocad DXF

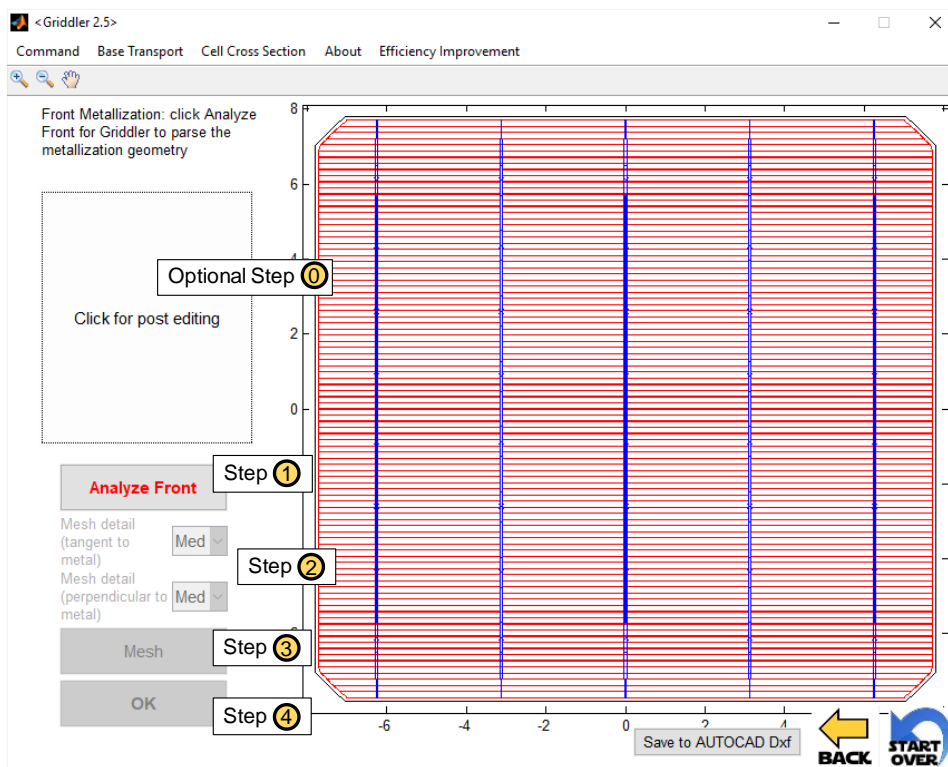


H-pattern 可以保存为 AutoCAD.dxf 文件, 用于与他人共享。.dxf 文件中的层和形状遵循第 2.6 节中的描述。

18 当您完成 H-pattern 的设计并准备好去 meshing 页面时, 点击 “next”

19 点击 “Start Over” 返回首页 (栅线设计图将会被自动保存)。

2.5 Meshing 页面

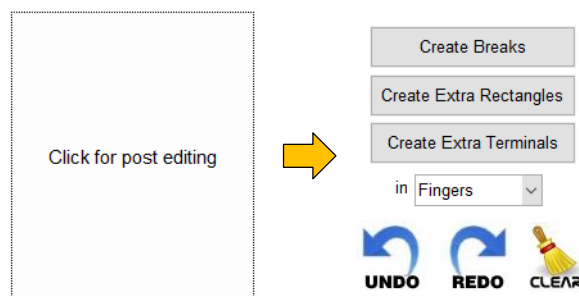


在该页面中,定义的太阳能电池的正面和背面将会被划分为三角形网格,用于建立太阳能电池的网络模型(见第 1.2 节)。参考上面的截图,这个步骤将不仅需要您点击我们推荐的按钮(步骤 1-4),更需要您注意一下网格的划分是否合适。该页将首先生成电池正面的网格,然后将生成电池背面的网格。

如果您仍想对金属栅线进行一些细微的修改,我们提供了一个可选的步骤 0。在步骤 2 中,您可以调整网格的细度。

(可选的) 步骤 0-后续修改

请点击“Click for Post editing”框,弹出附加选项



您可以从下拉菜单中选择编辑 “Fingers” (“栅线”) 层或是 “Busbars” (“主栅”) 层。



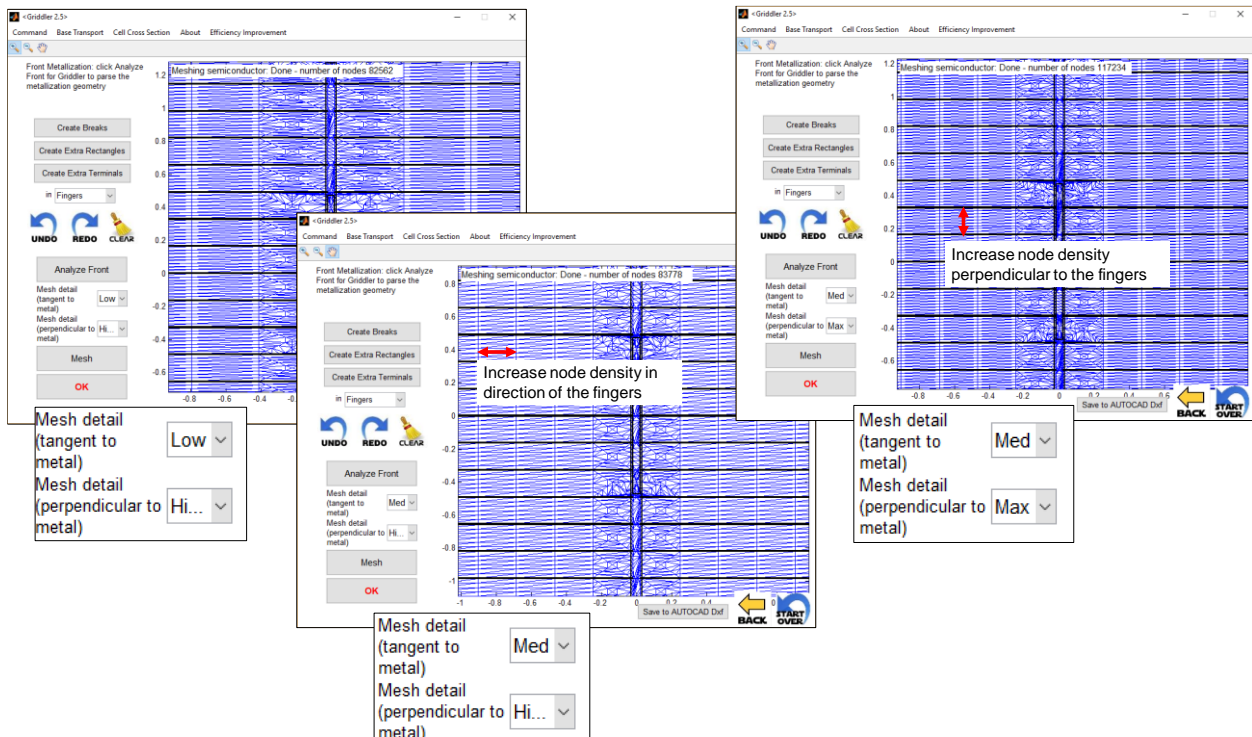
如上图所示, 如果您点击如下任意这三个按钮“Create Breaks”、“Create Extra Rectangles”、“Create Extra Terminals”之一, 光标将变成十字准线, 允许您精确定位金属图案上的位置。如果选择“Create Breaks”或“Create Extra Rectangles”, 您需要在图案上单击两个位置以定义一个矩形的对角。在 a) “Create Breaks”中定义的矩形的意思是说, 模拟的电池平面的这个矩形内将不再包含金属 (也就是说形成栅线的断线); 在 b) “Create Extra Rectangles”中所定义的矩形的意思是说, 这个新定义的矩形将被看做一片额外的金属存在在模拟的电池平面中 (也就是说形成相邻栅线之间的短路结构)。在 C) “Create Extra Terminals”, 您只需以十字准线光标单击一下, 以定义额外的焊点/探针点。

除了以光标来定义要编辑的位置, 您也可以使用命令进行更加精确地定义 (见 5.2)。例如, 在图片 d 中, 我们键入命令 “DRAWEXTRAFRONTSHAPE 1 -4.68225 -7.7 -4.67775 -7.7 -4.67775 7.7 -4.68225 7.7”, 来在层 1 (栅线) 中定义一个额外的金属多边形, 其中顶点在 $(-4.68\ 225, -7.7)\text{ cm}$, $(-4.677\ 75, -7.7)\text{ cm}$, $(-4.677\ 75, 7.7)\text{ cm}$, $(-4.68\ 225, 7.7)\text{ cm}$ 。这样栅线就与最左边的两条主栅交叉了。

第 1 步 - 分析 Pattern

当您点击这个按钮, Griddler 将把所有定义的图形合并成一个层, 如图 e 所示。

第 2 步 - 选择 Mesh 的细节



在这里, 您可以定义在与金属相切方向上的网格细节。在您选择之后, 您可以点击 Mesh, 然后通过放大按钮并点击网格来检查网格细节。上图显示了使用三种不同网格细节 (mesh detail) 设置的网格模式。一般

来说，在两条主栅之间最好至少有 4 个节点（除非您有很多主栅，并且之间的金属栅线很短），栅线之间也最好至少有 4 个节点。

第 3 步 - Mesh

当您点击这个按钮，Griddler 将开始生成网格并显示，如上图所示。

第 4 步 - OK

在检查网格之后，如果您想要使用它，请单击“OK”。如果不，则返回到步骤 2 或在步骤 0 中编辑 pattern。

2.6 导入 Autocad dxf

Griddler 不只能用来模拟 H-pattern 的电池设计！您也可以 AutoCAD 创建属于您自己的，任意的金属图案，保存为 dxf 文件并导入 Griddler。下图为您展示如何进行这一操作。



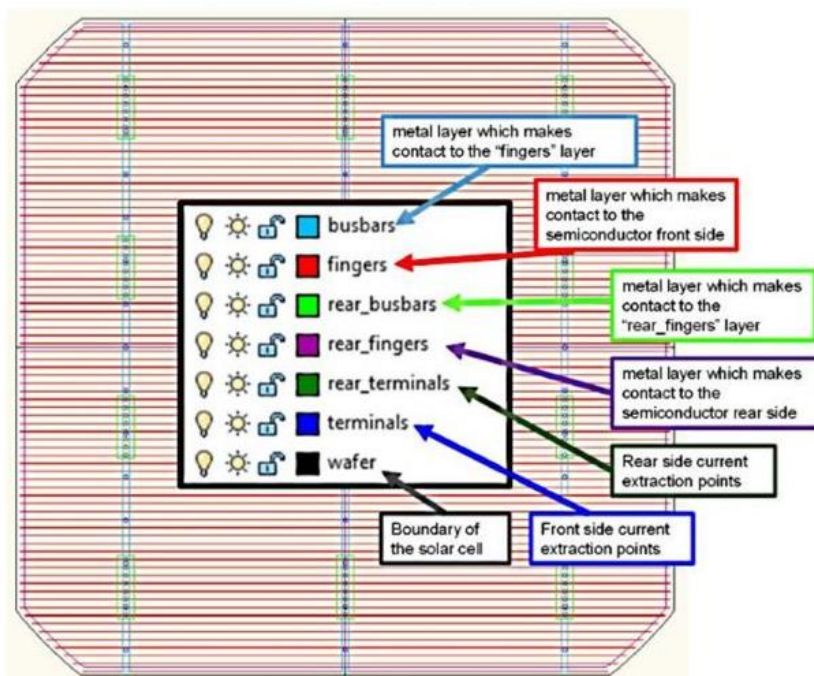
在首页上点击 “Import AutoCAD DXF”，然后出现一个对话框，要求我们选择一个.dxf 文件。我们选择了一个名为 “snowflake3.dxf” 的例子。Griddler 加载并在 Mesh 页面中显示这个 dxf 文件的图案。正如您所看到的，这个图案是一个非 H 型的栅线设计。具体地说，它是一个以大约 3.8×3.8 厘米的单元面积组成的金属缠绕式电池 (MWT)，其金属栅线类似于雪花图案，探针点在其中心。Griddler 同样能够将该图案网格化为合适的三角形网格，并且，对电池电压的模拟表明电压分布是平滑连续的。这表明这个网格是合适的。

如果您对在 AutoCAD 中创建自己的金属图案感兴趣，请务必参考下面的设计规则。您也可以在首页点击 “Import AutoCAD DXF” 按钮下面的 “help” 按钮弹出这些设计规则。

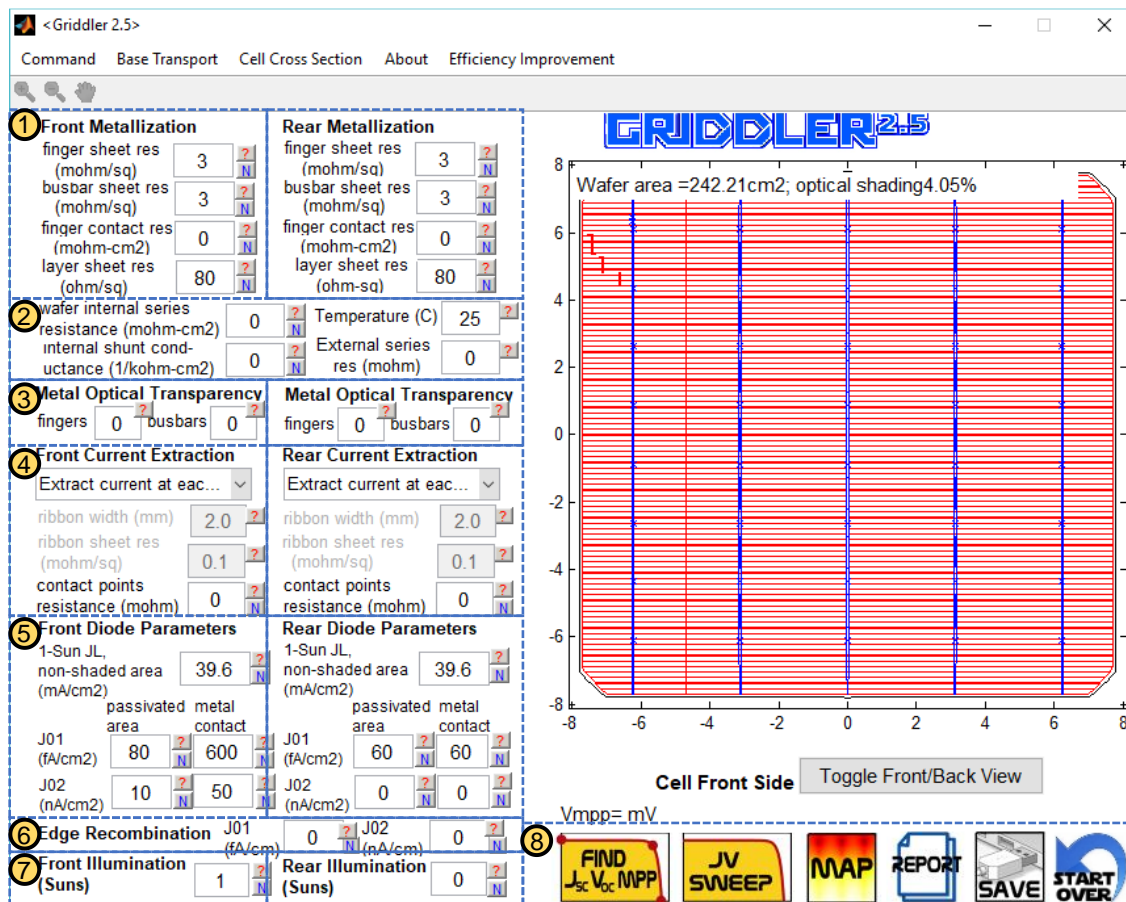
AUTOCAD Design Rules

1. All units are in **mm**
2. Layers should be named as shown to the right
3. Draw all structures as **closed polylines**
4. Terminals (front and rear) should be drawn as **circles**
5. Use **PURGE** and **OVERKILL** commands to clean up your drawing
6. Save as AUTOCAD **DXF 2013** version. If that doesn't work, try other versions.

OK



2.7 Simulation 页面



在完成网格化之后, Griddler 现在已经将您的电池设计转换成可以被模拟的有限元模型。上图是 Simulation 页面, 下面我们将说明各种选项的作用。

① Front and Rear Metallization Parameters (正面及背面金属电极的参数)

这一节定义了细栅、主栅层和半导体层 (简称层) 在电池正, 背面上的电阻。对于半导体层, 例如正面发射极平面或背面 BSF 平面, 薄层电阻是一个非常常用的量。对于金属层, 可以使用下列方程将已知电阻转换为薄层电阻。如果金属材料的体电阻率已知, 则使用

$$\rho_{sheet} = \rho_{bulk} / t_{layer}$$

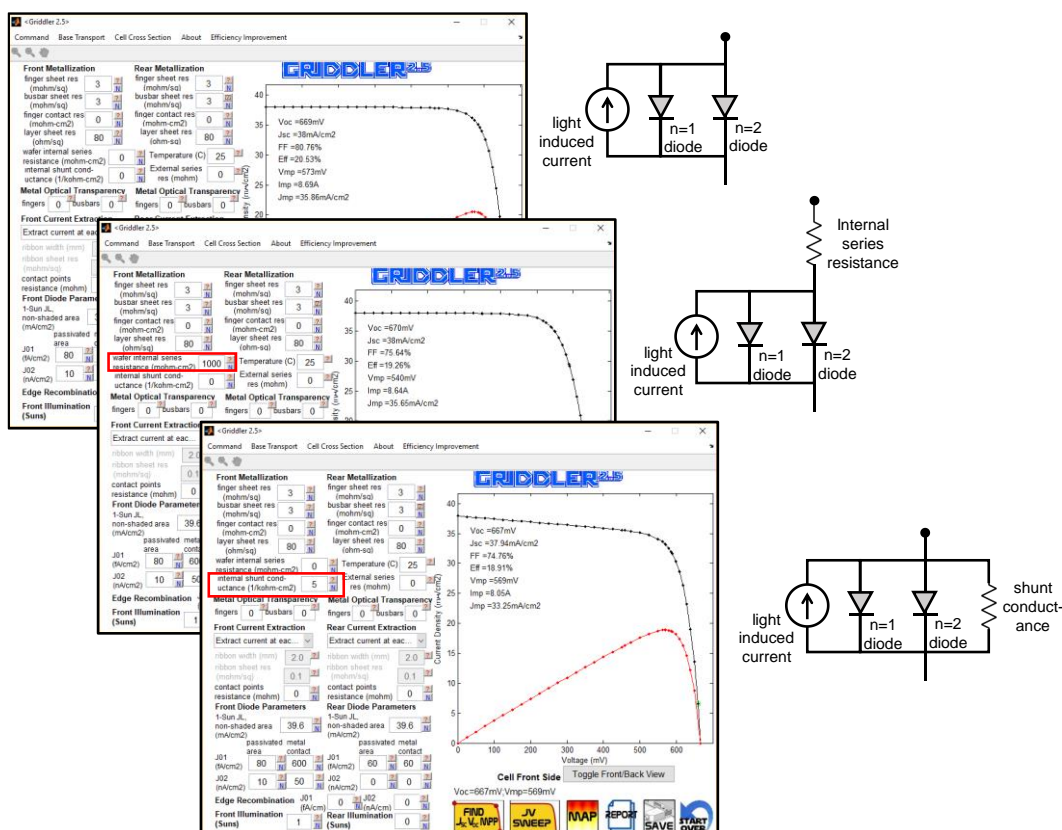
其中 ρ_{sheet} 是薄层电阻, ρ_{bulk} 是体电阻率, t_{layer} 是金属层的厚度。例如, $\rho_{bulk} = 3 \times 10^{-8} \Omega m$, $t_{layer} = 10 \mu m = 1 \times 10^{-5} m$, 由此得出 $\rho_{sheet} = 3 m\Omega/sq$ 。如果金属栅线的电阻是已知的 (以 Ω/cm 为单位), 则使用

$$\rho_{sheet} = R_{line} \times w_{line}$$

其中 ρ_{sheet} 是薄层电阻, R_{line} 是线电阻, w_{line} 是金属栅线的宽度。例如, $R_{line} = 0.333 \Omega/\text{cm}$, $w_{line} = 60 \mu\text{m} = 60 \times 10^{-4} \text{ cm}$, 则 $\rho_{sheet} = 2 \text{ m}\Omega/\text{sq}$ 。

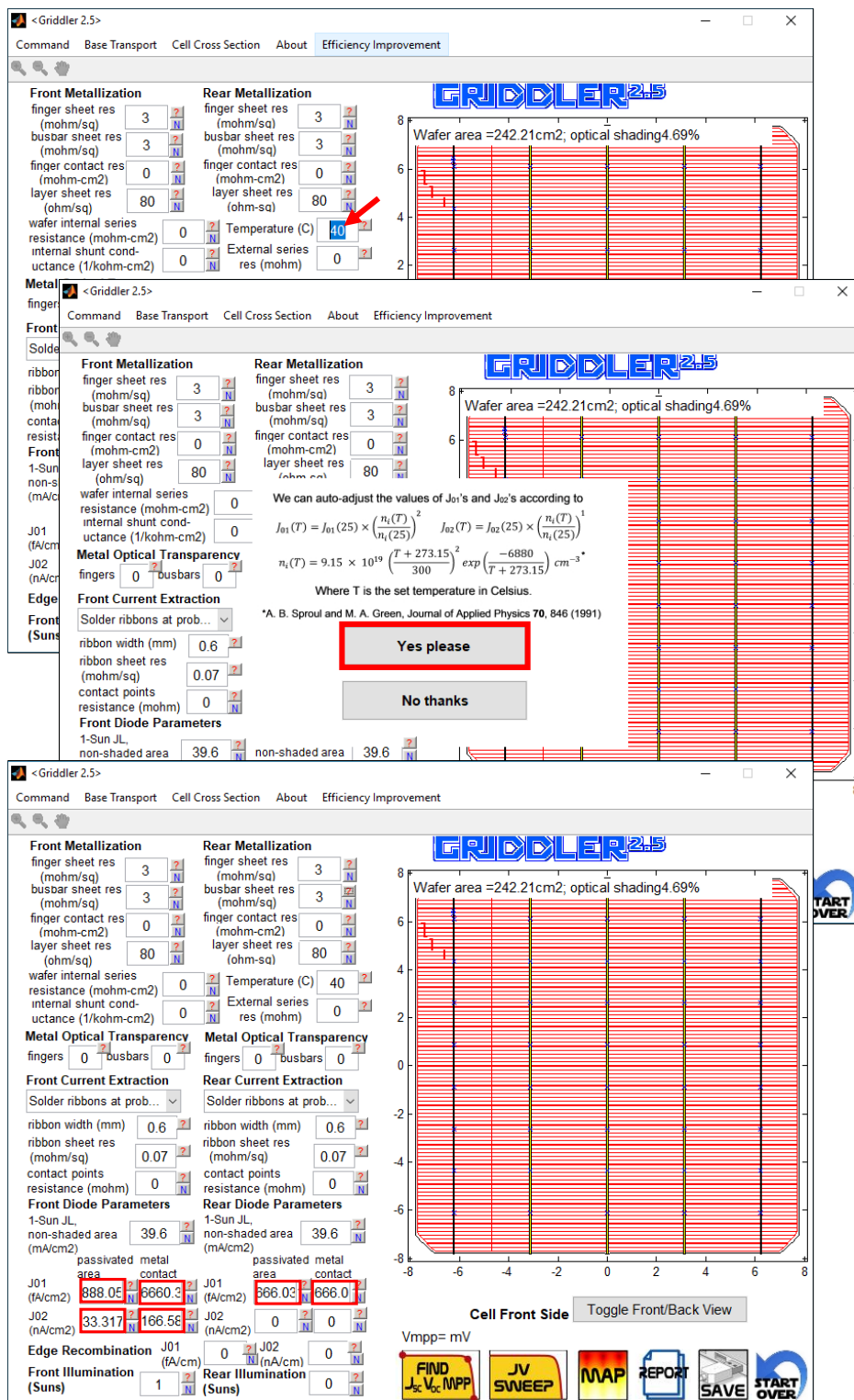
② Wafer Internal Series/Shunt, Temperature, External Series Resistance (硅片内串/并联, 温度, 外部串联电阻)

默认情况下, 硅片内部串联电阻和分流电导都设置为零。如第 1.2 节等效电路所示, 非零的晶片内部串联电阻即在 node 之间插入一个额外电阻。非零的晶片内部分流电导意味着在等效电路中有分流元件提供分流路径。下面的屏幕截图展示了当内部串联电阻或内部并联电导增加时, 电池的 I-V 特性如何变化。



在 Griddler2.5 PRO 中, 温度可以设为 25°C 默认值以外的值, 外部串联电阻可以设置为大于零。对于组件的模拟来说, 这两者都是非常重要的, 因为组件温度通常高于室温, 并且组件的电缆和互连常常引入额外的外部串联电阻。

如下图所示, 如果选择不同于 25°C 的温度, Griddler2.5 PRO 将根据下面的公式, 提供调整复合的参数 (参见第 5 点)



$$J_{01}(T) = J_{01}(25^{\circ}\text{C}) \times (n_i(T)/n_i(25^{\circ}\text{C}))^2$$

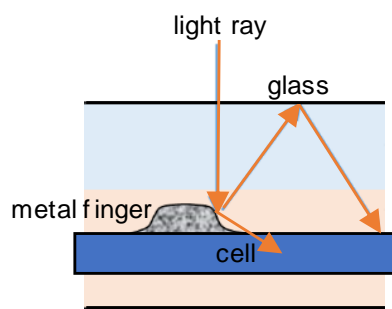
$$J_{02}(T) = J_{02}(25^{\circ}\text{C}) \times (n_i(T)/n_i(25^{\circ}\text{C}))^1$$

$$n_i(T) = 9.15 \times 10^{19} \left(\frac{T + 273.15}{300} \right)^2 \exp\left(\frac{-6880}{T + 273.15}\right)$$

其中, J_{01} 和 J_{02} 分别是 $n=1$ 和 $n=2$ 二极管的饱和电流密度 (在第 1.2 节中解释的 I_{01} 和 I_{02} 的饱和电流值), T 是摄氏温度, n_i 是硅中的本征载流子浓度。上述方程基本上意味着热平衡载流子浓度和复合电流将随温度增加而增加。这导致开路电压 (V_{oc}) 和效率随温度升高而下降。上述方程基本描述了太阳能电池 V_{oc} 和效率中的负温度系数。但是, Griddler 并没有考虑由于温度的升高, 硅带隙减小, 红外光子吸收增加而引起的, 短路电流密度 (J_{sc}) 中相对较小的温度系数。并且对由于温度的变化引起的载流子迁移率的变化, Griddler 并没有对半导体薄层电阻作出相应调整。

③ Metal Optical Transparency (金属光学透明度)

这是一个用来表示金属细栅和主栅物理宽度的比值的值, 它定义了接触面积 (contact area), 以及它们的“光学宽度” (“optical widths”), 即金属栅线遮挡电池上入射光线的程度。通常, 细栅或主栅的光学宽度小于物理宽度, 因为入射到金属栅线上的光可以散射到电池中。下面的图片显示了两中可能的散射机制。在一种情况下, 光线可以直接从金属栅线的一个面散射到电池中, 另一种情况, 更多的在组件中出现, 即光线可以从金属面散射, 然后经历玻璃-空气界面的内部反射并返回到电池中。



金属光学透明度 = 1 - 金属元件光学宽度/金属元件物理宽度。因此, 默认值零, 意味着光学宽度等于物理宽度。

④ Current Extraction Method (电流导出方式)

Front Current Extraction

Extract current at eac... ▾

Extract current at each probe point

Solder ribbons at probe points, extract current at ribbon ends

Floating (Voc calculation only)

Rear Current Extraction

Extract current at eac... ▾

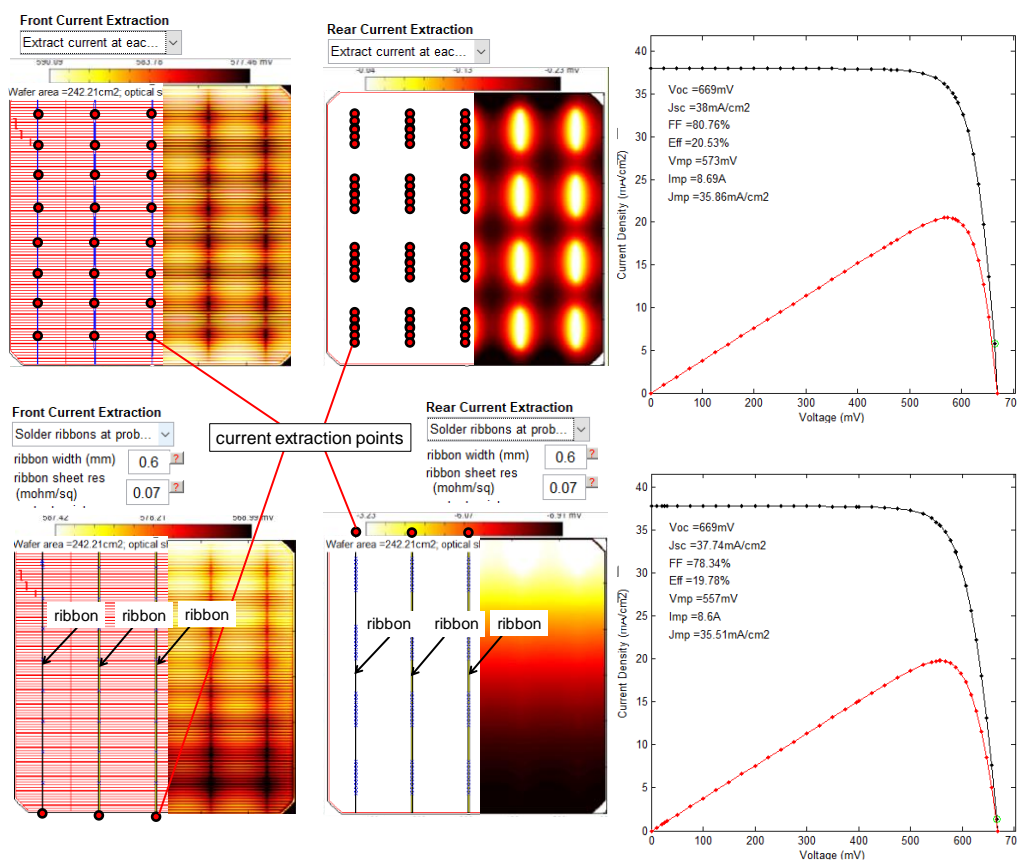
Extract current at each probe point

Solder ribbons at probe points, extract current at ribbon ends

Full area rear chuck contacting

Floating (Voc calculation only)

对于电池正, 背平面, 您可以选择电流被提取到外部电路的位置, 或者说施加端电压的位置。下面的图片说明了两种最常用的方法的区别: “Extract current at each probe point” 和 “Solder ribbons at probe points, extract current at ribbon ends”。选择 “Extract current at each probe point” 模拟了 I-V 测试装置, 其中每个 probe point 都与 I-V 测试的探针接触。这种情况由图的上半部分表示, 其中红点是外部电路的连接点。它们也被称为电流提取点。选择 “Solder ribbons at probe points, extract current at ribbon ends” 用于模拟组件中与其他电池相连的一片电池。这种情况由下面的图片的下半部分表示, 其中红点在焊带的末端, 会将电流从电池平面向下拉到电池的边缘。如 I-V 特性所示, 由于电流必须流过焊带并穿过较长的距离, 这种电流提取方法将导致较高的串联电阻损耗和较低的填充因子。



对于电池背面，您也可以选择“Full area rear chuck contacting”。在这种情况下，就像 I-V 测试中测试台与电池背板的接触一样，将假设背面上的每个 node 都接地。

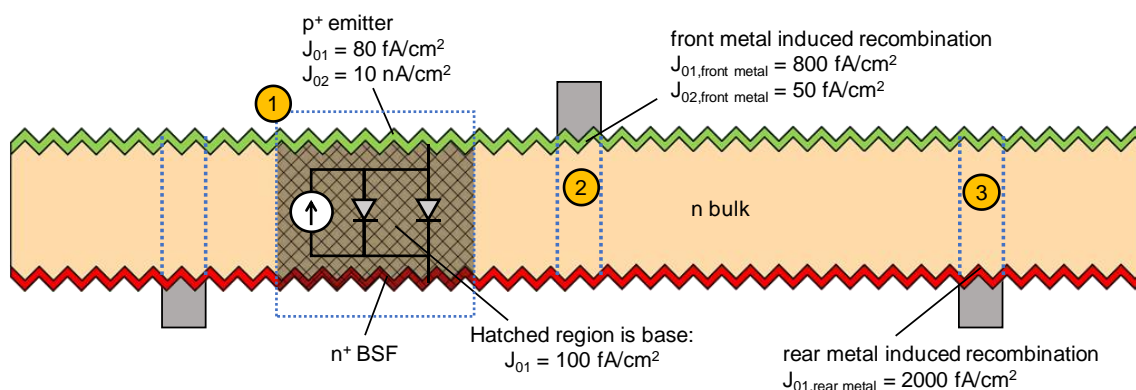
最后，选择“Floating (V_{oc} calculation only)”是比较少使用的。不管您在电池的正面或是背面选择这一选项，这将意味着电池与外部没有连接，Griddler 将阻止您运行 I-V 曲线。只有当您想要模拟开路条件（例如说在光致发光成像的情况下），您不希望电流从电池的一部分传递到另一部分时，才使用此选项。

⑤ Diode Parameters（二极管参数）

在第 1.2 节中，我们介绍了电池的正面和背面导体平面之间是一个夹层，其中太阳能电池的光伏特性由等效电路表现，称为双二极管模型。正如在该部分中所描述的，两个二极管模型的 I-V 特性是

$$I(V_{diode,i}) = I_{L,i} - I_{01,i} \exp\left(\frac{qV_{diode,i}}{kT}\right) - I_{02,i} \exp\left(\frac{qV_{diode,i}}{2kT}\right) - G_{shunt,i} V_{diode,i}$$

其中 $V_{diode,i}$ 是等效电路上的电压， q 是基本电荷， k 是玻尔兹曼常数， T 是电池温度以开尔文为单位。 $I_{L,i}$ 是光感应电流， $I_{01,i}$ 和 $I_{02,i}$ 是 $n=1$ 和 $n=2$ 二极管的饱和电流， $G_{shunt,i}$ 是分流电导（上面公式中并没有显示）。所有这些术语都与 node 的面积成比例（这与三角形包围 node 的面积有关），因此以电流密度来讨论这些值更加的方便： $I_{L,i} \rightarrow J_L$, $I_{01,i} \rightarrow J_{01}$, $I_{02,i} \rightarrow J_{02}$ 。这里的 J 指的是电流密度。需要注意的是，与等效电路的两个二极管相关的饱和电流密度 J_{01} , J_{02} 在晶片的表面钝化区域与晶片具有金属-半导体接触的区域中具有不同的值。此外，在钝化区域中，通常又习惯于将 J_{01} , J_{02} 细分为两个值，分别描述 pn 结两侧的复合电流。下图举例展示了这些划分方式。



Front Diode Parameters

1-Sun JL, non-shaded area (mA/cm²)	39.6	?	N
passivated metal area	?	?	N
contact	?	?	N
J01 (fA/cm²)	80	800	?
J02 (nA/cm²)	10	50	?

Rear Diode Parameters

1-Sun JL, non-shaded area (mA/cm²)	39.6	?	N
passivated metal area	?	?	N
contact	?	?	N
J01 (fA/cm²)	100	2000	?
J02 (nA/cm²)	0	0	?

区域 1 在晶片的两侧都具有良好的钝化。该示例电池具有 $p^+|n|n^+$ 的结构, 因此 pn 结是 p^+ 发射极接触 n 型衬底的地方。如之前介绍的, 习惯上将 J_{01}, J_{02} 细分为两部分, 分别描述 pn 结的两侧的复合电流。在这种情况下, 我们将 $J_{01} = 80 \text{ fA/cm}^2$, $J_{02} = 10 \text{ nA/cm}^2$ 分给 p^+ 型发射极, 把 $J_{01} = 100 \text{ fA/cm}^2$ 分给衬底。在 Griddler 中, 与 p^+ 发射极相关的值归为 “Front Diode Parameters” → “passivated area” 区域, 与衬底相关的值归为 “Rear Diode Parameters” → “passivated area” 区域。区域 2 是电池正面金属区域。我们将 $J_{01} = 800 \text{ fA/cm}^2$, $J_{02} = 50 \text{ nA/cm}^2$ 分配该区域的发射极侧, 所以在 Griddler 中, 这些值列在 “Front Diode Parameters” → “metal contact” 区域。最后, 区域 3 是背面金属区域。我们将 $J_{01} = 2000 \text{ fA/cm}^2$ 定义为该区域的衬底区值, 因此在 Griddler 中, 这些值位于 Rear Diode Parameters → metal contact 列。

把这些放在一起, 我们将得到

$$I_{01,i} = J_{01,front}^{pass} A_{front}^{pass} + J_{01,front}^{metal} A_{front}^{metal\ contact} + J_{01,rear}^{pass} A_{rear}^{pass} + J_{01,rear}^{metal} A_{rear}^{metal\ contact}$$

$$I_{02,i} = J_{02,front}^{pass} A_{front}^{pass} + J_{02,front}^{metal} A_{front}^{metal\ contact} + J_{02,rear}^{pass} A_{rear}^{pass} + J_{02,rear}^{metal} A_{rear}^{metal\ contact}$$

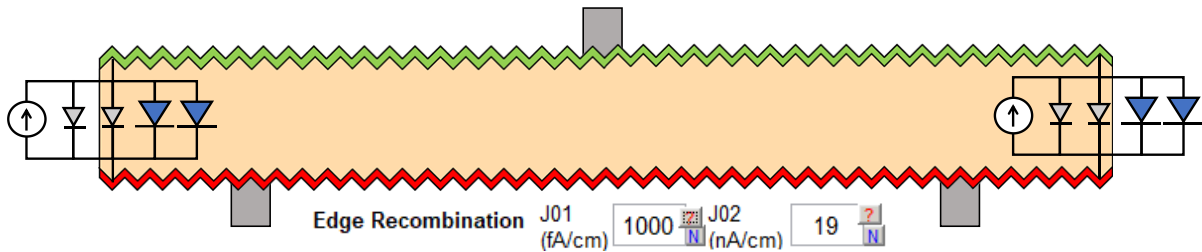
其中 A_{front}^{pass} 是正面钝化区 node 之间的面积; A_{rear}^{pass} 是背面钝化区 node 之间的面积; A_{front}^{metal} 是正面金属区 node 之间的面积; A_{rear}^{metal} 是背面金属区 node 之间的面积。

您或许注意到, 在正面、背面二极管参数下都有一个叫做 “1-Sun JL, non-shaded area (mA/cm^2)” 的框。这是电池的未被遮挡区域中的光生电流密度, 分别用于前入射光和后入射光。然后, 在一个 node 上总的光生电流是

$$I_{L,i} = J_{L,front}^{1Sun\ non\ shade} Suns_{front} (A_{front}^{pass} + A_{front}^{metal} \times metal\ transparency\ front) \\ + J_{L,rear}^{1Sun\ non\ shade} Suns_{rear} (A_{rear}^{pass} + A_{rear}^{metal} \times metal\ transparency\ rear)$$

其中 $J_{L,front}^{1Sun\ non\ shade}$ 和 $J_{L,rear}^{1Sun\ non\ shade}$ 是 1Sun 下, 在太阳能电池的未遮挡区域, 电池正面和背面的光生电流密度; $Suns_{front}$ 和 $Suns_{rear}$ 是从电池正面和背面入射的光的强度, 以 Suns 为单位; 正面和背面金属的透光度已经在本节第 3 点中讨论。

⑥ Edge Recombination (边缘复合)



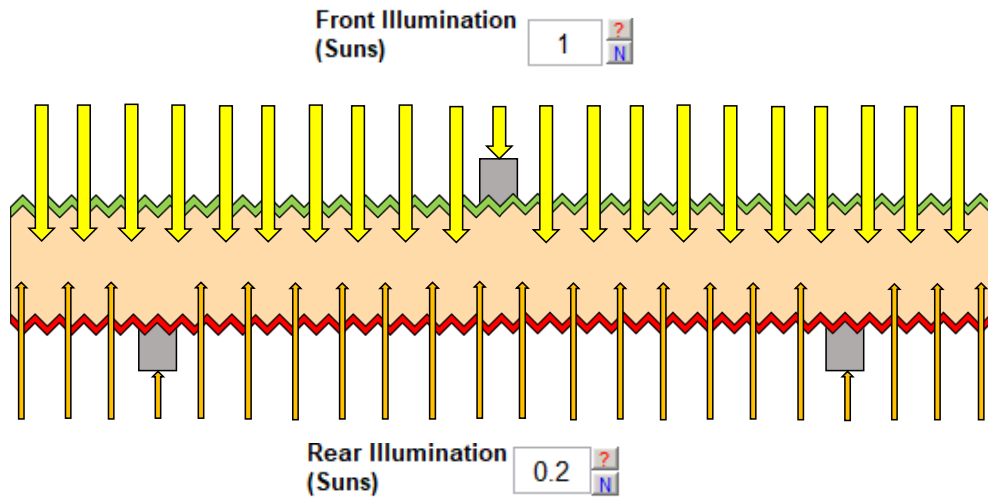
晶片的边缘或晶片的近边缘区域在大多数情况下有更多复合发生。这可能是由于晶片边缘的钝化较差或没有钝化层, 以及由 edge isolation (边缘结隔绝) 工艺引入的损伤。对于在晶片边缘处的 node, 除了那些与节点面积成正比的二极管电流以外, 增强的复合由额外的两个 $n=1$ 和 $n=2$ 的二极管电流表示。即上面画的蓝色的大二极管。在 edge node 上, 饱和电流密度为

$$I_{01,i} = J_{01,front}^{pass} A_{front}^{pass} + J_{01,front}^{metal} A_{front}^{metal\ contact} + J_{01,rear}^{pass} A_{rear}^{pass} + J_{01,rear}^{metal} A_{rear}^{metal\ contact} + J_{01,edge} L_{edge}$$

$$I_{02,i} = J_{02,front}^{pass} A_{front}^{pass} + J_{02,front}^{metal} A_{front}^{metal\ contact} + J_{02,rear}^{pass} A_{rear}^{pass} + J_{02,rear}^{metal} A_{rear}^{metal\ contact} + J_{02,edge} L_{edge}$$

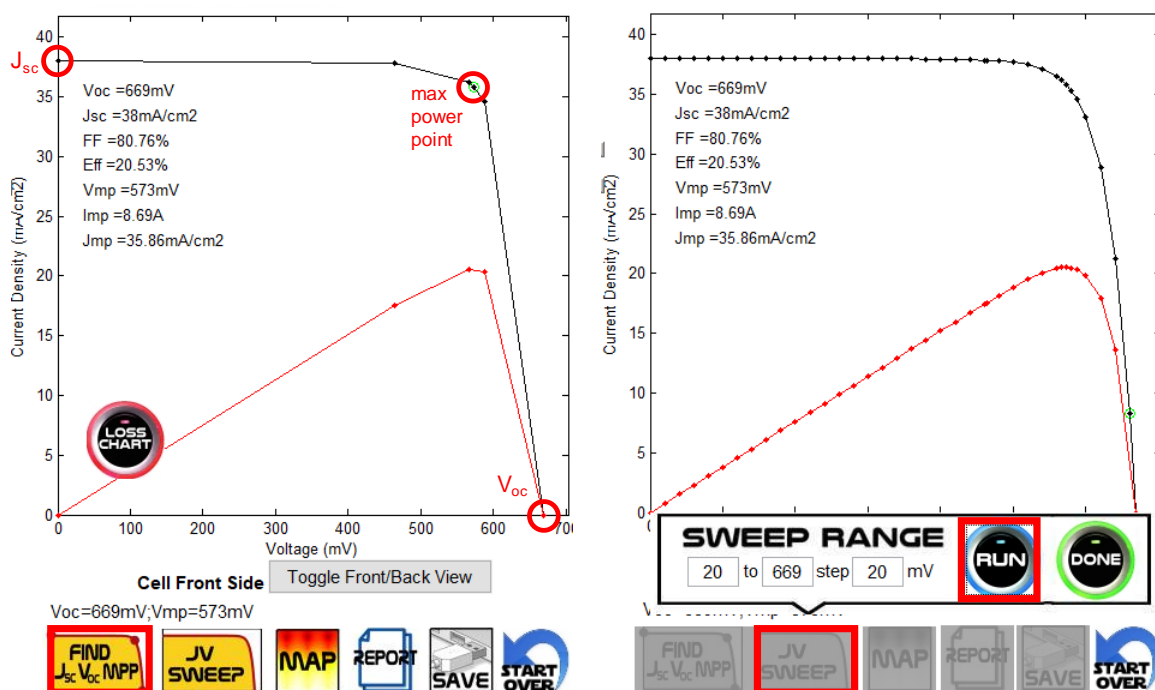
其中增强的复合是用红色写的。 $J_{01,edge}$ 和 $J_{02,edge}$ 是晶片边缘每单位长度的附加饱和电流, L_{edge} 是 node 边缘的长度。

⑦ Illumination (光照)



参考本节的第 5 点, 这些是 $I_{L,i}$ 方程式中出现的 $Suns_{front}$ 和 $Suns_{rear}$ 项。上面的图片展示了一个双面太阳能电池的例子, 正面有 1Sun 的入射, 背面有 0.2Sun 的入射。

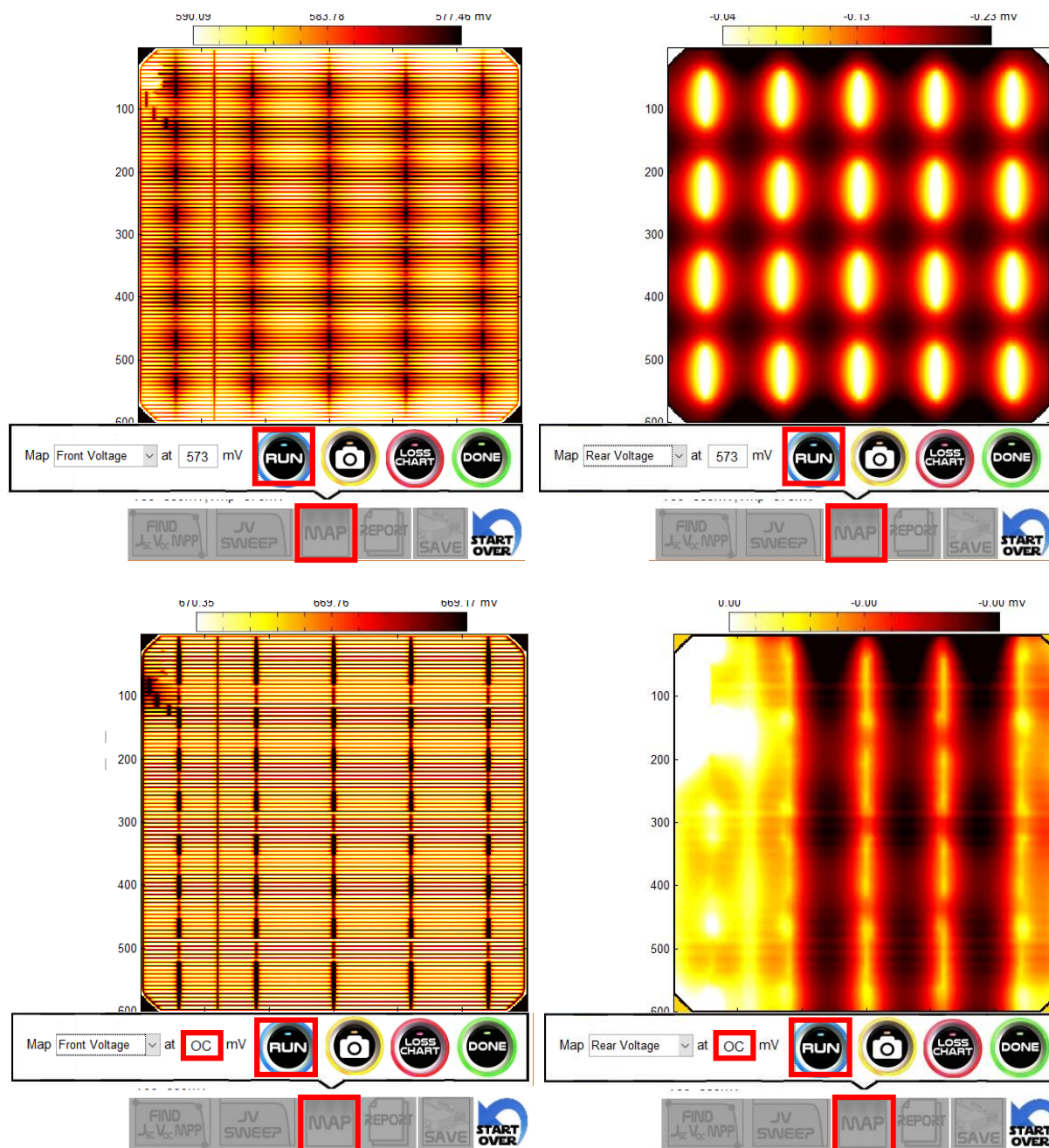
⑧ Run and Save Buttons (运行和保存按钮)



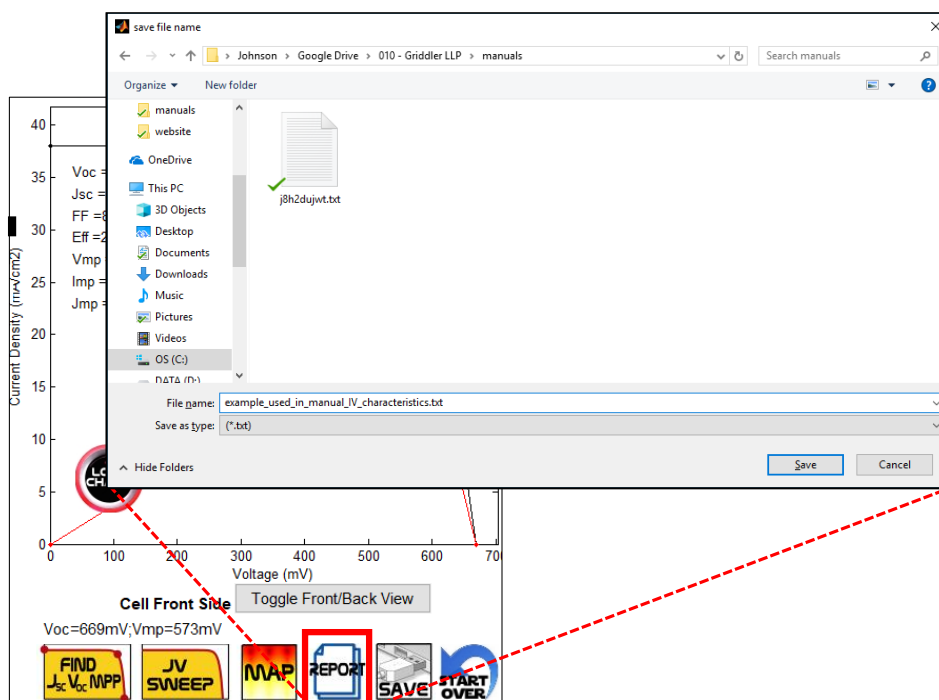
最常用的使用按钮是“Find J_{sc} V_{oc} MPP”，在上面左图中，Griddler 自动搜寻短路电流密度 (J_{sc})、开路电压 (V_{oc})，最大功率点 (MPP) 以及相关的 I-V 参数 (效率、填充因子 FF、在最大功率点 MPP 的电压 V_{mp} 和电流 I_{mp})。这是获得基本 I-V 参数的最快方法。上面的示例只搜索了 6 个点来查找所有这些 I-V 参数，在台式计算机上大约需要 12s。

接下来，如果您希望获得平滑的 I-V 曲线，可以通过按下“JV Sweep”来添加更多的计算数据，然后选择适当的范围和步长。只要不改变栅线设计或任何电池参数，您可以通过 JV sweep 不断添加更多的数据点到已经计算的曲线上。

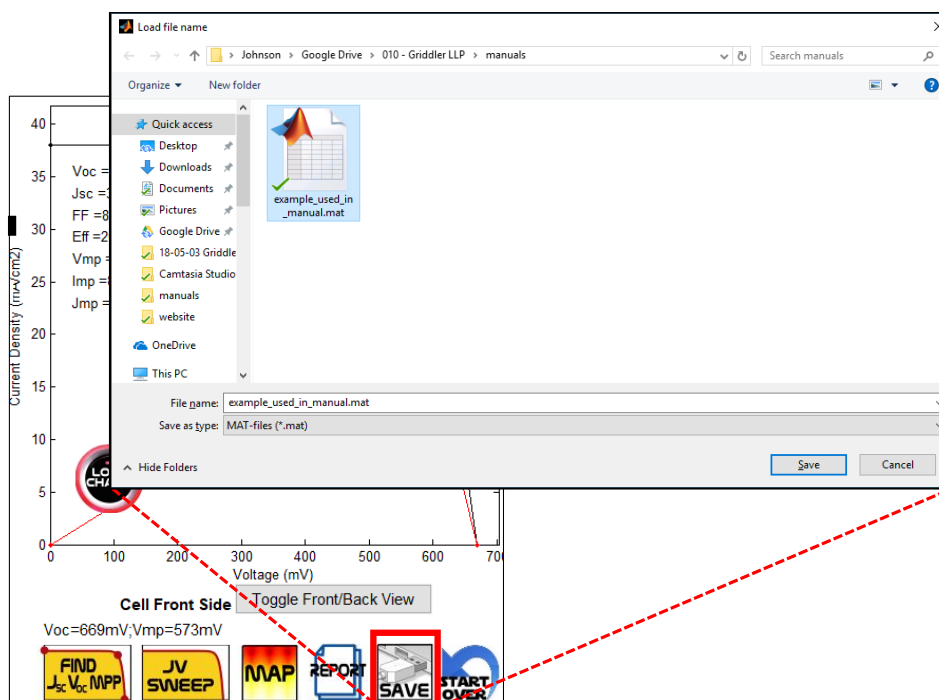
你可以通过点击“Map”来可视化电池电压/电流密度/发光强度。这时会弹出一个菜单栏，允许您指定要显示的图 (Diode voltage 二极管电压, Front Voltage 正面电压, Rear Voltage 背面电压, Luminescence 发光, Current Density 电流密度)；以及在什么电压值的情况下显示这些图 (下图，我们选取了 573 mV，这是最大功率点的电压；另一页图中，我们展示了通过勾选“OC”来进行开路电压条件下的模拟)。单击“Run”模拟设定条件下值的空间分布。点击相机图标以保存图像。



在通过“Find J_{sc} V_{oc} MPP”或“JV Sweep”运行 I-V 曲线之后，单击“Report”保存电池几何参数（例如，晶片面积、金属接触面积），I-V 参数（J_{sc}, V_{oc}, FF, 效率），损耗分析结果（更多，请参见 2.8）和 I-V 曲线为文本文件。

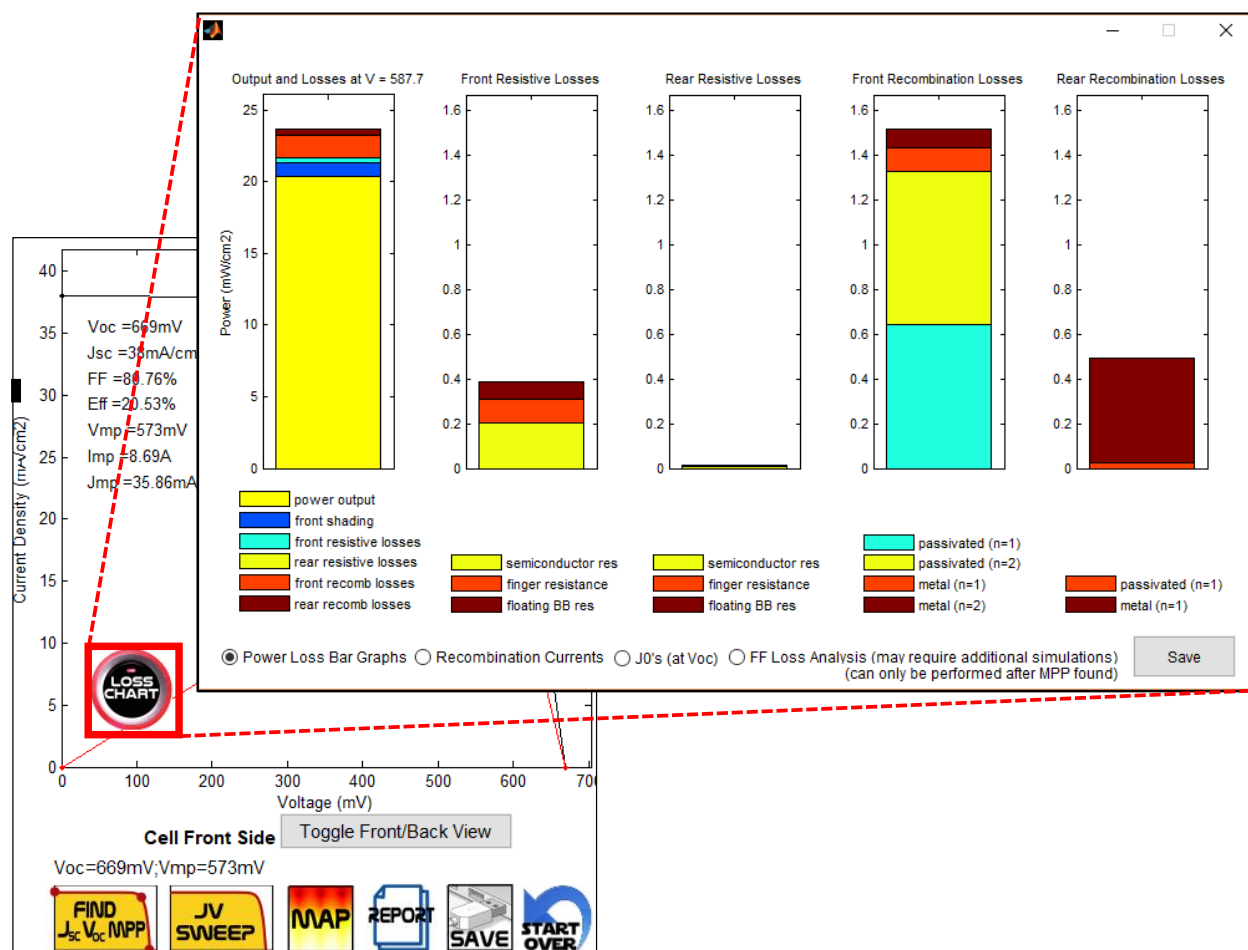


在任何时候，单击“Save”可以保存整个会话（电池设计模式和电池参数）。会话文件保存为 .mat 文件。您可以通过点击首页的“Load Session”来加载已保存的会话（参见 2.9）。

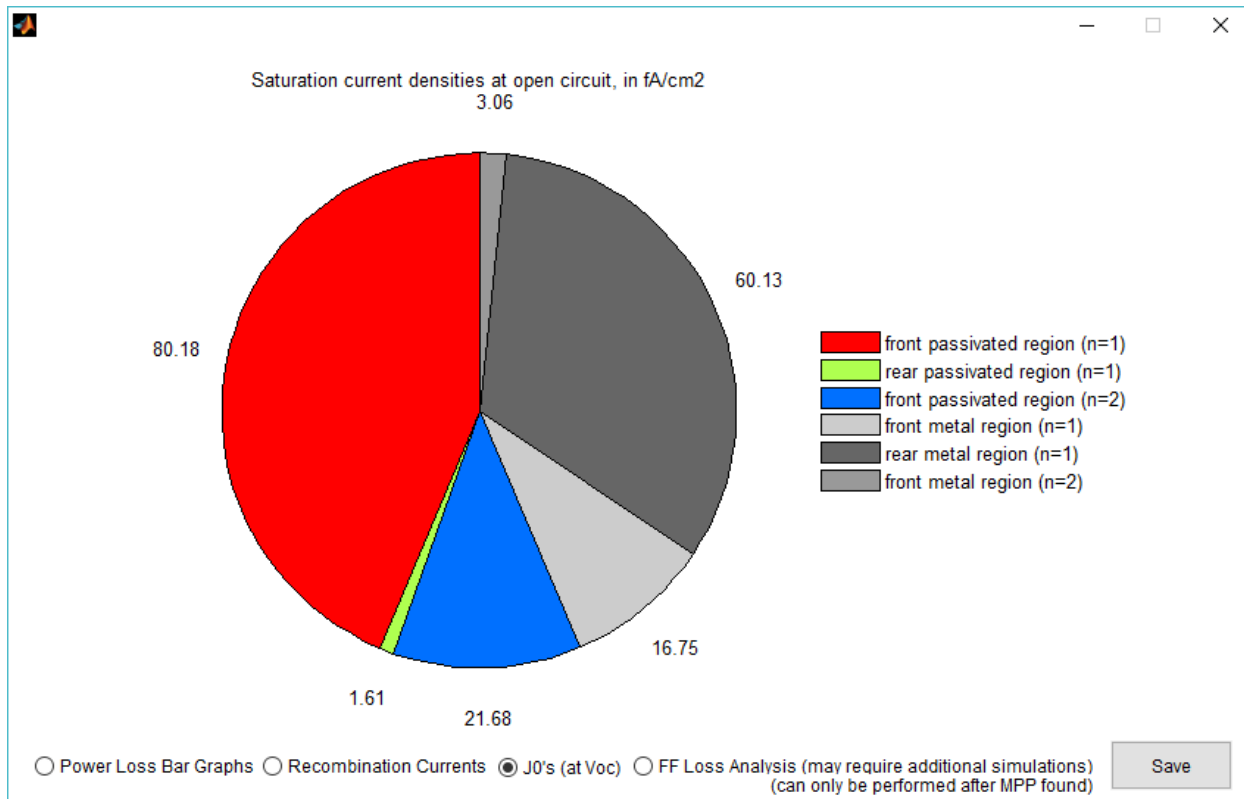
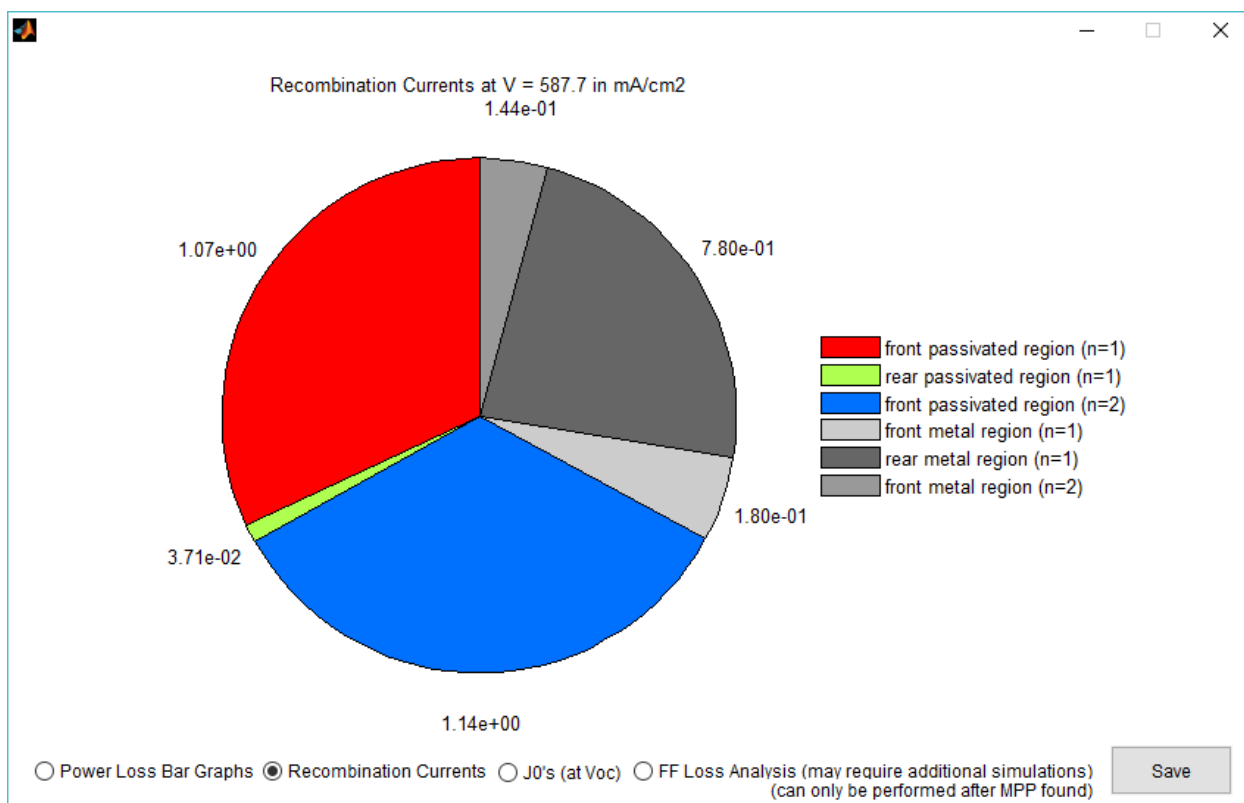


2.8 损耗分析图表

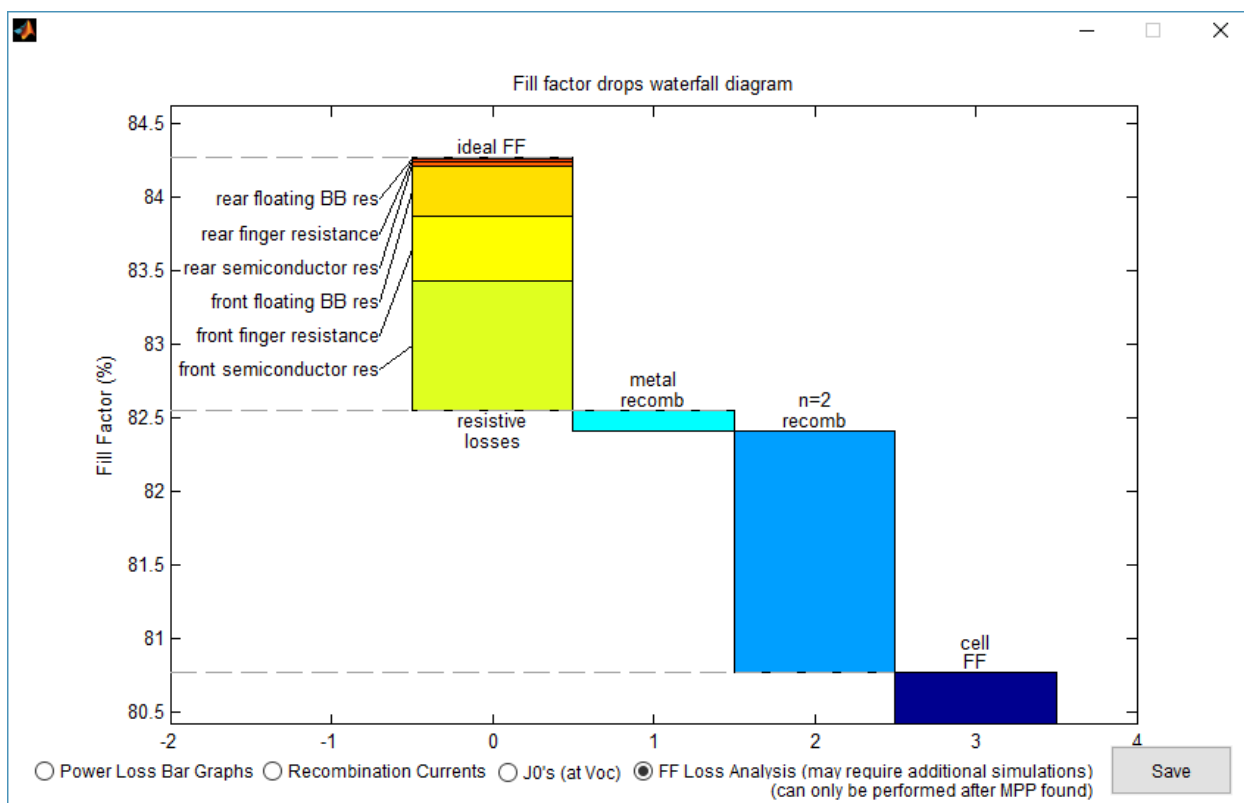
在通过“Find Jsc Voc MPP”运行 I-V 曲线之后，在 I-V 曲线的左下角出现一个名为“Loss Chart”的按钮。点击它显示一个新窗口，允许您在窗口底部使用单选按钮在四幅损耗分析图表之间切换。第一幅是功率损耗条形图，展示了以 mW/cm^2 为单位的，在最大功率点处，由阴影（shading）、复合（recombination）和电阻（resistances）引起的功率损耗。



如下图所示，第二和第三个单选按钮分别是在最大功率点（MPP）和在开路条件（OC）下不同复合电流的饼状图。在 MPP 点显示的复合电流密度饼状图以 mA/cm^2 为单位。各项复合电流密度乘以晶片面积的总和是实际 MPP 点的总复合电流。在 OC 显示的复合电流密度饼状图显示的是饱和电流密度除以 $\exp(qV_{oc}/kT)$ ，所以单位通常是 fA/cm^2 ，而且这也便于与第 1.2 节，第 5 点中的 J_0 项进行比较。

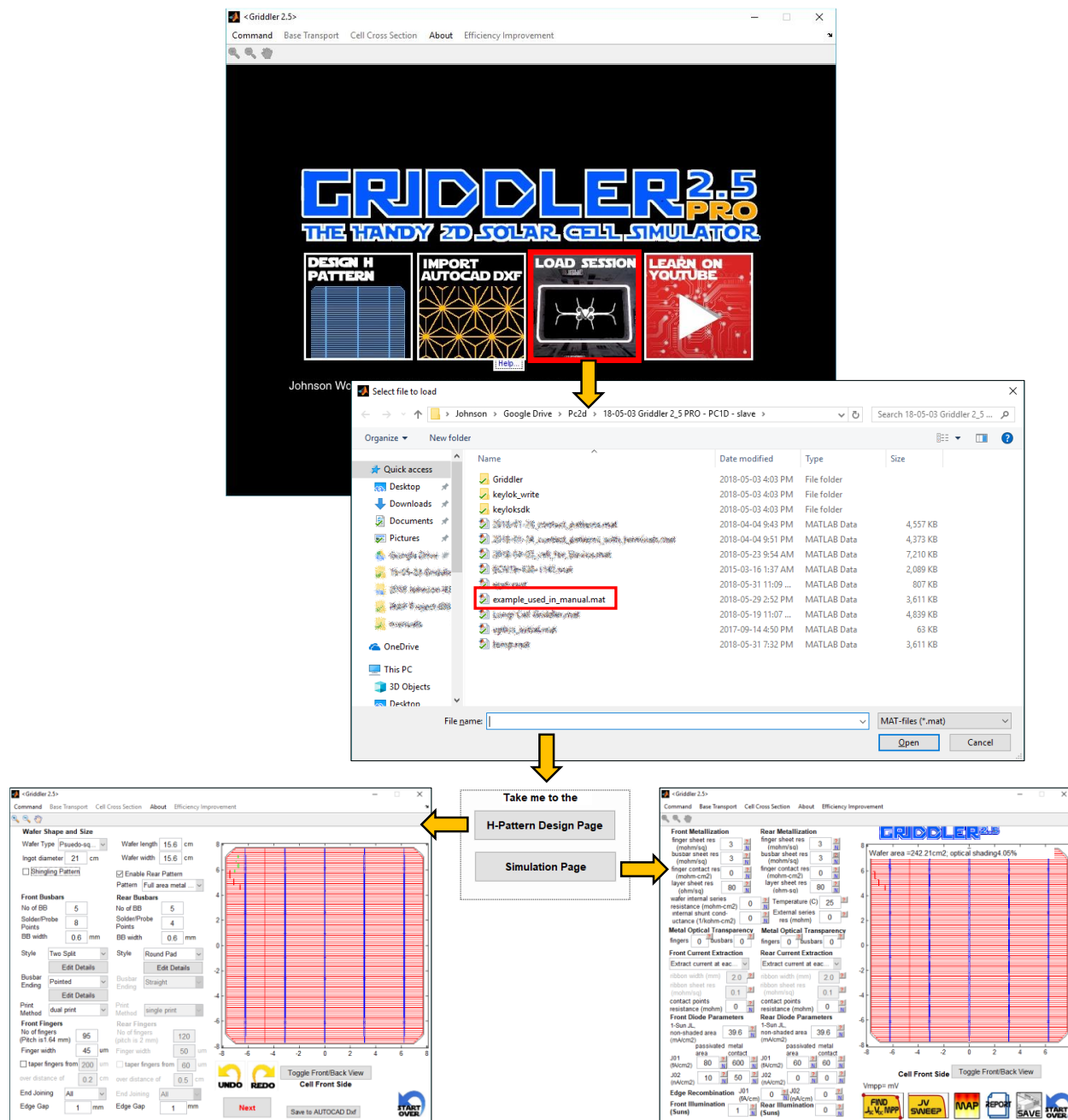


最后，第四个单选按钮是填充因子减小的瀑布图。这个图大约需要一分钟的时间来画，因为它通过模拟一系列与基线相比越来越高的 FF 的场景来实现的。首先，去掉边缘复合（如果有的话）。接着，如果正面钝化区 J_{01} 的空间分布不均匀（见 3.1），则将其设为中央值。然后，去掉 $n=2$ 的二极管的节点。然后，去掉由金属接触引起的额外的复合，也就是将金属区域的 J_{01} , J_{02} 设为与钝化区的一致。然后，去掉分流电导（如果有的话）。然后，在最后这个 I_{01} 的基础上，Griddler 通过 I-V 曲线 $I(V) = I_L - I_{01} (\exp(qV/kT)-1)$ ，来计算无电阻情况下，理想的填充因子。所以，最后那个模拟情景的填充因子与这个理想填充因子之间的差距，完全归因于串联电阻。不同种类的串联电阻导致的填充因子的损耗的比例，被假定为等于它们在 MPP 点时导致功率耗散的比例的值。



2.9 Load Session 功能

您可以通过在首页点击“Load Session”来加载以前保存的.mat 文件。导航到您的文件以打开它。您可以到 H-pattern 设计页面编辑电池的栅线设计或重新网格化您的设计，或者直接进入 simulation 页面，如下所示。



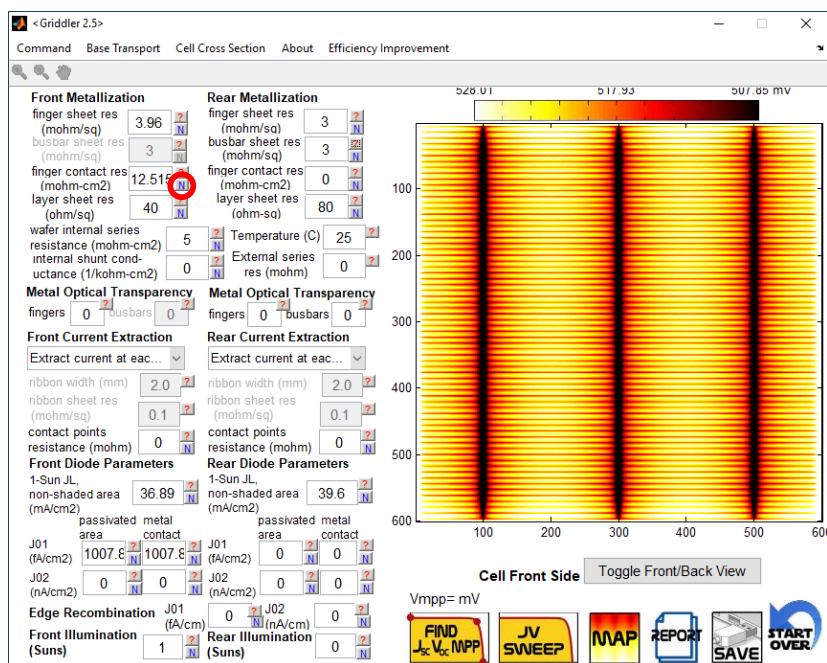
2.10 在 YouTube/YouKu 上学习

您可以在两个视频频道内找到 Griddler 的相关学习视频：一个在 YouTube 上，一个在 YouKu 上。两个频道上有相同的关于 Griddler, SolarEYE，以及太阳能电池模拟的解说和学习视频。

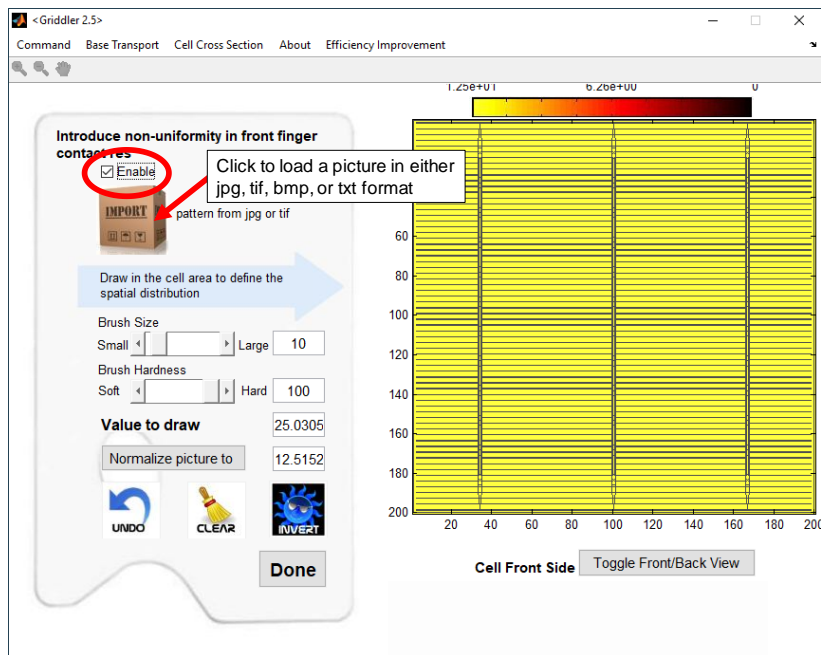


3.1 非均匀电池参数

大多数的电池参数都可以设为非均匀的空间分布。下面我们介绍两个例子。首先，我们建立一个均匀电池参数的电池。下面的截图显示在 500mv 电压时，电池正面电压呈现非常均匀的电压分布。

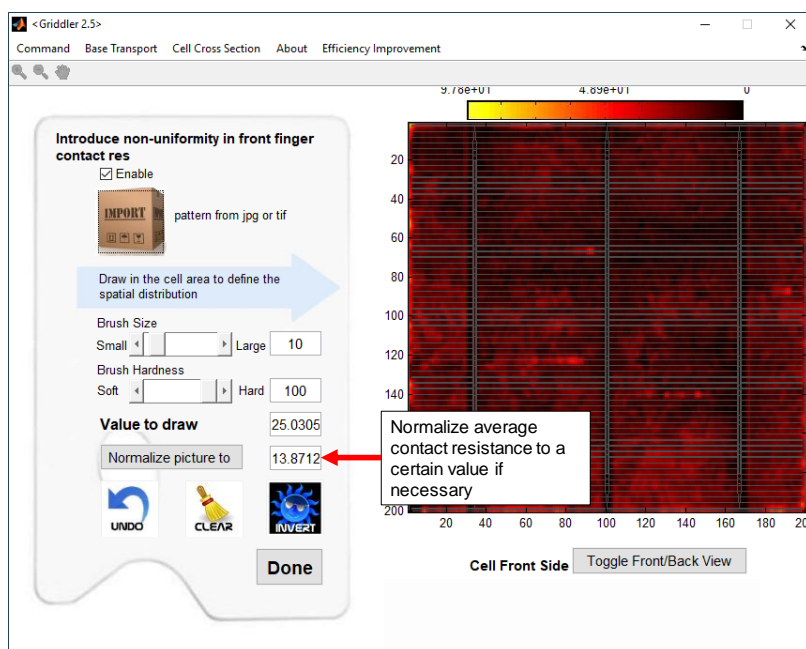


在 simulation 页面, 点击 Front Metallization 列中 “finger contact res” 旁边的 **N** 按钮。如下图窗口出现, 并显示了电池正面接触电阻的空间分布 (现在是均匀的)。勾选 Enable 以启用非均匀参数功能, 然后单击 “Import pattern”。您可以选择 jpg, tif, bmp 或者 txt 格式的图片。这里我们选择一个预先绘制的 txt 模版文件。

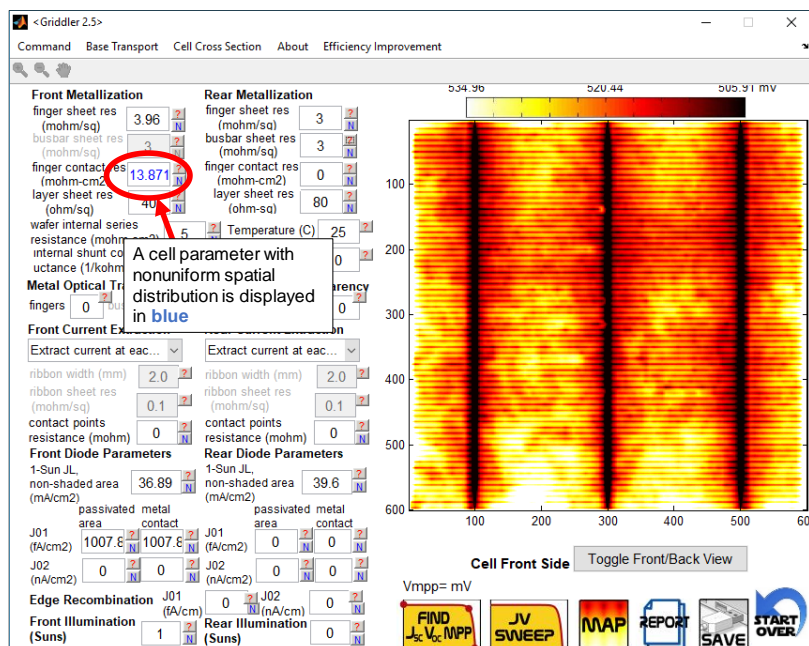


在加载图片时, 您可以看到窗口中显示了该图片所描述的空间分布。如果您可以导入一个包含数值矩阵

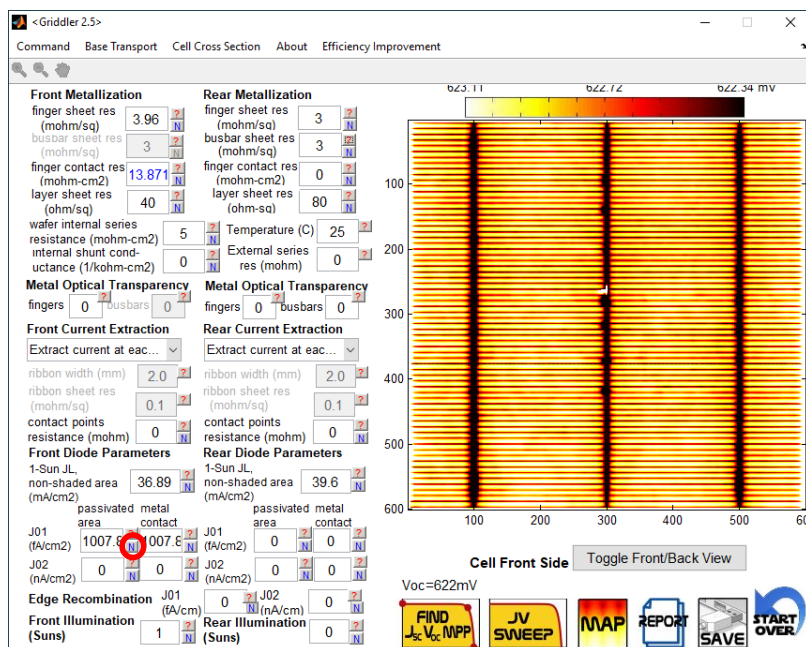
的 .txt 文件，则根据矩阵给图中的点分配精确的值。如果您导入 jpg, tif 或者 bmp 图片文件，则分配相对值，并且您可以在下面屏幕截图中指向的框中定义接触电阻的平均值。



点击 done 退出窗口。现在在 simulation 页面中，图中所指 front finger contact resistance 框中的数据是蓝色的，表明这个值是非均匀的。现在，如果我们再次在 500mv 电压时，画电池正面电压的分布图，我们看到的是由非均匀接触电阻导致的非均匀的呈片状的电压分布图。

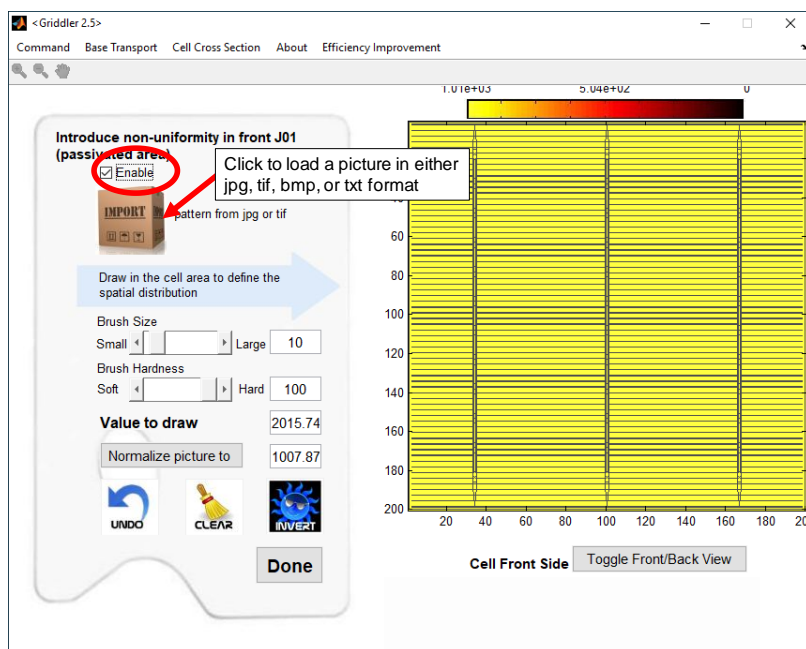


在第二个例子中, 我们画在开路电压条件下电池正面的电压分布。图中显示, 电压呈均匀分布。在 simulation 页面上, 点击 Front Diode Parameters 列中 passivated area J01 旁边的 **N** 按钮。

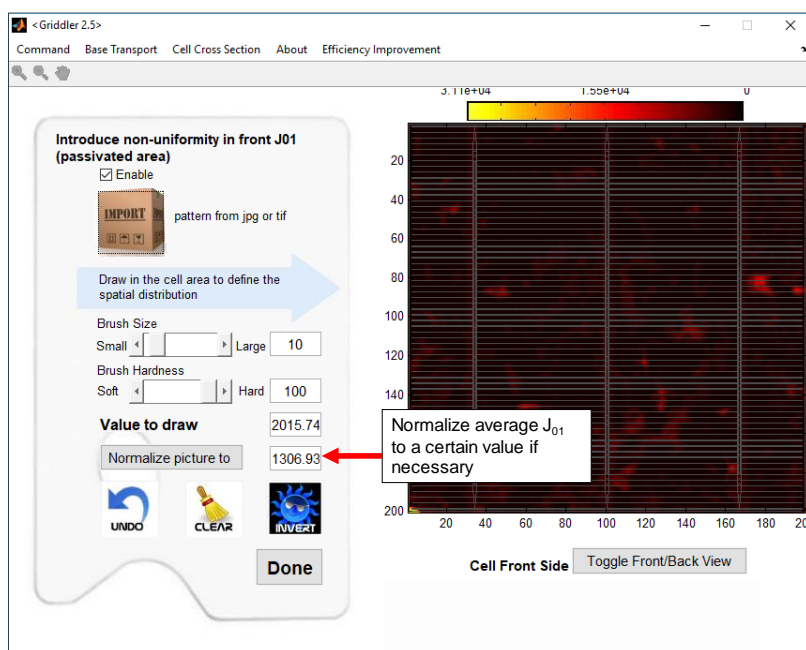


和之前类似的, 弹出如下窗口。这里显示的是电池正面钝化区 J_{01} 的空间分布。现在这个值是均匀的。勾选 Enable 以启用非均匀参数功能, 然后单击 "Import pattern"。您可以选择 jpg, tif, bmp 或者 txt 格式的图片。

这里我们仍然选择一个预先绘制的 txt 模版文件。

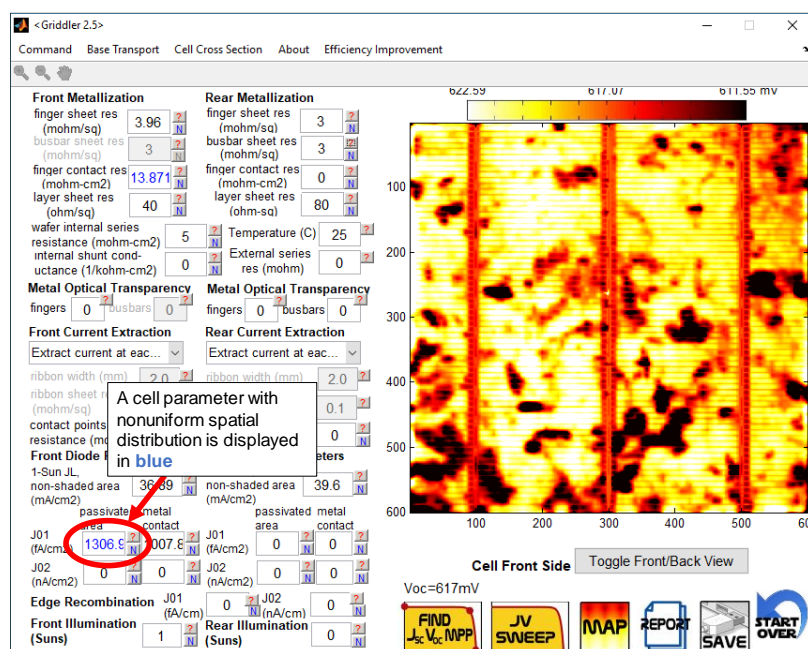


在加载图片时，您可以看到窗口中显示了该图片所描述的空间分布。和之前一样的，如果您导入一个包含数值矩阵的 .txt 文件，则根据矩阵给图中的点分配精确的值。如果您导入 jpg, tif 或者 bmp 图片文件，则分配相对值，并且您可以在下面屏幕截图中指向的框中定义钝化区 J_{01} 的平均值。




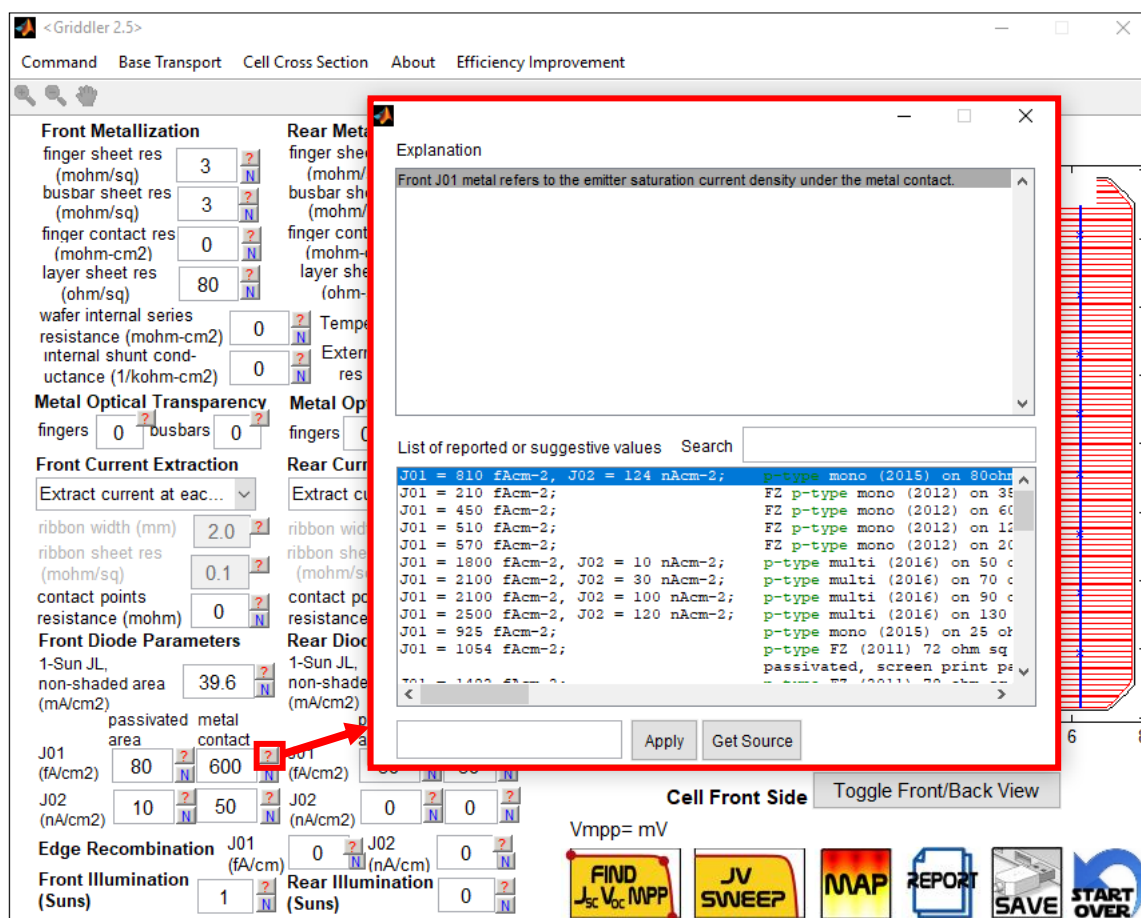
点击 done 退出窗口。现在在 simulation 页面中，图中所指 front passivated region J_{01} 框中的数据是蓝色

的, 表明这个值是非均匀的。现在, 如果我们再次在开路电压条件下, 画电池正面电压的分布图, 我们可以看到由于该区非均匀的复合电流密度, 电压呈非均匀的片状分布。



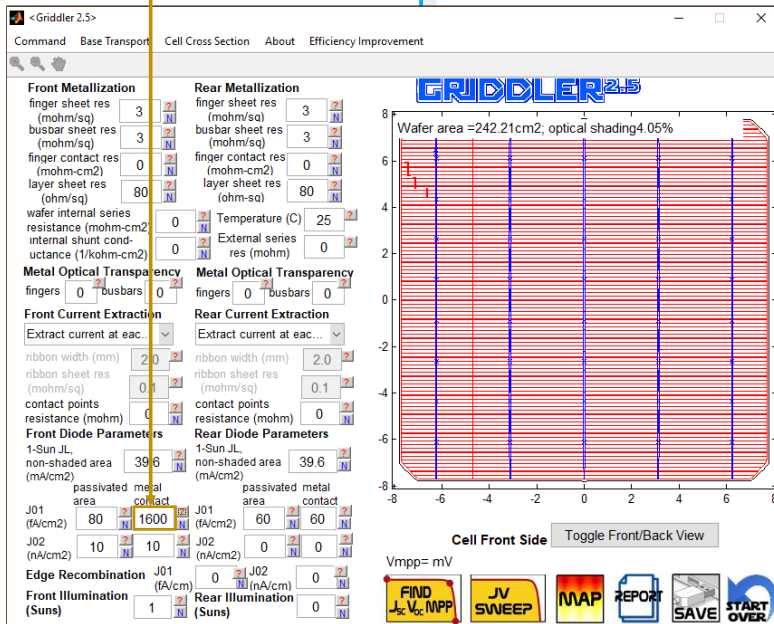
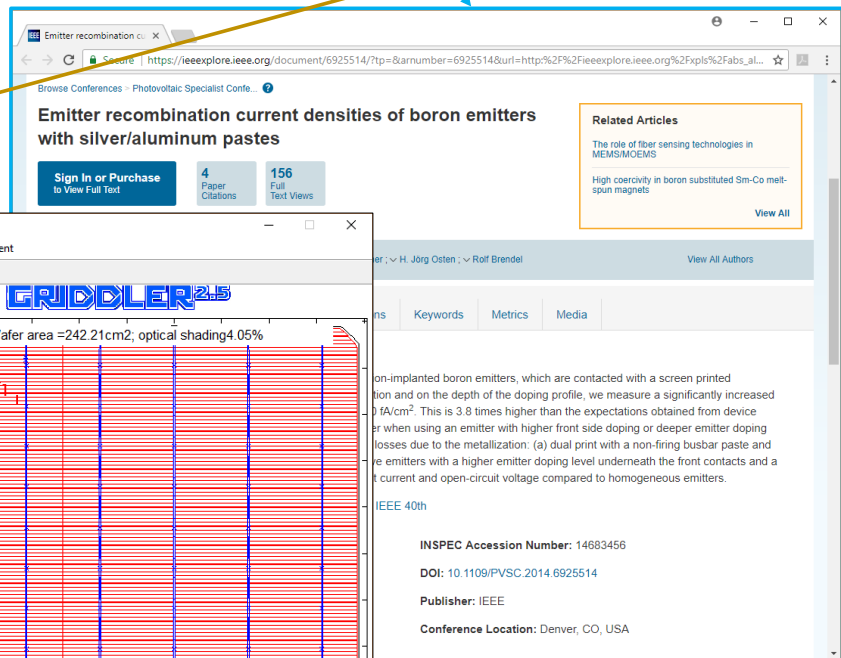
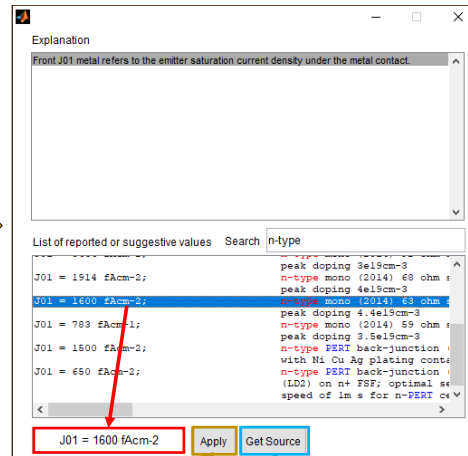
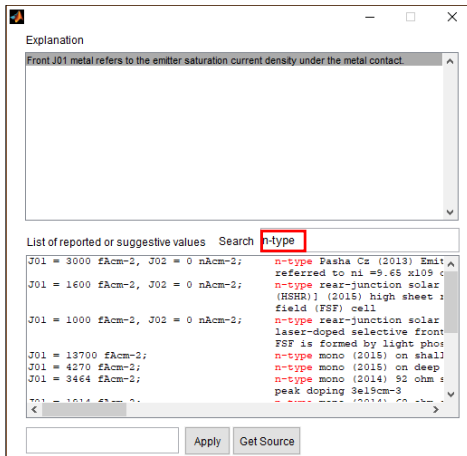
3.2 电池参数数据库 (PRO 版本)

Griddler 用户面临的挑战之一是在模拟太阳能电池时, 理解哪些是典型的, 哪些是敏感的电池参数。为了帮助您 (更帮助我们自己!), 随着时间的推移, 我们已经积累了一个电池参数的数据库, 并在 Griddler 2.5 PRO 中建立了一个界面, 这个界面与 simulation 页面互相联系, 非常容易使用, 并可以自动更新。截至 2018 年 5 月 31 日, 第 6 个版本的电池参数数据库中包含了超过了 400 条条目。在这里, 我们介绍一个使用它的例子。在下面的 simulation 页面中, 点击 Front Diode Parameters 中的 “metal contact J_{01} ” 旁边的  按钮, 数据库界面弹出。上半部分是对 “metal contact J_{01} ” 的解释, 下半部分是已发表的或建议值的列表, 同时标明了这些值的适用范围 (例如, 该值为用于 p 型多晶硅的 xxx ohm/sq 的发射极) 以及来源和作者。



参考下面的一系列截图，我们可以用关键字来缩小您的搜索范围。例如，如果您在做 n 型电池的模拟，则在搜索框中键入“n-type”将搜索范围缩小到包含关键字的结果中。在这个例子中，我们选择值为“J01 = 1600 fAcm-2”的行。单击此行后，该值将出现在“Apply”旁边的框中。点击“Apply”把这个值键入 simulation 页面 Front Diode Parameters 中“metal contact J_{01} ”框中。对于某些参数，如 metal contact J_{01} ，其已发表的值可能也同时限定其他参数的值，例如，“J01 = 1800 fAcm-2, J02 = 10 nAcm-2”。在这种情况下，选择这个值并点击“Apply”，将同时更新 simulation 页面中 metal contact J_{01} 和 metal contact J_{02} 的值。

在您选择一个参数值之后，您可以单击“Get Source”按钮，来查找参数值的来源。您的浏览器将加载被引用的期刊论文摘要的链接。



4 电池二极管参数计算 (PRO 版本)

4.1 概述

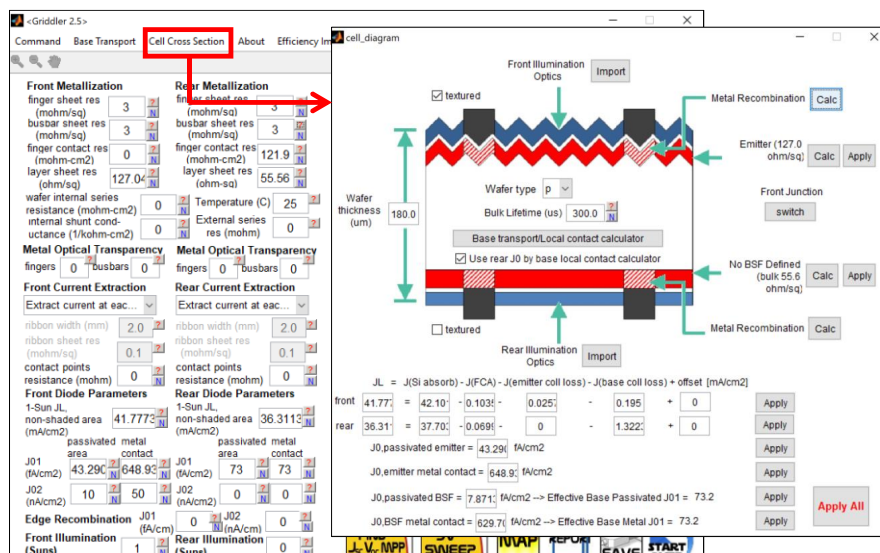
Griddler 依赖于用户提供 J_{01} , J_{02} 参数作为输入, 而并不进行有限元模拟来计算这些复合电流。随着时间的推移, 我们意识到给 Griddler 提供计算器的重要性, 或者为它提供与其他可以计算复合、基区输运和光学问题的模拟程序的接口的重要性。下面我们将介绍 Cell Cross Section Diagram 页面及其相关的窗口。

The image displays a collection of screenshots from the Griddler software interface, illustrating the workflow for battery diode parameter calculation. The central screenshot is the **Griddler Simulation Page**, which shows various input parameters and simulation results. To the left, the **Base Transport Calculator for PERC** window is shown, detailing parameters like wafer thickness, doping, and carrier mobilities. Above it, the **Import Page from Optics Simulators** window is visible, showing options for importing data from various sources. To the right, two **PC1D Caller** windows are shown, one for metal J_{0e} calculations and another for passivated emitter calculations. The **Cell Cross Section Diagram** window is also present, showing a cross-sectional view of the cell structure. Red arrows indicate the flow of data and parameters between these different components of the software.

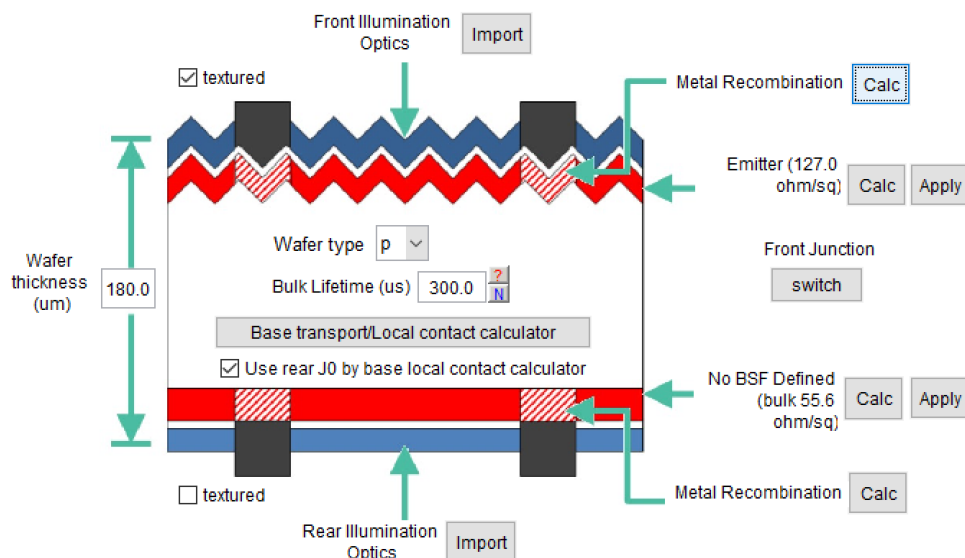
下面是这些窗口的用户指南。如果您想了解 Griddler 2.5 PRO 如何进行后台运算，请参阅附录 A：在 Cell Cross Sectional Diagram 和 Base Transport Calculator 页面中使用的数学公式。

4.2 Cell Cross Section Diagram 页面 (PRO 版本)

在 Griddler 2.5 PRO simulation 页面菜单栏单击“Cell Cross Section”，弹出 cell cross section diagram（电池横截面图表）页面。



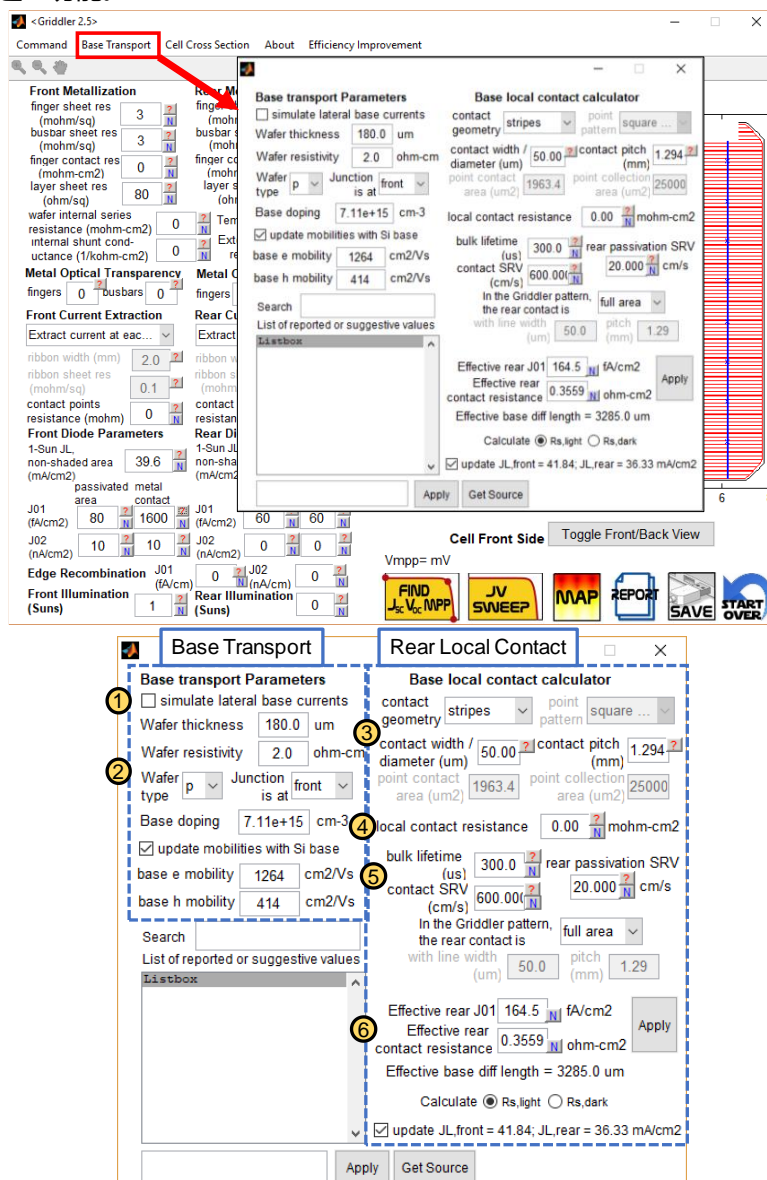
下面让我们来看一看这个页面，这些按钮分别链接到电池正面，背面的光学特性以及正面，背面的掺杂层计算。在这里，您还可以定义晶片的厚度、基区少数载流子寿命和基区掺杂类型。对于其他的参数，有一个按钮可以打开 base transport calculator（基区输运计算器）。



Base transport calculator (如上图所示, 可以点击 cell diagram 页面的“Base transport/local contact calculator” 或直接从 Griddler 2.5 PRO 菜单栏中启动) 和 cell cross section diagram 一起形成了一个简单的, 由解析方程组形成的网络。这个网络有利于我们同时考虑电池横截面的不同方面的特性 (例如掺杂层、光学、基区), 并计算一些 Griddler 中使用的二极管的参数, 如 $J_{L,front}^{1Sun}$, $J_{L,rear}^{1Sun}$, $J_{01,front}^{pass}$, $J_{01,front}^{metal}$, $J_{01,rear}^{pass}$, $J_{01,rear}^{metal}$ (见 2.65)。

4.3 Base Transport Calculator 页面 (PRO 版本)

在 Griddler 2.5 PRO 的 simulation 页面, 点击菜单栏的“Base Transport”来运行 base transport calculator (基区运输计算器)。您也可以在 cell cross section diagram 页面点击“Base transport/Local contact calculator”来实现这一功能。



上图展示了 base transport calculator 的各项功能，下面我们来逐一介绍。

① Simulate Lateral Base Currents (计算横向基区电流)

默认情况下，此选项是关闭的。参考第 1.2 节，Griddler 本质上是一个 2D 模拟器，其中电流只在顶层和底层中横向流动，而不在二极管所代表的“夹心”层中流动。当然，这个模型并不能完美地再现事实，因为电子和空穴可以在准中性体中漂移和扩散，并且以横向电流的方式中表现出来。打开“simulate lateral base currents”将增加这些基区电流项，但电压求解的收敛速度和整体的模拟速度会下降。

$$J_n = q\mu_n n \nabla \varepsilon_{fn}$$

$$J_p = q\mu_p p \nabla \varepsilon_{fp}$$

在这里， J_n 和 J_p 是基区的电流密度， q 是基本电荷， μ_n 和 μ_p 是电子和空穴迁移率， n 和 p 是电子和空穴密度， ε_{fn} 和 ε_{fp} 是电子和空穴费米能级。有两个重要的假设：1) μ_n 和 μ_p 是平衡值；2) 在整个晶片中 n 和 p 是恒定的。

对大多数情况，关闭“simulate lateral base currents”开关，同样可以做正确的 I-V 计算。下面，我们比较了选项开启/关闭情况下，一个 $V_{oc} = 669$ mV 的电池的 I-V 参数：

Comment1	Jsc(mA/cm2)	Voc(mV)	FF	Eff	Vmp(mV)	Jmp(mA/cm2)
without	37.997627	669.1464	80.76277	20.53472	572.5797	35.863513
with	37.997627	669.3543	80.77673	20.54465	573.0274	35.852824

在这两种情况下，I-V 参数几乎相同。当电池电压上升时，关闭“simulate lateral base currents”导致的精度的差距增加。例如，让我们运行同一个电池在 3.6 Suns 光照下的 I-V 参数：

Comment1	Jsc(mA/cm2)	Voc(mV)	FF	Eff	Vmp(mV)	Jmp(mA/cm2)
without	136.79145	702.4682	77.84141	20.77753	578.7787	129.236087
with	136.791451	703.4755	78.12487	20.88309	582.1547	129.139407

我们发现， V_{oc} ，FF，和电池效率都比之前稍高，如果我们加入横向电流的计算。

② Wafer Type, Thickness, Resistivity (晶片类型，厚度，电阻率)

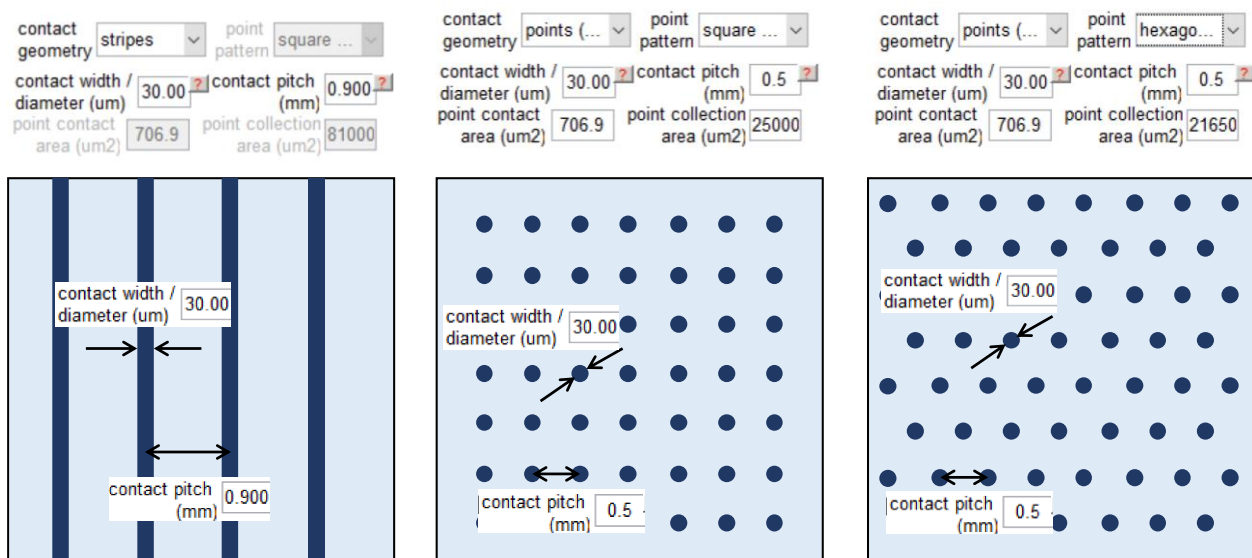
改变这些参数将改变基底掺杂水平，这将影响平衡状态下的少数载流子浓度，从而影响复合电流密度。参阅附录 A。

③ Base Contact Geometry (基底接触几何)

在这一节中，您可以定义基区金属接触的周期性重复的几何形状(这里，基区指电池背面)。Griddler 2.5 PRO 以解析方程求解如下所示的三种周期重复的背面金属接触的 J_{01} ：条形、正方形排布的圆点和六边形排布的圆

点

。



④ Base Local Contact Resistance (基区局部接触电阻)

正如正面金属-半导体接触电阻一样，基区周期接触也可以具有非零金属-半导体接触电阻。

⑤ Bulk Lifetime, Contact SRV, Passivation SRV (体载流子寿命, 电极表面复合速度, 钝化表面复合速度)

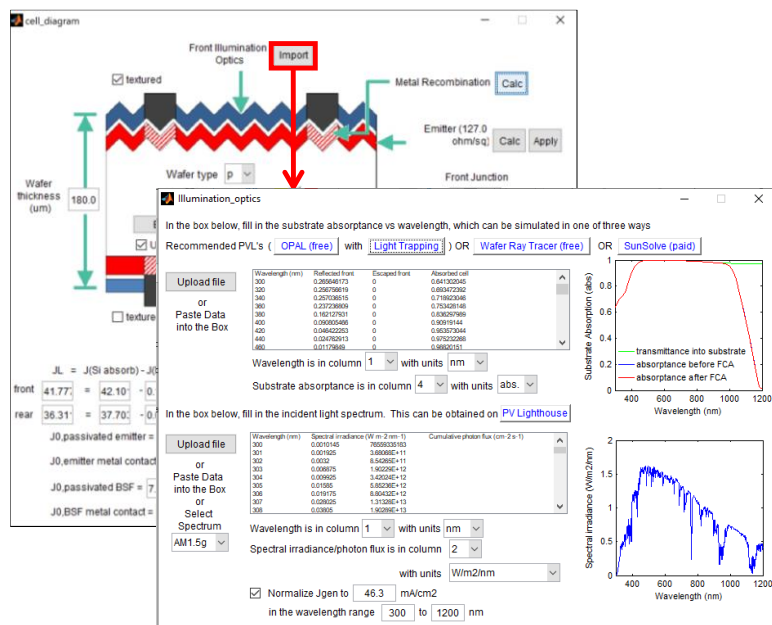
体载流子寿命是硅片基底中的载流子寿命。表面复合速度 (SRV) 是用来描述电池表面流向基区 (通常指背面) 的复合电流强度的参数。当存在周期性金属接触时，金属-半导体界面的 SRV，与栅线之间钝化层-半导体表面的 SRV 不同。

⑥ Effective Base J_{01} and Effective Contact Resistance (等效基区 J_{01} 和等效接触电阻)

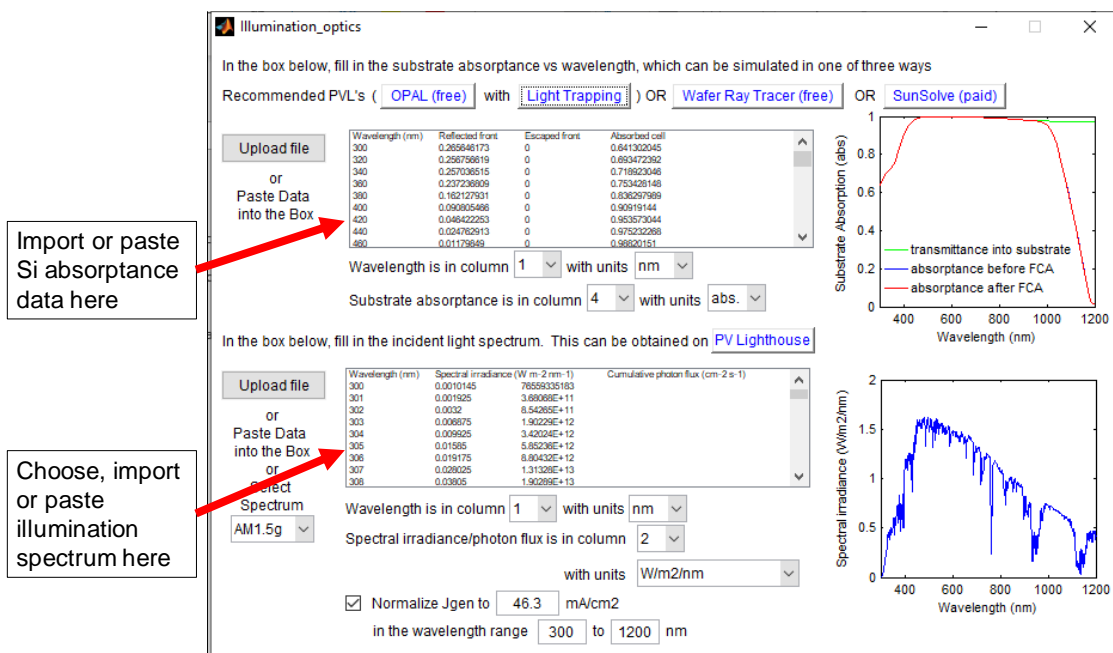
Griddler 以解析方程求解的方式 (见附录 A)，考虑基区掺杂、迁移率、晶片厚度、电池背面周期性金属接触几何结构、基区载流子寿命、电极表面 SRV、钝化表面 SRV，来计算等效基区 J_{01} 和等效接触电阻。在 Griddler simulation 页面，点击 “Apply” 将 effective base J_{01} 同时应用于 rear diode parameters 区域的 passivated area J_{01} 和 metal contact J_{01} 。另外，effective base contact resistance 将用于 rear metallization 区域的 “finger contact res”。

4.4 Illumination Optics 页面 (PRO 版本)

在 cell cross section diagram 页面, 点击 “Front Illumination Optics” 或 “Rear Illumination Optics” 来启动 illumination optics 页面。

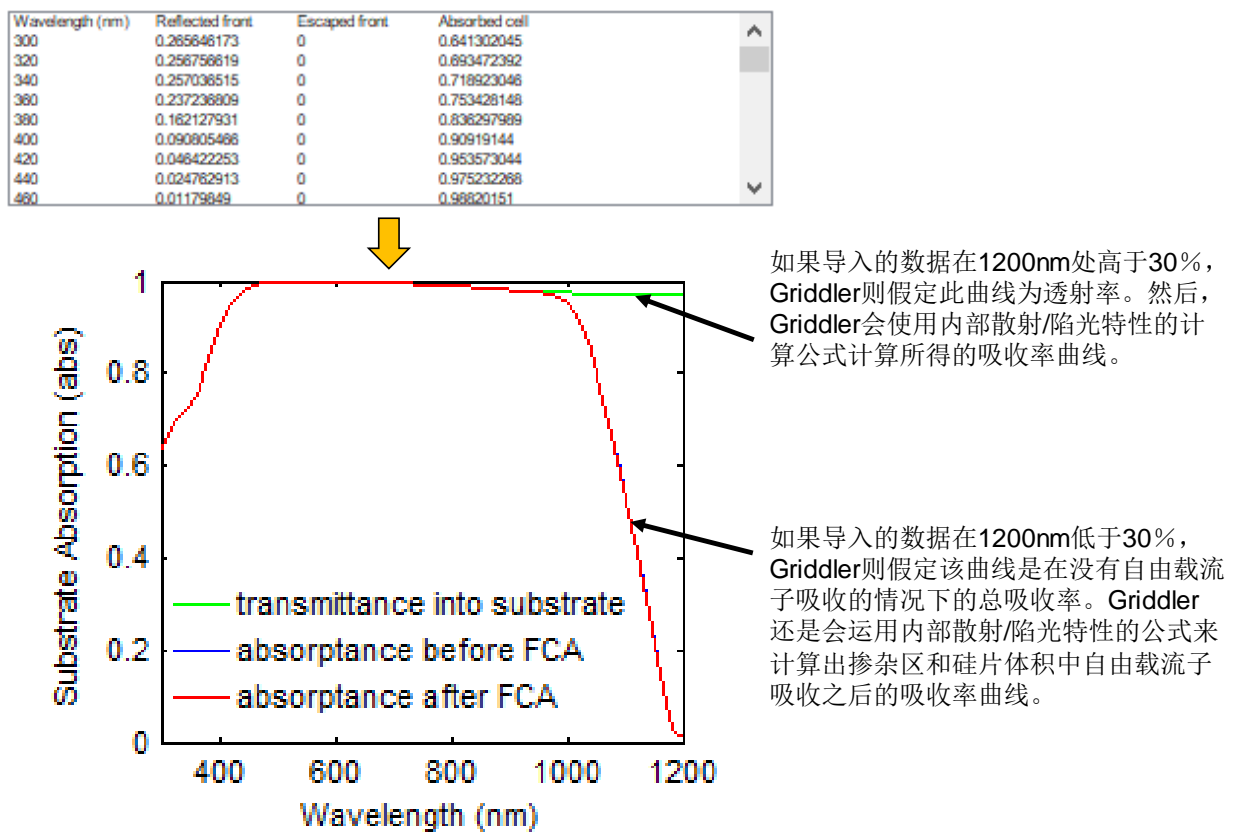


Illumination optics 页面需要两个数据: 1) 电池中波长范围为 300 ~ 1200 nm 的硅的吸收率, 2) 此波长范围内的照明光谱。默认情况下, Griddler 提供一个任意的 PERC 电池的吸光率曲线。您可以导入或粘贴另一组吸光率数据来覆盖默认的数据。默认照明光谱为 AM1.5G, 其归一化产生的电流密度为 46.3 mA/cm²。



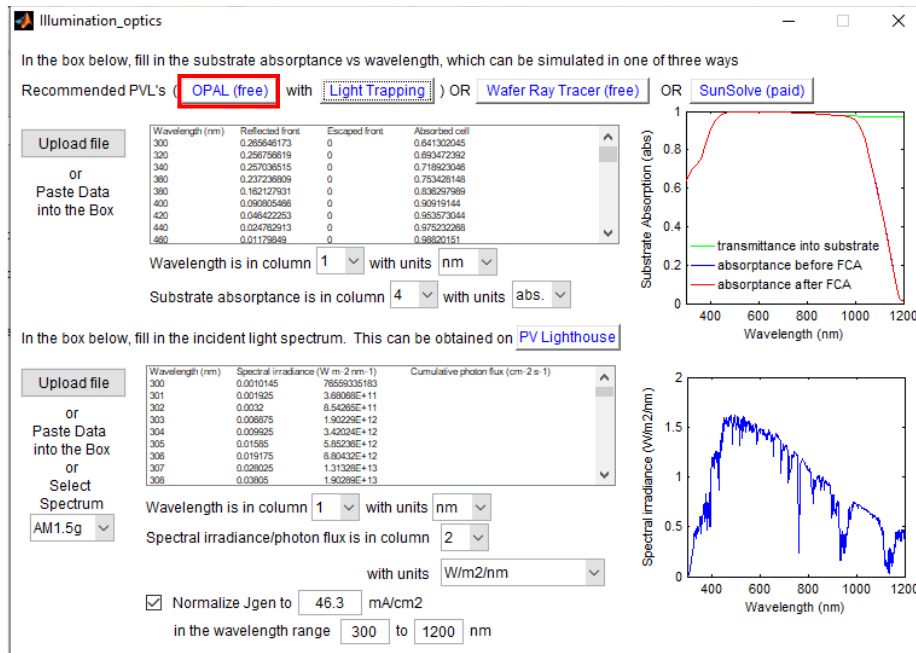
从 PRO 2.50034 版本开始, Griddler 2.5 PRO 将自动检测导入的数据行间是否包含有关硅片表面透射率的数据。如果导入的数据在 1200nm 处高于 30%, Griddler 则假定此曲线为透射率。然后, Griddler 会使用内部散射/陷光特性的计算公式 (参见附录 A2.2, 2.3) 计算所得的吸收率曲线。因为内部散射的计算取决于金属化图案 (金属化区域与非金属化区域相比具有不同的内部反射率), 以及硅片电阻和掺杂层分布 (自由载流子吸收率随这些参数而变化), 用户每一次更改金属化图案或掺杂剂分布之后 Griddler 都会自动更新内部散射计算获取更新的吸收率曲线。

反之, 如果导入的数据在 1200nm 低于 30%, Griddler 则假定该曲线是在没有自由载流子吸收的情况下的总吸收率。Griddler 还是会运用内部散射/陷光特性的公式来计算出掺杂区和硅片体积中自由载流子吸收之后的吸收率曲线。

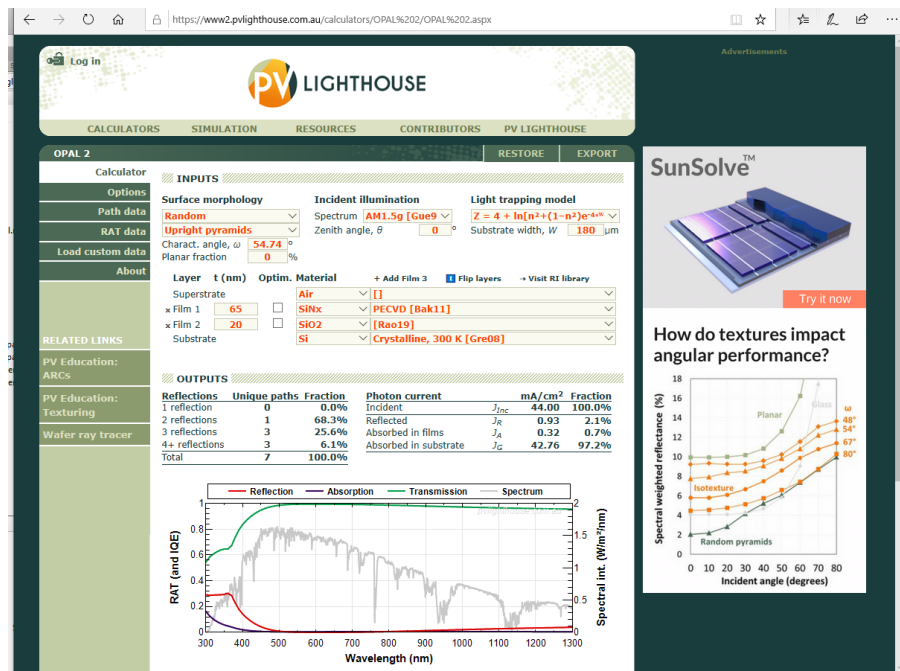


以下我们说明使用 PV Lighthouse 中的 OPAL2 (免费的在线计算器) 计算透射率, 然后使用 Griddler 计算陷光后的吸收率曲线的工作流程。

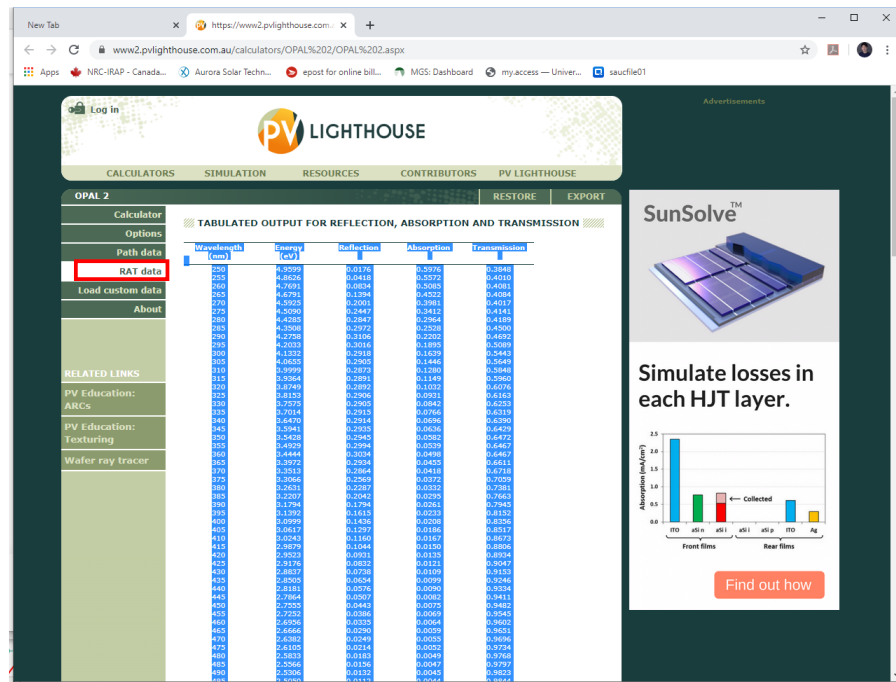
步骤 1: 在 “Illumination Optics” 窗口中, 按 OPAL (free) 按钮



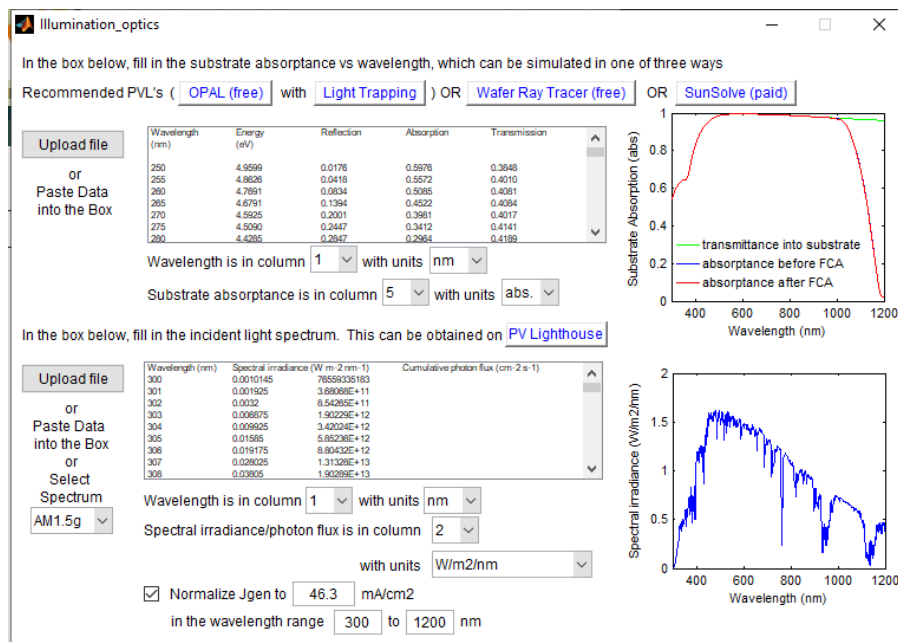
步骤 2: 你将被带到 PV Lighthouse 中的 OPAL2 计算器页面。在这里, 你可以定义表面形态和抗反射涂层的性质, 然后计算硅片表面的光学。



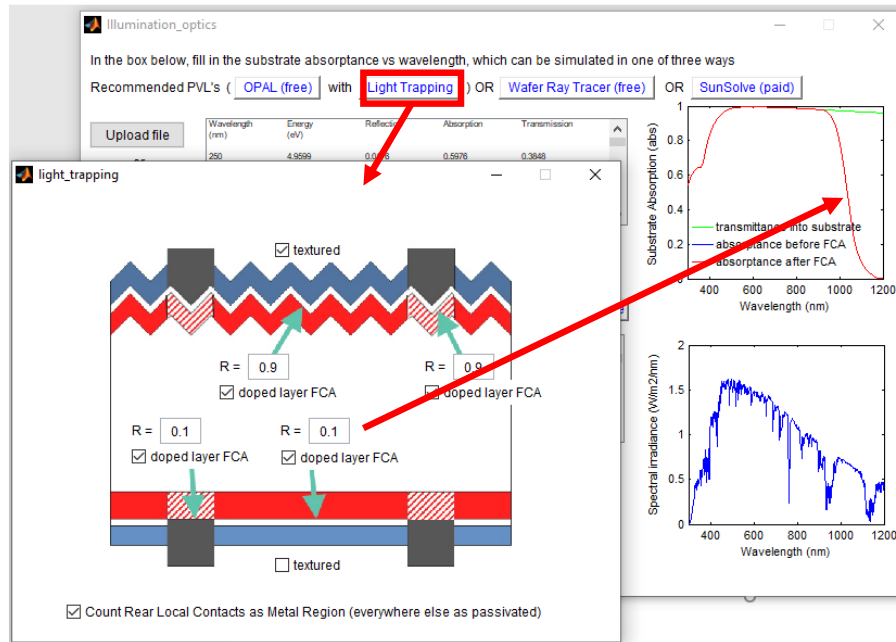
步骤 3: 运行抗反射涂层计算后, 点击 “RAT data” 选项。如图所示, 复制所有行列。



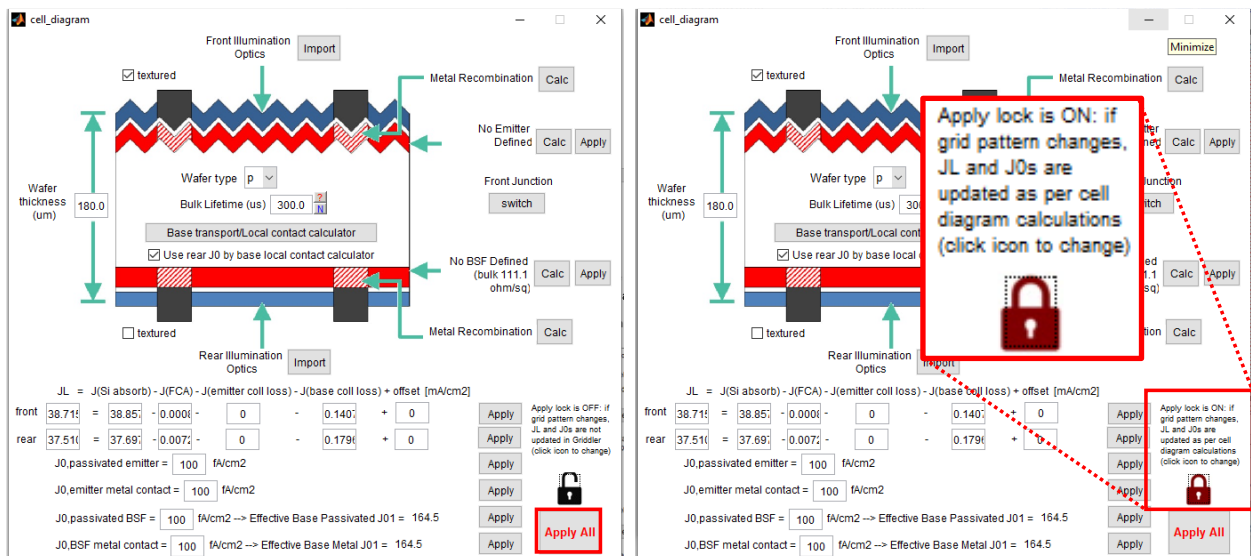
步骤 4: 将复制的列粘贴到 “Illumination Optics” 页面的顶部框中。你可以看到 Griddler 自动检测到称为 “Transmission” 的列, 将其绘制为绿色曲线, 然后运行内部散射计算得出红色吸收率曲线。



步骤 5: 单击 “Light Trapping”, 将显示一个图表, 可让您调整各种陷光结构参数, 包括各个部分的内部反射率, 以及不同位置的自由载流子吸收。在下面的示例, 其中我们把后侧内部反射率设置为非常低的数值 (0.1), 导致长波长区域的吸收率急剧下降。



步骤 6: 您需要在 Cell Diagram 窗口中单击 Apply All, 以使在非阴影区域的光感应电流 J_L 生效。如 “Apply Lock” 处于打开状态, 这将导致 Griddler 每次更改金属化图案时, 自动重新运行内部散射计算 (以及 J_0 计算), 并自动应用更新的非阴影区域 J_L 。您可以通过单击锁定图标来强制 Apply Lock。



4.5 掺杂层的相关计算 (PRO 版本)

在 cell cross section diagram 页面, 点击 Emitter, BSF 或者 Metal Recombination 旁边的 “Calc” 来定义掺杂层的掺杂分布, 或者用 cmd-PC1D-6.2 来计算掺杂区饱和复合电流密度 J_{0e} 以及内量子效率 IQE。

The image shows the Griddler software interface. At the top is the 'cell_diagram' window, which displays a cross-section of a solar cell. It includes parameters like 'Wafer thickness (um)' set to 180.0, 'Wafer type' set to 'p', and 'Bulk Lifetime (us)' set to 300.0. There are buttons for 'Front Illumination Optics', 'Rear Illumination Optics', 'Metal Recombination', and 'Emitter'. Red arrows point from the 'Calc' buttons in the diagram to the two PC1D Caller windows below.

The first window is 'PC1D Caller for metal J0e calculations'. It has tabs for 'Import Dopant Profile' and 'Define Dopant Profile'. Under 'Import Dopant Profile', there is a table for dopant concentrations and a graph of 'Dopant concentration (cm-3)' vs 'Depth (um)'. The 'Depth is column' is set to 1, and 'Donor density is column' is set to 2. The 'Accepter density is column' is set to 2. The 'or set constant background conc' is checked, with a value of 1.50478e-3 cm-3. The 'Use ionization factor at 25C' is set to 'phosphorus'. The 'PC1D for J0e' button is highlighted.

The second window is 'PC1D Caller for Passivated Emitter Calculations'. It also has tabs for 'Import Dopant Profile' and 'Define Dopant Profile'. Under 'Import Dopant Profile', there is a table for dopant concentrations and a graph of 'Dopant concentration (cm-3)' vs 'Depth (um)'. The 'Depth is column' is set to 1, and 'Donor density is column' is set to 2. The 'Accepter density is column' is set to 2. The 'or set constant background conc' is checked, with a value of 1.50478e-3 cm-3. The 'Use ionization factor at 25C' is set to 'phosphorus'. The 'PC1D for J0e and IQE' button is highlighted. There is also a graph of 'IQE (%)' vs 'Wavelength (nm)'. The 'Surface is textured' checkbox is checked, and the 'SRV' is set to 465.40 cm/s. The 'Bulk Tau' is set to 0.1 us. The 'Define SRV = f(x) [cm/s] where x [cm-3] is surface concentration' checkbox is checked, and the formula for SRV is shown: $SRV = \min(10^{-(x/1e20)^{1.5}} * 1.5)^{4.2} / 1.78, 1e7)$. The 'Use Abbott SRV parameterization (phosphorus only)' checkbox is also checked.

① Import or Define Dopant Profile (导入或定义掺杂分布)

您可以导入多种格式的掺杂分布文件, 包括制表符分隔符、逗号分隔符或者以空间分隔符分隔的数据。还可以定义深度、掺杂浓度的数据列, 并且您可以定义相应的单位。背景掺杂浓度默认设置为基底掺杂。点击 “set constant background conc” 可以将基底掺杂设为一个恒定值。选择完这些之后, Griddler 2.5 PRO 将显示结的深度和薄层电阻。

您还可以通过单击“Define Dopant Profile”按钮来定义掺杂分布的解析表达式。

The dialog box for defining a dopant profile includes the following fields and options:

- Type:** A dropdown menu currently set to 'n'.
- Peak Doping:** A text input field containing '1e+20' followed by a unit dropdown set to 'cm-3'.
- Depth Factor:** A text input field containing '0.2' followed by a unit dropdown set to 'um'.
- Peak Position:** A text input field containing '0' followed by a unit dropdown set to 'um'.
- Background Doping:** A text input field containing '1.00e+11' followed by a unit dropdown set to 'cm-3'.
- Profile:** A group box containing four radio buttons: 'Uniform', 'Exponential', 'Gaussian', and 'Erfc'. The 'Erfc' option is selected.

掺杂的不同表达式为：

恒值分布: $N(z) = N_p$ for $z \leq z_p$, $N(z) = 0$ for $z > z_p$

指数分布: $N(z) = N_p \cdot \exp(-|z - z_p| / z_f)$

高斯分布: $N(z) = N_p \cdot \exp(-(z - z_p)^2 / z_f^2)$

Erfc 方程式分布: $N(z) = N_p \cdot [1 - \text{erf}((z - z_p) / z_f)]$

其中 N 是载流子浓度, z 是深度, N_p 是掺杂峰值, z_f 是深度因子, z_p 是峰值位置。

② User ionization factor at 25°C (用户自定义 25°C 下的离子化因子)

在 2006 年, Altermatt, Schenk, Schmithusen, 和 Heiser 发表了两篇广为应用的(附录 C 中的引用文献 8-9), 关于以硼, 磷和砷掺杂浓度为函数的不完全离子化的文章。如果导入的是磷的掺杂分布, 您可以选择“none”或者“phosphorus”; 如果导入的是硼的掺杂分布, 您可以选择“none”, “boron”或“arsenic”。

③ Textured, SRV and Doped Layer Bulk Lifetime (纹理, SRV 和掺杂层的基载流子寿命)

在 PC1D 中选择“Surface is textured”设置纹理表面, 您必须在运行 cmd-PC1D-6.2 之前, 同时设定掺杂区的体载流子寿命 (“bulk tau”) 以及发射极表面复合速度。

④ Parameterization for SRV (SRV 参数计算)

有很多作者发表了不同的以表面浓度为函数的钝化区发射极 SRV 的经验值。您可以在公式框中, 用 $SRV = f(x)$ 的形式定义您的表达式, 其中 x 是以 cm^{-3} 为单位的表面浓度。例如, 写入 $SRV = 1e-14 \cdot x$, 则当表面浓度为 10^{20} cm^{-3} 时, SRV 为 1000000 cm/s 。

您也可以点击 “Use Abbott SRV parameterization (phosphorus only)” 设置

$$SRV = \min(10^{((x/1e20)*1.5)*4.2/1.78}, 1e7)$$

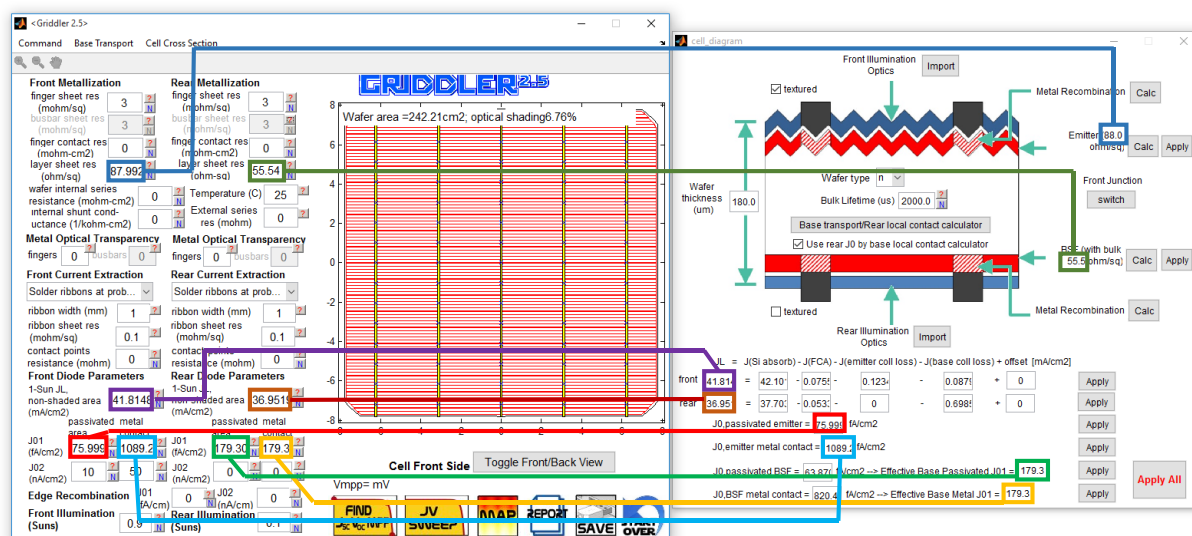
这是从 Abbott 及其同事的研究中观察到的一个粗略的经验值估计方式 (M. Abbott, G. Scardera, K. R. McIntosh, A. Meisel, "Simulation of emitter doping profiles formed by industrial POCl_3 processes", 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2013), 2013 年)。但實際上其他研究所也曾發表過其他的經驗值, 例如 (e.g. A. Kimmerle, M. Momtazur Rahman, S. Werner, S. Mack, A. Wolf, A. Richter, and H. Haug, J. Appl. Phys. 119, 2016)。

⑤ cmd-PC1D-6.2 Calculations for J_{0e} and IQE (用 cmd-PC1D-6.2 计算 J_{0e} 和 IQE)

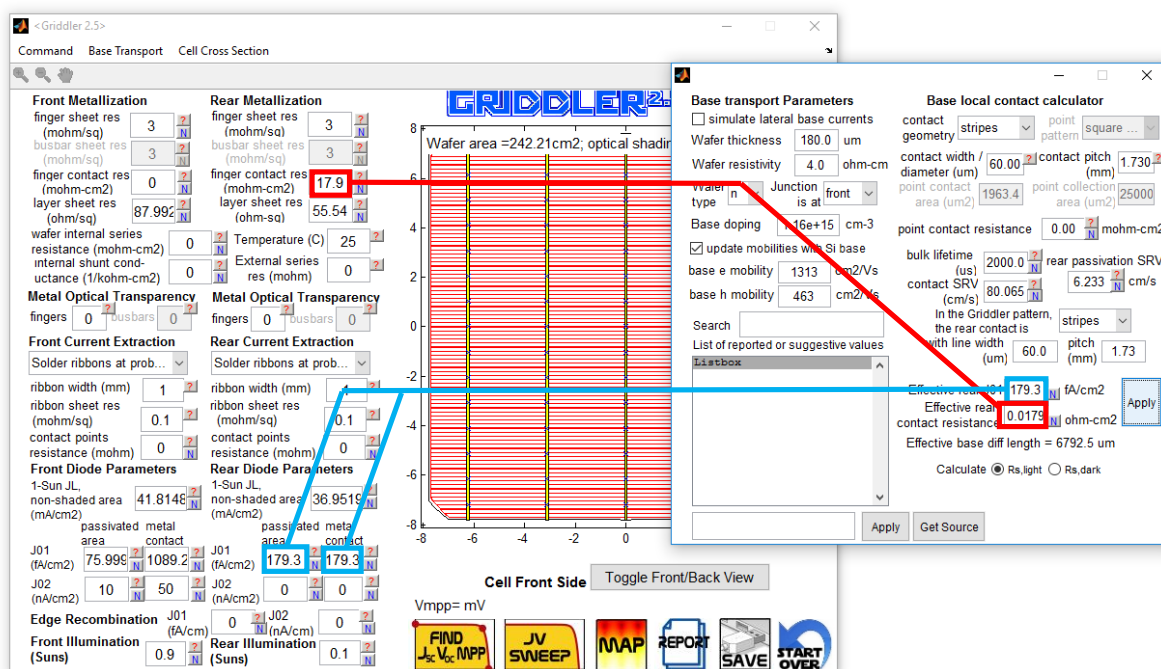
点击“PC1D for J_{0e} and IQE”按钮，Griddler 2.5 PRO 将会把发射极掺杂分布以及其他参数导入 cmd-PC1D-6.2 来计算发射极饱和电流浓度(J_{0e})和内量子效率(IQE)。请参见附录 C 比较 cmd-PC1D-6.2 caller 和 EDNA2 (EDNA2 是一个免费的线上计算 J_{0e} 和 IQE 的软件)

4.6 将计算的值应用到 Griddler Simulation (PRO 版本)

下图展示了 cell cross sectional diagram 页面中计算的值对应的 Griddler simulation 页面中的参数。



下图展示了 base transport calculator 页面中计算的值对应的 Griddler simulation 页面中的参数。

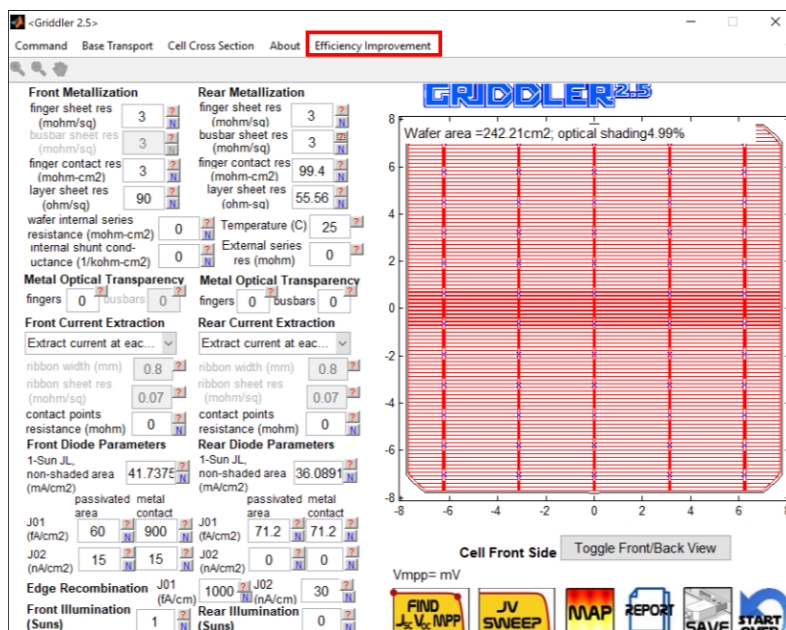


5 效率提升以及 Command 窗口 (PRO 版本)

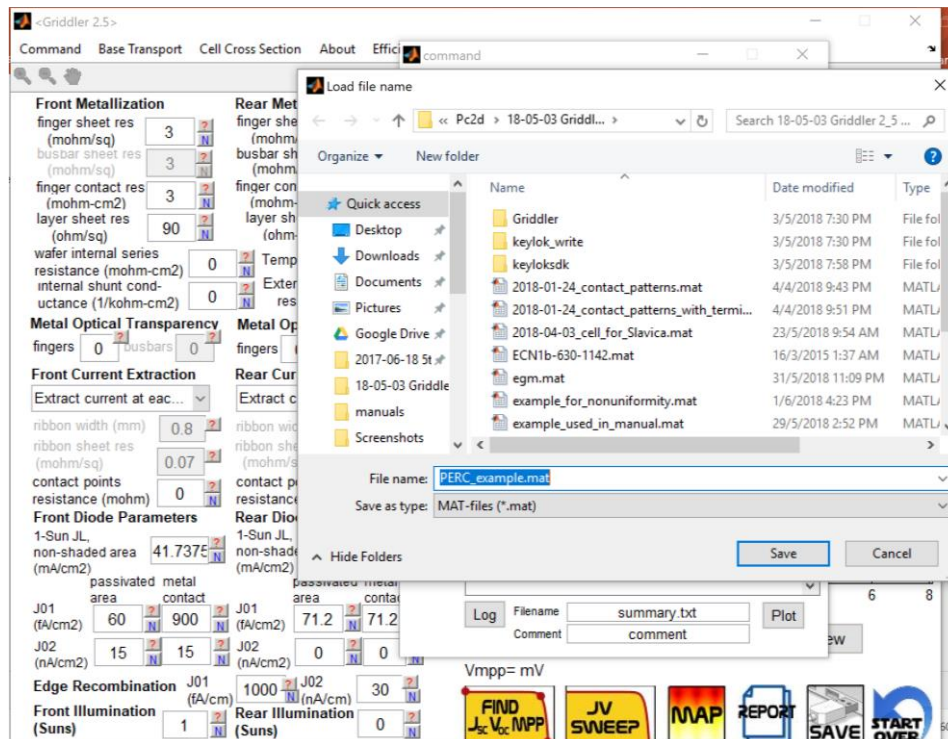
用 Griddler 2.5 PRO 的命令可以非常容易地实现一些常见的电池优化方案。例如优化细栅的数量, 同时运行多个模拟以在一定范围内寻找一个参数的最优值, 或是生成一个效率提升路线图 (效率改进图)。更加复杂的优化, 也可以通过组合使用一系列 Griddler 2.5 PRO 的命令来实现。例如同时寻找两个参数的最优值, 或是筛选发射极的最优掺杂分布。下面我们将介绍如何使用 Efficiency Improvement 按钮和一些常用命令的用法。在附录 D 收录了 Griddler 所有命令的汇总。

5.1 效率改进图 (PRO 版本)

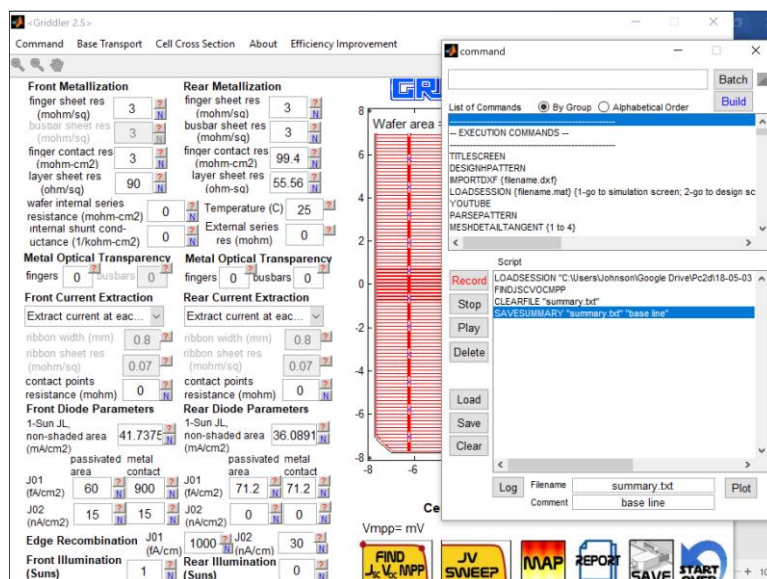
效率改进图可以帮助您记录改变电池不同参数带来的效率提升, 并快速生成一个效率提升路线图。要访问它, 请在 simulation 页面的菜单栏中单击 “Efficiency Improvement”。



单击“Efficiency Improvement”调用命令窗口 (见 5.2)。它将指导您一步一步创建一个效率改进图。首先，会弹出一个对话框，要求您保存当前会话，以便将其检索为“baseline” (“基线”)。这里使用现有文件名即可。

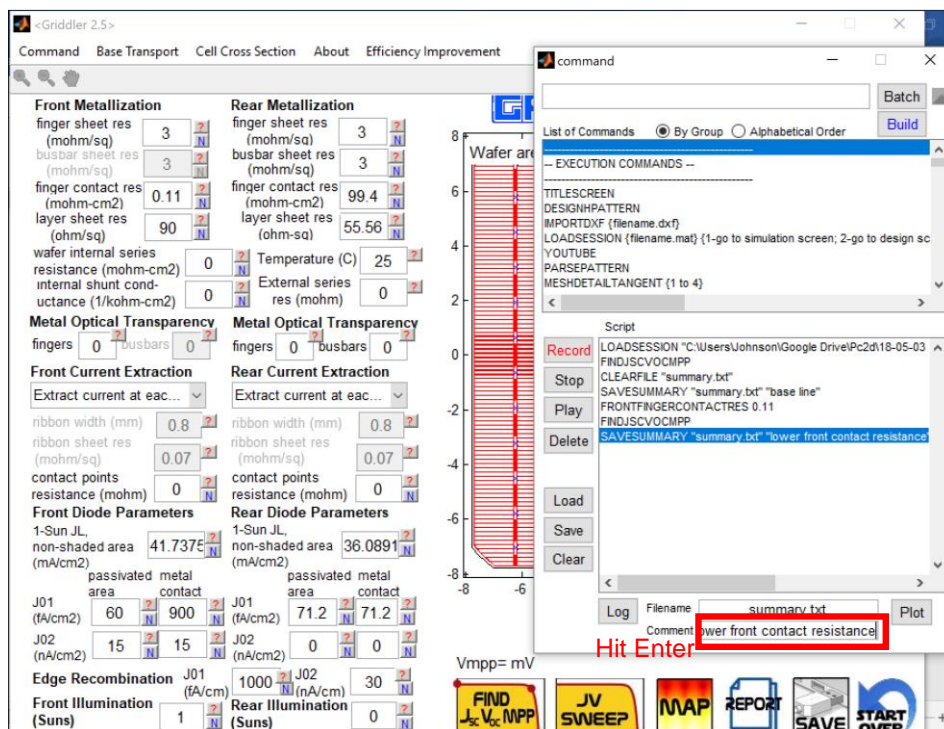


在您保存当前会话之后，command 窗口开始为效率提升图建立一个脚本。下面的四条命令将会，1) 载入 baseline, 2) 运行 baseline 的 I-V 曲线, 3) 打开一个空白的文件，命名为 “summary.txt” 并将 baseline 的 I-V 参数写入第一行。

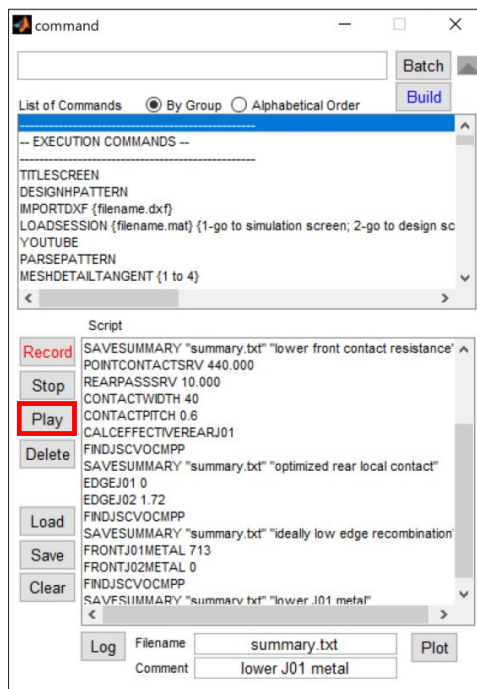


现在，去 Griddler 改动一个您想要改变的参数，以提高电池效率。您可以改动任意参数。您甚至可以点击 “STARTOVER” 回到首页，然后去 “Design H Pattern” 页面，对栅线设计做一些修改。您还可以打开 Cell Cross Section Diagram 或 Base Transport Window 窗口，并在其中做一些更改。所有这些更改都是可接受的，并且将由 command 窗口记录。

举个例子来说，下面我用电池参数数据库来找可能的 PERC 电池正面细栅金属接触电阻的改进并应用它。

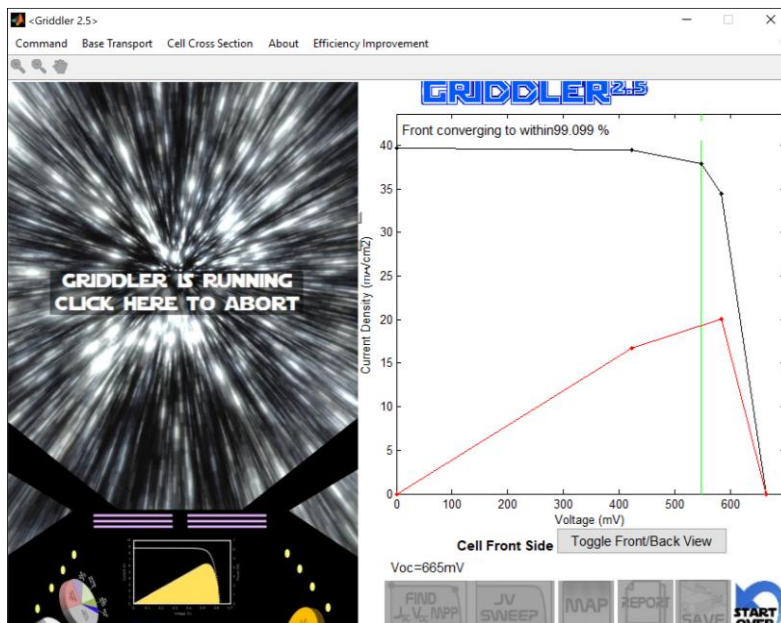


继续对其他电池参数进行更改，给每个更改案例一个新的描述，将其输入到命令窗口的“Comment”框中，然后点击回车。重复这个过程直到您完成所有您想做的更改。点击“Play”来运行这个电池效率改进的过程。

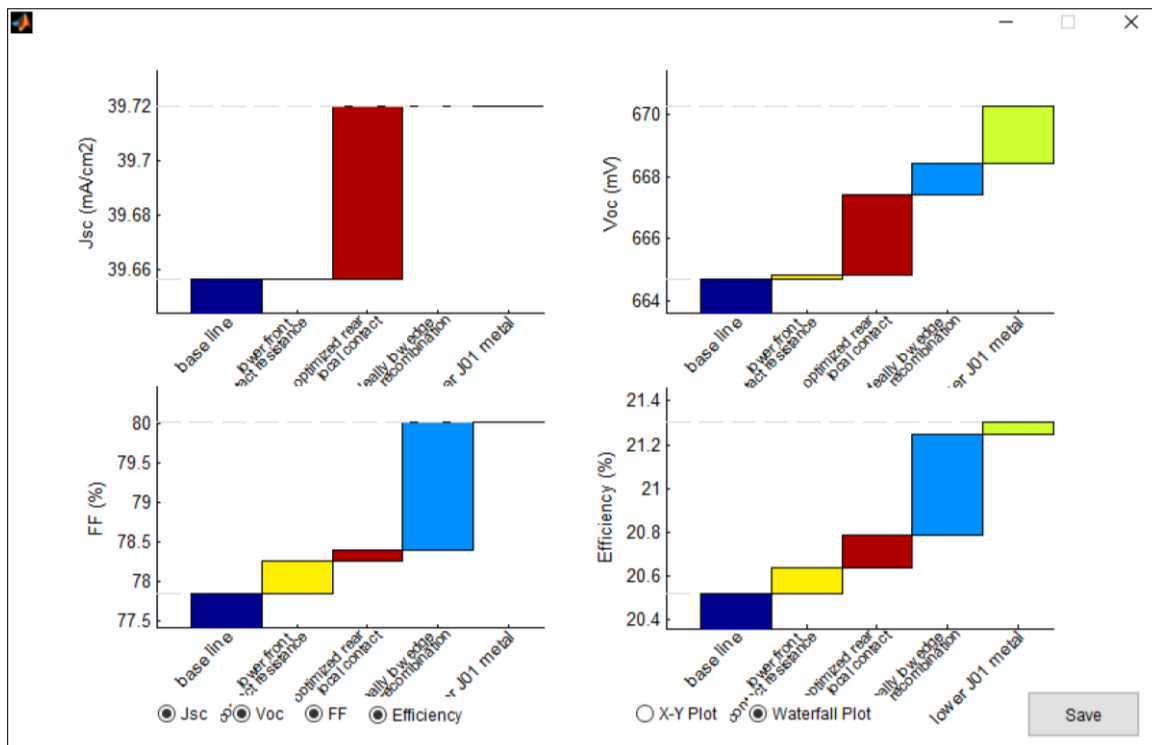


Griddler 2.5 PRO 将重新载入 baseline，计算 I-V 曲线，进行每一个改变，计算每一个改变之后的 I-V 曲

线。在每一步，它都会把 I-V 参数记录到 “summary.txt” 文件中。



Griddler 运行完成之后, 将显示一个效率改进图表页。您可以使用底部的选则按钮来选择展示四幅图(J_{sc} , V_{oc} , FF, 效率) 中的哪一幅。您也可以单击“Save”保存页面



同样，您也可以打开 “summary.txt” 读取 Griddler 记录的 baseline 以及每次改变的实际数据

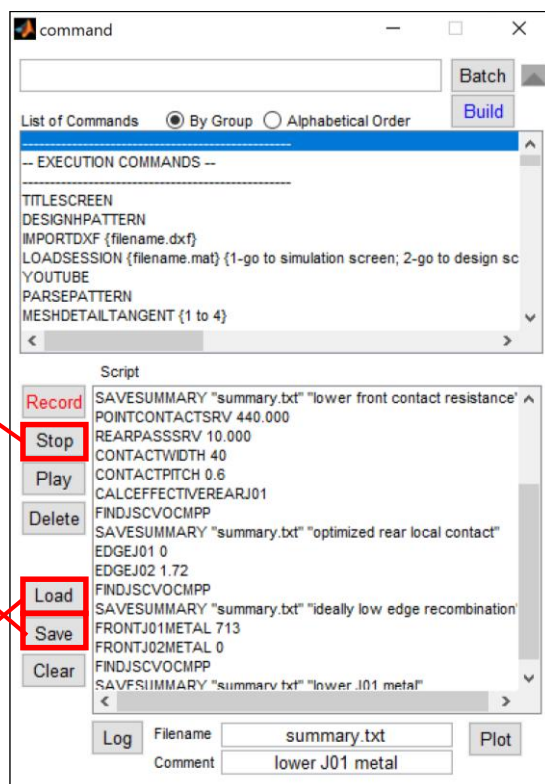
	A	B	C	D	E	F	G
1	Comment1	Jsc(mA/cm; Voc(mV)	FF	Eff	Vmp(mV)	Jmp(mA/cm2)	
2	base_line	39.65634	664.6897	77.84019	20.51802	558.5404	36.73507
3	lower_front_contact_resistance	39.65634	664.8337	78.26543	20.63458	561.4105	36.7549
4	optimized_rear_local_contact	39.7201	667.4182	78.40223	20.78437	566.399	36.69563
5	ideally_low_edge_recombination	39.72011	668.4387	80.01384	21.24404	569.9683	37.27233
6	lower_J01_metal	39.72011	670.2685	80.02183	21.30432	571.4376	37.28198

点击 Stop 按钮，则恢复正常界面，command 窗口将停止记录您的操作。您可以保存此脚本以重新运行效率提升图或分享给其他同事。如果您保存了这个脚本，可以点击“Load” 把它重新加载到 command 窗口中，或者点击这个窗口顶部的“Batch” 加载脚本。

To resume normal work, stop the command window from logging your work by hitting the Stop button

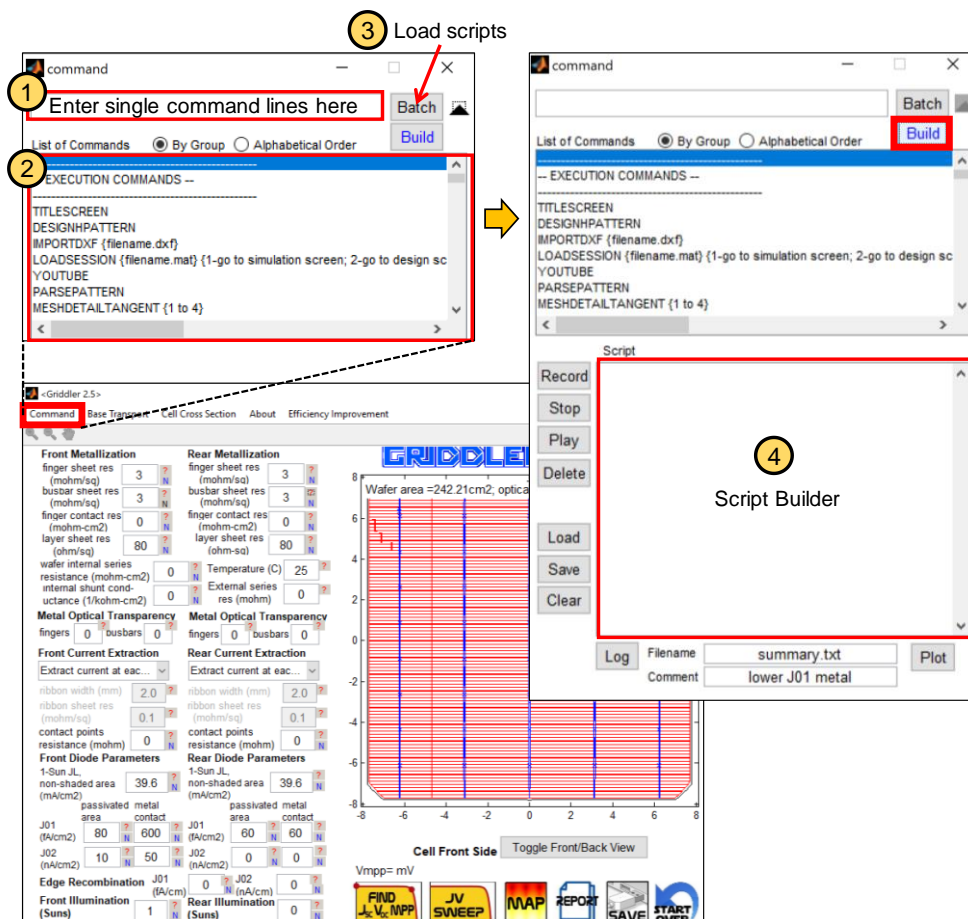
You can save this script to rerun the efficiency improvement or share it with colleagues

If you saved this script, you can rerun it later by loading it into the command window. Or hitting “Batch” near the top of this window and loadin the script.



5.2 Command 窗口 (PRO 版本)

5.2.1 怎样使用 command 窗口

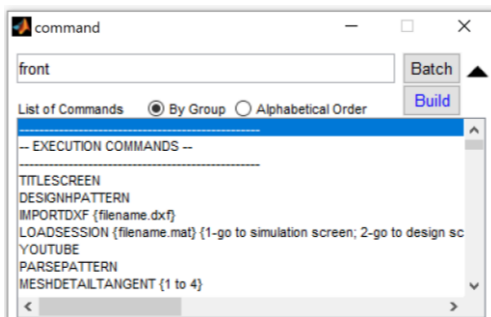


点击 simulation 页面菜单栏中的“Command”来调用 command 窗口。上图展示了 command 窗口的一些功能，我们将在下面逐一介绍。

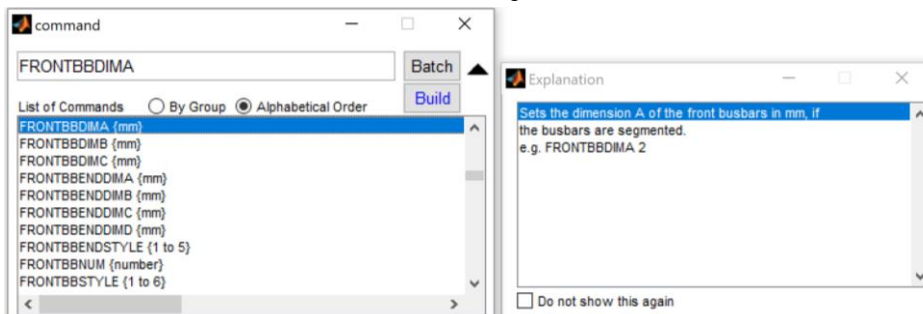
① Single Commands (单条命令)

在这里，您可以一次编写一条命令，Griddler2.5 PRO 将在您输入时逐条执行它们。命令不区分大小写。如果键入命令的前几个字母，比如说“front”并点击“tab”，命令窗口将返回汇总（附录 D）中所有以“front”开始的命令。如果您点击上下箭头，可以查看先前执行过的命令。

Type “front” and hit tab....

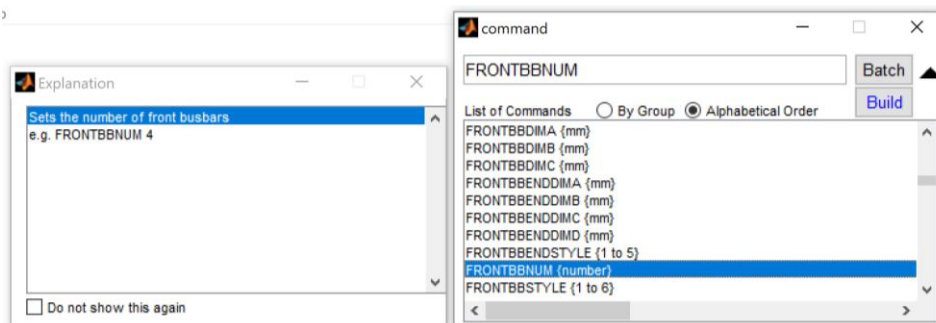


Command windows returns all commands that begin with “front”



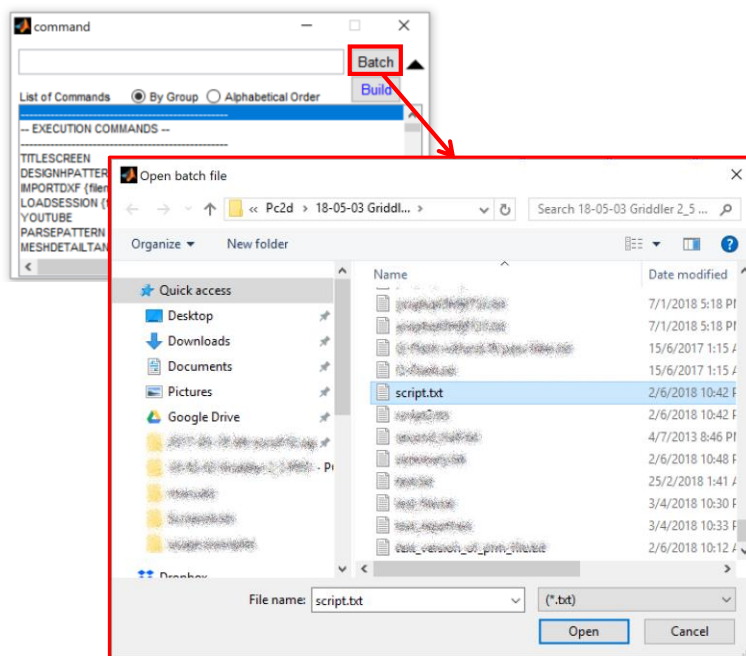
② Glossory of commands (命令汇总表)

您可以按组或按字母表顺序查看命令汇总表。点击任何命令，将弹出一个解释窗口来解释如何使用该命令。

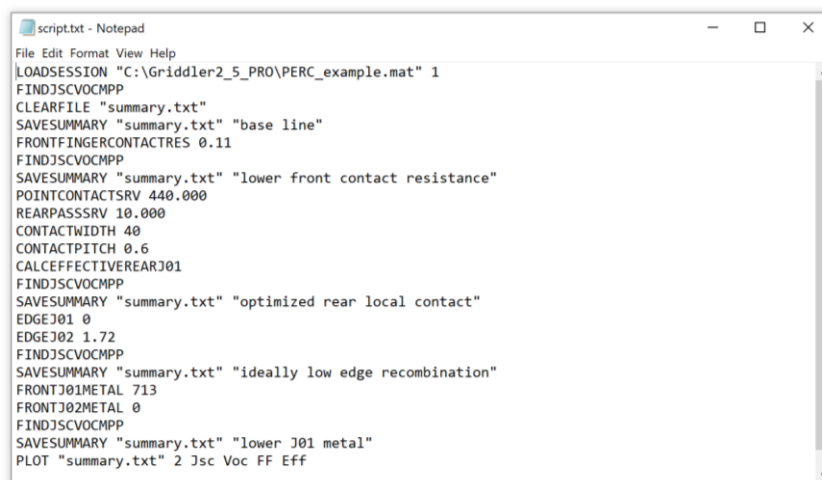


③ Load Scripts (加载脚本)

一个脚本文件是一个逐行记录命令的文本文件。要加载并运行它，在命令窗口点击 “Batch”，弹出会话窗口供您选择要加载的文件。



在这个例子里，我们加载了之前 5.1 小节中用来创建效率提升图的脚本。如下图所示，它记录了一系列的命令。



④ Script Builder（脚本生成器）

在命令窗口点击“Build”弹出脚本生成器。点击“Record”按钮，命令窗口将以命令的形式记录您使用 Griddler 做的事，并记录在脚本文件中。同时，在 record 模式下，您键入的任何命令都不会被立即执行，而是作为新条目添加在脚本文件中。下面的图介绍了其他按钮的功能。

If record mode is on, then any command you type here will not be executed, but rather logged as a new line in the script below

Turn on "Record" and the command window will record down every action you do in Griddler as a command in the script

Press "Stop" to stop the record mode

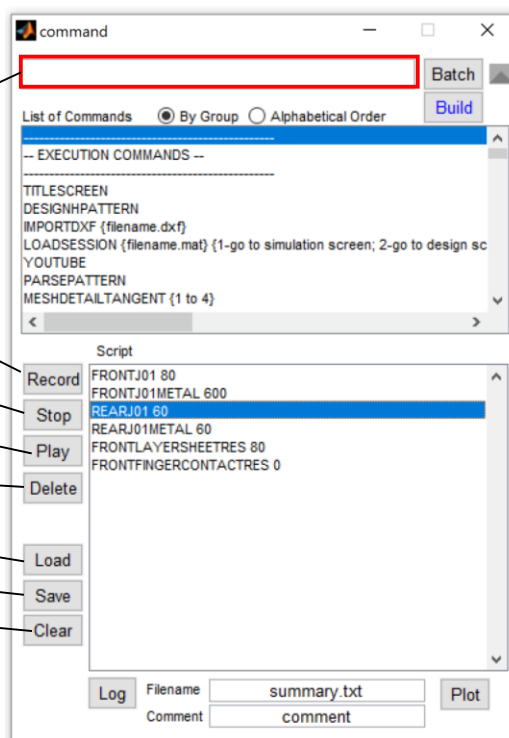
Press play to execute the script

Select any line of the script and hit delete to delete that line

Load previously saved scripts

Save this script as a text file

Clear the entire script window



5.2.2 常用命令

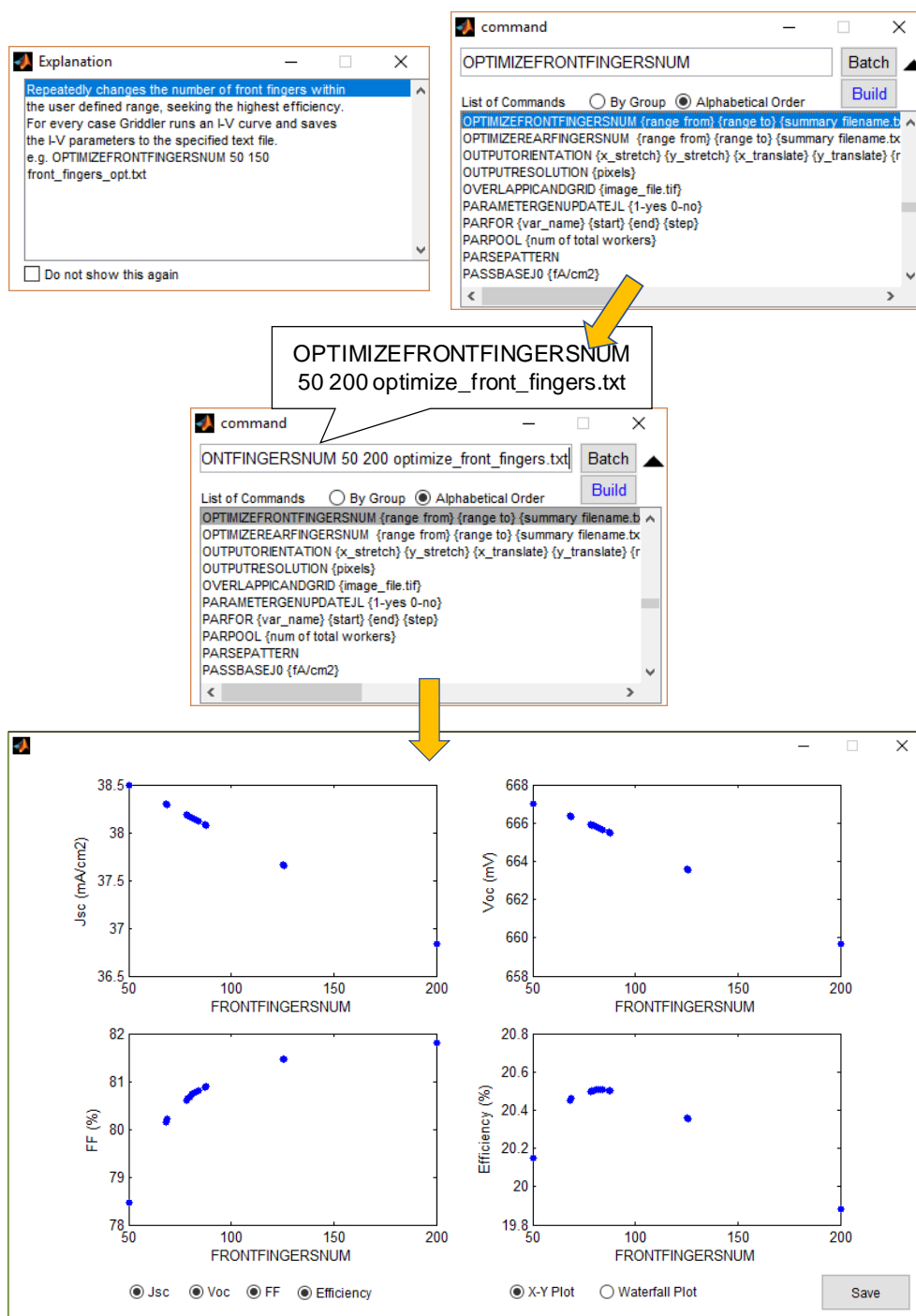
有些命令不是 Griddler 中一个按钮就可以做到的。下面我们来介绍一些常用命令。

1. OPTIMIZEFRONTFINGERSNUM and OPTIMIZEREARFINGERSNUM

这个命令可以用来找出可以最大的提高电池效率的电池正面或背面的细栅数量。这条命令的格式是：

OPTIMIZEFRONTFINGERSNUM {range from} {range to} {summary filename.txt}

举个例子，比如命令 OPTIMIZEFRONTFINGERSNUM 50 200 optimize_front_fingers.txt。Griddler 将会在 50-200 的数值范围内，不断改变电池正面的细栅数量，寻找在哪种情况下电池效率最高。每一种情况，Griddler 都会计算 I-V 曲线，保存 I-V 参数到 optimize_front_fingers.txt 文件。最后，Griddler 将会显示以细栅数量为变量的 J_{SG} , V_{OC} , FF, 效率的曲线图。



2. FINDJSCVOCMPP

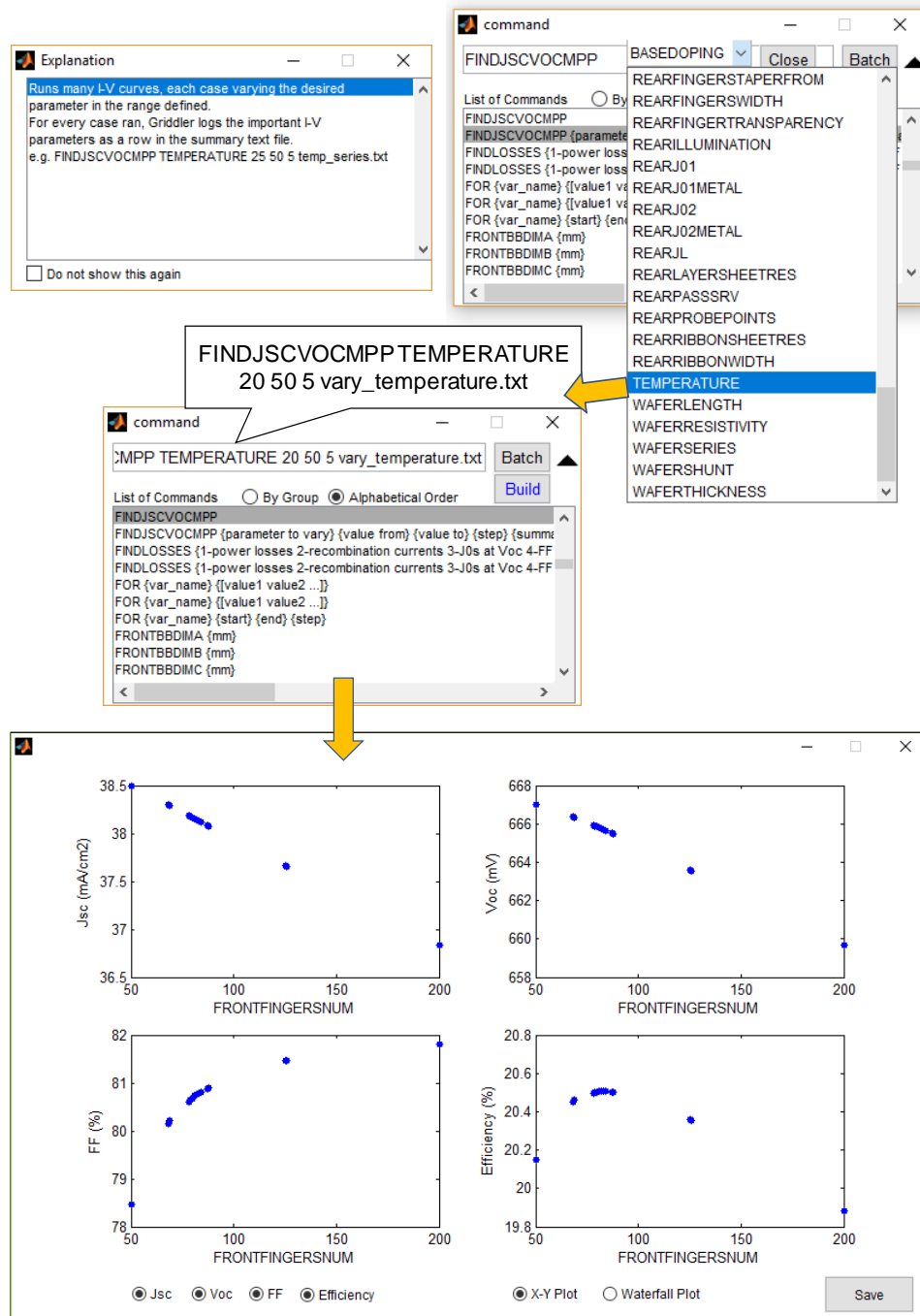
这条命令可以用来计算 I-V 曲线。如果您只是键入 FINDJSCVOCMPP, 则 Griddler 只根据当前情况计算 I-V。如果您使用下列格式

FINDJSCVOCMPP {parameter to vary} {value from} {value to} {step} {summary filename.txt}

则 Griddler 根据定义的范围和参数进行多次 I-V 运算。例如说,
 FINDJSCVOCMPP TEMPERATURE 25 50 5 vary_temperature.txt

Griddler 将在 25-50°C 范围内, 以 5°C 的速度改变温度。每一种情况, Griddler 都将相应的 I-V 参数记录在 vary_temperature.txt 文件中。

最后, Griddler 将展示以温度为横轴的 J_{sc} , V_{oc} , FF, 效率的曲线图。



3. SAVESUMMARY

SAVESUMMARY {filename.txt} {comment}

以单行的形式在您命名的 {filename.txt} 文本文档中保存重要的 I-V 参数(J_{sc} , V_{oc} , FF, 效率, V_{mp} , J_{mp})。您可以在每行最左侧, 添加备注。比如说, 在 5.1 节中, 在效率改进图的脚本中用的命令就是

SAVESUMMARY "summary.txt" "base line"

为了展示记录的 baseline 以及每次改变之后的 I-V 参数, 下图中我们再次展示一下 summary.txt 文件。

	A	B	C	D	E	F	G
1	Comment1	Jsc(mA/cm²)	Voc(mV)	FF	Eff	Vmp(mV)	Jmp(mA/cm²)
2	base_line	39.65634	664.6897	77.84019	20.51802	558.5404	36.73507
3	lower_front_contact_resistance	39.65634	664.8337	78.26543	20.63458	561.4105	36.7549
4	optimized_rear_local_contact	39.7201	667.4182	78.40223	20.78437	566.399	36.69563
5	ideally_low_edge_recombination	39.72011	668.4387	80.01384	21.24404	569.9683	37.27233
6	lower_J01_metal	39.72011	670.2685	80.02183	21.30432	571.4376	37.28198

5.2.3 FOR LOOPS 及相关命令

您可以用 For loop 或是套用 For loop (在一个 For loop 里写另一个 For loop) 来灵活地改变电池参数和进行多个 I-V 曲线的计算。下面我们介绍一个综合了一些非常实用的命令的 For loop。For loop 里行的缩进并不是必须的。不管是否有缩进, Griddler 都会运行这些行。

```

DEFINE J02_VALUE 10 40 10
FOR J0e_VALUE 30 60 10
    FRONTJ01 J0e_VALUE
    FRONTJ02 [J02_VALUE(J0e_VALUE)]
    REARJ01 EVAL<[J0e_VALUE]*1.5>
    REARJ01METAL EVAL<[J0e_VALUE]*1.5>
    FINDJSCVOCMP
    SAVESUMMARY Summary.txt FRONTJ01 J0e_VALUE
    SAVESESSION test_cell_with_j01=[J0e_VALUE]_j02=[J02_VALUE(J0e_VALUE)].mat
NEXT J0e_VALUE

```

在 For loop 的每次迭代中, 有四个电池参数被改变: FRONTJ01 (正面钝化区 J_{01}), FRONTJ02 (正面钝化

区 J_{02}), REARJ01 (背面钝化区 J_{01}), REARJ01METAL (背面金属区 J_{01}). 下面让我们来看看每一个参数是怎样被改变的。

首先, 对 FRONTJ02 的值存储在第一行, DEFINE J02_VALUE 10 40 10。DEFINE 命令创建一组称为 J02_VALUE 的值 [10, 20, 30, 40] (这是按照定义生成的, 开始= 10, 结束= 40, 步长= 10)。然后在 For loop 中, FRONTJ02 [J02_VALUE(J0e_VALUE)] 的意思是计算方括号中的值。方括号中 J02_VALUE(J0e_VALUE) 的意思是 J02_VALUE(for loop 中 J0e_VALUE 的迭代序号)。那么, 第一次迭代中, 方括号中即是 J02_VALUE(1) = 10。然后这个值赋给 FRONTJ02。所以整个四次迭代中, FRONTJ02 的值依次是 10, 20, 30, 40。

下一步, FRONTJ01 的值直接是 for loop 中的变量 J0e_VALUE 的值, 30, 40, 50, 60 (因为格式中定义的 开始=30, 结束=60, 步长=10)。然后四次迭代中, FRONTJ01 的值分别是 30, 40, 50, 60。

最后, REARJ01 和 REARJ01METAL 的值分别用 REARJ01 EVAL<[J0e_VALUE]*1.5> 和 REARJ01METAL EVAL<[J0e_VALUE]*1.5>定义。关键字 EVAL<mathematical statement>只是用来调用 Griddler 依据 MATLAB 语法来计算尖括号里的值。所以这里四次 for loop 迭代中 EVAL<[J0e_VALUE]*1.5> 的值即是 [J0e_VALUE]*1.5 = 45, 60, 75, 90。

在 for loop 中, 给定电池参数的值之后, 下一句 FINDJSCVOCMPP, 会运行并计算 I-V 曲线; SAVESUMMARY Summary.txt FRONTJ01 J0e_VALUE 会在每次迭代之后在 Summary.txt 文件中记录 I-V 参数 (每次迭代中, J0e_VALUE 也会作为备注被记录下来)。

最后, SAVESESSION test_cell_with_j01=[J0e_VALUE]_j02=[J02_VALUE(J0e_VALUE)].mat 这一句的意思是, 四次迭代分别命名为 test_cell_with_j01=30_j02=10.mat, test_cell_with_j01=40_j02=20.mat, test_cell_with_j01=50_j02=30.mat, test_cell_with_j01=60_j02=40.mat 并保存。

如果您不想以固定间隔定义 J0e_VALUE and J02_VALUE, 另一种语法是

```
DEFINE J02_VALUE [5 8 15 40]
FOR J0e_VALUE [30 35 42 60]
    FRONTJ01 J0e_VALUE
    FRONTJ02 [J02_VALUE(J0e_VALUE)]
    REARJ01 EVAL<[J0e_VALUE]*1.5>
    REARJ01METAL EVAL<[J0e_VALUE]*1.5>
    FINDJSCVOCMPP
    SAVESUMMARY Summary.txt FRONTJ01 J0e_VALUE
    SAVESESSION test_cell_with_j01=[J0e_VALUE]_j02=[J02_VALUE(J0e_VALUE)].mat
NEXT J0e_VALUE
```

这里, DEFINE J02_VALUE [5 8 15 40] 将值 5, 8, 15, 40 依次赋值给 J02_VALUE。FOR J0e_VALUE [30 35 42 60] 将值 30, 35, 42, 60 依次赋值给 J0e_VALUE。

下面我们给出另一个for loop的例子

```
FOR DOPANTPROFILENAME [D90_profile E_110_profile F_150_profile]
  FOR METALETCHDEPTH_ [10 20 30 50]
    LOADSESSION "E:\17-09-15 Griddler 2_5 PRO - PC1D\mono_example.mat" 1
    IMPORTDOPANTPROFILE 1 "E:\17-09-15 Griddler 2_5 PRO
    PC1D\[DOPANTPROFILENAME].dop"
    DOPEDLAYERSRV 1
    EVAL<min(10^([EMITTERPASSSURFACECONCENTRATION]/10000000000000000
    00)*1.5)*4.2/1.78,10000000)>
    DOPEDLAYERLIFETIME 1 100
    RUNPC1D 1
    IMPORTDOPANTPROFILE 2 "E:\17-09-15 Griddler 2_5 PRO
    -PC1D\[DOPANTPROFILENAME].dop"
    DOPEDLAYERLIFETIME 2 100
    METALETCHDEPTH 2 [METALETCHDEPTH_]
    RUNPC1D 2
    APPLYFRONTLAYERSHEETRES
    APPLYFRONTJL
    APPLYPASSEMITTERJ0
    APPLYMETALEMITTERJ0
    FRONTFINGERCONTACTRES
    EVAL<2E20*1/[EMITTERPASSSURFACECONCENTRATION]>
    OPTIMIZEFRONTFINGERSNUM 50 150 front_fingers_opt.txt
    FINDJSCVOCMPP
    SAVESUMMARY "2017-09-16_phos_emitter_profile_screening_summary.txt"
    [DOPANTPROFILENAME] [METALETCHDEPTH_]
    EMITTERPASSSURFACECONCENTRATION FRONTFINGERSNUM
    EMITTERPASSSRV JUNCTIONDEPTH FRONTLAYERSHEETRES FRONTJL
    FRONTJLOSSEMITTER FRONTJLOSSFCA FRONTJ01 FRONTJ01METAL
  NEXT METALETCHDEPTH_
NEXT DOPANTPROFILENAME
```

上面的代码中表明，您不仅可以在for loop中定义数字，也可以定义字符串。这里，FOR DOPANTPROFILENAME [D90_profile E_110_profile F_150_profile] 将值(或者说字符串)“D90_profile”，“E_110_profile”，“F_150_profile”依次赋值给DOPANTPROFILENAME。For loop中IMPORTDOPANTPROFILE 1 "E:\17-09-15 Griddler 2_5 PRO PC1D\[DOPANTPROFILENAME].dop"在第1, 2, 3次迭代中将[DOPANTPROFILENAME]依次替换为D90_profile, E_110_profile, F_150_profile。这样每次迭代中，Griddler将会依次打开并导入这三个掺杂分布曲线。

您可能注意到上面的代码中，有两个套用的for loop。大的for loop是用于不同的DOPANTPROFILENAME，小的for loop是用于不同的METALETCHDEPTH_。小的for loop是用在这行命令中METALETCHDEPTH 2 [METALETCHDEPTH_]的。在小的for loop迭代中，这一行的作用是将值10, 20, 30, 50 (nm) 依次赋值给非正面金属接触区金属蚀刻掺杂区的深度。

放在一起，上面的代码将会循环代入三个不同的掺杂分布曲线，对每一个掺杂分布曲线代入四个不同的金属蚀刻深度，对每一种情况计算金属区和钝化区的J0e。在计算钝化区的J0e时，代码将会应用EVAL命令，以发射极表面载流子浓度为函数计算并赋合适的值给正面SRV。同样，这段代码还应用EVAL命令，以发射极

表面载流子浓度为函数计算并赋合适的值给正面金属-半导体接触电阻。每一次迭代中，OPTIMIZEFRONTFINGERSNUM 50 150 front_fingers_opt.txt将会针对每种情况优化正面细栅的数量。每次优化细栅数量之后，计算得到的I-V参数都保存在下列文件中

2017-09-16_phos_emitter_profile_screening_summary.txt。

5.2.4 并行 FOR LOOPS

您也可以应用并行计算模式来运行for loop。下面让我们来看看如何用并行模式来运行之前介绍的for loop:

```
PARPOOL 3
DEFINE J02_VALUE 10 40 10
PARFOR J0e_VALUE 30 60 10
    FRONTJ01 J0e_VALUE
    FRONTJ02 [J02_VALUE(J0e_VALUE)]
    REARJ01 EVAL<[J0e_VALUE]*1.5>
    REARJ01METAL EVAL<[J0e_VALUE]*1.5>
    FINDJSCVOCMPP
    SAVESUMMARY Summary.txt FRONTJ01 J0e_VALUE
    SAVESESSION test_cell_with_j01=[J0e_VALUE]_j02=[J02_VALUE(J0e_VALUE)].mat
NEXT J0e_VALUE
```

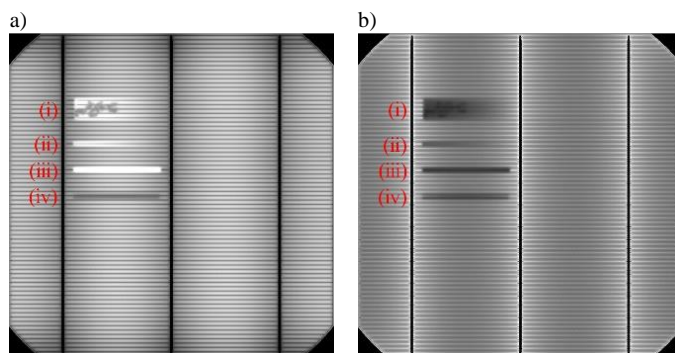
第一行PARPOOL 3使Griddler建立三条并行通道。PARFOR J0e_VALUE 30 60 10和之前的工作方式一样，但不是以迭代的方式，而是以并行的方式。需要注意的是，您不能套用PARFOR loops。内部小的循环必须以 FOR 的形式运行。

6 Griddler 2.5 PRO 的其他应用

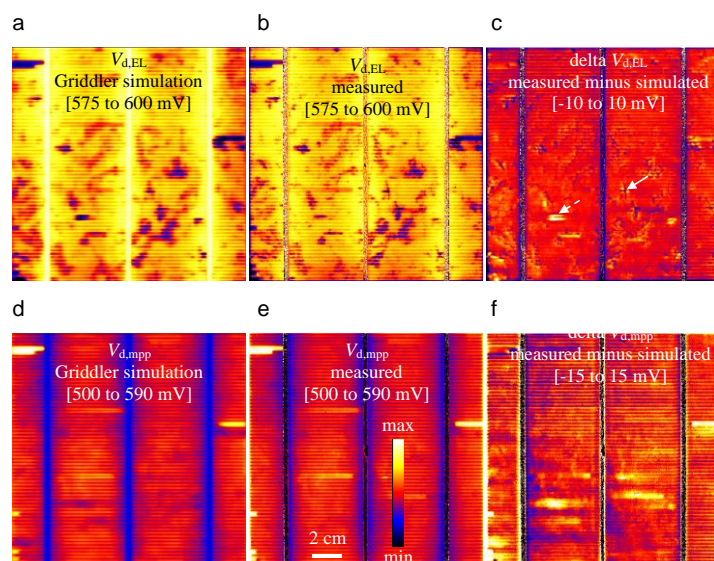
6.1 计算 luminescence 图形数据

光致发光 (PL)，电致发光 (EL)，或者笼统的说，发光成像技术在表征不同的工作状态下的太阳能电池时是非常有用的工具。从 2016-2017 年，Griddler 2.5 PRO 开始被应用于发光成像的模拟。下面我们来回顾一下。

下面是同时存在电池载流子寿命缺陷和细栅中断缺陷的模拟：a) 在峰值光照 2.25Suns 下，垂直移动样品得到的逐条扫描 PL 图像。b) 施加 650 mV 偏压时的 EL 图像。这是节选 Zafirovska 的，关于应用 PL 线性扫描来检测细栅的中断，并和载流子寿命不同的情况相区分的工作。(I. Zafirovska, M. K. Juhl, J. W. Weber, J. Wong, T. Trupke, "Detection of Finger Interruptions in Silicon Solar Cells Using Line Scan Photoluminescence Imaging", IEEE Journal of Photovoltaics, vol 7, pp. 1496 – 1502, 2017).

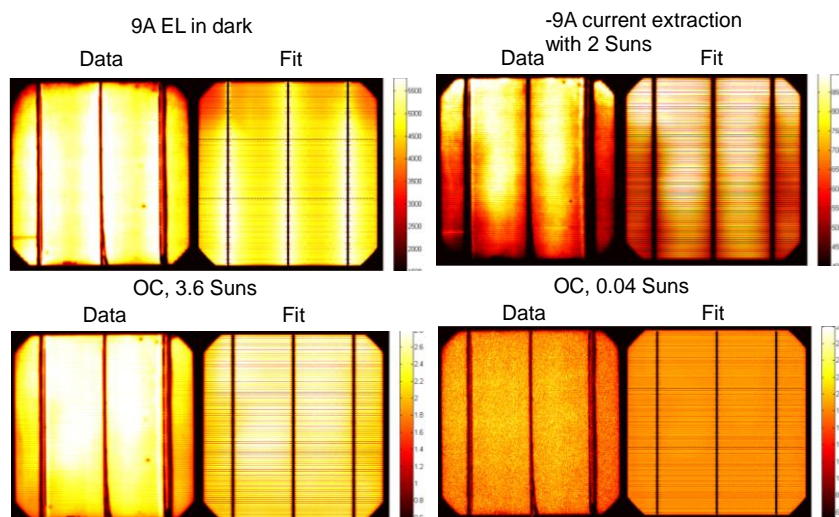


下面是应用 Griddler 模拟 EL 和 MPP 条件下的 V_d 分布图像的例子。(a) 模拟的 EL 情况下的 V_d , (d) 模拟的 MPP 条件下的 V_d , (b) 测量的 EL 情况下的 V_d , (e) 用 PL 测量的 MPP 条件下的 V_d 。



这部分是节选 Frühauf 的, 关于利用锁相热成像、电致发光和光致发光成像获得局部双二极管模型参数, 接触电阻, 栅线电阻和发射极薄层电阻的空间分布的工作。(F. Frühauf, J. Wong, J. Bauer, O. Breitenstein, “Finite element simulation of inhomogeneous solar cells based on lock-in thermography and luminescence imaging”, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol 162, pp. 103-113, 2017).

下面是一个比较测量的与其相应的模拟的单晶太阳能电池在不同光照条件下的光致发光图像的例子。这部分是节选 Wong 的 SolarEYE 的一部分工作。这部分工作是关于自动提取局部双二极管模型参数, 接触电阻, 边缘复合和金属导致的复合的空间分布的。(J. Wong, P. Teena, D. Inns, “Griddler AI: New Paradigm in Luminescence Image Analysis Using Automated Finite Element Methods”, IEEE PVSC 2017).



下面我们介绍一个模拟光致发光图像的例子。首先，我们从之前 3.1 小节介绍过的正面有非均匀的钝化区 J_{01} ，非均匀的接触电阻的电池模型开始。

以下是一些可以帮助研究人员拿到更准确的光致发光图像的命令

INPUTRESOLUTION 1000 - INPUTRESOLUTION 用于设定导入的参数空间分布的图像的分辨率。因为大多数 PL 图像是百万像素的分辨率, 并且派生的 J_0 图像也在这个分辨率附近, 所以我们通常建议使用 1000 (将分辨率像素设置为 1000×1000)。

OUTPUTRESOLUTION 1000 - OUTPUTRESOLUTION 用于设定导出的 Griddler 模拟的光致发光图像的分辨率。我们也建议使用 1000。

LUMINESCENCECAL {C, 或者是包含 C 矩阵的文件的文件名} {B, 或者是包含 B 矩阵的文件的文件名}

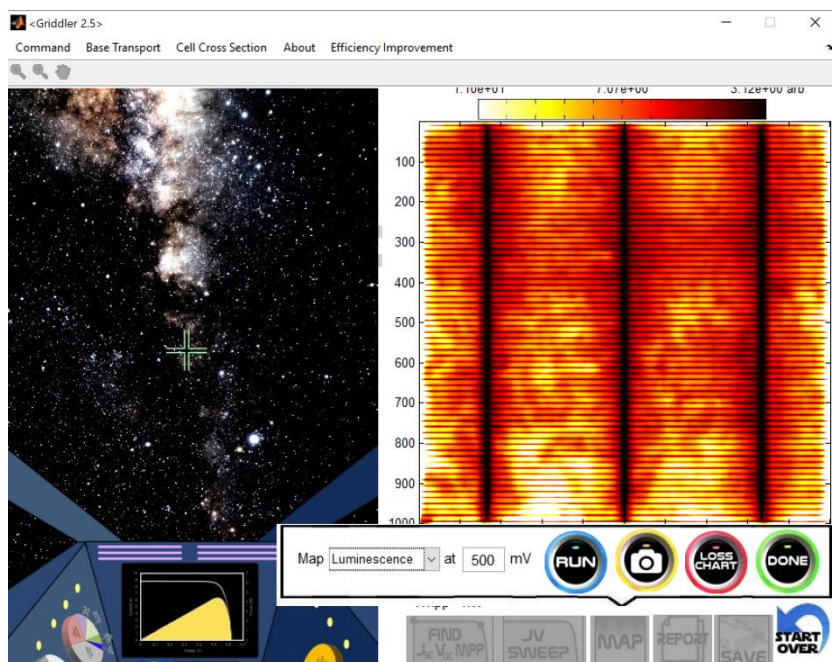
这第三条命令是用来设置模拟电池中的二极管电压与光照强度之间的转换因子的。Griddler 应用下面的公式

$$\Phi_{luminescence} = C \left(\exp\left(\frac{qV_{diode}}{kT}\right) - 1 \right) + BI_L$$

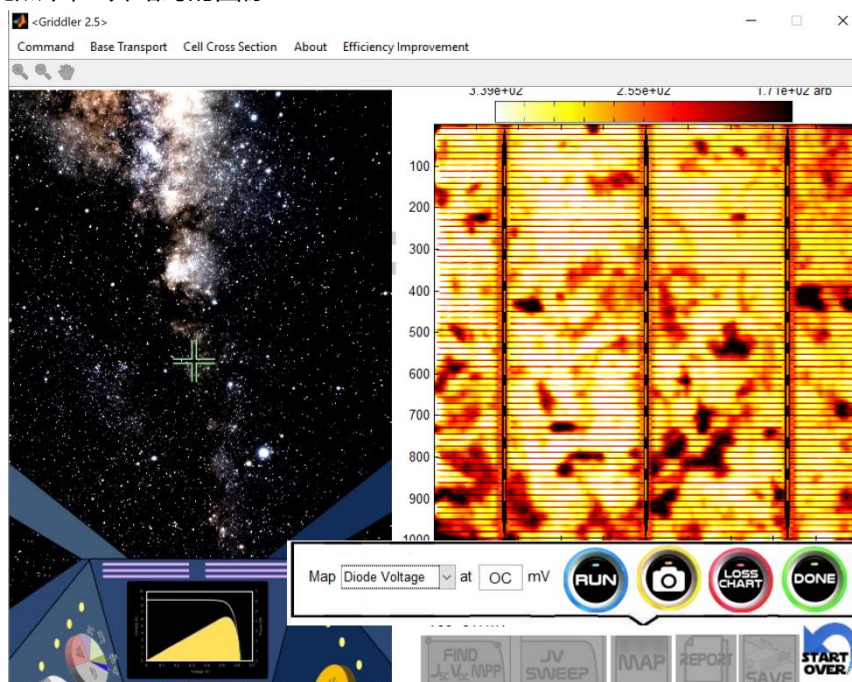
其中 $\Phi_{luminescence}$ 是光照强度, C 和 B 是因子, V_{diode} 是二极管电压, I_L 是以 Suns 为光照强度。用 LUMINESCENCECAL 命令, 您可以设定 C 和 B 为常数, 或者为包含 C 和 B 空间分布的文件的文件名。这里我们采用

LUMINESCENCECAL 1e-8 0

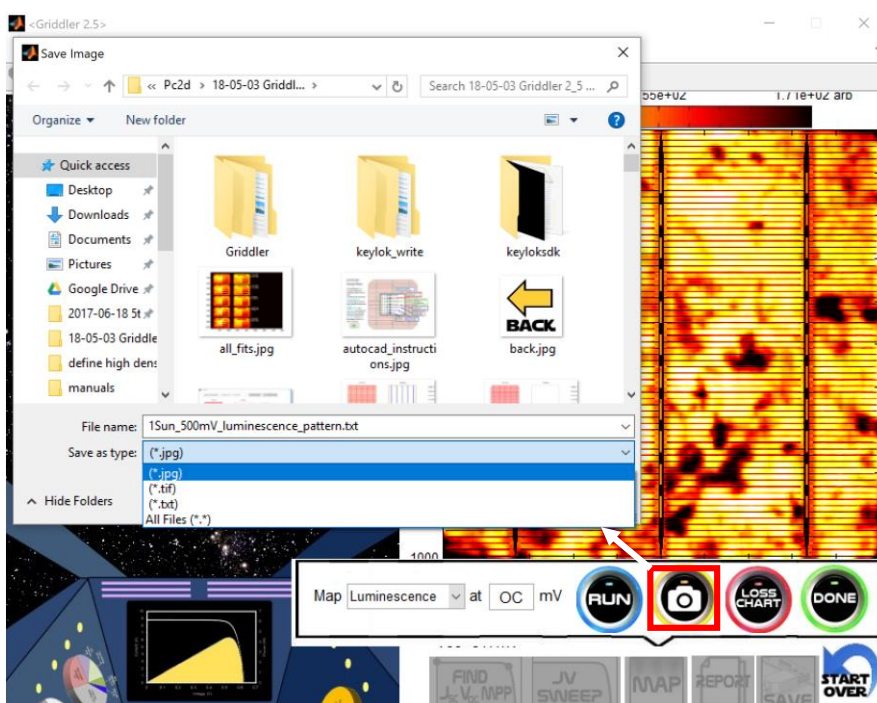
下面是 1 Sun 光照下, 500mV 路端电压下的图像:



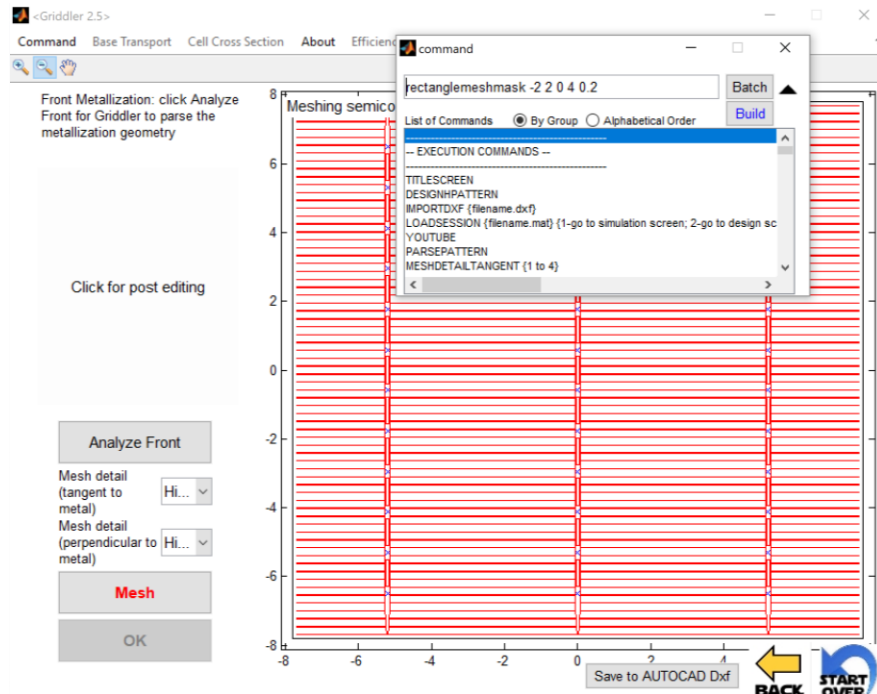
下面是 1 Sun 光照下，开路时的图像:



点击相机按钮来保存发光图像。我们推荐保存为文本 (.txt) 文件，因为这样会保留全部的数字不做舍入。



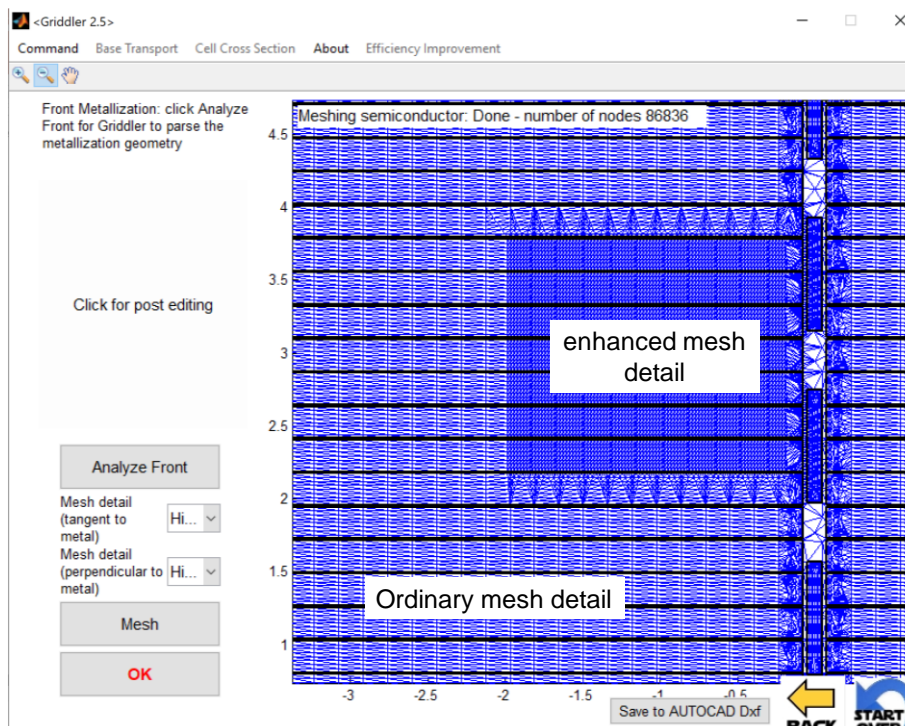
如果您想要获知光致发光图像特定区域的细节值，我们推荐您在网格化（mesh）的时候，在 Mesh detail 选项处尽量选择 High。我们也有一条命令可以提高金属栅线附近的网格的密度。这条命令需要在点击“Mesh”之前键入。



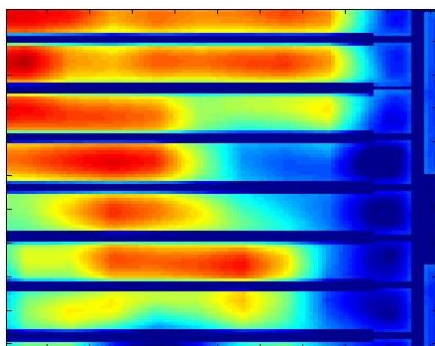
上面我们用了命令：RECTANGLEMESHMASK -2 2 0 4 0.2

这会定义一个对角坐标在(-2,2)cm 和(0,4)cm 的矩形，沿金属边的网格密度将会被提高到 0.2 mm。在下

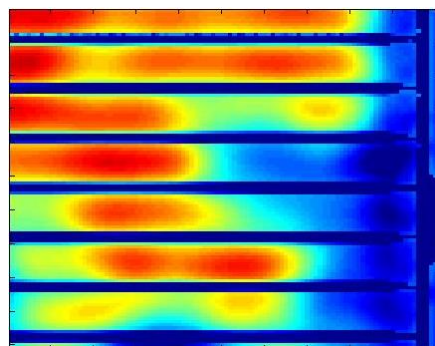
面的图片中，您可以看到矩形区域有更密集的网格。



下面我们比较一下对角坐标在(-2,2)cm 和 (0,4)cm 的矩形框中，添加或不添加更密集网格所得的光致发光图像的区别。您可以看到在这种情况下，添加密集网格略微获得更多细节。



对角坐标在(-2,2)cm 和 (0,4)cm 的矩形框中导出的发光图像，不添加密集网格。



对角坐标在(-2,2)cm 和 (0,4)cm 的矩形框中导出的发光图像，添加密集网格。

6.2 模拟小信号 AC 响应

如果激发条件（例如，光照、电压）存在小的扰动，可以使太阳能电池远离稳态，那么 I-V 特性和发光特性都将表现出不同。虽然 Griddler 本质上只进行稳态模拟，但它可以近似出所谓的小信号 AC 响应，也就是当激励（小扰动）随时间正弦变化时，Griddler 可以得出一个随时间正弦变化的电池输出参数。例如，如果电池的路端电压是 $V_{applied} = V_{DC} + \delta V_{AC} \times \sin(\omega t)$ ，其中 V_{DC} 是直流偏置， δV_{AC} 是一个小的交流偏置，其峰值到峰值的变化小于 kT/q ， ω 是一个径向频率，那么可以预期电池的终端电流为 $I = I_{DC} + \delta I_{AC} \times \sin(\omega t + \theta)$ 。其中 I_{DC} 是直流电流时， δI_{AC} 是一个小的交流电流， θ 是一个相角。类似地，发光信号也将具有这种形式的响应。

为了实现小信号 AC 响应的计算，我们在 base transport calculator 和发光信号计算中做了以下改变。首先，也是最重要的是，我们定义了一个复数，一个交流体载流子寿命 τ^* ：

$$\frac{1}{\tau^*} = \frac{1}{\tau} + i\omega$$

这时，扩散长度由 τ^* 定义，而非 τ

$$L_{diff} = \sqrt{D\tau^*}$$

这些都用在附录 A 的方程式中。然后，发光信号的计算变为

$$\Phi_{luminescence} = C f(\omega) \left(\exp\left(\frac{qV_{diode}}{kT}\right) - 1 \right) + BI_L$$

$$f(\omega) = \frac{L_{diff}}{W} \left(\left(1 + \frac{S_{eff} L_{diff}}{D} \right) \left(\exp\left(\frac{W}{L_{diff}}\right) - 1 \right) \right. \\ \left. + \frac{\left(1 - \frac{S_{eff} L_{diff}}{D} \right) \left(1 - \exp\left(\frac{-W}{L_{diff}}\right) \right)}{\left(1 + \frac{S_{eff} L_{diff}}{D} \right) \exp\left(\frac{W}{L_{diff}}\right) + \left(1 - \frac{S_{eff} L_{diff}}{D} \right) \exp\left(\frac{-W}{L_{diff}}\right)} \right)$$

这种算法和在 c 中考虑这个复数的扩散长度是一样的。

下面我们分享一段计算小信号 AC 响应的代码。相应的注释为带%的行。

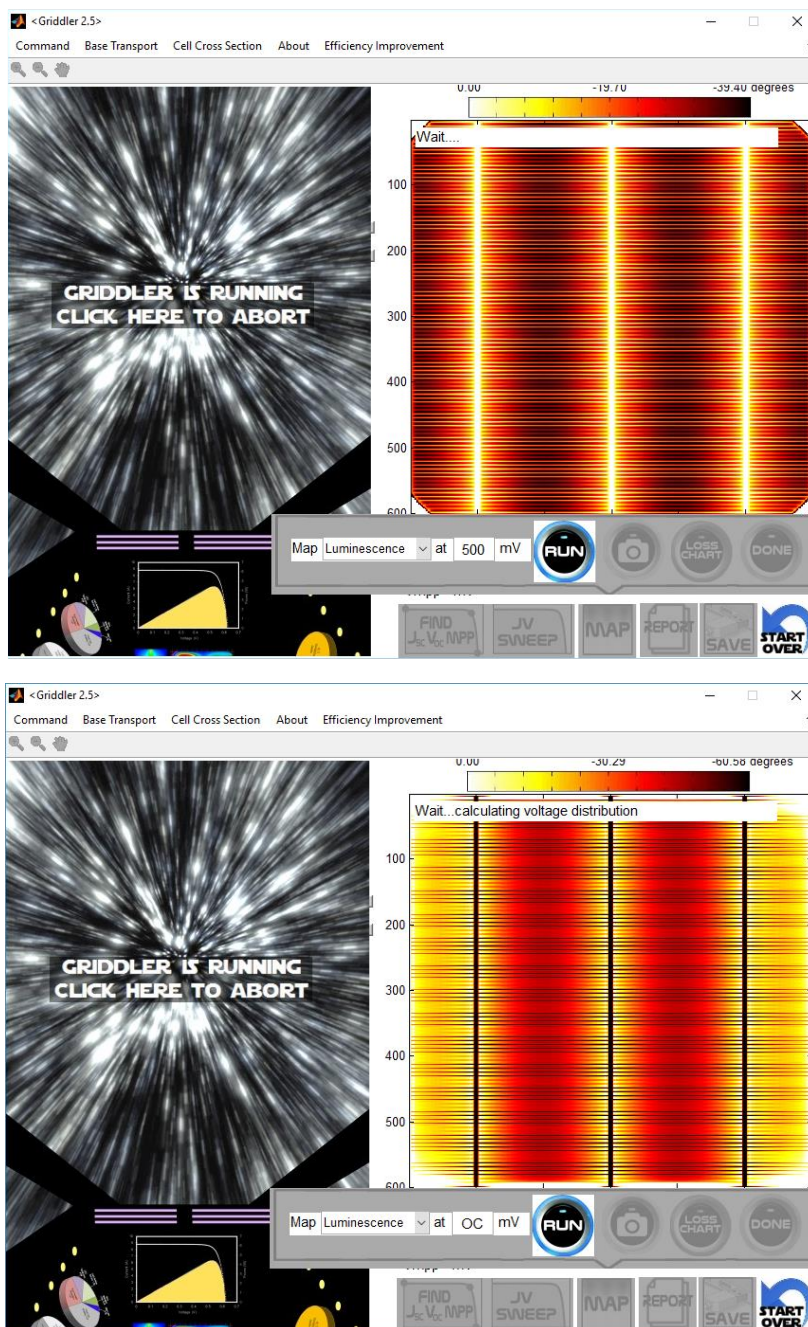
```
% load the large area cell file
loadsession 2017-05-19_test_cell.mat 1
FOR edgej01 [0]
  FOR rhoc [0]
    FOR J0e [50]
      FOR REARSRV [0 50 200]
        FOR TAU [2000]
```

```

% sets the region of interest to incorporate entire wafer
LUMINESCENCEROI -2 -2 2 2
% background light is about 0 Suns
FRONTILLUMINATION 0
% no sinusoidal light
LIGHTPERTURBATION 0
% AC bias of 10mV
BIASPERTURBATION 10
% first we simulate the DC response using the bias light and voltage
% first, we specify we are solving in DC mode
DIFFERENTIALMODE 0
% we open up the base transport calculator, and calculate effective rear J01
assuming certain bulk lifetime
EDGEJ01 [edgej01]
FRONTFINGERCONTACTRES [rhoc]
FRONTJ01 [J0e]
REARPASSSRV [REARSRV]
BULKLIFETIME [TAU]
CALCEFFECTIVEREARJ01
% we simulate the DC response with bias of 500mV
MAP 500 4
% we vary the frequency of the AC component from 10Hz to 1000kHz
% 1st argument is the filename to write results to
% 2nd argument (4) means we want to record the PL in the ROI
% 3rd is in the format NUM OF PTS to vary the frequency in a log scale
ACSWEEP 2017-05-19_test_cell_DC500mV_AC10mV_results_tau=
[TAU]_rearSRV=[REARSRV]_frontJ01=[J0e]_contactres=[rhoc]_edge=
[edgej01]_peri=[periJ01].txt 4 10 1000000 50
% background light is about 1 Suns
FRONTILLUMINATION 1
% sinusoidal light
LIGHTPERTURBATION 0.01
% no AC bias
BIASPERTURBATION 0
% first we simulate the DC response using the bias light and voltage
% first, we specify we are solving in DC mode
DIFFERENTIALMODE 0
% we open up the base transport calculator, and calculate effective rear J01
assuming certain bulk lifetime
CALCEFFECTIVEREARJ01
% we simulate the DC response with bias of 500mV
MAP OC 4
% we vary the frequency of the AC component from 10Hz to 1000kHz
% 1st argument is the filename to write results to
% 2nd argument (4) means we want to record the PL in the ROI
% 3rd is in the format NUM OF PTS to vary the frequency in a log scale
ACSWEEP 2017-05-19_test_cell_DC1Sun_AC0_01Suns_results_tau=
[TAU]_rearSRV=[REARSRV]_frontJ01=[J0e]_contactres=[rhoc]_edge=
[edgej01].txt 4 10 1000000 50
NEXT TAU
NEXT REARSRV
NEXT J0e
NEXT rhoc
NEXT edgej01

```

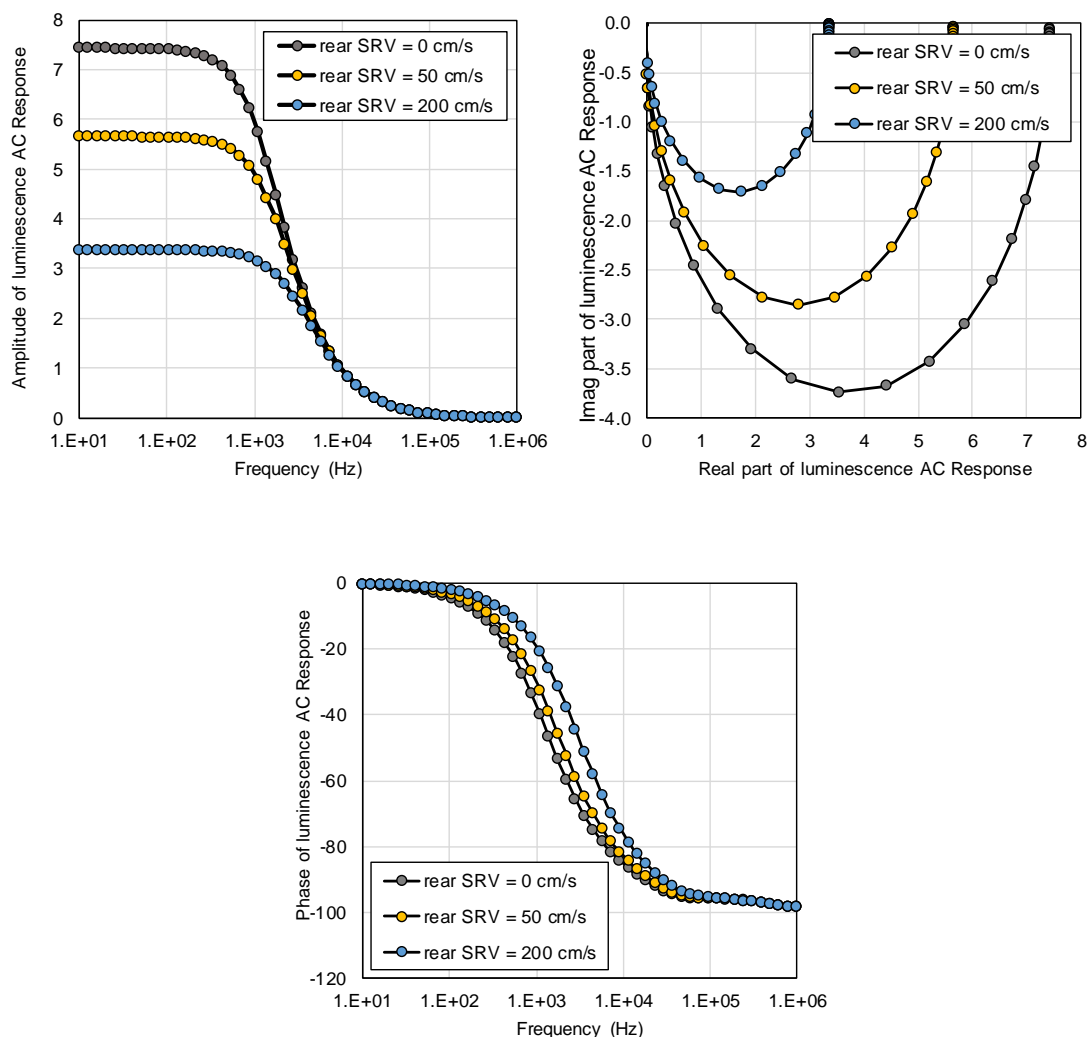
在程序运行的过程中，您将注意到，在 ACSWEEP 模式下，模拟的图像不再显示振幅，而是如下图所示地显示相角。



代码运行完之后，我们可以打开其中一个输出文件，看看里面都有些什么，如下：

AC excitation frequency mod freq(Hz)	DC excitation of light bias light(Suns)	DC excitation voltage bias bias V (mV)	AC excitation voltage bias mod V (mV)	AC response in sense voltage, imag component	AC response in sense voltage, magnitude	AC response in sense voltage, phase angle	AC response in current, imag component	AC response in current, magnitude	AC response in current, phase angle	AC response in luminescence, imag component	AC response in luminescence, magnitude	AC response in luminescence, phase angle		
1.00E-01	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.90E-06	2.57E-04	-0.04155	-7.06E-06	5.22E-08	7.06E-06	179.575997	7.44E+00	-5.61E-02	7.44E+00	-0.43291
1.20E+01	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-2.48E-06	2.57E-04	-0.54196	-7.06E-06	6.67E-08	7.06E-06	179.46826	7.44E+00	-1.71E-02	7.44E+00	-0.552302
1.60E+01	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-3.07E-06	2.57E-04	-0.68312	-7.06E-06	8.41E-08	7.06E-06	179.31884	7.44E+00	-9.04E-02	7.44E+00	-0.69652
2.02E+01	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-3.81E-06	2.57E-04	-0.84834	-7.05E-06	1.04E-07	7.06E-06	179.151818	7.44E+00	-1.12E-01	7.44E+00	-0.85078
2.56E+01	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-4.18E-06	2.57E-04	-1.08386	-7.05E-06	1.33E-07	7.05E-06	178.916296	7.44E+00	-1.43E-01	7.44E+00	-1.10495
3.24E+01	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-6.13E-06	2.57E-04	-1.36649	-7.05E-06	1.68E-07	7.05E-06	178.63363	7.44E+00	-1.81E-01	7.44E+00	-1.39363
4.09E+01	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-7.82E-06	2.57E-04	-1.74316	-7.05E-06	2.15E-07	7.05E-06	178.25696	7.44E+00	-2.31E-01	7.44E+00	-1.76889
5.18E+01	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-9.82E-06	2.57E-04	-2.19024	-7.05E-06	2.70E-07	7.05E-06	177.80968	7.44E+00	-2.90E-01	7.44E+00	-2.23224
6.53E+01	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.25E-05	2.57E-04	-2.77828	-7.04E-06	3.42E-07	7.05E-06	177.221624	7.44E+00	-3.67E-01	7.44E+00	-2.83249
8.39E+01	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.57E-05	2.57E-04	-3.35386	-7.03E-06	4.30E-07	7.04E-06	176.494566	7.44E+00	-4.63E-01	7.44E+00	-3.57386
1.05E+02	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.99E-05	2.56E-04	-4.0384	-7.01E-06	5.45E-07	7.03E-06	175.556769	7.39E+00	-5.86E-01	7.42E+00	-4.52964
1.33E+02	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-2.50E-05	2.56E-04	-5.61209	-6.99E-06	6.87E-07	7.02E-06	174.387643	7.37E+00	-7.38E-01	7.40E+00	-5.72106
1.68E+02	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-3.15E-05	2.55E-04	-7.07933	-6.95E-06	8.63E-07	7.00E-06	173.920959	7.32E+00	-9.27E-01	7.38E+00	-7.21727
2.12E+02	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-3.94E-05	2.54E-04	-8.92514	-6.88E-06	1.08E-06	6.97E-06	173.074939	7.25E+00	-1.16E+00	7.35E+00	-9.09977
2.68E+02	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-4.91E-05	2.52E-04	-11.22947	-6.78E-06	1.35E-06	6.92E-06	168.770704	7.15E+00	-1.45E+00	7.29E+00	-11.45025
3.39E+02	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-6.07E-05	2.48E-04	-14.08356	-6.63E-06	1.67E-06	6.84E-06	165.901796	6.99E+00	-1.79E+00	7.21E+00	-14.37746
4.35E+02	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-7.41E-05	2.45E-04	-17.61811	-6.40E-06	2.03E-06	6.72E-06	162.382341	6.74E+00	-2.38E+00	7.08E+00	-17.97028
5.43E+02	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-8.87E-05	2.38E-04	-21.87125	-6.07E-06	2.43E-06	6.54E-06	158.142925	6.38E+00	-3.26E+00	6.86E+00	-22.30287
6.87E+02	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.03E-04	2.29E-04	-26.88088	-5.60E-06	2.84E-06	6.28E-06	153.112056	5.87E+00	-3.05E+00	6.62E+00	-27.45076
8.69E+02	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.16E-04	2.16E-04	-32.61377	-4.98E-06	3.19E-06	5.92E-06	147.368356	5.21E+00	-3.48E+00	6.24E+00	-33.34173
1.10E+03	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.25E-04	1.99E-04	-38.92981	-4.24E-06	3.42E-06	5.45E-06	141.070305	4.41E+00	-3.68E+00	5.74E+00	-39.82408
1.36E+03	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.27E-04	1.78E-04	-45.48829	-3.43E-06	3.49E-06	4.89E-06	134.51185	3.54E+00	-3.74E+00	5.15E+00	-46.61213
1.76E+03	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.25E-04	1.56E-04	-51.97648	-2.63E-06	3.36E-06	4.27E-06	128.023804	2.68E+00	-3.61E+00	4.35E+00	-53.38619
2.22E+03	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.12E-04	1.33E-04	-58.00767	-1.93E-06	3.16E-06	3.64E-06	121.989386	1.98E+00	-3.31E+00	3.86E+00	-55.77388
2.81E+03	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-9.87E-05	1.05E-04	-63.34387	-1.36E-06	2.71E-06	3.03E-06	116.65685	1.32E+00	-2.90E+00	3.18E+00	-65.54199
3.56E+03	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-8.36E-05	9.04E-05	-67.84735	-9.35E-07	2.30E-06	2.48E-06	112.152828	8.66E-01	-2.46E+00	2.61E+00	-70.38418
4.50E+03	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-6.94E-05	7.32E-05	-71.466395	-6.37E-07	1.90E-06	2.01E-06	108.51357	5.49E-01	-2.08E+00	2.11E+00	-74.87179
5.69E+03	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-5.65E-05	5.87E-05	-74.28311	-4.36E-07	1.55E-06	1.61E-06	105.718044	3.35E-01	-1.65E+00	1.69E+00	-78.54672
7.05E+03	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-4.55E-05	4.68E-05	-76.2706	-3.05E-07	1.25E-06	1.28E-06	103.729893	1.96E-01	-1.39E+00	1.34E+00	-81.63566
9.10E+03	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-3.63E-05	3.72E-05	-77.48441	-2.21E-07	9.95E-07	1.02E-06	102.51573	1.06E-01	-1.06E+00	1.07E+00	-84.77987
1.15E+04	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-2.88E-05	2.94E-05	-77.910457	-1.69E-07	7.90E-07	8.08E-07	102.089695	5.02E-02	-8.41E-01	8.42E-01	-86.32468
1.46E+04	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-2.28E-05	2.35E-05	-77.519311	-1.38E-07	6.25E-07	6.40E-07	102.48882	1.58E-02	-6.63E-01	6.63E-01	-88.60624
1.84E+04	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.80E-05	1.85E-05	-76.26682	-1.21E-07	4.94E-07	5.09E-07	103.73468	-4.30E-03	-5.20E-01	5.20E-01	-90.47496
2.33E+04	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.43E-05	1.48E-05	-74.41567	-1.11E-07	3.92E-07	4.07E-07	105.858185	-1.50E-02	-4.05E-01	4.05E-01	-92.12387
2.95E+04	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-9.19E-06	9.91E-06	-71.21982	-1.06E-07	3.13E-07	3.30E-07	108.780369	-1.95E-02	-3.14E-01	3.15E-01	-93.54186
3.78E+04	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-7.53E-06	8.38E-06	-67.71302	-1.03E-07	2.52E-07	2.72E-07	112.283134	-1.98E-02	-2.43E-01	2.44E-01	-94.62378
4.91E+04	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-6.29E-06	7.23E-06	-60.57404	-9.74E-08	1.73E-07	1.98E-07	119.426126	-1.87E-02	-1.87E-01	1.88E-01	-95.42824
5.96E+04	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-5.38E-06	6.35E-06	-57.94942	-9.25E-08	1.48E-07	1.74E-07	122.095219	-1.71E-02	-1.11E-01	1.12E-01	-95.84261
7.34E+04	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-4.69E-06	5.64E-06	-56.31378	-8.38E-08	1.29E-07	1.55E-07	123.678817	-1.50E-02	-8.64E-02	8.69E-02	-95.46755
9.14E+04	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-4.15E-06	5.01E-06	-55.86564	-7.72E-08	1.14E-07	1.38E-07	124.685571	-1.36E-02	-7.03E-02	6.76E-02	-95.96176
1.21E+05	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-3.69E-06	4.43E-06	-56.32135	-6.74E-08	1.01E-07	1.22E-07	123.678817	-1.17E-02	-5.24E-02	5.27E-02	-96.03324
1.53E+05	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-3.26E-06	3.87E-06	-54.99335	-5.73E-08	8.93E-08	1.06E-07	122.68106	-1.08E-02	-4.42E-02	4.11E-02	-96.17621
1.94E+05	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-2.85E-06	3.34E-06	-58.69335	-4.80E-08	7.81E-08	9.17E-08	121.560616	-9.06E-03	-3.18E-02	3.02E-02	-96.44661
2.46E+05	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-2.46E-06	2.86E-06	-59.40769	-4.00E-08	6.76E-08	7.85E-08	120.592482	-2.93E-03	-2.47E-02	2.49E-02	-96.75652
3.09E+05	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-2.12E-06	2.44E-06	-60.15543	-3.34E-08	5.82E-08	6.70E-08	119.844708	-2.39E-03	-1.92E-02	1.94E-02	-97.10112
3.91E+05	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.82E-06	2.08E-06	-60.74584	-2.79E-08	4.99E-08	5.72E-08	119.23556	-1.95E-03	-1.49E-02	1.50E-02	-97.46605
4.94E+05	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.56E-06	1.78E-06	-61.34639	-2.34E-08	4.28E-08	4.88E-08	118.653804	-1.58E-03	-1.15E-02	1.16E-02	-97.79587
6.25E+05	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.34E-06	1.51E-06	-61.95375	-1.95E-08	3.66E-08	4.15E-08	118.046576	-1.28E-03	-8.94E-03	9.03E-03	-98.162741
7.91E+05	1.00E+00	6.59E-01	0.00E+00	-1.14E-06	1.29E-06	-62.38357	-1.63E-08	3.13E-08	3.53E-08	117.416594	-1.04E-03	-6.91E-03	6.99E-03	-98.55651

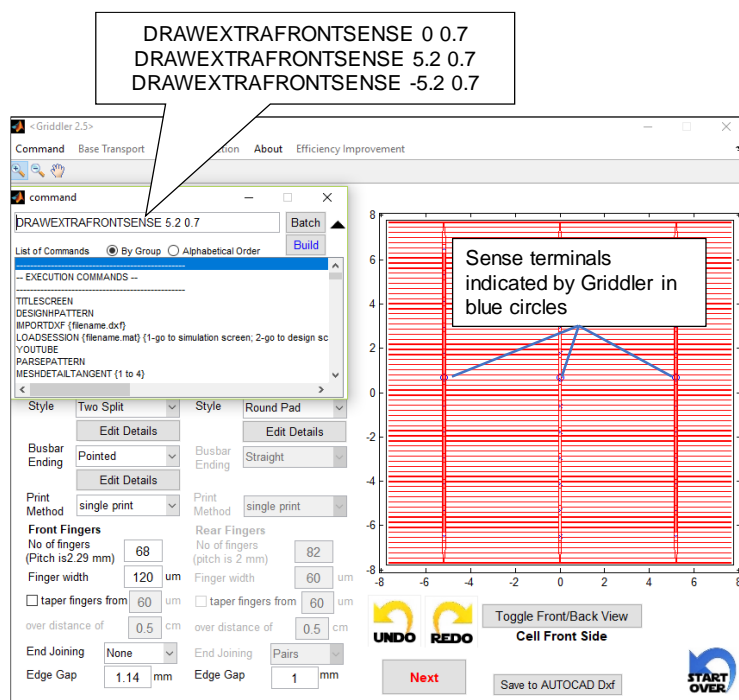
我们也可以画出模拟的开路条件下三种不同背面 SRV 的, 以频率为函数的发光图像 AC 响应的振幅和相位; 以及奈奎斯特图。



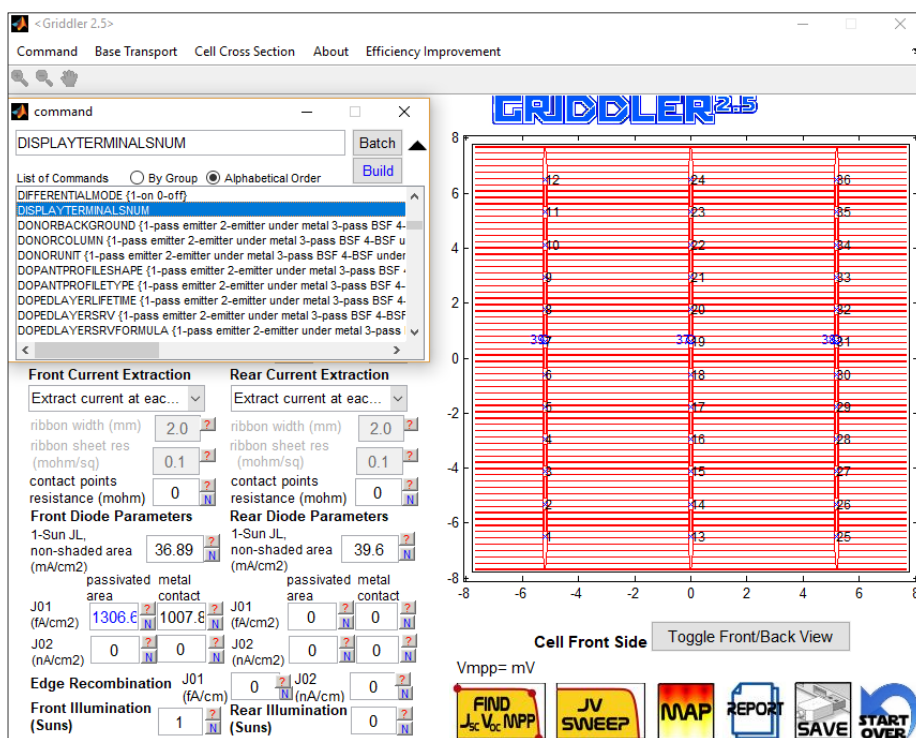
6.3 精确模拟四线 I-V 测量

实际的 I-V 测试使用四线配置, 其中电流源和电压测量由不同的接触引脚分开完成。为了研究在这种四线测量中引脚接触电阻的细微影响, Griddler 2.5 PRO 可以模拟添加测量探针, 并定义每个探针的接触电阻。

下面, 我们借用下面的例子来介绍这一功能。在 H-pattern 设计页面, 用命令 DRAWEXTRAFRONTSENSE {x position (cm)} {y position (cm)} 来在正面添加测量探针。您也可以使用命令 DRAWEXTRAREARSENSE {x position (cm)} {y position (cm)} 来在背面添加测量探针。但这里并没有这样做。

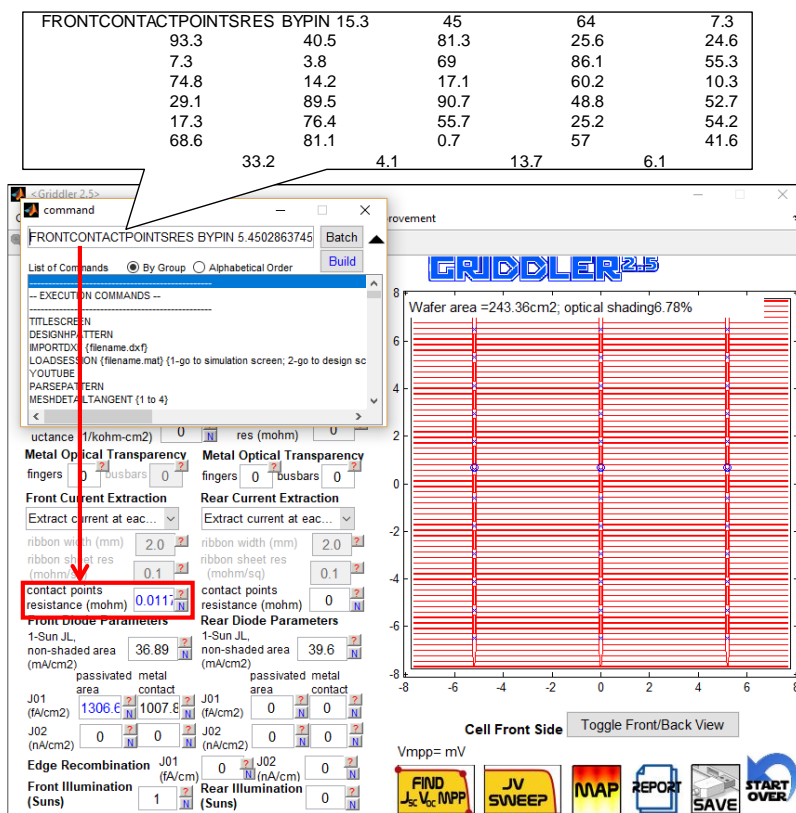


按照正常的方式进行正面、背面平面的网格化。然后，在 simulation 页面中，您可以通过命令 `DISPLAYTERMINALSNUM` 显示终端的序号。源引脚数以黑色表示，测量引脚以蓝色表示。



现在我们可以用命令 `FRONTCONTACTPOINTSRES BYPIN`，给每一个探针不同的接触电阻（以 ohms 为

单位)。



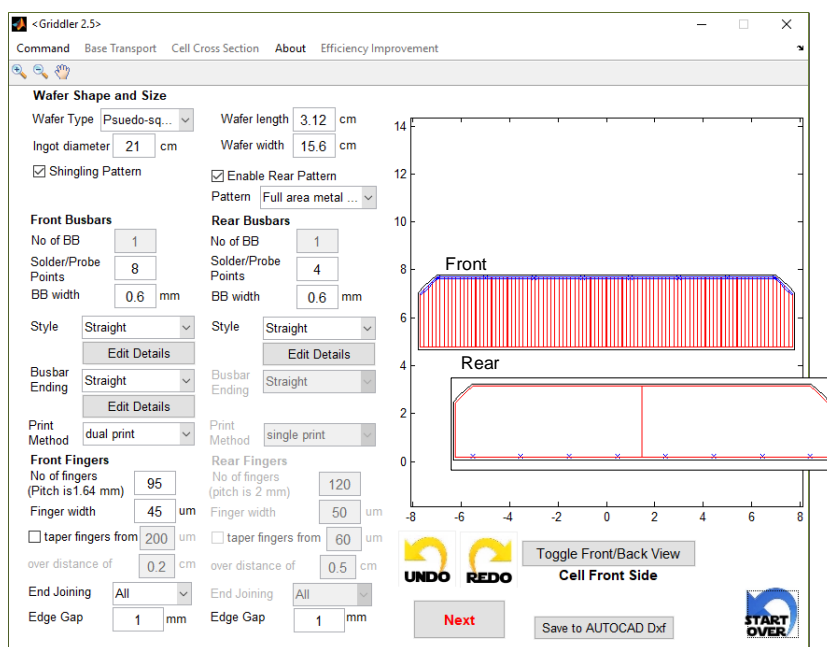
在这种情况下，模拟出来的 I-V 参数与默认情况（没有测量探针，源探针没有接触电阻）的差别非常细微。

Comment1	Jsc(mA/cm ²)	Voc(mV)	FF	Eff	Vmp(mV)	Jmp(mA/cm ²)
random_pin_contacts	34.387015	617.36178	79.53762	16.88522	513.445	32.886141
no_pin_contacts	34.387015	617.3891	79.68929	16.91817	518.6442	32.619993

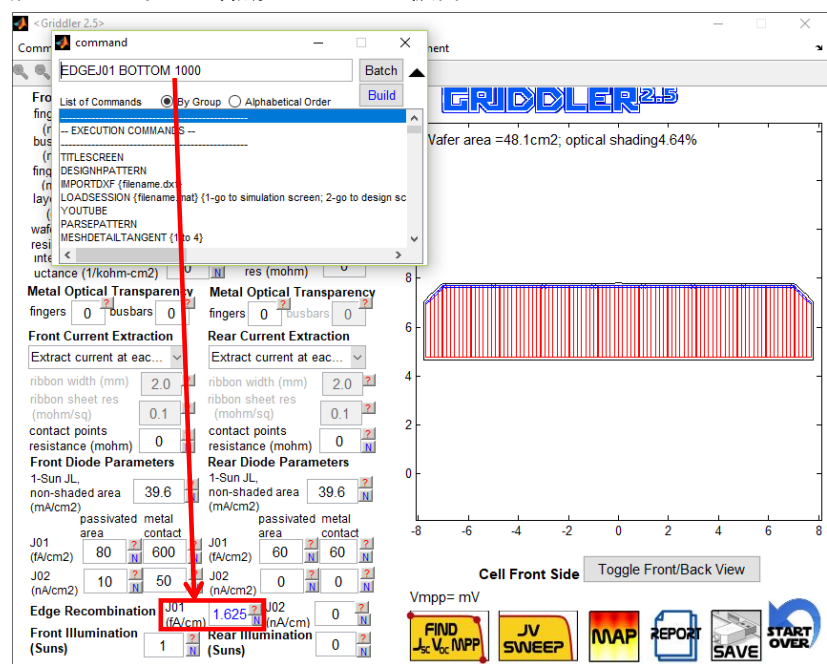
6.4 叠瓦和切片电池

现在我们教您怎样做精确的叠瓦和切片电池的模拟。用来切片的激光常常会在电池的一边造成额外的破坏。要想模拟这种情况，我们选用命令 EDGEJ01 BOTTOM, EDGEJ01 TOP, EDGEJ01 LEFT, EDGEJ01 RIGHT, EDGEJ02 BOTTOM, EDGEJ02 TOP, EDGEJ02 LEFT, EDGEJ02 RIGHT。下面让我们来看一个例子。

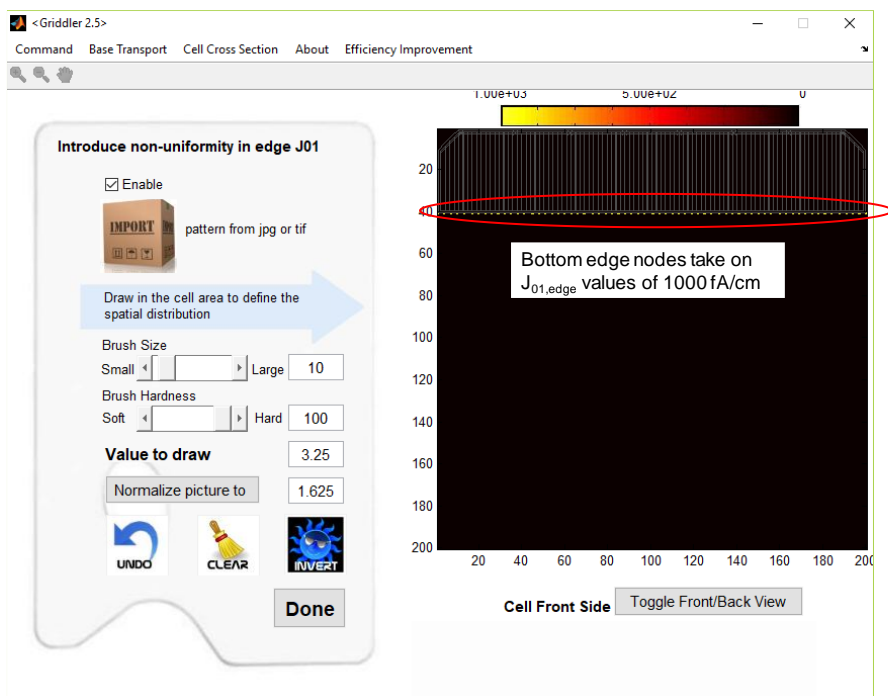
下面我们用 H-pattern 设计页面建立一片叠瓦。这是将一片电池切成五份所得的。我们将它网格化，然后去 simulation 页面。



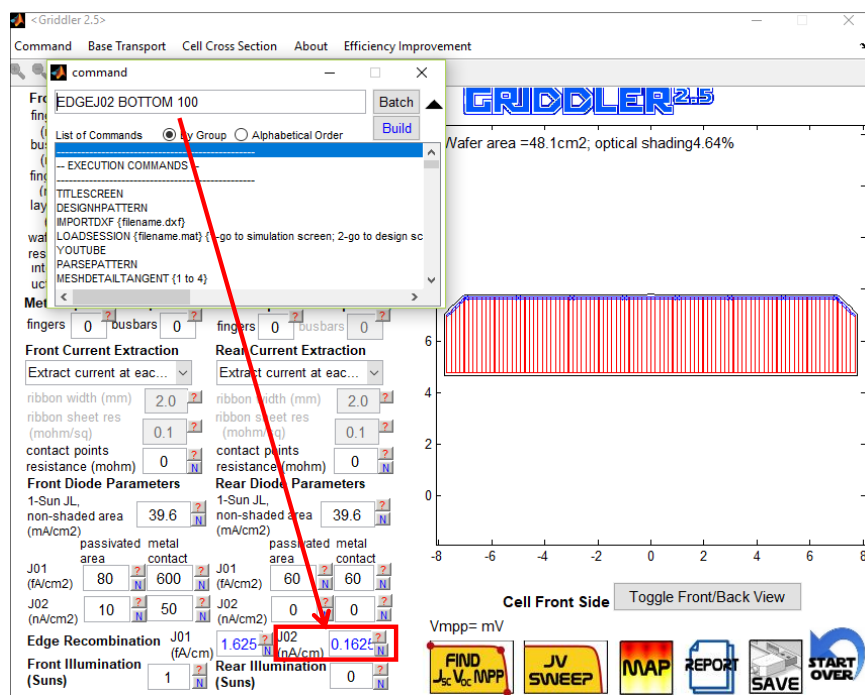
在 simulation 页面, 我们只在硅片底部引入边缘复合, 因为只有这边是激光打过的。我们用命令 EDGEJ01 BOTTOM 1000 赋值 1000 fA/cm 给底边 $n=1$ 的二极管。



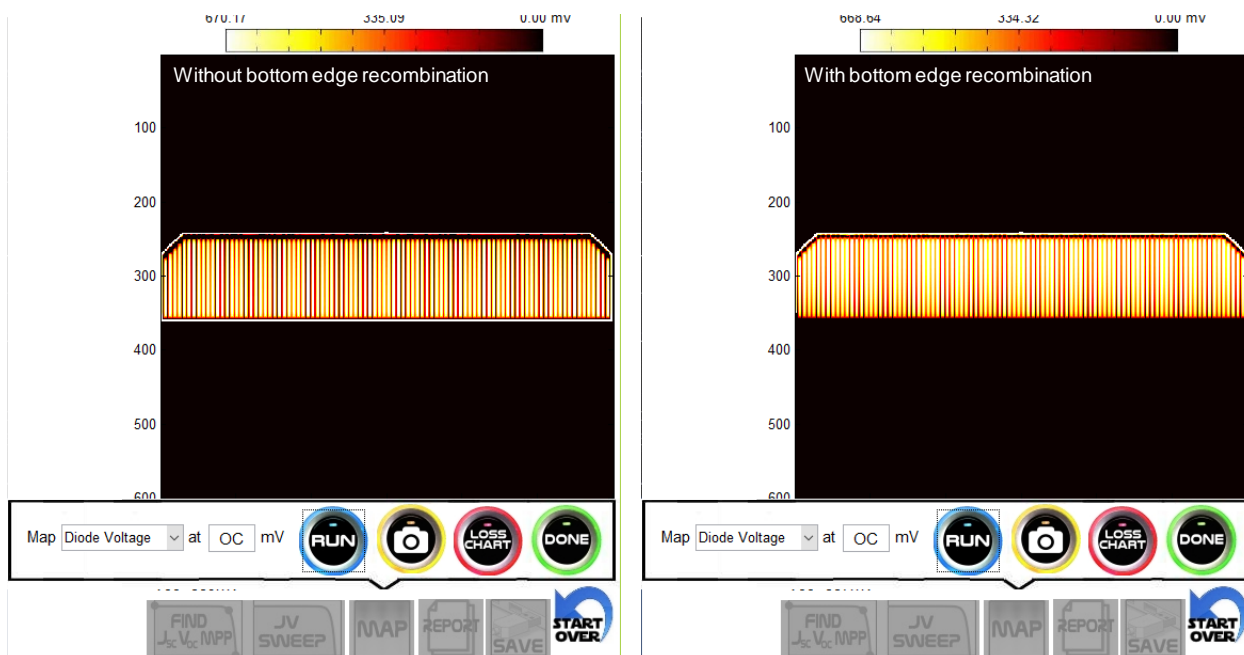
如果我们点击 Edge Recombination J_{01} 旁边的 **N** 按钮, 我们可以看到只有底边的 nodes 的 $J_{01,edge}$ 被设为 1000 fA/cm。



同样的,我们可以用命令 `EDGEJ02 BOTTOM 100` 赋值 100 nA/cm 给底边 $n=2$ 的 diodes.



现在如果我们在没有底边边缘复合和有底边边缘复合的情况下, 分别画开路二极管电压, 我们可以清晰的看到区别。后者底边显示更低的电压。



如果我们比较没有底边边缘复合和有底边边缘复合的 I-V 参数，我们同样也可以看到很明显的区别。后者有略低的 V_{oc} ，更重要的是，更低的填充因子。

Comment1	Jsc(mA/cm2)	Voc(mV)	FF	Eff	Vmp(mV)	Jmp(mA/cm2)
with_bottom_edge_recomb	37.764091	667.2117	76.61959	19.30557	557.5009	34.628757
without_bottom_edge_recomb	37.764149	668.8941	79.51409	20.08543	564.7428	35.565625

6.5 模拟太阳能电池裂缝

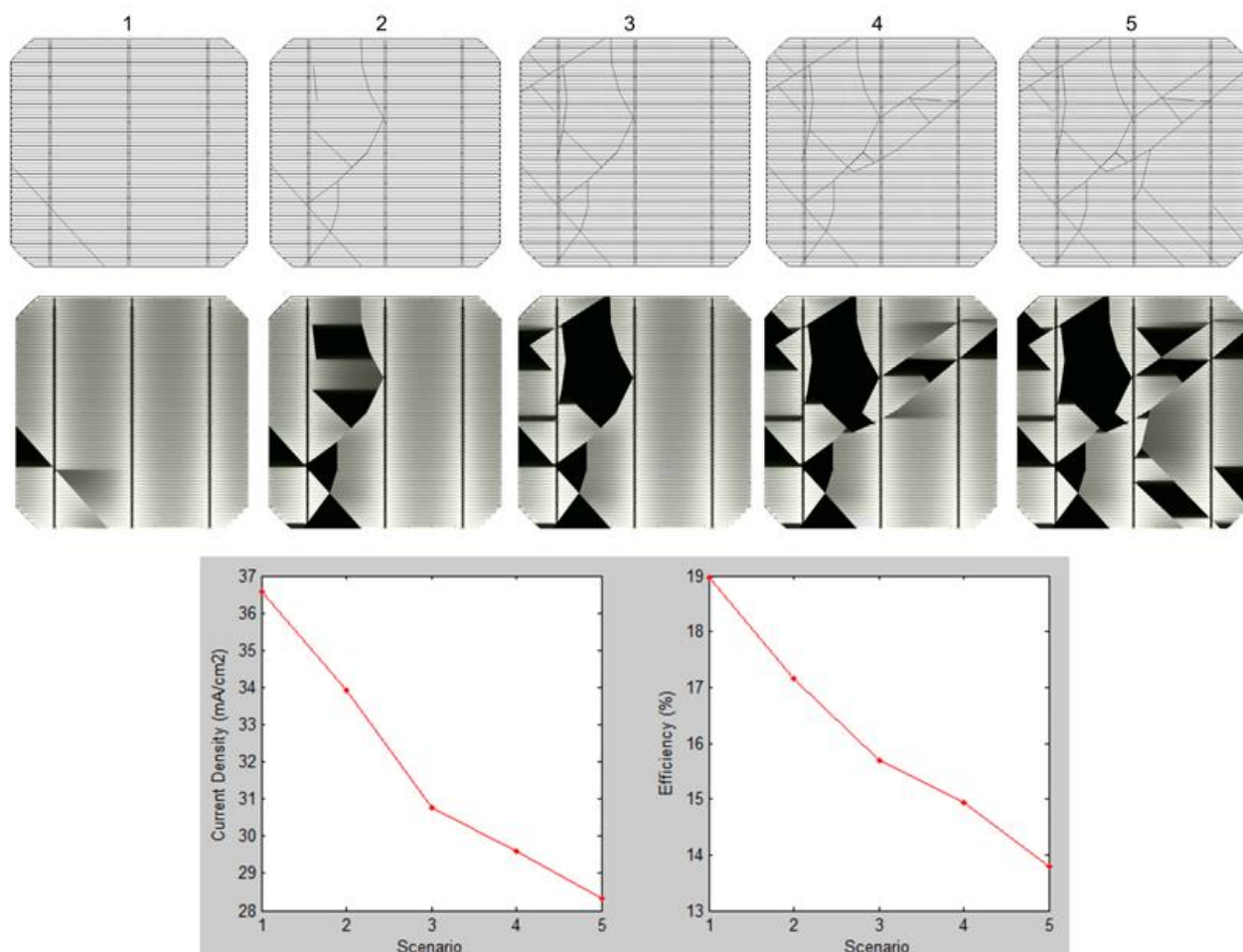
电池裂缝是在电池制造、组件制造以及现场组件中都存在的真实问题。Griddler 是一个理想的模拟程序，可轻松定义和模拟裂纹电池。要实现这一点，在到达网格页面时，您可以使用以下命令：

DRAWFRONTCRACK {1=穿过半导体和金属；2=仅穿过半导体} (x y) 以厘米为单位成对的坐标（宽度）以微米为单位

DRAWREARCRACK {1=穿过半导体和金属；2=仅穿过半导体} (x y) 以厘米为单位成对的坐标（宽度）以微米为单位

例如，DRAWFRONTCRACK 1 0 0 5 5 1

将在电池前面创建一个裂纹，穿过晶圆和金属化（在这种情况下，为了一致性，如果您的模拟还解决了后平面电压，则还应定义 DRAWREARCRACK 1 0 0 5 5 1）。下面我们展示了电池模拟中裂纹进展的示例，以及其对模拟电池电流密度和效率的影响。用于生成最后一个案例的脚本附在下面。



OUTPUTRESOLUTION 1000

TITLESCREEN

DESIGNHPATTERN

WAFERTYPE 2

SAVEDXF 8u2he727365ys.dxf

DRAWFRONTCRACK 1 -1.383966 -8.000000 -8.000000 -0.620690 1

DRAWFRONTCRACK 1 -5.569620 -7.862069 -3.679325 -5.310345 -3.206751 -3.793103 -3.206751
-1.931034 1

DRAWFRONTCRACK 1 -5.367089 -3.517241 -3.206751 -1.931034 -1.248945 0.000000 -0.101266
2.344828 1

DRAWFRONTCRACK 1 -2.261603 -1.034483 -4.894515 1.517241 1

DRAWFRONTCRACK 1 -4.624473 3.517241 -4.894515 5.931034 1

DRAWFRONTCRACK 1 -1.654008 8.000000 -1.586498 6.000000 -1.046414 4.068966 -0.101266

```

2.344828 1
DRAWFRONTCRACK 1 -4.894515 1.517241 -5.367089 -0.620690 1
DRAWFRONTCRACK 1 -4.894515 1.517241 -4.624473 3.517241 1
DRAWFRONTCRACK 1 -8.000000 3.931034 -4.894515 5.931034 -1.654008 8.000000 1
DRAWFRONTCRACK 1 -7.054852 4.551724 -5.434599 2.758621 1
DRAWFRONTCRACK 1 -7.864979 7.379310 -5.839662 5.310345 1
DRAWFRONTCRACK 1 -2.261603 -1.034483 -1.856540 -1.310345 -0.438819 -0.689655 1.113924
0.206897 8.000000 5.931034 1
DRAWFRONTCRACK 1 -1.248945 0.000000 -0.438819 -0.689655 1
DRAWFRONTCRACK 1 -0.101266 2.344828 5.367089 6.206897 1
DRAWFRONTCRACK 1 3.274262 2.000000 1.924051 3.655172 1
DRAWFRONTCRACK 1 1.924051 3.655172 5.232068 3.448276 1
DRAWFRONTCRACK 1 1.924051 3.655172 -0.033755 5.931034 1
DRAWFRONTCRACK 1 1.113924 0.206897 0.506329 -2.344828 -0.033755 -3.241379 1
DRAWFRONTCRACK 1 0.506329 -2.344828 5.974684 -7.931034 1
DRAWFRONTCRACK 1 -0.033755 -4.551724 3.544304 -7.931034 1
DRAWFRONTCRACK 1 5.367089 -3.655172 8.000000 -6.689655 1
PARSEPATTERN
GOMESH
OKMESH
PARSEPATTERN
GOMESH
OKMESH
REARCURRENTEXTRACTION 3
FRONTCURRENTEXTRACTION 2
FRONTILLUMINATION 1
FINDJSCVOCMPP
REPORT crack_IV_21.txt
FRONTILLUMINATION 0
MAP 700 4
FRONTILLUMINATION 1
SAVEPICTURE EL21.txt

```

6.6 模拟瞬态太阳能电池特性

高开路电压太阳能电池可能需要毫秒级的时间尺度才能响应所施加的电压达到稳定状态。如果电压扫描速率对于每个操作点来说过快，可能会导致测量的 I-V 特性存在非常显著的偏差。为了模拟这种行为，在模拟屏幕中使用以下命令之一：

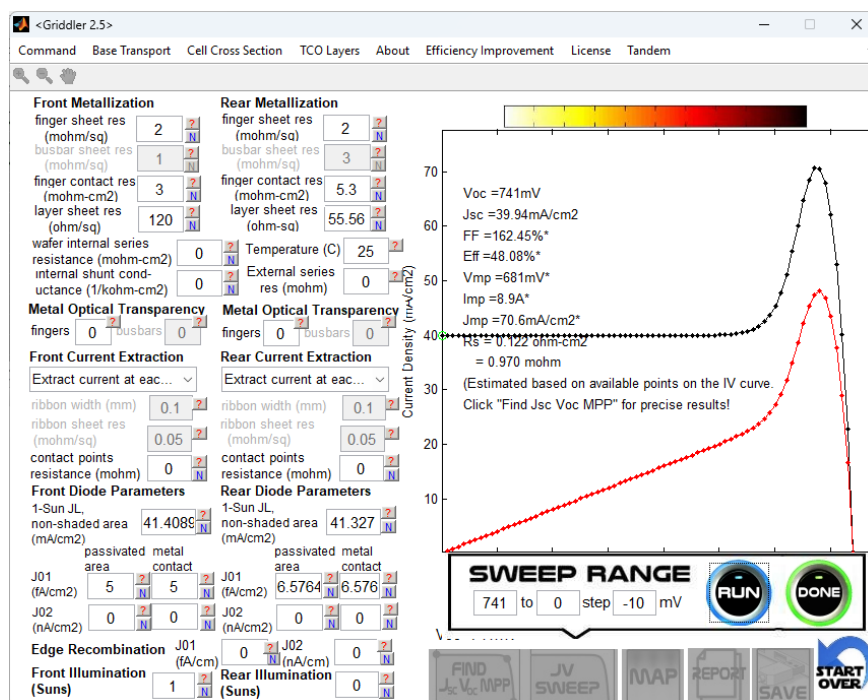
SETSWEPRATE {V/s}

设置 I-V 扫描中以 V/s 为单位的恒定电压斜率，或

SETSWEPTIMING {filename.txt}

加载一个文本文件，其中有两列，每行分别是以秒为单位的时间和以 V 为单位的电压，以确定不同电压下的扫描速率。后者可能更准确地描述了 I-V 测试仪的扫描速率，因为它们可能不是恒定的电压斜率。

下面是对高 Voc 电池 ($V_{oc} = 741 \text{ mV}$) 进行反向 JV 扫描的夸张示例，其中 SETSWEPRATE 为 100。



6.7 模拟光致发光线扫描

线扫描光致发光是 BT Imaging 开创的一种技术。它通过使用窄宽的线形光源对样品进行部分照明，并通常使用一条线状相机，在大致相同的位置成像。与线扫描成像的典型情况一样，然后将部分图像拼接在一起形成太阳能电池的整体面积图像。

为了进行线扫描 PL 模拟，可以使用以下任一命令：

LINESCANPL {1=南北, 2=东西} {pitch(cm)}

例如: LINESCANPL 1 0.156

南北/东西确定光扫描的方向。间距是光/相机 ROI 的增量。在上述情况下, 间距也是线扫描光的宽度, 以及线扫描相机的 ROI。光扫描光和线扫描相机的 ROI 是同一位置的。

LINESCANPLMULTIPLECAMERAS {1=南北, 2=东西} {pitch(cm)} {前置相机数} {后置相机数} {线状相机间距(cm)}

例如: LINESCANPLMULTIPLECAMERAS 1 0.156 5 5 0.156

在上述情况中, 线相机 ROI 的宽度=线相机间距可能与线扫描光的宽度=间距不同。可选地, 可以定义更多相机 ROI 在中间 ROI 的前后。如果这样, 那么在将模拟地图保存为 txt 时, 将为每个 ROI 生成多个 txt 以拼接图像。

LINESCANPLMULTIPLECAMERAS {1=南北, 2=东西} {pitch(cm)} {光宽(cm)} {前置相机数} {后置相机数} {线状相机间距(cm)}

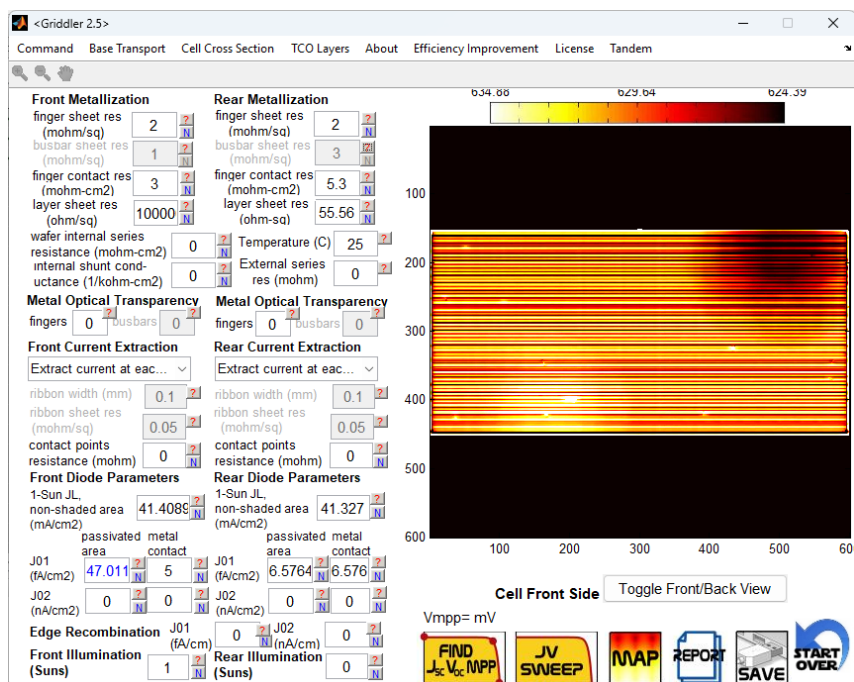
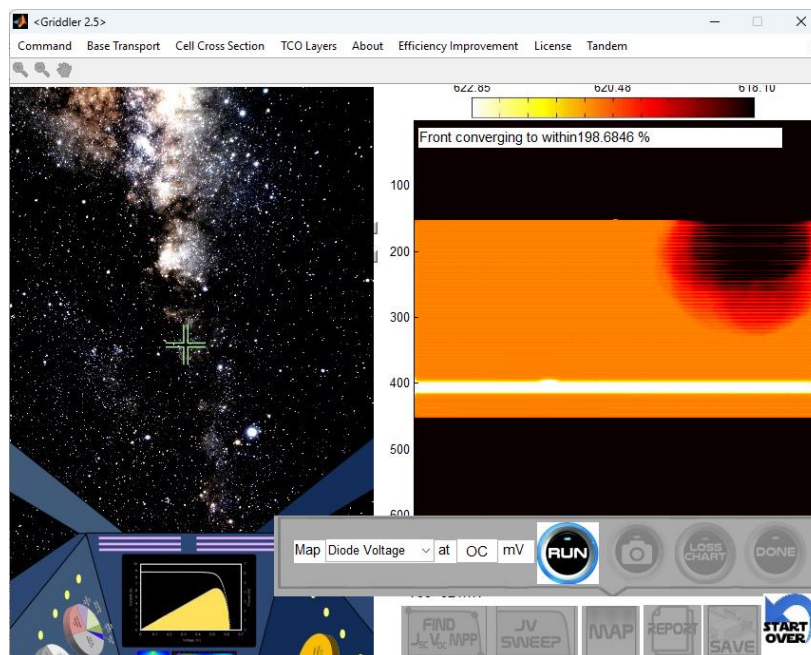
例如: LINESCANPLMULTIPLECAMERAS 1 0.156 5 5 0.156

在上述情况中, 线相机 ROI 的宽度=线相机间距可能与线扫描光的宽度=光宽不同, 这也可能与前进间距=间距不同

LINESCANPLMULTIPLECAMERAS {角度} {pitch(cm)} {光宽(cm)} {前置相机数} {后置相机数} {线状相机间距(cm)}

在上述情况中, 扫描的方向可以是任意角度

我们展示了以下线扫描模拟过程, 使用 LINESCANPLMULTIPLECAMERAS A45 0.156 5 5 0.156。请注意, 由于它包括模拟一系列具有不同光源的情形, 因此模拟非常缓慢。随着这些模拟的进展, 会显示整体电池空间分布。完成时, 会显示拼接的图像



6.8 模拟热点和硅片边缘的反向偏压击穿

Griddler 可以定义热点和硅片边缘的击穿来模拟逼真的反向偏压击穿情况。此外，如果将电池模型输入到 Module，Module 模拟会真实地模拟反向偏压击穿的电流-电压特性，从而也可以在组件层面模拟逼真的遮蔽情景（请参阅 Module 说明手册 4.7）。

要定义这些热点和硅片边缘，请在网格 (Mesh) 屏幕上使用以下命令：

DRAWHOTSPOT {x y} coordinate in cm (radius) in um, (shunt conductance) in 1/ohm, (rev breakdown V) in V, (rev I0) fA, (ideality factor)

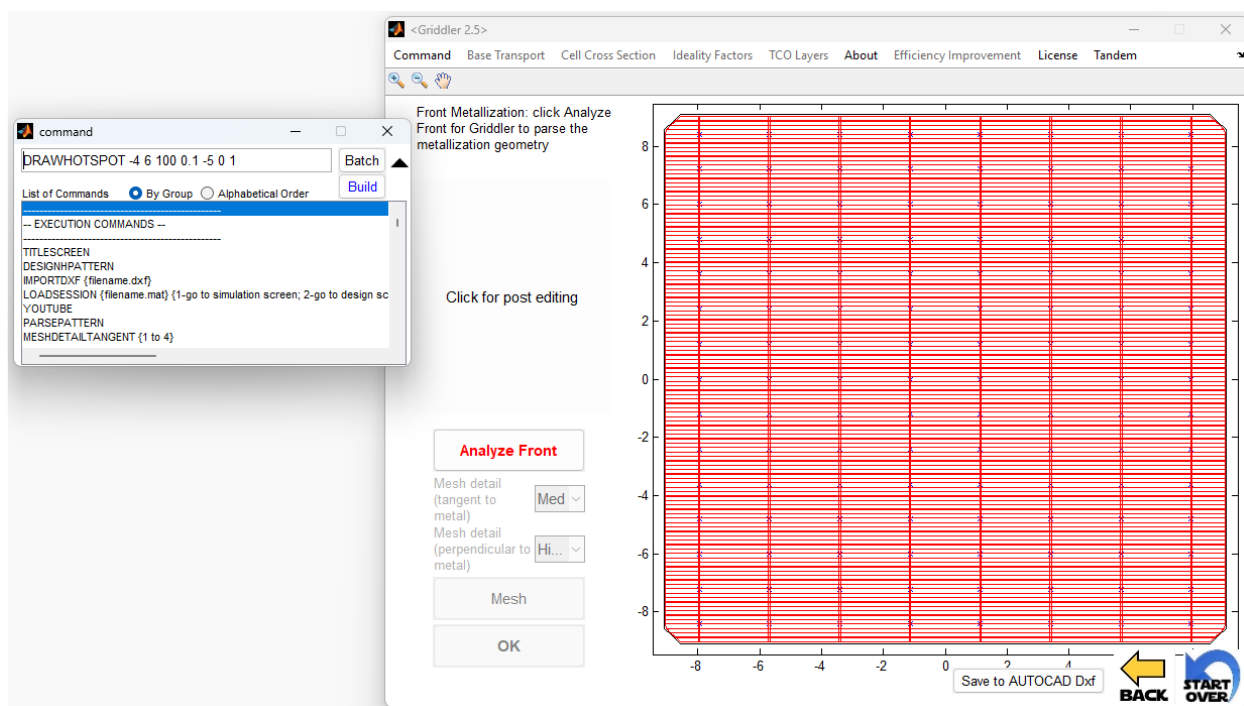
DRAWHOTSPOT EDGE {shunt conductance} in 1/ohm (rev breakdown V) in V (rev I0) fA (ideality factor)

例如：

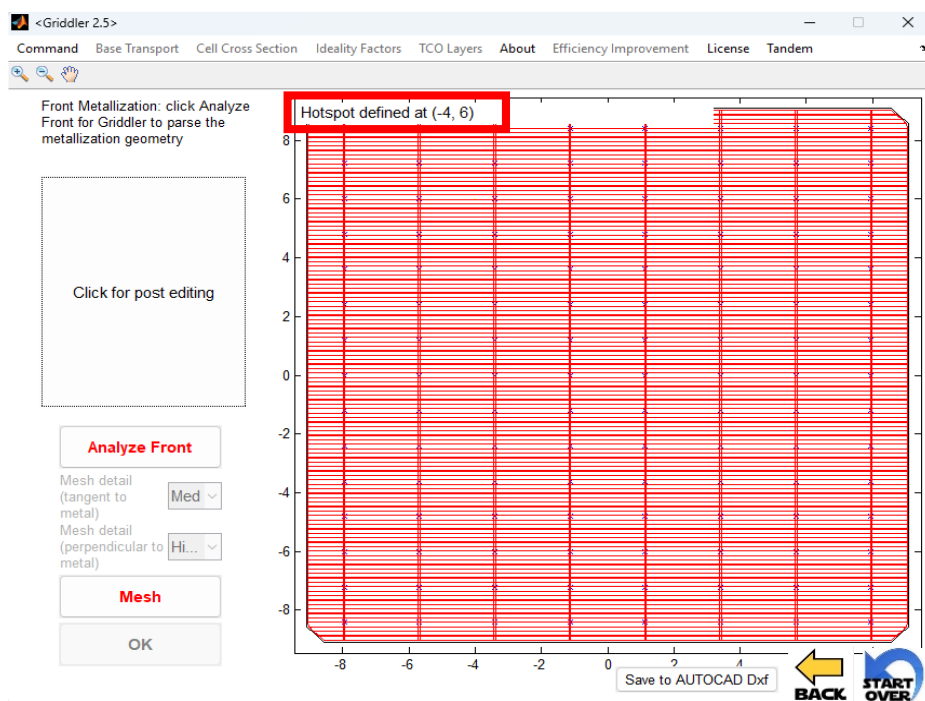
DRAWHOTSPOT -4 6 100 0.1 -5 0 1

DRAWHOTSPOT -9.1 2 100 0 -5 10000 1

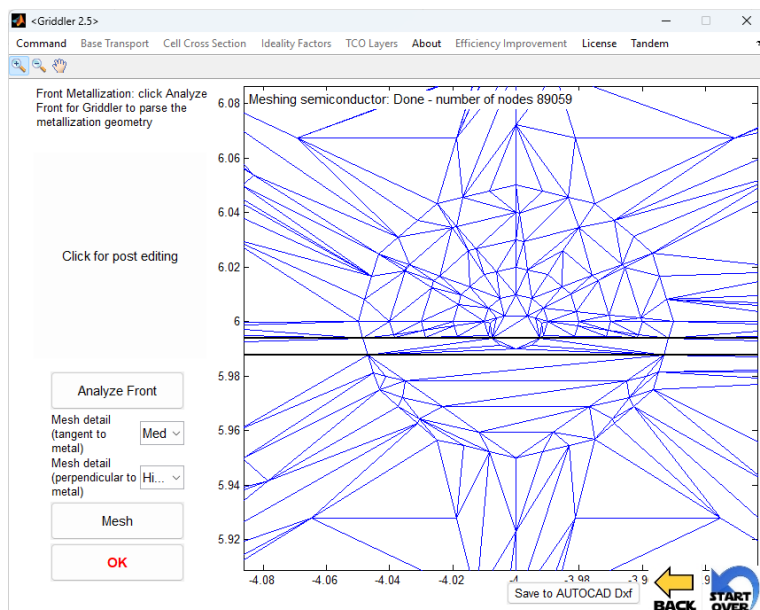
DRAWHOTSPOT EDGE 0 10 100 1



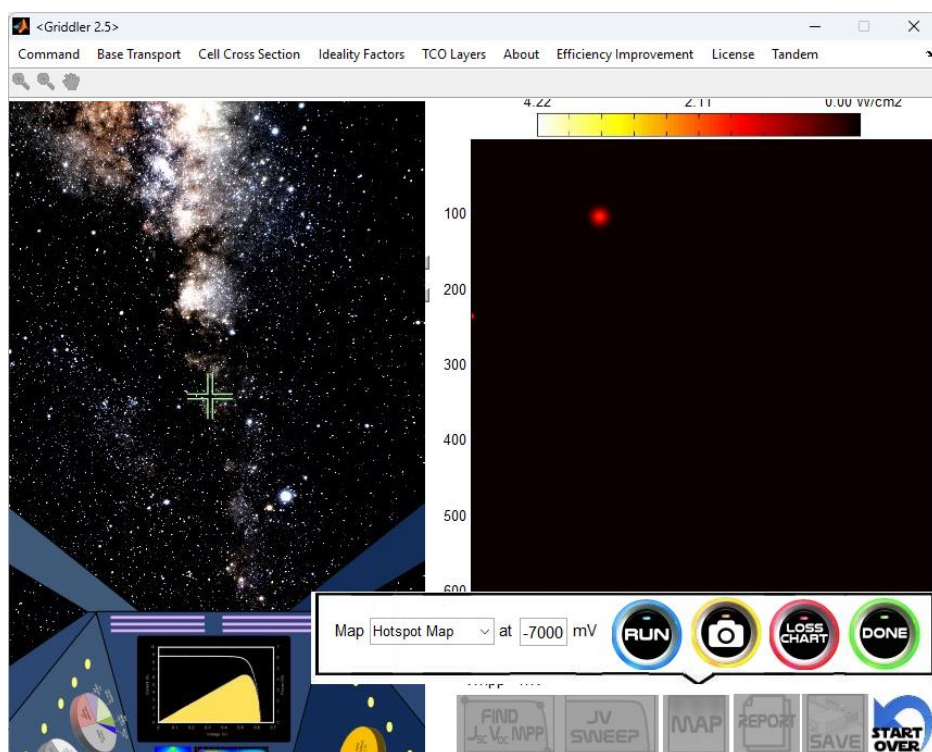
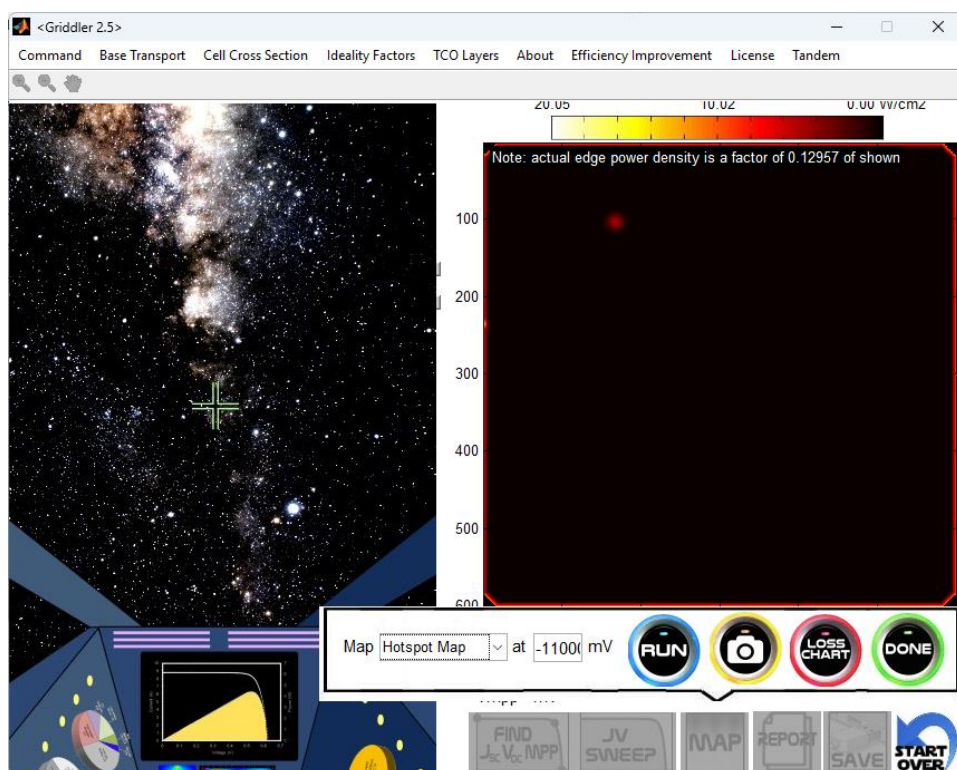
每次定义热点或边缘击穿时，都会显示确认消息：



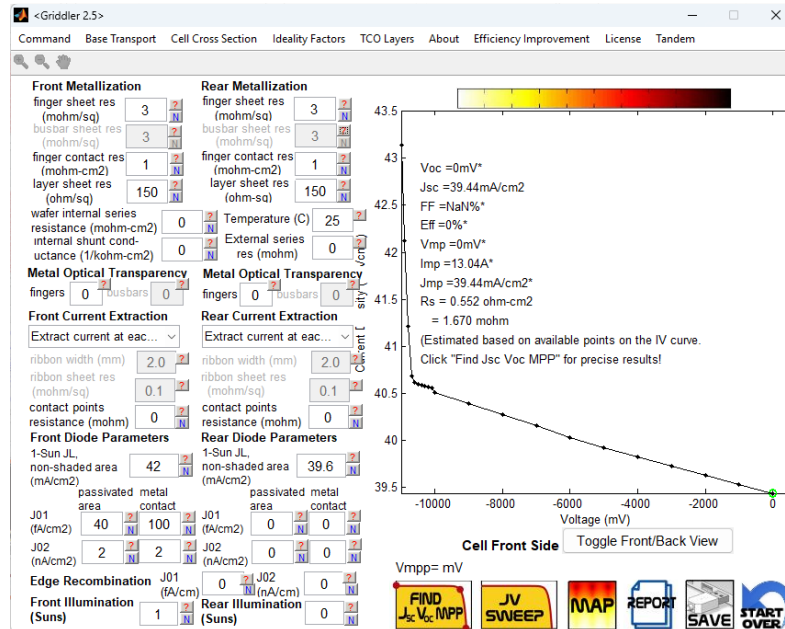
Griddler 将在热点周围集中更多网格点：



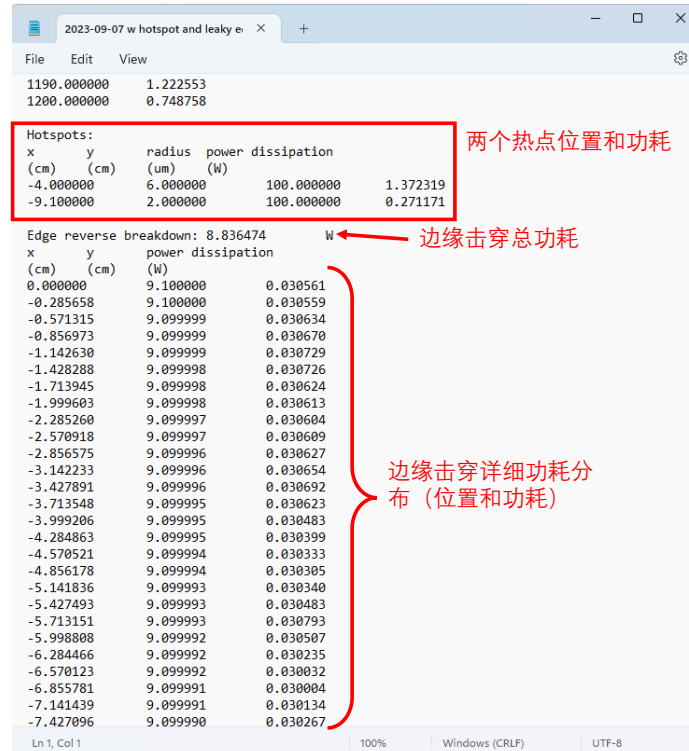
在模拟界面上，现在可以进行反向偏压模拟，并有一个下拉菜单选项用于绘制热点功耗分布图 (Hotspot Map)。下面分别是-11V 和-7V 的反向偏压功耗图。



还可以进行反向偏压 I-V 曲线跟踪：



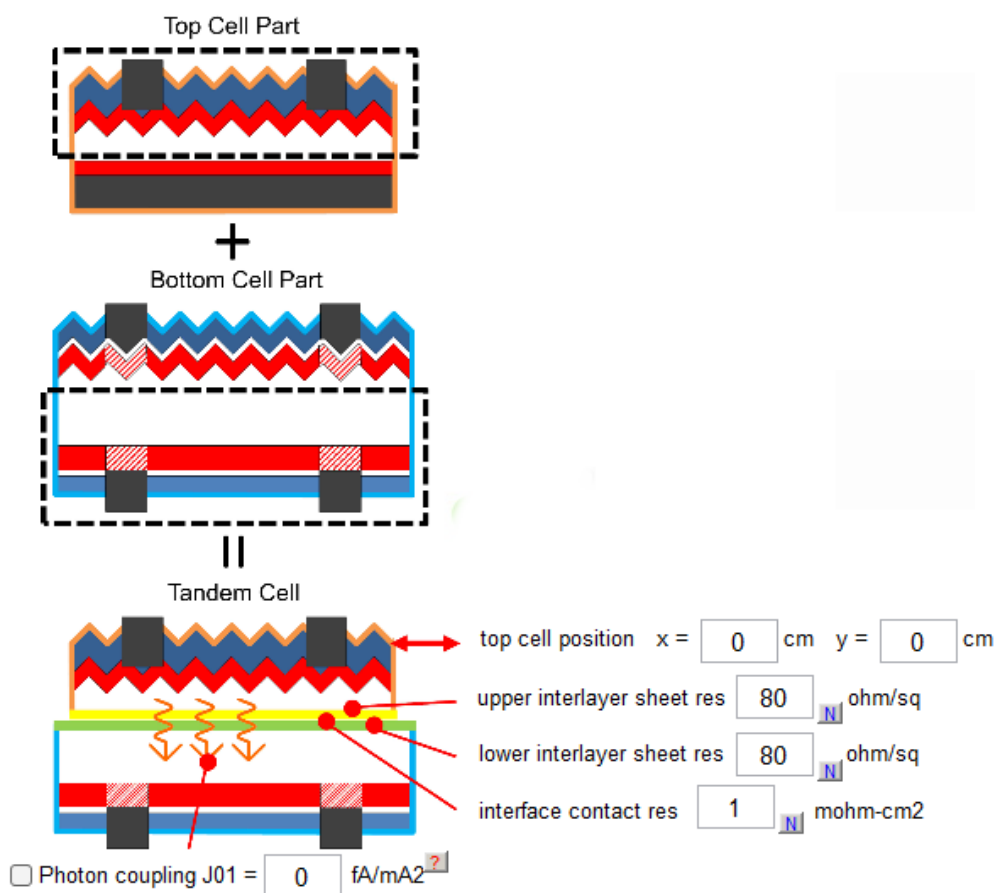
当保存到报告 (Report) 时，报告底部将记录上次运行的热点和边缘击穿功耗。以下是-11V 偏压条件下功耗的示例。



7 模拟双结叠层电池 (PRO 版本)

7.1 概述

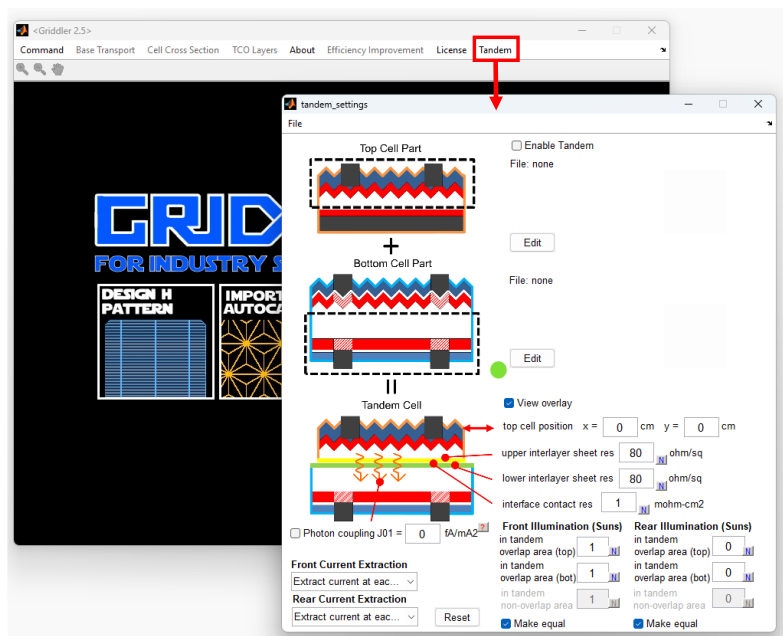
如果您已经熟悉 Griddler 的工作流程, 那么您会发现双结叠层太阳能电池的模拟是一种非常简单和自然的扩展。2J 双联太阳能电池模型基本上是两个常规的 Griddler 电池模型堆叠在一起。从概念上讲, 表示如下: Griddler 获取顶部电池 (切出后部金属化层)、底部电池 (切出顶部金属化层) 并通过添加新的中间层将它们粘合在一起。



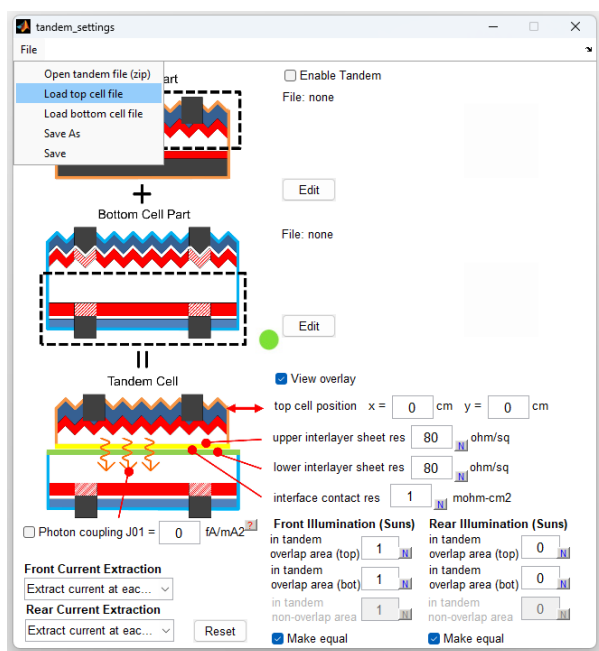
7.2 快速指南

下面我们将说明创建双结叠层太阳能电池模型的过程，从两个已经制作好的 Griddler 电池模型开始，一个用于顶部电池，另一个用于底部电池。创建完成后，可以将双联电池模型保存，并作为 zip 文件进行检索。

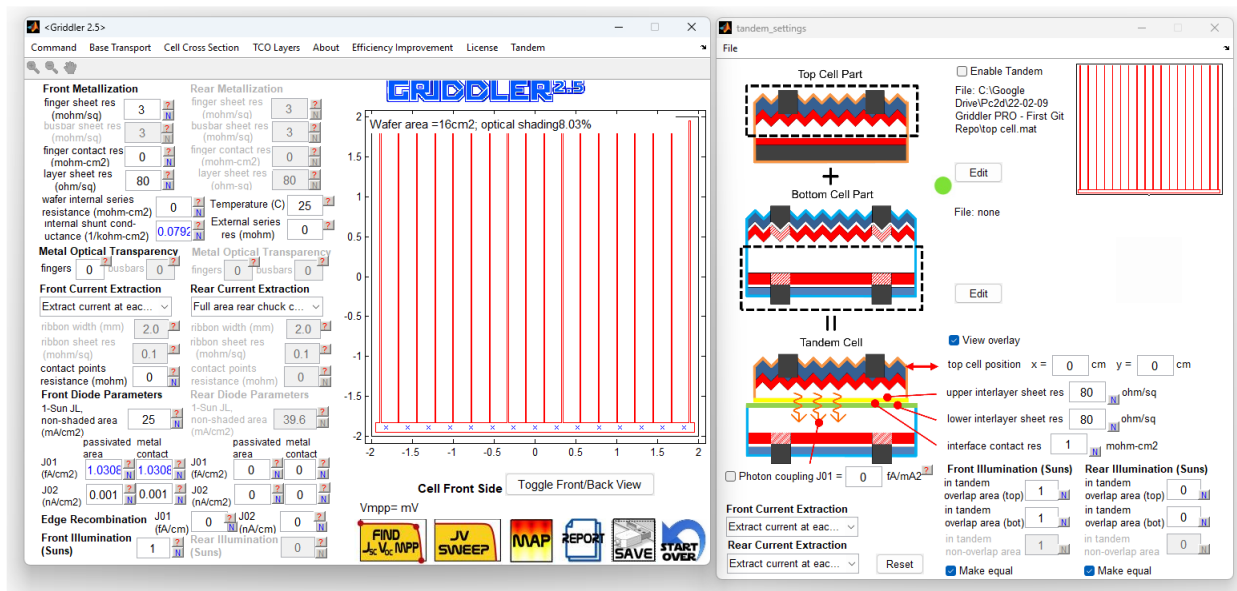
1. 在 Griddler 菜单中，单击 Tandem 以弹出双联设置屏幕。



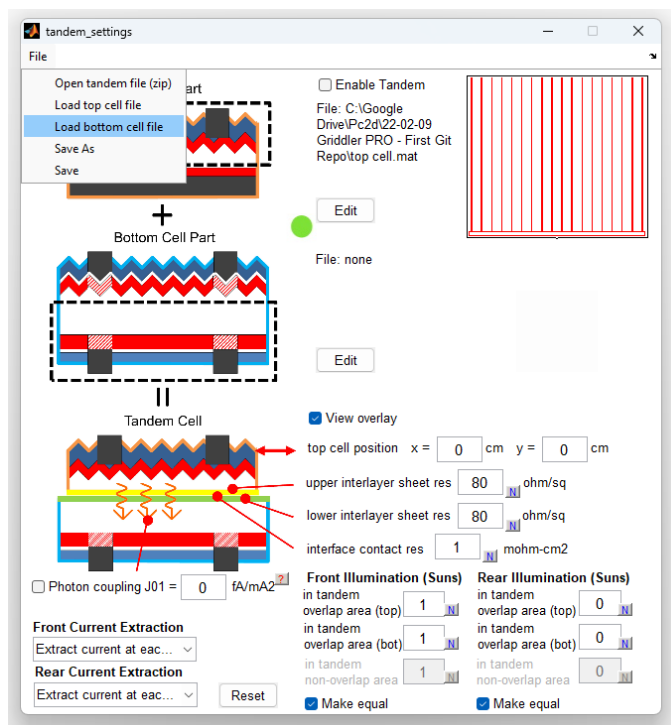
2. 转到文件→加载顶部电池文件。选择顶部电池 Griddler 模型。



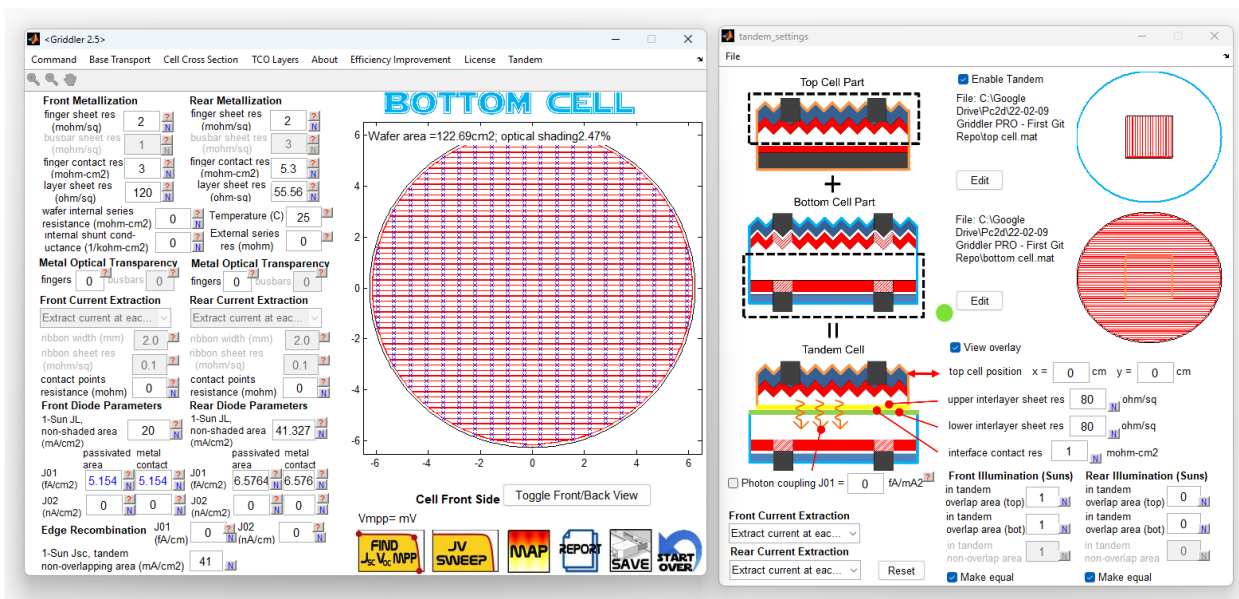
3. 顶部电池模型加载到 Griddler 主模拟屏幕中。它也显示在双联设置屏幕中作为顶部电池。



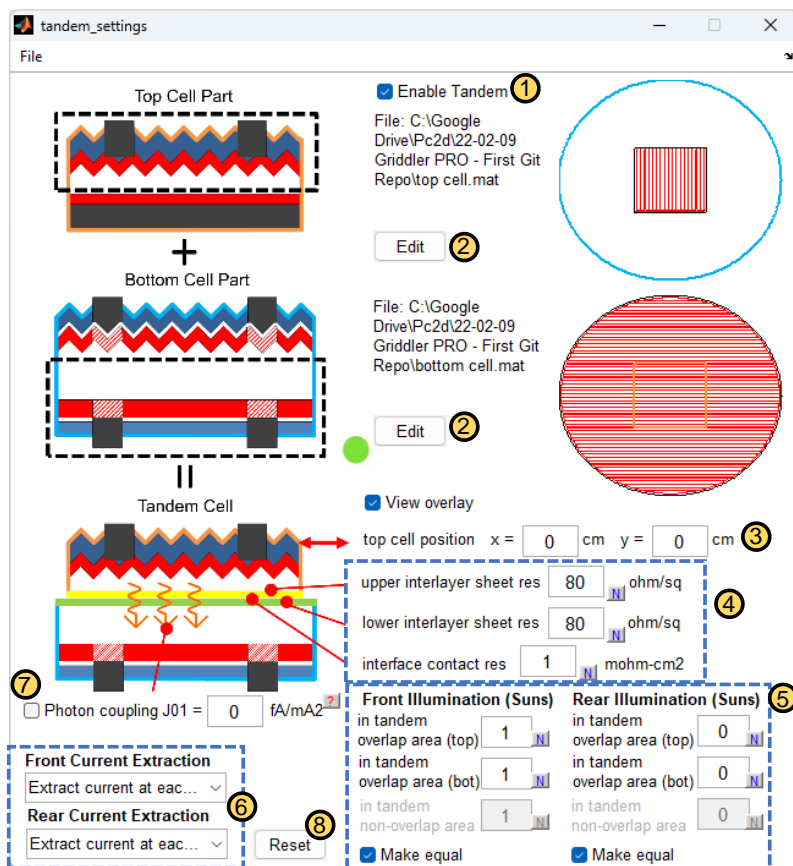
4. 转到文件→加载底部电池文件。选择底部电池 Griddler 模型。



5. 底部电池模型被加载到 Griddler 主模拟屏幕中。它也在双联设置屏幕中作为底部电池显示。



6. 让我们更仔细地研究双联设置屏幕的组成部分。



1. 启用双联

默认情况下选中此项。如果取消选中，则当前加载的 Griddler 模型将被解释为单个电池，如果运行任何模拟，则将模拟为单个电池。

2. 编辑顶部/底部电池

允许您在 Griddler 主模拟屏幕中在顶部/底部电池之间切换，以便您可以编辑每个电池（不要忘记保存）。

3. 顶部电池位置

如果顶部电池比底部电池小，则可以选择其相对位置覆盖底部电池。用户有责任确保顶部电池完全包含在底部电池的区域！

4. 中间层片电阻和接触电阻

Griddler 获取顶部电池（切出后部金属化层）、底部电池（切出顶部金属化层）并通过添加新的中间层将它们粘合在一起。您可以在这里定义这些中间层的片电阻以及它们连接到彼此的接触电阻。与大多数 Griddler 参数一样，您还可以单击蓝色的 **N** 按钮，为每个参数定义非均匀的空间模式。

5. 正/反面照明

对于双联太阳能电池，您可以单独定义顶部电池、底部电池以及未堆叠在顶部电池上的底部电池部分的照明。在这些区域的照明不同时，请务必先取消“使相等”复选框。

6. 正/反面电流提取方法

电流提取方法弹出菜单现已移到双联设置屏幕中（在 Griddler 主模拟页面中灰色不可用）。

7. 光子耦合 J01

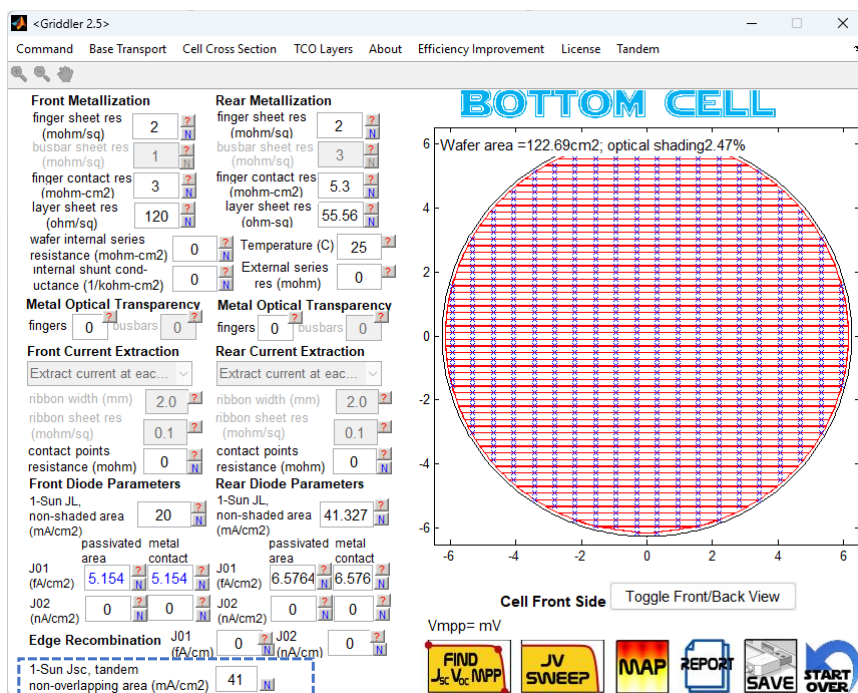
光子耦合也称为发光耦合或光子回收。它是指顶部电池中的辐射复合可以生成大量光子流进入底部电池的现象，然后被吸收并成为光生电流。Griddler 目前实现了一种简单的处理方法：

q (photon flux emitted from top cell to bottom cell in units of $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) =

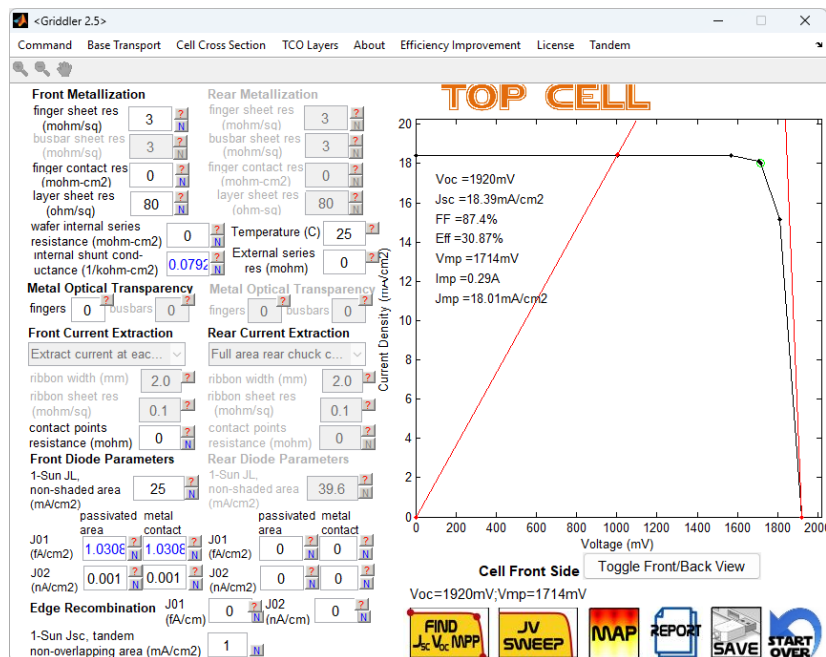
$(\text{Photon coupling } J_{01}) \times (\exp(qV_{\text{Jtopcell}}/kT)-1)$

其中 q 是基本电荷， V_{Jtopcell} 是顶部电池的结电压， T 是温度。

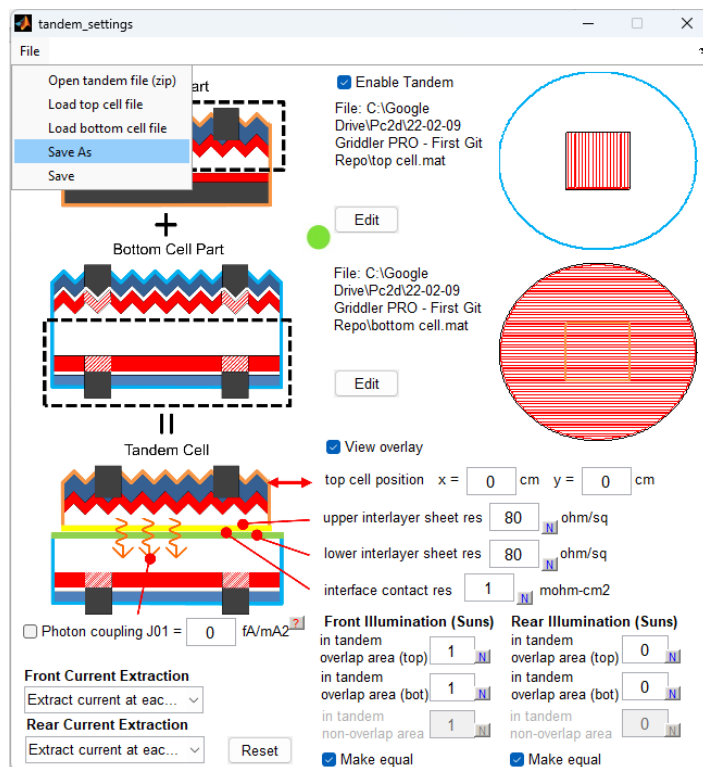
7. 当串联模式启用时, Griddler 主模拟屏幕也会有轻微变化。底部不再有可以输入光照度的空间 (已经移至串联设置屏幕)。代替它的是一个框, 您可以在非重叠区域中定义底部电池的 1-Sun J_{sc} 值 (在顶部电池小于底部电池的情况下)。



8. 与以前一样, 可以在 Griddler 主模拟屏幕上运行模拟。



9. 可以将整个串联电池会话保存为 zip 文件，并通过文件->打开串联文件 (.zip) 稍后检索它。



附录 A: 在 Cell Cross Sectional Diagram 和 Base Transport Calculator

页面中使用的数学公式

Griddler 2.5 PRO 中, cell cross sectional diagram 和 the base transport calculator 是连接 cmd PC1D 6-2, 以及外部用来计算电池透过率/吸收率的计算器 (例如 PV Lighthouse 提供的 OPAL2 和 Wafer Ray Tracer) 的界面。同时, 这两个界面还配备了许多有用的用以计算电流密度和复合参数的公式。这一小节我们将介绍这些公式, 以便于用户理解 Griddler 是怎样计算出这些数值的。

The screenshot shows the 'cell_diagram' window. It features a cross-sectional diagram of a solar cell with various layers and parameters. Below the diagram, there is a table of current density calculations. The table is divided into two main sections: 'front' and 'rear'. The 'front' section includes values for J_L , J_{FCA} , $J_{emitter\ coil\ loss}$, $J_{base\ coil\ loss}$, and an offset. The 'rear' section includes values for $J_{Si\ absorb}$, J_{FCA} , $J_{emitter\ coil\ loss}$, $J_{base\ coil\ loss}$, and an offset. Below the table, there are several calculated values for J_0 (passivated emitter, emitter metal contact, passivated BSF, and BSF metal contact) and their effective values.

Calculation	Value
$J_L = J(Si\ absorb) - J(FCA) - J(emitter\ coil\ loss) - J(base\ coil\ loss) + offset$	41.81
front	42.10
rear	37.70
$J_0, passivated\ emitter$	75.99 fA/cm ²
$J_0, emitter\ metal\ contact$	1089.2 fA/cm ²
$J_0, passivated\ BSF$	63.87 fA/cm ²
$J_0, BSF\ metal\ contact$	820.4 fA/cm ²
Effective Base Passivated J_01	179.3
Effective Base Metal J_01	179.3

The screenshot shows two windows: 'Base transport Parameters' and 'Base local contact calculator'. The 'Base transport Parameters' window includes fields for Wafer thickness, Wafer resistivity, Wafer type, Junction is at, Base doping, and mobilities. The 'Base local contact calculator' window includes fields for contact geometry, contact width/diameter, contact pitch, point contact area, point collection area, point contact resistance, bulk lifetime, contact SRV, rear passivation SRV, and effective rear J_01 , effective rear contact resistance, and effective base diff length.

Base transport Parameters

- simulate lateral base currents: ☐
- Wafer thickness: 180.0 um
- Wafer resistivity: 4.0 ohm-cm
- Wafer type: n
- Junction is at: front
- Base doping: 1.16e+15 cm⁻³
- update mobilities with Si base: ☒
- base e mobility: 1313 cm²/Vs
- base h mobility: 463 cm²/Vs

Base local contact calculator

- contact geometry: stripes
- contact width / diameter (um): 60.00
- contact pitch (mm): 1.730
- point contact area (um²): 1963.4
- point collection area (um²): 25000
- point contact resistance: 0.00 mohm-cm²
- bulk lifetime (us): 2000.0
- contact SRV (cm/s): 80.065
- rear passivation SRV (cm/s): 6.233
- In the Griddler pattern, the rear contact is with line width (um): 60.0
- pitch (mm): 1.73
- Effective rear J_01 : 179.3 fA/cm²
- Effective rear contact resistance: 0.0179 ohm-cm²
- Effective base diff length: 6792.5 um
- Calculate: ☒ Rs,light ☐ Rs,dark

A.1 限制条件

许多的计算都是基于硅基材料在 25°C 时的特性的。比如说电子和空穴的迁移率，光吸收系数、自由载流子吸收系数，以及掺杂层的特性如饱和电流密度 (J_{0e})，薄层电阻和内量子效率 (IQE)。因此，这些计算器是对硅基材料 25°C 时的情况才是精准的。在 Griddler 主页面 (simulation 页面)，您可以改变温度，那些饱和电流密度 J_0 将根据本征载流子浓度 $n_i(T)$ 调整 (见 2.7.2)。虽然这样做会近似得到电池在非标准温度下的工作状态，但它不是一个严谨的处理。在任何情况下，Griddler 并没有试图考虑所有的受温度影响的电池特性。因为这需要考虑许多因素，如缺陷能级，等等，这些目前超出了这个仿真程序的主要目的。

A.2 非金属区域的光致电流

A.2.1 综述

$$J_L = J_{Si\ absorption} - J_{loss,FCA} - J_{loss,emitter} - J_{loss,base} \quad (1)$$

其中 J_L 是光诱导电流密度 (在非金属区域)。在 cross section diagram 方框 1 中，一个附加的偏移电流密度也被包括在等式中，这允许用户调整计算的 J_L 以和实验结果相一致。偏移项是任意的，这里将不再赘述。在实际中，使用偏移项仍然是有意义的，因为它仍然允许用户探索 J_L 和变化的电池参数之间的关系。

A.2.2 不考虑自由载流子吸收的吸收电流密度

$$J_{Si\ absorption} = q \int_0^\infty A_{Si,no\ FCA}(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

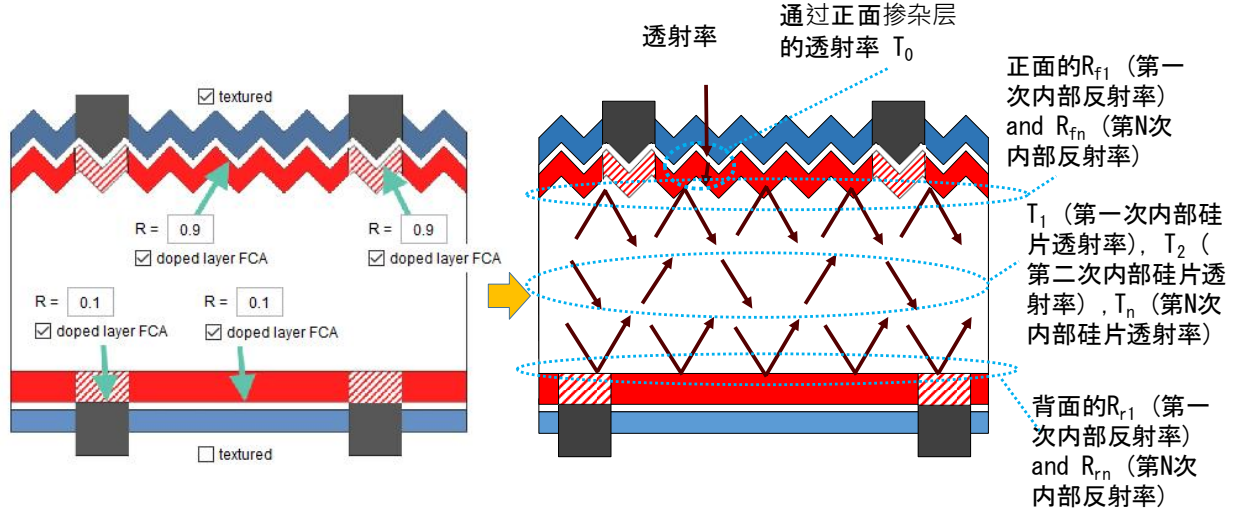
$J_{Si,absorption}$ 是在不考虑自由载流子吸收的情况下，太阳能电池中每单位面积的非金属活性区域吸收光子的速率，乘以单位电荷。这里， q 是基本电荷， λ 是波长， $\Phi(\lambda)$ 是单位波长的光子通量 ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{nm}^{-1}$)，代表入射光谱。 $A_{Si,no\ FCA}(\lambda)$ 是在没有自由载流子吸收的情况下，在电池中的光谱吸收率。

PRO 2.50034 版本之前，Griddler 一定是通过 “Illumination Optics” 窗口直接从其他计算程序导入 $A_{Si,no\ FCA}(\lambda)$ 。从 PRO 2.50034 版本开始，Griddler 2.5 PRO 将自动检测导入的数据行间是否包含有关硅片表面透射率的数据。如果导入的数据在 1200nm 处高于 30%，Griddler 则假定此曲线为透射率。然后，Griddler 会使用内部散射/陷光特性的计算公式计算所得的吸收率曲线：

$$A_{Si,no\ FCA}(\lambda) = T \frac{(1-T_1)+T_1 R_{b1}(1-T_2)+T_1 T_2 R_{b1} R_{f1}(1-T_n)(1+R_{bn} T_n)}{1-R_{bn} R_{fn} T_n^2} \quad (3)$$

其中 T 是透射率，等式 3 右侧的其余参数是 Basore [1] 首先发布的模型中的陷光特性参数。下图说明了

Griddler 在计算这些不同参数时考虑的因素。硅片两面的纹理（平面或金字塔纹理），金属区域和非金属区域的内部反射率以及硅片两面的金属图案，都包括在 T1, T2, Tn, Rf1, Rfn, Rb1, Rbn 的算法里面。



A.2.3 自由载流子吸收导致的电流密度损失

Griddler 使用跟公式 3 相似的内部散射计算公式计算自由载流子吸收的情况下的吸收率曲线

$$A_{Si,with FCA}(\lambda) = TT_0 \frac{\alpha_{BB}(\lambda)}{\alpha_{FCA}(\lambda, z) + \alpha_{BB}(\lambda)} \frac{(1-T_1') + T_1' R_{b1}' (1-T_2') + T_1' T_2' R_{b1}' R_{f1}' (1-T_n') (1+R_{bn}' T_n')}{1-R_{bn}' R_{fn}' T_n'^2} \quad (4)$$

在这里, T_1' , T_2' , T_n' , R_{f1}' , R_{fn}' , R_{b1}' , R_{bn}' 和 T_1 , T_2 , T_n , R_{f1} , R_{fn} , R_{b1} , R_{bn} 的分别在于前者考虑到硅片和掺杂区自由载流子吸收。额外项 T_0 是正面入射光通过侧掺杂层的透射率, 而 α_{BB} 是带间吸收系数 [2]。 $\alpha_{FCA}(\lambda, z)$ 是从参考 3 得出的自由载流子吸收系数:

$$\alpha_{FCA}(\lambda, z) = CN\lambda^\gamma, \{C = 1.80 \times 10^{-9}, \gamma = 2.18\} \text{ for p-Si, } \{C = 1.68 \times 10^{-6}, \gamma = 2.88\} \text{ for n-Si}$$

For $\lambda \geq 1000$ nm and

$$\alpha_{FCA}(\lambda, z) = 0$$

For $\lambda < 1000$ nm

(5)

其中 N 是以 cm^{-3} 为单位的掺杂浓度, λ 是以 nm 为单位的波长, α_{FCA} 的单位是 cm^{-1} 。虽然 ref2 中说的是只适用于掺杂浓度在 $10^{18} - 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的范围内, 但不管掺杂浓度是多少, 方程 6 都被应用于整个电池的计算。

此后, 由于自由载流子吸收而导致的电流密度损失为

$$J_{\text{loss}, FCA} = q \int_0^{\infty} (A_{Si, no FCA}(\lambda) - A_{Si, with FCA}(\lambda)) \Phi(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

A.2.4 较差的发射极收集导致的电流密度损失

$$J_{\text{loss}, emitter} \approx q \int_0^{600 \text{ nm}} A_{Si, no FCA}(\lambda) \Phi(\lambda) (1 - IQE_0(\lambda)) d\lambda \quad (7)$$

$J_{\text{loss}, emitter}$ 表示在发射层中的光生载流子的复合速率。在方程 7 中, $IQE_0(\lambda)$ 表示在有很厚的基底和很长的扩散长度的电池中, 由收集载流子与光生载流子的比率所定义的内量子效率。 $IQE_0(\lambda)$ 是由 cmd PC1D 6-2 计算的 [4]。注意, $A_{Si, no FCA}(\lambda)$ 是为了使用方便---严格地讲, 这里应该用 $A_{BB}(\lambda)$, 在考虑自由载流子吸收的情况下, 导致带-带跃迁 (电子-空穴对产生) 的吸收率。然而, 由于方程 7 中的积分范围是从 $0 \sim 600 \text{ nm}$ 的波长, 其中自由载流子吸收是微不足道的。所以可以假定 $A_{Si, no FCA}(\lambda) = A_{BB}(\lambda)$ 。在 $0 \sim 600 \text{ nm}$ 这个范围内积分, 这个范围是任选的。在 600 nm 处, 光穿透硅的深度约为 2.41 nm , 在实际应用中这个深度已经比大多数发射层深。对于大多数比较好的发射极来说, 600 nm 以上的 $IQE_0(\lambda)$ 接近于 1。然而, 对于非常差的发射极, 600 nm 以上的 $IQE_0(\lambda)$ 仍然可以显著低于 1, 而方程 7 将会低估因较差的发射极引起的实际收集损耗。

A.2.5 较差的基区收集导致的电流密度损失

$$J_{loss,base} = q \int_0^\infty \int_0^W g(\lambda, z)(1 - f_c(z)) dz d\lambda \quad (8)$$

$J_{loss,base}$ 代表光生载流子在基区复合的速率。在方程 8 中, $g(\lambda, z)$ 由方程 4 给出, $f_c(z)$ 是基区收集效率, 代表在深度 z 处收集的载流子与光生载流子的比率。如果 PN 结在正面, 基区的复合参数, $f_c(z)$ 写为

$$f_c(z) = \cosh\left(\frac{z}{L_D}\right) - \frac{S_{eff}L_D/D \cosh(w/L_D) + \sinh(w/L_D)}{S_{eff}L_D/D \sinh(w/L_D) + \cosh(w/L_D)} \sinh\left(\frac{z}{L_D}\right) \quad (8a)$$

如果 PN 结在背面

$$f_c(z) = \cosh\left(\frac{w-z}{L_D}\right) - \frac{S_{eff}L_D/D \cosh(w/L_D) + \sinh(w/L_D)}{S_{eff}L_D/D \sinh(w/L_D) + \cosh(w/L_D)} \sinh\left(\frac{w-z}{L_D}\right) \quad (8b)$$

w 是电池的厚度, L_D 是少数载流子在基底的扩散长度, D 是少数载流子的扩散系数, S_{eff} 是等效的背面复合速度 (如果 pn 结在正面; 那么如果 PN 结在背面, 则它是等效的正面复合速度), 其表达式将在下面进一步给出。

A.3 基区饱和复合电流密度

A.3.1 概述

基区总复合电流密度为

$$J_{recombination,base} = J_{01,base} \exp(qV/kT) + J_{02,base} \exp(qV/2kT) \quad (9)$$

其中 V 是局部二极管电压, T 是温度, k 是玻尔兹曼常数。 $J_{01,base}$ 和 $J_{02,base}$ 分别是理想因子 $n=1$ 和 $n=2$ 的二极管的饱和电流密度, 通常被称为太阳能电池的双二极管模型。计算器只提供 $J_{01,base}$ 的线性计算方程。在 cell cross sectional diagram 中, 如果选中 “Use rear J_0 base by local contact calculator” 的复选框, 则

$$J_{01,base} = \frac{qn_i^2 D}{NL_D} \frac{S_{eff}L_D/D \cosh(w/L_D) + \sinh(w/L_D)}{S_{eff}L_D/D \sinh(w/L_D) + \cosh(w/L_D)} \quad (10)$$

n_i 是硅的本征载流子浓度 [5], N 是基底中的掺杂浓度。在这种情况下, $J_{01,base}$ 可用于基区的任何地方 (或者说背面, 如果 PN 结在正面的话; 如果 PN 结在背面, 则正面)。如果图 1 中未选中 “Use rear J_0 base by local contact calculator” 复选框, 则 Griddler 使用

$$J_{01,base,pass1D} = \frac{qn_i^2 D}{NL_D} \frac{S_{pass} L_D / D \cosh(w/L_D) + \sinh(w/L_D)}{S_{pass} L_D / D \sinh(w/L_D) + \cosh(w/L_D)} \quad (11a)$$

$$J_{01,base,met1D} = \frac{qn_i^2 D}{NL_D} \frac{S_{met} L_D / D \cosh(w/L_D) + \sinh(w/L_D)}{S_{met} L_D / D \sinh(w/L_D) + \cosh(w/L_D)} \quad (11b)$$

$J_{01,base,pass1D}$ 应用于背面钝化区, $J_{01,base,met1D}$ 应用于背面金属区域。

A.3.2 局部接触电极的等效表面符合速度 S_{eff}

对于周期重复的局部接触电极的表面, 金属区域的表面复合速度 (SRV) 通常比非金属区域 (钝化区) 高。如果局部接触电极的形状是并排条形或者方形或者六边形排列的圆点, 那么 Saint-Cast 和他的同事给我们提供了用解析方程计算等效 SRV 的方式[6]

$$S_{eff} = \left((1-f)S_{pass} + S_{met} f \left(\frac{r_{spr} S_{pass} f + 1}{r_{spr} S_{met} f + 1} \right) \right) \times \left[\left(1 + \frac{L_D}{D} \tanh \left(\frac{w}{L_D} \right) \right) \left(S_{pass} - \left((1-f)S_{pass} + S_{met} f \frac{r_{spr} S_{pass} f + 1}{r_{spr} S_{met} f + 1} \right) \right) \right]^{-1} \quad (12)$$

f 是金属接触区域的面积, S_{pass} 是非金属区 (钝化区) 的 SRV, S_{met} 是金属区的 SRV, r_{spr} 是暗扩散电阻,

$$r_{spr} = \frac{1}{D} \left(\frac{A}{2\pi a} \operatorname{atan} \left(\frac{2w}{a} \right) + W(1 - \exp(-w/2p)) \right) \quad (13)$$

针对圆点形状的电极, a 是圆点电极的半径, w 是电池厚度, p 是两个电极中心之间的距离, A 是电极可用于收集电子的面积。

$$r_{spr} = \frac{1}{D} (p\gamma(a)/2 + w(1 - \exp(-w/2p))) \quad (14)$$

上面的公式适用于条形电极, γ 由下面的公式定义

$$\gamma(a) = \frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{\sqrt{\cosh(\pi a/4w) + 1}}{\sqrt{\cosh(\pi a/4w) - 1}} \right) \quad \text{if} \quad \tanh(\pi a/4w) \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (15a)$$

$$\gamma(a) = \pi \left[\ln \left(2 \frac{\sqrt{\cosh(\pi a/4w) + 1}}{\sqrt{\cosh(\pi a/4w) - 1}} \right) \right]^{-1} \quad \text{if} \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \leq \tanh(\pi a/4w) \leq 1 \quad (15b)$$

A.3.3 基区表面 J_0 和 SRVs 的转换

Cell cross sectional diagram 页面中框 2 的 $J_{0,passivated,BSF}$ 是和 base transport calculator 中框 4 的背面钝化区 SRV 相联系的。同样的, $J_{0,BSF,metal\ contact}$ 与金属区 SRV 想关联。这两组值可以通过下列公式进行转化

$$J_{0,passivated,BSF} = \frac{qn_i^2}{N} S_{pass} \quad (16a)$$

$$J_{0,metal,BSF} = \frac{qn_i^2}{N} S_{met} \quad (16b)$$

如果使用 cell cross sectional diagram 运行 cmd-PC1D 6-2 来计算 BSF 层的 $J_{0,passivated,BSF}$ 或者 $J_{0,metal,BSF}$, base transport calculator 页面中 S_{pass} 和 S_{met} 的值可以通过方程 16 来计算并更新。相反, 如果 base transport calculator 页面中 S_{pass} 和 S_{met} 被改变, cell cross sectional diagram 页面可以用方程 16 来计算相应的 $J_{0,passivated,BSF}$ 和 $J_{0,metal,BSF}$ 。

A.4 Auger 和辐射复合

参见 Richter 和 Glunz[9]的公式。Auger 和辐射复合构成了固有复合过程, 它设定了硅太阳能电池效率的上限。在 Griddler 中, 假定费米能级分裂是恒定的, 并且在整个硅晶片的厚度处等于结区的值。

A.5 局部电极区域由于电流集边效应, 横向电流和接触电阻引起的基区电阻

A.5.1 概述

基区电阻 (与 base transport calculator 中框 4 “effective rear contact resistance” 有关) 包含三部分

$$R_{s,base} = R_{s(lat)} + R_{s(crowd)} + R_{s(contact)} \quad (17)$$

$R_{s(lat)}$ 指基区横向电流通过遇到的电阻, $R_{s(crowd)}$ 指局部电极附近的电阻, 电极附近电流密度增大。 $R_{s(contact)}$ 指电极本身的接触电阻。

A.5.2 计算背面等效电阻

$R_{s,base}$ 以 Ωcm^2 为单位。如果电池背面是全覆盖金属, 那么 $R_{s,base} = \rho_{c,eff}$, 其中 $\rho_{c,eff}$ 是等效金属栅线的电阻, 也就是 base transport calculator 页面的框 4 “effective rear contact resistance”。如果背面是金属栅线, 那么, $\rho_{c,eff} = R_{s,base}/f$, f 是金属栅线覆盖率。

A.5.3 电流集边效应引起的基区电阻

Cuevas [7] 和 Saint-Cast and coworkers [6] 都推倒过由集边效应引起的电阻。前者推导的公式是

$$R_{s(crowd)} = \rho \int_w^0 \frac{A}{A_{crowd}(x)} dx \quad (18)$$

$$A_{crowd}(x)_{point} = \pi a^2 + \pi^2 a(w - x) + 2\pi(w - x)^2 \quad (19)$$

$$A_{crowd}(x)_{linear} = 2a + \pi(w - x) \times 1cm \quad (20)$$

后者的公式为 [7]

$$R_{s(crowd)} = D\rho r_{spr} \quad (21)$$

其中, r_{spr} 由公式 13,14 定义。在 base transport calculator 框 4 中, 如果“calculate $R_{s,light}$ ”选项被勾选, 那么将使用公式 18-20。如果“calculate $R_{s,dark}$ ”选项被勾选, 则使用公式 13-14 以及 21 (参见 A4.6)。

A.5.4 横向电流引起的基区电阻

对于圆点形电极来说[8],

$$R_{s(lat)} = \rho \frac{A}{2\pi w} \left[\frac{r_{max}^2}{r_{max}^2 - r_{min}^2} \ln\left(\frac{r_{max}}{r_{min}}\right) - \frac{1}{2} \right] \quad (22)$$

ρ 是基区电阻率, w 是电池厚度, A 是一个电极用于收集电子的面积。 $r_{max} = \sqrt{A/\pi}$, $r_{min} = a + w\pi/4$ 其

中 a 是圆点形电极的半径。对于条形电极, 我们根据功耗电阻来计算

$$R_{s(lat)} = \frac{\rho s(s-2a)}{12w} \quad (23)$$

其中 s 是电极之间的间距, a 是条形电极宽度的一半。

如果电池背面是栅线设计, 那么 Griddler 仿真本身也会模拟横向电流流向栅线。因此, 在这种情况下, 如果等效的背面接触电阻也考虑横向电流感应电阻, 这个效应将会被考虑两次。因此, 在这种特殊情况下, base transport calculator 将减去与等式 19 相似的一个项, 其中 s 是电极之间的间距, a 是条形电极宽度的一半。

A.5.5 接触电阻引起的基区电阻

这一项非常简单

$$R_{s(contact)} = \frac{\rho_c}{f} \quad (24)$$

其中, ρ_c 是接触电阻, f 是电极覆盖率。

A.5.6 $R_{s,light}$ 和 $R_{s,dark}$

在 base transport calculator, 框 4 中, 有一个选项可以选择 $R_{s,light}$ 还是 $R_{s,dark}$ 。前者指的是当太阳能电池被照明时, 电流流动所遇到的阻力, 也就是说, 在整个电池平面中, 光生电流密度是相当均匀的。后者指的是当太阳能电池在黑暗中被正向偏置时, 电流流动所遇到的阻力。在 base transport calculator 中, 使用了以下这些设定:

如果选择计算 $R_{s,dark}$:

1. $R_{s(lat)}$ 设置为零
2. $R_{s(crowd)}$ 使用公式 13-14, 21 计算
3. $R_{s(contact)}$ 使用公式 24 计算

如果选择计算 $R_{s,light}$:

1. $R_{s(lat)}$ 使用方程 22-23 计算
2. $R_{s(crowd)}$ 使用方程 18-20 计算
3. $R_{s(contact)}$ 使用公式 24 计算

4. 如果电池背面是栅线设计, 那么 Griddler 仿真本身也将模拟横向电流流向栅线。因此, 在这种情况下, 如果等效的背面接触电阻也考虑横向电流感应电阻, 这个效应将会被考虑两次。因此, 在这种特殊情况下,

base transport calculator 将减去与等式 18 相似的一个项, 其中 s 是电极之间的间距, a 是条形电极宽度的一半。

5. 计算所得的 $R_{s,light}$ 一定不会比 $R_{s,dark}$ 低。如果不是这样的话, 那么采用 $R_{s,dark}$ 。

References

1. Paul Basore, "Extended spectral analysis of internal quantum efficiency" Conference Record of the Twenty Third IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1993 (Cat. No.93CH3283-9)
2. Martin A. Green, "Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients", Solar Energy Materials & Solar Cells 92 (2008) 1305–1310
3. Simeon C. Baker-Finch, Keith R. McIntosh, Di Yan, Kean Chern Fong, and Teng C. Kho, "Near-infrared free carrier absorption in heavily doped silicon", Journal of Applied Physics 116, 063106 (2014); doi: 10.1063/1.4893176
4. Halvard Haug, Achim Kimmerle, Johannes Greulich, Andreas Wolf, Erik Stensrud Marstein, "Implementation of Fermi–Dirac statistics and advanced models in PC1D for precise simulations of silicon solar cells", Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 131, December 2014, Pages 30-36.
5. A. B. Sproul and M. A. Green, "Improved value for the silicon intrinsic carrier concentration from 275 to 375K", J. Appl. Phys. 70 (1991) pp. 846-854.
6. Pierre Saint-Cast, Marc Rüdiger, Andreas Wolf, Marc Hofmann, Jochen Rentsch, and Ralf Preu, "Advanced analytical model for the effective recombination velocity of locally contacted surfaces" Journal of Applied Physics 108, 013705 (2010)
7. Andres Cuevas, "Electrons and holes in solar cells with partial rear contacts", Prog. Photovolt: Res. Appl. 2014; 22:764–774
8. Andres Cuevas, "Geometrical Analysis of Solar Cells With Partial Rear Contacts", IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 2, NO. 4, OCTOBER 2012
9. Armin Richter and Stefan W. Glunz, "Improved quantitative description of Auger recombination in crystalline silicon", PHYSICAL REVIEW B 86, 165202 (2012)

附录 B: 比较 Griddler 2 和 Gridsim 以及双二极管模型

Griddler 2 是搭载了以互相连接的二极管构成的太阳能电池的网络化模型的有限元模型 (FEM) 计算器。Griddler 2 将电池的正面和背面网络化为节点 (node) 和三角形元素 (triangular elements)。它在定义了每个节点接收到的光电流, 以及正面背面平面上的端节点 (terminal node) 电压之后, 计算正面和背面每一个节点的电压。对于每一个栅线设计, 电池正面和背面的电压空间分布的解是与其定义的电流流动模型相对应的。因此, 在计算由横向电流流动引起的欧姆功耗方面, Griddler 2 比其他简单的功耗公式更为准确。这些简单的功耗公式基于两条简化条件来假定一个特定的电流流动模型: 条件 1) 每一个节点都是一个电流源并有相同的电流密度; 条件 2) H-pattern 的栅线设计中, 电流垂流向最近的细栅, 然后平行细栅流向主栅。如果电池设计不是 H-pattern (比如说, 背面是全覆盖的金属), 或者当电池端电压超过最大功率点时, 这两条简化条件将不成立。理论上讲, 由于简单的功率损耗公式假设了一个电流模型的特定解, 这会形成一个强制的约束, 根据能量最小化原理, 它一定会高估欧姆功耗。但是某些情况下, 高估的程度可能很小。在计算电池端电压时, Griddler 2 通常也比双二极管模型更为准确。因为 Griddler 2 包含了电池平面内横向电流以及电压的模拟。

理论上讲, 当简化条件被满足时, 简单功率耗散公式是准确的。在下列情况下, 简化条件是可以满足的 1) 当端电压远远小于最大功率点时, 或者说二极管没有达到开启电压时, 那么每个节点的电流密度大致是相同的; 2) 当电池的金属栅线平面设计大致复合简化条件的描述时。所以, 在一些特殊情况中, 上述条件被满足时, 简单功耗公式基本上是准确的, 并且其计算结果可以为 Griddler 2 提供一个基准。

另一方面, 当电池平面非常导电 (电池平面中电压的扰动最小化) 时, 双二极管模型也是准确的。在这种情况下, 每个节点的电压都可以看做是端电压, 所有的节点二极管都可以看做的是并联。这种情况下, 双二极管模型就可以用于端电压的准确计算, 也可以作为比较 Griddler 2 的基准。

B.1 比较用 Griddler 2 和 GridSim 5.3 计算欧姆功率消散

表 1. 模拟条件及其功率耗散结果

	Shading	front finger Rs loss	front emitter Rs loss	rear finger Rs loss	rear emitter Rs loss	front BB loss	front ribbon loss	contact loss	internal Rs loss
	%	mW/cm2	mW/cm2	mW/cm2	mW/cm2	mW/cm2	mW/cm2	mW/cm2	mW/cm2
	Griddler	Gridsim	Griddler	Gridsim	Griddler	Gridsim	Griddler	Gridsim	Griddler
gridsim_82_finger_test_for_finger_&_emitter_losses_1Sun_0mV	5.94496	5.94749	0.27546	0.28877	0.32493	0.33379			
gridsim_82_finger_test_for_finger_&_emitter_losses_rear_1Sun_0mV	5.94496	5.94749		0.27136	0.28877	0.33379			
gridsim_82_finger_test_for_finger_&_emitter_losses_rear_1Sun_0mV_rear_illum	5.94496	5.94749		0.27546	0.28877	0.33379			
gridsim_160_finger_test_for_r_BB_losses_1Sun_0mV	4.81383	4.87673				0.11542	0.11987		
gridsim_160_finger_test_for_r_ribbon_losses_1Sun_0mV	4.83213	4.87673					0.39318	0.40739	
gridsim_160_finger_test_for_r_BB_losses_1Sun_0mV	4.83213	4.87673				0.11498	0.11987		
gridsim_160_finger_test_for_r_ribbon_losses_1Sun_0mV	4.83213	4.87673					0.39319	0.40739	
gridsim_82_finger_test_for_contact_losses_1Sun_0mV	6.87903	6.96844						0.34586	0.34707
gridsim_82_finger_test_for_contact_losses_1Sun_0mV_low_rho	6.87903	6.96844						0.04616	0.04642
gridsim_160_finger_test_for_r_internal_Rs_1Sun_0mV									0.13954
									0.13627259

GridSim 5.3 是 A. Mette 开发并由 M. Hoerteis 做了小部分修改的一个用于计算 H-pattern 电池功率损耗的 excel 表格。表 1 比较了分别 GridSim 和 Griddler 2 计算功率损耗的结果。表 1 每行的最左边一列，标明的是 H-pattern 的相关细节。每一种模拟条件都尽量保证满足简单功率耗散公式的简化条件，从而使其电流流动模型尽可能的接近实际。

每一个 H-pattern, Griddler 2 都是用的最粗略的网格化模型。这里是故意这样做的以检测 Griddler 2 在用粗略网格模型时也有一定的准确度。预期如果采用更精细的网格划分, Griddler 2 的结果将更加准确。从表格中可以看出, 两个模型计算的功率耗散的区别都在 6.5% 之内。

同时, Griddler 2 和 GridSim 计算的光遮挡率的区别都在 1.5% 之内。

B.2 比较用 Griddler 2 和双二极管模型计算开路电压

表 2. 模拟条件及其开路电压结果

	Suns	Front Side				Rear Side				Edge Recombination		Internal Shunt	Griddler	Hand Calc*
		Passivated Area		Metal Contact		Passivated Area		Metal Contact					Voc	Voc
		J01	J02	J01	J02	J01	J02	J01	J02	J01	J02		(mV)	(mV)
		(fA/cm2)	(nA/cm2)	(fA/cm2)	(nA/cm2)	(fA/cm2)	(nA/cm2)	(fA/cm2)	(nA/cm2)	(fA/cm2)	(nA/cm2)	(ohm-cm2)		
case1	0.1	200	10	600	50	0	0	200	20	0	0	0	568	566
case2	1	200	10	600	50	0	0	200	20	0	0	0	640	639
case3	0.1	200	0	600	0	0	0	200	0	0	0	0	586	588
case4	1	200	0	600	0	0	0	200	0	0	0	0	647	645
case5	1	200	0	600	0	0	0	200	0	1000	0	0	635	634
case6	0.1	200	0	600	0	0	0	200	0	1000	0	0	576	574
case7	0.1	200	10	300	50	0	0	200	10	1000	200	0	541	540
case8	1	200	10	300	50	0	0	200	10	1000	200	0	624	622
case9	1	200	10	600	50	0	0	200	20	0	0	100	635	633
case10	0.1	200	10	600	50	0	0	200	20	0	0	100	366	365

双二极管模型中, 总光致电流等于每个节点光致电流的和, 总饱和复合电流密度也是每个节点饱和复合电流密度的和。

$$J_{01} = J_{01, \text{front passivated area}} \times (1 - f_{\text{front metal}}) + J_{01, \text{front metal contact}} \times f_{\text{front metal}} + J_{01, \text{rear passivated area}} \times (1 - f_{\text{rear metal}}) + J_{01, \text{rear metal contact}} \times f_{\text{rear metal}} + J_{01, \text{edge}} \times L_{\text{edge}} / A_{\text{wafer}}$$

$$J_{02} = J_{02, \text{front passivated area}} \times (1 - f_{\text{front metal}}) + J_{02, \text{front metal contact}} \times f_{\text{front metal}} + J_{02, \text{rear passivated area}} \times (1 - f_{\text{rear metal}}) + J_{02, \text{rear metal contact}} \times f_{\text{rear metal}} + J_{02, \text{edge}} \times L_{\text{edge}} / A_{\text{wafer}}$$

上述模拟的每一种情况都是在电池正面和背面横向电导最大化的条件下进行的。

可以看出两种模型计算所得的开路电压差别在 1-2 mV 之内。

附录 C: 比较 Griddler2.5 PRO(v2.50021) cmd-PC1D-6.2 Caller 和 EDNA2 (v2.5.5)对硼和磷发射极的计算

C.1 背景

Griddler 2.5 PRO 搭载了与 cmd-PC1D-6.2 [1] 相链接的 cell cross sectional diagram 页面, 用以计算掺杂层饱和复合电流密度 J_{0e} , 以及内量子效率 IQE。cmd-PC1D-6.2 和 PC1Dmod 6-2 是挪威能源技术研究所 (IFE) 编写的快速一维半导体器件模拟器中, 以命令行执行的图形用户界面版本。它是开源的并且可以免费下载。另一个广为人知的免费的硅太阳能电池 J_{0e} , IQE 计算器是 PV Lighthouse 开发并提供在线应用的 EDNA2 [2]。上一个版本的 cmd-PC1D-6.2 (v6.1)的作者及其合作者, 比较了用 cmd-PC1D-6.1 和 EDNA2 计算高斯分布的硼和磷掺杂区 J_{0e} 的情况, 并发现两者基本吻合[3]。这一小节, 我们将会比较用 cmd-PC1D-6.2 和 EDNA2 (v2.5.5) 同时计算 J_{0e} 和 IQE, 并且计算中涉及的硼磷掺杂区掺杂曲线均为采用电化学电容-电压法测得的实际曲线。需要强调的是, cmd-PC1D-6.2 的计算结果是通过运行 Griddler 2.5 PRO (v2.50021)获得的。所以, 我们实际比较的是 Griddler 2.5 PRO (v2.50021) cmd-PC1D-6.2 Caller 和 EDNA2 (v2.5.5)。

表 1. 两种计算中应用的参数

	Griddler 2.5 PRO (v2.50021) cmd-PC1D-6.2 Caller	EDNA2 (v2.5.5)
计算硼掺杂区时, 磷的背景掺杂	$2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
计算磷掺杂区时, 硼的背景掺杂	$8.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$8.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
俄歇复合	Richter 2012 [4]	Richter 2012 [4]
发射极体载流子寿命	100 us	100 us
电压条件	0.55 V	0.55 V
载流子迁移率	Klaassen 1992 [5,6] for sheet resistance, Schindler 2014 [7] for J_{0e} and IQE	Klaassen 1992 [5,6]
载流子分布	Fermi Dirac	Fermi Dirac
掺杂离子化情况	Altermatt 2006 [8,9]	Altermatt 2006 [8,9]
带隙变窄效应	Yan and Cuevas 2013 [10,11]	Schenk 1998 [12]
发射极体电场	Poisson equation	Quasi-neutral approximation

表 1 比较了两个模拟器中使用的参数。两个模拟器在模拟过程中稍稍有些区别。比如, EDNA2 假设发射极是准中性的; 但 cmd-PC1D-6.2 有计算发射极中的电场。这两个模拟器在计算带隙变窄效应方面也略有不同。

我们利用两个模拟器计算了许多不同硼和磷掺杂的情况。当计算硼掺杂区的情况时, 磷的体掺杂浓度是 $2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。当计算磷掺杂区的情况时, 硼的体掺杂浓度是 $8.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。体 SRH 寿命一直都被设

为 100us。每种情况的表面复合速度 (SRV) 都不尽相同, 详情参见表 2 和表 3。

C.2 瞬发发射极计算

表 2 比较了两个模拟器计算的薄层电阻, J_{0e} 和波长为 300, 350, 400 和 450 nm 时的 IQE。EMITTERPASSSRV 列是模拟中使用的电池正面表面 SRV。

表 2. 两个模拟器计算的薄层电阻, J_{0e} 和 IQE

Griddler 2.5 PRO (v2.50021) cmd-PC1D-6.2 Caller												EDNA2											
Dopant Profile	FRONTLAYER SHEETRES	EMITTERPASSSRV	PASSEMITTERSRV	ERJ0	(A/cm2)	EMITTERIQE	300	350	400	450	(%)	Dopant Profile	FRONTLAYER SHEETRES	EMITTERPASSSRV	PASSEMITTERSRV	ERJ0	(A/cm2)	EMITTERIQE	300	350	400	450	(%)
1	94.2	0	15.2	99.1	99.1	99.1	99.1	99.1	99.1	99.1	99.1	1	93.9	0	16.2	99	99	99	99	99	99.1	99.3	99.3
2	60.8	0	36.7	96.9	96.9	97.6	98.7	98.7	98.7	98.7	98.7	2	60.8	0	44.2	96.5	96.5	96.5	96.5	96.5	97.2	98.2	98.2
3	26.3	0	68.9	86.5	86.5	86.7	88.7	88.7	88.7	88.7	88.7	3	26.3	0	76.3	85.7	85.7	85.7	85.7	85.7	85.9	88.2	88.2
4	92.7	0	18.2	98.9	98.9	99.0	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	4	92.7	0	19.7	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8	99	99.3	99.3
5	84.6	0	20.5	98.7	98.7	98.8	99.2	99.2	99.2	99.2	99.2	5	84.6	0	22.2	98.6	98.6	98.6	98.6	98.6	98.7	99.1	99.1
6	92.1	0	18.4	98.9	98.9	99.0	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	6	92.1	0	19.9	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8	98.9	99.2	99.2
7	92.5	0	18.0	98.9	98.9	99.1	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	7	92.5	0	19.4	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8	99	99.3	99.3
8	54.7	0	40.8	96.1	96.1	96.9	98.3	98.3	98.3	98.3	98.3	8	54.7	0	49.5	95.7	95.7	95.7	95.7	95.7	96.5	97.6	97.6
12	465.4	0	1.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	12	468	0	1.43	100	100	100	100	100	100	100	100
13	531.2	0	1.1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	13	535	0	1.13	100	100	100	100	100	100	100	100
14	132.3	0	8.4	99.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	14	132	0	8.77	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.7	99.7
15	125.8	0	9.0	99.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	126	0	9.44	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.6	99.7	99.7
16	146.1	0	7.3	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	16	146	0	7.64	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.8	99.8
1	94.2	10000	180.6	80.6	80.7	84.2	90.3	95.4	95.4	95.4	95.4	1	93.9	10000	186	80.7	80.7	80.8	80.8	80.8	83.9	89.5	89.5
2	60.8	10000	103.1	86.2	86.4	90.9	95.4	95.4	95.4	95.4	95.4	2	60.8	10000	116	86.6	86.6	86.7	86.7	86.7	90.4	94.1	94.1
3	26.3	10000	126.6	64.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3	26.3	10000	136	64.8	64.8	64.9	64.9	64.9	66.8	74	74
4	92.7	10000	100.1	90.2	90.3	92.5	95.7	95.7	95.7	95.7	95.7	4	92.7	10000	107	90	90	90	90	90	92	94.7	94.7
5	84.6	10000	94.5	90.2	90.3	92.4	95.6	95.6	95.6	95.6	95.6	5	84.6	10000	101	89.8	89.9	89.9	89.9	89.9	91.8	94.6	94.6
6	92.1	10000	103.2	89.9	90.0	92.3	95.6	95.6	95.6	95.6	95.6	6	92.1	10000	109	89.6	89.7	89.7	89.7	89.7	91.8	94.5	94.5
7	92.5	10000	99.2	90.3	90.4	92.6	95.7	95.7	95.7	95.7	95.7	7	92.5	10000	105	90	90	90	90	90	92	94.8	94.8
8	54.7	10000	99.8	85.5	85.6	90.0	94.9	94.9	94.9	94.9	94.9	8	54.7	10000	114	85.8	85.9	85.9	85.9	85.9	89.6	93.3	93.3
12	465.4	10000	195.6	95.1	95.2	96.9	98.5	98.5	98.5	98.5	98.5	12	468	10000	200	95	95	95	95	95	96.6	97.7	97.7
13	531.2	10000	241.5	94.5	94.6	96.5	98.3	98.3	98.3	98.3	98.3	13	535	10000	246	94.5	94.5	94.6	94.6	94.6	96.2	97.2	97.2
14	132.3	10000	126.2	89.6	89.6	91.6	94.9	94.9	94.9	94.9	94.9	14	132	10000	130	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	91.3	93.9	93.9
15	125.8	10000	138.5	87.9	88.0	90.1	93.9	93.9	93.9	93.9	93.9	15	126	10000	143	88	88	88	88	88	89.9	92.9	92.9
16	146.1	10000	148.1	88.9	88.9	91.2	94.7	94.7	94.7	94.7	94.7	16	146	10000	152	88.6	88.7	88.7	88.7	88.7	90.8	94.1	94.1
1	94.2	1000	35.1	96.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1	93.9	1000	36.5	96.8	96.8	96.8	96.8	96.8	97.2	98.2	98.2
2	60.8	1000	44.1	95.7	95.7	96.8	98.3	98.3	98.3	98.3	98.3	2	60.8	1000	52.1	95.4	95.4	95.4	95.4	95.4	96.5	97.7	97.7
3	26.3	1000	76.4	83.7	83.7	84.2	86.8	86.8	86.8	86.8	86.8	3	26.3	1000	84	83	83	83	83	83.5	86.3	86.3	86.3
4	92.7	1000	27.2	98.0	98.0	98.3	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	4	92.7	1000	29.2	97.9	97.9	97.9	97.9	97.9	98.2	98.6	98.6
5	84.6	1000	28.5	97.7	97.8	98.1	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8	5	84.6	1000	30.8	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	98	98.6	98.6
6	92.1	1000	27.7	97.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	6	92.1	1000	29.7	97.8	97.8	97.8	97.8	97.8	98.2	98.7	98.7
7	92.5	1000	28.8	98.0	98.0	98.3	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	7	92.5	1000	28.8	97.9	97.9	97.9	97.9	97.9	98.2	98.8	98.8
8	54.7	1000	47.4	94.9	94.9	96.2	97.9	97.9	97.9	97.9	97.9	8	54.7	1000	56.6	94.6	94.6	94.7	94.7	94.7	95.7	97.1	97.1
12	465.4	1000	21.8	99.5	99.5	99.7	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	12	468	1000	22.2	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.6	99.7	99.7
13	531.2	1000	26.4	99.4	99.4	99.6	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	13	535	1000	26.9	99.4	99.4	99.4	99.4	99.4	99.6	99.7	99.7
14	132.3	1000	21.4	98.5	98.5	98.7	99.2	99.2	99.2	99.2	99.2	14	132	1000	22.2	98.5	98.5	98.5	98.5	98.5	98.7	99.1	99.1
15	125.8	1000	23.5	98.2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	126	1000	24.3	98.2	98.2	98.3	98.3	98.3	98.5	98.9	98.9
16	146.1	1000	22.9	98.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	16	146	1000	23.7	98.4	98.4	98.5	98.5	98.5	98.7	99.2	99.2

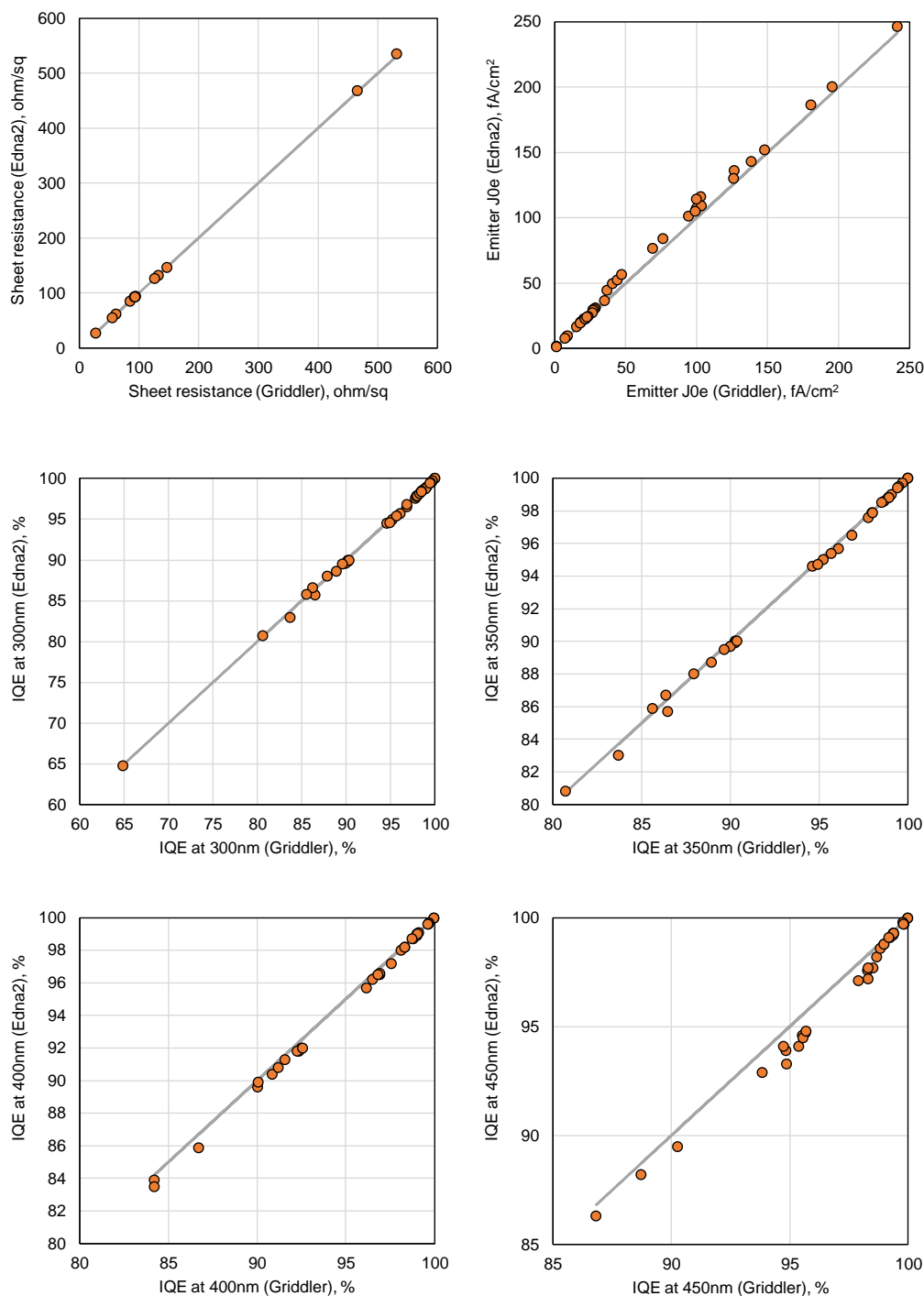


图 1. 表 2 结果的相应图形展示。每幅图中的灰色线条表示完全吻合。

图 1 以图形方式展示了两种模拟器的计算结果。其结果吻合得很好。对于薄层电阻, J_{0e} , IQE300, IQE350, IQE400, IQE450 的计算, 两个模拟器之间的平均分数偏差分别为 0.17%, 6.8%, 0.18%, 0.21%, 0.3%,

0.57%。因此，在实际应用中的对硼发射极的计算，两个模拟器可以互换使用。

C.3 磷发射极计算

表 3 比较了两个模拟器计算的薄层电阻， J_{0e} 和波长为 300, 350, 400 和 450 nm 时的 IQE。EMITTERPASSSRV 列是模拟中使用的电池正面表面 SRV。

表 3. 两个模拟器计算的薄层电阻， J_{0e} 和 IQE

Griddler 2.5 PRO (v2.50021) cmd-PC-ID-6.2 Caller										EDNA2									
Dopant Profile	FRONTLAYER RSHEETRES	EMITTERPASSSRV (cm/s)	PASSEMITT ERJ0	EMITTERIQE (%)	300 (%)	350 (%)	400 (%)	450 (%)	Dopant Profile	FRONTLAYER RSHEETRES (ohm/sq)	EMITTERPASSSRV (cm/s)	PASSEMITT ERJ0 (fA/cm2)	EMITTERIQE (%)	300 (%)	350 (%)	400 (%)	450 (%)		
1	126.9	0	20.3	98.9	99.0	99.3	99.7	99.9	1	127	0	20.6	98.8	98.9	99.5	99.6	99.6		
3	140.6	0	15.3	99.2	99.3	99.7	99.9	99.9	3	141	0	15.8	99	99.1	99.6	99.7	99.7		
6	94.9	0	22.1	97.3	97.6	99.3	99.7	99.7	6	94.6	0	22.6	97	97.2	99.1	99.4	99.4		
9	645.8	0	2.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	9	660	0	2.45	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0		
11	55.6	0	39.1	93.9	94.1	97.1	98.6	98.6	11	55.6	0	39.7	93	93.1	96.6	98.1	98.1		
13	77.6	0	30.0	97.0	97.1	98.5	99.3	99.3	13	77.6	0	30.5	96.6	96.7	98.3	99	99		
15	87.9	0	17.0	97.0	97.3	99.3	99.7	99.7	15	87.9	0	18.1	95.9	96.3	99	99.4	99.4		
16	129.3	0	12.4	98.8	99.0	99.7	99.9	99.9	16	129	0	12.8	98.1	98.4	99.6	99.7	99.7		
22	28.3	0	43.2	65.0	65.7	84.4	93.6	93.6	22	28.3	0	43.4	62	62.4	81.7	91.4	91.4		
23	51.3	0	27.8	88.5	89.2	96.6	98.7	98.7	23	51.3	0	29.3	86.4	86.9	95.5	97.7	97.7		
24	66.7	0	32.3	96.2	96.4	98.3	99.3	99.3	24	66.7	0	32.9	95.6	95.8	98	98.7	98.7		
27	48.7	0	39.6	93.0	93.4	96.8	98.5	98.5	27	48.7	0	40.2	91.3	91.7	96.2	97.8	97.8		
30	42.9	0	56.5	92.1	92.1	93.0	95.5	95.5	30	43.1	0	56.7	91.7	91.8	92.4	94.4	94.4		
31	129.4	0	12.4	98.8	98.9	99.7	99.9	99.9	31	129	0	13	98.4	98.6	99.6	99.7	99.7		
33	490.7	0	4.4	99.9	99.9	100.0	100.0	100.0	33	494	0	4.48	99.9	99.9	100	100	100		
34	195.0	0	9.0	99.6	99.7	99.9	100.0	100.0	34	196	0	9.36	99.5	99.6	99.9	99.9	99.9		
35	69.4	0	31.3	96.7	96.8	98.1	99.0	99.0	35	69.1	0	31.63	96	96.1	97.8	98.7	98.7		
39	103.4	0	17.6	98.4	98.6	99.6	99.9	99.9	39	103	0	18	98.3	98.5	99.5	99.6	99.6		
40	118.1	0	14.7	98.5	98.7	99.7	99.9	99.9	40	118	0	15	98.3	98.6	99.6	99.7	99.7		
41	144.0	0	12.7	99.1	99.2	99.8	99.9	99.9	41	144	0	13	99	99.2	99.7	99.8	99.8		
42	47.6	0	26.3	83.0	83.6	94.8	98.1	98.1	42	47.7	0	27.2	82.4	82.9	91.9	93.6	93.6		
43	71.3	0	18.1	91.4	92.0	98.0	99.3	99.3	43	71.2	0	18.9	90.9	91.4	95.5	96	96		
45	84.9	0	21.3	97.0	97.3	99.2	99.7	99.7	45	85.3	0	22	96.4	96.7	98.9	99.3	99.3		
1	126.9	465.403118	20.7	98.9	98.9	99.6	99.6	99.8	1	127	465.403118	21	98.8	98.8	99.5	99.6	99.6		
3	140.6	20083.03236	20.2	98.6	98.8	99.6	99.6	99.8	3	141	20083.03236	20.8	98.4	98.6	99.5	99.6	99.6		
9	645.8	4.941164	2.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	9	660	4.941164	2.49	100	100	100	100	100		
11	55.6	3826.742926	40.5	93.4	93.6	96.9	98.6	98.6	11	55.6	3826.742926	41.1	92.5	92.6	96.4	98	98		
13	77.6	928.601302	30.5	96.9	97.0	98.5	99.3	99.3	13	77.6	928.601302	31	96.5	96.6	98.3	98.9	98.9		
15	87.9	4548092.492	91.9	48.0	56.3	91.7	97.2	97.2	15	87.9	4548092.492	87.5	38.6	47.8	88.7	93.5	93.5		
16	129.3	928601.3016	66.5	80.8	84.6	97.2	99.0	99.0	16	129	928601.3016	65.1	73.6	78.5	95.7	97.4	97.4		
22	28.3	10000000	56.1	10.0	13.8	66.4	86.9	86.9	22	28.3	10000000	55.6	6.72	10.2	62.7	83.2	83.2		
23	51.3	153620.5402	40.4	70.2	72.4	92.4	97.2	97.2	23	51.3	153620.5402	41.8	66.7	68.6	90.5	95.2	95.2		
24	66.7	175850.7756	51.9	89.2	90.3	96.6	98.6	98.6	24	66.7	175850.7756	52.8	86.9	88.3	95.8	97.4	97.4		
27	48.7	10000000	107.0	33.2	41.9	83.9	93.5	93.5	27	48.7	10000000	99.8	22.5	32.2	81.3	90.7	90.7		
31	129.4	928601.3016	66.5	80.7	84.5	97.2	99.0	99.0	31	129	928601.3016	67	75.7	80.4	96	97.6	97.6		
34	195.0	10000000	224.8	70.7	77.4	96.1	98.6	98.6	34	196	10000000	219	63.3	72.4	94.4	96.2	96.2		
35	69.4	19401.23107	35.7	95.7	95.9	97.7	98.9	98.9	35	69.1	19401.23107	36.2	94.6	94.9	97.4	98.4	98.4		
39	103.4	10000000	130.9	49.4	59.4	92.9	97.6	97.6	39	103	10000000	140	44.3	55.8	89.4	92.1	92.1		
40	118.1	10000000	126.8	48.9	59.2	93.2	97.8	97.8	40	118	10000000	131	42.5	54.4	89.6	92.5	92.5		
41	144.0	10000000	150.9	56.9	66.3	94.7	98.2	98.2	41	144	10000000	157	50.8	62.2	91.4	93.6	93.6		
42	47.6	10000000	54.4	16.7	22.5	78.4	92.4	92.4	42	47.7	10000000	56.2	13.3	19	66.7	74	74		
43	71.3	10000000	63.3	24.5	32.7	84.9	94.9	94.9	43	71.2	10000000	66	19.6	27.6	66.8	71	71		
45	84.9	138940.6378	38.0	89.5	90.9	97.8	99.2	99.2	45	85.3	138940.6378	43.2	85.5	87.3	96.7	98.1	98.1		

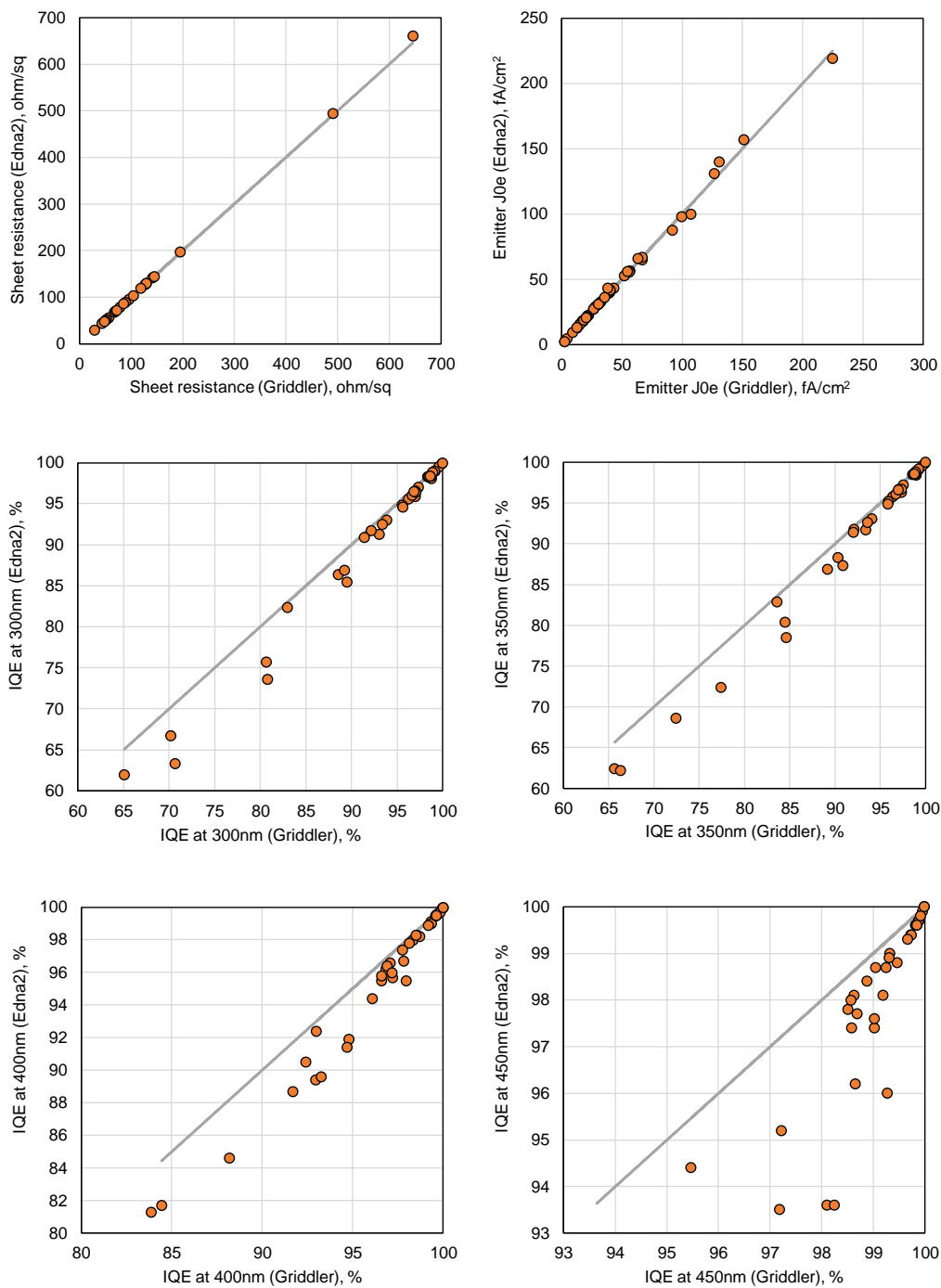


图 2. 表 3 结果的相应图形展示。每幅图中的灰色线条表示完全吻合。

图 2 以图形方式展示了两款模拟器的计算结果。其结果吻合得很好。对于薄层电阻, J_{0e} , IQE300, IQE350, IQE400, IQE450 的计算, 两个模拟器之间的平均分数偏差分别为 0.3%, 2.8%, 6.0%, 4.5%, 21%, 26%。

因此, 在实际应用中的对磷发射极的计算, 两个模拟器可以互换使用。在计算的 IQE 方面, 二者的吻合程

度足以得出类似的 J_{sc} 结果。

参考文献

1. H. Haug, J. Greulich, "PC1Dmod 6.2 – Improved simulation of c-Si devices with updates on device physics and user interface", Energy Procedia, vol 92, pp. 60-68, 2016.
2. K.R. McIntosh and P.P. Altermatt, "A freeware 1D emitter model for silicon solar cells," 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, pp. 2188–2193, 2010.
3. H. Haug, A. Kimmerle, J. Greulich, A. Wolf, E. S. Marstein, "Implementation of Fermi–Dirac statistics and advanced models in PC1D for precise simulations of silicon solar cells", Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 131, pp. 30-36, 2014.
4. A. Richter, S. W. Glunz, F. Werner, J. Schmidt, and A. Cuevas, "Improved quantitative description of Auger recombination in crystalline silicon," Physical Review B, vol. 86, pp. 1-14, 2012.
5. D. B. M. Klaassen, "A unified mobility model for device simulation - I. Model equations and concentration dependence," Solid-State Electronics, vol. 35, pp. 953-9, 1992.
6. D. B. M. Klaassen, "A unified mobility model for device simulation - II. Temperature dependence of carrier mobility and lifetime. ," Solid State Electronics, vol. 35, pp. 961-7, 1992.
7. F. Schindler, M. Forster, J. Broisch, J. Schön, J. Giesecke, S. Rein, et al., "Towards a unified low-field model for carrier mobilities in crystalline silicon," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 131, pp. 92-99, 2014.
8. P. P. Altermatt, A. Schenk, and G. Heiser, "A simulation model for the density of states and for incomplete ionization in crystalline silicon. I. Establishing the model in Si : P," Journal of Applied Physics, vol. 100, p. 113714, 2006.
9. P. P. Altermatt, A. Schenk, B. Schmithusen, and G. Heiser, "A simulation model for the density of states and for incomplete ionization in crystalline silicon. II. Investigation of Si : As and Si : B and usage in device simulation," Journal of Applied Physics, vol. 100, p. 113715, Dec 1 2006.
10. D. Yan and A. Cuevas, "Empirical determination of the energy band gap narrowing in highly doped n+ silicon," Journal of Applied Physics, vol. 114, p. 044508, 2013.
11. D. Yan and A. Cuevas, "Empirical determination of the energy band gap narrowing in p+ silicon heavily doped with boron," Journal of Applied Physics, vol. 116, p. 194505, 2014.
12. A. Schenk, "Finite-temperature full random-phase approximation model of band gap narrowing for silicon device simulation," Journal of Applied Physics, vol. 84, pp. 3684-95, 1998.