

# 2450型ソースメータを使用した 太陽電池のI-V特性評価

## はじめに

太陽電池は、光源から光子を吸収し、電子を放出するデバイスであり、負荷に接続すると電流が流れます。太陽電池の研究者、製造メーカーは、最小の損失による高効率を目指しています。このため、太陽電池や太陽電池の材料の電気特性評価は、研究／開発、製造プロセスの一部として実行されます。太陽電池の電流－電圧 (I-V) 特性により、最大電流 ( $I_{max}$ )、最大電圧 ( $V_{max}$ )、オープン回路電圧 ( $V_{oc}$ )、ショート回路電流 ( $I_{sc}$ )、効率 ( $\eta$ ) などの重要なパラメータを求めます。

ケースレーの2450型ソースメータを使用すると電流、電圧の両方が印加／測定でき、このようなI-V特性が容易に測定できます。2450型には4象限のソース機能があるため、印加される電圧において最大1.05A@21Vのセル電流をシンクすることができます。このアプリケーション・ノートでは、2450型ソースメータ (図1) を使用した、太陽電池のI-V特性評価方法について説明します。前面パネルからI-Vテストを実行し、グラフの表示方法、USBメモリへのデータの保存方法についても説明します。また、バス経由で自動測定する方法についても説明します。



図1. 太陽電池と2450型ソースメータとの接続

## 太陽電池

太陽電池は図2のような等価回路モデルとして表すことができ、光によって誘起される電流ソース ( $I_L$ )、飽和電流 [ $I_S (e^{qV/kT} - 1)$ ] を発生するダイオード、直列抵抗 ( $r_s$ )、シャント抵抗 ( $r_{sh}$ ) から成ります。直列抵抗は、金属の接触、セル前面の抵抗損、不純物濃度、接合の深さで生ずる抵抗です。直列抵抗はセルのショートカット電流と最大電力出力の両方を低減するため、直列抵抗は重要なパラメータになります。直接抵抗は0Ωであることが理想です。シャント抵抗は、セルのエッジにおける表面リークまたは水晶の不良による損失として表わされます。シャント抵抗は、無限大であることが理想です。

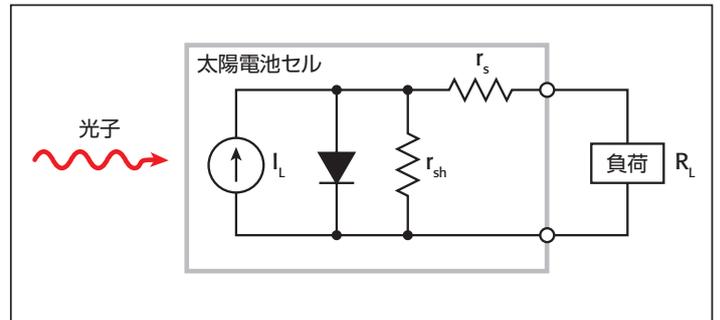


図2. 太陽電池セルの理想等価回路

光の当たった太陽電池セルに負荷抵抗 ( $R_L$ ) を接続すると、トータル電流は次のように表わされます。

$$I = I_S (e^{qV/kT} - 1) - I_L$$

ここで、 $I_S$ はダイオードの飽和による電流、 $I_L$ は光発電による電流

太陽電池の効率は、最大電力ポイント ( $P_{max}$ )、ショート回路電流 ( $I_{sc}$ )、オープン回路電圧 ( $V_{oc}$ ) などのパラメータで評価します。図3は、光の当たった太陽電池の、代表的な順方向I-V曲線であり、これらのポイントも記されています。最大電力ポイント ( $P_{max}$ ) は最大セル電流 ( $I_{max}$ ) と電圧 ( $V_{max}$ ) の積で求められ、セルの電力出力が最大になります。このポイントは、この曲線の角にあたります。

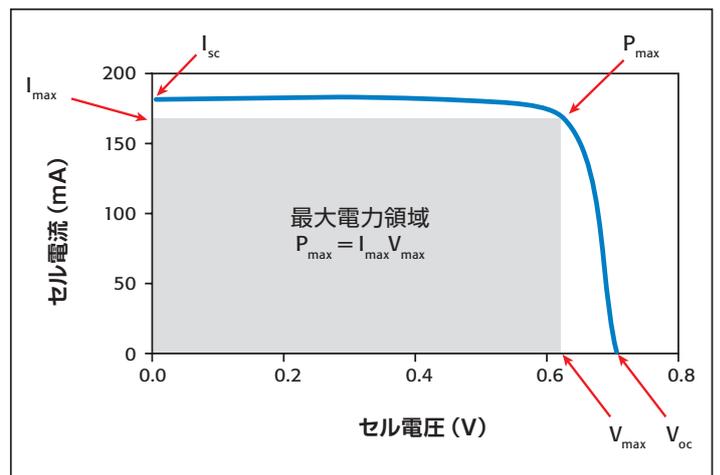


図3. 太陽電池の代表的な順方向バイアスのI-V特性の例

## 電子負荷としての2450型

図4のように、光の当たった太陽電池の出力に負荷を接続すると、電流が流れます。

光の当たった太陽電池を2450型の出力端子に接続すると、ソースメータは電流を引き込みます。別な言い方をすると、2450型は負荷になります。このため、測定される電流は負の極性になります。

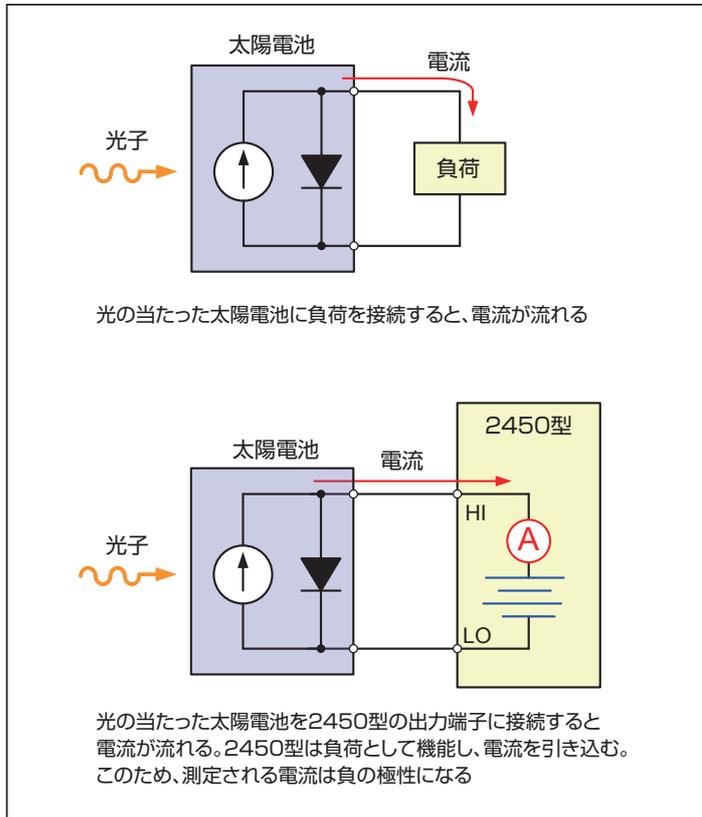


図4. 光の当たった太陽電池に2450型を接続すると、負荷として機能する

## 2450型と太陽電池の接続

太陽電池と2450型は、図5のように接続します。4線接続することにより、リード線の抵抗による影響を抑えます。太陽電池とリードを接続する場合、Force LOとSense LOはカソード端子に接続します。Force HIとSense HIはアノードに接続します。測定精度への影響を抑えるため、太陽電池と接続端子の距離はできる限り短くとります。

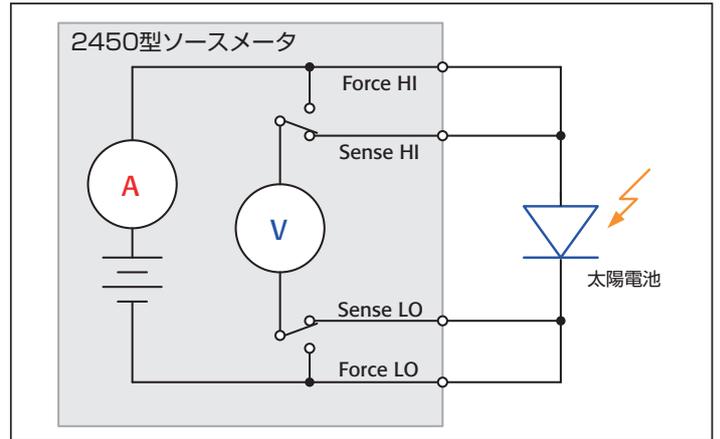


図5. 2450型と太陽電池の接続例

## ユーザ・インタフェースの3つの簡単な手順によるI-Vスイープの作成、プロット、保存

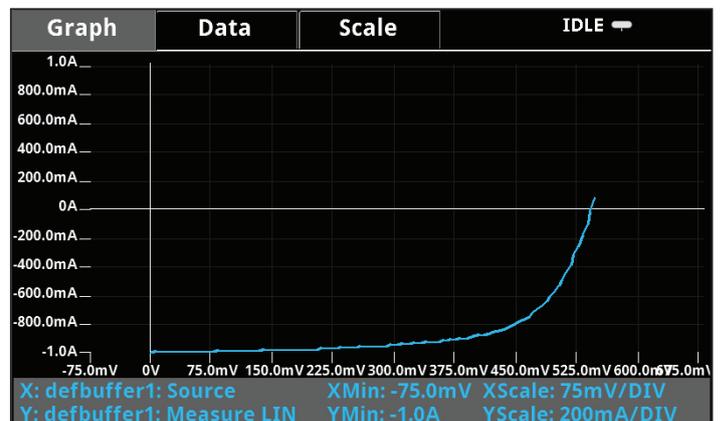
太陽電池のI-Vスイープは、2450型の前面パネルから、またはバス経由で実行できます。わずかな押しボタン操作で、I-Vスイープの作成、グラフ化、USBメモリへの保存が行えます。その3つの手順を以下に示します。

### 手順1. I-Vスイープの作成と実行

内容	操作手順
計測器をデフォルト状態にリセットする	Menuキー → Manage System → Reset
電圧を印加し、電流を測定する	Homeキー → Functionキー → Source V Measure I
4線式センシングに設定する	Menuキー → Measure Settings → Sense Mode → 4-Wire Sense
スイープ・パラメータを設定する	Menuキー → Source Sweep <ul style="list-style-type: none"> <li>Start, Stop, Step Vを設定</li> <li>下にスクロールし、Source Limitを設定</li> <li>Generateを選択してスイープを作成</li> </ul>
I-Vスイープを実行する	Homeキー → Triggerキー

### 手順2. グラフの表示

データをグラフにして表示するには、MENUキーを押し、次にGraphを選択します。I-Vスイープのグラフが自動的に表示されます。グラフを再表示するには、TRIGGERキーを押すだけです。



### 手順3. USBメモリへのデータの保存

I-VデータをUSBメモリに保存するには、USBメモリを差し込み、MENUキーを押し、Data Buffersを選択し、保存するバッファを選択し、SAVE TO USBを選択します。ファイル名を入力します。データはCSVフォーマットで保存されるため、後からスプレッドシートにダウンロードして解析できます。



図6. USBメモリへのデータの保存

### リモート・プログラムによるI-V測定の自動化

2450型は、LAN、USB、またはGPINインタフェースでSCPIまたはTSP® (Test Script Processor) を使用することでリモート制御できます。多結晶シリコンの太陽電池セルでI-V特性を自動化するための、2450型のプログラム例をご紹介します。このテストでは、4線接続により、0~0.55V、56ステップで電圧スイープし、電流を測定するように2450型をプログラムします。このテストのためのTSPコードの例を付録Aに、SCPIコードの例を付録Bに記します。この太陽電池のI-V特性のグラフを図7に示します。このテストでは、照明オン (Light ON) と照明オフ (Light OFF) で実行しています。先にも説明したように、Light ONでの電流はシンク電流であるため、グラフは負極性になっています。スプレッドシートを使用すれば、極性は簡単に反転できます。

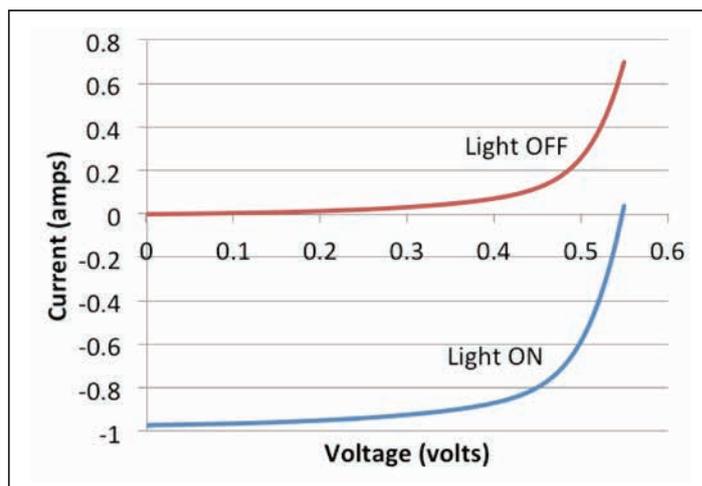


図7. 2450型による太陽電池のI-Vスイープ測定例

バス経由でI-V測定が自動化できるだけでなく、2450型は最大電力 ( $P_{max}$ )、ショート回路電流 ( $I_{SC}$ )、オープン回路電圧 ( $V_{OC}$ ) を表示することができます。ユーザ・インタフェースでユーザ独自の計算をすることもできます。2450型の大型ディスプレイにわかりやすく表示される、太陽電池のパラメータの例を、図8に示します。



図8. 2450型に表示された最大電力 ( $P_{max}$ )、ショート回路電流 ( $I_{SC}$ )、オープン回路電圧 ( $V_{OC}$ ) の例

## 付録A : TSPコードの例

以下に示すTSPコードの例は、ケースレーの計測器用TSB (Test Script Builder) で実行するものです。TSBは、2450型に付属されているソフトウェア・ツールです。他のプログラム環境を使用す

る場合は、TSPコードの例を変更する必要があります。この例では、0~0.55Vの電圧を56の刻みでスイープし、電流を測定します。電流と電圧の読み値は、デフォルトのバッファ (defbuffer1) に保存されます。

```
--Define number of points in sweep
num = 56

--Reset the instrument and clear the buffer
reset()

--Set source and measure functions
smu.measure.func = smu.FUNC_DC_CURRENT
smu.source.func = smu.FUNC_DC_VOLTAGE

--Measurement Settings
smu.measure.terminals = smu.TERMINALS_FRONT
smu.measure.sense = smu.SENSE_4WIRE
smu.measure.autorange = smu.ON
smu.measure.nplc = 1

--Source Settings
smu.source.highc = smu.OFF
smu.source.range = 2
smu.source.readback = smu.ON
smu.source.ilimit.level = 1
smu.source.sweeplinear('SolarCell', 0, 0.55, num, 0.1)

--Start the trigger model and wait for it to complete
trigger.model.initiate()
waitcomplete()

--Define initial values
voltage = defbuffer1.sourcevalues
current = defbuffer1
isc = current[1]
mincurr = current[1]
imax = current[1]
voc = voltage[1]
vmax = voltage[1]
pmax = voltage[1]*current[1]

--Calculate values
for i = 1, num do
    print(voltage[i],current[i],voltage[i]*current[i])
    if (voltage[i]*current[i] < pmax) then
        pmax = voltage[i]*current[i]
        imax = current[i]
        vmax = voltage[i]
    end
    if math.abs(current[i]) < math.abs(mincurr) then
        voc = voltage[i]
```

```

end

end

pmax = math.abs(pmax)
imax = math.abs(imax)

print("Pmax = ", pmax, ", Imax = ", imax, ", Vmax = ", vmax, ", Isc = ", isc, ", Voc = ", voc)

--Display values on 2450 front panel
display.changescreen(display.SCREEN_USER_SWIPE)
display.settext(0, string.format("Pmax = %.4fW", pmax))
display.settext(1, string.format("Isc = %.4fA, Voc = %.2fV", isc, voc))

```

## 付録B : SCPIコードの例

太陽電池のI-Vスイープ出力のためのSCPIコマンドの例を示します。他のプログラム環境で実行する場合は、適切に変更する必要があります。この例では、0~0.55Vの電圧を56の刻みでスイープし、電流を測定します。電流と電圧の読み値は、デフォルトのバッファ (defbuffer1) に保存されます。

SCPIコマンドのシーケンス	概要
*RST	リセット
SENS:FUNC "CURR"	電流を測定する
SENS:CURR:RANG:AUTO ON	オートレンジ
SENS:CURR:RSEN ON	4線センス・モード
SOUR:FUNC VOLT	電圧を印加する
SOUR:VOLT:RANG 2	ソース・レンジ : 2V
SOUR:VOLT:ILIM 1	電流リミット : 1A
SOUR:SWE:VOLT:LIN 0, 0.55, 56, 0.1	0~0.55V、56ステップ、100ms間隔
:INIT	スイープを初期化する
*WAI	スイープ完了を待つ
TRAC:DATA? 1, 56, "defbuffer1", SOUR, READ	バッファからソース、測定値を読み取る

**KEITHLEY**

A Tektronix Company

[www.keithley.jp](http://www.keithley.jp)

テクトロニクス/ケースレーインストルメンツお客様コールセンター

TEL : 0120-441-046 電話受付時間/9:00~12:00・13:00~18:00(土・日・祝・弊社休業日を除く)

〒108-6106 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティ B棟6階

記載内容は予告なく変更することがありますので、あらかじめご了承ください。

Copyright © Keithley Instruments. All rights reserved. 記載された製品名はすべて各社の商標あるいは登録商標です。

Number 3224 2013年8月