

4200半導体パラメータアナライザを用いた 光起電材料や太陽電池の電気的特性評価

I-V, C-V, C-f, DLCP, Resistivity, and Hall Voltage Measurements

イントロダクション

クリーンエネルギーへの需要の増大やエネルギー源としての太陽の大きな潜在的可能性によって太陽エネルギー変換技術が益々重要となっており、その結果太陽光を直接電気に変換する太陽電池に対する要求が大きくなっている。太陽電池や光電池は太陽光から光子を吸収しエレクトロンを放出する半導体材料から作られ、それを負荷に接続することにより電流を得る。太陽電池はその出力や効率を含めた太陽電池性能を評価するため様々な測定が行われる。そしてその電気的特性評価は製造プロセス中に加え、太陽電池や材料の研究開発の一部でも行われている。

太陽電池で一般的に行われる電気的な試験にはDC電圧を印加し電流や容量を測定するものがある。容量測定は周波数やAC電圧を変化させて行われ、通常異なった光度や温度条件で実行される。その結果出力電流、変換効率、最大出力電力、不純物濃度、抵抗率等を含めた様々な重要なデバイスパラメータがI-VやC-V測定から抽出される。したがって電気的特性評価は太陽電池をより効率的に作成する方法を決定するために重要である。

4200半導体パラメータアナライザは太陽電池に必要な測定や解析を容易に行うことが出来る。4200-SCSはI-VやC-V測定に加え制御ソフト、グラフィクス、計算機能を持った統合システムであり、I-V, C-V, C-f, DLCP, 4線式抵抗測定やホール電圧測定といった幅広い測定に適している。本稿はこの4200-SCSを使ってそれらの測定を太陽電池セルにおいて実行するための手法について解説する。

4200-SCSを用いた電気的測定

太陽電池やその材料の測定を簡略化するため、4200-SCSは一般的に太陽電池セルの評価に使用される多くのテストをテストプロジェクトの形でサポートしている。I-V, C-Vや抵抗測定を含めたそれらのテストは最大電力、ショートサーキット電流、欠陥密度等の標準的なパラメータを抽出するための計算式が組み込まれている。Fig-1に示した”SolarCell”プロジェクトは4200-SCSのKTELバージョン7.2よりサポートされており、Table-1に示した12項目のテストがITMやUTMの形式で提供されている。

Subsite Level	Test Module	Description
IV_sweep	fwd-ivsweep	Performs I-V sweep and calculates I_{sc} , V_{oc} , P_{max} , I_{max} , V_{max} , FF
	rev-ivsweep	Performs reversed bias I-V sweep

CV_sweep	cvsweep	Generates C-V sweep
	C-2vsV	Generates C-V sweep and calculates $1/C^2$
	cfsweep	Sweeps the frequency and measures capacitance
	DLCP	Measures capacitance as AC voltage is swept. DC voltage is applied so as to keep the total applied voltage constant. The defect density is calculated.
4PtProbe_resistivity	HiR	Uses 3 or 4 SMUs to source current and measure voltage difference for high resistance semiconductor materials. Calculates sheet resistivity.
	LoR	Uses 1 or 2 SMUs to source current and measure voltage using remote sense. Calculates sheet resistivity. Uses current reversal method to compensate for thermoelectric voltage offsets.
vdp_resistivity	I1_V23	First of 4 ITMs that are used to measure the van der Pauw resistivity. This ITM sources current between terminals 1 and 4 and measures the voltage difference between terminals 2 and 3.
	I2_V34	Sources current between terminals 2 and 1 and measures the voltage difference between terminals 3 and 4.
	I3_V41	Sources current between terminals 3 and 2 and measures the voltage difference between terminals 4 and 1.
	I4_V12	Sources current between terminals 4 and 1 and measures the voltage difference between terminals 1 and 2.

Table 1. Test modules in the SolarCell project

電流－電圧測定

前述したように、太陽電池のパラメータの多くはそのセルの電流－電圧測定から求めることができる。そのI-V測定は電流と電圧両方の印加と測定が可能な4200SMUを用いて行うことができる。4200SMUは4象限の印加性能を持ち、そのため太陽電池の電流を印加電圧値に対しシンクすることができる。さらに4200SCSには最大100mAのソース/シンクが可能な4200-SMUと最大1Aまでのソース/シンクが可能な4210-SMUの2種類のSMUがサポートされている。もし太陽電池の出力電流がその測定最大電流レベルを超える場合にはセルの面積を減らし電流値を下げる必要がある。しかしもしそれが不可能な場合はさらに大きな電流のソース/シンク仕様を持つKeithley2400シリーズもしくはKeithley2600シリーズを代替のソリューションとして提案する。

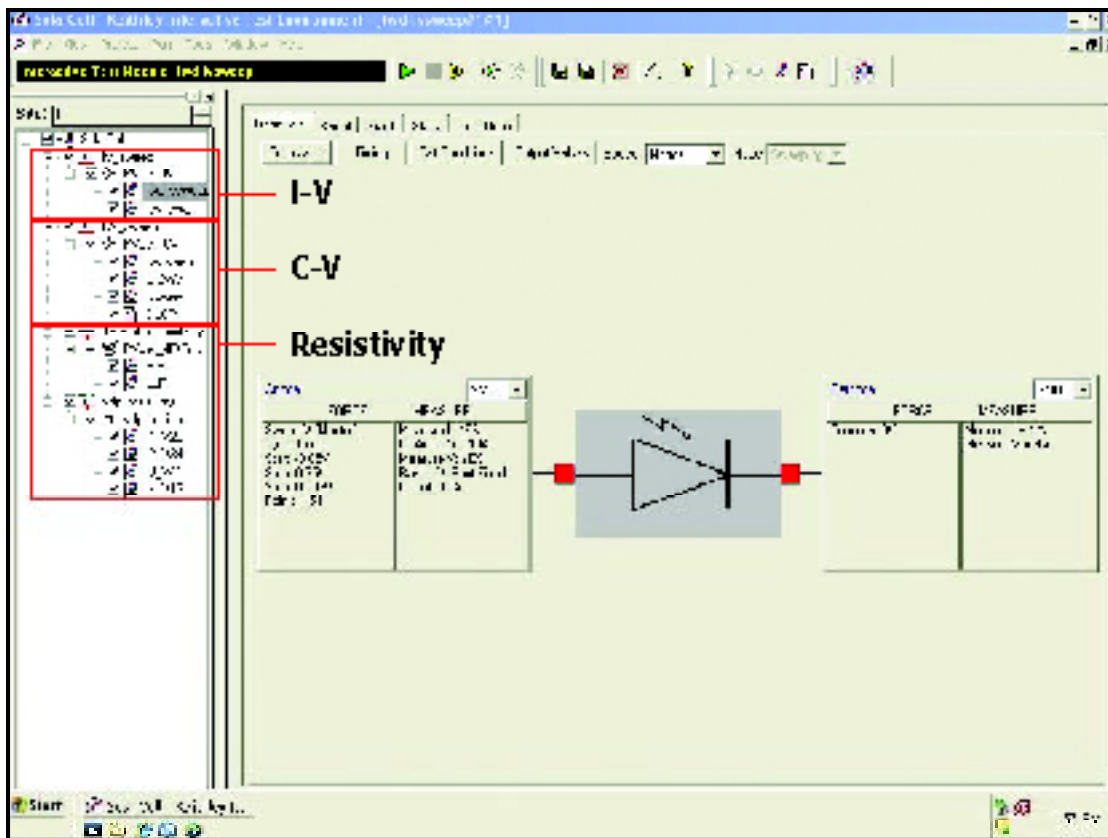


Figure 1. Screenshot of SolarCell project for the Model 4200-SCS

電流－電圧測定より抽出されるパラメータ:

Fig-2に光誘起電流源(I_L)、飽和電流を生成するダイオード [$I_S(e^{qV/kT} - 1)$]、直列抵抗(r_s)そしてシャント抵抗(r_{sh})で構成された太陽電池セルの等価回路を示す。直列抵抗はメタル配線、セルの表面のオーミック損失、不純物濃度や接合深さに起因しており、セルの短絡電流や最大出力電力を低下させる重要なパラメータである。この直列抵抗は 0Ω が理想となる。シャント抵抗はセルの境界に沿った表面リークや結晶欠陥に起因した損失を表しており、無限大が理想である。

もし負荷抵抗(R_L)を光を照射した太陽電池セルに接続した場合、全電流値は次のようになる:

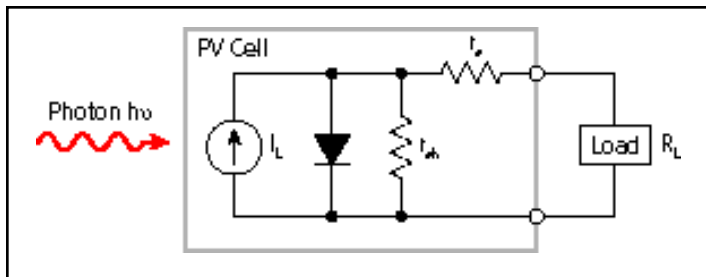


Figure 2. Idealized equivalent circuit of a photovoltaic cell

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

ここで

I_S =ダイオードの飽和電流

I_L =光学的に生成された電流

最大電力点(P_{max})、エネルギー変換効率(η)、そして曲線因子(FF)を含むさまざまなパラメータが太陽電池の効率を評価するために使用される。それらのパラメータがFig-3の光を照射した太陽電池セルの典型的な順方向バイアスI-Vカーブに示されている。最大電力点(P_{max})とはセル電流が最大かつセルの電力出力が最大のときの電圧値(V_{max})で、Fig-3のカーブが曲がった点になる。

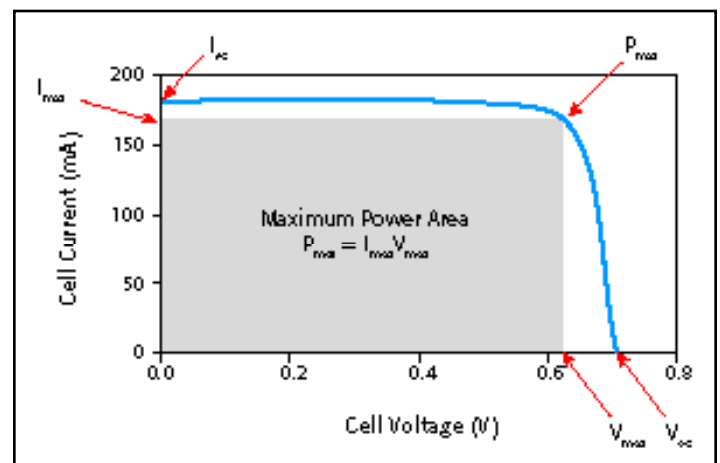


Figure 3. Typical forward bias I-V characteristics of a PV cell

曲線因子(FF)は理想的なI-V特性に対しどれくらい乖離しているかを表す指標であり、次によって定義される:

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{sc} V_{oc}}$$

ここで、

I_{max} = 最大電力出力での電流値(A)

V_{max} = 最大電力出力での電圧値(V)

I_{SC} = 回路短絡電流(A)

V_{OC} = 回路開放電圧(V)

以上に定義されたように、曲線因子は短絡電流と開放電圧に対する最大電力の比である。理想的な太陽電池セルは曲線因子が1であるが直列抵抗やシャント抵抗の損失がその効率を低下させる。

もう一つの重要なパラメータはセルへの入力電力に対する電力出力の比で定義される変換効率(η)である。

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}}$$

ここで、

P_{max} = 出力電力の最大値

P_{in} = セルの表面への全入射放射エネルギーとして定義されるセルへの入力電力

I-V測定のための太陽電池への接続:

Fig-4にIV測定のための4200SCSと太陽電池セルの接続を示す。太陽電池セルの片側をSMU1のForceとSense端子に接続し、もう一方をSMU2かGNDユニットのForceとSense端子に接続する。

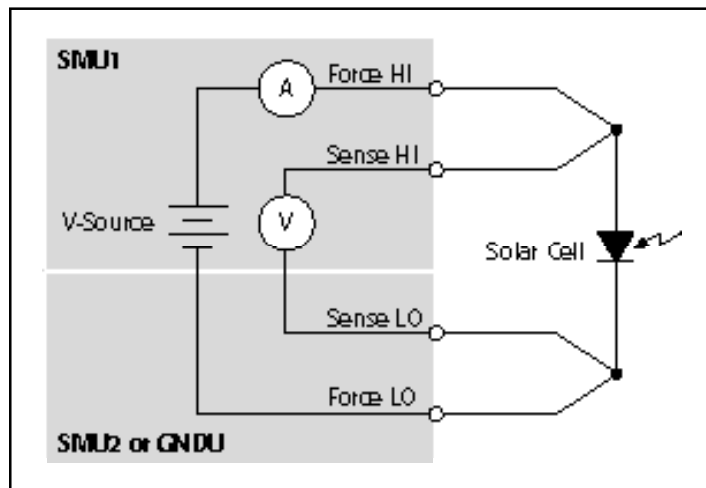


Figure 4. Connection of Model 4200-SCS to a solar cell for I-V measurements

この4線式接続を使うことにより測定精度に影響を及ぼすリード抵抗の影響を取り除くことができる。電圧は一對のテストリードを使い太陽電池セルに対し印加され、センスリードによりセルの電圧降下が測定される。そしてこのセンスリードにより補正されたプログラム電圧がセルに印加される。

順方向バイアスIV測定:

制御された光を照射した状態で太陽電池セルの順方向バイアスIV測定を行う。SMUは電圧スイープに設定し電流を測定する。この順方向バイアススイープ試験はITMの“fwd-ivsweep”で

スイープ電圧を任意の値に設定し実行できる。Fig-3では電圧は $V_1=0$ から $V_2=V_{OC}$ にスイープされている。電圧値がゼロ($V_1=0$)のとき電流値は電源回路電流と同じ($I_1=I_{SC}$)で、電圧が開放回路($V_2=V_{OC}$)のとき電流値はゼロ($I_2=0$)となる。この V_{OC} や I_{SC} のパラメータは4200SCSに内蔵された解析ツールであるフォーミュレータ機能を使い容易に導き出すことができる。便宜上SolarCellのプロジェクトには既に計算がされたパラメータが設定されているためテストを実行する毎に自動的に値が表示される。Fig-5に示したシートタブには導出されたパラメータが示されている。それらのパラメータは短絡回路電流(I_{SC})、開放回路電圧(V_{OC})、最大電力(P_{max})、最大セル電流(I_{max})、最大セル電圧(V_{max})そして曲線因子(FF)が含まれている。

ユーザは必要なパラメータに応じて式を自由に追加することができる。

フォーミュレータ機能を使用しセルへの入力電圧を式に入力することにより変換効率(η)が算出でき、さらに電流密度(J)も同様に導き出すことができる。

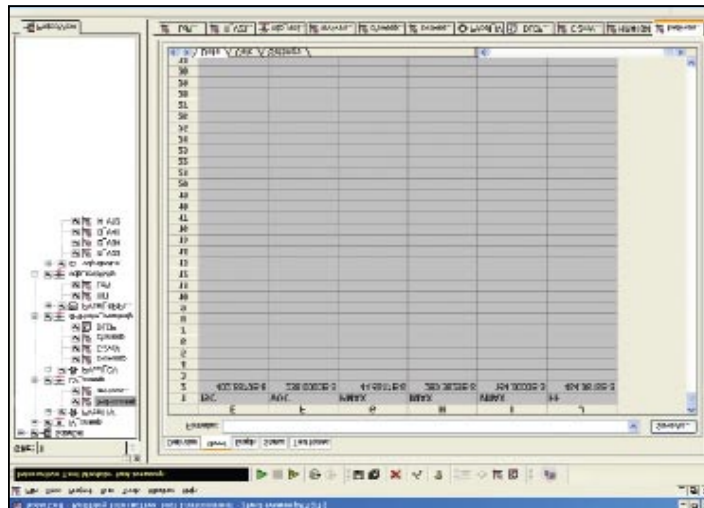


Figure 5. Results of calculated parameters shown in Sheet tab

Fig-6は4200SCSの“fwd-ivsweep”ITMを使用し取得した光を照射したシリコン太陽電池セルの実際のIVスイープである。このシステムのSMUは電流をシンクすることができるため、カーブは4象限で示すことができ、(I-,V+)のデバイスから電力を求めることができる。もし出力電流値が印加電圧の関数として数十倍に渡る場合、片対数電流値-電圧プロットを用いることが望ましい。グラフオプションにはリニアとログの軸変更が容易に行えるグラフデータ表示機能がサポートされている。

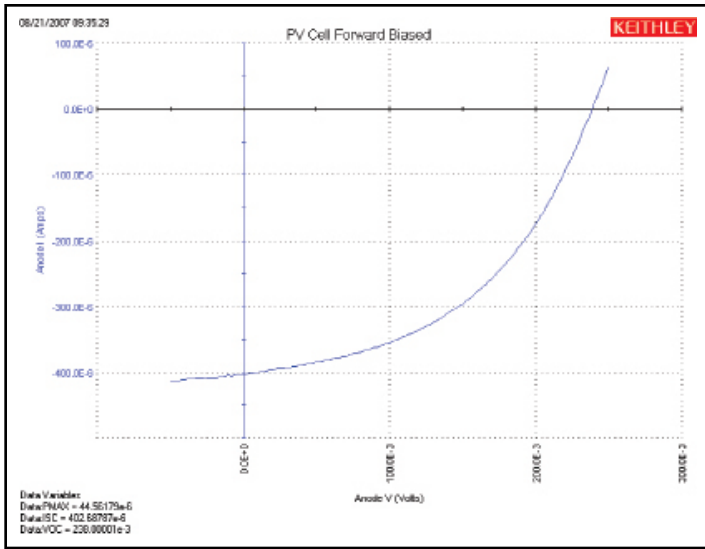


Figure 6. I-V sweep of silicon PV cell generated with the 4200-SMU

さらに必要に応じてグラフ機能を用いFig-7に示したように容易に軸の変換ができる。

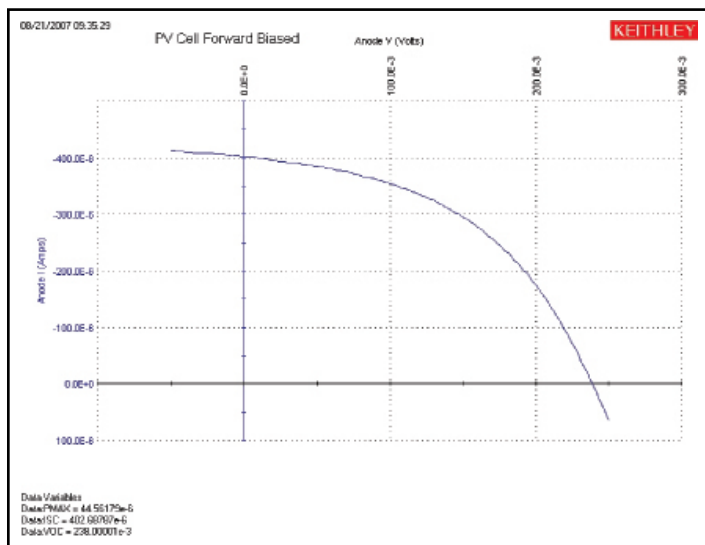


Figure 7. Inversion of the forward-biased I-V curve about the voltage axis

直列抵抗(r_s)は2つ以上の光強度での順方向IVスイープより求めることができる。まず、IVカーブを2つの異なる強度で取得する(その場合光の強度は重要でない)。次にカーブが線形になる順方向特性からこのカーブの傾きを測定する。その傾きの逆数が直列抵抗の値を示す:

$$r_s = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

さらに異なる光強度を用いることにより、カーブの曲がった部分付近の複数の点を使用しこの手法を広げることができる。Fig-8に示されたように、傾きから算出される直列抵抗から直線が求められる。

電流計を考えた場合、4200SCSのSMUの一つの重要な特徴としてその極めて低い電圧負荷がある。電圧負荷とは測定中発

生ずる電流計の電圧降下で、ほとんどの標準的なデジタルマルチメータ(DMM)ではフルスケールで少なくとも200mVの電圧負荷を持っている。わずかにミリボルトの電圧を太陽電池の測定においてサンプルに印加しただけで大きな誤差が生じてしまう。それに対し4200SCSのSMUは数100マイクロボルト以上の電圧負荷や電圧降下を生じない。

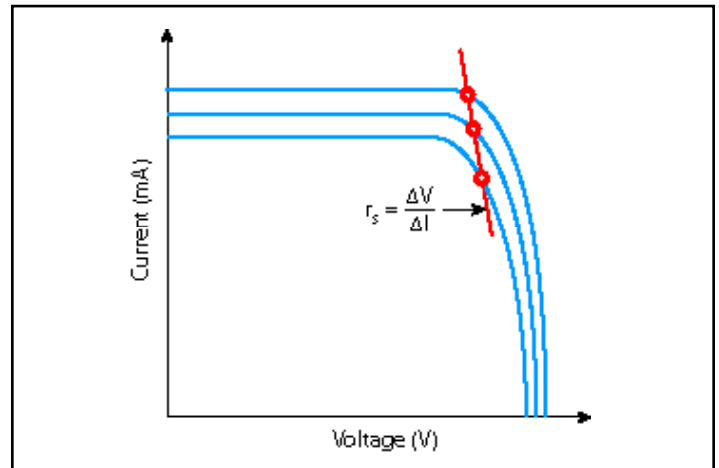


Figure 8. Slope method used to calculate the series resistance

逆バイアスIV測定:

リーク電流とシャント抵抗(r_{sh})は逆バイアスIVデータより求めることができる。通常そのテストは遮光された環境で行われる。電圧は0Vからデバイスが破壊し始めるレベルまで印加され、電流が電圧の関数として測定されプロットされる。セルのサイズによってはリーク電流はピコアンペア程度の大きさになる。ナノアンペアかそれ以下の微小電流測定を行う場合、低ノイズケーブルを使用し、デバイスを電気的にシールドされた状態にする必要がある。

Fig-9に示したように、逆バイアスIVカーブの傾きから太陽電池セルのシャント抵抗を測定する方法がある。カーブの線形領域からシャント抵抗が次の式で算出できる。

$$r_{sh} = \frac{\Delta V_{\text{Reverse Bias}}}{\Delta I_{\text{Reverse Bias}}}$$

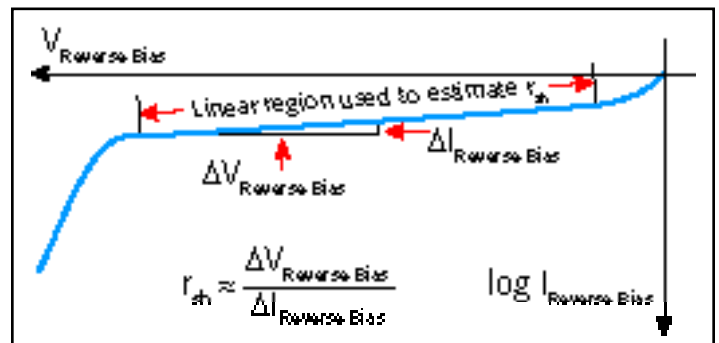


Figure 9. Typical reverse-biased characteristics of a PV cell

Fig-10は“rev-ivsweep”のITMを使用し取得された実際の逆バイアスカーブである。この片対数グラフにおいて電流の絶対値が逆バイアス電圧の関数としてプロットされている。

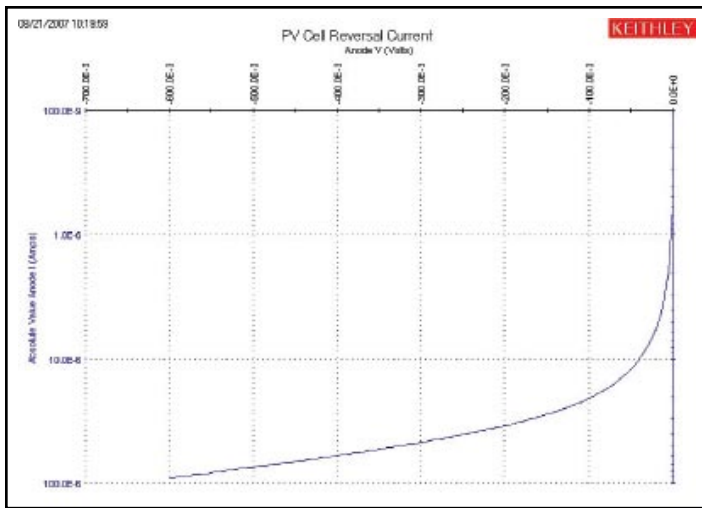


Figure 10. Reverse-biased I-V measurement of silicon solar cell using the Model 4200-SMU

容量測定

CV測定は太陽電池デバイスに関する特定のパラメータを導出するために有効である。太陽電池の種類によってCV測定は不純物濃度や接合のビルトイン電圧のようなパラメータを導き出すために使うことができる。さらにC-fスイープはデプレッション領域におけるトラップの情報を得るために使うことができる。4200SCSのオプションである4210-CVU容量測定器はC-V, C-f, C-t測定機能を持ち、さらにはコンダクタンスやインピーダンス測定も行うことができる。

太陽電池セルでCV測定を行うために4210-CVUはFig-11に示した接続を行う。SMUでのIV測定と同様にCV測定でもリード抵抗を補正し測定を行うために4線式接続が用いられる。HPOT/HCUR端子はアノードに、LPOT/LCUR端子はカソードに接続する。この接続では4210-CVUのDC電圧源はアノード側に接続されている。

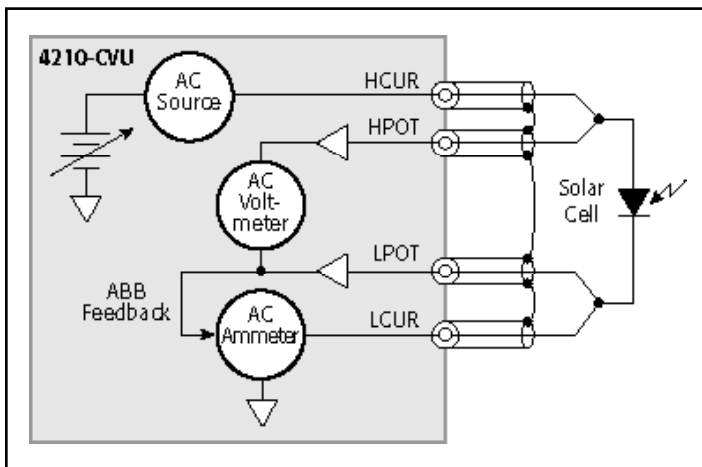


Figure 11. Connecting the solar cell to the Model 4210-CVU capacitance meter

Fig-11は容量計の4端子からの4本のコアキシャルケーブルのシールドを示している。測定回路におけるインダクタンスの影響を低減させ高精度の測定を行うため、このコアキシャルケーブルからのシールドは太陽電池セルにできるだけ近いところに接

続する必要がある。特に高周波での測定においてはこれが重要になる。

さらにオープン、ショート接続での補正を行うことにより測定におけるケーブル容量の影響を低減することができる。この手順については4200-SCS型のリファレンスマニュアルの第15章に記載されている。

セルの容量はデバイスの面積に直接関連していることから、非常に大きい容量の測定を避けるためにもし可能であるならセルの面積を小さくする必要がある。さらに4210-CVU型を使った測定において周波数を低くもしくはACドライブ電圧値を低く設定することによっても大きな容量測定を行うことができる。

C-V Sweep:

CV測定は順方向バイアスと逆方向バイアスの両方で行うことができる。しかしながら、セルが順方向バイアスのとき印加できる電圧値には制限があり、それ以上の印加ではコンダクタンスが非常に大きくなってしまふ。最大DC電流値は10mA以下である必要があり、それ以上の印加ではDC電圧源がコンプライアンスになり必要なバイアスを与えることができない。

Fig-12は4210-CVU型の“cvsweep” ITMを用いて取得したシリコン太陽電池セルのCVカーブである。このテストは遮光された状態で逆方向バイアスにて行われている。

いくつかのパラメータは $1/C^2$ と相関するため、ときどき dC/dV のプロットより $1/C^2$ vs. 電圧のデータに対する要求がある。たとえば不純物濃度 N は以下の式で得られる容量値と相関するためこのカーブの傾きより求められる。

$$N(a) = \frac{2}{qE_s A^2 [d(1/C^2)/dV]}$$

ここで、

$N(a)$ = 不純物濃度($1/cm^3$)

q = 電荷($1.60219 \times 10^{-19}C$)

E_s = 半導体の誘電率($1.034 \times 10^{-12}F/cm$ for Si)

A = 面積(cm^2)

C = 容量測定値(F)

V = DC電圧印加値(V)

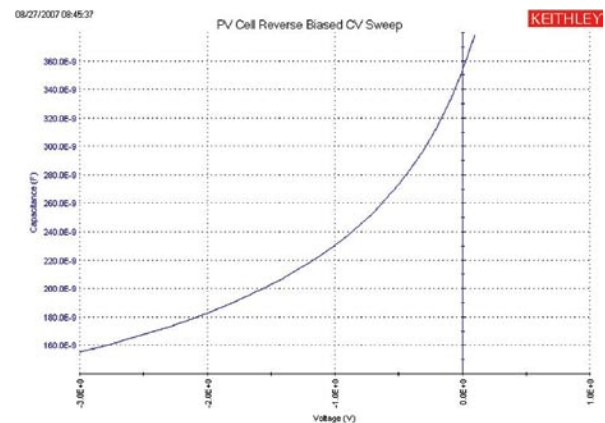


Figure 12. C-V sweep of a silicon solar cell

セルの接合のビルトイン電圧は $1/C^2$ カーブとX軸との交点より求められる。4210-CVU型の“C-2vsV”のITMにてFig-13に示したカーブが取得でき、フォーミュレータ機能を使用し不純物濃度(N)やビルトイン電圧を求めることができる。

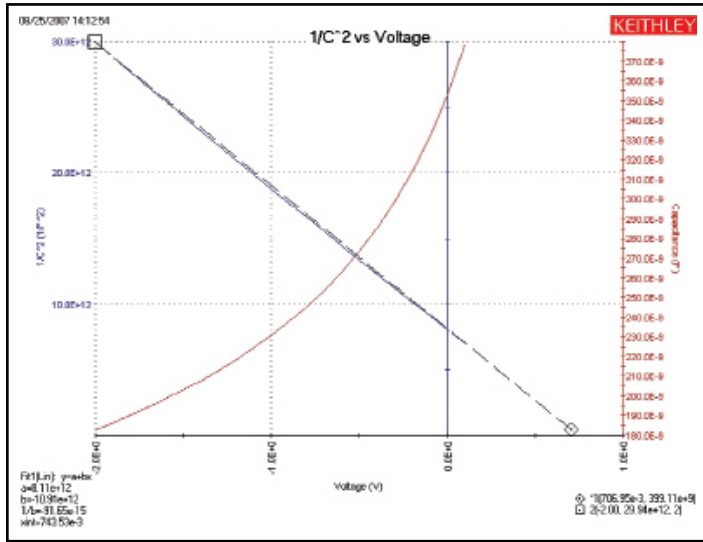


Figure 13. $1/C^2$ vs. voltage of a silicon solar cell

C-f Sweep:

4210-CVU型オプションにより周波数レンジ1kHzから10MHzの範囲でテスト周波数に対する容量、コンダクタンス、もしくはインピーダンスが測定できる。Fig-14に示したカーブは“cfsweep”のITMで取得された。トラップ密度のような必要とされるパラメータが容量 vs. 周波数のデータより抽出できる。

Drive Level Capacitance Profiling(DLCP):

Drive Level Capacitance Profiling(DLCP)とは太陽電池セルの深さの関数として欠陥密度(N_{DL})を求める手法である。容量測定中にAC電圧(Peak-to-Peak)をスイープしDC電圧を変化させる。この手法はAC電圧を固定しDC電圧をスイープしCVを測定する標準的な手法と逆になる。

DLCP法ではAC電圧をスイープするあいだDC電圧はACとDCをあわせた電圧値を一定に保持した状態に自動的に調整される。その電圧の合計値を一定に維持することにより、セル材料中の電荷密度(ρ_e)は $E_F - E_V = E_e$ で表される界面からの距離として定義される深さ X_e まで一定に留めている。これは電荷チャージ密度の変化だけが空乏領域の終端で起こると仮定し解析を行っている従来のCV法とは違っている。

従って、DLCP法においては深さ位置 X_e の値は試料に与えるDCバイアスを調整することにより変化させることができる。さらにこの手法により距離や特別なプロファイルの関数としての欠陥密度を求めることができる。エネルギーに依存したプロファイルを示すため測定のテスト周波数や温度も変化させることができる。

CVデータの二次元近似は以下に示したp型半導体のある空乏層深さにおける不純物密度と相関している。

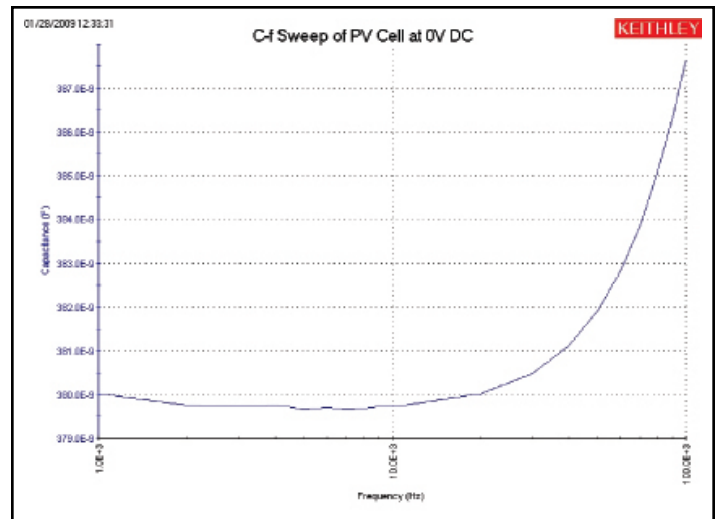


Figure 14. C-f Sweep of Solar Cell

$$N_{DL} \equiv \frac{C_0^3}{2q\epsilon A^2 C_1} = \frac{|\rho_e|}{q} = p + \int_{E_F}^{E_F+E_e} g(E, x) dE$$

ここで、

N_{DL} = 欠陥密度(cm^{-3})

C_1, C_0 = CVデータの二次元近似係数

q = 電荷($1.6 \times 10^{-19}C$)

ϵ = 誘電率(F/cm)

A = 太陽電池セルの面積(cm^2)

ρ_e = 電荷密度(C/cm^3)

p = 正孔密度(cm^{-3})

$X_e = E_F - E_V = E_e$ の界面からの距離

係数 C_0 と C_1 は次の二次元方程式に最小二乗法を適合させて得られる。

$$dQ/dV = C_2 (dV)^2 + C_1 * (dV) + C_0$$

しかしながらこの C_0 と C_1 はこの解析でのみ使用される。

“DLCP”のUTMを使用しDrive Level Capacitance ProfilingのCV測定が行える。この測定中印加電圧の合計値はDC電圧値をAC電圧の変化に対し自動的に調整することにより一定に保たれる。4210-CVUのAC電圧値は10mVrmsから100mVrms(14.14mVから141.4mVp-p)まで変化でき、周波数レンジは1kHzから10MHzである。容量はAC電圧をスイープし測定される。

Table-2にそのUTMで使用する入力パラメータとその入力レンジの解説を示す。

テストを実行すると容量、AC電圧値、DC電圧値、時間間隔、周波数、欠陥密度が測定され、それらの値はシートタブに示される。欠陥密度はCVデータの二次近似を使いフォーミュレータ機能にて算出される。二次方程式の係数 C_0 と C_1 もシートタブに示される。ユーザは太陽電池セルの面積と誘電率をフォーミュレータのConstant/Values/Unitの部分に入力する。

Table 2. Adjustable parameters for the DLCP UTM

Parameter	Range	Description
VmaxTotal	-10 to 10 volts	Applied DC Volts and ½ AC Volts p-p
VacppStart	.01414 to .1414	Start Vac p-p
VacppStop	.02828 to .1414	Stop Vac p-p
VacppStep	.0007070 to .1414	Step Vac p-p
SweepDelay	0 to 100	Sweep delay time in seconds
Frequency	1E+3 to 10E+6	Test Frequency in Hertz
Speed	0, 1, 2	0=Fast, 1=Normal, 2=Quiet
CVRange	0, 1E-6, 30E-6, 1E-3	0=autorange, 1µA, 30µA, 1mA
OpenComp	1, 0	Enables/disables open compensation for CVU
ShortComp	1, 0	Enables/disables short compensation for CVU
LoadComp	1, 0	Enables/disables load compensation for CVU
LoadVal	1 to 1E+9	Load value

Fig-15に容量vs. AC電圧の測定結果を示す。求められた二次近似の係数や欠陥密度がグラフ中に表示されている。

X_0 の深さ位置を変化させるため、容量測定を印加電圧の合計値を変化させ繰り返すことができる。エネルギー(E_0)はテスト周波数や温度により変化させることができる。測定の温度を変化させるため、4200-SCSのGPIBインタフェースを介し温度コントローラ制御を行うUTMを追加することができる。4200-SCSにはTemptronics及びTriotekの温度コントローラが標準搭載されている。

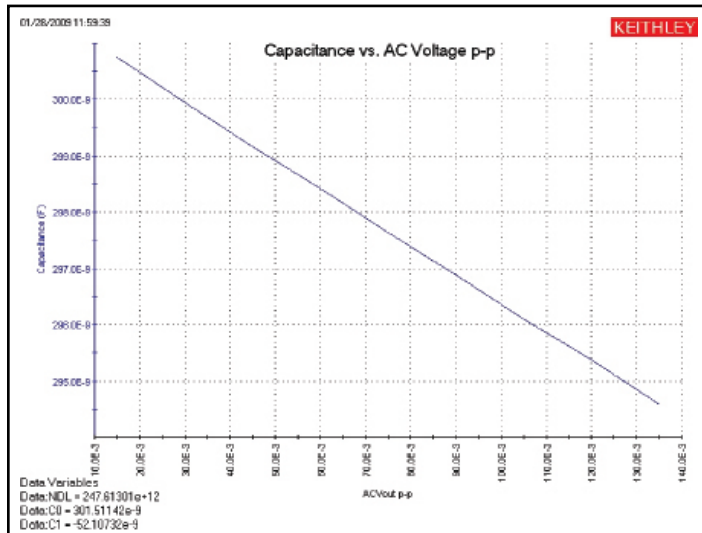


Figure 15. Capacitance vs. AC voltage p-p of a solar cell

抵抗及びホール電圧測定

太陽電池セルの性能に直接抵抗値の大きさが影響することを考えた場合、太陽電池セルの材料の抵抗測定が当然必要となる。半導体材料の抵抗値測定は通常4端子測定が用いられる。4端子測定を用いることにより針の抵抗、各針の接触面の抵抗、半導体材料と金属接合間の接触抵抗による誤差を排除することができる。太陽電池セル材料の抵抗を測定する二つの標準的な手法として4点共線プローブ法とVan der Pauw法がある。4200SCSのSolarCellプロジェクトにはそれらの測定を行ういく

つかのITMが存在する。4200SCSを使った半導体材料の抵抗測定に関するより詳細な情報がアプリケーションノート#2475“Four-Probe Resistivity and Hall Voltage Measurements with the Model 4200-SCS”に記載されている。

4点共線プローブ法:

4点共線プローブ法は未知の抵抗値を持つ材料に4本等間隔でプローブを当てる。そのプローブをFig-16に示したように材料の中央に配置する。外側の2本のプローブは電流を印加し、内側の2本は材料表面の差動電圧を測定する。

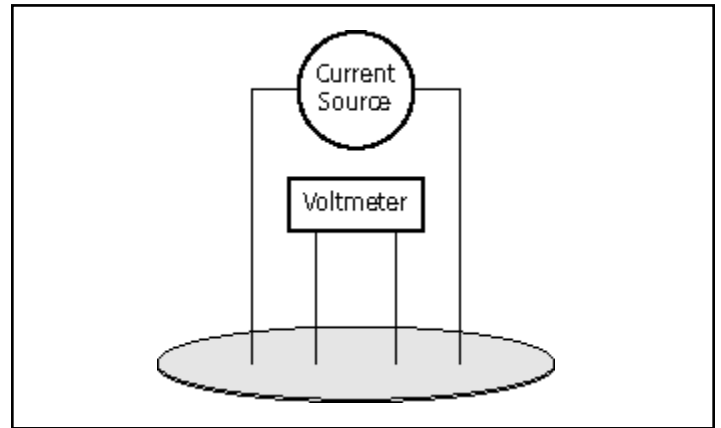


Figure 16. Four-point collinear probe resistivity configuration

その印加電流と測定電圧より表面もしくはシート抵抗は次式で算出される:

$$\sigma = \frac{\rho}{\ln 2} \times \frac{V}{I}$$

ここで、

σ =表面抵抗(Ω/\square)

V =電圧測定値(V)

I =印加電流(A)

極端に薄いもしくは厚い試料や試料の直径がプローブの間隔と比較して小さいものに対しては抵抗測定式に対し補正係数が必要となる。

もし試料の厚みが既知である場合、体積抵抗率は下記で表される。

$$\rho = \frac{\rho}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \times t \times k$$

ここで、

ρ =体積低効率($\Omega\text{-cm}$)

t =試料の厚み(cm)

k =プローブ間隔のウェーハ直径に対する比率及びプローブ間隔のウェーハの厚さに対する比率に基づく補正係数。この補正係数についてはSemi MF84(Standard Test Method for Measuring Resistivity of Silicon Wafers With an In-Line Four-Point Probe)のような標準4点プローブ抵抗テストプロシジャを参照。

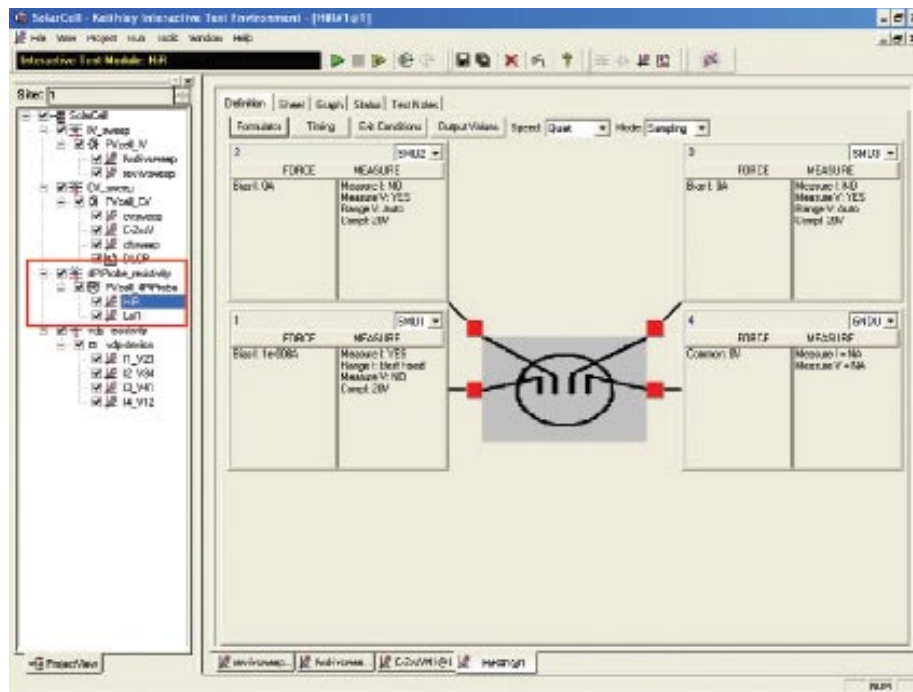


Figure 17. “HiR” test module for measuring resistivity

4点プローブのITM、HiRとLoRの使用について:

“HiR”と“LoR”のITMは4点共線プローブ測定に使用される。“HiR”のITMは1mΩから1TΩの広い抵抗レンジの材料に対し使用される。1MΩ以上の抵抗測定については4200-PAプリアンプが必要となる。“LoR”のITMは1mΩ～1kΩの低い抵抗を持つ材料に使用される。

4点抵抗測定を行うための“HiR”のITMのスクリーンショットをFig-17に示す。

“HiR”のITMは抵抗測定を実行する際3つもしくは4つのSMUを必要とする。SMU1とGNDUが外側の2つのプローブ間で電流を印加するために、SMU2とSMU3は内側の2本のプローブ間の電圧降下を測定するためにそれぞれ使用される。そして各SMUのForce Hi端子が4本のプローブにそれぞれ接続される。この接続における各SMUの意味をFig-18に示す。

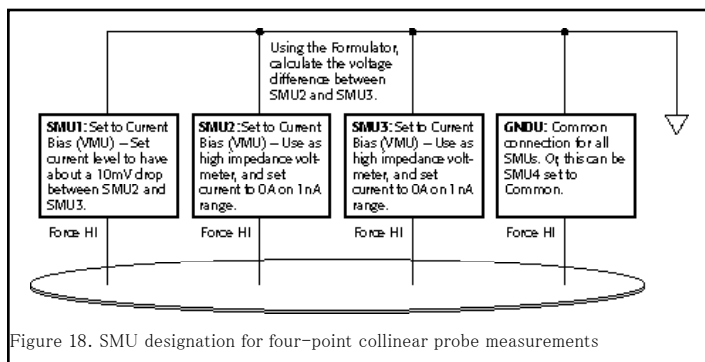


Figure 18. SMU designation for four-point collinear probe measurements

フォーミュレータ機能を用いSMU2とSMU3間の電位差が計算され、抵抗値とシート抵抗値がその電位差より求められ、その結果はITMのシートタブに表示される。

高抵抗測定において最適な測定を行うために誤差の発生源を考慮する必要がある。プローブ間の絶縁抵抗レベルが測定を

する材料の抵抗より十分に大きいプローブを使用する。それによりプローブ先端からのリーク電流による誤差を防ぐことができる。その際は測定回路が電氣的にシールドされた状態を保ち、そのシールドを4200SCSのLo端子に接続しておく。Lo端子はGNDUもしくはトライアキシャルケーブルの外側シールドを使用する。さらにトライアキシャルケーブルをガード測定を行うために使用する。それによりリーク電流による誤差や測定時間が大きく改善される。最後に、ナノアンペアやピコアンペアレンジの微小電流を印加したり、電位差測定の際に負荷誤差を避けるための高入力インピーダンスを与えるため4200-PAプリアンプオプションも必要となる。

“LoR”のITMは低抵抗材料に対してのみ用いられ、1もしくは2つのSMUが必要となる。その場合においてはSMUのForceとSense端子をFig-18に示したように4つのプローブに接続する。

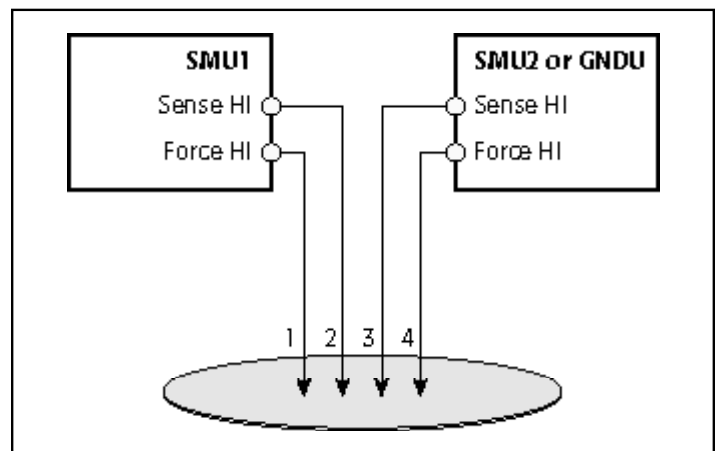


Figure 19. Connecting two SMUs for four-point probe measurements

Fig-19に示した接続では、SMU1のForce HI端子がプローブ1に電流を印加し、プローブ2とプローブ3の間の電位差を二つのSMUのSense端子で測定する。

熱電オフセット電圧を補正するため電流を正と負の両極で印加し2回電圧測定を行う。そしてその2回の結果は熱電EMFをキャンセルするために平均化される。“LoR”のITMではこのオフセット補正が2つの電流値を印加することにより自動的に実行され、フォーミュレータ機能にて計算され、補正された抵抗値やシート抵抗値がシートタブに表示される。

Van der Pauw法での抵抗測定:

抵抗測定におけるVan der Pauw(以降vdp)法は任意の平坦な形状の試料の境界に別々に4点をコンタクトする。そして抵抗値がFig-20に示したような8種類の測定を行い求められる。

全種類の測定が実施された後、以下の2つの抵抗値が求められる。

$$\rho_A = \frac{\rho}{\ln 2} f_A t_s \frac{(V_2 + V_4 - V_1 - V_3)}{4I}$$

$$\rho_B = \frac{\rho}{\ln 2} f_B t_s \frac{(V_6 + V_8 - V_5 - V_7)}{4I}$$

ここで、

ρ_A 及び ρ_B : 体積抵抗(Ω -cm)

t_s : 試料の厚み(cm)

V_1 - V_8 : 電圧値(V)

I : 電流値(A)

f_A 及び f_B : 試料の対称性に基づく幾何学的因子。さらにそれらは次式で示される2つの抵抗比QA及びQBと相関している(完全な対称性を持つ場合 $f_A=f_B=1$)。

$$Q_A = \frac{V_2 - V_1}{V_4 - V_3}$$

$$Q_B = \frac{V_6 - V_5}{V_8 - V_7}$$

さらにQとfは次のように相関する:

$$\frac{Q - 1}{Q + 1} = \frac{f}{0.693} \operatorname{arc} \cosh \left(\frac{e^{0.693/f}}{2} \right)$$

この関数のプロットをFig-21に示す。Qを求めることによりこのプロットから“f”の値を得ることが出来る。

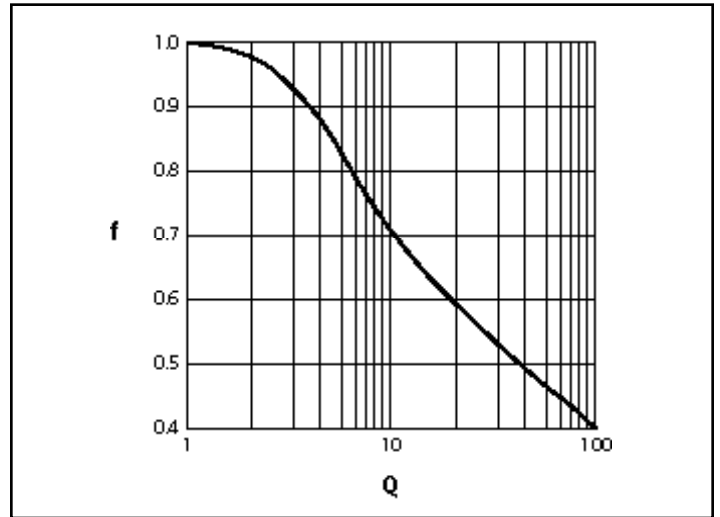


Figure 21. Plot of f vs. Q

ρ_A 及び ρ_B を得ることにより抵抗の平均値(ρ_{AVG})が次式により求められる。

$$\rho_{AVG} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2}$$

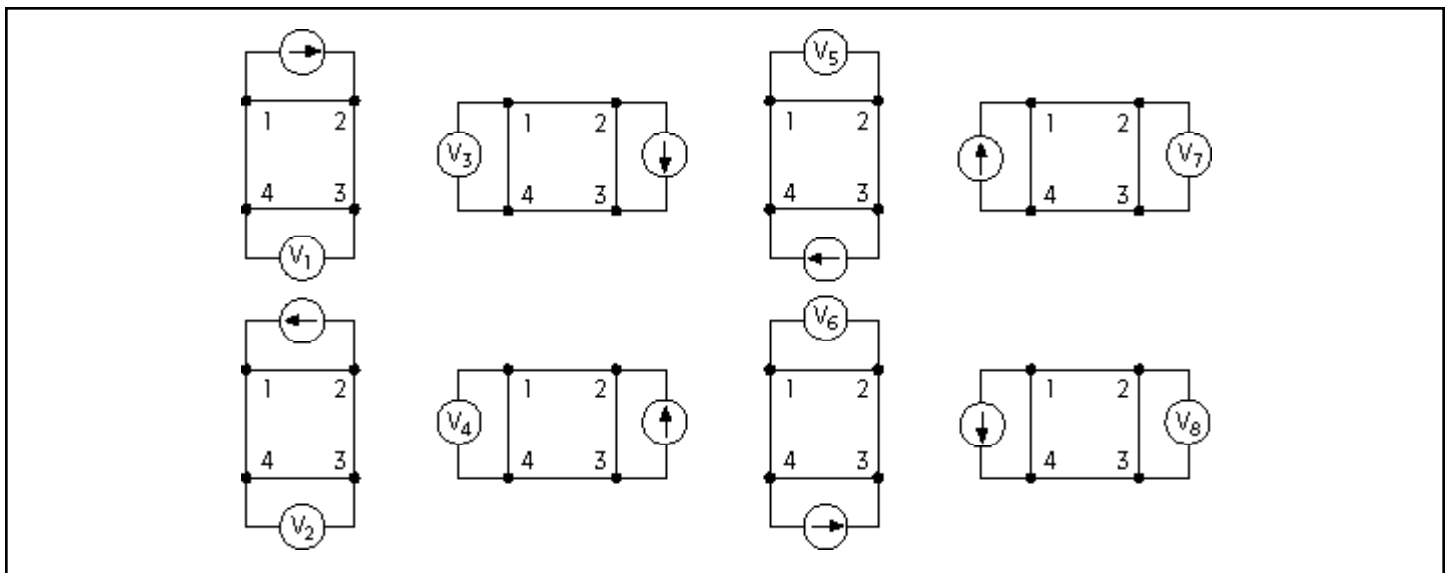


Figure 20. Van der Pauw resistivity measurement conventions

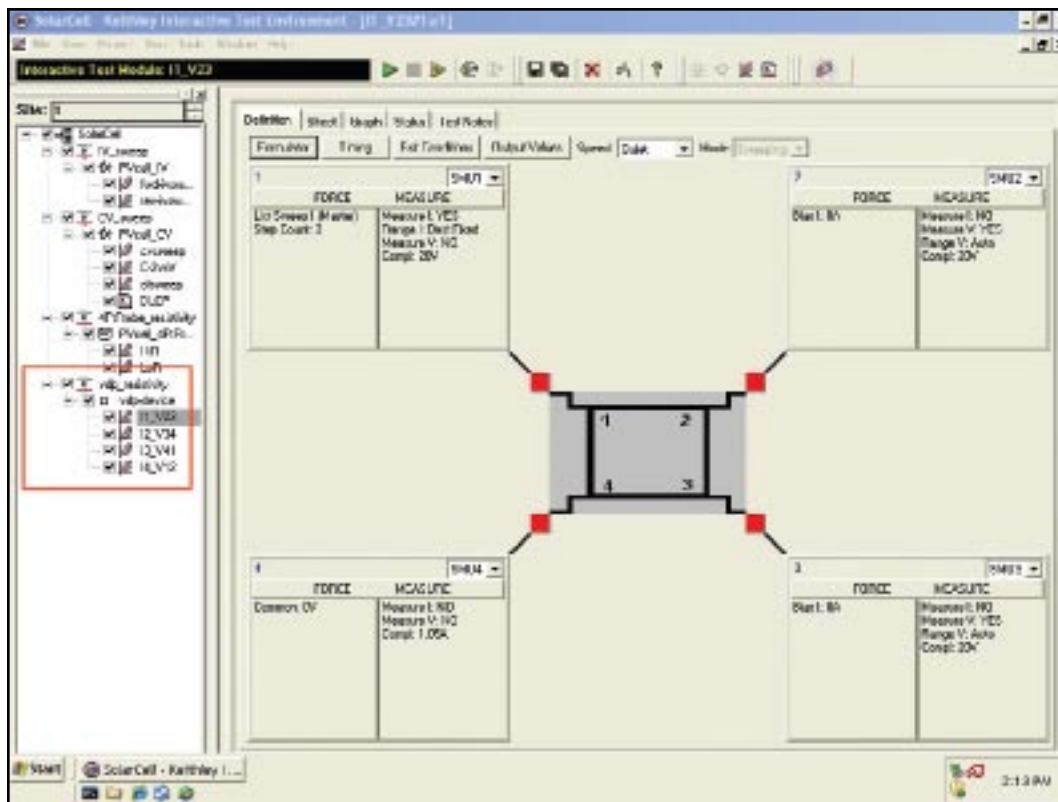


Figure 22. Screenshot of van der Pauw test

Vdp_resistivityのサブサイト及びvdp法のITMの使用について:

Vdp抵抗測定を自動化するためにSolarCellプロジェクトは“I1_V23”, “I2_V34”, “I3_V41”, “I4_V12”の4つのITMを含んだvdp-resistivityサブサイトをもつ。そのテストのスクリーンショットをFig-22に示す。

試料の各端子はSMUのForce HI端子と接続されるため、4SMU構成の4200-SCSが必要となる。4つのSMUはそれぞれ4つのITMにおいて、1つのSMUが電流を印加し、2つのSMUが電圧計として使用されそして1つがCommon設定されるというように異なって構成される。この測定の設定は4SMUのそれぞれが異なった機能を各ITMにおいて持ちながら試料を取り囲む形で繰り返される。各ITMにおけるそれぞれのSMUの機能をFig-23に示す。

テストパラメータの調整

テスト実行前に試料によって幾つかのテストパラメータを調整する必要がある。特に印加電流値、セリング時間、試料の厚みを決定することが必要となる。

・印加電流値

プロジェクトを開始する前に、予想される抵抗値に応じた印加電流値を入力する。試料の温度均衡を保つため電位差が約25mVを超えないように電流値を調整する。4つのITMのそれぞれにおいて両極性のテスト電流を入力し電流値を同じにする。

・セリング時間

高抵抗測定においては測定のセリング時間を決定する必要があり、それは試料の2端子間に電流を印加し隣り合う2端子間の電圧降下を測定するITMを作成することにより行うことができる。その際セリング時間は電圧値の多点読み取りを行い、時間に対する電位差のプロットをすることにより決定することができる。

このセリング時間のテストITMは既存のvdpのITMをコピーし中身を一部修正する。Source FunctionをSweepモードからSamplingモードに切り替え、Timing Menuにおいて1秒のdelay時間で数百の読み取りに設定し、“Timestamp Enabled”にチェックを入れる。その測定終了後電位差 vs. 時間のグラフをプロットする。セリング時間はそのグラフを観察し、読み取り値が最終の値を満足するパーセンテージ以内になった時間を求め決定する。

・試料の厚さ

サブサイトレベルにおいて計算シート(Calc Sheet)に試料の厚さを入力する。サブサイト“vdp_resistivity”を選択し、サブサイトデータ“vdp-device”タブに移動する。そこには電位差とテスト電流の出力値が含まれている。“Calc”タブから厚さが調整できる。デフォルト厚さの値は1cmである。

・補正因子

サブサイトの階層における“Calc”シートにある抵抗率を求め式に補正要因を必要に応じて入力することが可能である。抵抗率に試料の幾何学性や均一性に基づいたこの因子を乗算する。補正因子のデフォルト値は1となっている。

プロジェクトの開始

Van der Pauw抵抗率測定はサブサイトの階層から開始しなければならない。Vdpの各ITM (“I1_V23”, “I2_V34”, “I3_V41”, “I4_V12”)の前の4つのチェックボックスにチェックが入っていることを確認し、サブサイトvdp_resistivityをクリックする。サブサイトのランボタンを使用しプロジェクトを実行する。4つのそれぞれのITMからの電位差がサブサイトデータシートタブに表示される(Fig-24参照)。

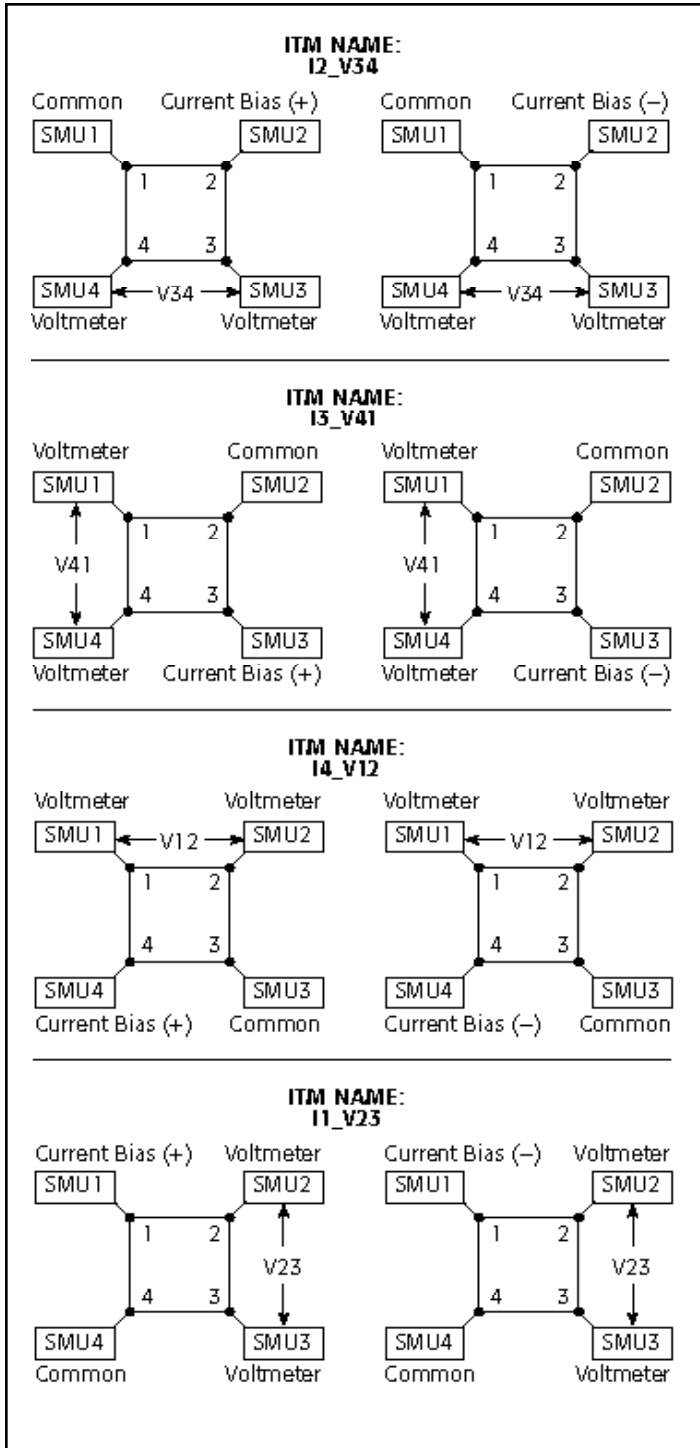


Figure 23. SMU configurations for van der Pauw measurements

ホール電圧測定:

ホール電圧測定は導電型、キャリア濃度、正孔移動度を求めることができるため、半導体材料の特性評価として重要である。Fig-25に示した構成で磁束を与えながらホール電圧を測定する。

正の磁界(B+)を与えながら試料の端子1から3に電流を印加し、端子2と4間の電圧降下(V₂₋₄₊)を測定する。そして電流を逆に流し同様の電圧降下(V₄₋₂₊)を測定する。次に電流を端子2と4間に印加し端子1と3間の電圧降下(V₁₋₃₊)を測定する。そして同様に電流を逆に印加し電圧降下(V₁₋₃₊)を測定する。

磁界(B-)を逆にし同様の手順を繰り返し、同様の電圧降下(V₂₋₄₋),(V₄₋₂₋),(V₁₋₃₋),(V₃₋₁₋)を測定する。

Table-3にそのホール電圧測定をまとめる。

Table 3. Summary of Hall Voltage Measurements

Voltage Designation	Magnetic Flux	Current Forced Between Terminals	Voltage Measured Between Terminals
V2-4+	B+	1-3	2-4
V4-2+	B+	3-1	4-2
V1-3+	B+	2-4	1-3
V3-1+	B+	4-2	3-1
V2-4-	B-	1-3	2-4
V4-2-	B-	3-1	4-2
V1-3-	B-	2-4	1-3
V3-1-	B-	4-2	3-1

8つのホール電圧測定より平均ホール係数が次式で算出される。

$$R_{HC} = \frac{t(V_{4-2+} - V_{2-4+} + V_{2-4-} - V_{4-2-})}{BI}$$

$$R_{HD} = \frac{t(V_{3-1+} - V_{1-3+} + V_{1-3-} - V_{3-1-})}{BI}$$

ここで、

R_{HC} 及び R_{HD} :ホール係数(cm^3/C)

t :試料の厚さ(cm)

V :測定電圧値(V)

I :試料に印加する電流値(A)

B :磁束(Vs/cm^2)

R_{HC} 及び R_{HD} が求められることにより平均ホール係数(R_{AVG})は次式にて決定される。

$$R_{H,AVG} = \frac{R_{HC} + R_{HD}}{2}$$

抵抗率(ρ_{AVG})及びホール係数(R_H)より次式にてホール移動度(μ_H)が算出される

$$\mu_H = \frac{|R_H|}{\rho_{AVG}}$$

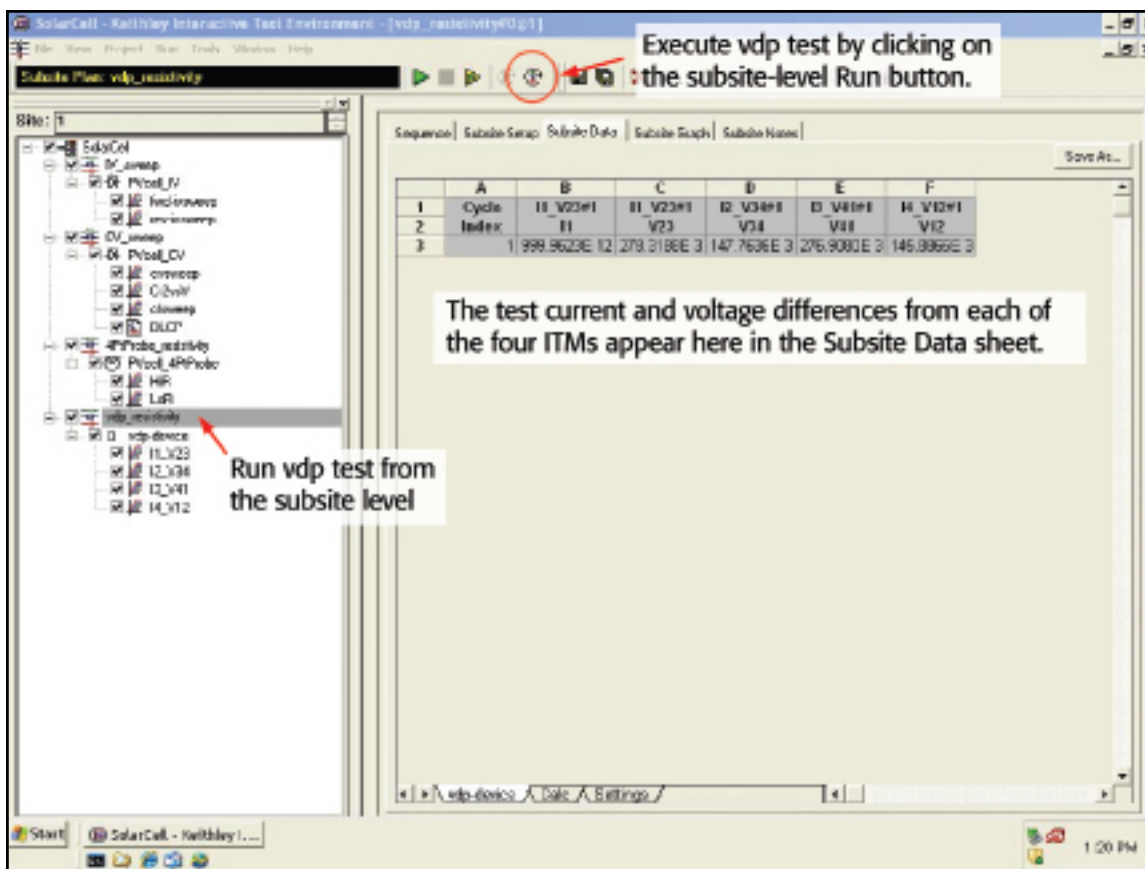


Figure 24. Executing the vdp_resistivity test

4200SCSを使用したホール電圧測定:

SolarCellのプロジェクトにはホール電圧を実際測定する特定のテスト条件は入っていないが、4つのITMをホール係数や移動度を求めるためのサブサイトに追加することができる。ホール測定の構成がvan der Pauw抵抗率測定と酷似していることを考えると、vdpのITMをコピーしホール電圧測定用に修正することができる。Fig-26にITMにおける4つのSMUをホール電圧測定用に構成する方法を示す。ホール電圧の値をサブサイトの階層のCalc Sheetに返すためにDefinitionタブのOutput Valueのチェックボックスにチェックを入れる。

磁気装置を制御するためにはUTMを使用する必要がある。GPIB制御可能な磁気装置に対し、電磁気の大きさや極性を制御するためユーザーがKULTを使用しプログラミングを行う必要がある。そこで作成したプログラムはプロジェクト内のUTMから呼び出すことができる。KULTを使ったプログラミングについては4200-SCS Reference Manualの第8章に記載されている。

もし永久磁石が使用された場合、UTMはプロジェクトツリーのテストシーケンスを一旦停止し試料に与える磁界の極性をユーザーに変更するタイミングを促す役割をする。プロジェクトプロンプトの使用方法については4200-SCS Reference ManualのSection-Aを参照。

最後にホール係数及び移動度がサブサイト階層のCalc Sheetに出力される。それらの計算機能は抵抗率を求めるための他の式に追加することができる。

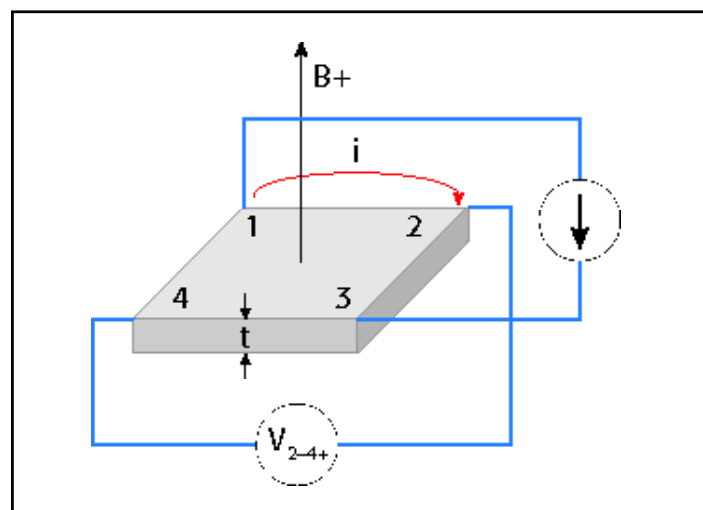


Figure 25. Hall voltage measurement

結論

太陽電池セルの電気的な特性を測定することはデバイスの出力性能や効率を求めるために重要である。4200SCSはI-V、C-V及び抵抗測定を自動化することによりセルの試験を簡素化し、グラフィクスや解析機能も提供している。また、1A以上の電流測定に対してはシリーズ2400や2600ソースメータを太陽電池セルの試験に用いることができるが、太陽電池セルの測定におけるそれらのモデルの詳細な情報についてはケースレーのウェブサイト(www.keithley.com)を参照されたい。

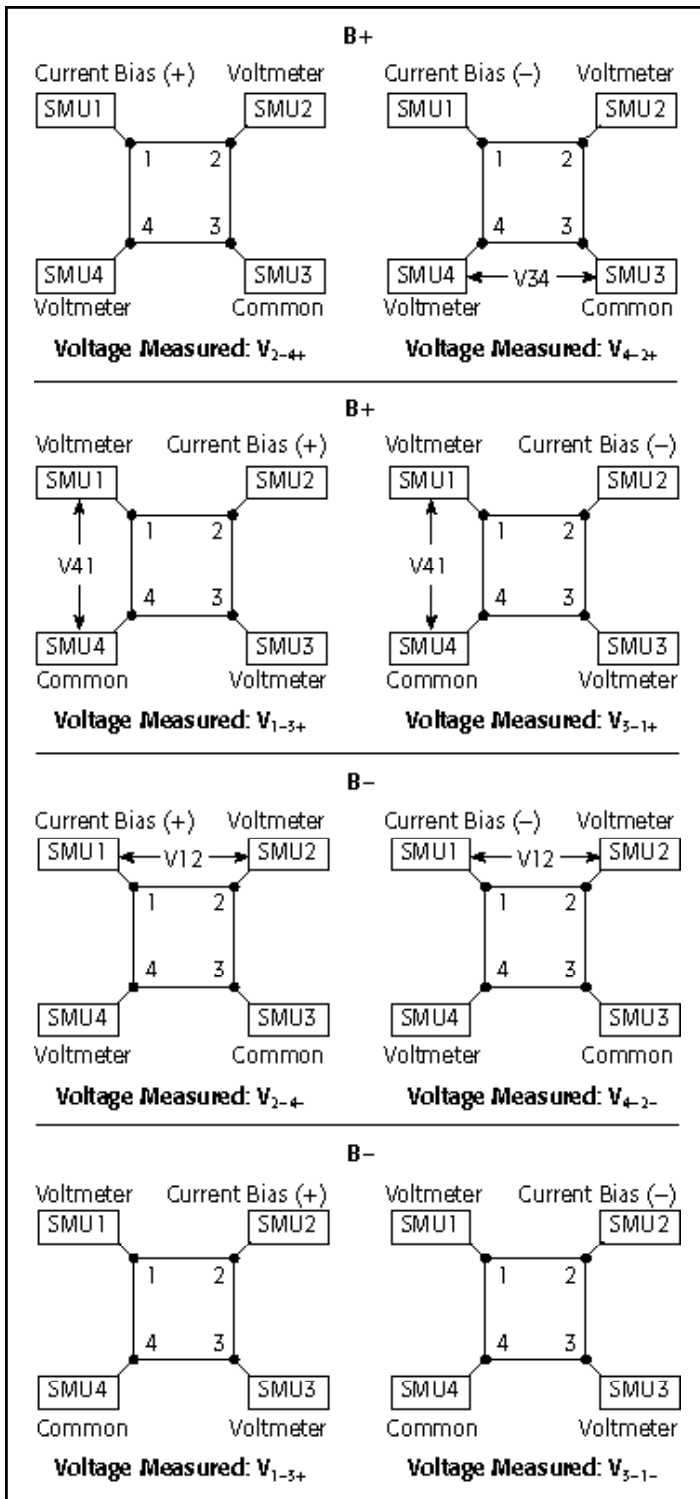


Figure 26. SMU configurations for Hall voltage measurements

Specifications are subject to change without notice.
All Keithley trademarks and trade names are the property of Keithley Instruments, Inc.
All other trademarks and trade names are the property of their respective companies.



A G R E A T E R M E A S U R E O F C O N F I D E N C E

KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. ■ 28775 AURORA ROAD ■ CLEVELAND, OHIO 44139-1891 ■ 440-248-0400 ■ Fax: 440-248-6168 ■ 1-888-KEITHLEY ■ www.keithley.com

BELGIUM
Sint-Pieters-Leeuw
Ph: 02-3630040
Fax: 02-3630064
info@keithley.nl
www.keithley.nl

CHINA
Beijing
Ph: 8610-82255010
Fax: 8610-82255018
china@keithley.com
www.keithley.com.cn

FINLAND
Espoo
Ph: 358-40-7600-880
Fax: 44-118-929-7509
finland@keithley.com
www.keithley.com

FRANCE
Saint-Aubin
Ph: 01-64532020
Fax: 01-60117726
info@keithley.fr
www.keithley.fr

GERMANY
Germering
Ph: 089-84930740
Fax: 089-84930734
info@keithley.de
www.keithley.de

INDIA
Bangalore
Ph: 080-26771071, -72, -73
Fax: 080-26771076
support_india@keithley.com
www.keithley.com

ITALY
Peschiera Borromeo (Mi)
Ph: 02-5538421
Fax: 02-55384228
info@keithley.it
www.keithley.it

JAPAN
Tokyo
Ph: 81-3-5733-7555
Fax: 81-3-5733-7556
info.jp@keithley.com
www.keithley.jp

KOREA
Seoul
Ph: 82-2-574-7778
Fax: 82-2-574-7838
keithley@keithley.co.kr
www.keithley.co.kr

MALAYSIA
Penang
Ph: 60-4-643-9679
Fax: 60-4-643-3794
chan_patrick@keithley.com
www.keithley.com

NETHERLANDS
Gorinchem
Ph: 0183-635333
Fax: 0183-630821
info@keithley.nl
www.keithley.nl

SINGAPORE
Singapore
Ph: 65-6747-9077
Fax: 65-6747-2991
koh_william@keithley.com
www.keithley.com.sg

SWEDEN
Stenungsund
Ph: 08-50904600
Fax: 08-6552610
sweden@keithley.com
www.keithley.com

SWITZERLAND
Zürich
Ph: 044-8219444
Fax: 044-8203081
info@keithley.ch
www.keithley.ch

TAIWAN
Hsinchu
Ph: 886-3-572-9077
Fax: 886-3-572-9031
info_tw@keithley.com
www.keithley.com.tw

UNITED KINGDOM
Theale
Ph: 0118-9297500
Fax: 0118-9297519
info@keithley.co.uk
www.keithley.co.uk