

I-V計測器を用いた高電流測定手法

電流や電圧を印加及び測定するために最も自由度の高い測定機器としてKeithley 2600Aシリーズのようなソース・メジャー・ユニット(SMU)がある。それらは卓上型のIV評価ツールとして、もしくは多チャンネルのIV測定システムの構成ユニットとして設計された高性能IV印加測定器であり、特に2600Aシリーズの各ソースメーターは高精度電源、電流源、デジタル・マルチメーター、測定機能を持つ任意波形発生器、電子負荷、トリガーコントローラーの機能を併せ持つ一体型測定機器で、電流もしくは電圧を印加し同時に電圧もしくは電流を測定することができ、さらには電流と電圧に対し両極性(つまり4象限オペレーション)をサポートしている。

SMU単体は設計によって印加及び測定できる電流・電圧の最大値に制限がある。本稿ではそのような単体のSMUの電流仕様をより大きな電流レベルに達成する方法を示しており、以下の2つの手法をもちいて検討が行われている。

1. パルススイープ
2. 複数のSMUの組み合わせ

そして今回検討されたそれらの手法は以下のような40Aまでの電流を印加・測定するハイパワーアプリケーションに適用できると考えられる。

- ・ 太陽電池やその他の太陽光発電
- ・ パワーMOSFETやIGBTのようなパワーマネージメントデバイス
- ・ 高輝度LED
- ・ RFパワートランジスタ

パルススイープ

単体のSMUが印加及び測定できる最大のDC電流と電圧には制限がある。その制限は設計段階で備わったものであり、一般的にはSMU自体への供給電源の最大出力、SMUに使用されているディスクリート部品の安全操作領域(SOA)、SMU内部のプリント基板上の配線間隔等に依存している。それらの設計パラメータのいくつかは最大電流制限値、最大電圧制限値や最大電力制限値に制約を受ける。4象限SMUのDC I-V制限の標準的な仕様をFig-1に示す。ここではその制限値は3A(図中Aで示された点)の最大DC電流と40Vの最大電圧(図中Bで示された点)となっている。さらにこのSMUの最大電力は40Wであり、それはFig-1中の点B(1A x 40V)で達成される。点Aでは電力はそれより低くなり18Wである。それらの違いは、例えば点Bの最大値はオンボード電源の最大許容出力電力により制約を受け、一方点Aはその制限が主要な部品が扱うことのできる最大電流に基づいているということにより説明することができる。

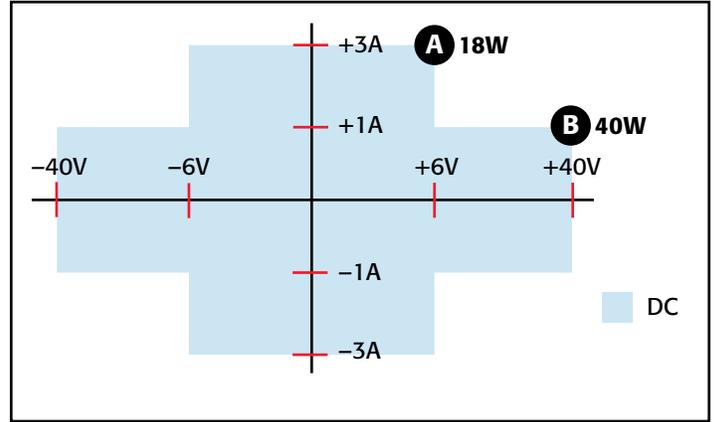


Figure 1

Fig-1はDC(もしくは連続波形) I-V制限値及び性能エンベロップを示している。ここでSMUがパルスのように時間に対し変化する波形を発生する場合を考えてみる。もしパルス波形が40Vの電圧、1msecのパルス幅、50%デューティー比の場合、数秒間平均した実効的な連続波形のパワーは40Wではなく20Wになる。このことによりSMUはパルスモードでDCモードより高い電流を出力することが可能となる(パルスモードでの瞬間的な最大ピークパワー値はDCピークパワーより高いが、パルスモードでの連続波の電力損失は平均値においてDCモードより少ない)。

例として、Fig-1に示したSMUと同じモデルのSMUのパルスIVエンベロップをFig-2に示す。パルス幅とデューティー比に制限は存在するが、パルスによって瞬間的なパワーは200Wまで出力可能である。ただこのように瞬間的なパワーは高くなっているが、許容範囲でのパルス幅やデューティー比での連続波のパワーは40WのDC電力リミットより低くなっている。

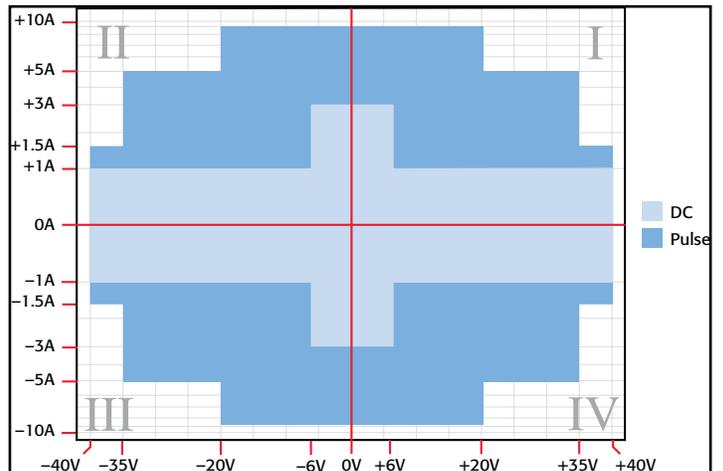


Figure 2

このパルス時の高い瞬間的なパワーをハイパワーI-Vスイープを実現するために利用する。ここでDUTに電圧バイアスを印加する典型的な測定を考えてみる。電圧値が低い値から高い値へと時間に対しスイープさ

れ、一定間隔で電流が測定される (Fig-3参照)。それによりI,Vのデータが得られ、それをプロットするとPN接合ダイオードにおいてはFig-4に示したような典型的なIVスイープが得られる。PNダイオードは太陽電池やその他の太陽光発電デバイスや高輝度LEDの測定の際にも同様に切り扱われる。このスイープでは電圧スイープの刻みは0.02Vとなっている。Fig-2に示したように印加電圧が6V以下のとき、そのSMUの許容電流値は3Aであり、その測定結果がFig-4に示されている。

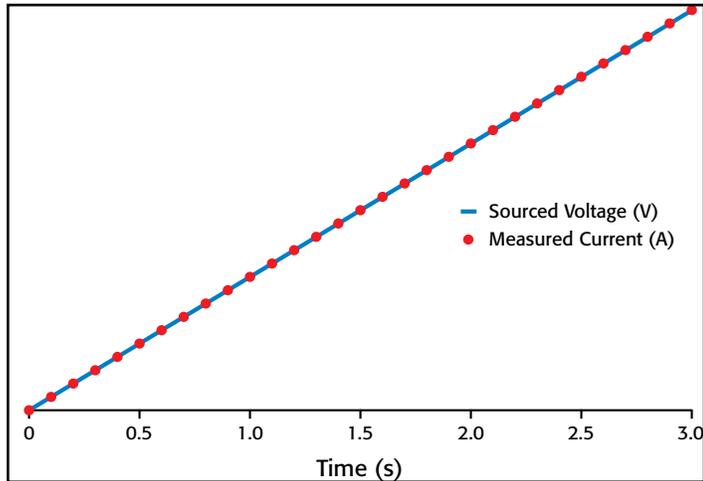


Figure 3

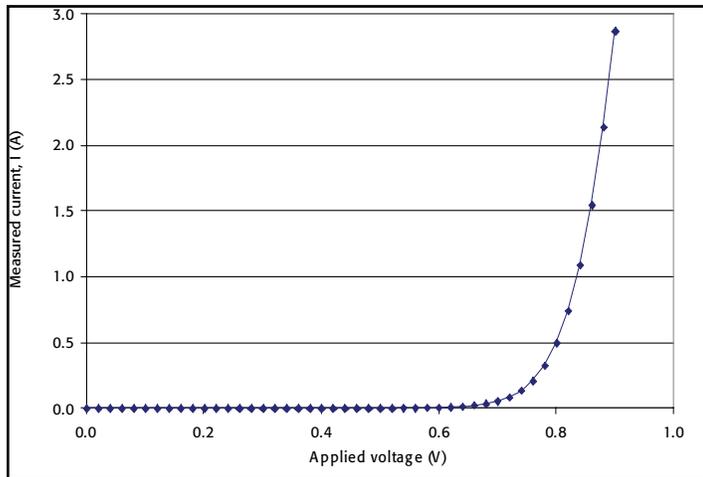


Figure 4

Fig-5はFig-3に示したDCスイープと同様にパルス電圧をスイープした図である。電流測定がされていない状態では印加電圧はゼロの状態になっており、このことにより連続波のパワーの平均値をその許容限界内に保つことが出来る。Fig-5で見られるように、電流値が計測される時点での電圧バイアス値と電流値のサンプリングレートはFig-3に示したDCスイープのそれらと一致している。この方法でパルススイープを行うことにより、10Aまでの高パワー領域の測定を行いながら (Fig-7参照) 低電力領域ではDCでのIV測定値と一致した測定が達成されている (Fig-6参照)。

Fig-6において、DCとパルスIVの測定カーブはほぼ重なっておりそれらの差をそのままグラフ中に表示するのは困難であるため、良好な相関を数値化する方法としてFig-6に相対割合の差を算出しプロットした。最も関心がある高電流領域でDCとパルススイープの相関が±2%以内を達成している。低電流レベルでの良好な相関結果に基づき、パルススイープはDCで測定できる最大電流値の3倍の10Aまで拡張することができる。その結果をFig-7に示す。

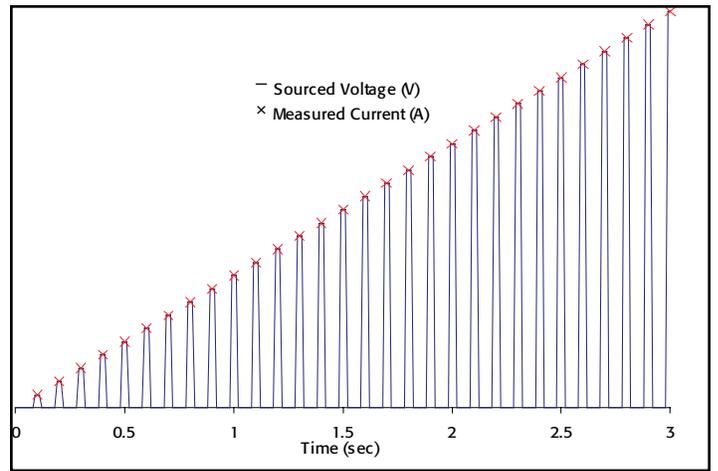


Figure 5

様々なタイプのDUTの対し、このパルススイープをハイパワーIVスイープ測定としてDCスイープの代わりに使うことができる。パルススイープの値がDCスイープの値とうまく相関しないDUTは変位電流の影響を受けている可能性がある (電流に対するマクスウェルの式の第2項参照)。大きな変位電流が電圧パルスの立ち上りの角の部分で生じ、特に容量のようなDUTでは大きな変位電流により電気特性が変化する。

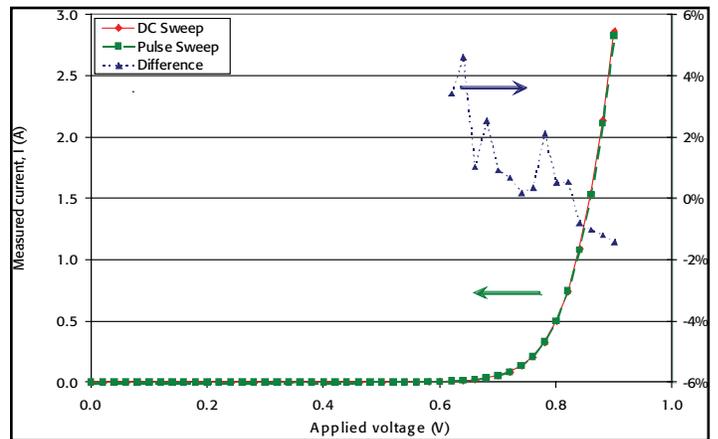


Figure 6

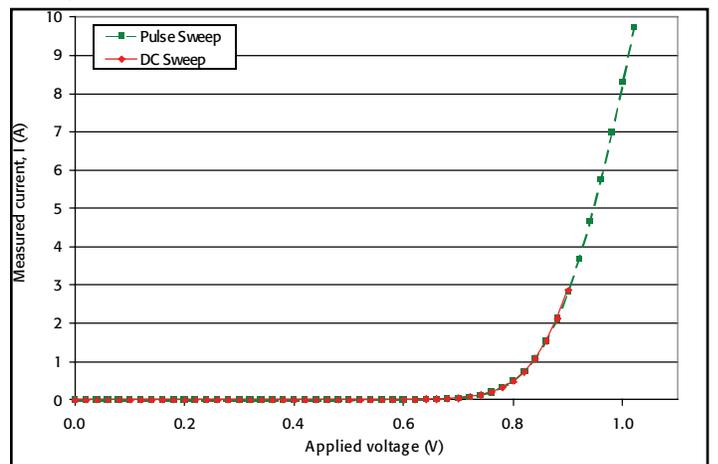


Figure 7

最適な測定結果を得るためにパルスIV測定が必要不可欠なハイパワーデバイスが多く存在する。その理由としてはハイパワーでの連続波で

の測定中、半導体材料それ自身が発熱により印加パワーを消失させ始めることによる。デバイスが発熱状態にあるとき、キャリアはより振動する格子と衝突するため伝導電流は低下する。したがってその電流の測定値は低く誤った値となってしまう、それをジュール熱による自己発熱効果 (<http://www.keithley.com/data?asset=50742>) と呼んでいる。そのようなデバイスは一般的にパルスモードやACや不連続な印加モードで動作するため、DCの測定で本来の値より低くシフトする電流値ではそれらのデバイスの特性を正確に評価できない。そのようなケースではパルステストを行わなければならない、そのパルス幅やデューティー比はデバイスのデータシート (<http://www.fairchildsemi.com/ds/1N%2F1N5400.pdf> のFig2に示した挿絵を参照) に明記されている。パルステストが必要なデバイスとしては主にRFパワーアンプや低電力のナノスケールデバイスなどがある。

DCスイープ測定からパルススイープに移行させる際の主なトレードオフ要因として次のものがある。

- ・ 使用するパルス幅はデバイスのトランジェントやケーブルやそれ以外の接続回路に対し十分安定し繰り返し測定が可能になるような長さである必要がある。
- ・ さらにそのパルス幅は使用する計測器の最大パルス幅やデューティーサイクルの制限をこえない範囲で設定する必要がある。

複数SMUチャンネルを組み合わせた高いDC電流出力の達成

高いDC電流を得るため複数のSMUチャンネルを組み合わせる手法として最も一般的なものはFig-8に示したようなDUTに対し並列に電流源をつなぐ方法である。

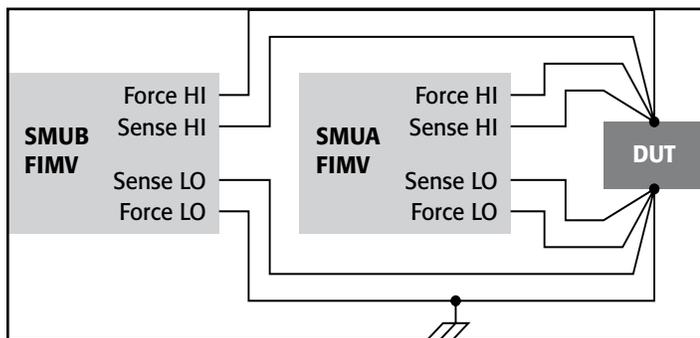


Figure 8

この手法は2つの電流源を同じ回路に並列に接続した場合、その回路に流れる電流値はそれらを加算したもの (キルヒホッフの電流の法則) という良く知られた法則を利用している。Fig-8は両方のSMUが電流を印加し電圧を測定する。ここでHI端子とはSMUの高インピーダンス端子を言い、LO端子とはSMUの低インピーダンス端子を言う。さらに”FORCE”端子は電流を印加する端子で、SENSE線は4端子電圧測定に使用される。この4端子接続は高電流測定において必須であり、詳細については後述する。両SMUのLO端子(FORCEとSENSE)は全て接地される。

この構成に対する特性を以下に示す:

- ・ 印加電流: $I_{DUT} = I_{SMU A} + I_{SMU B}$
- ・ 負荷電圧:
 $V_{DUT} = V_{SMU A} = V_{SMU B}$
- ・ 最大印加電流:
 $I_{MAX} = I_{MAX SMU A} + I_{MAX SMU B}$

- ・ 最大電圧: 2つのSMUの最大電圧容量の少ないほうに制限を受ける。それは2つのSMUの電流印加時の最大電圧値のわずかな差である。

その他の記述:

- ・ 最大の出力値を得るため、SMU AとSMU Bの出力電流の極性を同じに設定する。
 - 必ずしもこの設定が必要であるとは限らないが、この構成においては印加の極性は一般的に両SMUとも同じになる。もし可能であれば、一方のSMUの印加設定を固定しもう一方のSMUでスイープを行うようにする。これは両方のSMUで同時にスイープを行うより好ましいやり方である。もし両SMUをスイープする場合、例えばオートレンジを使った場合のようにSMUの出力インピーダンスは自動的に変化し、さらに、DUTのインピーダンスも例えば高抵抗のオフ状態から低抵抗のオン状態まで急激に変化する可能性がある。回路の多くのインピーダンス成分の変化に伴い、各バイアスポイントにおける回路全体のセトリング時間が増加する。これは過渡現象によるものであるが、一方のSMU電流源を固定してもう一方をスイープするとより早く安定した結果が得られ、その結果テストのスループットが高くなる。
 - この一方のSMUの電流値を固定しもう一方をスイープする方法の一つの問題点としては、その最大値より十分下回る電流レベルにおいて、一つのSMUがもう一方より多くの電流を出力もしくはシンクしてしまうことがある点である。しかし電流レベルが2つのSMU間で均一でなくとも、高品質なSMUを使用する限りそのことが精度に影響を与えることはない。つまり、スイープ中2つのSMUの電流レベルを同等に保つ必要はない。
 - したがって、0AからIMAXまでスイープする場合、まず両SMUを0A印加に設定し、SMU Bを0Aから+IMAX SMU Bまでスイープする。次にSMU Aを0Aから+IMAX SMU Aまでスイープする。同様なアプローチがIMAXから0Aへ、0Aから- IMAXもしくは- IMAXから0Aへのスイープでも適用できる。
 - -IMAXから+IMAXへのスイープでは、まず、SMU Aを- IMAX SMU A、SMU Bを-IMAX SMU Bに設定する。次にSMU Bを- IMAX SMU Bから+IMAX SMU Bにスイープしその後SMU Aを- IMAX SMU Aから+IMAX SMU Aにスイープする。繰り返しになるが、スイープ中2つのSMUの電流レベルを同等に保つ必要はない。同様なアプローチは+IMAXから-IMAXにも適用できる。
- ・ 両SMUが電流を印加するが、一方のSMUに対してコンプライアンス設定を通じて最大出力電圧の制限をかける。例えば、SMU Bの電流印加の電圧コンプライアンスをSMU Aより大きく設定する。すなわち $V_{LIMIT SMU B} > V_{LIMIT SMU A}$ とする。
 - もしDUTが電源となる場合、SMU Aのコンプライアンス設定は、回路やSMUを未知の状態にすることを回避するため、DUTが印加できる最大電圧より大きくしなければならぬ。例えば、DUTが9VのバッテリーでSMU Aのコンプライアンスが5Vに設定された場合、結果は予測不能で不安定なものになる。
 - SMU Bの電圧測定レンジをそのコンプライアンスレンジに合わせる。SMU Aの測定レンジに対しては特別な要求はないが、測定レンジがコンプライアンスレンジより小さくして計測機器が (Keithley 24xx型や6430型のように) 実コンプライアンスとレンジコンプライアンスの違いを許容しているかどうかということに注意をする必要がある。

ここで我々は、Fig-2に示されたDC IVのパワーエンベロップを持つSMUを使い、このSMUを並列に組み合わせる手法を適用する。Fig-4で単体のSMUでの測定結果が示されているものと同じP-NダイオードをDUTとして使用する。2つのSMUを並列に組み合わせることにより、DC電流測定の上限を3Aから6Aに倍増することが期待できる。

Fig-9にこの検証結果を示す。3Aまで単体のSMUと2台のSMUの測定結果は極めて良く相関が取れており、それらの差をそのままグラフ中に表示するのは難しいため、前述したように、両者の結果の相対的な割合の差を計算しFig-9にプロットし、ほとんどの場合単体のSMUと2台のSMUによる差が±1%以内の相関を達成していることが確認された(単体のSMUの結果をリファレンスとして計算)。低電流レベルにおける良好な相関が確認されたことにより、単体のSMUのスweepより2倍高い電流値である最大6AまでのIVカーブが2台のSMUを使用することにより達成できた。

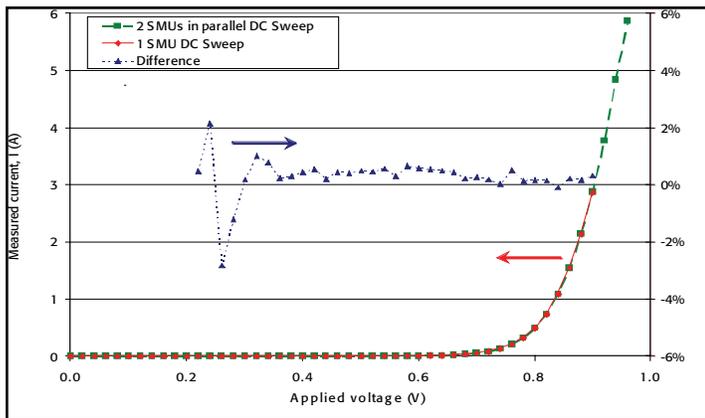


Figure 9

複数SMUを使用したパルススweep

この章ではパルススweepでパワーを増加させる手法と複数SMUを並列に使用する手法を組み合わせる方法について議論する。Keithley 2602A型のような2チャンネルSMUを2台使用することによりSMUのチャンネル数を2から4に増やすことができる。Fig-2に示したように、このSMUは20V以下のバイアス条件で最大10Aまでのパルス電流出力が可能であるため、従って最大40A(4 x 10A)の電流を達成することができ、これはDCスweep条件で単体のSMUが出せる値の13倍になる。

当然のことながら、この手法を用いる際には厳重な注意が必要になる。まず、人に対する安全面として危険な電圧を扱う際その作業者が回路に直接触れないよう絶縁したり障壁を設けることが重要になる。そのような予防措置を怠ると電気的な衝撃や死亡事故につながる危険性がある。

さらに測定機器やDUTへのダメージを避ける必要がある。まだオンしていない機器にダメージを与えたり装置の一部にパワーが供給されないように複数のパルスは厳密に同期している必要がある。市場の多くのSMUは十分短い時間スケールで同期する能力がないため、このような測定法に適していないが、Keithley 2600Aシリーズ SMUはそれを考慮し計されている。二つ以上のSMUを使う際、その他の重要な検討事項があり、それは次章で議論する。

SMUを組み合わせる前に、ベースラインを設定するため、単体のSMUを使った10Aのパルスを出し、オシロスコープで波形の観測を行う。ハイパワー向け高精度抵抗(0.01Ω, ±0.25%, KRLR-3274)をそのDUTとして使用し、300usecのパルス幅を設定する。0.1Vで300uの矩形波がオン

スコープで観測されることが期待され、その結果をFig-10に示す。さらに同様のDUTに40Aパルスを印加するため4SMUを並列に組み合わせた結果、それぞれのチャンネルが良好に同期した0.4Vの波形が観測された。

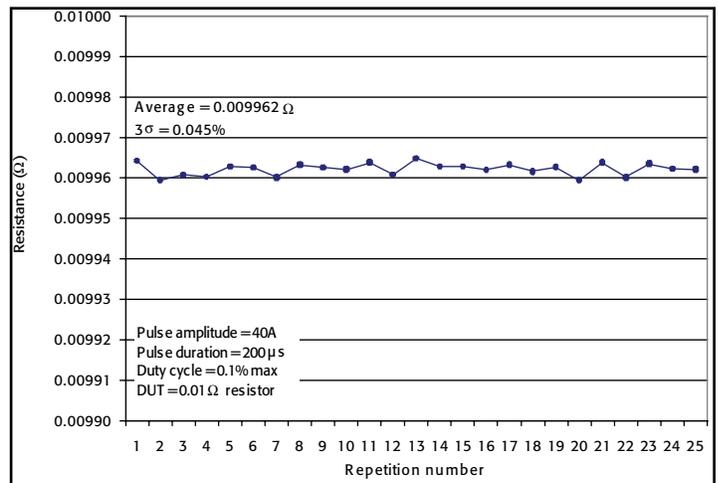


Figure 10

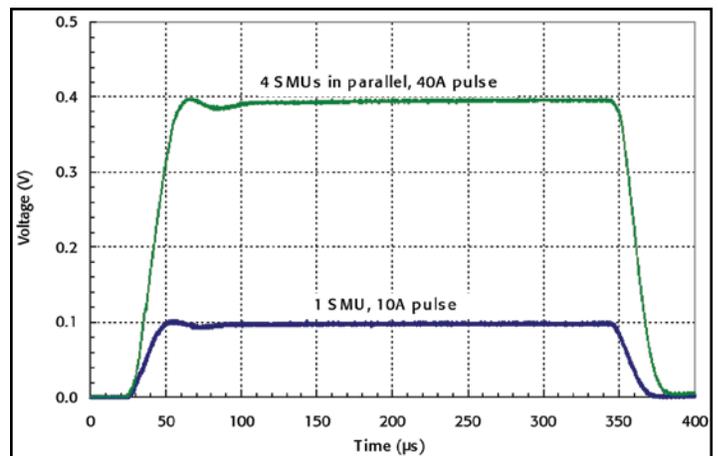


Figure 11

Fig-10に示した波形を用い、パルスの安定性を検証するため繰り返し試験が行われた。これは同時に高電流印加と低電圧測定的能力を評価するための特別に厳しいテストである。その結果はFig-11に示され、25回の繰り返しテストで0.045%の3σ標準偏差が得られた。

パルス性能の検証に伴い、4SMUを組み合わせたパルススweepをプログラムし、P-NダイオードでIV測定を繰り返し実行した。その結果をFig-12に示す。単体のSMUでの3AまでのDCスweepの結果と単体のSMUでの10Aまでのパルススweepの結果に良好な相関が確認された。その後40AまでIVスweep範囲を延長した。

s2端子デバイスでの検証結果に基づき、次にその手法をハイパワーMOSFETの3端子デバイス(IRFP240, www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/IRFP240.pdf)に適用させた。このデバイスは高いドレイン電流ID(ON) (VDS>20V, VGS>10Vで>20A)と、低いドレイン-ソース間のオン抵抗rDS(ON) (VGS=10V, ID=10Aで<0.2Ω)特性をもつ。

このデバイスの標準的な測定パラメータは以下である:

- ・ 各VGSに対するID-VDS
- ・ 各VGSに対するrDS(ON)-ID
- ・ しきい値電圧VGS(TH)

- ・ ドレイン、ソース間破壊電圧BV_{DSS}
- ・ ISD, VSD

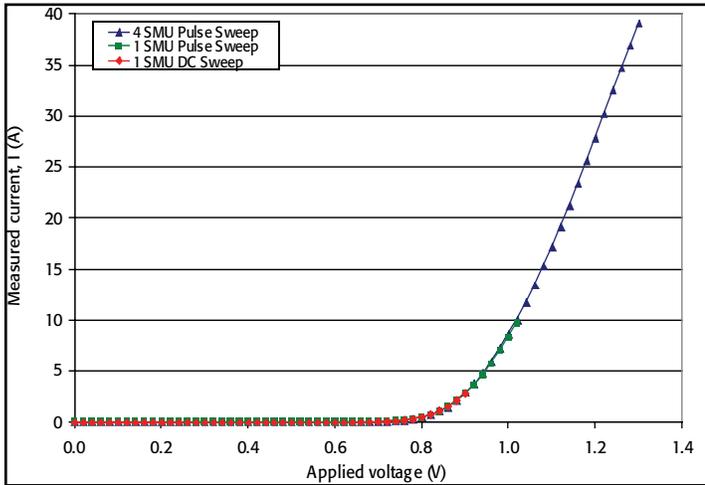
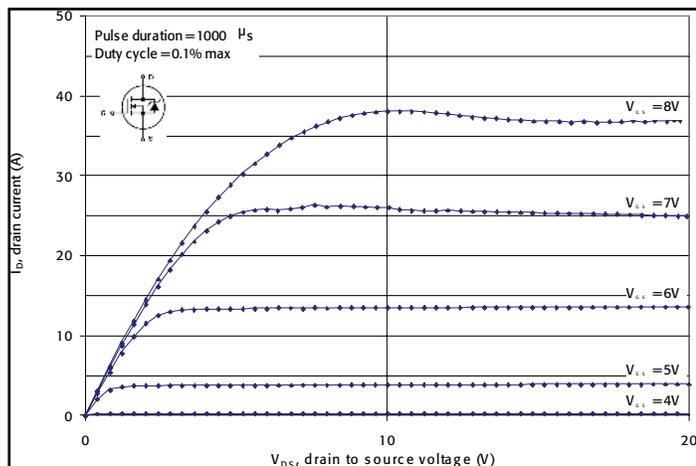


Figure 12

3端子デバイス測定に対し、40Aパルス電流をドレイン-ソース間に印加するため4SMUが並列に接続され、5番目のSMUはゲートバイアスを印加するためにゲート-ソース間に接続された。

VGSを変化させたID-VDSカーブをFig-13に示す。得られた結果はVg=7Vと8Vに対しVDS =10V付近でわずかな自己発熱現象を伴っており期待通りの結果を示している。自己発熱現象は1000usのパルス幅の条件で観測されている。おおよそ800Wのピークパワー値がこのテストセットアップで実現されていることに注目する。

Figure 13



rDS(ON)-IDカーブがVGS=10Vに対し最大ID=40Aのドレイン電流値まで測定されている。その結果はFig-14に示され、比較としてデバイスのデータシートのデータも示されており、良好な相関が確認されている。標準的な単体のSMUを使ったDCスイープでは測定は3Aまでとなり、このデバイスを評価するには電流値が不十分である。

最後にVGS=0VにおけるISD-VSDカーブがFig-15に示されている。その結果はデバイスのデータシートに記載されたデータと比較され、同様に良好な相関が得られている。

マイクロプロセッサやオンボードのメモリー、さらにはあらかじめ組み込まれたオープンソースのスクリプト言語を用いた計算や論理プ

ログラムが内蔵されたKeithley 2600シリーズのような最新のスマートSMUは、高速の並列テストに対しSMUにスクリプトを記録させPCコントロールなしで制御したり、GUIを使って容易にSMUを制御することができる。さらにKeithley 2600Aシリーズ SMUはメインとなる筐体が必要としないため、電源容量の制限や追加費用を負うことなく必要な数のチャネル数に拡張できる。

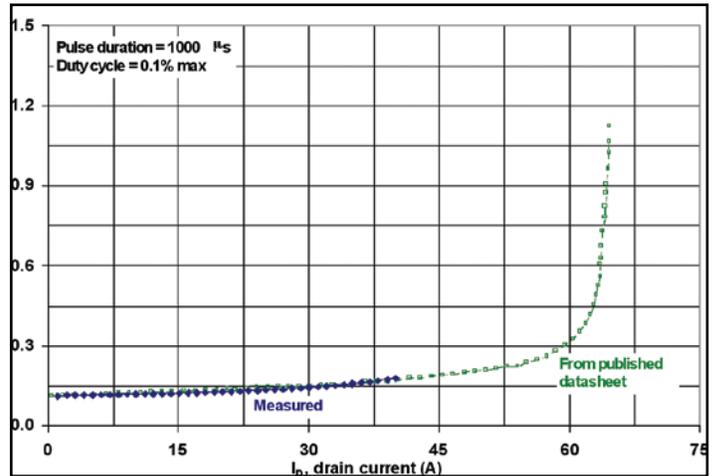


Figure 14

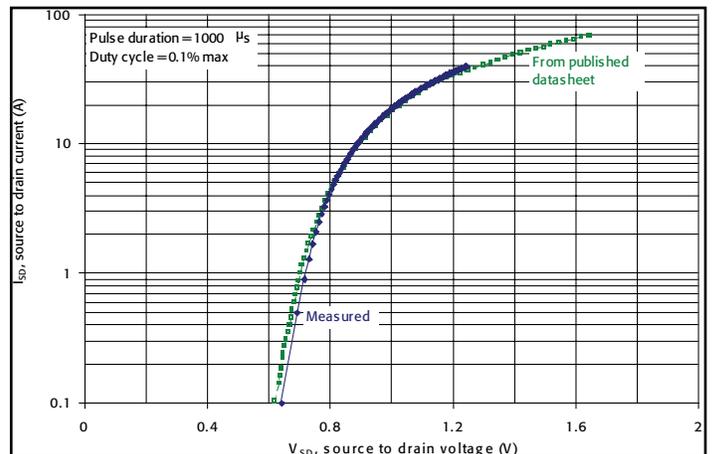


Figure 15

テストを行うための重要事項について

この章では、複数SMUパルススイープ手法を用いて得られた結果の精度を大きく改善するための鍵となる重要事項について述べる。

ソースリードバック:

DUTに電圧を印加し電流を測定するテストを考えた場合、SMUは印加と測定の両機能を持っているため、実際に印加している電圧値の読み取りが可能である。つまりそれは単なる印加-測定ではなく、印加-測定-測定シーケンスということになり、印加電圧とその読み取り及びデバイスを流れる電流測定が行えることを意味している。DUTに実際印加される電圧値がプログラム電圧値と異なる一般的な理由としてはDUTの大きな電流により、電源に負荷が与えられることがあげられる。そのような場合においては読み取り電圧値はプログラム値に対し小さくなる。前述したPNダイオードにて比較を行った結果をFig-16に示す。IV測定の最大値(約40A)において、プログラム電圧値は1.3Vであるが実際印加電圧値は1.2917Vであり、0.64%の小さな誤差があり、アプリケーションに

よっては測定結果に影響をもたらす場合もありうるが、その誤差それ自体は電圧軸における小さなオフセットで測定電流値に対して影響は少ない。

4線式測定:

高電流測定を行う際には4線式測定が必要となる。4線式測定はDUTから高インピーダンスの2本の電圧センス線を引き出すことにより測定におけるテスト配線による電圧降下をキャンセルすることができる。センス線にはほとんど電流が流れないため、センス線間で観測された電圧は事実上試料の抵抗間の電圧と同じである。

この手法は高電流測定を行う場合非常に重要である。40Aレベルでは、10mΩ程度の小さな抵抗でも0.4Vの電圧降下を生む。つまりもしSMUが1V、40Aを印加した際、配線抵抗が10mΩで2本のテスト線が使われていたとすると、そのDUTには0.2Vしか印加されず、テスト線により0.8Vもの電圧降下が生じていることになる。

4線式測定のより詳細な議論は<http://www.keithley.com/data?asset=10636>にて行われている。

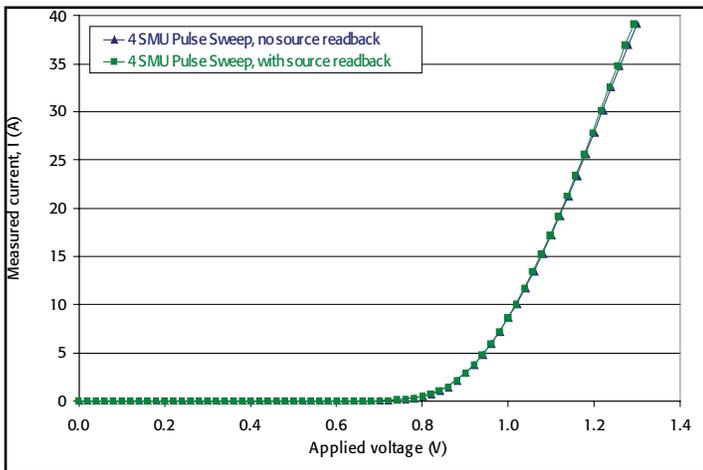


Figure 16

主に初期の印加電圧値にのみ影響を及ぼす印加読み取り機能とは異なり、4線式測定を導入することにより印加、測定両方の精度が大幅に向上する。

それは高品質の最新のSMUのほとんどがアナログフィードバック制御機能を持っているためであり、つまりプログラム電圧値が1Vで4線式でのDUT間の電圧がわずか0.2Vであった場合、SMUは電圧がプログラム値に近づくように電圧降下と負荷を補正するために電流を増加させる。それによりDUTのバイアスは目的の値により近づき、印加値と測定値の精度が向上する。

前に使用されたPNダイオードに対し、2線式と4線式の測定結果がFig-17に示されている。そのグラフに示されたように、テスト線の電圧降下により2線式のモードでは意図した電圧が印加されず電流値が低くなっている。

2線式での1.3Vバイアス時では、測定電流値は20A以下と4線式の半分になっている。これは大きな誤差であり4線式フルケルビン測定の利点を証明している。

もちろんより高精度な測定結果を得るためには、DUTにより近い部分に4線式ケルビン接続を行う必要がある。

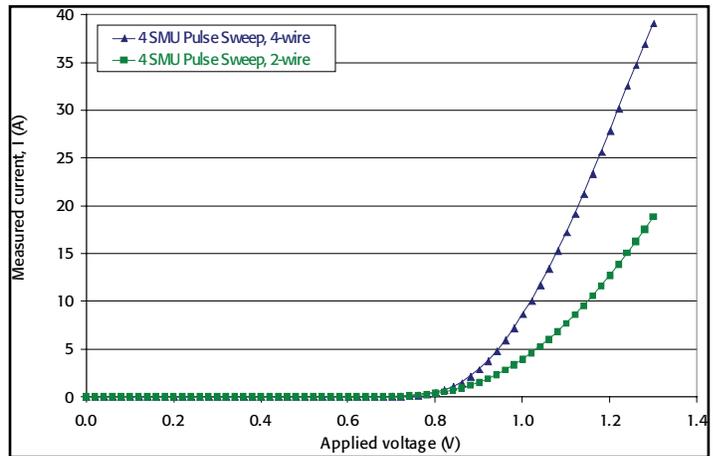


Figure 17

各DUTの端子における一つの電源の最大値

電圧スイープ電流測定は一般的な測定手法である。複数のSMUを並列にデバイスの一つの端子に接続する場合、全てのSMUは電圧印加の電流測定モードで使用される。しかし、以下の3点についてあらかじめ考慮しておく必要がある:

- ・ 電圧印加時SMUを非常に低いインピーダンス状態にする。
- ・ DUTのインピーダンスは電圧印加モードにおいてSMUより高い。DUTのインピーダンスはテスト中変動する。
- ・ 並列の全SMUが同じ電圧を出力するようにプログラムされていても、一つのSMUがその他のSMUと比較してわずかに電圧が低くなるような装置の電圧印加精度によるSMU間のわずかな差が存在する。

よって並列接続した3つのSMUをDUTの一つの端子に接続し、そして各SMUが電圧を印加し最大電流に近い値を出力し、さらにDUTが高インピーダンス状態の場合、全電流は電圧出力がわずかに小さいSMUに流れSMUにダメージを与えてしまう。従って、SMUを並列にDUTの一つの端子に接続した際はFig-18に示したように一つのSMUだけで電圧を印加するようにする。複数のSMUをMOSFETのドレインに接続したデータをFig-13-15に示す。

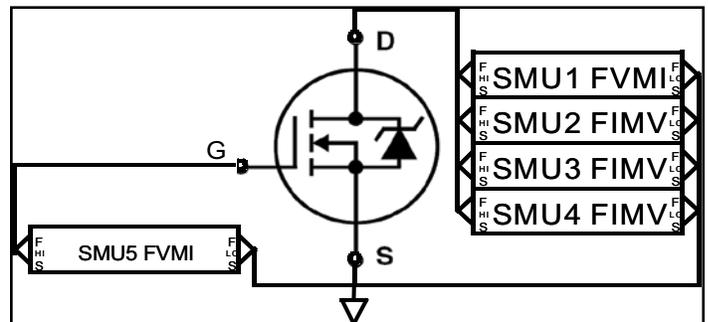


Figure 18

たとえFig-18の構成であっても、スイープ中はSMU一つだけが電圧印加/電流測定モードで他の電流印加/電圧測定モードのSMUのどれもが自動的にもしくは不注意に電圧印加/電流測定モードにならないように最大限の注意が払われる必要がある。例えば電流印加モードのSMUがそのプログラムした電圧コンプライアンスに達した場合、SMUは電流印加/電圧測定モードから電圧印加/電流測定モードに切り替わる。SMUが電流印加/電圧測定モードでプログラムした電流値を印加しDUTがその電流を引き込む場合、SMUはプログラムされた出力電流値を維持するためアナログフィードバックループ機能により自動的にその出力電圧を増やす。使用する最大電圧値はコンプライアンス電圧を使いユーザーによ

り設定される。SMUが電流印加/電圧測定モードで印加電圧コンプライアンスに達した場合、SMUはモードを切り替え低インピーダンス電圧源になりダメージを受ける危険が生じる。それを回避するため:

- ・ 電圧コンプライアンスレベルを適切な値に設定する (通常できる限り高い値に設定)。
- ・ スweep中測定結果をモニターするようにコーディングを実施し測定器がコンプライアンスに近づくことを避けるような措置を取るようにする。

一つの実験として全SMUを電流源に設定してみる。スweepはそのとき電圧バイアスではなく電流バイアスになる。その導入は容易であるが、この手法ではI-Vカーブの電圧軸のステップが均等で無く、電流軸に対し均等になるため標準的な解析アルゴリズムからみると複雑で混乱するかもしれない。Fig-19にそのIVプロットを示す。ここで、全てのSMUは電流印加/電圧測定モードで、電圧源は一つも無い。この結果はFig-13と比較できるが、Fig-13は一つのSMUを電圧源に使っているため電圧のステップが均等になっている。

Fig-18に示した手法は一つのSMUが出力電圧をコントロールし一方で残りのSMUが電流を供給するという原理で動作する。スweep測定時には一つのSMUが電圧源として、残りが電流源として用いられる。

Fig-12~Fig-17に示された結果に対し4つのSMUを使う場合:

- ・ SMU1を電圧源モード、SMU2, SMU3, SMU4を電流電モードに設定
- ・ 電圧ステップ値を決定
- ・ 最初SMU1は0V印加。SMU2~4は0A印加。
- ・ スweepループ:
 - 4つの全てのSMUで電流を測定
 - $ITOTAL = ISMU1 + ISMU2 + ISMU3 + ISMU4$ を計算
 - $I_{bias} = ITOTAL / 3$
 - SMU1の電圧値を前の電圧値+ステップ電圧値に設定する
 - SMU2, SMU3, SMU4をそれぞれ I_{bias} 値で電流源に設定
 - EXIT条件に達するまでこのループを繰り返す

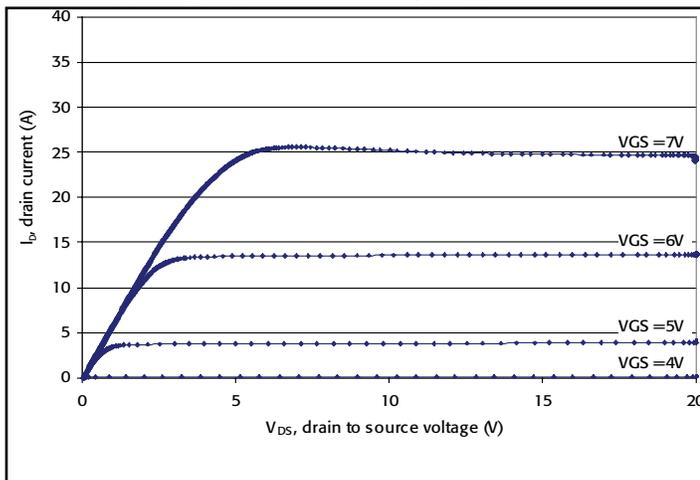


Figure 19

デバイス破壊による過剰なエネルギー散逸の緩和

同じ性能の二つのSMUが回路の一つの端子に並列に接続された場合、一つのSMUは常にもう一方のSMUが出力した全電流を引き込むことができる。そのような現象は例えばDUTが破壊しオープン状態になり、そして電流が流れる経路が無くなった場合に起こる可能性があり、その場合短い時間一つのSMUにもう一方からの全電流が流れ込んでしまう。

しかし一つの端子に並列に2台以上のSMUが存在する場合、一つのSMUが他のSMUから流れてくる全ての電流を引き込むことはできない。DUTが破壊した際、電流を引き込むSMUはSMUの中で一番電圧もしくはインピーダンスが低いもので、ほとんどの場合それは電圧を印加しているSMUである。その電圧を印加するSMUの信号入力を保護するために1N5829のようなダイオードが用いられる。これはSMUに流れ込む電流量を制限する。ここではヒューズはスピードが遅く、抵抗は大きな電圧降下を生じるためダイオードを使用することが望ましい。

Fig-18に示した接続にダイオードを付加したものがFig-20に示した接続である。SMU5も電圧印加/電流測定モードであるが、そのForce-Hiが高インピーダンスのゲート端子に接続されているため入力保護は不要である。さらにFig-20のテスト設定においてSMU2~SMU4が測定中にコンプライアンスにより電圧印加/電流測定モードに切り替わらないようなプログラムを特別に追加しておく必要がある。もしそのプログラムを用いない場合、いずれかのSMUが電圧コンプライアンスに達した際のハードウェア保護を追加しておく必要がある。

SMU1に保護ダイオードを付加しても影響が少ないことを示すため、保護ダイオード有り無しの場合に対し、最大電流40Aまでの $V_{g}=10V$ に対する $r_{DS(ON)}-I_D$ 測定をIRFP240のデバイスにおいて繰り返した結果をFig-21に示す。そしてそれらの結果は非常に一致しており、計算された相対的割合の差はほとんどの場合 $\pm 1\%$ 内の相関を示している。この検証により保護ダイオードが使用可能であることが確認された。

また、Fig-8, 18及び19に示したようにそれぞれのSMUのLO端子を接地することも重要である。

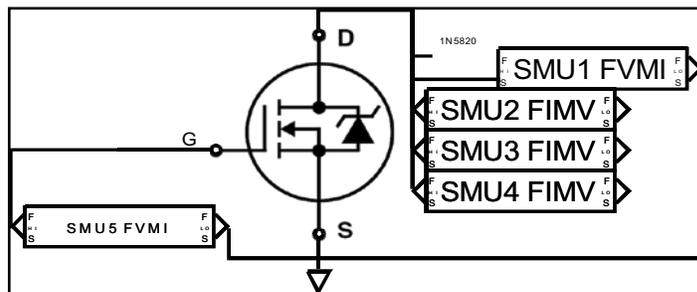


Figure 20

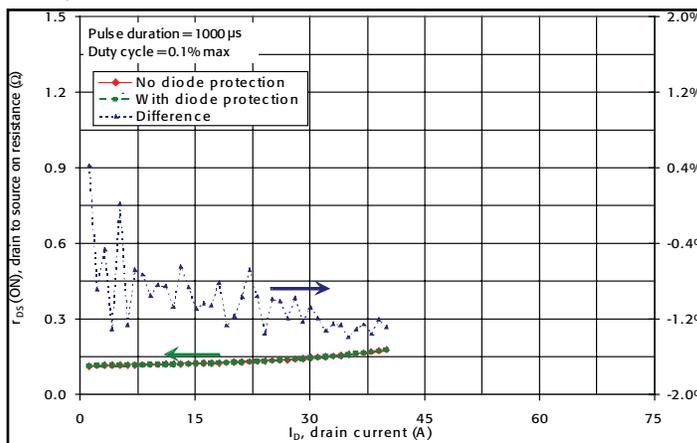


Figure 21

ケーブル接続とテストフィクスチャーについて

一般にテストのケーブル引き回しや接続はDUTとSMU間の抵抗や容量やインダクタンスを最小にするように設計されなければならない。

抵抗値を最小にするには可能な限り太いゲージワイヤを使用する。ケーブルの抵抗は30~300mΩ/mのレンジからそれ以上のものがあるが、出来る限り低いものを選択し、そしてケーブル長をできるだけ1メートル以内に短くする。

この資料で使用されているケーブルはKeithley 2600-BAN 型 (Hi, Sence Hi, Lo, Sense Lo 及びガードにバナナ接続を行う1mのバナナケーブル)である。DUTへはKeithley 5804型 テストリードセットのようにワニ口クリップを使い接続する。

一般にガーディングはケーブルのチャージング効果を低減するため使用されると考えられているが、それは高電圧テストに対する懸念に対してであり、高電流テストに対してではない。本書に示された結果にはガーディングは使用されていない。

4線式ケルビン接続はDUTにできるだけ近いところにされなければならない。よってもしバナナテストリード線とジャックのつなぎ合わせを用いて接続する場合、下の写真に示したようにSENSEリード線はFORCEリード線より先に接続する必要がある。つなぎ合わせ接続がSMUの電流印加において許容される一方で、適切な4線式測定を行うため電圧印加をするSMUのSENSEリード線は分けられDUTの直近で(例えばワニ口クリップを使って)接続されなければならない。さらに、電流印加のSMUの電圧読み取りは接続の影響で極めて小さい値になっているため、電圧のリードバックは電圧を印加するSMUが行うようにしなければならないことに注意する。



テストフィクスチャーで使用される差込口は高い品質が必要とされる。特に赤いジャックはそのカラーリングを施すため大量の鉄分を含んでおり、許容できないくらいの高レベルのリーク電流が発生する可能性がある。よってプラグからケース間の抵抗値は出来るだけ高く、10GΩ以上の必要がある。

テスト設定に関する多くの文献ではFETやIGBTの試験を行う際にはSMUとデバイスのゲート間に抵抗を付加することを勧めている。例えばFig-20においては10KΩの抵抗をSMUとゲート間に付加することにより測定が安定するが、ゲートは電流がほとんど流れないため抵抗による電圧降下は問題にならない。

もしテスト中に40V以上の電圧を必要とする場合、テストフィクスチャーとSMUは適切にインターロック機能が設定され、安全手順に従って操作されなければならない。

もしテスト中に40V以上の電圧を必要とする場合、テストフィクスチャーとSMUは適切にインターロック機能が設定され、安全手順に従って操作されなければならない。

サマリー

以下によって3Aから40Aに最大電流を増やし測定を行う手法が示された。

1. パルススイープ
2. 複数のSMUを並列に接続する

それらの手法は市販のデバイスに適用されその測定結果はデータシートに対し良好な相関が確認された。

さらにソースのリードバック、4線式測定、各DUTの端子への一つの電圧源使用そしてデバイス破壊による過剰なエネルギー散逸の緩和と言ったテストを行う際に重要となる要素について詳細に議論された。

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.

KEITHLEY

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: 09-88171661
Fax: 09-88171662
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