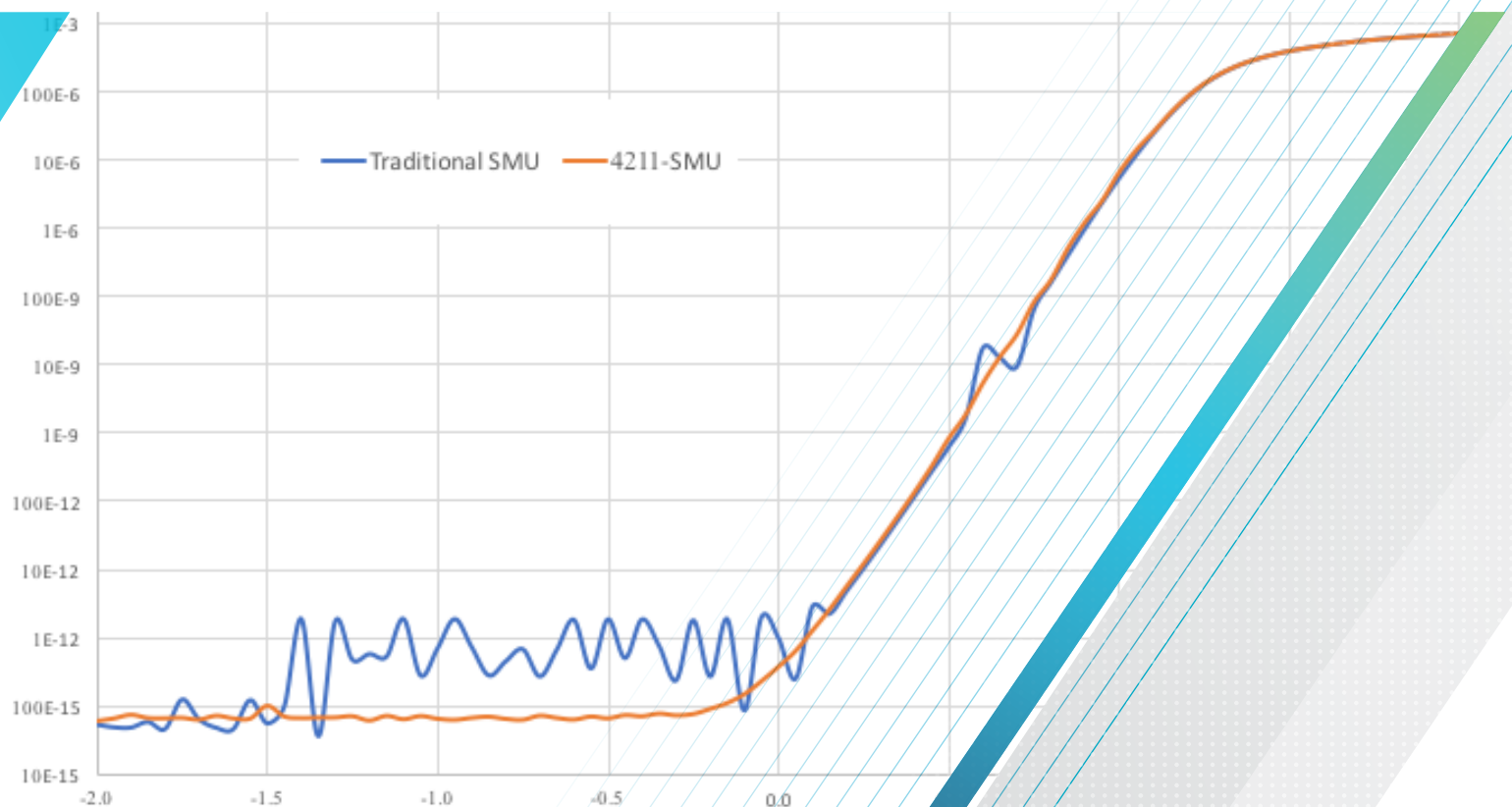


# 4201-SMU型および4211-SMU型を使用した 高い測定接続容量における安定した微小電流測 定の実現

## アプリケーション・ノート



**KEITHLEY**  
A Tektronix Company

## はじめに

ソース・メジャー・ユニット(SMU)は、電流または電圧を印加でき、電流と電圧の両方を測定できる機器である。SMUは、多種多様なデバイスや材料のI-V特性評価に使用され、DC電圧を印加またはスweepしながら非常に高感度な微小電流測定を行うように設計されている。しかし、ケーブルが長いテスト・システムや他の大容量試験接続のテスト・システムでは、一部のSMUがその出力でこの容量に耐えられず、その結果、ノイズの多い読み取り値や発振が発生することがある。

4201-SMU型大容量測定用ミディアム・パワー・ソースメジャー・ユニットおよび4211-SMU型大容量測定用ハイパワー・ソースメジャー・ユニット(オプションの 4200-PA プリアンプ付き)は、高い試験接続容量を持つアプリケーションでも、安定した微小電流測定を行う。一つの例として、デバイスへの接続に非常に長いトライアックスケーブルを使用する。**4201-SMU型および4211-SMU型は、他の高感度 SMU と比較して、最大静電容量の仕様が增加している。**これらのSMUは、モデル4200A-SCSパラメータアナライザ用に構成可能なモジュールであり、Clarius+ソフトウェアを使用して対話的に制御される。

このアプリケーション・ノートでは、SMUの最大容量仕様について説明し、4201-SMU型および4211-SMU型で安定した微小電流測定を行うことができるいくつかのアプリケーションについて解説する。このアプリケーション事例には、フラット・パネル・ディスプレイ上でのOLEDピクセル・デバイスのテスト、長いケーブルを使用したMOSFETの伝達特性、スイッチ・マトリクスを介したFETテスト、チャック上でのナノFET I-V測定、およびコンデンサのリーク測定が含まれる。テスト・システムの容量の計算についての詳細は、このアプリケーション・ノートにも記載されている。

## Triax ケーブルの容量

電圧を印加し、微小電流を測定するためにSMUを使用する場合、一般的に低ノイズ3軸ケーブルが、SMUと被試験デバイスとの間の接続を行うために使用される。たとえ他の容量源が試験接続容量に寄与するとしても、一般的には長い3軸ケーブルは出力端子上の容量追加に対する最も一般的な容量源となる。**図1**に示すように、3軸ケーブルは、3つの導体を有し、SMUを使用する試験システム設計中に考慮すべき2つの異なるキャパシタンスが存在する。下図に示すように、3つの導体は、信号導体(Force HI に接続)、内部シールド(Guard に接続)、外部シールド(Force LO に接続)である。ガードは、ケーブルの絶縁体に流れる漏れ電流を除去する。

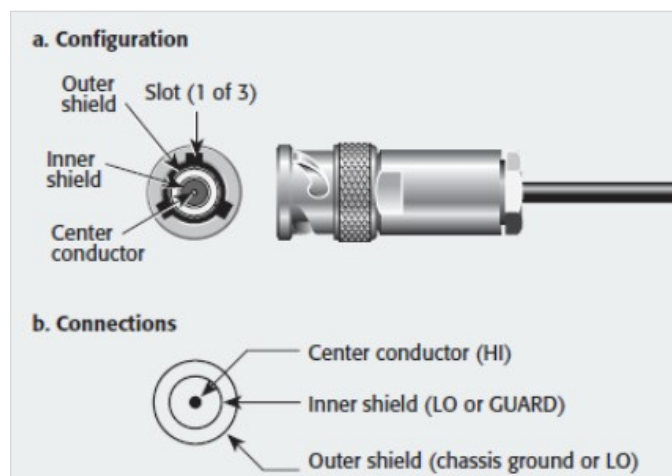


図1.3軸コネクタの構成。

**4201-SMU型および4211-SMU型で使用する3軸ケーブルの静電容量/メータ仕様は、以下のとおり:**

- センターピン(Force HI)と内部シールド(ガード)間: 98pF/m
- 内部シールド(ガード)と外側シールド(Force LO)間: 330pF/m

**注意:** 3軸ケーブルを選択する場合は、Keithley SMU に付属の低ノイズ3軸ケーブルと仕様が同様なケーブルを使用すること。

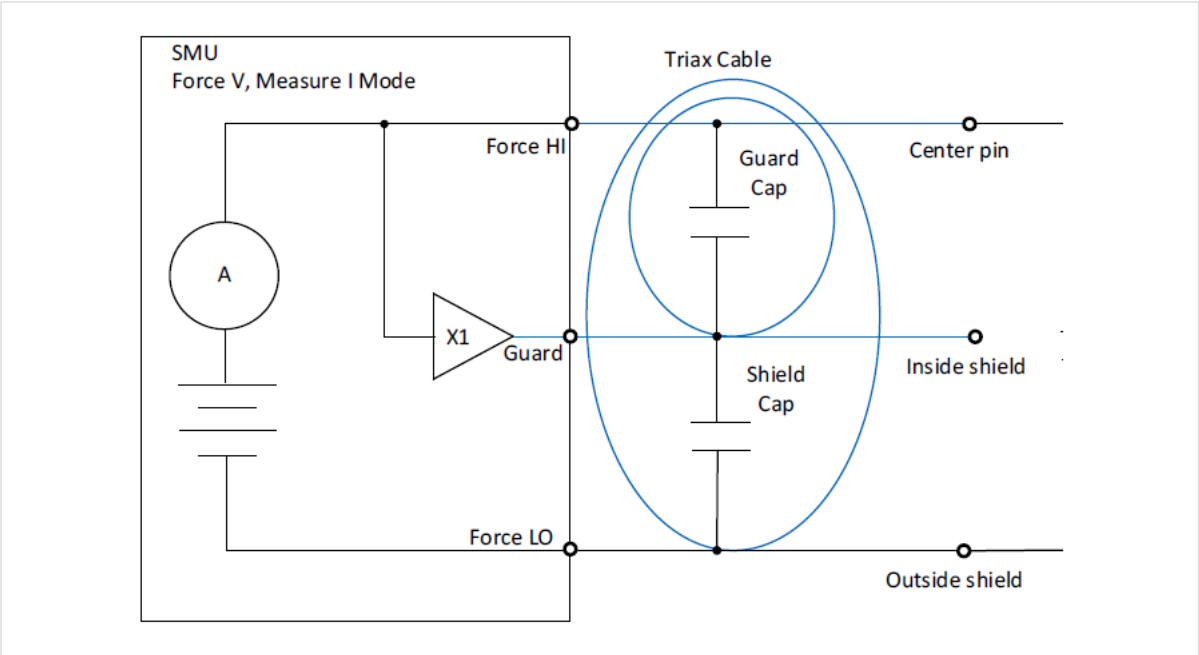


図2. ガード、シールド、および負荷容量の図

SMUの最大容量の仕様

SMUの最大容量仕様は、SMUの出力における3軸コネクタのシールド間の容量に基づいている。図2は、SMUに接続されたガード、シールド、および負荷容量を示している：

- ・ガード容量:Force HI (センターピン)とガード(シールド内側)の間
- ・シールド静電容量:ガード(シールド内部)とForce LO (シールド外部)間
- ・負荷容量:Force HI (センターピン)とForce LO (シールド外側)間

SMU Capacitance Specifications	Between SMU Terminals	4201-SMU and 4211-SMU Specs	Source of System Capacitance
Maximum Load Capacitance	Force HI and Force LO	100mA-1A ranges: 100 $\mu$ F 100nA-10mA ranges: 10 $\mu$ F 1nA-10nA preamp ranges: 10 $\mu$ F 1pA-100pA preamp ranges: 1 $\mu$ F	DUT, coax cables, chuck
Maximum Guard Capacitance	Force HI and Guard	5nF	Triax Cables and Connections
Maximum Shield Capacitance	Guard and Force LO	10nF	Triax Cables and Connections

表1. 4201-SMU型と4211-SMU型の容量仕様

表 1 に、4201-SMU型および4211-SMU型の最大容量の仕様とテスト・システム容量源を示す。

## 2線式および4線式測定のテスト・システム容量の計算

各SMUに接続された3軸ケーブルの容量を計算するとき、Force HIおよびSense HIから被測定デバイスまでのケーブル長を決定し、次いで合計ケーブル長を得るために統合しなければならない。次に、3軸ケーブルの長さ単位の容量仕様を使用して、全容量値を計算する。例を図3に示す。DUT は、4線式(またはリモートセンス)構成で、2本の15m 3軸ケーブルForce とSense を使用して4200A-SCS のSMU1 に接続されている。3軸ケーブルの長さ単位の容量仕様(pf/m)に基づいて、2つの15m 3軸ケーブルの容量は、以下の式から計算することができる:

- ガード容量 =  $98\text{pF/m} \times 2 \times 15\text{m} = 2.9\text{ nF}$
- シールド容量 =  $330\text{pF/m} \times 2 \times 15\text{m} = 9.9\text{ nF}$

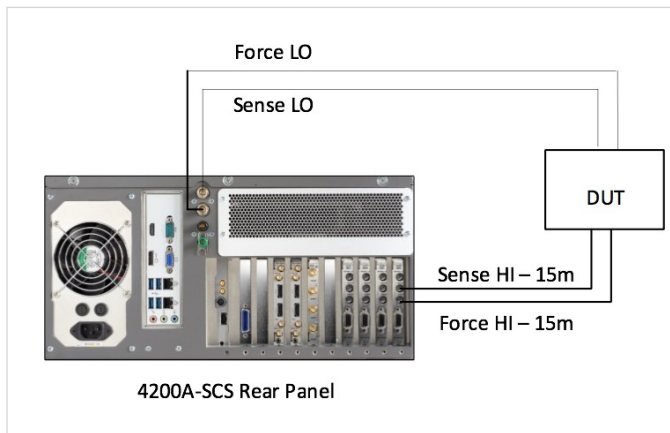


図3. Force及びSense 用の15m 3軸ケーブルを使用し、DUT をSMU に接続する。

2線式またはローカルセンスの構成を使用して接続を行った場合、ケーブル容量は、次のように計算することができる:

- ガード容量 =  $98\text{pF/m} \times 15\text{m} = 1.47\text{ nF}$
- シールド容量 =  $330\text{pF/m} \times 15\text{m} = 5\text{ nF}$

3軸ケーブルに加えて、テスト・システム容量の他の容量源は、パッチパネル、スイッチ・マトリクス、プローブ、チャック及びDUTが含まれる。これらのその他の誤差要因については、次のセクションのアプリケーション例で説明する。

## 最大容量仕様の増加を必要とするアプリケーション例

次のいくつかのセクションは、4201-SMUおよび4211-SMUがI-V測定を行うために使用される、敏感な微小電流アプリケーションの例を示す。これらのアプリケーションには、フラット・パネル・ディスプレイのテスト、長いケーブルを使用したnMOSFETの伝達特性、スイッチ・マトリクスを介したFETテスト、ナノFET上のId-Vg曲線、およびコンデンサのリーク測定などがある。

### フラット・パネル・ディスプレイ上のOLED画素デバイス

フラット・パネル・ディスプレイ上のOLED 픽셀・デバイスのI-V曲線は、通常、非常に長い3軸ケーブル(典型的には、長さ12~16m)を使用して、スイッチ・マトリクスを介してLCDプローブステーションにSMUを接続し測定される。図4にKeithley S500試験システムを用いた典型的なフラット・パネル・ディスプレイ試験構成を示す。S500は、カスタマイズ可能であり、フラット・パネル・ディスプレイを試験するために一般的に使用される自動パラメータテスタである。図示したケースの場合、S500内のSMUは、スイッチ・マトリクスを介してプローブステーションに接続され、そのプローブカードで、ガラスパネル上のDUTにテスト信号を接続する。

接続には非常に長いケーブルが使用されているため、適切な測定技術や機器を使用しないと、不安定な微小電流測定結果が得られてしまう可能性がある。

例えば、図5は、16mの3軸ケーブルで従来のSMUとDUTを接続して測定された場合の、OLEDデバイス上の不安定な飽和(オレンジ曲線)および線形(青曲線)両方のI-V曲線を示す。しかしながら、これらのI-V測定をDUTのドレイン端子に4211-SMUを用いて実行したところ、図6に示すようにI-V曲線は安定していた。

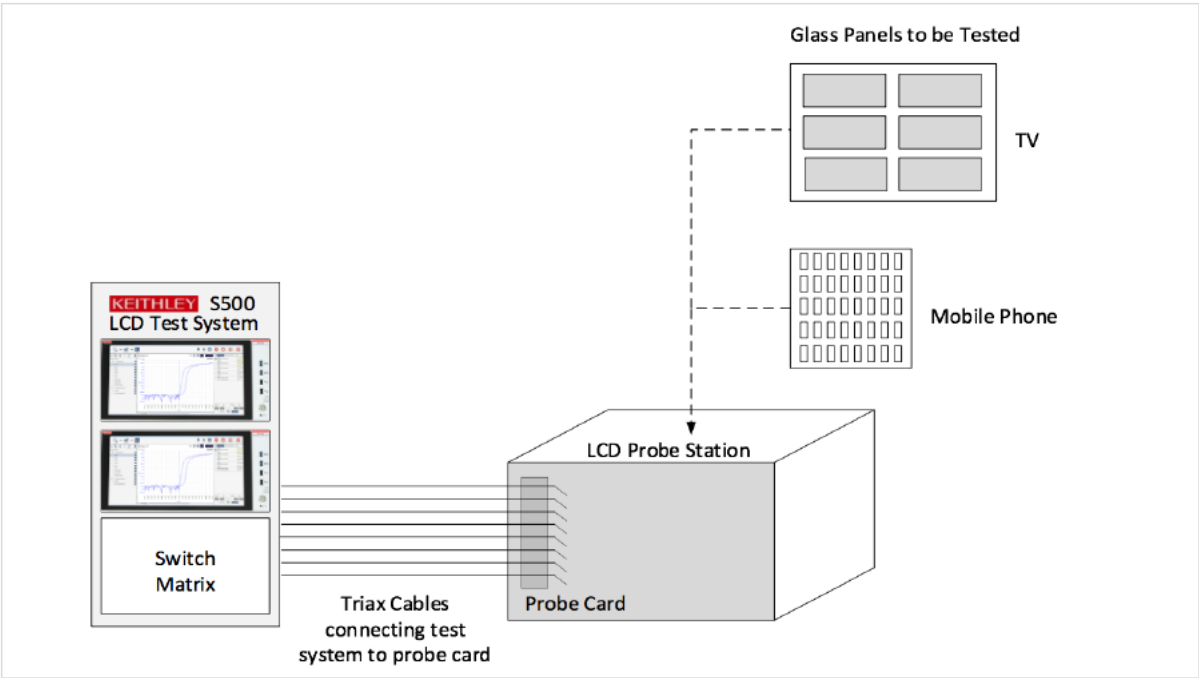


図4. Keithley S500 Test System を使用したフラット・パネル・ディスプレイのテスト構成

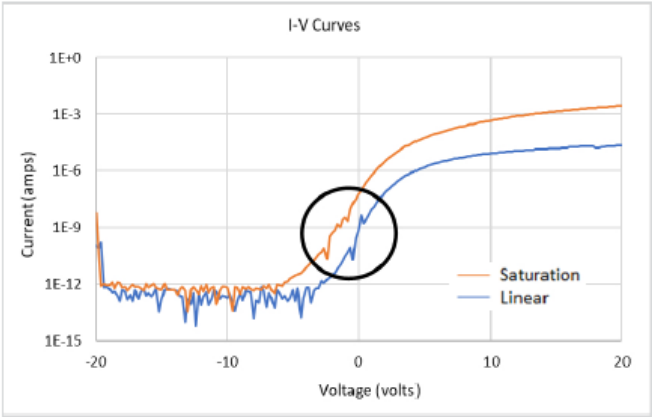


図5. 従来のSMUを用いて測定したOLED上の飽和および線形I-V曲線。

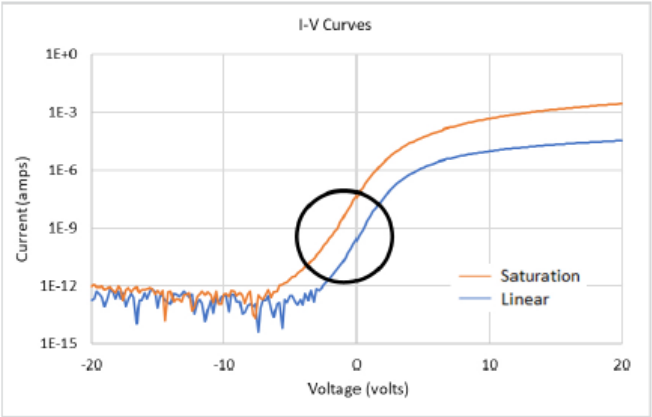


図6. 4211-SMUを用いて測定したOLED上の飽和および線形I-V曲線。

### nMOSFETの伝達特性

n 型MOSFET の $I_d$ - $V_g$  曲線は、2 つのSMU を使用して生成できる。一方のSMUはゲート電圧をスイープし、他方のSMUでドレイン電流を測定する。典型的なテスト回路の回路図を図7に示す。ここでは、SMUをデバイス端子に接続するために20mの3軸ケーブルを使用した。

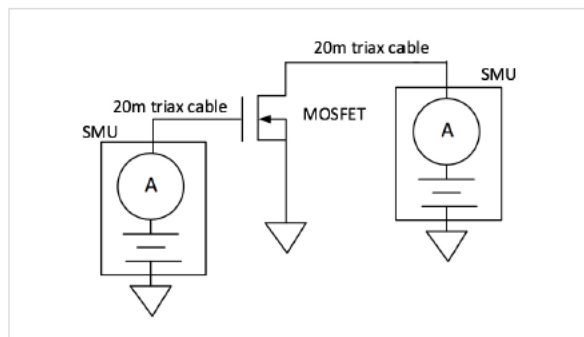


図7. MOSFET のI-V 特性を測定するために2つのSMU を用いる

従来の2台のSMUと2台の4211-SMU型で測定した伝達特性を図8に示す。青色の曲線(従来の2台のSMUで取得)は、特に微小電流レベルで、電流レンジを変更したときの発振を示している。2つの4211-SMUを用いて得られた電流測定値、赤で示した曲線は、非常に安定であった。

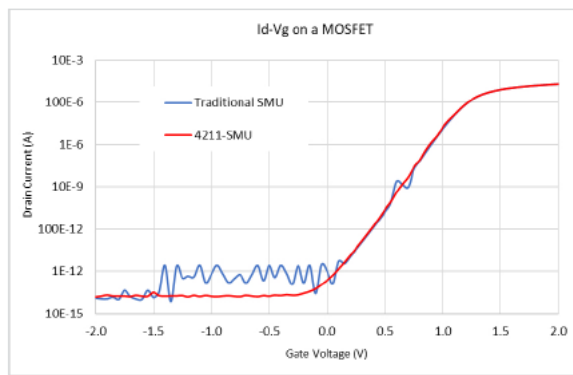


図8. 20mの3軸ケーブルと従来型及びSMUと4211-SMUを使用してnMOSFET のI-V 特性を測定



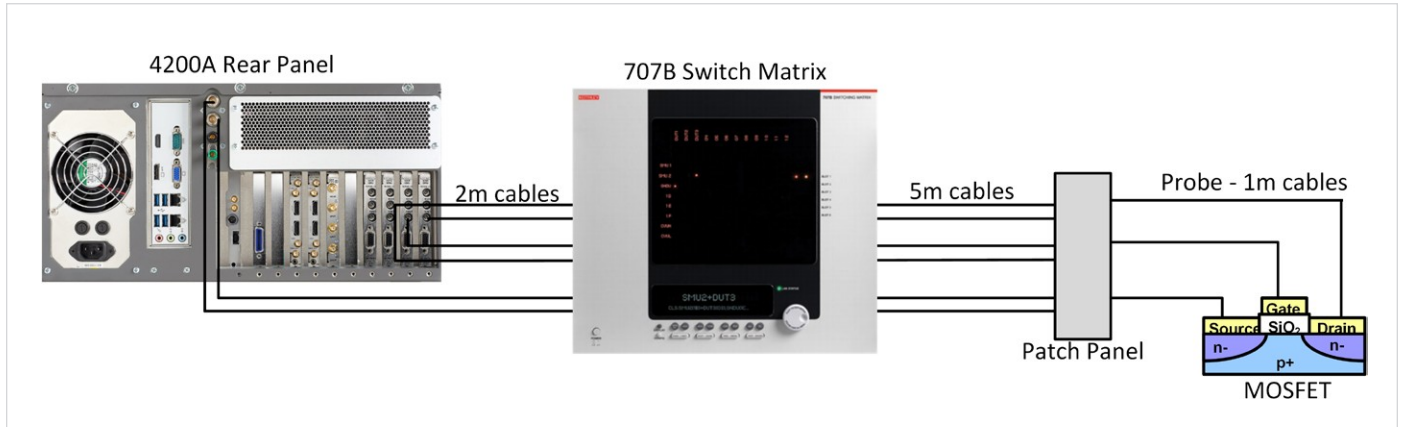


図9. 707Bスイッチ・マトリクスを介したDUTへの簡略化されたSMU接続

### スイッチ・マトリクスを介したFETテスト

スイッチ・マトリクスを介したデバイス試験は、追加のケーブル配線が必要とされるため課題が多い。SMUをスイッチ・マトリクスに接続し、スイッチ・マトリクスからDUTに接続するために、3軸ケーブルが使用される。

リモートセンスを使用して、スイッチ・マトリクスを介して接続された2つのSMUが関係する典型的な回路を図9に示す。ローカルセンス(2線式測定)の代わりにリモートセンス(4線式測定)を使用する場合、各SMUに接続された2本のケーブルが必要となる。また、ケーブルが並列接続されているため、SMU出力の静電容量が2倍になる。

この場合、SMUは、2つの2mケーブルを使用してスイッチ・マトリクスの行(入力)に接続され、スイッチ・マトリクスの列(出力)は、2つの5mケーブルを使用してパッチパネルに接続される。パッチパネルからプローブに接続された追加の1mケーブルでは、1つのSMUからDUTまでの全3軸ケーブル長は、以下の通りである:

1つのSMU (リモートセンス付き)からDUT までの  
合計 3 軸 ケーブル長

$$= (2 \times 2 \text{ m}) + (2 \times 5 \text{ m}) + (1 \text{ m}) = 15 \text{ m}$$

3軸ケーブルに加えて、スイッチ・マトリクス自体の容量も追加されるため、全試験システム容量の計算に含む必要があるかもしれない。

スイッチ・マトリクスを介してFETデバイスの出力特性を測定するために、従来の2つのSMUと比較して、4211-SMU型を2つ使用すると、飛躍的な改善が得られた。この試験では、1つのSMUが一定のゲート電圧にバイアスをかけており、2つ目のSMUがドレイン電圧をスイープし、結果として生じるドレイン電流を測定していた。

ドレイン電流対ドレイン電圧曲線は、図10に示すように、2つの従来のSMU型(青い曲線)と2つの4211-SMU型(赤い曲線)を使用して生成された。ドレイン電流を測定する従来のSMUは、ナノアンペアレベルの測定において(青い曲線)発振しているように見える。

しかしながら、4211-SMU型でスイッチ・マトリクスを介しFETのドレイン電流を測定した場合、測定値は安定している(赤の曲線)。

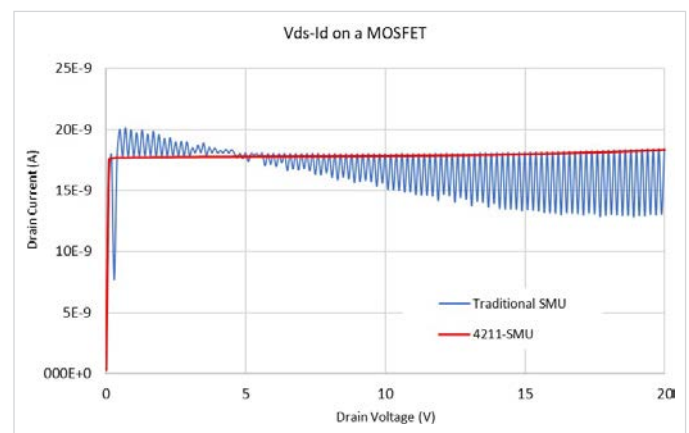


図10. 従来の2台のSMU対2台の4211-SMU型を使用してスイッチ・マトリクスを介して測定されたFETのId-Vd曲線。

### 共通ゲートとチャック容量を持つナノFET

4201-SMUおよび4211-SMUを使用することにより、ナノFETおよび2D FETで安定した微小電流測定を行うことができる。これらのFET、および他のデバイスは、時に、プローブステーションチャックを介してSMUに接触されたデバイス端子を有する。

図11に、ナノFETテスト構造の典型的な回路図を示す。この例では、1つのSMUをドレイン端子に接続し、もう1つのSMUを、チャックを介してゲート端子に接続する。チャックは、数nF程度の容量を有する場合があり、それはプローブステーションメーカーが検証可能である。場合によっては、チャックの上部にある導電性パッドを使用してゲートに接触させる必要がある。

チャックへのSMU接続は、プローブステーションメーカーによっては、同軸または3軸のいずれかになる。同軸チャックは、SMUのForce HIとForce LOの間に容量を持つため、負荷キャパシタンスとしてテスト回路に存在する。これは、図示された例の場合である。しかしながら、3軸ケーブルを有するチャックは、ケーブル容量として存在する。

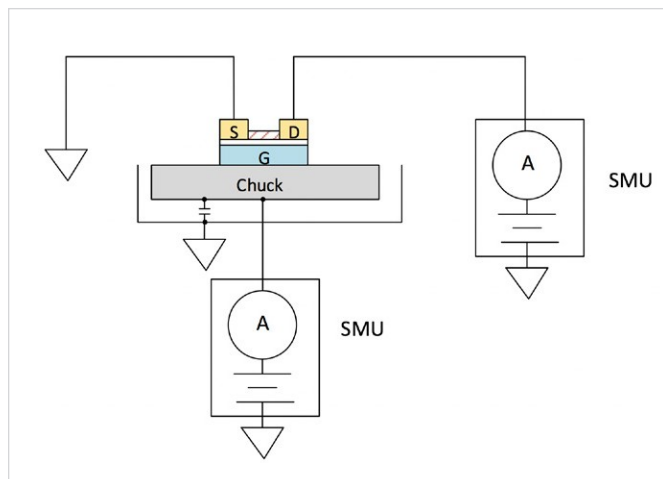


図11. 2つのSMUを使用してナノFETを測定する

2DFETのゲートとドレインへの接続に、2つの従来型のSMUを使用することで、図12に示すようなノイズの多いId-Vgヒステリシス曲線が生成されたが、2つの4211-SMU型を同じデバイスのゲートとドレインに接続しても、得られるヒステリシス曲線は図13に示すように滑らかで安定していた。

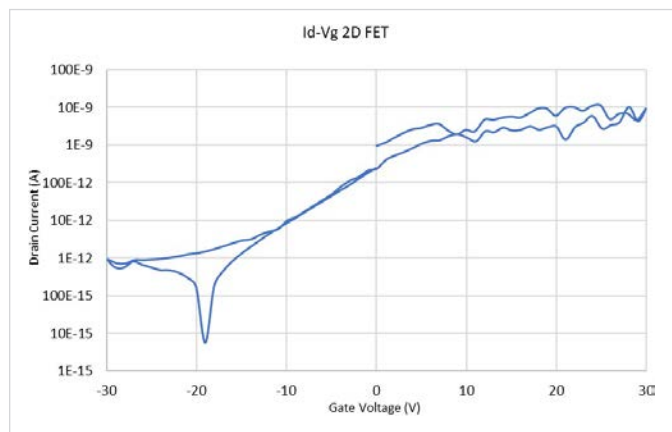


図12. 従来型のSMUで測定した2D FETのId-Vgヒステリシス曲線

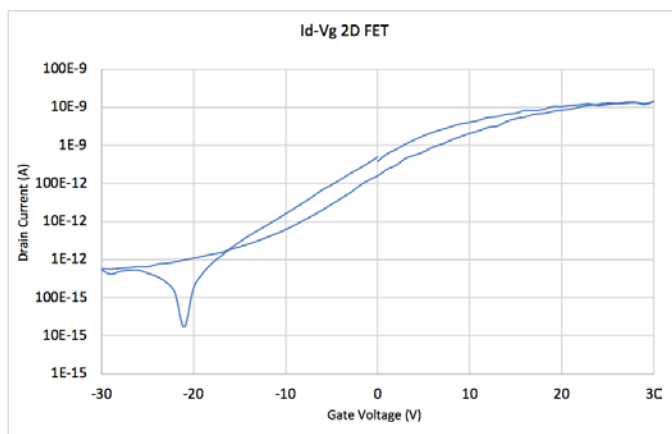


図13. 2台の4211-SMU型で測定したId-Vg ヒステリシス曲線



## キャパシタリーク

キャパシタのリークは、被測定キャパシタに固定電圧を印加し、その結果得られる電流を測定する。リーク電流は時間とともに指数関数的に減衰するため、通常は電流を測定する前に既知の期間電圧を印加する必要がある。被測定デバイスによっては、測定される電流値は、一般的には非常に小さい(通常<10nA)。SMU を使用してキャパシタのリークを測定する回路図を図14 に示す。測定ノイズを低減するために、回路内に直列ダイオードの使用を推奨する。容量源がフィードバック電流計のノイズ性能にどのように影響するかについての詳細は、Keithley 7th Edition Low Level Measurements HandbookのSection 2.3.3 Noise and Source Impedanceを参照。

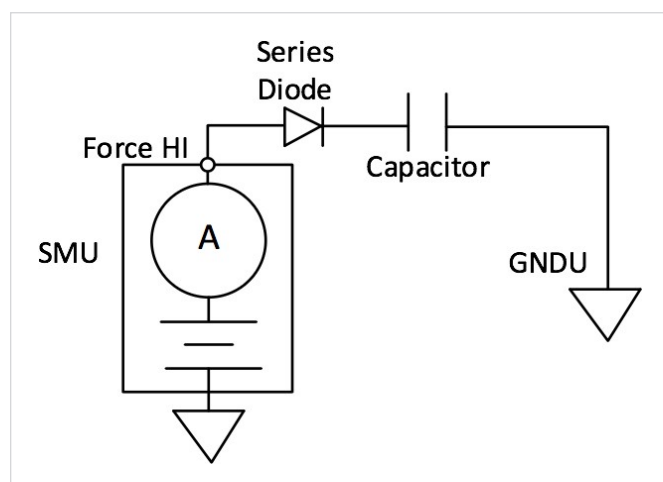


図14. SMUと直列ダイオードでキャパシタのリークを測定する

図15は、4201-SMU型で測定した100nFのキャパシタのリーク電流対時間のグラフを示している。最大負荷容量の仕様が aumentando ため、4201-SMU型および4211-SMU型は、コンデンサのリークを測定するときにより安定しているが、

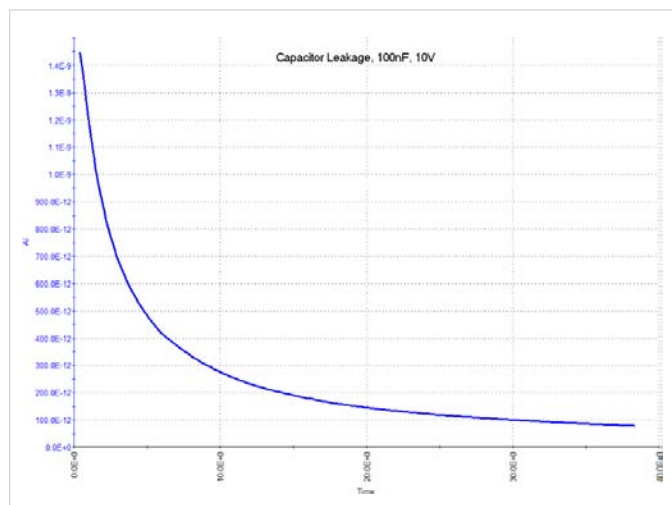


図15. 4201-SMU型で測定した100nF キャパシタのリーク電流 vs 時間。

直列ダイオードが必要かどうかはキャパシタの絶縁抵抗と大きさ、および電流測定レンジに依存する。いくつかの実験が必要になるかもしれない。

## まとめ

ケースレー4201-SMU型大容量測定用ミディアム・パワー・ソースメジャー・ユニットおよび4211-SMU型大容量測定用ハイパワー・ソースメジャー・ユニットは、電圧印加に最適で、デバイスや材料で非常に高感度(<nA)の微小電流測定を行うことができる。これらのSMUは、高いテスト接続容量を持つテスト回路において、安定した微小電流測定を行うために特に有益である。それらは、他の高感度SMUと比較して、高い最大静電容量の仕様を持っている。

適切なSMUを使用することに加えて、微小電流測定を行うための適切な手法を使用することが重要である。シールドやガードのような手法については、Keithley Low Level Measurements Handbook、ならびにアプリケーション・ノート“Optimizing Low Current Measurements with the 4200A-SCS Parameter Analyzer”でより詳細に解説されている。これらの文書は[jp.tek.com](http://jp.tek.com)から入手可能である。

## お問い合わせ先：

オーストラリア 1 800 709 465  
オーストリア 00800 2255 4835  
バルカン諸国、イスラエル、南アフリカ、その他ISE諸国 +41 52 675 3777  
ベルギー 00800 2255 4835  
ブラジル +55 (11) 3759 7627  
カナダ 1 800 833 9200  
中央／東ヨーロッパ、バルト海諸国 +41 52 675 3777  
中央ヨーロッパ／ギリシャ +41 52 675 3777  
デンマーク +45 80 88 1401  
フィンランド +41 52 675 3777  
フランス 00800 2255 4835  
ドイツ 00800 2255 4835  
香港 400 820 5835  
インド 000 800 650 1835  
インドネシア 007 803 601 5249  
イタリア 00800 2255 4835  
日本 81 (3) 6714 3086  
ルクセンブルク +41 52 675 3777  
マレーシア 1 800 22 55835  
メキシコ、中央／南アメリカ、カリブ海諸国 52 (55) 56 04 50 90  
中東、アジア、北アフリカ +41 52 675 3777  
オランダ 00800 2255 4835  
ニュージーランド 0800 800 238  
ノルウェー 800 16098  
中国 400 820 5835  
フィリピン 1 800 1601 0077  
ポーランド +41 52 675 3777  
ポルトガル 80 08 12370  
韓国 +82 2 6917 5000  
ロシア +7 (495) 6647564  
シンガポール 800 6011 473  
南アフリカ +41 52 675 3777  
スペイン 00800 2255 4835  
スウェーデン 00800 2255 4835  
スイス 00800 2255 4835  
台湾 886 (2) 2656 6688  
タイ 1 800 011 931  
イギリス、アイルランド 00800 2255 4835  
アメリカ 1 800 833 9200  
ベトナム 12060128

2017年4月現在



jp.tek.com

## テクトロニクス／ケースレーインスツルメンツ

お客様コールセンター：技術的な質問、製品の購入、価格・納期、営業への連絡

**TEL: 0120-441-046** ヨッ! 良い オ シ ロ 営業時間／9:00～12:00・13:00～18:00  
(土日祝日および当社休日を除く)

サービス・コールセンター：修理・校正の依頼

**TEL: 0120-741-046** なんと良い オ シ ロ 営業時間／9:00～12:00・13:00～17:00  
(土日祝日および当社休日を除く)

〒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 © 2020, Tektronix. All rights reserved. TEKTRONIX およびTEK はTektronix, Inc. の登録商標です。  
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。

2020年6月 1KZ-61609-0