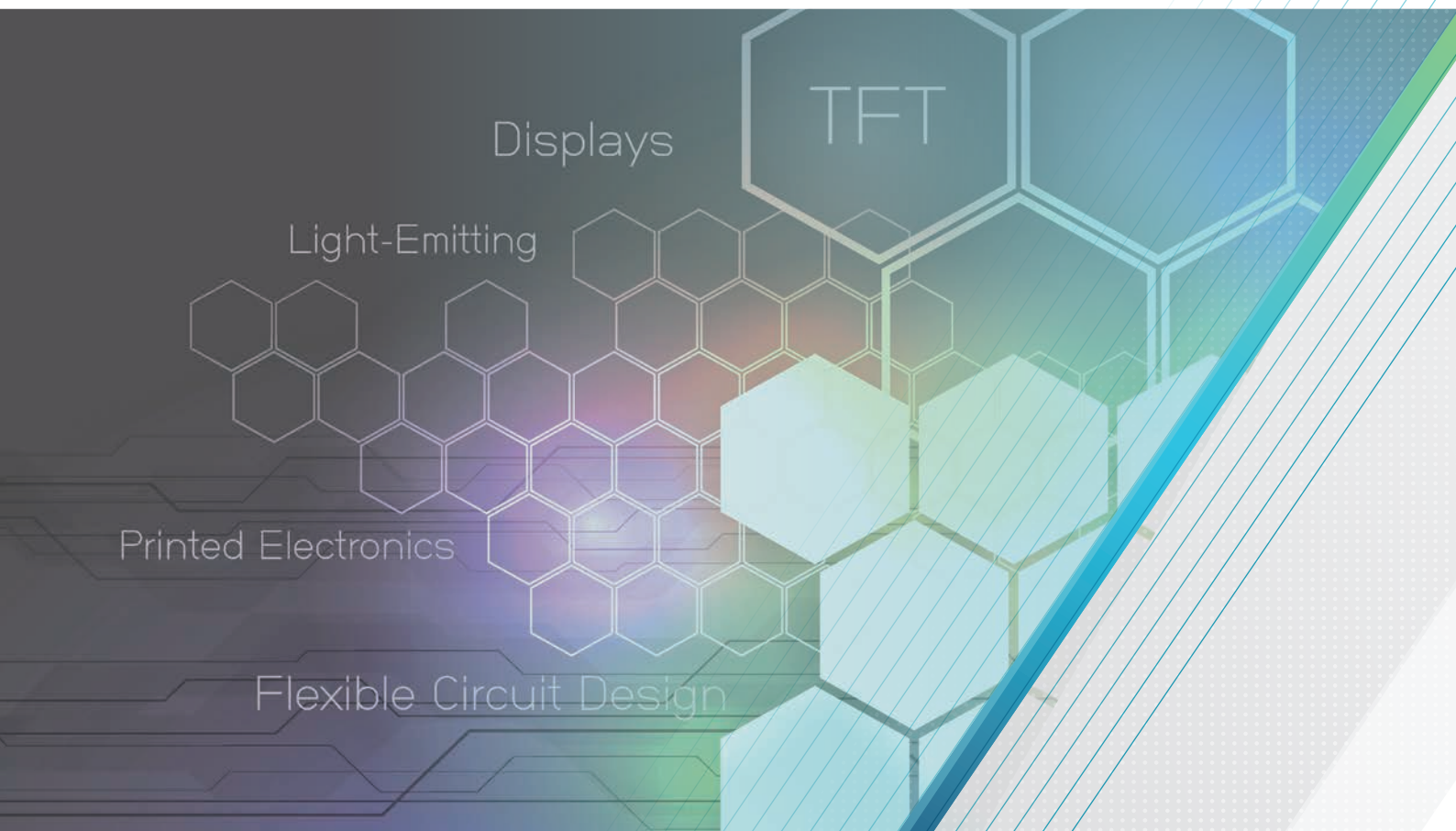


**Tektronix**<sup>®</sup>

# 有機FETのDC IV及び ACインピーダンス測定

アプリケーション・ノート



**KEITHLEY**  
A Tektronix Company

## イントロダクション

有機半導体デバイスは、低コスト材料を使用するため安価で製造でき、紙やガラスのようなものの表面に印刷でき、さらに回路設計の自由度の高さなどから、これまでの半導体デバイスに置き換わるものとして開発されています。このデバイスは、ディスプレイ、医療デバイス、照明、センサー、メモリデバイス、バッテリー、太陽電池を含む様々なアプリケーションで使用され、そのうち最も一般的なアプリケーションの一つとして有機電界効果トランジスタ (OFET) があります。

OFETの研究では一般的に、キャリア移動度や電流のオン/オフ比のようなデバイスの特性の最適化を行っており、出力及び伝達特性、ヒステリシス効果、バイアスストレス、ゲートリーク電流等の評価のためにDC IV測定が行われます。さらにキャリア移動度、しきい値電圧、フラットバンド電圧及びチャージの影響のようなデバイスの重要な情報を明らかにするためにACインピーダンス測定も用いられます。

このアプリケーションノートでは、4200A-SCSパラメータ・アナライザを用いたOFETのDC IVやACインピーダンス測定の最適化を行うための概要を示し、最適な結果を得るために、時間パラメータ、ノイズ低減、シールド、適切な接続やその他の重要な測定に関して議論します。

## 有機電界効果トランジスタ (OFET)

有機電界効果トランジスタ (OFET) は、デバイスのソース、ドレイン間のチャンネル間に有機半導体材料を用いたトランジスタです。有機薄膜トランジスタ (OTFT) もOFETの一種であり、本稿ではそれら2つのFETを同義的に扱います。図1にボトムゲート型OFETを示します。有機半導体材料をゲート端子上の絶縁膜の上に作りこみ、その上にソース、ドレインの金属接合端子を形成します。電気的特性試験は、そのデバイスの3つの端子に接続を行い実行します。

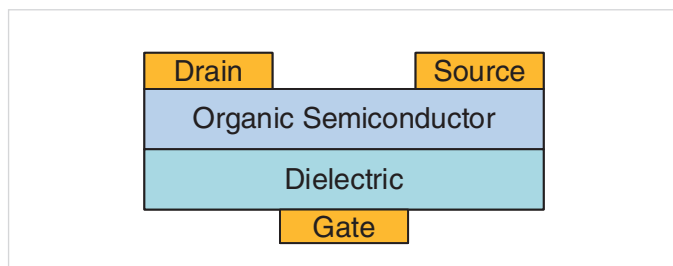


図1. ボトムゲート型有機電界効果トランジスタ

## 4200A-SCSを用いた電気特性試験

4200A-SCSシステムには、有機FETの一般的な電気的特性試験を行うための設定が用意されています。ClariusソフトウェアのSelect Viewに“ofet”あるいは“organic”のキーワードを入力し検索することによりDC IV、超低周波CV、高周波CV測定を行うためのテストライブラリを呼び出すことができます。図2にそのProjectのスクリーンキャプチャを示します。予め用意されたテストに加え、ユーザーも独自のアプリケーションや測定要求に応じたテストやProjectを容易に作成することができます。

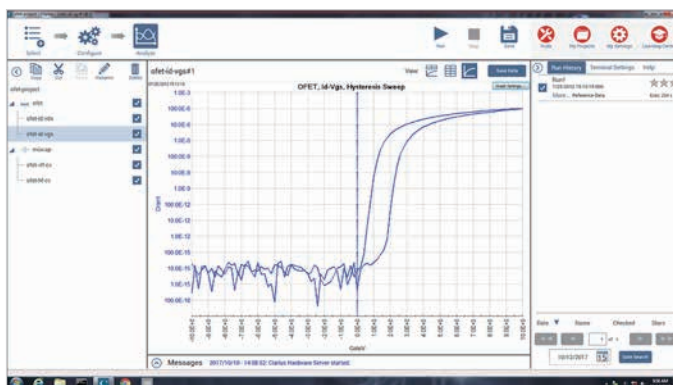


図2. 有機FET特性評価Projectのスクリーンキャプチャ

## 電流-電圧測定

有機デバイスのIV特性評価により、多くのデバイスパラメータの抽出、製造プロセスの影響の調査、コンタクトの品質の特定などを行うことができます。有機FET特性評価のProjectやテストライブラリにはOFETの出力特性 ( $I_D-V_{DS}$ ) や伝達特性 ( $I_D-V_{GS}$ ) を測定するテストが用意されています。

図3に4200-PAをオプションとして使用する2つの4200-SMUを使用し、OFETの伝達特性を測定するための構成を示します。SMUは電流と電圧を印加し測定することができ、ピコアンペアレベルの感度の測定とデバイスへのダメージを避けるための電流制限機能を持っています。この図では、SMU1はOFETのゲートに接続され、SMU2はドレイン端子に接続されています。ソース端子は、グラウンドユニット (GNDU) に接続するか、もしOFET全3端子に対し電圧印加及び電流測定が必要であれば3つ目のSMUを接続することができます。

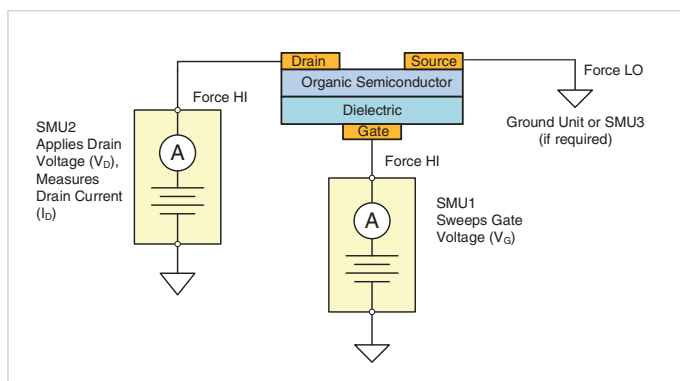


図3. OFETのDC IV特性評価を行うための回路図

OFETに各SMUを接続することにより、測定ライブラリの有機FETのドレイン電流 vs. ゲート電圧 (*ofet-id-vgs*) で伝達特性を得ることができます。その測定では、SMU2で一定のドレイン電圧 ( $V_D$ ) を与え、SMU1でゲート電圧 ( $V_G$ ) をスイープしながらドレイン電流 ( $I_D$ ) を測定します。図4にOFETのゲート電圧に対するドレイン電流の測定結果を示します。ヒステリシススイープはソフトウェアのDual Sweep機能を使用し実行できます。ここでプリアンプを搭載した4200SMUにより、フェムトアンペアからミリアンペアまでの広いレンジでの電流測定が実現できていることに注目して下さい。

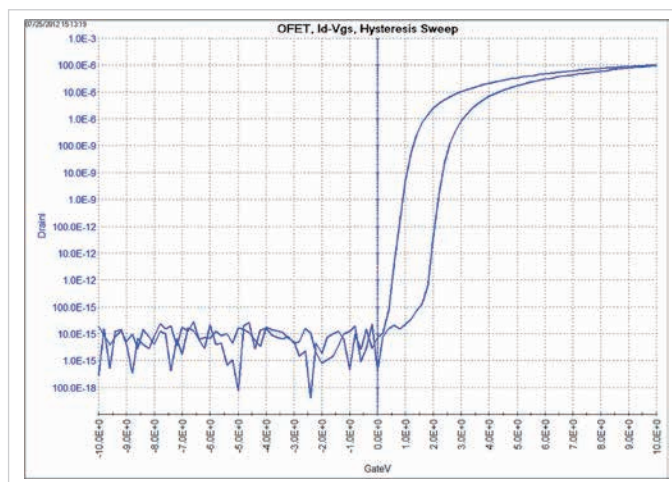


図4. OFETのID-VGSカーブ

OFETの各端子に接続されたSMUは、他の測定を行う場合でもClariusソフトウェア上で容易に設定することができます。 $I_D$  vs.  $V_D$ の出力特性もソフトウェア上でSMUのパラメータを変更するだけで測定ができます。それはもちろん予め用意された測定ライブラリの有機FETの出力特性テストを使っても可能です。ゲート電圧をステップしながらドレイン電圧に対するドレイン電流の特性を測定することにより、複数のドレイン電流特性カーブを得ることができます。図5に *ofet-id-vds* テストを使用したp型OFETの  $I_D-V_{DS}$  カーブを示します。

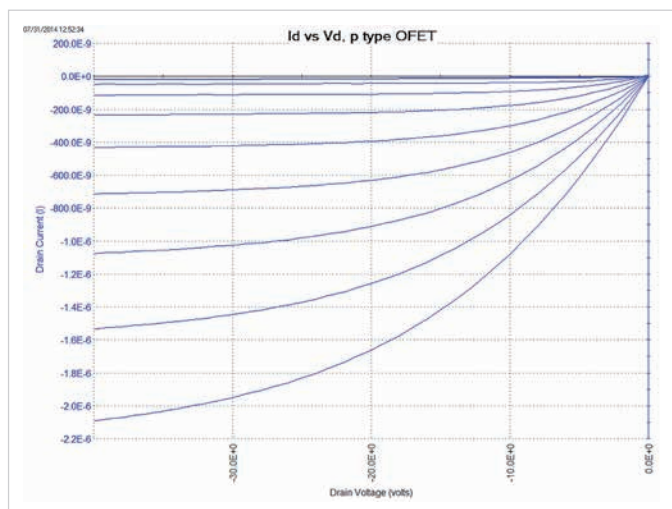


図5. p型OFETの出力特性

## DC IV測定 of 最適化

次のような手法を用いることにより、4200A-SCSでの有機FETのDC測定の品質を改善することができます。

**リード線や接触抵抗を排除する：**SMUとデバイスをつなぐケーブルの直列抵抗が測定誤差の原因になります。測定電圧に対しケーブル抵抗による電圧降下の影響が無視できなくなるため、長い接続ケーブルと高電流を扱う場合、特に問題となります。

図6に示したように、2線式やローカルセンス接続の際にケーブル抵抗による電圧降下分の電圧がDUTの電圧測定に追加されます。その場合、電流はDUTに加え2つのケーブルを流れるため、SMUで計測される電圧値はそれら3つの電圧降下分に等しくなります。測定値からそのケーブル抵抗を排除するためには、デバイスに対し図6の右に示したような4線式もしくはローカルセンス接続を行います。その場合、SMUで計測される電圧値はDUTの電圧降下分と等しくなります。

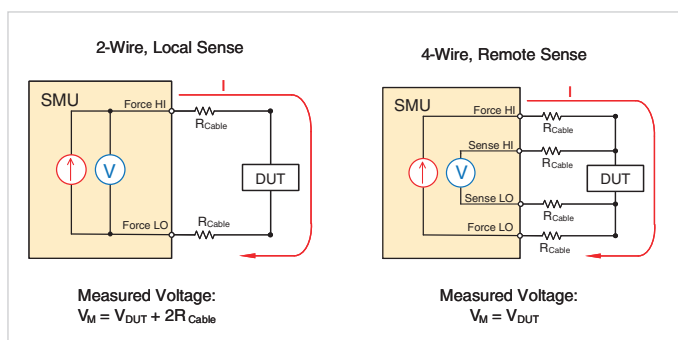


図6. ローカル vs. リモートセンス

**測定におけるノイズの低減：**ノイズは、ACピックアップや静電干渉を含む様々な要因で発生します。計測されるDC信号にノイズ源が重畳した場合に測定結果がノイズとなります。その場合、測定結果は不正確もしくは不安定になります。

外部ノイズピックアップの最も一般的な形態は60Hz（もしくは50Hz）電源周波数ピックアップで、蛍光灯に近づけた際に発生しミリボルトのノイズが乗ることもあります。ケースレーは60Hz（もしくは50Hz）の電源ピックアップの影響を最小にするため、ライン・サイクル・インテグレーションと呼ばれる手法を用います。積分時間あるいは測定時間範囲を電源ラインサイクルの数と同じにすることによりノイズを平均化して取り除きます。そのADアパーチャ時間（測定時間範囲）はテストセッティング画面のスピード設定を使って調整します。

静電干渉は微小電流測定を行う際にノイズな測定をもたらすもう一つの要因です。帯電物が測定回路に近づいた場合に発生します。高インピーダンス回路ではこれによる帯電が急速には減衰せず、測定が不安定になります。誤差を含んだ測定はDCもしくはAC静電界に起因しているため、静電シールドがその影響を最小化するために役に立ちます。

静電シールドは測定回路を遮蔽した単純な金属箱で十分ですが、有機デバイスでたびたび使用される研究室のグローブボックス内で使用するのには難しいかもしれません。プローブステーションには静電/EMIシールドや暗箱がよく設置されています。図7に示したように、デバイスを覆うシールドは、SMUのForce LO端子からの測定回路のLOと接続して下さい。Force LO端子は4200-SMUのトライアキシャルケーブルのアウターシールドで、4200A-SCSのリアパネルにあるグランド・ユニット（GNDU）と同じです。全てのケーブルはローノイズ仕様でシールドされている必要があります。4200-SMUもしくは4210-SMUには2本のローノイズ・トライアキシャル・ケーブルが付属してきます。

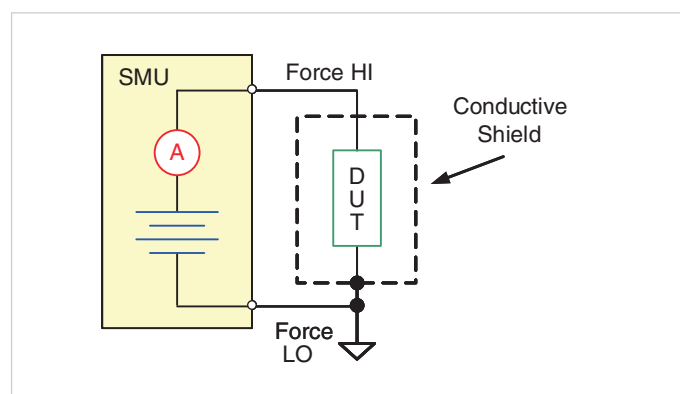


図7. 導電シールドでDUTを遮蔽する

**十分なセトリング時間を与える：**デバイスのリーク電流は通常1nA以下の微小電流を測定するため、電圧が印加されてから安定な測定を行うまでに十分なセトリング時間を与えることが重要です。ケーブル、テストフィクスチャー、スイッチ、プローブ、DUTの抵抗や容量、SMUの電流レンジ等測定回路のセトリング時間に影響を与えるいくつかの要因があります。安定した測定を行うためには電圧ステップ後、測定前にディレイ時間を追加します。このディレイ時間はClariusソフトウェアのテストセッティング画面で容易に調整できます。

## 超低周波 CV 測定法

微小電流測定に加えて、プリアンプを搭載した2つのSMUでは超低周波CV測定 (VLF C-V) が実行できます。10mHzから10Hzのテスト周波数でC-VスイープとC-t測定が可能です。図8に低周波インピーダンス測定に用いるSMU構成の簡略図を示します。この構成では、4200-SCS型システムに2台のSMUを備え、4200-PA型シリーズのプリアンプをそれぞれ試験するデバイスの片側に接続する必要があります。SMU1はAC信号を重畳させたDCバイアスを出力し、電圧を測定します。SMU2はDC 0Vを供給しつつ、結果として得られるAC電流を測定します。

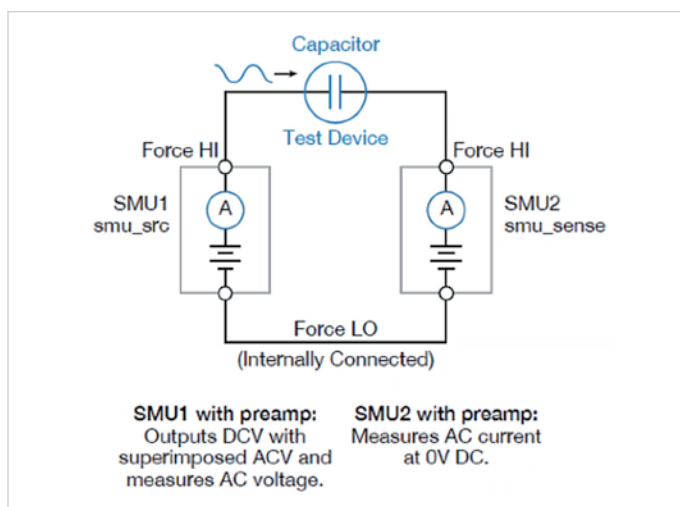


図8. 超低周波CV測定の接続

電圧を印加している間、電圧と電流の測定が数サイクルにわたり同時に行われます。DUTのインピーダンスの大きさと位相は、結果として生じる電圧と電流の正弦波の比率から、離散フーリエ変換 (DFT) により抽出します。このナローバンドの情報は周波数を10mHzから10Hzの間で変化させて収集し、DUTの複雑な多素子モデルを作成します。結果として得られるパラメータには、インピーダンス (Z)、位相角 ( $\theta$ )、キャパシタンス (C)、伝導度 (G)、抵抗 (R)、リアクタンス (X)、誘電正接 (D) があります。

超低周波法は限られた周波数範囲しか利用できないため、試験デバイス (DUT) のキャパシタンスは1pFから10nFである必要があります。表1にVLF C-Vの仕様をまとめます。全仕様もしくはこの手法の詳細については下記アプリケーションノートをご参照下さい。

[“Performing Very Low Frequency Capacitance-Voltage Measurements of High Impedance Devices Using the 4200A-SCS Parameter Analyzer”](#)

表1. 測定精度の標準値

Frequency	Measured Capacitance	C Accuracy @ 300 mV rms <sup>1</sup>	C Accuracy @ 30 mV rms <sup>1</sup>
10 Hz	1 pF	10%	13%
	10 pF	10%	10%
	100 pF	5%	5%
	1 nF	5%	9%
	10 nF	5%	5%
1 Hz	1 pF	2%	2%
	10 pF	1%	2%
	100 pF	2%	1%
	1 nF	2%	1%
	10 nF	2%	2%
100 mHz	1 pF	2%	3%
	10 pF	2%	2%
	100 pF	2%	2%
	1 nF	1%	2%
	10 nF	2%	1%
10 mHz	1 pF	5%	10%
	10 pF	1%	2%
	100 pF	1%	1%
	1 nF	1%	1%
	10 nF	2%	2%

### 注記

- ±20Vの最大値には、DCバイアスとAC試験信号のピーク電圧を含みます。  
負の最大バイアス電圧 =  $-20 + (\text{AC電圧} * \sqrt{2})$ 、  
正の最大バイアス電圧 =  $20 - (\text{AC電圧} * \sqrt{2})$
- 試験デバイスは、誘電正接  $\text{DX} < 0.1$  でなければなりません。全てのデータは、DCバイアス電圧 = 0Vの場合です。

全ての仕様は、23°C ± 5°C、校正後1年以内、相対湿度5%~60%、30分の暖機運転後の条件で適用するものです。

## 有機FETの超低周波CV特性評価

有機FETやMISキャパシタデバイスを含む様々なタイプのデバイスで超低周波C-V測定を行う予め用意されたソフトウェアが使用できます。図9にOrganic FET Very Low Frequency C-V Sweep (*ofet-vlf-cv*) テスト・ライブラリを使用したOFETのゲートとドレイン端子間のテスト周波数0.25HzでのCVスイープの結果を示します。

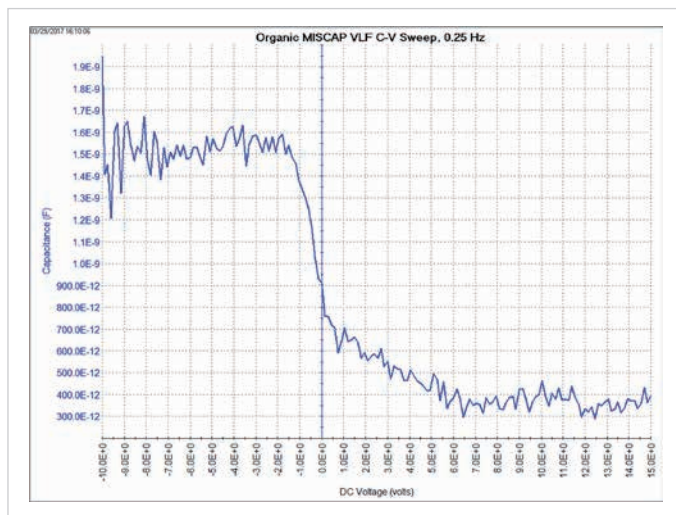


図9. テスト周波数0.25HzでのOFETの超低周波CVスイープ

## 高周波CV測定

DC I-VやVLF C-V測定に加え、OFETの容量測定によりゲート容量やキャリア移動度を含むデバイスに関する情報を得ることができます。図10にOFETへの4210-CVU CVユニットの接続を示します。この構成では、ゲート電圧に対するゲートとドレイン間の容量が測定されます。



図10. 4210-CVUとOFETへの接続

Organic FET C-V Sweep (*ofet-hf-cv*) テスト・ライブラリを使用し、OFETのゲートとドレイン端子間に50kHzで-10V~10VのCVスイープを行った結果を図11に示します。

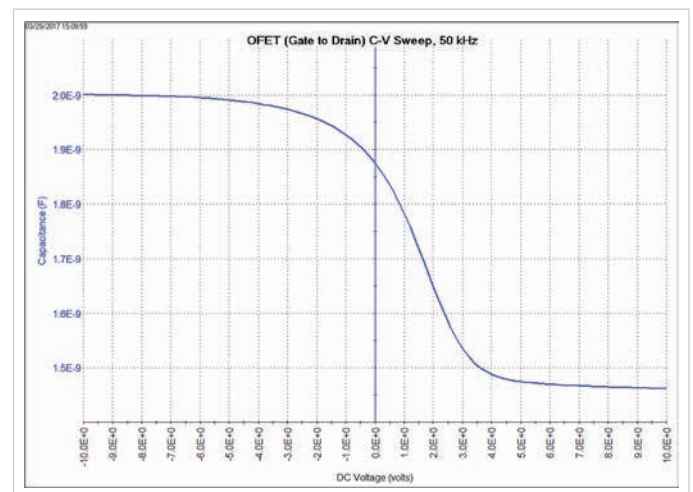


図11. OFETの高周波CV

## CV測定最適化

以下のガイドラインに従い4200A-SCSでの容量測定の品質を改善します：

**Open補正 (10pF以下の測定)：**オープン補正機能にて配線と接続のオフセット容量を補正します。その補正は2つのプロセスがあり、その補正值は測定結果に反映されます。

Clariusソフトウェアで補正を実行するため、画面の上部の *Tools* を選択し、*CVU Connection Compensation* を選択します。オープン補正では *Measure Open* を選択し、プローブを上げるかテストフィクスチャーからDUTを取り除きます。そのToolsメニューで補正データを取得したらTerminal Setting画面の *Open Compensation* を選択することによりその補正が有効になります。

**適切なホールド時間とスイープディレイ時間を選択する：**電圧ステップが印加された後、デバイス内の全ての容量が完全にチャージされた状態を平衡状態と呼びます。容量測定の際デバイスがその平衡状態になる前に測定を行ってしまうと正確な測定結果が得られません。

適切なディレイ時間を選択するために、Sampling Test ModeでデバイスにDC電圧を印加し時間に対する容量の変化をプロットし、セトリング時間を観測します。その平衡状態に至る時間がホールド時間として使用でき、それをSweepやSampling Operation Modeの開始前に与えるPresoak電圧出力時間として設定します。その時間はスイープ時の各ステップに対するSweep Delay時間としても使用でき

ます。Sweep delay時間はホールド時間程長くする必要は無いかもしれませんが、ユーザーは特定のテストに対しTest Setting画面で使用するため、適切な時間の検証を実施する必要があります。

**適切なシールド接続を行う：**1MHz以上のテスト周波数でACインピーダンス測定を行う場合、デバイスのできるだけ近くで同軸ケーブルのシールド同士を接続します。これによりシールドのループ面積が最小になりインダクタンスを最小にできます。これはさらに伝送線効果を維持するためにも有効です。そのシールド同士が接続されない場合オフセットが発生します。

**テストセッティング画面において適切なスピードモードを選択する：**Speed Mode機能でセトリング時間と測定時の測定領域 (A/Dアパーチャー)が調整できます。小さい容量に対しては最適な結果を得るためにQuietもしくはCustom Speed Modeを使用して下さい。

## 結論

適切な測定器と測定手法が有機FETの最適な電気特性評価を実現します。4200A-SCSは統合されたハードウェア、対話式ソフトウェアと解析機能によりOFETの電気的特性評価を行うために最も理想的なツールです。このテストシステムはオープン補正のような予め用意されたツール、情報ビデオ、ヘルプ機能、そして研究者がセットアップ時間を最小にでき最速でベストな測定結果を得るために役立つタイミングコントロールを持っています。

**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



A Tektronix Company



[jp.tek.com](http://jp.tek.com)

## 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：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 ヨク良い 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・13:00～17:30  
(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 © 2018, 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。

2018年6月 1KZ-61313-0