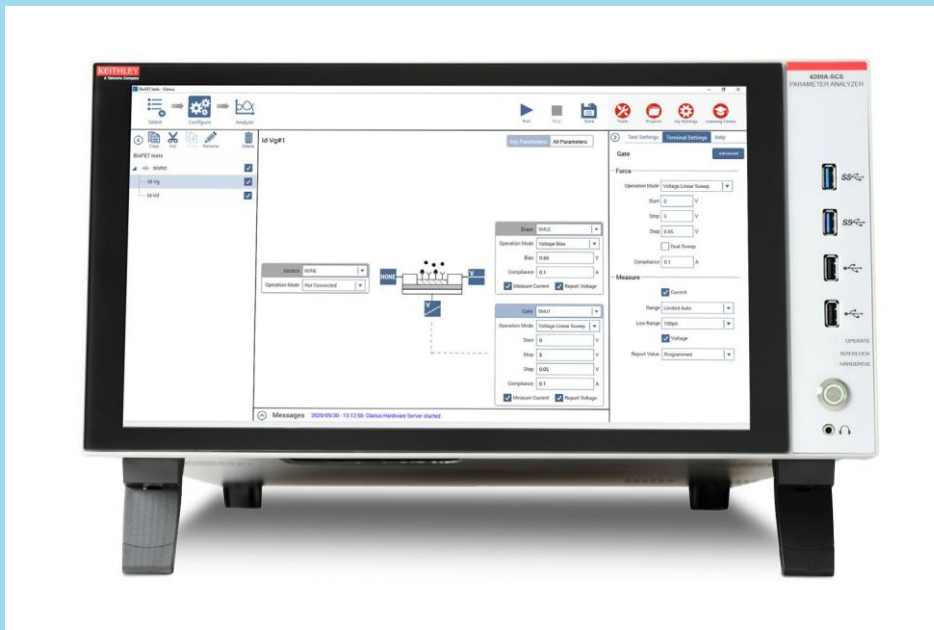


# 4200A-SCSパラメータアナライザを用いた FETベースのバイオセンサのDC I-V特性評価

アプリケーションノート



**KEITHLEY**  
A Tektronix Company

**Tektronix**

## イントロダクション

半導体ベースのバイオセンサには、その低コスト、迅速な応答、および正確な検出のために、広範な研究および開発が投資されてきた。特に、電界効果トランジスタ(FET)ベースのバイオセンサ、またはバイオFETは、生物学的研究、ポイントオブケア診断、環境用途、さらには食品安全性などの多種多様な用途に使用されている。

バイオFETは、生物学的応答を分析物に変換し、それを、DC I-V技術を用いて容易に測定することができる電気信号に変換する。出力特性( $I_d-V_d$ )、伝達( $I_d-V_g$ )特性、および電流測定対時間( $I-t$ )は、分析物の検出および大きさに関連する。

これらのDC I-V テストは、デバイスの端子数に応じて複数のソースメジャーユニット(SMU)を使用して簡単に測定できる。SMU は、電流と電圧を印加および測定でき、FET のゲート端子とドレイン端子に電圧を印加するために使用できる機器である。図1に示したKeithley 4200A-SCS パラメータアナライザは、複数のSMUを対話型ソフトウェアと組み合わせた統合システムである。

このテストシステムは、これらの測定をハードウェア、インタラクティブソフトウェア、グラフィック、および解析機能を含む1つのシステムに統合されている。

このアプリケーションノートは、典型的なバイオFETを説明し、SMUからデバイスへの電氣的接続をどのように行うかを解説し、共通のDC I-V測定および測定を行うために使用される機器を定義し、最適な結果を得るために考慮すべき事項について述べる。



図1.4200A-SCS パラメータアナライザ

## バイオFETセンサ

バイオFETは、トランジスタを、生体分子などの生物学的成分を検出することができる生体感受性層と組み合わせる。バイオFETがどのように機能するかを示す簡略図を図2に示す。

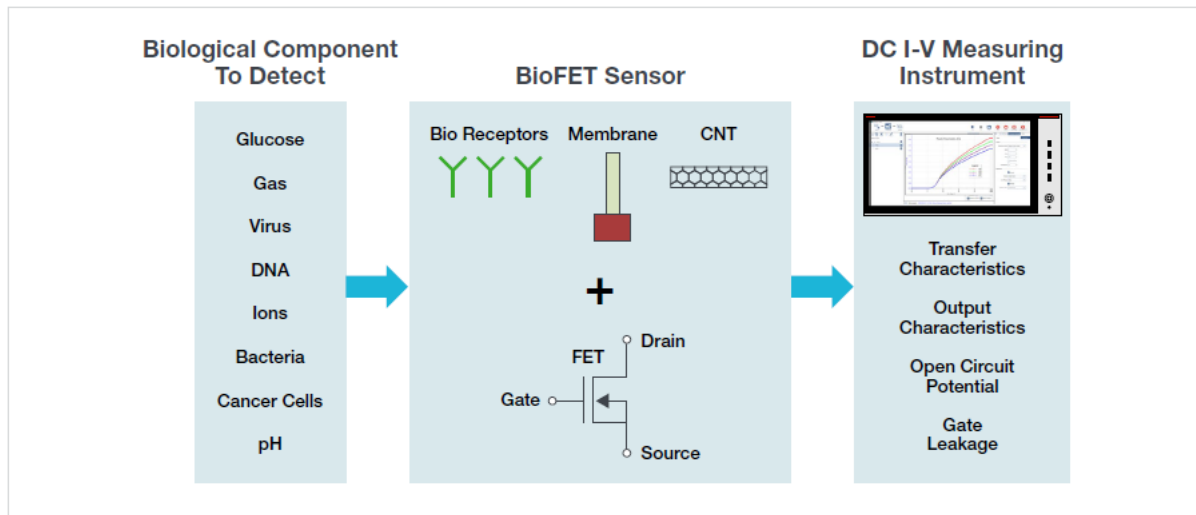


図2. bioFETとDC I-V測定機器を用いた生物学的成分の検出および測定

バイオFETを使用して、グルコース、ウイルス、PH、または癌細胞などの生物学的成分が、バイオFETの一部であるバイオ受容体、感知膜、またはカーボンナノ材料などの感知要素によって検出される。デバイスは、生物学的応答を分析物に変換して電気信号にする。生物学的要素の検出および濃度は、トランジスタを流れるドレイン電流に関連する。次いで、FETの電気信号は、DC I-V測定器を用いて測定される。これらは、従来のトランジスタの測定に使用されるものと同じ測定器である。

これらのデバイスで行われる一般的なDC I-Vテストには、デバイスの伝達特性、出力特性、しきい値電圧、オープン回路電位、ゲートリーク電流などがある。

## MOSFETの概要

多くのバイオFETセンサは、絶縁ゲートを備えた3または4端子FETであるMOSFETに基づいている。

図3はゲート、ドレイン、ソース、バルクの4つの端子を持つn-チャンネルMOSFETである。ソースとドレインの接点は、高濃度にドーパされたn+領域である。基板は低ドーパ材料p-である。ゲートは、主にSiO<sub>2</sub>の非常に薄い酸化膜層でチャンネルから絶縁されている。

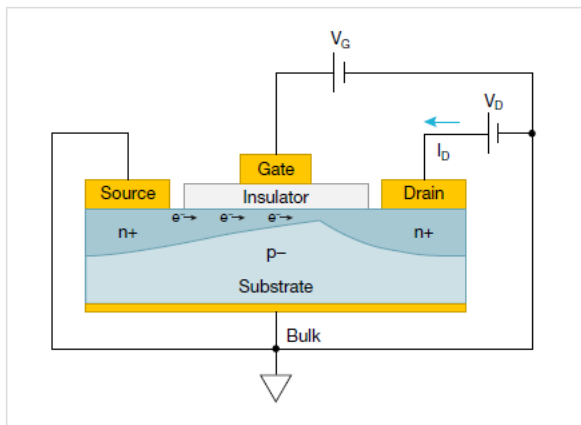


図3. MOSFETの回路の簡略図

ゲート端子とドレイン端子に電圧源を接続し、バイアス電圧V<sub>G</sub>とV<sub>D</sub>を印加すると、ソース端子とドレイン端子の間に導電性チャネルが形成されドレインからソースに電流が流れ始める。電流の流れる方向は、負に帯電した電子の動く方向とは逆である。ゲート電圧で、電荷キャリアとともにチャネルを制御する。

図4に示すように、回路内の2つの電源を電圧を供給し、MOSFETのI-V特性を決定するための電流を測定できるSMUに置き換えることができる。この例では、1つのSMUをゲート端子に接続し、ゲート電圧を印加してゲートリーク電流を測定する。第2のSMUがドレイン端子に接続され、ドレイン電圧を印加し、結果として生じるドレイン電流を測定する。

SMUは、印加電圧と測定電流の他に、電圧ソースの極性を遠隔操作で変更し、コンプライアンス電流を設定して、過剰な電流がデバイスにダメージを与えるのを防ぐことができる。

目的のI-V測定値に応じて、SMUをMOSFETのSource端子とBulk端子に接続することもできる。しかし、この例では、ソース端子およびバルク端子は、SMUのLO端子に接続されている。

複数のSMUを使用する場合、SMUのタイミングは同期されなければならない。これは4200A-SCSパラメータアナライザ内で自動的に行われる。

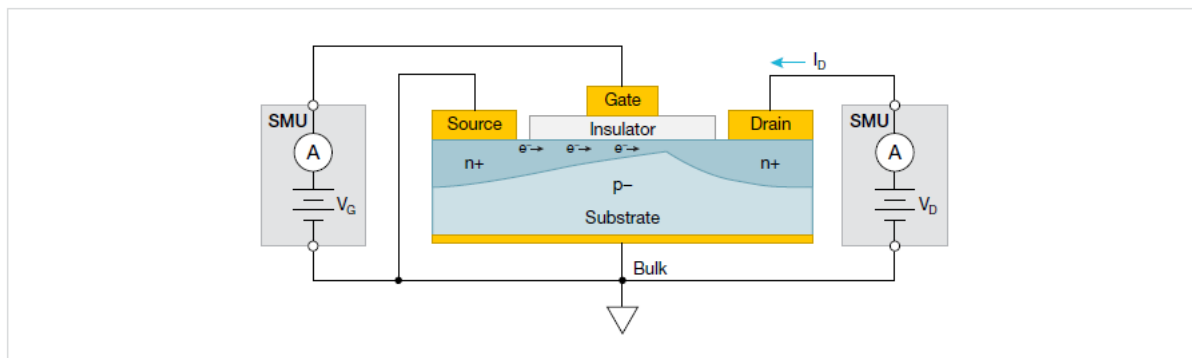


図4. 2つのSMUを使用し、MOSFETのDC I-V特性を測定する

## バイオフィットの例

この章では、一般的なバイオフィットの例および、これらのデバイスへの電氣的接続がどのように行われるかについて説明する。これらの例には、バックゲート型バイオフィット、拡張ゲート型FET、イオン感応型FETが含まれる。

### バックゲートバイオフィット

図5に示すバックゲートバイオフィットでは、電氣的および化学的に絶縁性の材料が半導体層を導電チャネルから分離する。バイオフィットレセプターが特定の分析物または生物学的要素に曝されると、FETのI-V特性が影響を受ける。この場合、ドレイン電流は病原体などの生物学的要因、または他の生物学的分析物に関連する。

2つのSMUで、デバイスのバイアスと特性評価を行う。1つのSMUがゲートに接続され、2つ目のSMUがドレインに接続される。ソース端子は、4200A-SCSのグラウンドユニットまたは第3のSMUに接続することができる。

この例では、SMU1はゲート電圧を供給し、ゲートリーク電流の測定にも使用できる。ゲート電圧を印加するために電源を使用するケースもあるが、SMUを使用することにより、デバイスのI-V特性を研究するときに役立つゲートリーク電流を測定できる利点がある。ゲート電圧は、チャネル幅を制御するために使用され、検体に対する感度を増加させるために使用することができ、その結果ドレイン電流を測定することがより容易になる。SMU2はドレイン端子に接続され、ドレイン電圧( $V_D$ )を印加し、ドレイン電流( $I_D$ )を測定する。

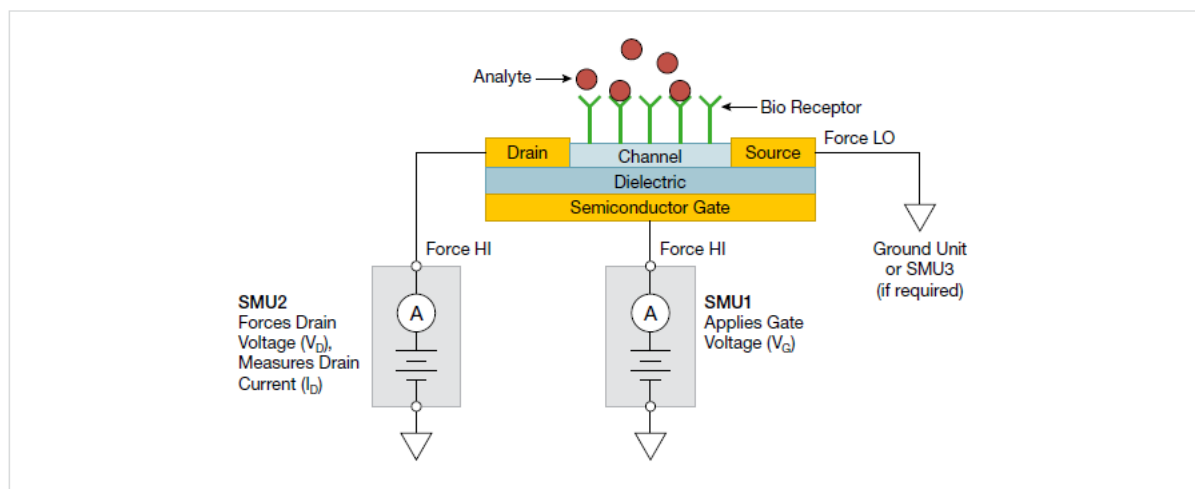


図5.バックゲートバイオフィット

## 拡張ゲート FET (EGFET)

図6に、センシング構造とMOSFETの両方を含む拡張ゲートFETを示す。このバイオFETでは、センシング構造とMOSFETが物理的に2つの部分に分離されている。MOSFETがセンシング構造から分離されているため、市販のMOSFETを変換器として使用することができる。

EGFETは、MOSFETのゲートに直接接触する作用電極を有する。作用電極はまた、分析物を感知するために使用される電解質溶液中の感知膜を有する。この構成では、SMU1は、参照電極に接続され、参照電圧( $V_{REF}$ )を印加する。

この電圧は、FETのチャネル幅を制御するために使用される。SMU2はドレイン電圧( $V_D$ )を印加し、ドレイン電流( $I_D$ )を測定する。

バックゲートFETと同様に、2つのSMUで測定されるMOSFETの伝達特性( $I_D$  vs.  $V_{REF}$ )は分析物により変化する。それらのSMUはデバイスの出力特性( $I_D$  vs.  $V_D$ )やゲートリークの測定にも使用できる。

EGFETのいくつかのアプリケーションには、グルコース、pHやイオン種のような特定の分子を検出するものが含まれている。

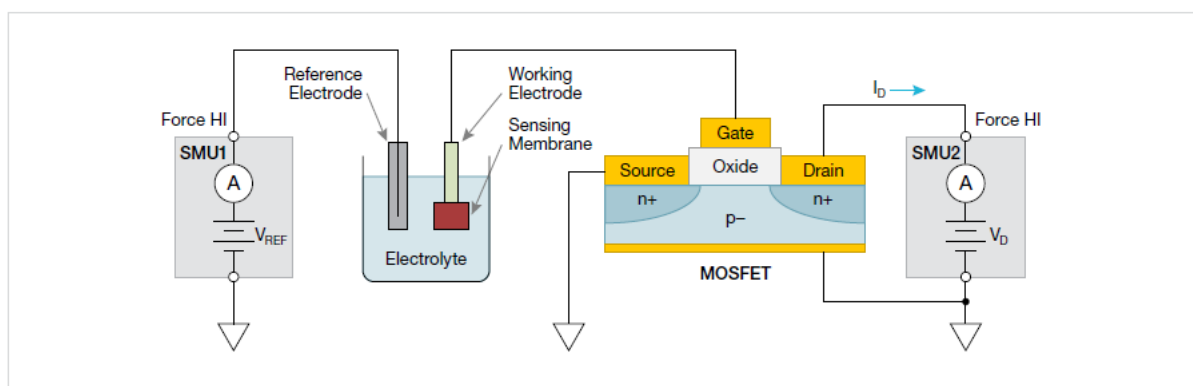


図6. 拡張ゲートFET.

## イオン感応性FET (ISFET)

図7に示すように、イオン感応性電界効果トランジスタ(ISFET)は、溶液中のイオン濃度を測定するために使用される。イオン濃度はトランジスタを流れるドレイン電流に関係する。ISFETは、pHモニタリング、グルコース測定、および抗体検出のような広範囲の生物医学的適用において使用される。

イオンに敏感なFETは、EGFETと同様に、センシング構造とMOSFETの両方を有する。しかしながら、EGFETとは異なり、感知素子とFETは物理的に分離されておらず、組み合わせられている。ISFETは、ゲート、ドレイン、およびソースを含むMOSFETの同じ基本構造を有する。

しかしながら、従来のMOSFETの金属ゲートは、溶液中の参照電極およびイオン感応性膜によって置き換えられる。この例では、シリコンチャネルを示しているが、このチャネルはグラフェン、シリコンナノワイヤー、カーボンナノチューブなどの他の材料でも作ることができる。

この例では、参照電極は、電圧を印加しゲート電流を測定するSMU1に接続される。ゲート電圧は、基準電極と基板との間に印加され、FETのドレイン端子とソース端子との間に反転層を形成する。FETのドレインは、ドレイン電圧を印加しドレイン電流を測定するSMU2に接続される。裏面端子は、ISFETの基板をGNDUのForce LO端子に接続するために使用される。電解質溶液のイオン濃度が変化すると、FETのドレイン電流も変化し、SMU2によって測定される。

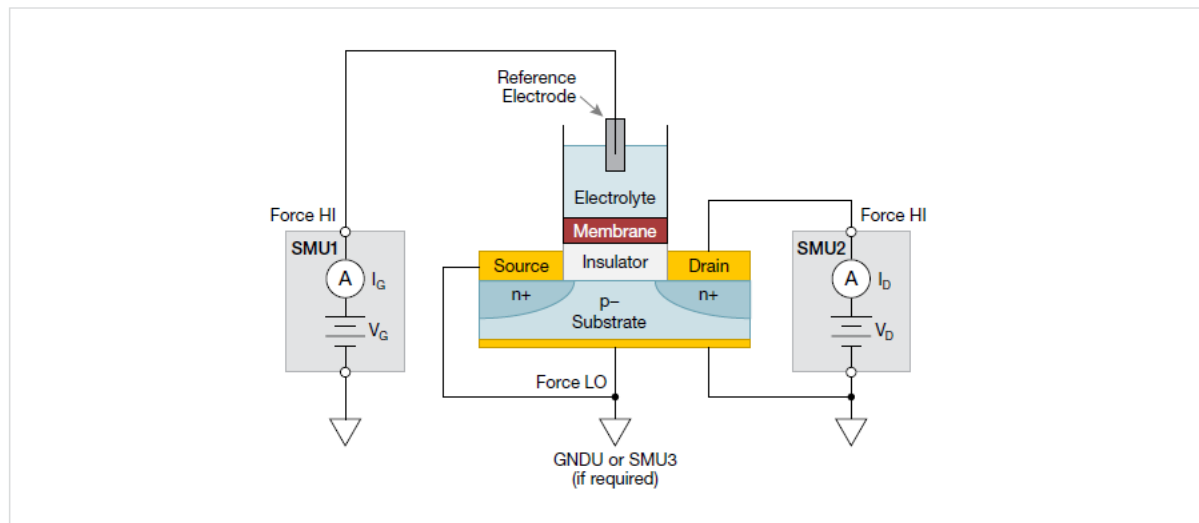


図7.イオン感応性 FET (ISFET)

## DC I-V測定

このセクションでは、バイオFETの特性評価に使用される一般的なDC I-V測定について説明する。これには、伝達特性( $I_d$ - $V_g$ )、出力特性( $I_d$ - $V_d$ )、およびドレイン電流対時間測定( $I_d$ - $t$ )が含まれる。

### 伝達特性( $I_d$ - $V_g$ )

おそらくバイオFETに関する最も一般的な電気的測定は、ドレイン電流対ゲート電圧をプロットした伝達特性である。伝達特性は、通常、病原体または調査対象の他の生物学的因子の濃度に関係している。

このテストでは、1つのSMUがゲート電圧をスイープし、2つ目のSMUが一定のドレイン電圧で結果として生じるドレイン電流を測定する。

図8は、病原体の4つの異なる濃度を表す4つの異なる曲線を示す。これらの曲線は、4200A-SCSパラメータアナライザを用いて作成した。

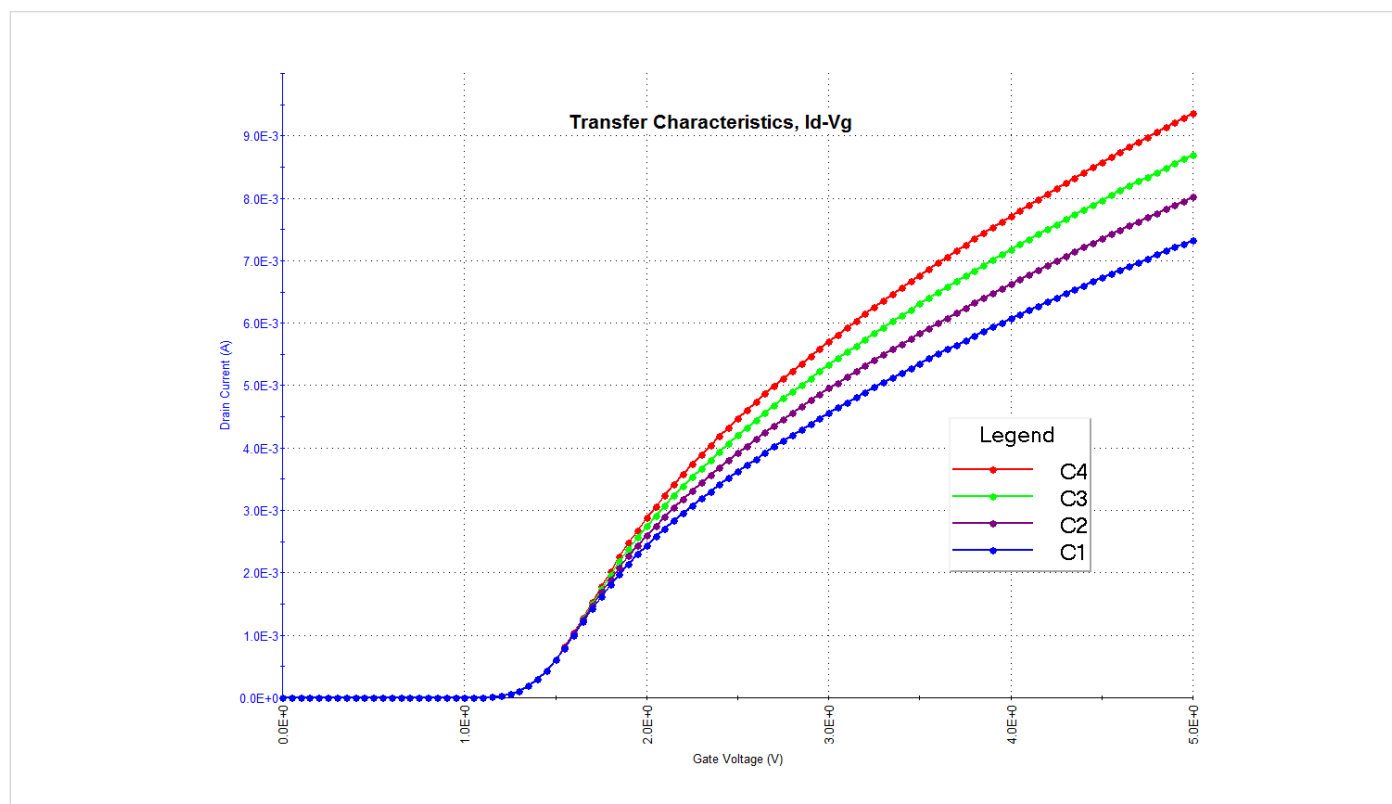


図8.伝達特性



Clariusソフトウェアのライブラリには、FETの伝達特性を実行するテストと、伝達特性と出力特性の両方をテストするプロジェクトが付属している。これらのテストとプロジェクトは、ソフトウェアのSelectビューでライブラリのサーチバーに“biofet”を入力することで検出できる。このテストのConfigure(設定)ビューの画面キャプチャを図9に示す。

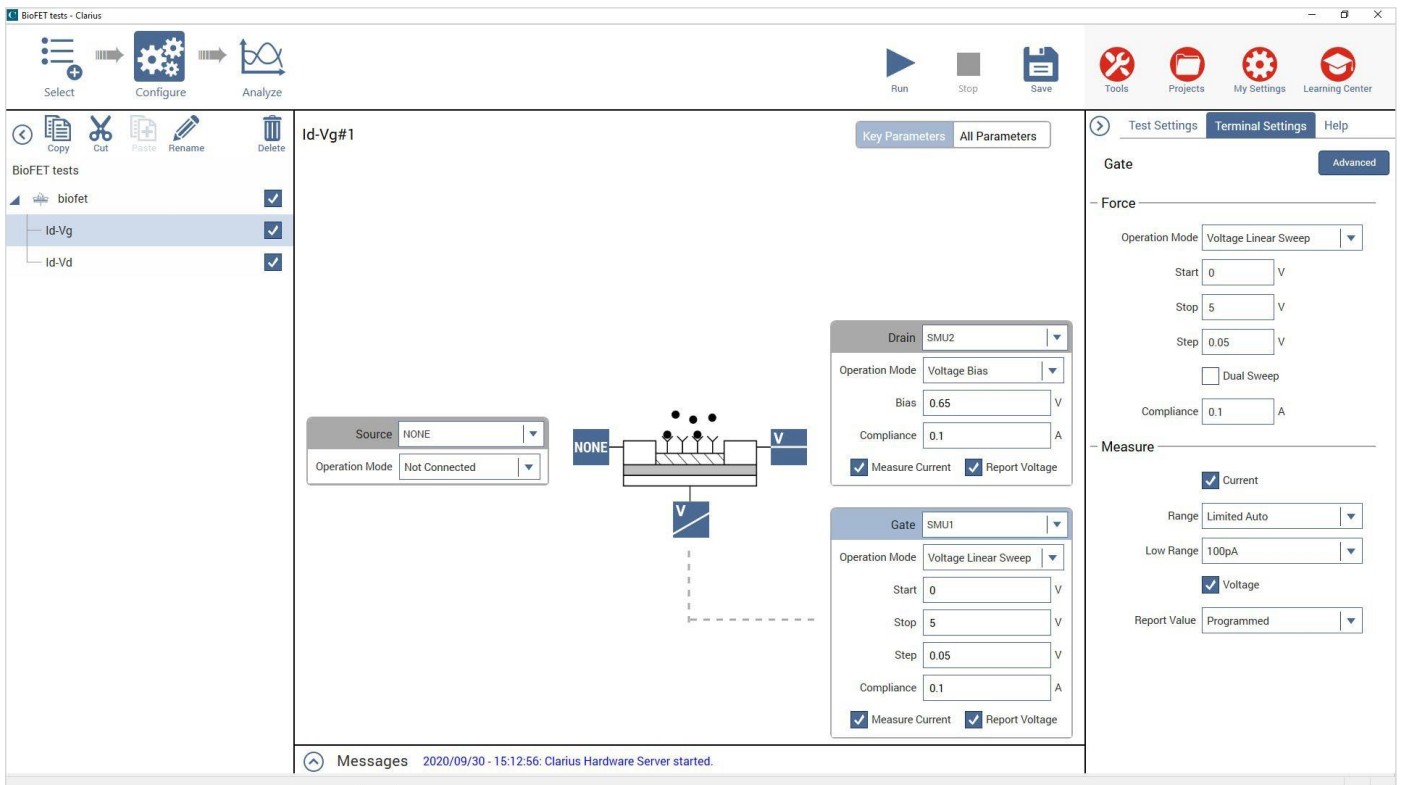


図9. ClariusソフトウェアでバイオFETのId-Vgを測定するためのテストビューの設定

## 出力特性(Id-Vd)

もう1つの一般的なテストとして、**図10**に示したFETのドレイン電圧に対するドレイン電流の変化を評価する出力特性がある。これらの曲線は、4200A-SCSパラメータアナライザの2つのSMUを使用して生成できる。

この場合、ゲートに接続されているSMU1は電圧をステップし、ドレインに接続されているSMU2は電圧をスイープし、結果として生じる電流を測定する。

FETの動作を試験するために、多重ゲートステップにより複数の曲線が得られ、ドレイン電流のゲート電圧への依存性が示される。ゲート電圧を一定に保つこともできるが、異なる成分または濃度がドレイン電流にどのように影響するかを観察するために、生物学的成分に対する変化が評価される。

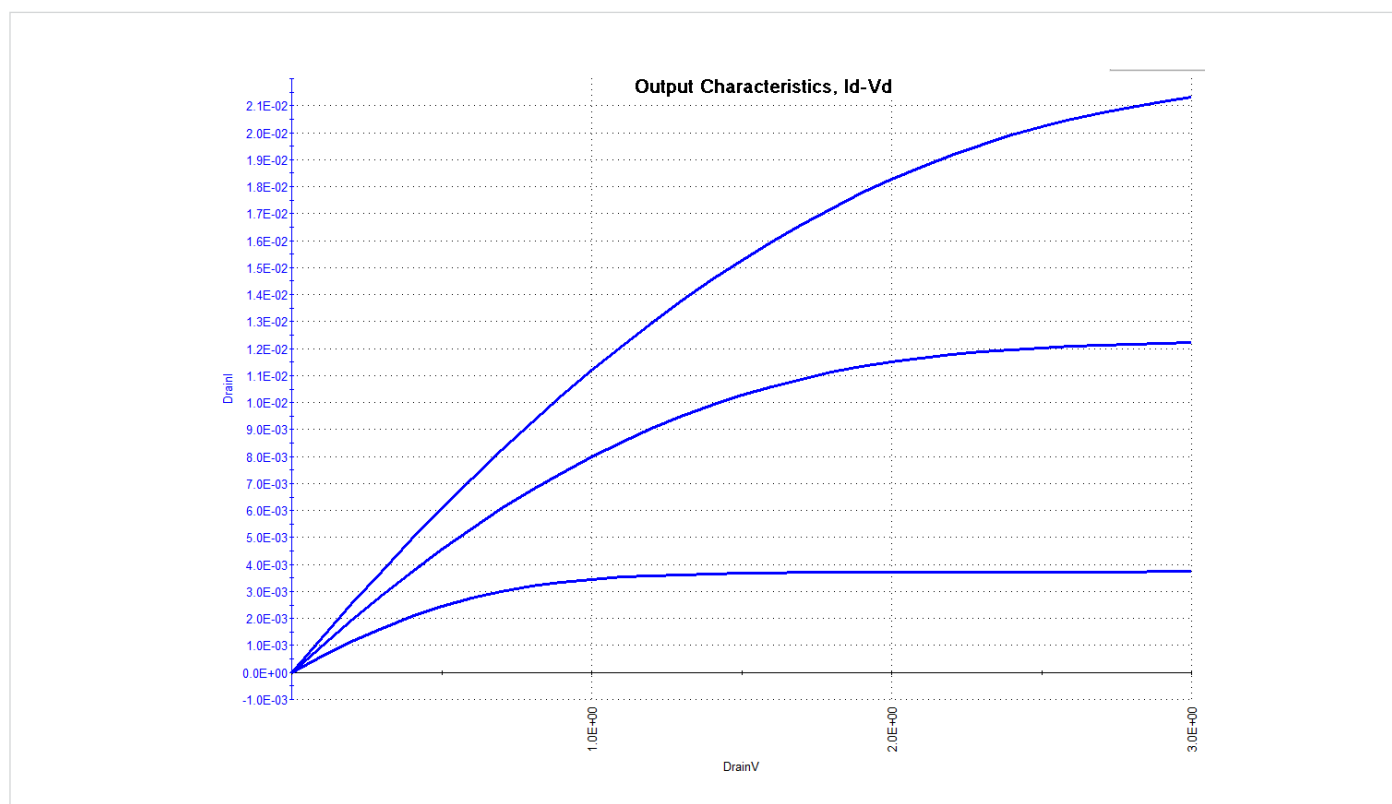


図10.出力特性

## ドレイン電流vs.時間(Id-t)

バイオFETセンサの動的応答は、**図11**に示すように、ドレイン電流を時間の関数としてグラフ化することによってモニターすることができ、ドレイン電流の大きさは、分析物の濃度が変化するにつれて変化する。

このアプリケーションでは、分析物のみが変化するようにゲートおよびドレイン電圧バイアスの両方を一定に保ち、ドレイン電流を測定する。

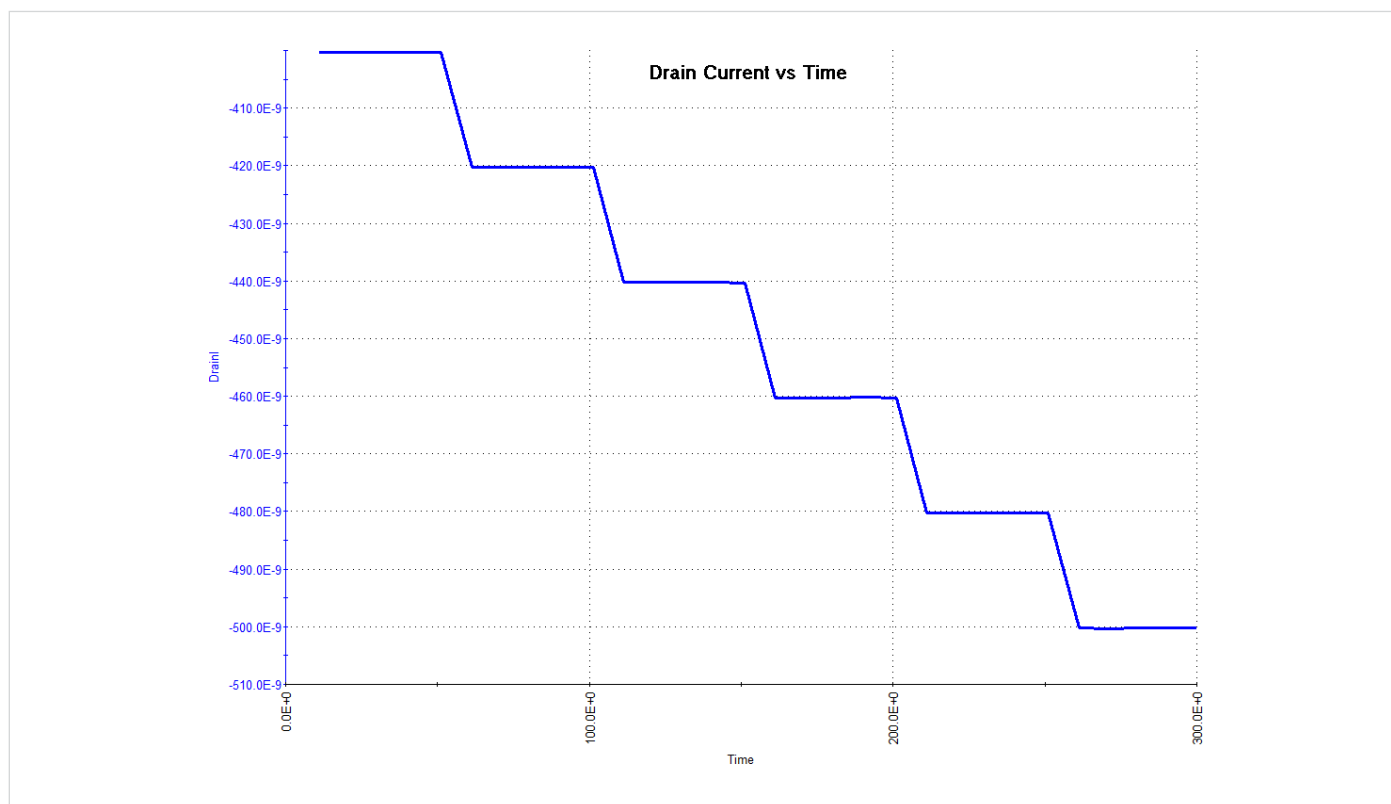


図11.ドレイン電流 vs. 時間

## 測定の最適化

このセクションでは、ブランク試験または空試験を実行すること、ノイズを最小限に抑えること、十分なセトリング時間を与えること、およびデバイスの損傷を回避するためにコンプライアンスを使用することを含む最適な測定を実現するための方法を説明する。

**“ブランク”テストの実行:**システムがセットアップされると、“ブランク”または空テストを実行して、すべてが適切にセットアップされ、構成されていることを確認することを推奨する。このテストでは、機器のI-V特性を測定して、生物学的成分を付加せずに、適切に動作していることを確認することで、ベースライン電流を確認する。生物学的成分を付加する前に、必要に応じて、試験回路および設定を調整する。デバイスのタイプに応じて、これは可能な場合も、不可能な場合もある。

**ノイズを低減する:**ノイズの多い測定は、おそらく、低電流を測定するときの最も一般的な問題の1つである。バイオFETのドレイン電流またはゲートリーク電流は、ナノアンペアおよびピコアンペアの範囲の可能性がある。ノイズは、いくつかの理由によって引き起こされることがあり、ノイズ源を決定するために何らかの実験が必要となる場合がある。

静電気干渉は、帯電した物体が被測定回路に近づくと発生する。高インピーダンス回路では、この電荷は急激に減衰せず、測定が不安定になることがある。測定誤差は、直流または交流の静電界のいずれかに起因する可能性があるため、静電シールドを使用することで、これらの電界の影響を最小限に抑えることができる。

静電シールドは、テスト回路を囲む単純な金属ボックスにすぎない。プローブステーションには静電 / EMI シールドまたはオプションのダークボックスが含まれていることがある。シールドは、SMUのForce LO 端子である測定回路LO に接続する。Force LO 端子は、SMU の triax ケーブルの外側シールドか、GNDU にある。すべてのケーブルは、低ノイズ設計でシールドされている必要がある。各42XX-SMUには、2本の低ノイズトライアックスケーブルが付属している。

ノイズを低減するもう一つの方法は、外部のノイズ源を制御することである。これらのノイズ源は、モーター、コンピュータ画面、またはラボやテストステーション内またはその近くにあるその他の電気機器によって発生するが、シールドとフィルタリング、またはノイズ源の除去または

オフによって制御できる。

要約すると、ノイズを最小限にするために:

- 人、導体を含むすべての荷電物は、テスト回路の敏感な領域から離す。
- テストエリア付近での移動や振動を避ける。
- 外部のノイズ源を制御または除去する。

被試験デバイスを導電性のエンクロージャで囲んでシールドし、**図 12** に示すようにエンクロージャをテスト回路のコモン端子 (Force LO) に電氣的に接続する。シールドは、テスト回路を囲む単純な金属ボックスまたはメッシュスクリーンだけに行うことができる。

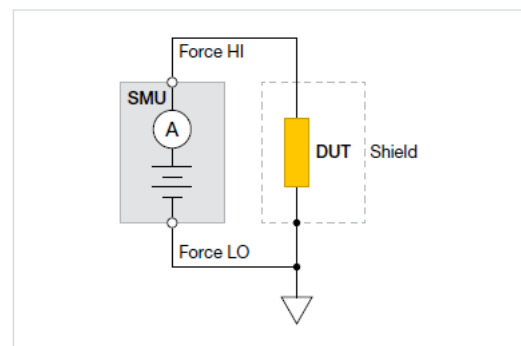


図12. 導電性シールドはForce LO に接続される

**リミット電流:** I-V 特性評価の実行中にデバイスへの損傷を防ぐために、デバイスに流れることができる電流量を制限するようにコンプライアンスを設定する。これは、Clariusソフトウェアでは、各SMUの現在のコンプライアンスを安全なレベルに設定することによって行うことができる。これは、電流がユーザー定義のレベルを超えないようにするためにプログラムされた制限である。

**十分なセトリング時間を提供する:**低電流 (<1 $\mu$ A)を測定する場合、ゲート電圧をスイープしてドレイン電流を測定する場合など、あるいは電流または電圧が印加または変化した後測定が安定化されることを確実にするために、十分なセトリング時間を設定にすることが重要である。回路のセトリング時間に影響する要因には、試験回路のシャント容量とデバイス抵抗が含まれる。シャント容量には、ケーブル、テスト・フィクスチャ、プローバ、およびスイッチ・マトリクスが含まれる。

測定回路のセトリング時間は、電流対時間を階段状の電圧にプロットすることによって決定することができる。セトリング時間は、グラフによって視覚的に決定することができ、その値はClariusソフトウェアのTest Settingsウィンドウ内の電圧スイープデレイ時間として使用することができる。

## 結論

FETベースのバイオセンサの研究開発は、それらの低コスト、迅速な応答、および正確な検出のために増加している。バイオFETは、分析物に対する生物学的応答を、DC I-V計測器によって容易に測定することができる電気信号に変換する。バイオFETのI-V特性評価は4200A-SCSパラメータアナライザのSMUを使用して行うことができ、適切な機器設定を使用し、適切な測定技術を適用することで、最適な測定結果が得られる。

最適な低電流測定を行うことに関する詳細情報は、Tek.comウェブサイトからダウンロードすることができるKeithley Low Level Measurements Handbookを参照。

連絡先:

オーストラリア1 800 709 465  
オーストラリア\* 00800 2255 4835  
バルカン諸国、イスラエル、南アフリカ及び他の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 / バルティス +41 52 675 3777  
中欧/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、中南米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 800 800 238  
ノルウェー800 16098  
中華人民共和国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  
+82 2 565 1455 韓国  
ロシア / CIS +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  
USA 1 800 833 9200  
ベトナム12060128

\* ヨーロッパのフリーダイヤル番号アクセスできない場合は、+41 52 675 3777を呼び出す。



TEK.COMでより価値のある情報を見つける

Copyright (著作権) Tektronix(テクトロニクス)。無断転載を禁じます。Tektronix製品は、米国特許および外国特許によってカバーされ、発行され、係属中である。この出版物の情報は、以前に出版されたすべての資料の情報に取って代わるものである。指定および価格変更特権は予約されています。TEKTRONIXおよびTEKは、Tektronix, Inc.の登録商標です。参照されているその他すべての商号は、それぞれの会社のサービスマーク、商標または登録商標です。

102620 SBG 1KW-73757-0

2018年改訂

