

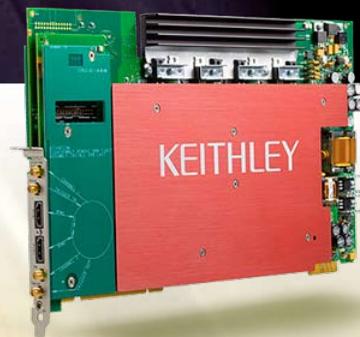
KEITHLEY

A GREATER MEASURE OF CONFIDENCE

# 超速I-Vアプリケーション

## 4225-PMU型

### 超速I-Vモジュールを用いて



超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

## はじめに

超高速のI-V印加および測定機能は、化合物半導体、中電力用デバイス、不揮発性メモリ、MEMS（マイクロエレクトロメカニカル・システム）デバイス、ナノデバイス、太陽電池、CMOSデバイスなどの多くの技術で、ますますその重要性を増しています。DC信号ではなく、パルス状のI-V信号によってデバイスの特性を評価することで、自己発熱（ジュール熱）の影響を観測あるいは排除すること、また、電荷トラップによる測定時の電流ドリフトを最小限に抑えることができます。また、トランジェントI-V測定によって、超速の電流または電圧波形を時間領域で捉え、試験回路の動的な観測ができます。パルス印加機能を用いれば、信頼性評価においてAC信号を印加してデバイスにサイクル試験のストレスを与えることや、マルチレベル波形モードによるメモリデバイスへの書き込み／消去も可能になります。4200-SCS型 半導体特性評価システム用の4225-PMU型 超速I-Vモジュールは、多くの高速印加／測定アプリケーションをサポートします。

## 主な特長と仕様

4225-PMU型 超速I-Vモジュールは、高速で複数のレベルの電圧パルスを出し、電流と電圧を同時に測定する2つのチャンネルを提供します。従来の一般的なパルス出力／測定ハードウェアは、外部のパルスジェネレータ、マルチチャンネルのオシロスコープ、専用設計された相互接続ハードウェア、内蔵ソフトウェアなどから構成されていました。4225-PMU型モジュールは、このようなシステムのすべてを置き換えます。

4225-PMU型には、いくつかの重要な特長があります。

- 超速I-V試験を可能とする、高速の印加および測定機能を統合
- ダイナミックレンジの広い電圧印加、電流測定（オートレンジ機能搭載）およびタイミングパラメータ
- 多岐にわたるアプリケーション
- 操作の簡単な対話型の内蔵ソフトウェア

# 超速I-Vアプリケーション

## 4225-PMU型 超速I-Vモジュールを用いて

### 高速印加および測定機能を統合

各モジュールには独立した2つのチャンネルがあります。どちらのチャンネルも大容量メモリを備えた並列14ビットADコンバータで電圧と電流を同時に測定でき、5nsごとに最大100万サンプルのデータを保持できます。

このような高速の測定と格納機能によって、デバイスにトラップされた電荷の等温パルスI-V特性や過渡特性の評価など、幅広い分野の高速アプリケーションに対応できます。各チャンネルは、最小パルス幅60ns、最小立上り時間20nsで確度の高い電圧パルスを出力します。マルチレベルのパルスを出力するためにユニットのセグメントARB®モードを使用する場合、個々の電圧セグメントには最短で20nsの時間幅を設定でき、各々異なるこれらのセグメントをチャンネルあたり最大2048種類組み合わせることで波形を構成できます。このモードによって、フラッシュデバイスをはじめとする不揮発性メモリ技術の特性評価に必要な柔軟性が得られます。



超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

# 超速I-Vアプリケーション

## 4225-PMU型 超速I-Vモジュールを用いて



### 超速I-Vの概要

### 超速I-Vのアプリケーション例

### まとめ

### ホーム

### 幅広いパラメータレンジ

4225-PMU型では、電圧印加、電流測定、タイミングのパラメータを広い範囲で設定できます。

- 電圧印加レンジ:**パルス振幅は、mVの分解能で最大±40Vまでプログラムできます。このように幅広いレンジは、次世代シリコン技術の特性評価に使用する低電圧と、多値フラッシュやLDMOS向けの高電圧の両方への対応を可能とします。また、窒化ガリウム (GaN) やガリウムヒ素 (GaAs) などの材料から作られる、小電力用化合物半導体デバイスの測定にも適しています。
- 電流測定範囲:**4225-PMU型の電流測定範囲は±100 μA~800mA (フルスケール) です。電流測定の分解能は12nA未満 (アベレーシングなし)、ノイズフロアは約10nAです。オプションの4225-RPM型リモートプリアンプ/スイッチモジュールを使用した場合、±100nA~10mA (フルスケール) の範囲に6つの測定レンジが得られ、電流測定の分解能は200pA未満 (アベレーシングなし)、ノイズフロアは約10pAになります。(オフセット電流と時間の関係は図1を参照してください。) 電流能力が大きいくことで、比較的大電力のデバイスを試験できる一方、より電流の低いレンジはスケーリングの最先端を行くCMOSデバイスのバイアス温度不安定性 (BTI) 特性評価など、難しいとされるアプリケーションに対応できます。図2は、4225-PMU型とケースレーのDCおよびパルスI-Vユニットの電流測定能力を比較したものです。
- タイミングパラメータ:**4225-PMU型は、60ns~999msの範囲で2レベルのパルス幅を設定できます。マルチレベルの波形は、最短20ns、最長40sのセグメントによってプログラムできます。パルス周期も120ns~1sの範囲でプログラム可能です。また、大量のストレス・測定ループが必要となる場合の多いBTIや不揮発性メモリの書き換え耐性試験など、要求の厳しい信頼性アプリケーション向けに、複数のセグメントを最大10<sup>12</sup>回まで繰り返すことができます。

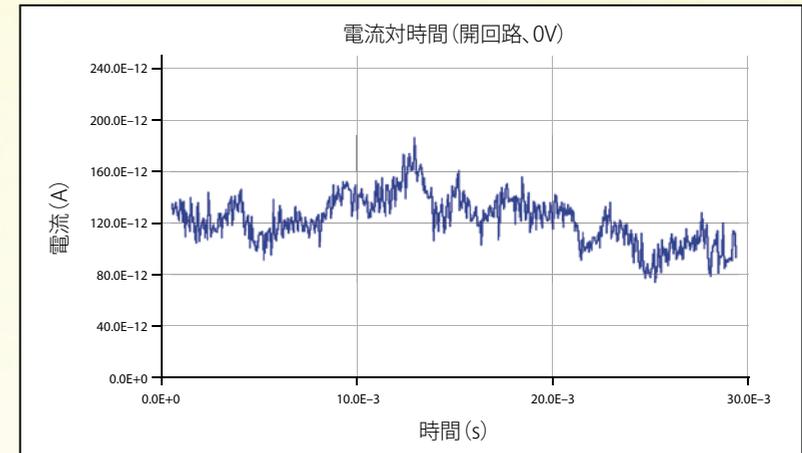


図1. 1 μAレンジ、0Vのときのオフセット電流

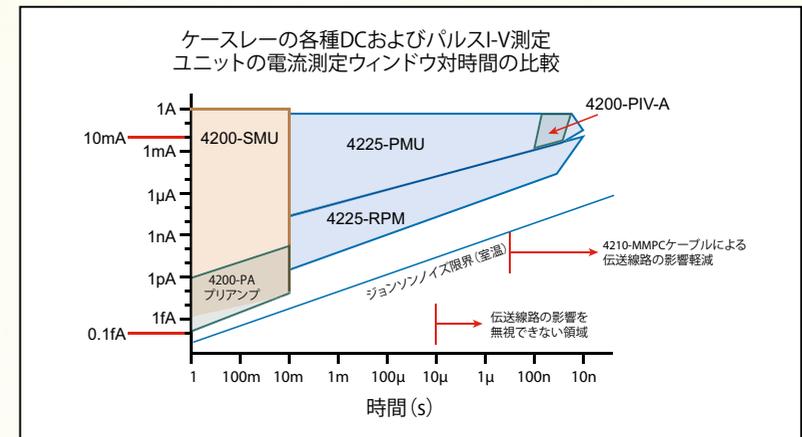


図2. 時間の関数として示したDCおよびパルスI-Vユニットの電流測定ウィンドウ

# 超速I-Vアプリケーション

## 4225-PMU型 超速I-Vモジュールを用いて



超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

### 多岐にわたるアプリケーション

4225-PMU型は、デバイスの基本的なパルスI-V測定、フラッシュやPCRAMデバイスなどの不揮発性メモリの試験、CMOSデバイスの特性評価(チャージポンプや自己発熱の影響など)、信頼性試験、ナノデバイスの測定、太陽電池の試験、有機TFTディスプレイの測定など、幅広い分野の高速アプリケーションに有効です。「[超速I-Vのアプリケーション例](#)」と題したセクションでは、4225-PMU型の代表的なアプリケーションの一部について概要を説明しています。

- デバイスの汎用パルスI-V試験
- CMOSデバイスの特性評価
  - チャージポンプ
  - 自己発熱の影響
  - 電荷トラップ
  - NBTIやPBTIの特性評価、モデル化、モニタリング
- 不揮発性メモリデバイスの試験
  - フラッシュメモリ
  - 相変化ランダムアクセスメモリ (PRAMまたはPCRAM)
- 化合物半導体デバイスおよび材料
  - レーザダイオード
  - 熱インピーダンス測定
- ナノテクノロジーおよびMEMSデバイス
- 太陽電池
- その他の試験

# 超速I-Vアプリケーション

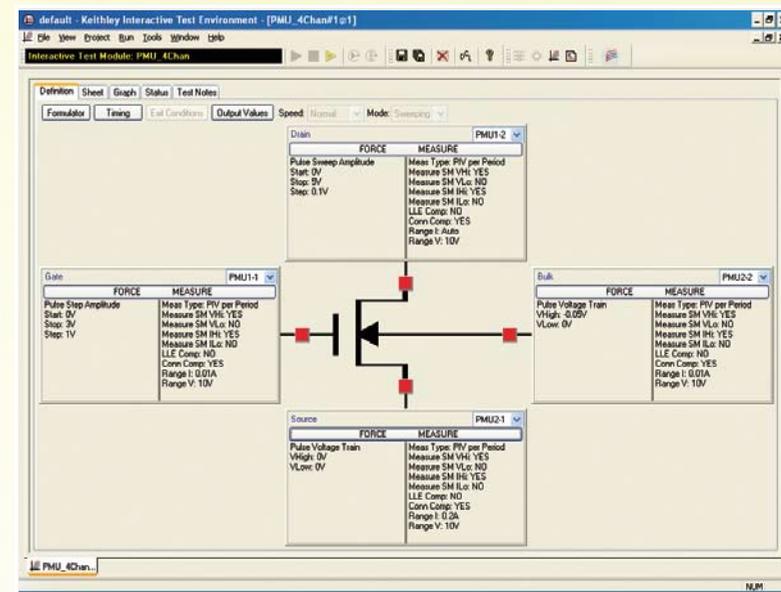
## 4225-PMU型 超速I-Vモジュールを用いて



### 対話型の内蔵ソフトウェア

4200-SCS型の対話型ソフトウェア、KTEI V8.0 (Keithley Test Environment Interactive、バージョン8) では、システム内の測定ユニットに加えて、増え続けるグラフ化や分析用ツールを、ポイント&クリックで直感的に制御できます。この試験ソフトウェアは、DCおよびC-V特性評価において長年にわたり高い評価を受けてきましたが、システムの超速I-V機能を使う場合にも外観と操作性を維持して機能強化されました。ユーザは、独自の試験を簡単に作成できます。あるいは、付属する多数の試験プロジェクトの中からいずれかを選んで使用することもできます。これらのプロジェクトは、チャージポンプ、電荷トラップ、不揮発性メモリの試験などのもっとも一般的な高速I-V試験アプリケーション向けに作られています。

その他のアプリケーションについては、4200-SCS型のオプションとしてACS統合テストシステム (Automated Characterization Suite) を使用できます。ACSバージョン4.2には、ユーザテストモジュールの開発を支援し、ウェーハおよびカセットレベルの自動化、ウェーハマップ作成、大規模データセットに対応した、超速I-Vライブラリが含まれています。このライブラリを4200-SCS型に付属された試験ライブラリと連携させることで、4225-PMU型と4225-RPM型リモートアンプ/スイッチを併用する試験プロジェクトを、ACS 4.2によって開発できます。超速BTI試験プロジェクトは、先端的な超速バイアス温度不安定性試験を簡単に実行できるようにする、強力で使いやすいインターフェースを実現しています。



超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

# 超速I-Vの概要

4225-PMU型は、パルスI-V、トランジェントI-V、パルス印加の3種類の超速I-V試験に使用できます。これら3つのモードを図3に示します。

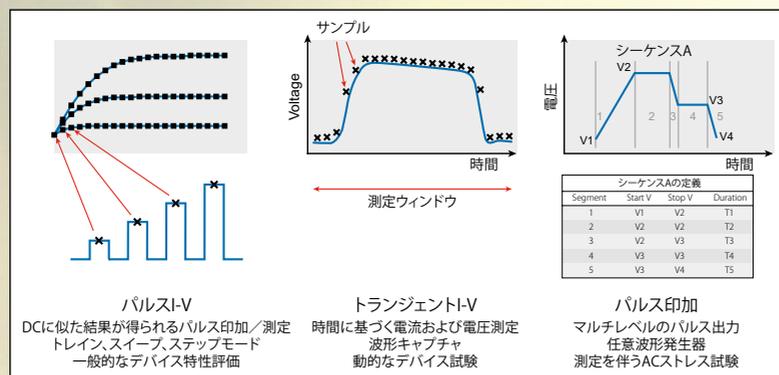


図3. 4225-PMU型 超速I-Vモジュールの3つのモード

「パルスI-V」は、パルスの印加と、その応答に対する、時間に基づいた高速測定全般を指し、DC測定に似た結果が得られます。得られる電流および電圧（または、そのいずれか）の値は、パルスに対してあらかじめ定義された測定ウィンドウ内の測定値を平均したものです。この測定値の平均を「スポット平均」と呼びます。ユーザはパルス幅、デューティサイクル、立上り/立下り時間、振幅などのパルスのパラメータを定義します。

「トランジェントI-V」または波形キャプチャとは通常、パルス波形の取得を伴う、時間に基づいた電流および電圧（または、そのいずれか）の測定です。トランジェント試験は通常、電荷トラップや自己発熱によって生じるドレイン電流劣化の時間依存性など、時間とともに変化するパラメータの観測に使用します。トランジェントI-V測定は、動的な試験回路の検証や、パルスI-Vモードの適切なパルス設定を選択する診断ツールとして使用できます。

「パルス印加」では、ユーザ定義による2レベルのパルス出力、内蔵のセグメントARB機能を用いたマルチレベルのパルス出力、または4200-SCS型に付属するKPULSEソフトウェアの任意波形発生器による自由に定義した波形の出力が可能です。セグメントARB機能では、各々異なる電圧と時間幅を定義されたセグメントを組み合わせることで波形を作成できます。パルスジェネレータとしての機能に加えて、4225-PMU型はACまたはDCの電圧および電流の測定機能を備えているため、測定ハードウェアの追加やプログラムの複雑化が抑えられます。4220-PGU型は、測定機能を持たない点を除いて4225-PMU型とまったく同じ出力機能を持つ2チャンネルのパルスジェネレータです。

超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

# 超速I-Vのアプリケーション例



## 超速I-Vの概要

## 超速I-Vのアプリケーション例

## まとめ

## ホーム

4200-SCS型の持つ多彩な測定機能と対話型の内蔵ソフトウェアにより、4225-PMU型はさまざまなアプリケーションに幅広く対応できます。例えば、デバイスの一般的なパルスI-V測定、化合物半導体の試験、CMOSデバイスの特性評価、不揮発性メモリデバイス（フラッシュ、PCRAMなど）の検証、ナノテクノロジーやMEMSの測定、ACストレスおよび信頼性試験、有機TFTディスプレイや太陽電池の試験などです。

### デバイスの汎用パルスI-V試験

DC信号ではなく、短いパルスあるいはデューティサイクルの小さいパルス（または、その両方）を用いてデバイスの自己発熱を予防するなど、さまざまな目的で幅広いデバイスを対象としたパルスI-V試験を実行できます。パルスI-V信号を適用するもう一つの一般的な理由に、トラップされた

電荷が特性評価中のデバイス性能に与える影響を最小化することがあります。4225-PMU型モジュールでは、トランジスタ、ダイオード、抵抗、コンデンサなど多くのデバイスのパルスI-V測定が可能です。モジュールは1つあたり2チャンネルを搭載しているため、端子の1つをコモンに接続できるならば3端子デバイスの試験にモジュールを1つしか必要としません。図4に2チャンネルの4225-PMU型をMOSFETに接続した状態を示します。この

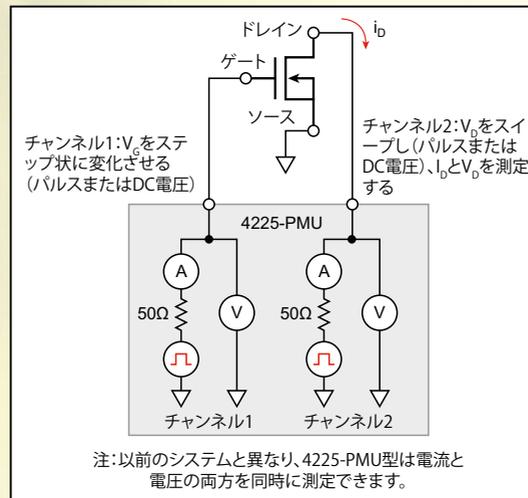


図4. 4225-PMU型のMOSFETへの接続

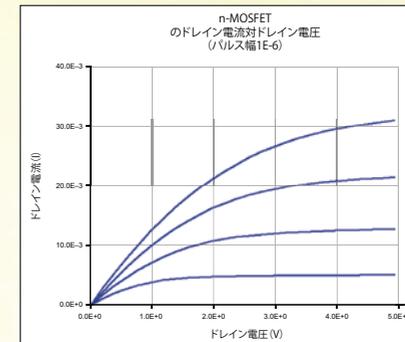


図5. nチャンネルMOSFETのパルスI-Vカーブ

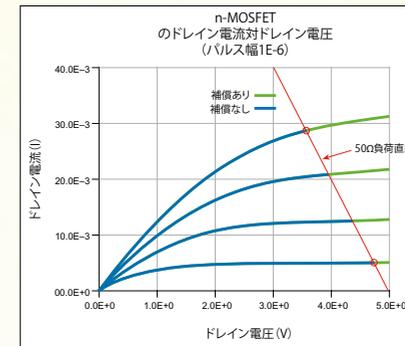


図6. LLECあり/なしで得られたカーブ

図5の結果には、パルス源の出力インピーダンス50Ωの両端に生じる電圧降下、および被測定デバイスとの接続部分や配線抵抗によって生じる電圧降下を数学的なアルゴリズムによって補償するLLEC (Load Line Effect Compensation、負荷直線効果補償) 機能が適用されています。LLECは大電流または低抵抗の測定時に特に重要になります。図6に、LLECあり(緑)およびなし(青)の結果を示します。グラフ内の50Ωの負荷直線に注目してください。LLECなしの場合は緑の部分の特性は得られません。

例ではチャンネル1をMOSFETのゲートに、チャンネル2をドレインに接続しています。チャンネル1は、ゲートにパルスまたはDCの電圧 ( $V_g$ ) をステップ状に印加し、チャンネル2ではパルスまたはDC電圧のいずれかによってドレイン電圧 ( $V_D$ ) をスイープすると同時に、ドレインに流れる電流 ( $I_D$ ) を測定します。このパルス測定によって得られた  $V_{DS}-I_D$  カーブを図5に示します。

図5の結果には、パルス源の出力インピーダンス50Ωの両端に生じる電圧降下、および被測定デバイスとの接続部分や配線抵抗によって生じる電圧降下を数学的なアルゴリズムによって補償するLLEC (Load Line Effect Compensation、負荷直線効果補償) 機能が適用されています。LLECは大電流または低抵抗の測定時に特に重要になります。図6に、LLECあり(緑)およびなし(青)の結果を示します。グラフ内の50Ωの負荷直線に注目してください。LLECなしの場合は緑の部分の特性は得られません。

# 超速I-Vのアプリケーション例

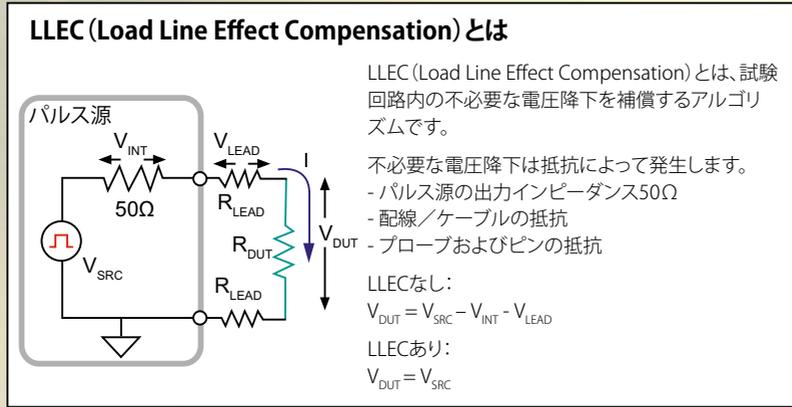


超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム



より正確な測定を行うためのLLEC機能に加えて、接続補償機能は、ケーブル、アダプタ、プローブのピン-パッド間抵抗などに起因する電圧降下を相殺してゼロにします。初期設定中に1回だけ実行される接続補償の手順では、カードからデバイスとの相互接続に至る全経路の電圧降下を測定し、ユーザが測定性能を最適化できるようにします。

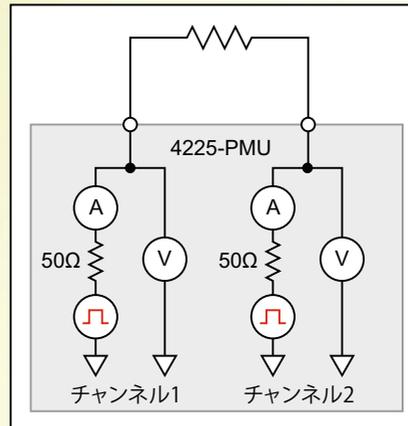


図7. 4225-PMU型への抵抗の接続

4225-PMU型は3端子デバイスのほかに、2端子または3端子のデバイス(4225-PMU型1台)または最大8端子のデバイス(4225-PMU型4台)を測定できます。

図7に示した抵抗は、PMUに接続した2端子のデバイスの例です。2端子のデバイスは、PMUのいずれか1チャンネルまたは2チャンネル両方を使って測定できます。1チャンネルしか使わない場合は、デバイスの一方の端をチャンネル1の出力端子に、もう一方の端をPMUの共通端子、すなわち同軸ケーブルの外部導体に接続します。図8は1MΩの抵抗にパルス状のI-Vスイープを印加した場合です。測定された高速電流がマイクロアンペアの範囲にあることに注意してください。

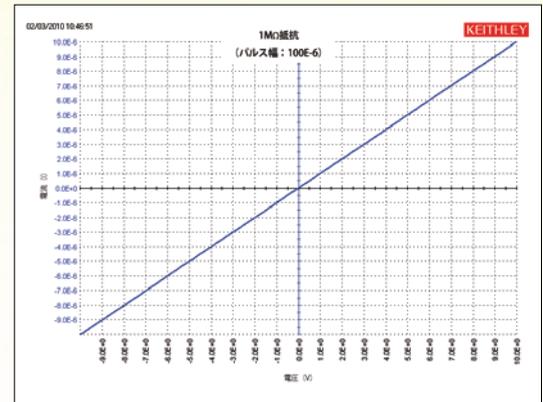


図8. 1MΩ抵抗のパルスI-Vカーブ

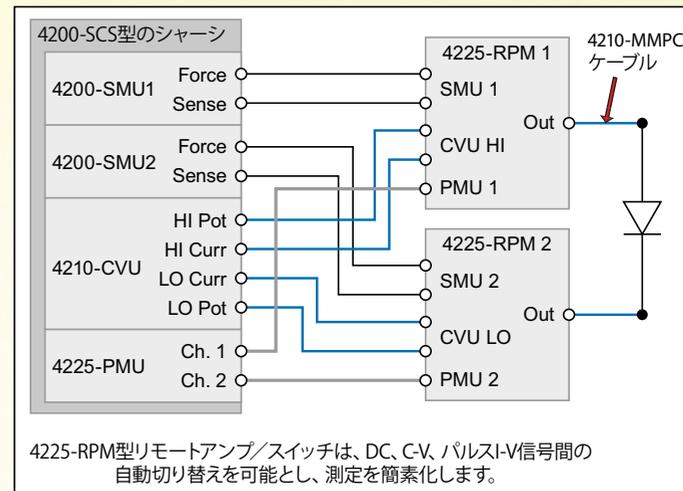
# 超速I-Vのアプリケーション例



PMUは、1Ω未満から1GΩを超える値まで、広範囲の抵抗に対するパルスI-V測定に使用できます。オプションの4225-RPM型リモートアンプ/スイッチを使えば、1GΩを超える抵抗も測定できます。PMUに内蔵されたオートレンジ設定機能は、センサ出力の測定など、外部要因の関数として変化する可能性がある抵抗の特性を評価する場合に非常に有効です。

デバイスによっては、パルスI-V、DC I-V、C-V試験など、複数の種類の電気測定が必要になるものがあります。通常このような測定には、被測定デバイスへの各種信号を切り替える機能を持った外部のスイッチマトリクスが必要です。しかし、オプションの4225-RPM型リモートプリアンプ/スイッチは、DC I-V、C-V、パルスI-Vの測定を自動的に切り換えることができます。これによって、デバイスへの接続が大幅に簡素化されます。図9に、4225-RPM型によって、ダイオードのDC I-V、C-V、パルスI-V測定に必要なケーブル配線の量をどの程度減らせるかを示します。ユーザは、試験ごとにケーブルの再配線をせずにデバイスに対するすべての電気測定を実行できるため、結果として貴重な試験時間が節約され、作業の負担も軽減されます。オプションのマルチ測定高性能ケーブルキット(4210-MMPC)は、4200-SCS型をプロセッサに接続します。このキットは、再配線を不要とするだけでなく、不適切なケーブル接続によって発生することが多い測定誤差を排除することで、信号の忠実度が最大化されます。

4225-RPM型はプリアンプとしても機能するため、PMUの低電流側レンジが拡張されます。この機能は、I-V特性の電流範囲が数デケードに及ぶダイオードのようなデバイスで特に重要になります。4225-RPM型リモートアンプ/スイッチを介した、ダイオードのパルスI-V測定結果を図10に示します。独自のオートレンジ機能により、パルスI-Vのスweep中に自動的にレンジが選択されています。この機能により、従来のように固定されたレンジを選択しなければならないという制約による測定分解能の劣化のおそれなくなります。



4225-RPM型リモートアンプ/スイッチは、DC、C-V、パルスI-V信号間の自動切り替えを可能とし、測定を簡素化します。

図9. 4225-RPM型リモートプリアンプ/スイッチによるDC I-V、C-V、パルスI-V間の自動切り換え

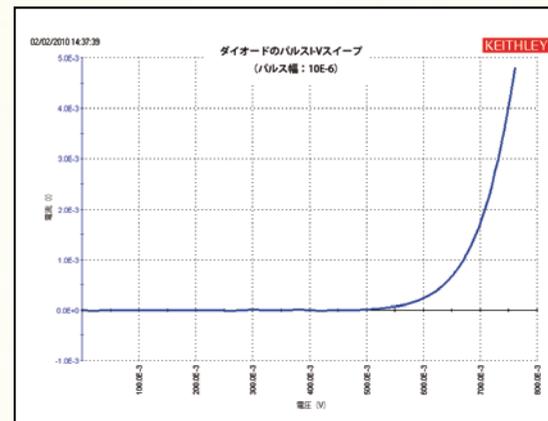


図10. 4225-RPM型を用いて測定したダイオードのパルスI-V特性

超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム



# 超速I-Vのアプリケーション例

## CMOSデバイスの特性評価

High- $\kappa$  デバイスやシリコンオンインシュレータ (SOI) などの先端CMOS技術をはじめとするCMOSデバイスの特性評価では、高速の印加および測定機能がますますその重要性を増しています。MOSFETの結果を例として、これまで説明してきた一般的なパルスI-VおよびトランジエントI-V測定に加えて、CMOSデバイスに対して広く適用されるアプリケーションに、チャージポンプ、電荷トラップ、自己発熱の試験、トランジエントI-V試験、負バイアス温度不安定性 (NBTI) や信頼性の試験などがあります。

### チャージポンプ

チャージポンプ (CP) は、MOS構造の半導体-誘電体界面を分析するとき用いられる、よく知られた測定技術です。界面トラップ密度や平均捕獲断面積などの、デバイスの品質や劣化に関する重要なパラメータを、チャージポンプ電流 ( $I_{CP}$ ) から求めることができます。さまざまなチャージポンプ手法の基本となるのが、ゲートへのパルス電圧印加と同時にDC基板電流を測定する方法です。したがって、パルスジェネレータと非常に高感度の電流計が必要になります。これらの測定には4200-SCS型が最適です。4220-PGU型または4225-PMU型をパルス源に、プリアンプ付きの4200-SMU型を測定系として構成できるからです。またシステム内蔵のソフトウェア (KTEI 8.0) は、一般的なチャージポンプ法の多くに対応しています。

図11は、4200-SCS型を用いたチャージポンプ測定系を示したものです。基本的には、MOSFETのゲートをパルスジェネレータに接続し、トランジスタの蓄積状態と反転状態を繰り返し切り替えます。ゲートにパルスを印加すると、その立上りおよび立下りエッジで多数/少数キャリアの再結合過程が発生します。これにより通常のドレインからソースへの電流とは逆方向の微弱な電流が生じます。このようにして発生した電流、いわゆるチャージポンプ電流 ( $I_{CP}$ ) を4200-SMU型によって測定します。その際、4200-SMU型のプリアンプを基板、つまりMOSFETのバルク端子に接続します。

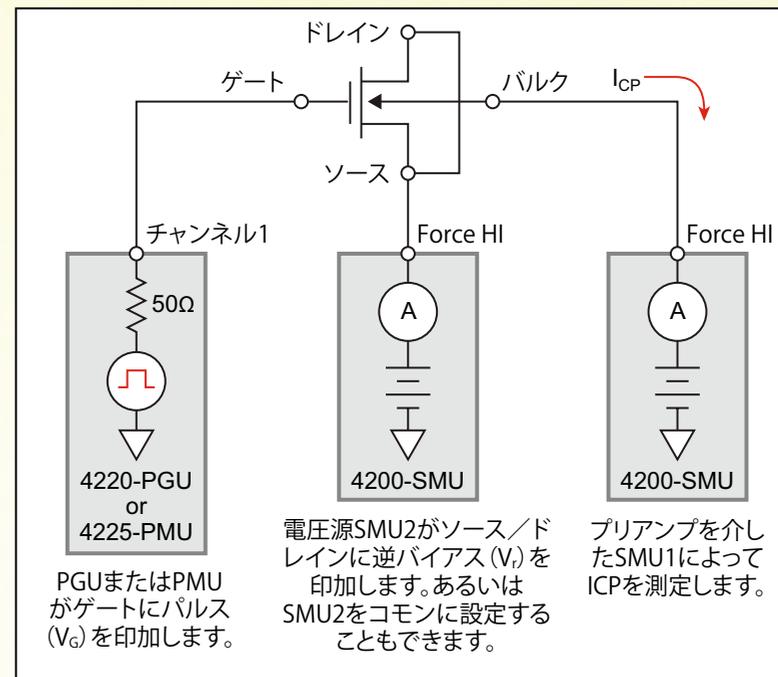


図11. チャージポンプ測定用に構成した4200-SCS型

超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

# 超速I-Vのアプリケーション例



## チャージポンプ

4200-SCS型には、振幅固定の電圧ベーススイープやベース固定の可変振幅スイープ試験など、一般的なチャージポンプ法を実行する試験が多数含まれたプロジェクトが附属しています。これら2種類の試験のパルス波形と、対応するチャージポンプのカーブを図12に示します。振幅固定の電圧ベーススイープ試験の結果を図13に示します。これらの測定は、複数の試験周波数で行われました。

4200-SCS型によるチャージポンプ測定の詳細は、ケースレーのアプリケーションノート#3066『Performing Charge Pumping Measurements with the Model 4200-SCS Semiconductor Characterization System』を参照してください。

超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

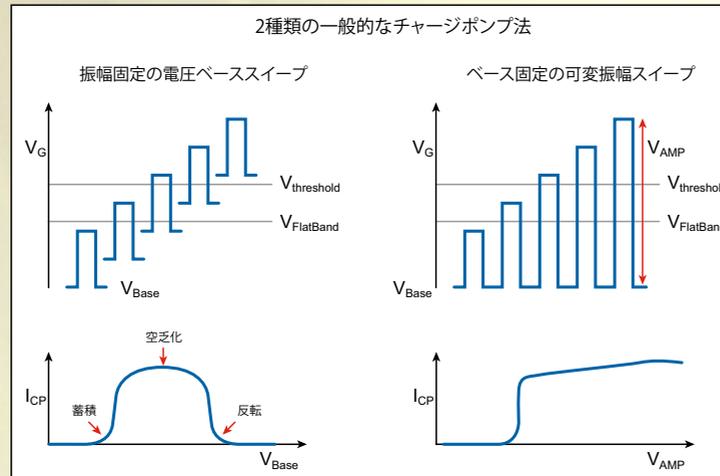


図12. 2種類の一般的なチャージポンプ法で使用するパルス波形と対応するチャージポンプのカーブ

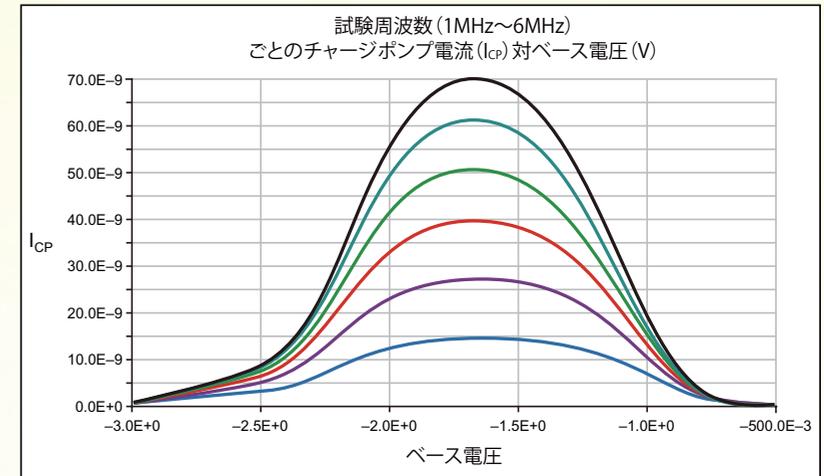


図13. 複数の試験周波数によるチャージポンプ電流の測定結果

# 超速I-Vのアプリケーション例



## 超速I-Vの概要

## 超速I-Vのアプリケーション例

## まとめ

## ホーム

### 自己発熱の影響

MOSFETに対するパルスI-V試験に加えて、トランジェントI-V測定ではデバイスの特性を時間ドメインで評価できます。波形キャプチャモードとも呼ばれるトランジェントI-V測定によって得られた測定結果の例を図14に示します。このカーブでは、ドレインおよびゲートの電圧を一定にしてドレイン電流を時間の関数として測定しています。ドレイン電流に対する発熱の影響に注目してください。

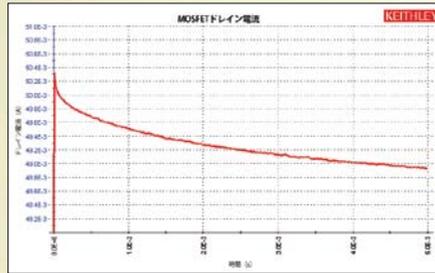


図14. MOSFETドレイン電流の波形キャプチャ

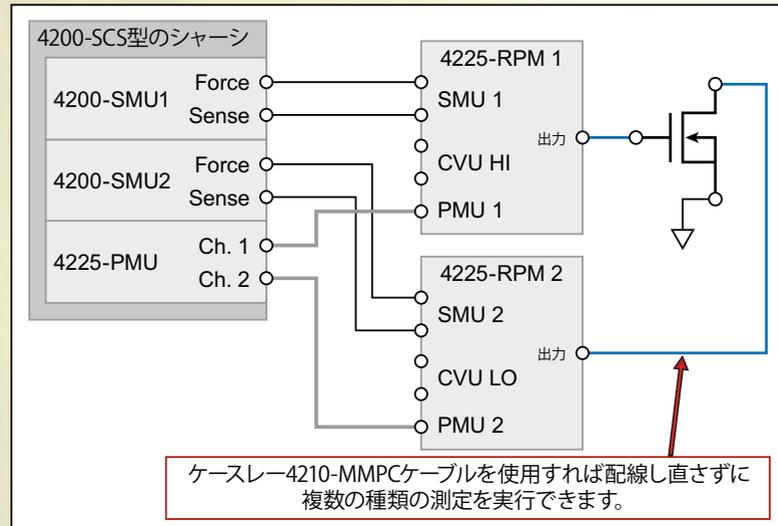


図15. MOSFETにPMUとSMUの両方を接続した試験回路

自己発熱は、DC I-V法またはパルスI-V法のいずれかによって試験できます。ただし、トランジスタの自己発熱および帯電の影響によってパルスI-VとDC I-Vの測定結果はかなり異なった様子を示します。オプションの4225-RPM型リモートアンプ/スイッチモジュールを使えば、4225-PMU型（パルスI-V）または4200-SMU型（DC I-V）を切り替えながら被測定デバイスを測定できます。図15は、MOSFETにPMUとSMUの両方を接続した試験回路です。

図16に、MOSFETのパルスI-V（破線）測定およびDC I-V（実線）測定によって得られたカーブを共に示します。DC測定はゲートおよびドレインの電圧レベルが高い領域で発熱の影響が認められることに注意してください。パルスI-Vのカーブは、離散的な電圧パルスによって測定された電流値からなることを忘れてはなりません。これらパルスごとの電流測定値は、精度を高めるためにユーザが定義するパルス数にわたる平均値とすることができます。

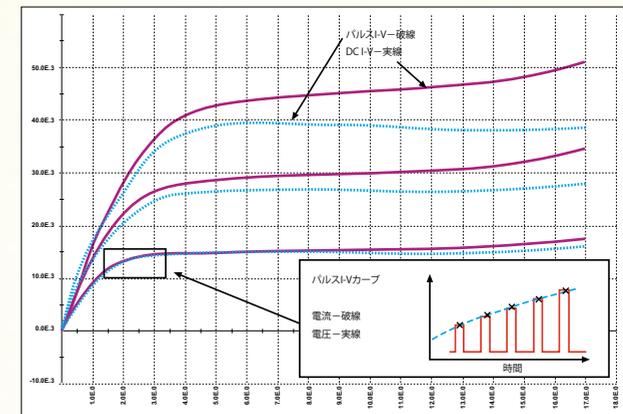


図16. パルスI-VとDC I-V試験の両方で示したMOSFETの自己発熱の影響



# 超速I-Vのアプリケーション例

## 電荷トラップ

近年、高誘電率 (High- $\kappa$ ) 材料は、ゲート誘電体として従来の $\text{SiO}_2$ を置き換えるアプリケーションが大いに注目されています。High- $\kappa$  材料を使ったトランジスタに伴う信頼性の課題の1つに電荷トラップがあります。DC I-V、C-V、パルスI-V測定を使ってこのトラップされた電荷を観測する手法がいくつか開発されています。パルスI-V法の1つに、低速単一パルス電荷トラップ法があります。この方法はHigh- $\kappa$  ゲート構造への電荷のトラップ、デトラップ現象を観測するときに使われます。

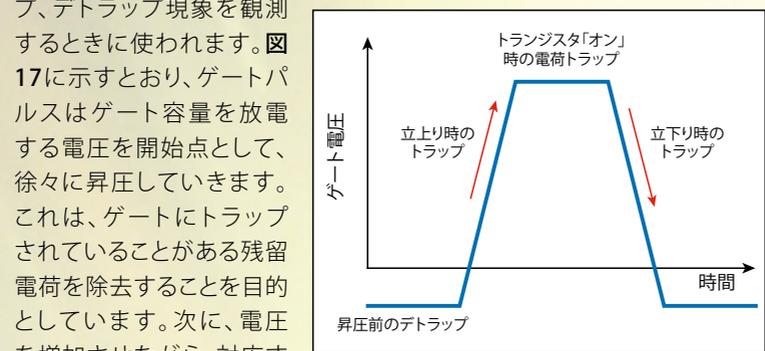


図17. 単一ゲート電圧パルスによるトラップとデトラップ

図17に示すとおり、ゲートパルスはゲート容量を放電する電圧を開始点として、徐々に昇圧していきます。これは、ゲートにトラップされていることがある残留電荷を除去することを目的としています。次に、電圧を増加させながら、対応するドレイン電流の応答を測定します。ゲート電圧パルス全体を通じてドレイン電流を測定すれば、パルスの立上り時と立下り時の $V_{GS}$ - $I_D$ カーブが得られます。

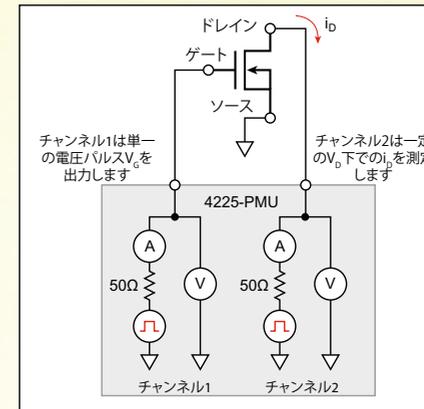


図18. 4225-PMU型による単一パルス電荷トラップの測定回路

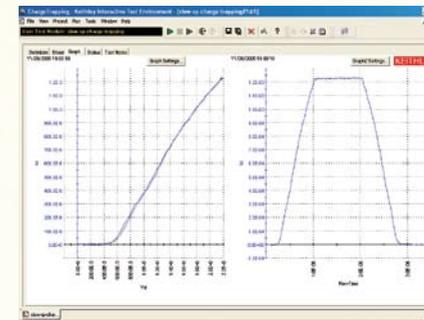


図19. 単一電圧パルス法で得られたドレイン電流対ゲート電圧のカーブ

この単一パルス電荷トラップ法は、4225-PMU型1台をそのシステムソフトウェアKTEI 8.0によって制御することで実行できます。図18に単一パルス電荷トラップの測定回路を示します。チャンネル1は単一のゲート電圧パルスを出力し、チャンネル2は一定のドレイン電圧を出力しながらドレイン電流を測定します。

この試験によって得られた測定結果が図19です。左側のグラフは単一パルスを印加したときのドレイン電流対ゲート電圧の測定結果です。右側のグラフは、ドレイン電流の測定値を時間の関数として示しています。パルス幅が大きくなるに従い、トラップされる電荷量も増加するため、立上り時間と立下り時間のデータに大きな差が生じます。

超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

# 超速I-Vのアプリケーション例

## NBTIやPBTIの特性評価、モデル化、モニタリング

スケールが進んだシリコンCMOSトランジスタを設計する開発者にとって、NBTIの特性評価、モデル化、および制御は常に課題です。NBTIの影響により、時間の経過とともにトランジスタのしきい値電圧 ( $V_T$ ) が変化し、電圧がしきい値より低い場合のドレイン電流が大幅に増加します。これらの要因はトランジスタの寿命と回路の性能に直接影響する著しい制約になります。したがって、トランジスタを高速の論理回路で使用するには、実際に使用されるときにデバイスが曝されるのと同等の条件下で、この影響を正確にモデル化する必要があります。また、NBTIとPBTI (nMOSトランジスタに影響します) はプロセスおよび材料に依存します。したがってプロセスインテグレーションおよび生産時には、正負バイアスのいずれであれ、BTIを監視する必要があります。

BTI特性評価では、トランジスタへのストレス印加と測定を交互に実行します。ストレス印加の段階では、トランジスタのゲートにDCまたはACストレス

を加え、残りの端子は接地します。測定の段階では、ゲートとドレインに電圧を印加しながら、ドレイン電流を測定します。一見簡単そうに見えますが、BTIのメカニズムには緩和効果の影響を受けやすいという特徴があります。これは、ストレスが取り除かれた瞬間からトランジスタが回復を始め、劣化の度合いが薄れることを意味します。このような緩和が発生する前に劣化の特性を評価することが不可欠であることから、超速のI-V測定手法が必要になります。

4200-SCS型用の4200-BTI-A型 超速BTIパッケージは、超速BTI試験のための、スピードと感度を最適なバランスで組み合わせたシステムを提供します。このパッケージには4225-PMU型が1台、4225-RPM型が2台、そしてACS 4.2ソフトウェアが含まれます。図20にこのパッケージをケースレーMMPCケーブルと組み合わせた例を示します。このシステムによってユーザはケーブルの配線をやり直さずに複数の種類の測定を実行できます。

超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

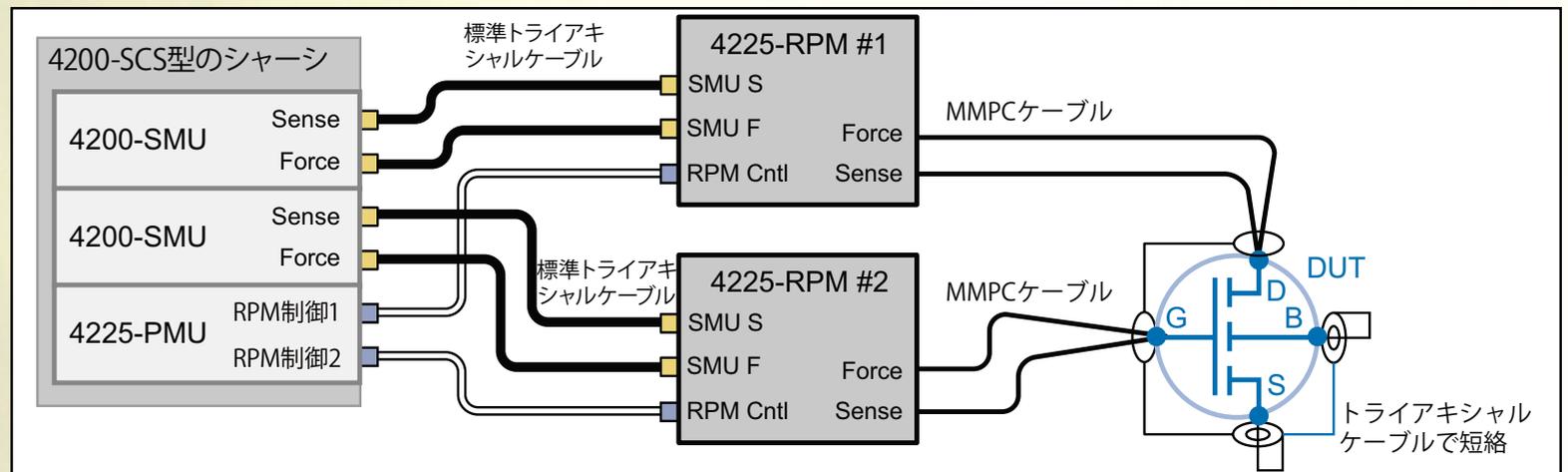


図20. 4200-SCS型用の4200-BTI-A型パッケージには、nMOSおよびpMOSデバイスの特性評価に必要な測定ユニットとソフトウェアが含まれます



# 超速I-Vのアプリケーション例

## NBTIやPBTIの特性評価、モデル化、モニタリング

バイアス温度不安定性は、正確に特性を評価するうえで高感度かつ高速な測定が必要な、きわめて動的な現象であることが裏付けられています。測定物理は、他の要因がすべて一定である場合の測定速度と感度の関係を概ね定義しています。このことから、サブミリ秒の測定領域ではすべてのノイズ源を考慮することが不可欠であり、サブマイクロ秒の測定領域では量子効果を見逃すことができません。4200-BTI-A型は、BTI試験アプリケーションをできるだけ使いやすくしつつ、測定物理の限界に近づけるようにきめ細かな設計がなされています。

BTI試験中にホットキャリア注入効果や不要な電荷移動が発生しないように、ドレインからソースへの電界を最小限にすることが重要です。BTI特性評価では、いずれの手法もドレインに電圧をかけながらドレイン電流を測定します。ドレイン電流はドレイン-ソース間電界に比例するため、ドレイン電流をより高感度で測定しようとする、必要なドレイン電圧は低下します。4200-BTI-A型パッケージの優れた低電流測定能力によって、より低いドレイン電圧を使用でき、よりすぐれた結果が得られます。

ハードウェア構成による低電流および高速の測定能力に加えて、ACSソフトウェアでは図21に示すストレスと測定の波形など、特定のBTI試験を設定できます。

超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

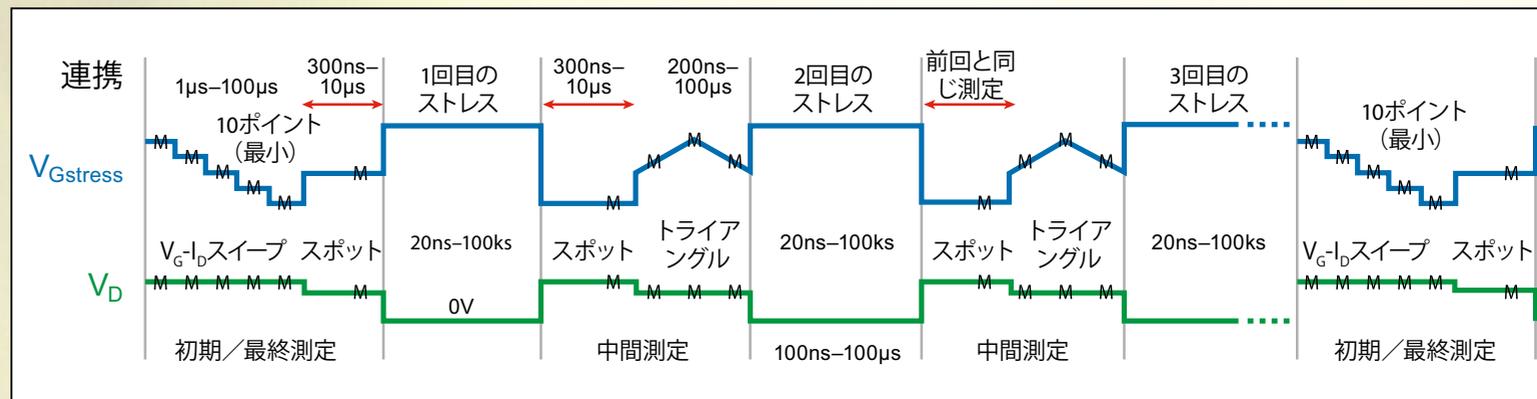


図21. ACSソフトウェアで得られる代表的なストレス/測定波形

# 超速I-Vのアプリケーション例



## 超速I-Vの概要

## 超速I-Vのアプリケーション例

## まとめ

## ホーム

### 不揮発性メモリデバイスの試験

4225-PMU型は、研究開発またはプロセス検証などで分離されたメモリセルの試験が必要な場合に、単一メモリセルまたは小さなセルアレイを測定するのに最適のユニットです。4225-PMU型はパルス印加と測定の両方を使用できるため、総試験時間が短縮されます。4200-SCS型は、不揮発性メモリデバイスの寿命および信頼性試験に役立つ、ストレス/測定のループ機能を内蔵しています。ソフトウェアには、フラッシュおよび相変化メモリ (PCRAM) デバイスの両方を試験するために作成されたプロジェクトが付属しています。

#### フラッシュメモリ

フラッシュメモリセルは、制御ゲート (CG) と浮遊ゲート (FG) の2つのゲートを持つこと以外、基本的構造は通常MOSFETと同じです。制御ゲートによって浮遊ゲートの読み出し、書き込み、消去を行います。浮遊ゲートには、そのメモリに格納されるデータに相当する電荷が蓄積されます。浮遊ゲートへの電荷の出し入れには電圧パルスが使われます。浮遊ゲートに電荷が存在すると、しきい値電圧 ( $V_T$ ) が高い側に変化します。パルスジェネレータによって、セルの書き込みおよび消去のためのパルスを出力し、書き込みと消去の完了後、SMUによってDCしきい値電圧を測定します。図22は、4200-SCS型を用いたフラッシュメモリ試験システムの基本回路図です。この回路では、セルの各端子がSMUとパルスジェネレータ (4225-PMU型または4220-PGU型) の両方に接続されています。

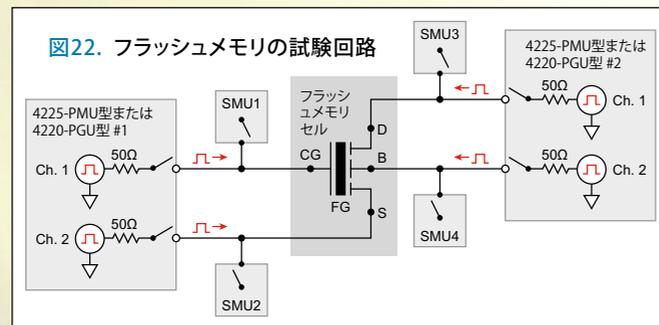


図22. フラッシュメモリの試験回路

4200-SCS型には、フラッシュメモリでもっとも重要とされる、特性評価、ディスターブ試験、書き込み耐性試験の3つを実行するためのソフトウェアが付属しています。4225-PMU型または4220-PGU型によってデバイスの書き込みと消去を行い、4200-SMU型によって $V_T$ を測定します。ソフトウェアが自動的にSMUおよびパルスジェネレータの出力リレーを開閉します。このためバイアステーや外部のスイッチマトリクスは不要です。ソフトウェアは、書き込み-消去-測定プロセスの繰り返し実行も制御します。書き込みサイクル20回ごとのしきい値電圧の測定結果を図23に示します。サイクルごとに、グラフには新しく得られたカーブが加わり、データがExcel風の個別のスプレッドシートとしてノートブックに追加されます。このノートブックは.xlsまたは.csvファイルとして保存できます。

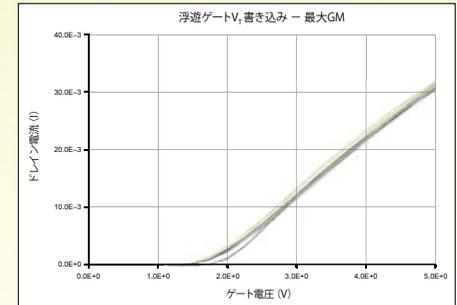


図23. 書き込みモードにおける浮遊ゲート $V_T$ のサイクル試験の測定結果

消去状態および書き込み状態での $V_T$ カーブの差異を図24に示します。

複数のデバイスを試験する場合、またはディスターブ試験に使用する隣接セルを測定する場合、7174A型8×12マトリクスカードを搭載した707A型または708A型スイッチマトリクスを使用できます。ソフトウェアには、これらの試験でスイッチマトリクスを使用するためのドライバが付属しています。

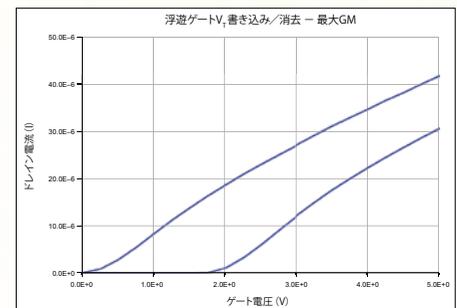


図24. 消去および書き込み状態のしきい値電圧測定値



# 超速I-Vのアプリケーション例

## 相変化ランダムアクセスメモリ (PRAMまたはPCRAM)

相変化メモリは、可逆的に変化するセルの抵抗の状態を利用した不揮発性メモリデバイスの一種です。セルに電圧パルスを加えることで、その状態が整列構造（結晶相）と非整列構造（アモルファス相）の間で切り替わります。この相変化を使って格納されたデータは、セルの抵抗変化の形で測定できます。セルはパルス状の電圧によって「セット」および「リセット」されます。

従来のPCRAM試験回路は、2チャンネルのデジタルスコープ、パルスジェネレータ、負荷抵抗、バイアステー、DCユニットから構成されていました。4225-PMU型は、1台でこれらのシステムを置き換えることができます。4225-PMU型がセルをセット/リセットする電圧パルスを出力し、同時にDC電流、電圧、抵抗を測定します。図25からも、4225-PMU型1台とPCRAMデバイスの接続が簡単に簡単であるかがわかります。チャンネル1が電圧パルスを出力し、その結果流れる電流をチャンネル2で測定します。

表1にPCRAMデバイスに対して実行する基本的な試験の一部を示します。測定器は、セルを既知の状態にしてからリセット、DC電流を測定して抵抗を計算、セルをセットという手順を実行できなければなりません。試験を簡単に実施できるようにするため、4200-SCS型には、表1に示したさまざまな試験モードを実行するソフトウェアと試験プロジェクトが付属しています。

図26は、リセット/セット試験の代表的な電圧出力と測定結果です。ユーザは、システムに付属する対話型ソフトウェアによって簡単に電圧波形を定義できます。このソフトウェアは4225-PMU型のセグメントARB機能を使用します。

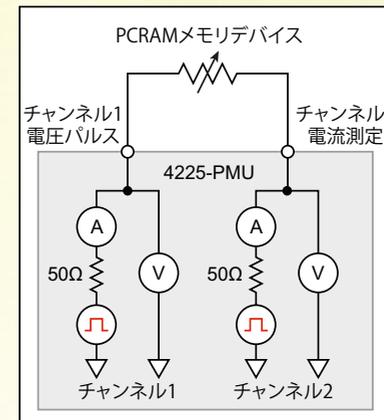


図25. 4225-PMU型へのPCRAMセルの接続

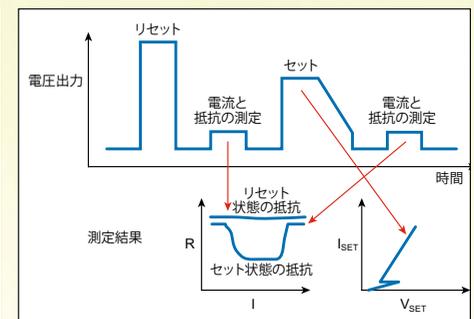


図26. PCRAM試験の代表的な電圧出力と測定結果

試験モード	内容
初期状態	デバイスを既知の状態に設定するために、ユーザが定義した数だけパルスを出力します。
リセット	ユーザが定義する（振幅、パルス幅、立上り/立下り時間など）パルスを出力し、電流、電圧、抵抗の波形を取得します。
電流および抵抗の測定	リセットおよびセットモードの後に実行する試験です。電流、電圧、抵抗の波形を取得します。電流および抵抗の両方について「スポット平均」の値を計算します。
セット	ユーザが定義する（振幅、パルス幅、立上り/立下り時間など）パルスを出力し、電流、電圧、抵抗の波形を取得します。

表1. PCRAMの試験モードとその内容

超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

# 超速I-Vのアプリケーション例

## 化合物半導体デバイスおよび材料

GaN、GaAsなどのIII-V族材料や、その他の化合物半導体材料から作られたデバイスの特性評価では、パルスI-V試験が行われることが少なくありません。バンドギャップが大きいこれらのデバイスは、しばしば大電力デバイスや高周波デバイスに用いられます。パルスI-V測定は、電気的特性を評価する際の特性の変動を制御または観測することができます。通常の使用時に実際のデバイスが置かれる状況を再現するために、より高い周波数によるデバイスの試験が必要になる場合もあります。4225-PMU型は、非ゼロ値から測定を開始できるように、パルスにオフセット電圧を設定できます。この機能は、アンプの利得またはデバイスの線形性の評価に使用できます。特性評価にパルスI-V測定が必要になる場合が多い代表的な化合物半導体デバイスは、レーザダイオードとパワーMOSFETの2つです。

### レーザダイオード

発熱の影響を管理下に置くために、レーザダイオードの特性は多くの場合パルスI-V手法によって評価されます。レーザダイオードの出力モニタとしてフォトダイオードが内蔵されている場合があります。そのような場合、2チャンネルの4225-PMU型は、一方のチャンネルでパルス電圧をスイープしながらレーザダイオードの電流を測定し、同時に他方のチャンネル

でフォトダイオードの電流を測定できます。このような測定のための回路図を図27に示します。電流印加の動作により近づけるために、必要に応じてレーザダイオードと直列に負荷抵抗を追加することもできます。

### 熱インピーダンス測定

パワーMOSFETやその他の半導体デバイスでは、接合温度が動作パラメータや寿命に影響を及ぼすことがあるため、熱性能の評価が重要です。過渡熱インピーダンス測定では、パルス電力を印加したときのデバイスの振る舞いを観測します。アプリケーションに応じて、単独パルス、繰り返しパルス列、幅が次第に大きくなるパルス列などを印加します。過渡熱インピーダンスは、パルス電力、パルス期間、デューティサイクルから求めます。多くの場合、インピーダンスはパルス期間の関数としてプロットされま

す。4225-PMU型は、電流と電圧の同時測定、パルス幅の関数としてのパルス電圧スイープ、フォーミュレータと呼ばれる内蔵計算ツールによる電力とインピーダンスの計算などの機能を持ち、熱インピーダンス測定に最適です。

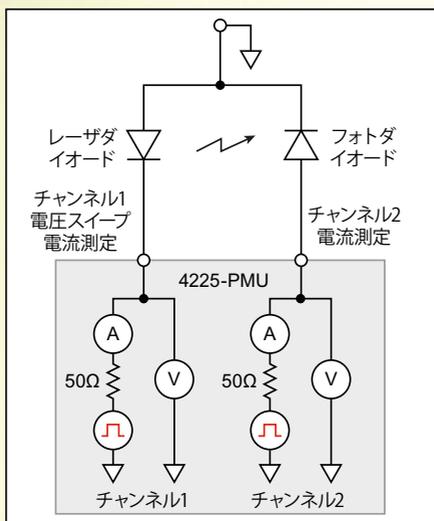


図27. レーザダイオードの試験構成

超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

# 超速I-Vのアプリケーション例



超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

## ナノテクノロジーとMEMSデバイス

高速I-V試験は、カーボンナノチューブ (CNT)、半導体ナノワイヤ、グラフェン系材料のデバイス、分子系材料の電子部品、スイッチなどのMEMS構造といった、さまざまなデバイスに適用できます。これらの繊細なナノエレクトロニクス部品および材料の電気的特性評価には、低電力測定に最適化されたユニットと測定手法が必要です。低温材料、ナノデバイス、サブミクロンのシリコン構造は、従来のDC測定によって発生する熱で簡単に変成または破壊されてしまいます。パルスによる電気試験はデバイスで消費される総エネルギーを低減するため、損傷の可能性も低くなります。パルスI-V測定は、従来のDC測定で発生する可能性があった測定中の電流ドリフトも予防できます。CNT FETを用いたセンサの試験では、ゲートへのパルス印加によって、センサのより高速なリフレッシュが可能になります。

パルスI-V測定を実行するには、質のよい測定値を得るために十分高い電圧のパルスにより、被測定ナノデバイスをごく短い時間間隔で励起します。このパルスの幅は、デバイスのインピーダンスや容量またはアプリケーションに応じて、数十ナノ秒から数ミリ秒に及びます。実際のパルスI-Vスイープを開始する前に、波形キャプチャモードによって適切なパルス幅であるかどうかを検証できます。

カーボンナノチューブを使ったFETに対するパルスI-V測定の構成を図28に示します。この図ではチャンネル1をCNT FETのドレインに、チャンネル2をゲートに接続しています。CNTのソース端子はPMUのコモン端子、すなわち同軸ケーブルの外部導体に接続します。3端子すべての間で測定する必要がある場合は、システムに4225-PMU型をもう1台追加する必要があります。

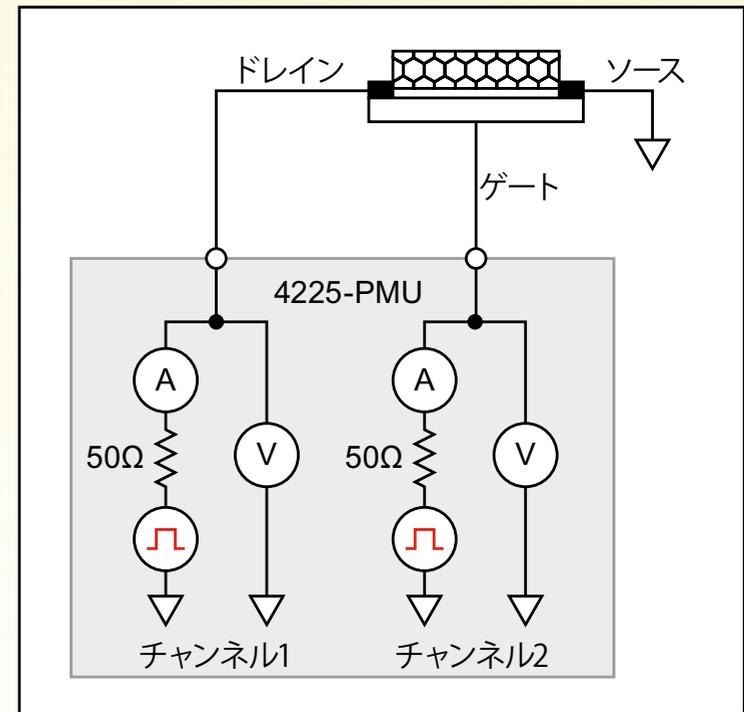


図28. CNT FETのパルスI-V特性測定回路

# 超速I-Vのアプリケーション例

## 太陽電池

太陽光を直接電気に変換する太陽電池は代替エネルギー源としてますます需要が高まっています。出力や効率など太陽電池の性能を評価するために、さまざまな電気測定が行われます。各種の重要なパラメータは、電池出力電流、最大出力電力、変換効率、抵抗、ドーピング濃度などのDC I-VおよびC-V測定から得られます。

4225-PMU型により、太陽電池のパルスI-V測定も可能になります(図29)。太陽電池の変換効率は電圧の印加時間の影響を受けるので、パルスI-V測定を実施することによりバイアス時間を短縮できます。パルス電圧の印加に加えて、PMUは電流をシンクできるため太陽電池の電流出力も測定できます。太陽電池は容量的な性質をかなり強く持つため、パルスI-Vスイープでは十分に長いパルス幅を確保することが重要です。パルスI-Vスイープを開始する前に、波形キャプチャモードによって適切なパルス幅であるかどうかを検証してください。シリコン太陽電池に対するパルスI-Vスイープの測定結果を図30に示します。電流がグラフの第4象限にあることに注意してください。これは、PMUが電流をシンクしている、つまり電流が太陽電池からPMUへと流れ込んでいることを意味します。

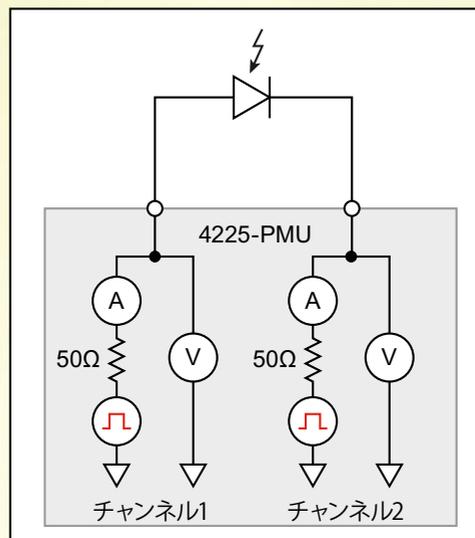


図29. 4225-PMU型への太陽電池の接続

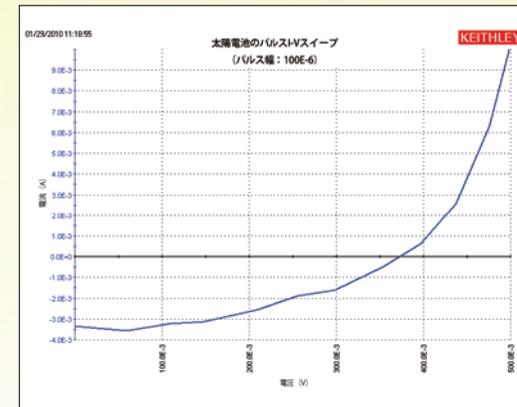


図30. シリコン太陽電池のパルスI-Vカーブ

太陽電池に対する電気測定の詳細は、ケースレーのアプリケーションノート#3026『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』を参照してください。

### その他の試験

4225-PMU型の広いダイナミックレンジと高い感度は、有機TFTディスプレイ、高速TDD、1/fノイズ、ランダムテレグラフ信号(RTS)など、これまで説明してきた以外のアプリケーションにも最適のソリューションを提供します。

超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

## まとめ

4225-PMU型 超速I-Vモジュールは、高速性、広い電流測定範囲、波形キャプチャモード、セグメントARB機能、ポイント&クリックによる対話型ソフトウェア制御、具体的な試験に対応した内蔵プロジェクト、本書で説明したその他多数の機能により、多様なアプリケーションに適用できます。例えば、MOSFETデバイスの特性評価、デバイスの汎用パルスI-V試験、チャージポンプや電荷トラップなどのCMOS特性評価、不揮発性メモリや化合物半導体デバイスの試験、ナノデバイスの測定、太陽電池の評価、その他多くの用途が考えられます。

4225-PMU型は、4200-SCS型半導体特性評価システムで使用可能な、数あるモジュールの1つにすぎません。アプリケーションの要件に応じて、高精度DC SMU、DCプリアンプ、マルチ周波数C-Vメータ、パルスジェネレータなどからシステムを構成できる4200-SCS型は、1台であらゆる機能を実現できる総合的な特性評価ツールです。



超速I-Vの概要

超速I-Vのアプリケーション例

まとめ

ホーム

### 問い合わせ先:

電話、ファックス、Eメール、郵便でお問い合わせください。

ケースレーインスツルメンツ株式会社

電話: 03-5733-7555

FAX: 03-5733-7556

Eメール: [info.jp@keithley.com](mailto:info.jp@keithley.com)

〒105-0022 東京都港区海岸1-11-1 ニューピア竹芝ノースタワー13F

URL: [www.keithley.jp](http://www.keithley.jp)