

A GREATER MEASURE OF CONFIDENCE

KEITHLEY

ナノテク電気測定 の 精度を上げる

はじめに 2 | ナノテクノロジー試験の挑戦 2 | 電気測定での注意事項 5 | 電気ノイズ 6 | ソースメジャー計測器 7
パルス法 8 | 自己発熱の予防 9 | アプリケーション: グラフェン 10 | まとめ 12 | 用語集 13 | 選定ガイド 16 | さらに詳しくは 17

ナノテクノロジー試験の挑戦

はじめに

ナノテクノロジーは様々な面で私たちの生活の質を向上させる可能性を秘めています。その例をあげれば、エレクトロニクス の速度向上、PC のメモリ/ストレージ容量拡大、エネルギー変換効率による安価なエネルギー、ナノスケールでのバイオ・化学検知システムによるセキュリティの向上、など、枚挙にいとまがありません。

ナノエレクトロニクス材料を活用するには、感度の良い電気測定ツールが不可欠です。新しい電気材料の特性を完全に理解し、新しいナノエレクトロニクスデバイスやコンポーネントの電気的性能を理解するために必要なデータを与えてくれるのがこれらのツールです。しかし、多くのナノスケール材料では、例えば導電率などの特性が大幅に改善されているため、測定する電流ははるかに小さく、しかもこれまでよりもはるかに高い感度が要求されます。測定電流の大きさはフェムトアンペアのレンジまで下がり、マイクロオームレベルの小さな抵抗を測定しなければなりません。したがって、信号に干渉する可能性のあるノイズやその他のエラー発生源を可能な限り小さくする測定法と測定装置を用いる必要があります。

その性質上、ナノテク材料は従来にはない測定手法を必要とすることがあります。ナノテク材料は原子レベル、分子レベルで構成されるため、量子力学が関わります。粒径が非常

に小さいため、これらの新材料の中では原子と分子が他の巨視的材料とは異なる方法で結合している可能性があり、電子的な構造や結晶形状、物質としての挙動が従来とは異なっているかも知れません。このように新しい特性を持つナノ粒子は、それぞれを単独で利用することもあり、またはバルク材料の構成ブロックとして使用することもあります。バルクとしての特性を把握することも重要ですが、ナノスケール構造に特有な特性を発見することも測定に課せられた重要な役割です。

材料研究に使用される測定方法は、粒子のサイズと構造から大きな影響を受けます。粒子のサイズが小さくなり、ナノメートルレベルの大きさになると、材料の化学的、電気的特性が変化します。この挙動は生物材料についても当てはまります。したがって、これらの材料の大部分は、実用的な製品への応用を考える場合には、化学的および電気的な試験を必要とします。これらの材料の多くについて実際に測定される量は低レベルの電流または電圧ですが、これらは別な物理量から変換されたものです。¹ 多くの物質については、現在利用可能なプローブ付き装置やナノマニピュレータを利用して直接的に電気測定を行うことができます。

物質のサイズが小さくなりナノスコピックなレベルに達すると、材料の電子エネルギーバンドの中にある、バンドギャップおよび隣接するエネルギーレベル間の隔たりが変化しま

す。これらの変化は、粒子サイズが物質中の平均自由行程（散乱から次の散乱までに電子が移動できる平均距離）との比較の意味で微視的サイズまで小さくなるにつれて、ナノ粒子の電気抵抗に直接的な影響を及ぼします。より一般的には、物質のバンドギャップは、ある粒子が導体、絶縁体、または半導体であるかに直接的な影響を与えます。たとえば、カーボンナノチューブ (CNT) を使ってトランジスタスイッチを作ることができるのも、この電気的特性のおかげです。² トランジスタスイッチを作る 1 つの方法として、ドレインおよびソースとして機能する 2 つの電極の間を、半導体特性を持つ CNT で接続する方法が考えられます。その場合、カーボンナノチューブ チャンネルの全長にわたって下側に第 3 の電極 (ゲート) を配置します。半導体特性を持つ CNT の場合であれば、ゲート電圧 (絶縁されたゲートを CNT チャンネルに隣接させて配置します) を上昇させて、チャンネルに電界を印加することによって CNT を半導体状態から絶縁体状態へ変化させることができます。逆に、ゲート電圧を下げることによって、このデバイスは導体状態へ遷移します。この電気伝導メカニズムはシリコン MOSFET トランジスタスイッチとよく似ています。シリコン MOSFET の場合は、シリコンに電子アクセプタまたはドナーをドーピングすることによって、材料の特定位置における電気導電率を変化させます。

はじめに	2
ナノテクノロジー試験の挑戦	2
電気測定での注意事項	5
電気ノイズ	6
ソースメジャー計測器	7
パルス法	8
自己発熱の予防	9
アプリケーション例: グラフェン	10
まとめ	12
用語集	13
選定ガイド	16
さらに詳しくは	17

さらに知るには… 重要リソース



・ナノテクベースの産業の整序に寄与する標準規格

・将来のナノテク特性評価の課題を解決する最新ソリューション

追加リソース

- ・ナノテクノロジー試験の喫緊の課題
- ・商業化への道程

製品・アプリケーションに関するご質問

ナノテクノロジー試験の挑戦 (続)

巨視的な粒子の場合、電子はエネルギーバンド内で離散的なエネルギー量子を持ち、それぞれの電子は熱的エネルギーを介してバンド内に多数存在するエネルギーレベルを共有します。電気伝導性材料の場合、電子は熱的励起によって伝導バンドへ移動します(つまり、電子は価電子帯ばかりでなく、伝導バンドにも存在します)。絶縁体(バンドギャップ > 電子の熱エネルギー)の場合、電子が価電子帯から伝導バンド(両者は物質のバンドギャップによって隔てられています)への遷移するために非常に大きなエネルギーを必要とします。適当な量のエネルギー (> バンドギャップ) を吸収できた場合に限って、電子はバンドから次のバンドへとジャンプすることができます。

粒子サイズが小さくなり、ナノスコピックなレベルへ達すると、それまで連続的であったバンド内の許容エネルギーが離散的なレベルへ分離してゆきます(その理由は、粒子内の原子数のはるかに少なくなるためです)。この現象は、エネルギーレベル間の隔たりが電子の熱エネルギーに近づいていくときに起こります(図1)。特定のエネルギーバンド内のエネルギーレベルが少なくなるに伴い、物質の状態密度も変化します。

状態密度とは、ある電子がエネルギーを放出して下位のエネルギーレベルへ移行するときに取り得るエネルギー状態の数、あるいはエネルギーを吸収して上位のエネルギーレベルへ移行するときに取り得るエネルギー状態の数を表す尺度です。そこから導かれる結論として、状態密度を知ることができれば粒子のサイズを推定することができます。

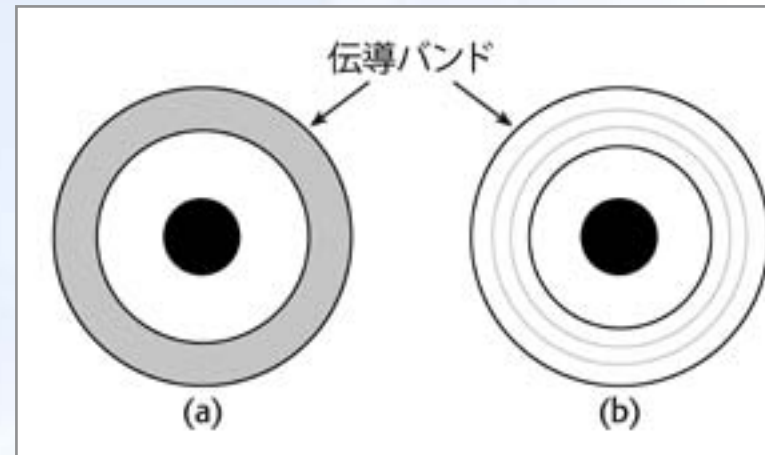


図 1. 材料の大きさが巨視的な寸法からナノスコピックなレベルへ減少すると、連続的であったエネルギーバンド(a)がバンド内で離散的なレベルへ分離してゆき(b)、バンドギャップが増大します。

状態密度の特性を明らかにすることは、ナノスコピックな材料の研究における基本的な活動の 1 つです。状態密度(3次元)はエネルギーの関数として次のように表現されます:

$$\rho(E) = dn_s/dE = \{4\pi(2m)^{3/2}/h^3\}[\sqrt{E}]$$

この式は、エネルギー E における単位体積、単位エネルギーに含まれる電子状態の数を表しています。

- m = 粒子の有効質量
- h = プランク定数
- E = 電子ボルト (eV) で表したエネルギー (電子の軌道に対応)

この結果は体積には関係しないのですが(従って、任意のサイズの粒子に適用可能)、粒子のサイズ/構造が未知の場合、この式の有用性は限定的になります。しかし、実験

的に状態密度を決定できる方法がこの他にがあるので、それによって粒子サイズを知ることができます。

状態密度から材料の電氣的挙動を予測することが可能であることから、逆に電氣的インピーダンス測定を使用して状態密度を導き出すことも可能です。すなわち、微分コンダクタンスを印加電圧に対してプロットすることによって状態密度を知ることができます。微分コンダクタンスの式は簡単で、(di/dv)として表現されます。微分コンダクタンスを電圧に対してプロットしたグラフがその材料の状態密度を表現します。電気伝導度の高い材料は伝導バンド内に豊富な自由エネルギーレベル、言い換えれば、大きな状態密度を持っています(つまり、単位エネルギーあたりで許容される個々のエネルギーレベルが豊富)。これに対して、絶縁材料は、伝導バンド内の占拠されたエネルギーレベルが不足した電子構造を持っています。

状態密度はこれらのエネルギーレベルの密度を表しますから、電気伝導の電圧に対する変化のプロットは、それぞれのエネルギーレベル(デバイスの両端にかかる電圧)における電子の状態密度の直接的な尺度を与えてくれます。

この方法を実施する 1 つの方法は、ナノ粒子に低い抵抗値での接触が可能なナノマニピュレータを使用することです。この構成を使用することで電荷輸送と状態密度の測定が可能になります。ナノプローブは低い抵抗値を保ちながら被試験材料(粒子)へ接触させることができるため、伝導領域までうまく機能します。

はじめに	2
ナノテクノロジー試験の挑戦	2
電気測定での注意事項	5
電気ノイズ	6
ソースメジャー計測器	7
パルス法	8
自己発熱の予防	9
アプリケーション例: グラフェン	10
まとめ	12
用語集	13
選定ガイド	16
さらに詳しくは	17

製品・アプリケーションに関するご質問

ナノテクノロジー試験の挑戦 (続)

ナノマニピュレータとそのプローブ、およびソースメジャーユニット (SMU) を併用することにより、ナノ粒子に直接的に電流または電圧刺激を与えてその電流/電圧応答を測定することができます (図 2)。ソースメジャーユニットを使用して電氣的な印加/測定試験を行う利点は、材料や被試験デバイス (DUT) が持つ相対的なインピーダンスに応じて特定の SMU 測定モード (電流印加/電圧測定、またはその逆) を選択できることにあります。測定モードはインピーダンスの変化に応じて動的に変化することもあります。たとえば、CNT が半導体スイッチとして動作する測定系でこれが起こります。測定モードを変化させることによって電圧と電流刺激のダイナミックレンジをはるかに広く使用することが可能となり、パラメータ試験から最大限の確度と精度を引き出すことができます。SMU の電圧と電流の感度はそれぞれ 1 マイクロボルト、100 アトアンペアまで達する場合があります。

ナノスコピック材料の電氣的測定は装置に非常に厳しい要求を課します。

電気伝導度、インピーダンス、その他の電氣的特性を測定し、それらの測定値を状態密度に関係付けるためには、まずナノスコピックな DUT との間に電氣的な接続を作らなければなりません。³ ナノテクノロジー試験の分野では、まず、この課題を克服する必要があります。この目的に使用できるツールはほんの数種類しかなく、このタイプの接続をうまく行える装置構成はほとんどありません。

シリコンからシリコンの場合は、従来からのフォトリソグラフィ技術を用いて粒子を自己組織化させることにより、プロービングに使用

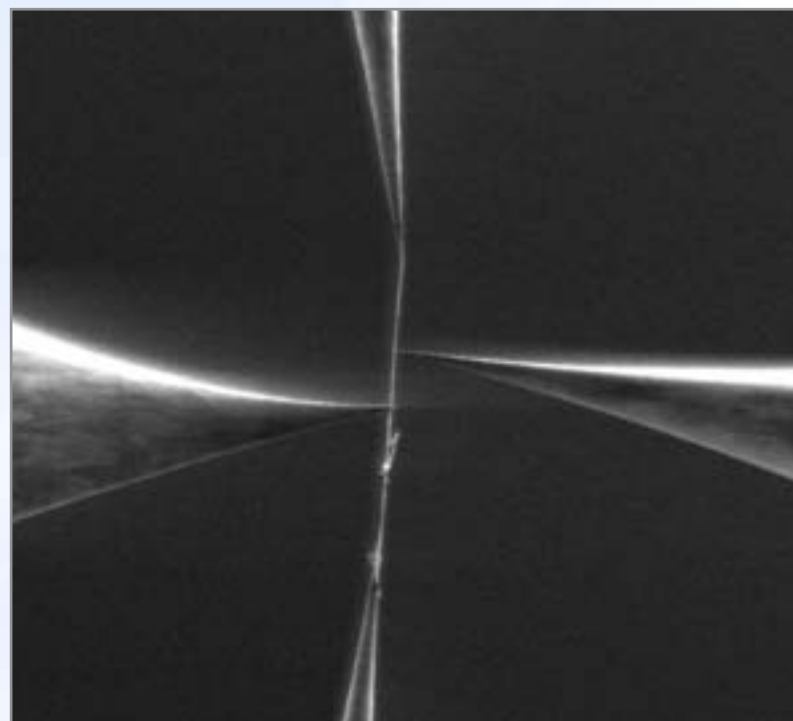


図 2. ナノスケール構造を探索中のナノマニピュレータ: CNT の直接電氣測定に使用される低インピーダンスプローブ接点 (全体を巨視的に見る)。ナノマニピュレータ ヘッドアセンブリの写真。(写真提供: Zyvex Corporation)

できる電氣的接続用パッドを形成することが可能です。このようなパッドをまたぐだけの十分な長さを持つ粒子 (たとえば、カーボンナノワイヤ) であれば、外部から静電場を与えることによってパッドへ接続することができます。

量子ウェル、量子ワイヤ、量子ドットの特性はそれぞれ異なりますが、ある材料から形成した量子ワイヤまたは量子ウェル (ナノフィルム) の情報が得られたならば、その情報を詳細に調べることによって同じ材料の量子ドットが示す特性を推定することができます。

ナノフィルムは、1 方向のみ奥行きが非常に小さいため、特に測定が容易です。導体表面上に堆積させてこのようなフィルムを形成すれば、巨視的なサイズの試験パッドであっても、その試験パッドを材料表面上の適当な

位置に形成することによって、体積方向および表面方向の測定が可能になります。導電性材料の場合、印加および測定のためのパッドを分離した位置に、ケルビン (4線式) 接続となるように形成 (堆積) します。⁴ ケルビン式の回路構成とすることにより、試験リード抵抗の影響を排除して測定精度を上げることができます。どのような方式にせよ、他のバルク材料と同じようにして量子ウェル (ナノフィルム) を試験することができます。

¹ Bioimpedance Bioelectricity Basics, Wiley 2003.

² Applied Physics Letters, Single and Multiwalled Carbon Nanotube Field Effect Transistors, volume 17, number 73, October 26, 1998, IBM Research Division.

³ I-V Measurements of Nanoscale Wires and Tubes with the Model 4200-SCS and Zyvex S100 Nanomanipulator, Application Note #2481, Keithley Instruments, 2004.

⁴ Four-Probe Resistivity and Hall Voltage Measurements with the Model 4200-SCS, Application Note #2475, Keithley Instruments, 2004.

はじめに	2
ナノテクノロジー試験の挑戦	2
電氣測定での注意事項	5
電氣ノイズ	6
ソースメジャー計測器	7
パルス法	8
自己発熱の予防	9
アプリケーション例: グラフェン	10
まとめ	12
用語集	13
選定ガイド	16
さらに詳しくは	17

さらに知るには...

重要リソース



・ 顕微鏡に「手」をつける:
ナノ構造の特性評価

Kleindiek Nanotechnik



・ 4200-SCS 型半導体パラメータアナライザを用いたカーボンナノチューブトランジスタの電氣特性評価

追加リソース

- ・ ナノスケールデバイス/材料の電氣的測定
- ・ ナノスケール特性評価/解析のための先端粒子ビーム技術
- ・ 低電流測定最適化: 4200-SCS 型半導体特性評価システム
- ・ ナノスケールワイヤ/チューブの I-V 測定: 4200-SCS 型/ Zyvex S100 ナノマニピュレータ
- ・ カーボンナノチューブ/低パワーナノデバイスの電氣的特性評価のヒント

電気測定での注意事項

パッシブデバイス (それ自体でエネルギー源とはならないデバイス) の電気測定は、「サンプルに何等かの方法で刺激を与え、その刺激に対する応答を測定する」という簡単な手順によって実行されます。この方法はパッシブとアクティブ両方の特性を備えたデバイスにも適用できます (伝達特性は線形であっても非線形であってもかまいません)。適当な手法を用いれば、印加-測定のアプローチを有効に使用してエネルギー源の特性を把握することも可能です。

ナノスコピック粒子の場合、一般的にはインピーダンス、コンダクタンス、および抵抗値の定量化するために印加-測定という試験形態を適応して重要な材料特性を明らかにします。この試験方法は、最終的なアプリケーションが電気回路ではないケースであっても有用です。

ナノスコピック粒子の特性測定では、次に示すいくつかの注意が特に重要です:

- ナノスコピック粒子は巨視的なデバイスに流れるような大きさの電流に耐えることができません (超伝導体の場合は話が別ですが)。この性質は、電流刺激の大きさを慎重にコントロールしながらデバイスを調べる必要があることを意味します。
- ナノスコピック粒子は隣接するデバイスから印加される電圧を、通常の電子部品や材料 (たとえばトランジスタ) のようには持

ちこたえることができません。デバイスが小さくなるほど、隣接するデバイスの近くに配置することが可能になり、実際にそうなるからです。小型デバイスはそれだけ質量も小さくなるため、強力な場の力から影響を受けやすくなります。さらに、ナノスコピック粒子の場合には内部の電界が非常に強力になる可能性がありますから、電圧の印加は慎重に行わなければなりません。

- ナノスコピックデバイスが非常に小型であることから、標準的には寄生 (浮遊) インダクタンスとキャパシタンスも小さくなります。これは、エレクトロニクス回路での使用を考えると有利な条件であり、対応するマクロスコピックデバイスと比較してスイッチング速度の向上と消費電力の低減を可能にします。しかし、この特性は同時に、I-V 曲線測定用計測器への要求が厳しくなることを意味します。すなわち、短い反応時間の間に小さな電流を測定しなければなりません。

ナノスコピック試験アプリケーションでは弱い電流の印加と測定が必要になることがしばしばですから、電気的特性を正確に把握するためには適切な装置の選択が欠かせません。DUT はキャパシタンスが小さく、微弱電流でも迅速に状態を変化させるという特性を持っています。そのため、計測器類は、高い感度を持つことに加えて、応答時間が短く

なければなりません (広帯域と表現することもあります)。

印加-測定の実験回路のスイッチング速度は、デバイスの状態を追跡するために使用する計測器類によって影響を受けることがあります。この問題に関して特に留意が必要なのは、必ずしも理想的ではない測定トポロジでデバイスを観測しなければならない場合です。可能性のあるトポロジは次の 2 種類です: 電流印加/電圧測定、および電圧印加/電流測定。

低インピーダンスデバイス (<1000 Ω) の測定を考える場合は、一般的に、電流を印加して電圧を測定する方法が最良の結果をもたらします。低インピーダンス測定に適用する場合は、電流を印加する方式が安定しており、それほど困難なく良好なS/N比を得ることができます。これにより、低電圧応答の正確な測定が可能になります。

高インピーダンスデバイス (>10,000 Ω) の測定では、電圧を印加して電流を測定するのが最良の方法です。高インピーダンスを駆動する安定した電圧ソースは簡単に構成することができます。うまく設計された電圧ソースを高インピーダンスの両端に接続することにより、DUT の浮遊キャパシタンスと試験ケーブルが素早く充電され、迅速に最終出力値に達して安定します。DUT の応答電流は小さいですが、適切な電流計を使用すれば正確に測定することができます。

はじめに	2
ナノテクノロジー試験の挑戦	2
電気測定での注意事項	5
電気ノイズ	6
ソースメジャー計測器	7
パルス法	8
自己発熱の予防	9
アプリケーション例: グラフェン	10
まとめ	12
用語集	13
選定ガイド	16
さらに詳しくは	17

さらに知るには… 重要リソース



・ ナノアーキテククスにおける測定ニーズ
Dr. Kang Wang
ナノアーキテククス機能エンジニアリングセンター所長 (カリフォルニア大学、ロサンゼルス校)



・ ナノエレクトロニクス/分子エレクトロニクスデバイスにおける低電流測定の改善

追加リソース

- ・ ナノスケース材料の電氣的測定
- ・ 4200-SCS型による4プローブ抵抗率とホール電圧測定
- ・ 材料科学やデバイス開発の限界への挑戦

製品・アプリケーションに関するご質問

電気ノイズ

測定の感度と確度は最終的に電気ノイズによって制約されますが、測定トポロジはこの電気ノイズにも影響を与えます。電流ソースを使用してインピーダンスの低い電圧を測定する場合、測定回路は DUT の電圧ノイズとインピーダンスに対して敏感です。抵抗のような巨視的デバイスについて考えると、室温 (270K) におけるジョンソン電圧ノイズは下式によって表現されます:

$$V_n = \sqrt{4kTBR}$$

ここに、

k = ボルツマン定数

T = ソースの絶対温度 (度K)

B = ノイズ帯域幅 (Hz)

R = ソース抵抗 (Ω)

この式は次のように単純化することができます:

$$V_n = 6.5 \times 10^{-10} [\sqrt{(BR)}] / R$$

この式は、DUT 抵抗 (R) が減少するにしたがって、DUT が発生するジョンソン電圧ノイズも減少することを示しています。逆に、電圧ソースを使用して高インピーダンスデバイスに刺激を与えた場合には、電流

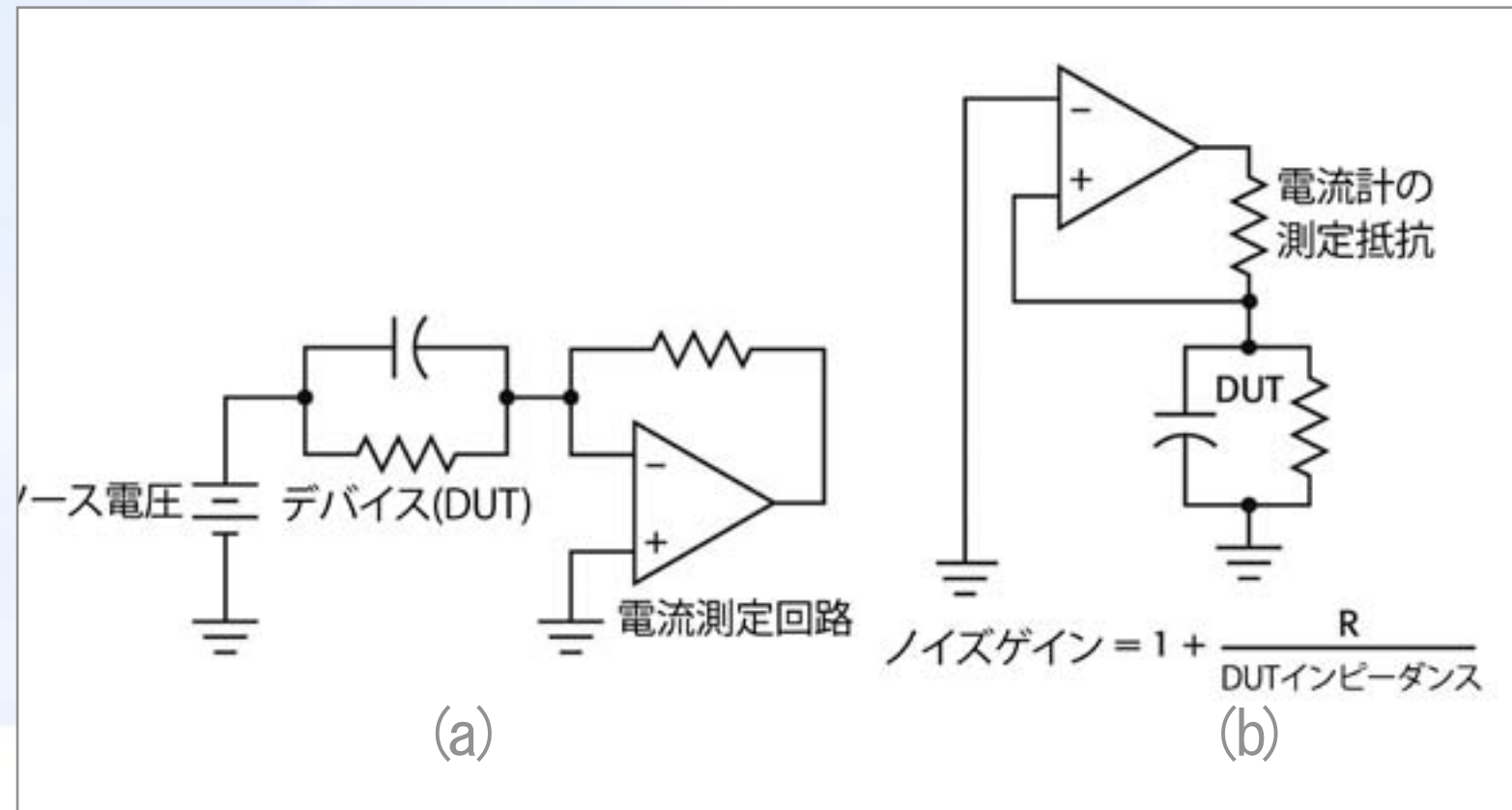


図 3. (a)電圧印加/電流測定法の回路モデル、(b)DUT のインピーダンスが測定回路インピーダンスに比べて低い場合のノイズゲインの修正モデル (演算増幅器ノイズを「ゲインアップ」してある)

測定ノイズによって制限されることを意味します。

抵抗の 270K におけるジョンソン電流ノイズは次式で表現されます:

$$I_n = 6.5 \times 10^{-10} [\sqrt{(BR)}] / R$$

この式から分かりますとおり、DUT 抵抗が大きくなるにしたがってノイズは小さくなってゆきます。

ジョンソンノイズの他に、選択した測定トポロジに付随するノイズゲインが発生することがあり、このゲインは粒子サイズには

依存しません。ノイズゲインは測定システムのノイズが寄生的に増幅される現象ですから、適正な測定トポロジが選択されれば発生しません。

1 つの例として、電圧印加/電流測定のトポロジを考えてみます。多くの電流測定回路 (アンメータ) では、図 3 に示すように演算増幅器が使用されます。このようなアンメータ回路でノイズゲインを小さくするためには、非反転入力端子のゲインができるだけ小さくなるようにして回路を動作させなければなりません。

- はじめに 2
- ナノテクノロジー試験の挑戦 2
- 電気測定での注意事項 5
- 電気ノイズ 6
- ソースメジャー計測器 7
- パルス法 8
- 自己発熱の予防 9
- アプリケーション例: グラフェン 10
- まとめ 12
- 用語集 13
- 選定ガイド 16
- さらに詳しくは 17

さらに知るには… 重要リソース



・ ナノワイヤとナノFET の電気的特性 (Zinc-Blende Wurtzite Biphasic Gallium Nitride)

Dr. Virginia Ayers
電子、生物ナノ構造ラボラトリ所長
(ミシガン州立大学)



・ 低ノイズな 4200-SCS 型による超低電流測定

追加リソース

・ 高感度測定ハンドブック

製品・アプリケーションに関するご質問

ソースメジャー計測器

市販の DC ソースメジャーユニット (SMU) は、多くのナノスコピック材料とデバイスの測定に使用できる便利な試験ツールです。SMU ならば、測定トポロジを自動的に変更することができます (つまり、電圧印加/電流測定と電流印加/電圧測定モードを簡単かつ迅速に切り換え可能)。測定トポロジを切り換えて、速度と確度を最大限に引き出しながら、同時にノイズを最小限に抑えた測定を行えます。

ある種のナノ粒子は、外部から場を印加することによって状態を変化させます。このような材料の研究では、ナノ粒子が高インピーダンス状態に保たれるように電圧の印加と電流の測定を行わなければなりません。材料が低インピーダンス状態にあるときは、電流を印加して電圧を測定する方法によって、より確度の高い結果が得られます。

さらに、SMU は電流コンプライアンス機能を持っていますから、これを利用すれば被試験材料/デバイス (DUT) の材料破壊を防止するように DC 電流レベルを自動的に制限することができます。電圧を印加する応用では、これと同じように電圧コンプライアンス機能を使用することができます。

コンプライアンス機能を使用する場

合、SMU は、ユーザのコンプライアンス値を超えない限りにおいて指定されたソース値を出力します。たとえば、SMU があるプリセットされた電流コンプライアンス条件を満たすように電圧印加設定されていたとすれば、そのコンプライアンス値を超える状況が発生した場合には SMU は自動的に定電流ソースとして機能し始めます。その時の出力レベルは電流コンプライアンス値と一致します。また、SMU がコンプライアンス電圧を指定して電流印加設定されている場合であれば、DUT のインピーダンスと引き込み電流が変化して電圧がコンプライアンス値を超過する状況が発生すると、SMU はその時点から定電圧ソース (その時の電圧はコンプライアンス電圧) として機能します。

ナノスコピックデバイス (たとえば、CNT スイッチ) は瞬時にして状態を変化することがありますが、計測器の状態は同じ速度では変化できません。SMU のタイプによっては、このスイッチング時間が 100 ナノ秒から 100 マイクロ秒に及ぶことがあります。このようなスイッチング速度ではナノ粒子の状態変化を精密に追跡するには不十分ですが、DUT のパワー損失を許容範囲内に押さえながら変化前後の状態を正確に測定するという意味では十分な速度といえます。

はじめに	2
ナノテクノロジー試験の挑戦	2
電気測定での注意事項	5
電気ノイズ	6
ソースメジャー計測器	7
パルス法	8
自己発熱の予防	9
アプリケーション例: グラフェン	10
まとめ	12
用語集	13
選定ガイド	16
さらに詳しくは	17

さらに知るには… 重要リソース



・ ナノテクノロジー実用化の鍵となる試験システム



Ryan Major
R&D プロジェクトマネージャ、
Hysitron, Inc.

・ 材料の機械特性、変形挙動、および電気的特性の in-situ 相関: 導電性ナノインデンテーションの応用

追加リソース

- ・ 4200-SCS型半導体特性評価システム
- ・ 2600Aシリーズ システム ソースメータ®

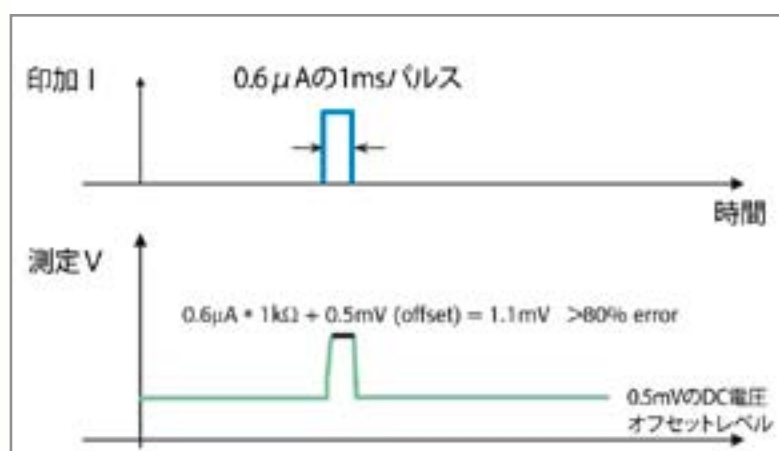
製品・アプリケーションに関するご質問

パルス法

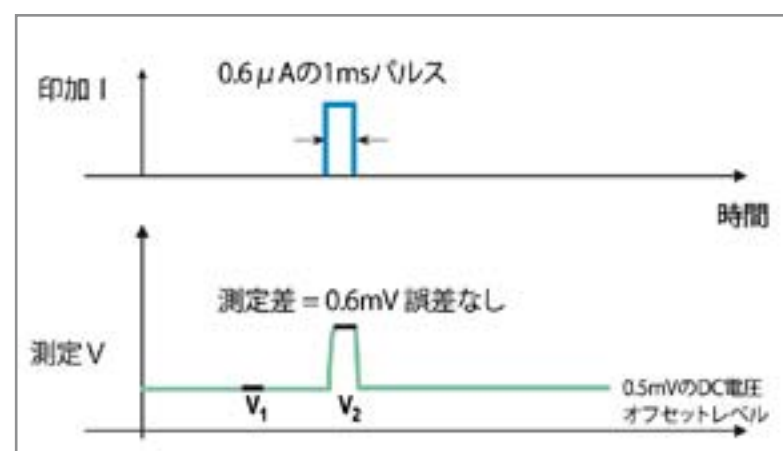
測定速度向上とノイズ削減のために最適な測定トポロジを選択したとしても、ある種のナノスコピック材料の試験ニーズに応えるにはこれだけでは不十分なことがあります。たとえば、CNTの中には従来からの CMOS トランジスタスイッチより 1000 倍も速くスイッチング可能と思われるものがあり、商用ピコアンメータ (ナノアンペアレンジで使用) ではこの速度に追い付くことができません。このようなデバイスの要求に対応するには、異なる測定法を工夫してインピーダンス測定を向上させる必要があります。

何種類かの SMU ではすでに設計に組み込まれている低パワーパルス法は、この問題に部分的な解答を与えてくれる測定

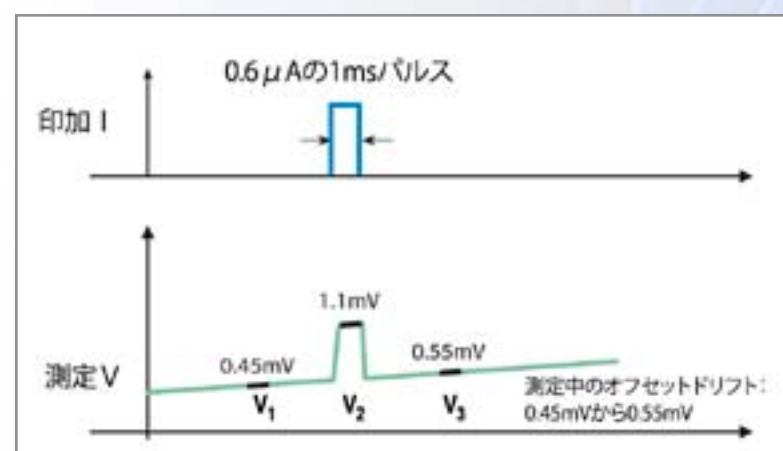
法です。この測定法の基本的な考え方は、標準的な方法よりもはるかに大きな試験電圧/電流を使用して、この大きな刺激を短い印加サイクルで与えることにあります。大きな刺激を与えることにより、印加のノイズを低下させ (S/N比を向上させ)、電圧パルスと電流パルスそれぞれの立ち上がり時間 (セトリング時間) を改善します。ソースの静粛性が向上してフィルタの強度を下げることで、印加のサイクル時間を短縮する (パルス幅を狭くする) ことができます。ソース刺激が大きくなると、それに応答する電流/電圧も大きくなりますから、より大きな測定レンジの選択が可能となって、これもノイズの影響排除に寄与します。ノイズが少なくなると測定値の取り込み時間 (積分時間) が短縮され、より高速な測定が可能になります。



熱電圧に起因する DC オフセットと計測器オフセットは、電圧測定値に無視できない誤差を生じます。



2点デルタ測定を実行することによりオフセット誤差がキャンセルされます。測定したデルタ電圧は電流パルスに対する正しい電圧応答となります。



第 3 の測定ポイント (オプション) を追加すれば、オフセット変動のキャンセルも可能になります。

はじめに	2
ナノテクノロジー試験の挑戦	2
電気測定での注意事項	5
電気ノイズ	6
ソースメジャー計測器	7
パルス法	8
自己発熱の予防	9
アプリケーション例: グラフェン	10
まとめ	12
用語集	13
選定ガイド	16
さらに詳しくは	17

さらに知るには… 重要リソース



- 低レベルパルスを使用する電気的特性評価: 6221/2182A 型の組み合わせ



- 超速 I-V アプリケーションガイド (4225-PMU型 超速 I-V モジュール)

追加リソース

- ナノスケースデバイスのパルス試験
- ケースレーが提供するパルスソリューション

製品・アプリケーションに関するご質問

自己発熱の予防

ナノ研究で起こり得る誤差発生源の 1 つとして、DUT に過剰な電流を流すことによる自己発熱をあげることができます。この電流によって、サンプルに壊滅的な破壊が起こることも考えられます。そのため、計測システムはデバイス試験中にソース電流を自動的に制限できる機能を持っていないければなりません。SMU をベースとしてパルス電流機能を備える試験システムの大部分はプログラム方式の電流、電圧コンプライアンス回路を標準で装備しています。実際、ある種の低抵抗構造を持つサンプルの自己発熱を防止するには、このような機能が必要となります。

大きな試験電流を流す必要がある場合は、エネルギーが蓄積して DUT の破壊温度に達するのを防止するために、電流を流す時間を短くしなければなりません。(ナノスコピックデバイスが耐えられるのは非常に小さな熱量に限られます。したがって、このようなデバイス内で散逸する全エネルギーを可能な限り低く保つ必要があります)。さらに、DUT のナノスコピックチャンネルが飽和しないようにするため、試験電流をできるだけ小さく保たなければなりません。(たとえば、直径が 1.5nm しかない電流

チャンネルを単位時間に通過できる電子数は著しく制限されます)。ナノスコピックデバイスのタイプによっては、伝導状態で耐えられる電流量が数百ナノアンペアに限定されることがあります。したがって、パルスを使用するアプリケーションであったとしても、最大許容試験電流がデバイスの飽和電流によって規定されることがあります。

パルスモードで使用するデューティサイクルと測定時間が DUT 内で散逸するパワーに与える影響を示すのが次式です。パルスモードでのパワー損失は、見かけのパワー損失 ($V \times I$) に刺激印加時間を乗算し、その値を試験の反復速度で除算することによって得られます。

$$P_p = P_a \times T_t / T_r$$

ここに:

- P_p = パルスパワー損失
- P_a = 見かけのパワー ($V \times I$)
- T_t = 試験時間

$$T_r = \text{試験の反復速度}$$

パルスモードは状態密度測定にも有用です。その場合は、たとえばナノマニピュレータのような低インピーダンス接続を使用します。これまで粒子の自己発熱のために困難であった I/V 位置での特性測定が、パルスを使用することにより可能になります。

はじめに	2
ナノテクノロジー試験の挑戦	2
電気測定での注意事項	5
電気ノイズ	6
ソースメジャー計測器	7
パルス法	8
自己発熱の予防	9
アプリケーション例: グラフェン	10
まとめ	12
用語集	13
選定ガイド	16
さらに詳しくは	17

さらに知るには… 重要リソース



Jonathan Tucker
上級マーケティング、ケーススレー
(ナノテクノロジー部門)

- ナノスケールデバイスの自己発熱を避ける方法

製品・アプリケーションに関するご質問

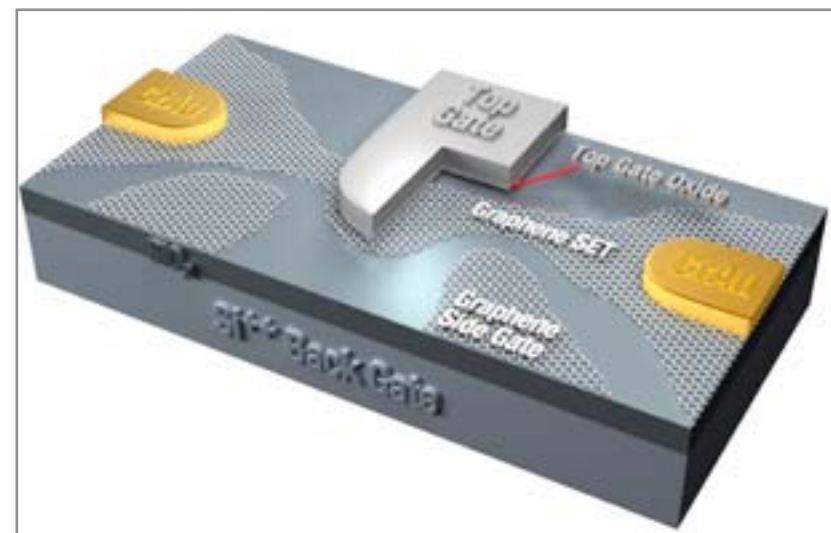
グラフェン: 半導体産業でシリコンの代替材料となり得るか?

グラフェン(原子 1 個の厚みしか持たない結晶状炭素)は、並外れて優れた電気伝導度を持っています。その結合は非常に強靱かつ柔軟でありながら、その硬度はダイヤモンドを凌駕しています。つい最近に至るまで、物理学者は原子 1 個の厚みしか持たない固体結晶が存在し得るとは考えていませんでした。ノボセロフ、ガイム 両教授は 2004 年にグラフェンを発見してそのような結晶の存在を実証しました。彼らはその業績によって 2010 年のノーベル物理学賞を受賞しました。

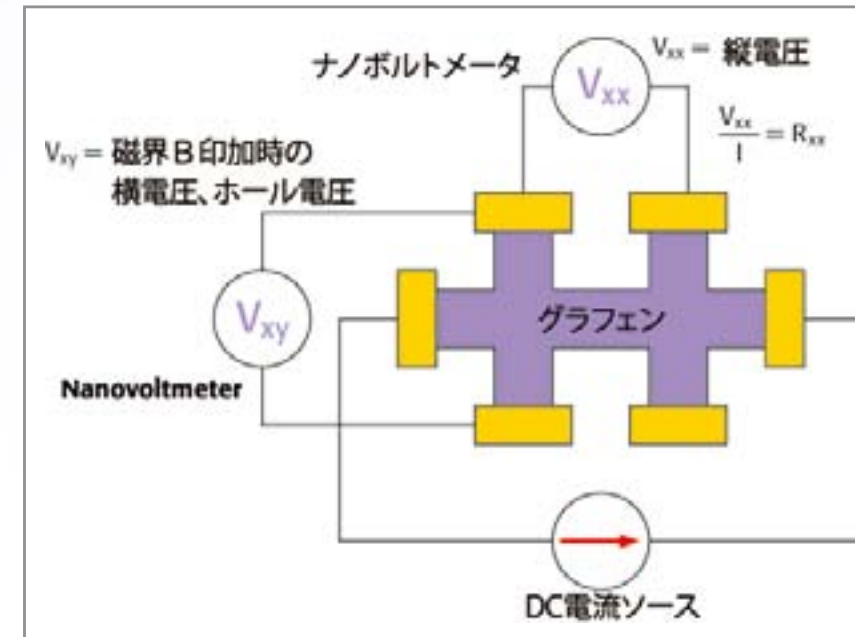
半導体産業にとってグラフェンが持つ魅力は、電子がグラフェン中を阻害されずに、量子電磁力学の原理にしたがって移動できるという特性です。

グラフェン中での室温におけるキャリア移動度は $10,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 程度のオーダーを示し、浮遊状態のサンプルでは移動度が $200,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ に達すると報告されています。グラフェンの高い移動度を利用した超高周波 RF トランジスタ (100GHz またはそれ以上) の開発が進められています。残念なことに、グラフェンは自然状態ではバンドギャップを持たないため、多くの研究者がバンドギャップを作り出す方法について研究を進めています。これが実現すれば、高速特性とナノスケールサイズを利用してデジタル回路のシリコン FET をグラフェンで置き換える可能性が現実のものとなり、ムーアの法則の寿命を延ばすことにも繋がります。

グラフェンとグラフェンをベースとする材料の特性の研究では、ホール効果を測定して縦抵抗を調べることで、キャリア移動度を評価します。そのデータから量子ホール効果が発現しているか否かを探ります(量子ホール効果が発現すると縦抵抗が $0\Omega\text{-cm}$ に近い値まで減少します)。このような測定では、非常に低い電流レベル(ナノアンペアレベル)での精密な電流印加が必要となります。電流印加をコントロールするときの最重要事項は、過剰なパワーがグラフェンサンプルに供給されてサンプルが破壊されるのを防止することです。さらに、ナノアンペアレベルの電流印加では、サンプル両端に発生する電圧も極めて小さな値となります(数十から数百ナノボルト)。このような、ナノボルトレベルでの測定を



グラフェンを使用した単一エレクトロントランジスタ (SET)



グラフェンサンプルのホール効果電圧と縦抵抗を同時に測定する回路構成 (ホールバー構成)

実行するには、十分な分解能と極めて高い感度を有する特殊な計測器が必要になります。

ナノボルトレベルでの測定では、熱電効果による電圧とノイズ源が測定精度に大きな影響を与えるため、これらの効果を最小限に抑さえる測定法を用いることが重要です。たとえば、信号の極性を反転できる電流源を使用すれば、熱起電力オフセットに起因する測定誤差をなくすることができます。グラフェンサンプルの自己発熱による抵抗率変化も測定誤差の原因となりますが、低いデューティサイクルで幅の狭いパルスを出力できる電流源を使用することで、この誤差を最小限に抑さえることができます。

- はじめに 2
- ナノテクノロジー試験の挑戦 2
- 電気測定での注意事項 5
- 電気ノイズ 6
- ソースメジャー計測器 7
- パルス法 8
- 自己発熱の予防 9
- アプリケーション例: グラフェン 10
- まとめ 12
- 用語集 13
- 選定ガイド 16
- さらに詳しくは 17

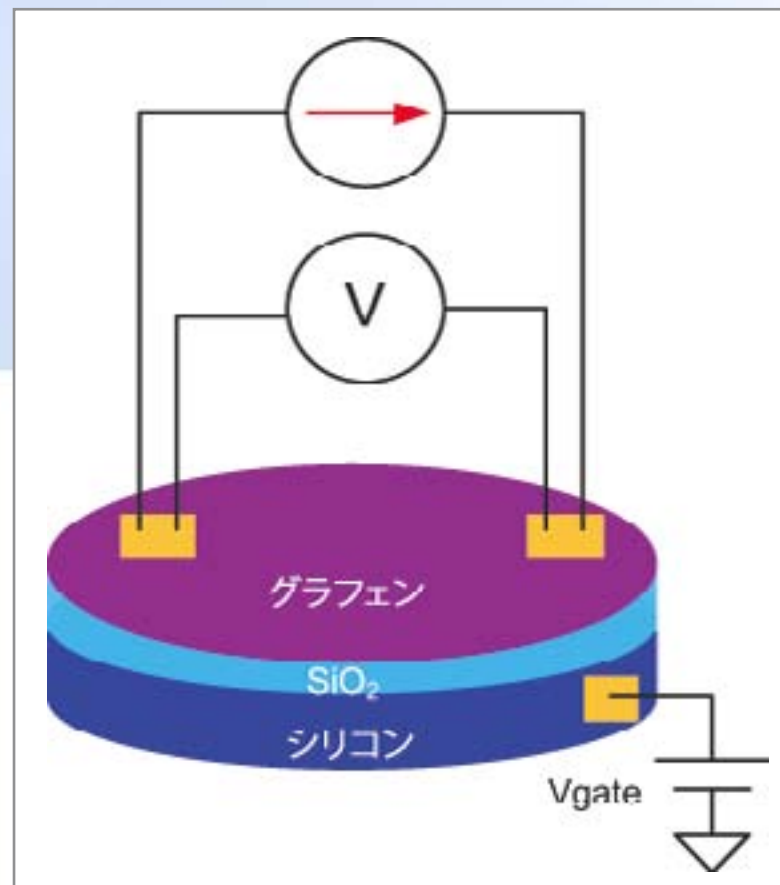
製品・アプリケーションに関するご質問

グラフェン:半導体産業でシリコンの代替材料となり得るか？(続)

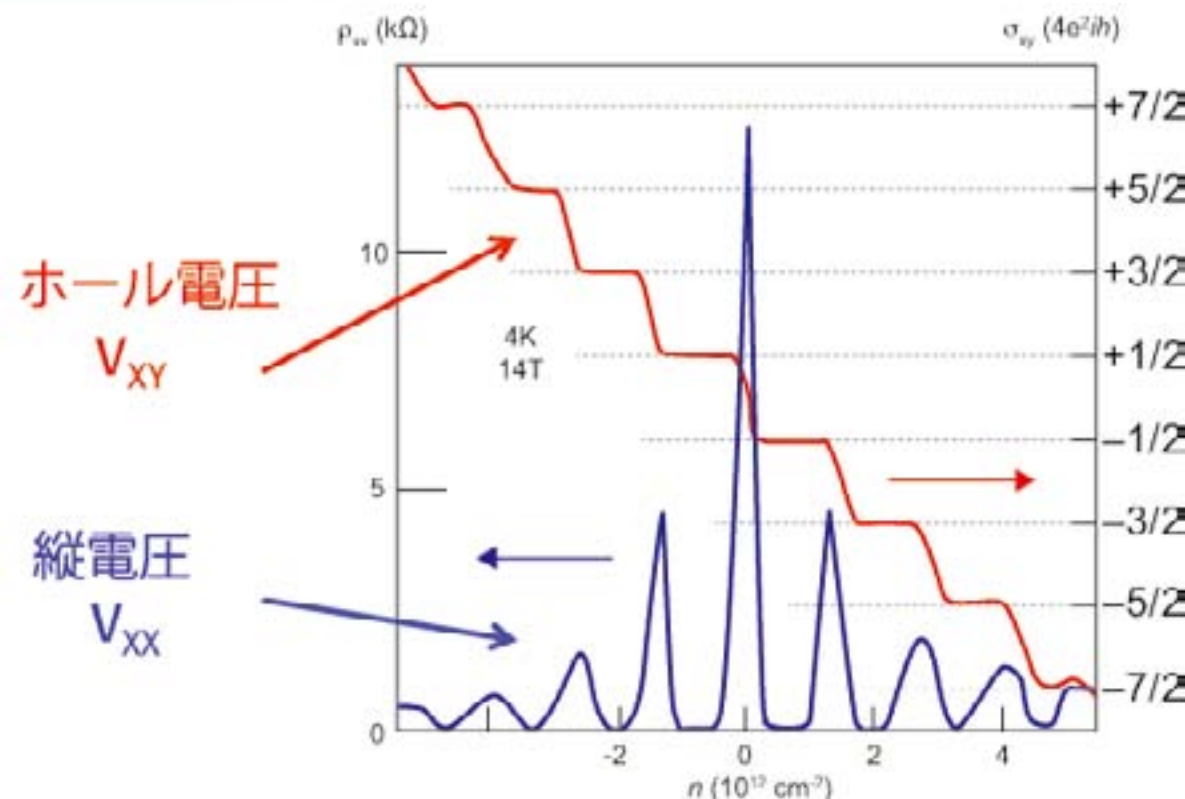
したがって、印加と測定の同期が可能な電流ソースとナノボルトメータを組み合わせることにより、熱オフセットの除去とノイズ信号の平均化除去が容易になります。

シリコンとの置き換えが可能となるためには、グラフェン(またはグラフェンをベースとする材料)が

適当なバンドギャップを持ち、FET チャンネルの ON/OFF 切り換えができなければなりません。サブストレート「ゲート」電圧を変調して、ゲート電圧の範囲全体にわたるサンプル性能を評価するためには、精密なソースメータ計測器が必要となります。ここでも、低レベルパワーの印加と低レベル測定が要求され、そのための低レベル電流ソースとナノボルトメータが必要となります。



グラフェン(またはグラフェンをベースとする構造)のバンドギャップ評価に使用する測定システムの構成



磁場強度を変化させ、それに対応するホール電圧と縦電圧のプロット。磁場強度の部分部分においてホール電圧が一定値を示し、それに対応する縦電圧がほぼゼロに近い値を示す(極めて高い電気伝導度)ことが注目される。この挙動は、グラフェンが量子ホール効果を持つことを示している。

Neto, Novoselov, Geim, et, al の許可を得て “The Electronic Properties of Graphene” (Jan. 2009) より転載

- はじめに 2
- ナノテクノロジー試験の挑戦 2
- 電気測定での注意事項 5
- 電気ノイズ 6
- ソースメジャー計測器 7
- パルス法 8
- 自己発熱の予防 9
- アプリケーション例: グラフェン 10
- まとめ 12
- 用語集 13
- 選定ガイド 16
- さらに詳しくは 17

さらに知るには... 重要リソース



- ・ グラフェン測定にケースレーの専門技術をお役立てください

追加リソース

- ・ デルタモードのオンラインデモ
- ・ 低パワー、低電圧アプリケーションで正確かつ信頼できる抵抗測定の仕方

製品・アプリケーションに関するご質問

まとめ

ナノスコピック粒子の電子構造は、原子内の電子エネルギーばかりでなく、分子間で共有される電子軌道と自由電子の軌道分布を反映しています。このような情報をもとに、ナノスコピック材料がエネルギーの印加に対して、あるいは異種材料の存在に対してどのような挙動を示すかを説明することができます。材料内の状態密度は電子構造に直接的に関連しており、この情報は材料の特性を予測して操作するために役立ちます。

状態密度は、電氣的に微分コンダクタンスを直接的に測定することで得ることができます。したがって、状態密度は材料の電氣的インピーダンスを予測しますが、その逆もまた真なのです。

ナノスコピック材料を電氣的に調べる方法にも正しい方法と不適切な方法があり、どの方法が適正であるかは材料のインピーダンスに依存します。低インピーダンス材料の場合は、電流を印加して電圧を測定することによって、電氣的ノイズを最小限に抑えた測定が可能になります。この測定方法により、最も広い帯域幅で最も正確に応答を測定することができます。同様の理由により、高インピーダンス材料を対象とするのであれば、電圧を印加して電流を測定する方法がより適切です。時には、デバイスを励起するために、適当と思われる測定モードを他の電圧または電流ソースと調和させて使わなければなりません。

はじめに	2
ナノテクノロジー試験の挑戦	2
電気測定での注意事項	5
電気ノイズ	6
ソースメジャー計測器	7
パルス法	8
自己発熱の予防	9
アプリケーション例: グラフェン	10
まとめ	12
用語集	13
選定ガイド	16
さらに詳しくは	17

さらに知るには… 重要リソース



- ・ 微分コンダクタンス測定法によるナノスケールデバイスの特性評価

追加リソース

- ・ 4200-SCS 型半導体特性評価試験システムの紹介
- ・ 4200-SCS 型半導体特性評価システム

製品・アプリケーションに関するご質問

用語集

絶対精度: 公的標準機関が認定する基準に対して絶対的なトレーサビリティを持つ一次標準と比較したときに、計測器指示値が示す標準値との一致の程度を示す尺度。精度はゲイン項とオフセット項と分けられることが多い。「相対精度」の説明を参照。

A/D (アナログ/デジタル) 変換器: アナログ入力信号をデジタル情報へ変換するために使用される回路。すべてのデジタル計測器は A/D 変換器を用いて入力信号をデジタル情報へ変換する。

アナログ出力: 入力信号に直接比例する出力。

アセンブラ: 分子レベルでの製造をサポートする装置であり、分子の位置操作を行うことによって適切な化学反応を導きます。アセンブラをプログラムすることにより、簡単な化学的構成ブロックからスタートして実質的に任意の分子構造やデバイスを構築することができる。

自動レンジ切り換え: 計測器自身が、複数の測定レンジの中から最も高い分解能が得られるレンジを選択するよう自動的に切り換える機能。通常、レンジは 10 の倍数ステップで設定されている。

自動レンジ切り換え時間: 自動レンジ切り換え可能な計測器に対して、あるステップ入力信号が与えられた後、適正レンジの選択と切り換えのために必要な時間も含めて、計測器指示値が表示されるまでに要する時間。

帯域幅: ある制限内で、伝達または増幅が可能である周波数範囲。通常は -3dB (パワーが半減する) ポイントを基準として帯域幅が定義される。

バイアス電圧: 試験中のデバイスの基準レベルまたは動作点を設定する目的でデバイスまたは回路に印加される電圧。

キャパシタンス (静電容量): キャパシタ、または導体と誘電体から構成される系において、導体間に電位差を与えたときに系内に分極した状態で電荷を蓄積できる能力を示す尺度。キャパシタンスと電荷および電圧は次式によって関係付けられる: $C = Q/V$ 。ここに、 C はキャパシタンス (単位: farad)、 Q は電荷 (単位: coulomb)、および V は電圧 (単位: Volt) を表す。

カーボンナノチューブ: 炭素原子の単層シートから作られるチューブ形状のナノデバイスであり、今までにない電気的特性と引張特性を持っている。カーボンナノチューブ ファイバは銅に匹敵する電気伝導度、ダイヤモンドに匹敵する熱伝導度、鋼の 100 倍に達する引張り強度 (しかも、重量は 1/6)、高度の破断歪みなどの特性を示すことがあり、さらに、超伝導、絶縁、半導体、導電体 (金属様) 特性を発現する可能性がある。主として窒化ホウ素またはシリコンから作られる非炭素系ナノチューブ (ナノワイヤと呼ばれることがある) も存在する。

チャンネル (スイッチング): スwitchingカード上の信号径路 (複数ある場合はそのいずれか)。スキヤナまたはマルチプレクサカードの場合、測定回路への入力の選択、または印加回路の出力切り換えのためにチャンネルを使用する。スイッチカードの場合は、それぞれのチャンネルの信号径路は他のチャンネルの信号径路から独立している。マトリックスカードの場合、行と列の交差点に配置されたリレーが動作することによってチャンネルが確定する。

同軸ケーブル: 1 つの軸を中心に巻かれた 2 つ以上の導電層から構成されるケーブル (導電層間は電氣的に絶縁されている)。多くの場合、一番外側の導電層を接地する。

同相除去比 (CMRR): 計測器入力端に印加される対地コモン電圧に起因する干渉を排除する能力。通常は周波数を指定し、その周波数における CMRR をデシベル単位で表す。

コモンモード電流: 入力 Low 端子と計測器のシャーシ GND 間に流れる電流。

コモンモード電圧: 入力 Low 端子と装置の接地 GND 間の電圧。

接触抵抗: 導体が接触する部位 (閉じたリレー接点、接続されたコネクタなど) に発生する抵抗 (Ω)。

コンタミネーション: 半導体や絶縁体の物理的、化学的、電気的特性に悪影響を与える、好ましくない物質を一般的に表現する用語。

D/A (デジタル/アナログ) 変換器: デジタル情報をアナログ信号へ変換するために使用される回路。D/A

変換器は、絶縁されたアナログ出力を生成するために多くの計測器で使用される。

誘電吸収: キャパシタに蓄積された電荷を瞬間的に放電させた後で、キャパシタに残る残留電荷が引き起こす効果。

デジタルマルチメータ (DMM): 電圧、電流、抵抗、その他の電気的パラメータを、アナログ信号をデジタル情報に変換して測定し、表示する電子計測器。たとえば、標準的な 5機能 DMM は DC 電圧、DC 電流、AC 電圧、AC 電流、および抵抗を測定する。

ドリフト: 入力信号や動作条件が変化していないにも拘わらず、指示値が徐々に変化する現象。

ドライ回路試験: デバイスの両端に印加する電圧を一定レベル未満 (たとえば、 $<20\text{mV}$) に保って行われるデバイス測定。酸化その他の効果によってデバイスが劣化するのを防止するために印加電圧を制限する。

電気化学効果: コンタミネーションや湿度などが原因となってガルバニ電池が生成し、それによって電流が発生する現象。

エレクトロメータ: 高性能 DC マルチメータの 1 種。エレクトロメータは、一般のデジタルマルチメータと比較して高い入力抵抗と高い電流感度を特徴とする。一般の DMM が持たない機能を備えていることもある (例: 電荷測定、電圧印加)。

EMF: 起電力 (Electromotive force) または起電圧。EMF という用語は、主として電磁気学的、電気化学的、または熱的效果によって生ずる電位差を説明する文脈で使用される。

静電カップリング: 導体の近傍で電圧が変化する、あるいは電圧源が移動することによって導体に電流が発生する現象。

誤差: 測定値の真値からの偏倚 (差または比率)。ただし、真値は、その性質上、確定できない場合がある。「ランダム誤差」、「システムチック誤差」の項参照。

立ち下り時間: 信号の大きさが、ピークツーピーク値の上位のパーセント値 (通常 90%) から下位のパーセ

ント値 (通常 10%) まで下降するのに要する時間。「立ち上り時間」も参照。

ファラデーカップ: ファラデーカップ (ファラデーケージ、アイスペイルと呼ぶこともある) は、シート状の金属や導電性メッシュで作られた囲い。ファラデーカップは、一方が他方の内側に配置された 2 つの電極から構成され、両者は絶縁材で隔離されている。内側の電極をエレクトロメータへ接続し、外側の電極をグランドラインへ接続する。帯電した物体を内側電極の内部に置くと、すべての電荷が測定装置へ流れ込む。内部が空の、導体で囲まれて閉じた空間の電場はゼロなので、カップの内側に置かれた物体は外部の場 (大気電場や漂遊電場) から遮蔽される。これにより、物体の電荷だけを正確に測定することが可能になる。

フィードバック ピコアンメータ: 演算増幅器でフィードバック回路を構成し、入力電流を電圧に変換して測定する高感度アンメータ。

フローティング: 接地ラインと特定の計測器または回路の間にコモンモード電圧が存在する状態。(回路の Low は接地電位に固定されていない)

4 点プローブ: 4 点のプローブを同一直線上に並べた抵抗率測定法であり、抵抗率未知の物質上に 4 個のプローブを等間隔で配置する。このプローブ配列を物質の中央部に配置する。この方法では外側の 2 個のプローブに既知量の電流を流して内側の 2 個のプローブで電圧を検知する。抵抗率は下式によって計算される:

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \times t \times k$$

ここに: V = 測定された電圧値 (V)、 I = ソース電流 (A)、 t = ウェーハの厚さ (cm) であり、 k はウェーハ直径とプローブの比率、およびウェーハ厚みとプローブ同士の隔たりの比率から決まる補正係数。

4端子抵抗測定: 2 本のリードを使用して未知抵抗に電流を流し、別な 2 本のリードを使用して抵抗両端の電圧降下を検知する測定方法。4端子構成は特に小さな抵抗値の測定において効果を発揮する。

はじめに	2
ナノテクノロジー試験の挑戦	2
電気測定での注意事項	5
電気ノイズ	6
ソースメジャー計測器	7
パルス法	8
自己発熱の予防	9
アプリケーション例: グラフェン	10
まとめ	12
用語集	13
選定ガイド	16
さらに詳しくは	17

製品・アプリケーションに関するご質問

用語集 (続)

フラーレン: 60 個の炭素原子で構成される、ほぼ球状で中空な炭素分子 C60 を指す。球面は炭素原子のみからなる 6 角形と 5 角形のメッシュで構成されており、これが建築家 R. Buckminster Fuller の設計になるジオデシックドームを連想させることから、この名前と呼ばれることが多い。「バックミンスターフラーレン」または「バッキーボール」と呼ばれることもある。

グラウンドループ: 2 台以上の計測器がグラウンドバス上の異なる地点に接続されてアースまたは電源ライングラウンドに接続されることにより生ずる状況。グラウンドループは望ましくないオフセット電圧やノイズを発生させる原因になる。

ガード: 電流のリークによる誤差を減らし、応答時間を短縮するために使用される方法。ガードは、高インピーダンス信号リードを囲む低インピーダンスソースによって駆動される導体によって形成される。ガードの電圧は信号電圧の電位、またはそれに近い電位に保たれる。

ホール効果: 導体を磁場に置いたときに、その導体にまたがって横方向電圧が発生する現象。この電圧を測定することにより、シリコン中のキャリアのタイプ、濃度、移動度を決定することができる。

高インピーダンス端子: 予期される浮遊電流 (たとえば、1 μ A) と信号源抵抗を乗算した値が、計測器に要求される電圧測定感度を上回る端子。

入力バイアス電流: 計測器の内部回路とバイアス電圧が原因となって計測器入力端に流れる電流。

入力インピーダンス: 入力端子において測定されるシャント抵抗とキャパシタンス (またはインダクタンス)。ただし、入力バイアス電流やオフセット電流による影響は含めない。

入力オフセット電流: 差動の計測器にゼロを指示させるために入力測定端子に供給しなければならない 2 つの電流の差を入力オフセット電流と呼ぶ (入力電圧、オフセット電圧はゼロとする)。非公式には、入力バイアス電流を指すこともある。

入力オフセット電圧: 装置の出力指示値をゼロとするために入力端子間に直接印加しなければならない

電圧値 (バイアス電流は抵抗径路を介して供給されるものとする)。

入力抵抗: 入力インピーダンスの抵抗成分。

絶縁抵抗: 絶縁のオーミック抵抗。絶縁抵抗は湿度の上昇とともに急速に低下する。

ジョンソンノイズ: 電荷キャリアの熱運動によって抵抗体内部に発生するノイズ。白色ノイズスペクトルを持ち、その強度は抵抗の大きさ、温度、および帯域幅によって決定される。

リーク電流: 電圧を印加したときに、絶縁抵抗を通過して流れる (漏出する) 誤差電流。低電流導体とその近傍の電圧源との間を隔離する高抵抗径路であっても、無視できないリーク電流が流れることがある。

長期確度: 90 日間、またはそれを超える期間内に超えてはならない誤差リミット。長期確度は指示値 (またはソース値) に対するパーセント値に、指定された温度範囲にわたるカウント数を加算した形で表現される。

最大許容入力: 測定端子間 (High-Low 間) に、計測器の損傷を引き起こさず印加可能な最大 DC 電圧/電流 + ピーク AC 電圧/電流。

MEMS: マイクロ電子機械システム (Microelectromechanical system)。刺激にตอบสนองして物理的な力を発生させることができる (センサとアクチュエータを有する) マイクロメータスケールの微小システム。シリコン系 IC 製造に用いられるのと同様のリソグラフィ技術を応用して作られることが多い。

マイクロ・オームメータ: 低抵抗測定を目的として最適化されたオームメータ。マイクロ・オームメータは標準的に 4 端子測定法を用い、低レベル測定での確度を上げるための機能を備えている。

分子エレクトロニクス: 原子レベルの精密さとナノメートルレベルのサイズで特徴付けられるエレクトロニクスデバイス。特に、今日の半導体デバイスが連続体としての材料特性を用いるのに対して、個別分子を構成部品として利用するデバイスを指す。

分子マニピュレータ: 原子レベルでの精密な位置決めが可能な近接プローブを、チップ上にマウントした分子結合サイトを組み合わせる装置。これにより、位置を特定して合成を行うことにより複雑な構造を構築することができる。

分子製造: 分子機械を使用する製造技術であり、位置を特定して化学的な合成を行うことにより製品または副生成物を分子単位でコントロールする。

分子ナノテクノロジー: 製品または副生成物を分子単位で完全かつ安価にコントロールすることにより物質の構造 (分子機械を含む) を作り出すプロセス、および、そのプロセスを通して得られる製品。

MOSFET: 金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)。極めて高い入力抵抗で特徴付けられる単極性デバイス。

ナノ: 10 億分の 1 (1/1,000,000,000) を意味する接頭語。

ナノエレクトロニクス: ナノメータスケールで実現されるエレクトロニクス。現在の半導体デバイスに似た機能を持つ分子エレクトロニクスおよびナノスケールデバイスを指す。

ナノテクノロジー: 原子または分子スケールの精度を持つデバイス製造技術。デバイスを特徴付けるスケールが 100 ナノメータ (nm) 以下であるものをナノテクノロジー製品と見なす。ナノメータ (10 億分の 1 メートル、10⁻⁹m) は単一分子の大きさを一般的に表現するために最も適した長さ単位。

ナノボルトメータ: ナノボルトレベルでの感度を持つように最適化された電圧計 (一般的には、熱起電力の小さなコネクタ、オフセット補償などを使用)。

ノイズ: 希望する信号に重畳する望ましくない信号。

ノーマルモード除去比 (NMRR): 計測器の入力端子にまたがって入り込む干渉を除去する能力。通常は、指定された周波数 (たとえば、AC 電源ライン周波数) における除去能力をデシベル値で表す。

ノーマルモード電圧: 計測器の High および Low 端子間に印加される電圧。

オフセット電流: 信号が印加されていない状態の回路で生成する電流。回路内に存在する摩擦電気効果、圧電効果、電気化学的效果などの原因によってオフセット電流が発生する。

過負荷保護: 入力端子に過大な電流/電圧が印加された場合に計測器を保護するための回路。

ピコアンメータ: 微弱電流の精密測定のために最適化されたアンメータ (電流計)。一般的には、フィードバックアンメータを意味する。

圧電効果: ある種の絶縁体に機械的応力を印加すると電流が発生する現象を表す用語。

精度: 測定における不確実性からの自由度を表す。リピータビリティや再現性を説明する文脈で使用されることが多く、確度 (accuracy) とは区別しなければならない。「不確実性」の項も参照。

量子ドット: 原子のように 1 個または数個の電子をその内部に収容することが可能であり、電子がその内部で離散的なエネルギー状態を取り得るナノスケールの物体 (通常、半導体アイランド)。量子ドットはこれまで「人工原子」と呼ばれてきた。

ランダム誤差: ランダム誤差の影響を受ける測定の場合、多数回の測定の平均値が真値と一致する。「システムチック誤差」の項も参照。

レンジ: 測定または印加可能な信号値の連続的な幅を意味する。双極性の装置の場合は、レンジは正と負の値を両方含むことがある。

指示値 (読取り値、読値): 入力信号を表す値として表示される数字。

読取り速度: 計測器指示値が更新される速度。読取り速度は、指示値が表示されてから次回更新されるまでの時間の逆数。

相対確度: 2 次標準を基準として表現した測定器の確度。「絶対確度」の説明を参照。

はじめに	2
ナノテクノロジー試験の挑戦	2
電気測定での注意事項	5
電気ノイズ	6
ソースメジャー計測器	7
パルス法	8
自己発熱の予防	9
アプリケーション例: グラフェン	10
まとめ	12
用語集	13
選定ガイド	16
さらに詳しくは	17

製品・アプリケーションに関するご質問

用語集 (続)

リピータビリティ: 同一条件下で逐次的に測定を行ったときの、測定値の一致の良さを示す尺度。

再現性(Reproducibility): 同じ物理量を対象として、規定の条件変更を行って取得した測定値間の一致の良さを示す尺度。

分解能: 入力 (または出力) 信号の、測定可能 (または出力可能)、かつ表示可能な最小部分。

応答時間: 測定器の場合は、その測定器にステップ状に変化する入力を印加したときに、当該信号の大きさを定められた精度で表示できるまでに要する時間。印加装置の場合は、出力を変化させるプログラムの実行開始後、実際に変化後の出力が出力端子に現れるまでに要する時間。「セトリング時間」としても知られる。

立ち上り時間: 信号の大きさが、ピークツーピーク値の下位のパーセント値 (通常 10%) から上位のパーセント値 (通常 90%) まで上昇するのに要する時間。「立ち下り時間」も参照。

感度: 測定可能、かつ表示可能な最小量。

セトリング時間: 測定器の場合は、その測定器にステップ状に変化する入力を印加したときに、当該信号の大きさを定められた精度で表示できるまでに要する時間。印加装置の場合は、出力を変化させるプログラムの実行開始後、実際に変化後の出力が出力端子に現れるまでに要する時間。「応答時間」としても知られる。

シールド: 測定対象である回路を内部に包む金属製囲い、または電線の導体を包み込む金属製スリーブ (同軸、または 3 軸ケーブル) などを意味し、その目的は干渉、相互作用、漏洩を低減させることにある。通常、シールドは接地されるか、または入力 Lo に接続される。

シャントアンメータ: 入力電流をシャント (分流) 抵抗に流して電圧へ変換することによって測定を行うアンメータ。シャントアンメータでは入力電圧降下が必然的に大きくなるため、フィードバックアンメータよりも感度が低くなる。

シャントキャパシタンス負荷: 入力端子間にキャパシタンスが接続されることによる測定への影響。たとえば、ケーブルやフィクスチャなどがキャパシタンス負荷の原因になる。シャントキャパシタンスは立ち上り時間とセトリング時間を長くする。

短期精度: ある一定の、比較的短い期間 (たとえば、24 時間) の連続運転で超えてはならない誤差限界。特に指定されない限りは、この期間内にゼロ調節その他の調節操作は行われないものとする。短期精度は指示値 (またはソース値) に対するパーセント値に、指定された温度範囲にわたるカウント数を加算した値として表現される。

単一電子トランジスタ: 電子のトンネル効果をコントロールして電流を増幅することにより実現されるスイッチングデバイス。SET (単一電子トランジスタ) は 1 つの電極を共有する 2 つのトンネル接合によって構成され、トンネル接合は非常に薄い ($\sim 1\text{nm}$) 絶縁体で隔離された 2 つの金属片によって作られる。一方の金属電極の電子が他方の電極へ移動する方法は、絶縁体をトンネル効果で通り抜ける以外にない。トンネル効果による移動は孤立して起こる現象なので、トンネル接合を通過する電荷の流れは e (1 個の電子電荷) の倍数で起こる。

ソース (信号源) インピーダンス: ソース (信号源) が、抵抗性、容量性、誘導性抵抗の組み合わせとして測定器の入力端子に示すインピーダンス。

ソースメジャーユニット (SMU): DC 電圧/電流の印加 (ソース) と測定 (メジャー) の両方の機能を持つ電子計測器。一般的に、SMU は「電圧を印加して電流を測定」、または、「電流を印加して電圧を測定」の 2 通りのモードで動作する。ソースモニターユニット、刺激-測定ユニットと呼ばれることもある。

ソースメータ: ソースメータ[®]は多くの面でソースメジャーユニットに非常に良く似ている。たとえば、電流と電圧の印加と測定に対応し、掃引機能を持つことにおいて両者は共通する。ソースメータは、測定結果を電圧と電流で表示できることに加えて、直接抵抗値を表示する機能を備えている。ソースメータは汎用、高速製造試験アプリケーションを目的として設計されている。また、ソースメータは中間レベルから低レベル測定用の信号源として、あるいは研究アプリケーション用として使用できる。

ソース抵抗: ソース (信号源) インピーダンスの抵抗成分。「テブナン等価回路」の項も参照。

スピントロニクス: 電子の電荷だけでなく、電子の持つスピンを何らかの方法で利用するエレクトロニクス。

標準電池: 実験室において、電圧の基準として用いられる電気化学セル (電池)。

超伝導体: 抵抗がゼロである導体。通常、このような材料は極低温においてのみ超伝導性を発現する。

スイッチカード: 相互に絶縁されて独立に動作するリレーを使用して、それぞれのチャンネルの入力と出力を切り換えることのできるカード。

スイッチングメインフレーム: 印加、測定計測器と被試験デバイス間で信号の接続と切り換えを行うスイッチング装置。スキャナ、マルチプレクサ、マトリックス、プログラムスイッチなどもメインフレームと呼ぶことがある。

システムチック誤差: システムチック誤差が存在する系では、測定を多数回行って平均しても、その値は真値から偏倚を示す。「ランダム誤差」の項も参照。

温度係数: 温度が変化することによって計測器指示値 (または、ソース値) が受ける影響を表す尺度。温度係数は指示値 (またはソース値) に対するパーセント値に、温度 1 度の変化に対応するカウント数を加算した値として表現される。

抵抗の温度係数: 材料またはデバイスの抵抗の温度による変化率。通常は $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ で表される。

熱電的 EMF: 測定回路内に存在する温度差によって発生する電圧、または、材質の異なる導体同士を接合させたことに起因する電圧。

テブナン等価回路: 複雑な 2 端子線形回路網の解析を簡単にするために使用される回路。テブナン等価電圧は開回路電圧と同じであり、テブナン等価抵抗は開回路電圧を短絡電流で除算した値と一致する。

伝達精度: 一定の温度範囲内で、一定の時間範囲の中で行われた 2 回の測定の変化を ppm で表した値。「相対精度」、「短期精度」の項も参照。

摩擦電気効果: 導体と絶縁体の間の摩擦が生成する電荷によって電流が発生する現象。

トリガ: 計測器の機能を起動させる契機として外部から与えられる信号。入力信号、フロントパネル操作、外部トリガパルス、IEEE-488 バスの X, talk, GET コマンドなどがトリガとして使用される。

2端子抵抗測定: 同じ組の試験リードを使用してソース電流の印加と電圧検知を行う測定方式。

不確実性: 測定において起こり得る誤差の推定値。言い換えれば、実際の値からの偏倚推定値。

van der Pauw 測定: 任意形状のサンプルの抵抗率測定に使用できる測定方法。

入力電圧降下: アンメータの入力端子間に発生する電圧降下。

電圧係数: 電圧を印加したことによる抵抗値の変化。通常は印加する単位電圧あたりのパーセント値、または ppm/V で表現される。

ウォームアップ時間: 測定器への電源投入後、基準条件下で規定精度が得られるまでに必要な時間。

ゼロオフセット: 測定器の入力端子を短絡 (電圧計の場合)、または開放 (電流計の場合) したときに表示される指示値。

はじめに	2
ナノテクノロジー試験の挑戦	2
電気測定での注意事項	5
電気ノイズ	6
ソースメジャー計測器	7
パルス法	8
自己発熱の予防	9
アプリケーション例: グラフェン	10
まとめ	12
用語集	13
選定ガイド	16
さらに詳しくは	17

製品・アプリケーションに関するご質問

選定ガイド: お客様の印加/測定アプリケーションに最適なケースレーの ナノテクノロジーソリューション

増大の一途を辿るナノテクノロジー研究と生産試験の現場で多数のケースレー製品が使用されています。ここに示すのは、ナノテクノロジーに関わる研究と測定タスクに弊社製品を適用できるアプリケーションのほんの一部にすぎません。ケースレーの計測製品は、低レベル信号の印加と測定を必要とするお客様に、より正確で、かつコスト効率の良い試験を提供します。

電流パルス印加・測定をシームレスに制御する必要がありますか？

6221 型 精密AC/DC電流源と 2182A 型ナノボルトメータを組み合わせると、両者がまるで単一の計測器であるかのように機能します。この組み合わせが高速パルスモード測定を実現します。



高抵抗ナノワイヤの研究をされていますか？

6430 型サブフェムトアンペア リモートソースメータ®の低いノイズとドリフト性能がこの目的に理想的です。6430 型は 400aA ($400 \times 10^{-18} \text{A}$) という高感度で電流を測定します。



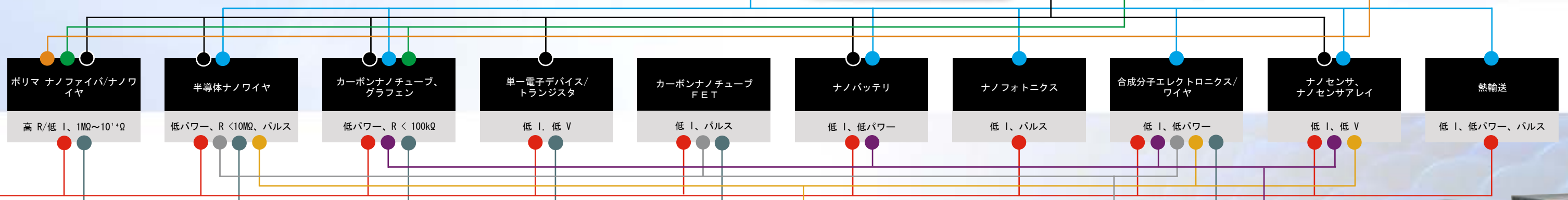
高抵抗ナノ材料の特性評価が必要ですか？

6517B 型エレクトロメータ/高抵抗メータは 1kV ソースを内蔵しています。さらに、200Ω の入力抵抗を持ち、低電流測定感度に優れたこの製品は、お客様の使用目的に理想的です。



経済的に行える低電流測定をお望みですか？

入力電圧降下 $200 \mu\text{V}$ という性能を持ち、かつコスト効率の良い 6485 型ピコアンメータならば、ソース電圧が非常に低い回路であっても低電流を正確に測定します。6487 型ピコアンメータ/電圧源は高抵抗/抵抗率測定に必要な 500V バイアスソースを供給します。



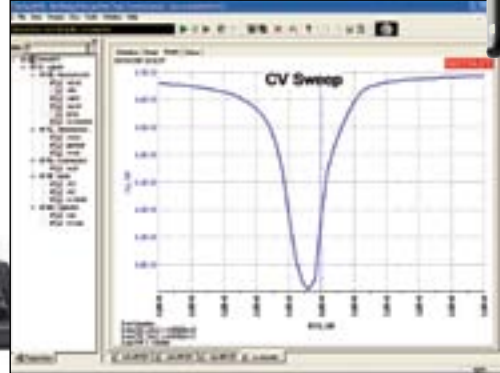
複数のチャンネルで印加と測定が必要ですか？

全ての機能を統合した 4200 型半導体特性評価システムは、1台で、根幹となる 3 タイプの測定 (DC-IV、ACインピーダンス、過渡 I-V) を簡単な操作で実現します。ナノ材料の研究、開発、特性評価、製造にいたる多くの段階でご使用いただけます。



移動度、キャリア密度、デバイス速度の特性評価が必要ですか？

4210 型 CVU オプションは、有効なキャパシタンス-電圧 (C-V) 測定を迅速かつ簡単に行い、それから各種パラメータを導き出します。直観的なポイント&クリック設定、完備した配線、そして内蔵の要素モデルなど操作面も充実しています。



パルスのより厳密なコントロールが必要ですか？

3400 型パルス/バターンジェネレータシリーズは、3ns という狭い幅の電圧パルスを出し、さらに 2ns という短い立ち上がり時間と立ち下り時間を独立してコントロールします。



発熱の問題でお困りですか？

4200 型 SCS の 4225-PMU オプションは、異なる目的のパルス I-V 試験を様々なデバイスを対象として実行します。デバイスの自己発熱を防止するため、DC 信号ではなく幅の狭いパルス/低デューティサイクルパルスを使用して実行する測定法もその中の一つです。



多数のデバイスを試験する必要がありますか？

2600A 型システムソースメータ®シリーズを使用することで様々なタイプの試験 (精密 DC、パルス、低周波数 AC ソースメジャー試験) を迅速、簡単、かつ経済的に実行することができます。チャンネル数の増減からアプリケーションニーズの変化への対応に至るまで、このシリーズは殆ど無限と言ってもよい柔軟性とスケラビリティをシステムに与えてくれます。

1 チャンネルだけで十分ですか？

2400 型ソースメータシリーズは、どれもが必要な機能を完備した単一チャンネルの DC パラメータ試験装置です。お客様のニーズに最適なレンジと機能を備えた計測器をこのシリーズから選択してください。2430 型はプログラムにより最短 5ms 幅までの個別パルス、またはパルス列として発生させることができます。

製品・アプリケーションに関するご質問

さらに詳しくは

ナノテクノロジー測定ハンドブック:「A Guide to Electrical Measurements for Nanoscience Application」は、ナノスケール材料とデバイスのより効率的な試験方法を理解していただくためにケースレーが提供している資料の1つです。このハンドブックは、ナノ材料とデバイスを対象として低レベル精密 DC 測定とパルス測定を実施するための実際的な情報源として役立ちます。130 ページ強のボリュームを持つこのハンドブックは参照資料として、また研究室で観察される低レベル現象の理解を助ける資料として編纂されており、低レベル電流、高抵抗、低電圧、および低抵抗測定に関わる理論面および実際面の情報が盛り込まれています。ここをクリックしてダウンロード版のハンドブックを請求してください (Adobe Reader が必要です)

本 e-handbook で使用した資料の一部はケースレー「ナノテクノロジー測定ハンドブック」(初版、Keithley Instruments, Inc 刊、2007) の内容を複製したものです。

ナノテクノロジーに関するその他の情報源

TryNano.org は学生とその教師、スクールカウンセラーのための情報源として、IEEE、IBM、New York Hall of Science が合同で一般の人たち向けに設立した組織です。TryNano.org は IEEE Nanotechnology Council および IEEE Educational Activities Board の主唱による取り組みであり、IEEE New Initiatives Committee から資金援助を得ています。

はじめに	2
ナノテクノロジー試験の挑戦	2
電気測定での注意事項	5
電気ノイズ	6
ソースメジャー計測器	7
パルス法	8
自己発熱の予防	9
アプリケーション例: グラフェン	10
まとめ	12
用語集	13
選定ガイド	16
さらに詳しくは	17

製品・アプリケーションに関するご質問

ご連絡先

何でもお気軽にお問い合わせください。

電話： 03-5733-7555

FAX： 03-5733-7556

Eメール： info.jp@keithley.com

Webによる問い合わせ： <http://www.keithley.jp/contact>



仕様は改良のために予告なく変更されることがあります。
ケースレーの商標と商標名は Keithley Instruments, Inc. に帰属します。
それ以外の商標と商品名はそれぞれ該当する企業に帰属します。

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

ケースレーインスツルメンツ株式会社

本 社： 〒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 TEL:03-5733-7555 FAX:03-5733-7556

大阪オフィス： TEL: 06-6396-1630 FAX:06-6396-1634

Web site : www.keithley.jp ・ E mail : info.jp@keithley.com

© Copyright 2011 Keithley Instruments, Inc

© Copyright 2011 Keithley Instruments, Inc.

No. 3114J

02.15.11