

**Tektronix**<sup>®</sup>

# 4225-PMU パルス測定ユニットと 4225-RPM リモート／プリアンプ・スイッチ・ モジュールによる低電流パルスI-V測定

アプリケーション・ノート



**KEITHLEY**  
A Tektronix Company

## はじめに

高速電圧パルスを印加し、同時に低電流を測定する試験は多くの半導体デバイスのアプリケーションにとって重要である。デバイスの特性評価にDC信号ではなくパルスI-Vを使用することによって、自己発熱の影響を調査及び排除すること、もしくは電荷トラップによる測定における電流ドリフトを最小限に抑えることが可能になる。過渡I-V測定によって、技術者または研究者は、時間ドメインにおける電流または電圧波形の取得、または試験回路の動的な評価が可能になる。

4225-PMU Pulse Measure Unit オプションを搭載した4200A-SCSパラメータ・アナライザは、超速I-V測定をサポートしている。4225-RPM リモートプリアンプ/スイッチ・モジュール (図1) を追加すると、PMUの電流範囲が100nAフルスケールまで拡張され、低電流パルス測定を行うことができる。



図1. 4225-RPM リモートプリアンプ/スイッチ・モジュール

図2のグラフは、RPMを有するPMUの低電流性能を示す。このグラフにおいて、オープン回路オフセット電流が0Vにおける時間の関数として表示され、100nAレンジで800 $\mu$ sのパルス幅を10パルス・アベレージングで測定が行われている。

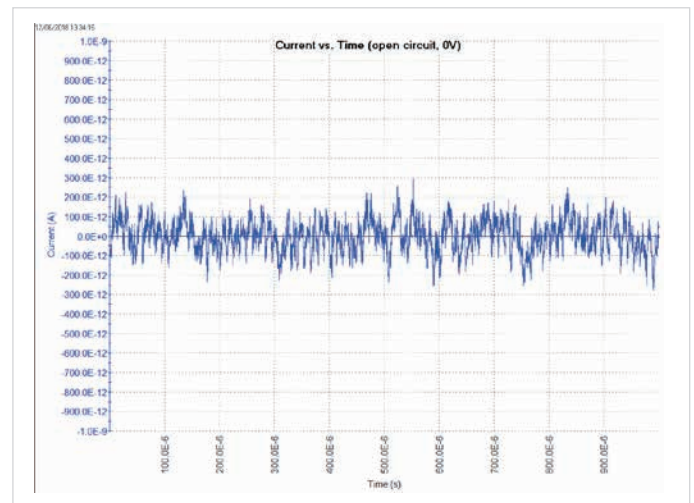


図2. 0V印加時での100nAレンジのオフセット電流 (10/パルスアベレージング)

半導体デバイスの測定に低電流の測定が必要とされる場合、2つのRPMを有するPMUを使用することにより、以下の機能及び測定が可能となる。

- 2つの独立且つ同期したチャンネルでのパルスI-V印加および測定
- $\pm 800\text{mA}$  から  $\pm 100\text{nA}$  までの広い電流測定レンジ
- 全電流レンジの自動レンジ切り替え – ダイオードなどの広いレンジの電流応答を有するデバイスでのI-V試験に理想的な機能
- DC I-V、C-V、パルスI-Vを切り替える機能
- 容易にテスト構築と実行が行える対話型ソフトウェアを内蔵

このアプリケーションノートは、超速I-Vを定義し、時間-測定ウィンドウにおける電流測定の基本的な限界を説明し、低電流超速I-V測定を行うための技法を解説する。

## 超速I-Vとは？

4225-PMUは、パルスI-V、過渡I-V、およびパルス印加の3種類の超速I-Vテストが実行できる。これらの3つのモードを図3に示す。

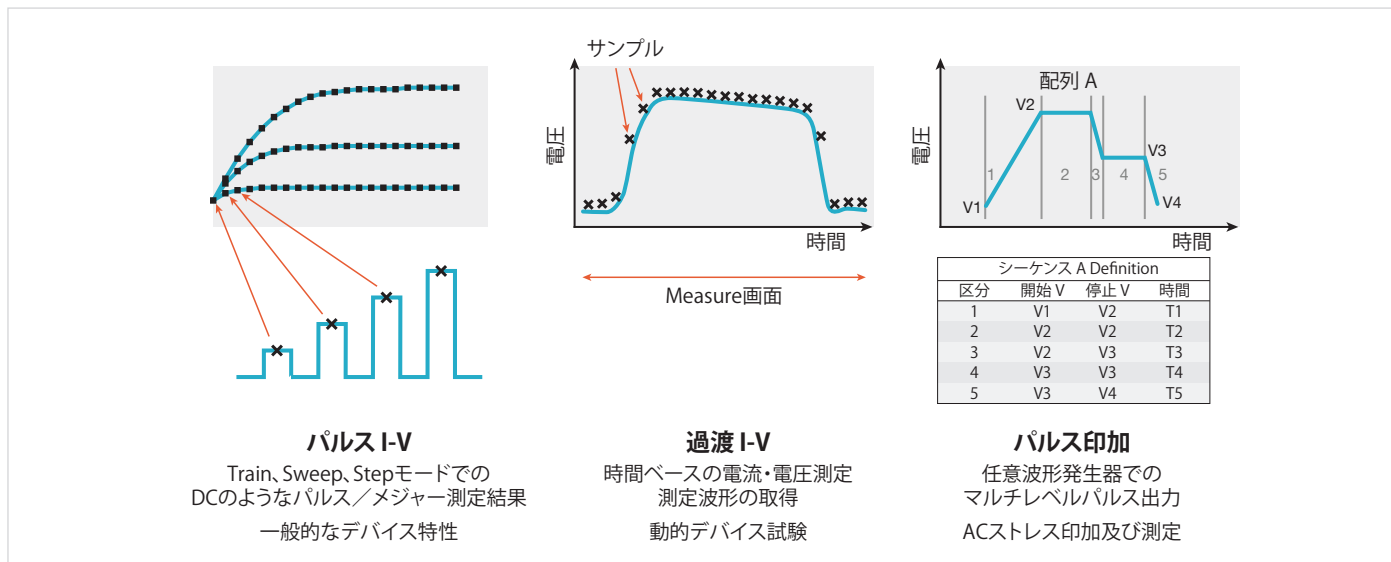


図3. 4225-PMU超速I-Vモジュールの3つの動作モード

**パルスI-Vとは**、パルス印加およびそれに対応する高速の時間ベースの測定による任意の試験を指し、DCに似た測定結果を提供する。電流および/または電圧の測定は、測定ウィンドウで取得された読み取りの平均である。この測定値の平均を“spot mean”と呼ぶ。

**過渡I-V**または波形キャプチャとは、時間ベースの電流および/または電圧測定であり、一般的にはパルス波形の取得である。過渡測定は、通常、時間的に変化するパラメータを評価するために使用される単一のパルス波形である。

**パルス印加は**、内蔵Segment ARB®機能を使用してユーザ定義の2レベルまたはマルチレベル・パルスを出力すること、または任意に定義された波形を出力することを含んでいる。

## 高速低電流測定の基本限界

電流測定の基本的な限界は、ソース抵抗におけるJohnson-Nyquistノイズである。いずれの抵抗においても、熱エネルギーは荷電粒子の運動を生じさせる。この電荷移動は、熱雑音とも呼ばれる雑音をもたらす。この動きから有効電力(P)は、次式で与えられる。

$$P = 4kTB$$

式中:k = ボルツマン定数 (1.38 × 10<sup>-23</sup> J/K)

T = 絶対温度 (K)

B = ノイズ帯域幅 (Hz)

抵抗 (R) によって発生するジョンソン電流ノイズ (I) は、以下のようになる。

$$I = \frac{\sqrt{4kTRB}}{R} \text{ アンペア、rms}$$

全ての電流源は内部抵抗を有し、従ってそれらはジョンソンノイズで表される。図4は、室温 ( $T = 290\text{K}$ ) における、測定時間ウィンドウに対する種々の抵抗により生成される電流ノイズを示す。秒 (s) 単位の測定ウィンドウは、帯域幅 ( $B$ ) として次式で定義される。

$$B = \frac{1}{(2 \times \text{メジャーウィンドウ})}$$

アプリケーションが、DUT抵抗を表す線より下の電流測定を必要とする場合、抵抗器内のジョンソンノイズの影響により、測定を行うことは不可能である。ソース抵抗の温度を下げることにによりノイズレベルを下げるができる。

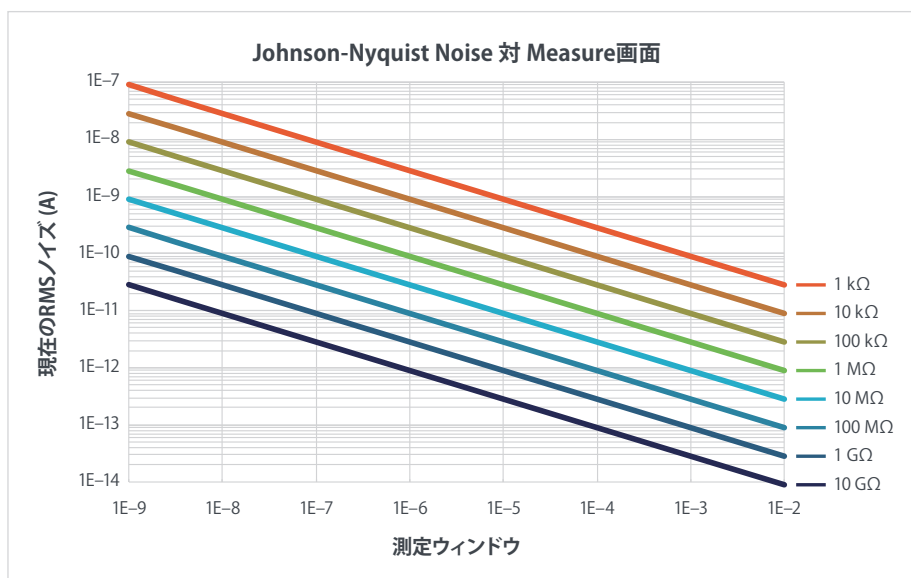


図4. 種々のソース抵抗における電流ノイズ対測定ウィンドウ (current noise vs. measure window)

## 高インピーダンス測定法

最適な低電流および高インピーダンスのパルスI-V測定を行うには、以下のセクションで解説する適切な測定手法を使用しなければならない。

### 接続補償を用いた電流オフセットの補正

PMUと被測定デバイス間の接続およびケーブル長によって生じるオフセット電流誤差は、内蔵されている接続補正機能を使用して簡単に補正できる。接続補正を有効にすると、測定されたオフセット電流値は、各電流測定に適用される。PMUオフセット電流補正は、次の2つのプロセスからなる。

1. 各電流レンジの電流オフセットをオープン回路で取得する。補正中はプローブをアップするか、またはデバイスをテスト・フィクスチャから取り外す必要がある。Clariusでは、画面上部の[ツール]メニューで、[PMU Connection Compensation]を選択する。Measure Offsetを選択し、両チャンネルのすべてのレンジの誤差電流を測定して保存する。
2. オフセット補正データが取得されたら、テスト内でConnection Compensationを有効にする。テスト内の[Configure]ビューから、[Terminal Settings]タブに進み、[Advanced]を選択する。右上隅のOffset Current Correctionを選択する。保存された補正測定値が、後続の読み取り値から自動的に減算される。

図5は、オフセット補正を適用した場合と適用しない場合のパルスI-V曲線の一例を示す。

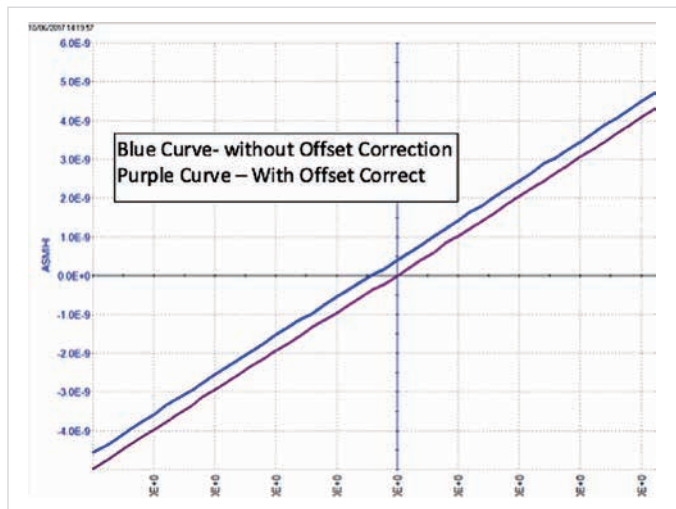


図5. オフセット補正の有無での1GΩ抵抗のパルスI-Vスイープ

最適な性能を得るためには、温度や湿度の変化など、接続設定が変更されたり、接続が乱れたりするたびに、接続補正を実施する。

### “Low Side” 測定手法

高インピーダンスに対する超速IV測定には“Low Side”測定手法を用いる。この方法では、図6に示すように、CH1は電圧印加のみに使用され、CH2は電流測定のために使用される。

CH1が電圧を印加すると、電流の一部がそれぞれデバイス ( $I_{DUT}$ )、ケーブルのリーク抵抗およびキャパシタンス ( $I_{LEAK}$ ) を通って流れる。測定値は、デバイスの電流とケーブルの漏れ電流の両方を含む ( $I_{MEAS} = I_{DUT} + I_{LEAK}$ )。

CH2は、ケーブルの中心導体と外部シールドの両方が同じ電位0Vになるように、出力0Vに設定される。その結果、漏れはケーブルを通して流れず、測定電流はデバイス電流 ( $I_{MEAS} = I_{DUT}$ ) となる。CH2の電流は反対の極性であるため、Formulatorを用いて(-1)を掛ける。CH1ではなくCH2によって測定された電流は、高インピーダンス測定に使用される。

この方法は、(CH1は安定するのを待つ必要があるので)より速い測定を可能にし、ケーブルの漏れおよび長い安定時間に起因する誤差を回避できる。

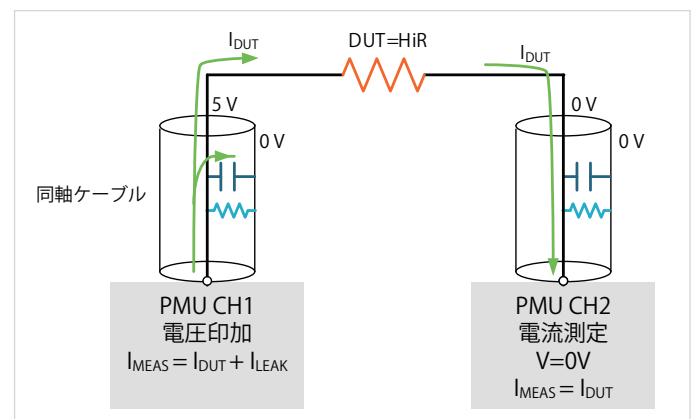


図6. “Low Side” 高抵抗超速IV測定法

図7は、1GΩ抵抗のパルスI-Vスイープの例を示す。グラフは、“Low Side”測定法で測定されている。この曲線は*pulse-high-resistance*と呼ばれ、Clariusのテスト・ライブラリに存在する。

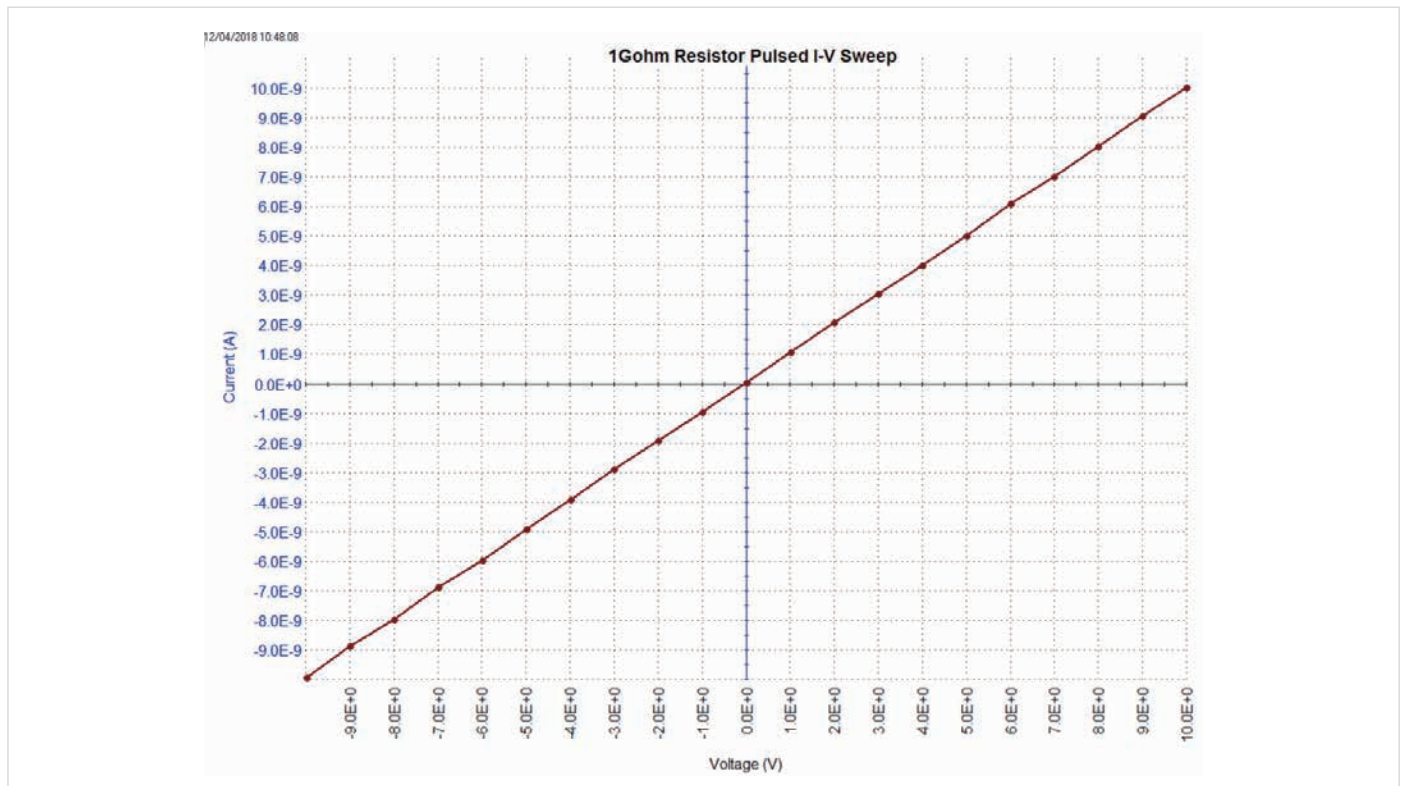


図7. “Low Side”測定法で測定した1GΩ抵抗のパルスI-Vスイープ

### DUT、接続、およびテスト・フィクスチャのシールド

高感度のDC電流の測定に際しては、シールドを使用して不要なピックアップ・ノイズを防ぐ。超速I-V測定は、SMUの場合のようにラインサイクル積分がないため、50/60Hzノイズの影響を受けやすい。

シールドの一例を図8に示す。この場合、抵抗器DUTはシールドされたテスト・フィクスチャ内に配置されている。シールドは、RPMのトライアキシャルコネクタの外側シールドであるPMUのLO端子に接続される。RPMの出力に配置されたトライアキシャルコネクタのタップも使用できる。

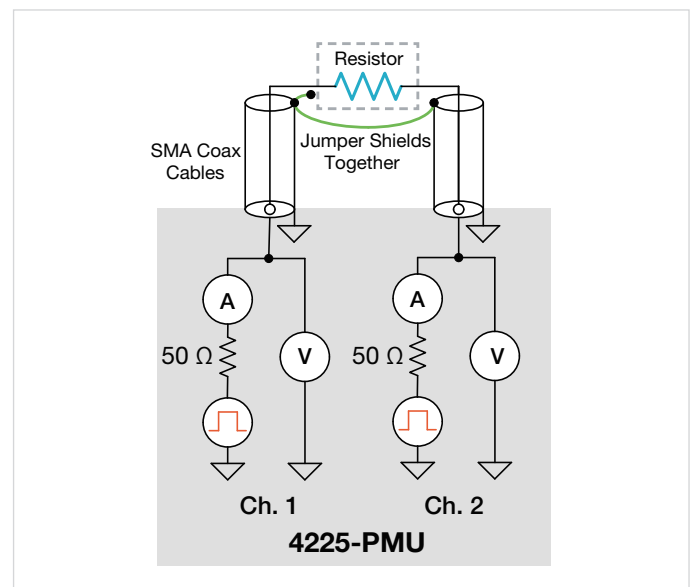


図8. デバイスをシールドする。

## ノイズを低減するためのアベレージング

アベレージングはノイズを低減することができるが、総テスト時間も増加させ、より多くのパルスをDUTに印加することになる。アベレージングは、パルス幅を最小限に抑え、低ノイズを望むユーザーにとって良好である。

Configureビューの[Test Settings]ウィンドウで、[Measure Mode]を[Discrete Pulses]から[Average Pulses]に変更した後、[Number of Pulses to Average]を選択する。パルス設定を図9に示す。

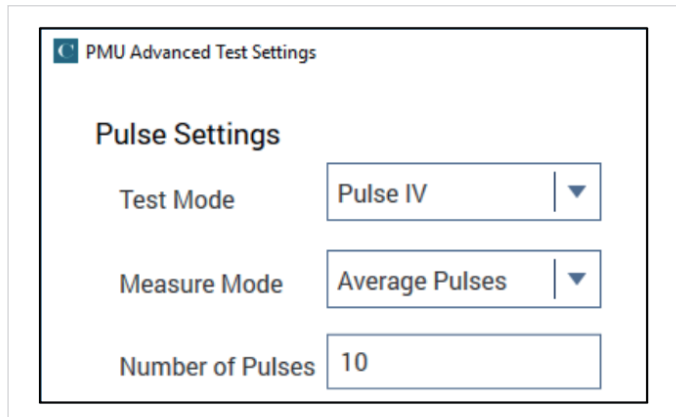


図9. PMU Advanced Test Settingsウィンドウのアベレージングパルス設定

パルスI-VモードでAverage Pulsesを選択すると、返される各読みは平均値となる。このモードは、バースト内のすべてのパルスの平均読み取り値を平均する。平均される読み取りの数が多いほど、ノイズは低くなる。

## テストシステムのウォームアップ

ベスト・プラクティスのためには、4200A-SCSシステムを少なくとも1時間以上ウォームアップし、システム温度が平衡に達するようにする。

## 結論

4225-RPMを有する4225-PMUは、デバイス上で低電流パルスI-V測定を行うために使用することができる。低電流測定の基本的な限界を理解し、適切な技法を使用することにより、高速低電流測定を行うことが可能になる。

**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／ケースレーインズツルメンツ**

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 © 2019, 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。

2019年3月 1KZ-61527-0