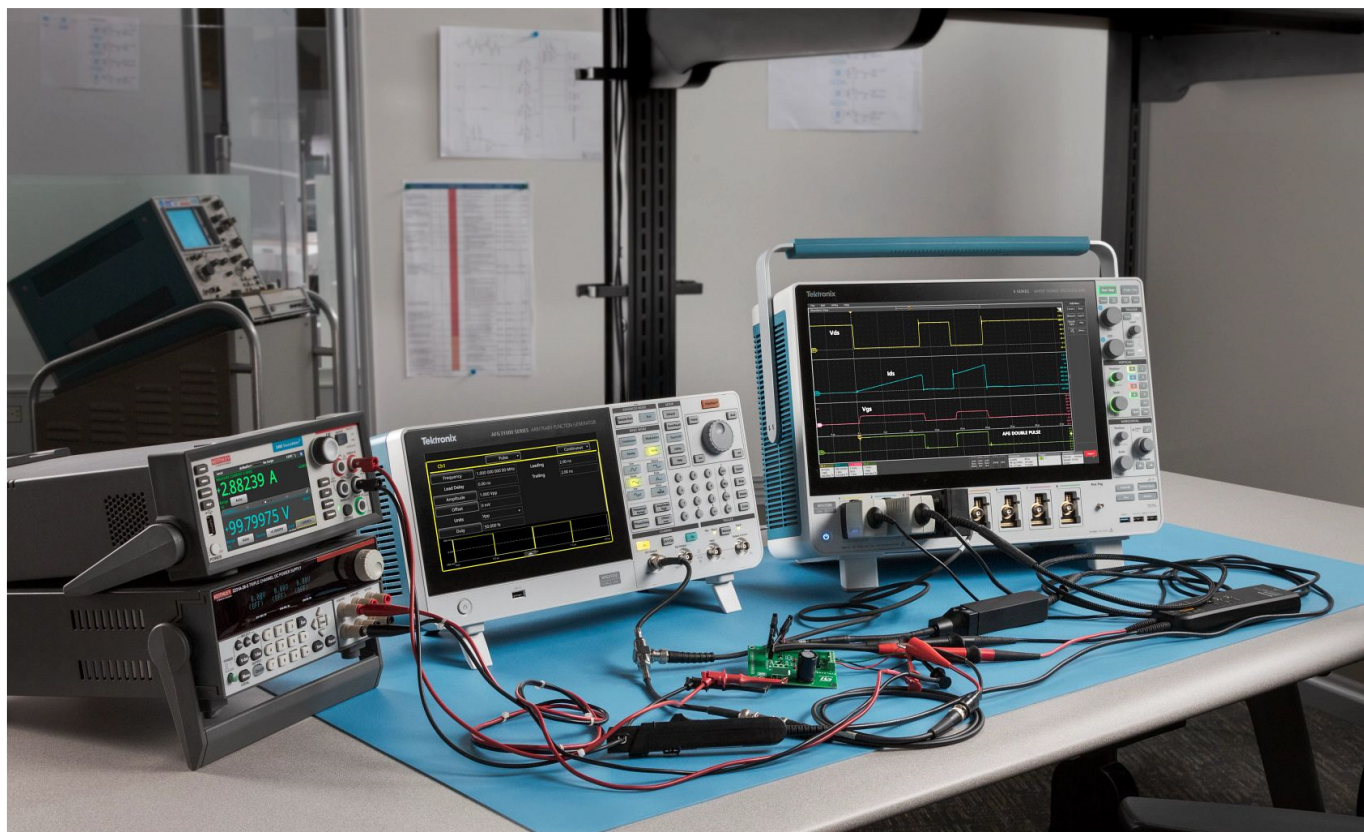


ワイド・バンドギャップ - ダブル・パルス・テスト解析

4/5B/6 シリーズ MSO Opt. 4-WBG-DPT/5-WBG-DPT/6-WBG-DPT アプリケーション・データシート



パワー・エレクトロニクスにおいて使用される半導体材料は、シリコン半導体から、炭化ケイ素（SiC）や窒化ガリウム（GaN）などのワイド・バンドギャップ（WBG）半導体に移行しています。こうした半導体は自動車用途や産業用途において高い電力レベルで優れた性能を発揮するためです。SiC 技術はその高い動作電圧レベルから EV パワー・トレインで活用されており、GaN は主にラップトップやモバイル・デバイス、その他のコンシューマ・デバイスの高速充電器に使用されています。

ダブル・パルス・テスト（DPT）は、ターン・オン、ターン・オフ、逆回復中に重要なパラメータの範囲を測定するための業界標準の技術です。

DPT では、DUT はパワー・デバイスまたはダイオードのいずれかになります。パワー・デバイスには、Si、SiC、GaN MOSFET または IGBT を使用できます。

4/5B/6B シリーズ MSO のワイドバンド・ギャップ・ダブル・パルス・テスト・アプリケーション（オプション WBG-DPT）は、正確なワイドバンド・ギャップ測定を提供し、デバイスとシステムの検証を容易にします。このアプリケーションは、当社のすべての VPI プローブと互換性があり、当社の IsoVu™ プローブと併用することで、SiC または GaN デバイスの隠れたすべてのアーチファクトを回路レベルで発見するのに役立ちます。

このアプリケーションは、JEDEC 規格および IEC 規格に従って測定を自動化します。注釈付きのサイクルごとの解析、カスタム基準レベル設定での柔軟性、構成可能な統合ポイント、DUT 設計に基づいて設定可能な電源プリセットなど、独自の機能を提供します。

WBG-DPT アプリケーションにより、設計者の時間とコストを節約できます。セット・アップと測定が迅速に行えるため、設計エンジニアとテスト・エンジニアはデバッグとターゲットの設計の改善に集中できます。

主な特長と仕様

- JEDEC および IEC 規格に準拠した 18 個のダブル・パルス・テスト・キー測定値
- SiC または GaN デバイスに加え、Si MOSFET および IGBT のテスト機能
- 目的のパルス領域（1 番目、2 番目、または複数パルスなど）を指定し、バグのスカラ結果と相関
- 目的の領域を示す波形上のアノテーション
- 複数パルスのユース・ケースで目的のパルス領域を簡単にナビゲート
- ノイズの多い波形を解析する独自のエッジ調整アルゴリズム
- すべての測定および構成に対するプログラム可能なインタフェースで、テスト・システム・アプリケーションの完全な自動化を実現
- 自動およびカスタムの基準レベルのサポートにより、開始と停止の領域を正確に特定
- ゲート・ソースのヒステリシスレベル設定で間違ったエッジを回避
- 4/5/6 シリーズ B MSO の直感的なドラッグ・アンド・ドロップ・インタフェースを使用して、測定項目をすばやく追加、構成することが可能
- 逆回復（Trr）測定のためのオーバーラップされたプロット
- 検索方向（前方、後方）を追加し、効果的なパルス領域のデバッグを実現
- ダブル・パルス信号生成用のゲート・ドライバ（AFG31000 シリーズ）制御のサポート
- スイッチング解析用のデスキュー機能

本アプリケーションは、次の参照規格に基づいて設計されています。

- ダブル・パルス・テスト（DPT）
 - IEC 60747-9
 - JEP182
 - IEC 60747-8
- ダイオード逆回復
 - JESD24-10
 - IEC 60747-9

以下の測定が実行されます。

- ロー・サイド・スイッチング・パラメータおよびハイ・サイド・ダイオード逆回復測定
- ロー・サイドおよびハイ・サイド・スイッチングパラメータ

テスト・セットアップ

次の概略図は、ダブル・パルス・テストの測定のセットアップを示しています。これは、ロー・サイドとハイ・サイドの両方のスイッチングを備えたパワー MOSFET 用のハーフブリッジ・ゲート・ドライバの例です。ハイ・サイドでは、ダイオード逆回復電流パラメータを測定するために、ソースからゲートへのピンが短絡しています。

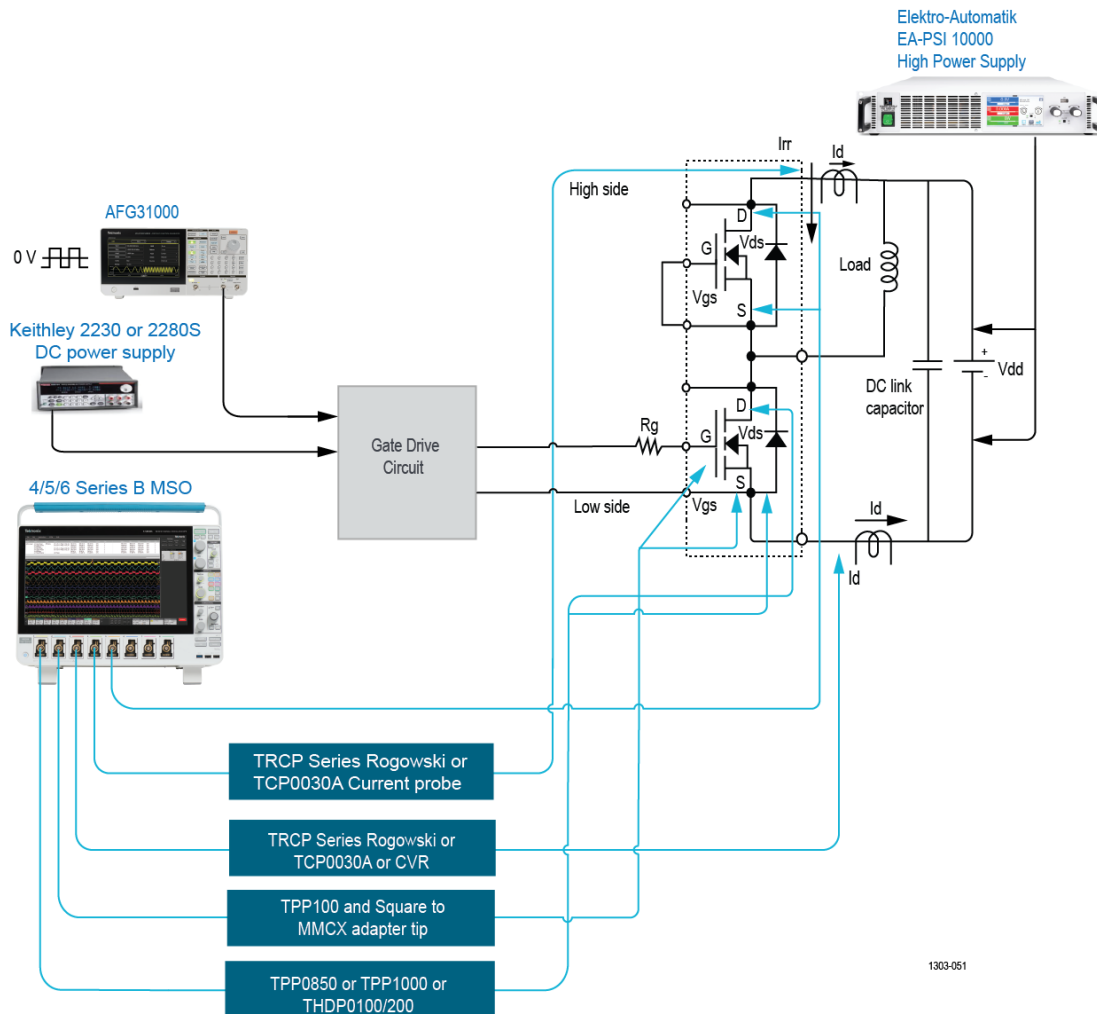
4/5/6 シリーズ MSO は、ダブル・パルス・テストに最適です。ハイ・サイドまたはロー・サイドのスイッチングを個別にテストするには4チャンネルで十分ですが、ゲート電圧をソースおよびダイオードの逆回復パラメータとして監視する場合は、4つ以上のチャンネルが必要になる場合があります。そうしたケースでは6つまたは8つのチャンネルを持つオシロスコープが理想的です。

DPT スwitching・パラメータの場合は、ロー・サイドで V_{ds} 、 I_d 、 V_{gs} を取得する必要があります。同様に、ハイ・サイドとロー・サイドの両方の MOSFET をテストする場合は、ハイ・サイドの V_{gs} をチェックする必要があります（以

下の [ロー・サイド/ハイ・サイド設定のダブル・パルス・テスト](#)を参照してください）。通常、ダイオード逆回復は I_{rr} と V_{rr} を必要とするハイ・サイドで測定されます。テクトロニクスでは、エッジの誤検出を避けるために、ゲート電圧をクオリファイア・ソースとして推奨しています。

ハイ・サイド V_{gs} 測定を正確に行うためには、広い帯域幅、高いコモン・モード電圧、優れた同相除去性能を組み合わせた測定システムが必要です。テクトロニクスの IsoVu システムは、完全なガルバニック絶縁に加えて、1 GHz の帯域幅、2000 V のコモン・モード電圧、および 100 万 : 1 (120 dB) の同相除去比を提供します。これらの仕様を組み合わせることで、このような困難な測定が可能になります。

IsoVu 測定システムは、設計で発生していることの詳細を表示し、測定を安定した、繰り返し可能なものにしてくれます。スイッチ・ノードとハイ・サイドおよびロー・サイド MOSFET 間の寄生によるカップリングは明らかであり、IsoVu 測定システムはこのデッド・タイムを正しく測定するのに十分な帯域幅を備えています。



ロー・サイドの場合:

- CH1: Vds-TPP0850 または TPP1000、または THDP0200
- CH2: Vgs-TPP1000 およびスクエア - MMCX アダプタ・チップ

ハイ・サイドの場合:

- Ch4: Irr-TCP
- Ch5: Vds-THDP

注:



- TPP1000 - 電圧が 400 V 未満の場合は、このプローブを使用します。
- TPP0850 - 適切に接地され、絶縁された電源を使用している場合にのみ使用してください。

ロー・サイドおよびハイ・サイドのダイオード逆回復のダブル・パルス・テスト。

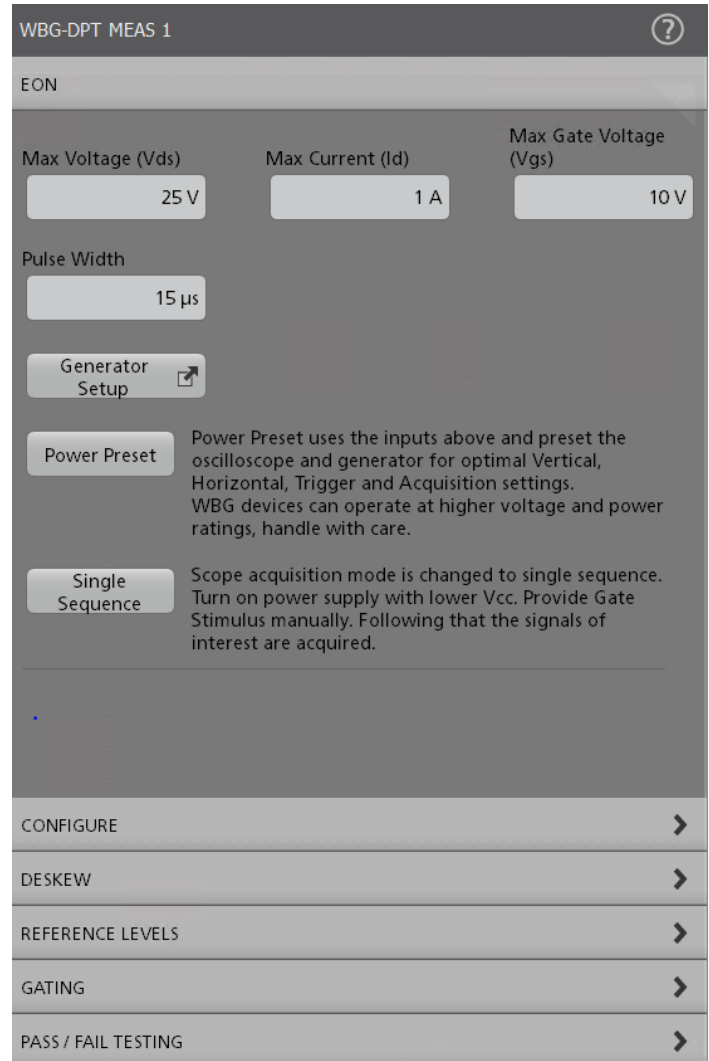
ゲート・ドライバとしての AFG31000

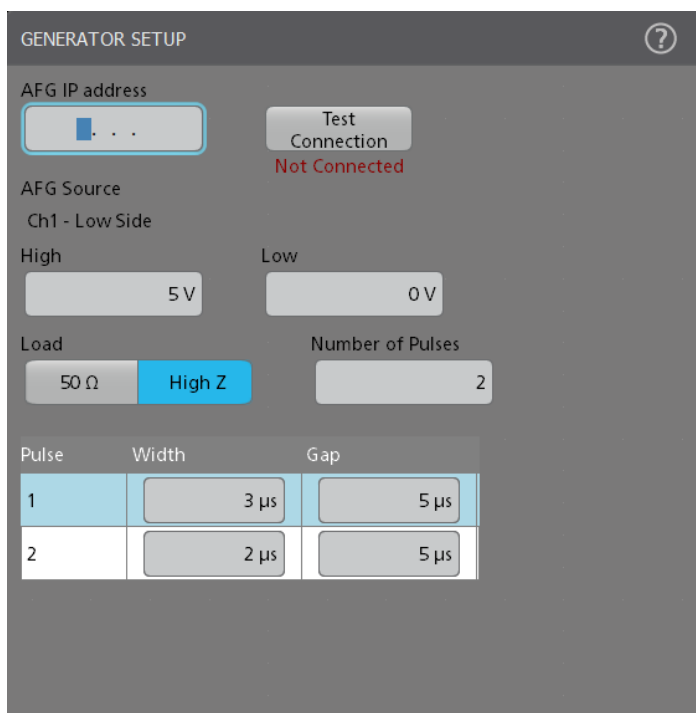
テクトロニクス社の AFG31000 シリーズは、任意波形生成機能、リアルタイム波形モニタ機能、大型タッチスクリーンを装備した、高性能 AFG（任意波形／ファンクション・ジェネレータ）です。高度な波形生成／プログラミング機能や波形検証機能に加えて、最新のタッチスクリーン・インタフェースを備えた AFG31000 シリーズはゲート・ドライバ・デバイスとして機能する理想的な機器です。AFG31000 シリーズには、ダブル・パルス・テスト・アプリケーションが含まれています。このダウンロード可能なプラグイン・ソフトウェア・アプリケーションを使用すれば、電源、半導体市場でダブル・パルス・アプリケーションが利用可能になります。ダブル・パルス・テストのユーザ・インタフェースは、タッチ&スワイプ、またはポイント&クリック操作により、少なくとも2つのパルス幅を変化させることが可能です。絶縁されたゲート・ドライバにパルスを出力することで、MOSFET や IGBT などのパワー・デバイスをトリガして通電を開始できます。AFG31000 シリーズのダブル・パルス・テスト機能を使用すれば、設計エンジニアやテスト・エンジニアは、パルス幅の異なる電圧パルスを DUT に印加できます。設計者やテスト・エンジニアは、PC ソフトウェアやマイクロコントローラを使用したさまざまな構成でのテストを実行する場合と比べてはるかに簡単にダブル・パルス・テストを実行できるため、時間を節約できます。

また、このアプリケーションでは、1 番目のパルス、2 番目のパルス、複数パルスといった関心のあるパルス領域を指定することもできます。この入力、オシロスコープで取込んだ波形を検証および解析し、WBG 測定を実行するために使用されます。

詳細については、[AFG31000 のアプリケーション・ノート](#)を参照してください。

WBG-DPT アプリケーションから AFG 31000 シリーズを構成して、必要な振幅とパルス幅のダブル・パルス信号を生成できます。この AFG 出力刺激は、デバイスのスイッチング、タイミング、容量、逆回復パラメータを測定するために、パワー・デバイスのゲート・ドライバに与える必要があります。





電源

DUT の電源をオンにするには、DUT の要件に基づいて適切な電源を選択する必要があります。設計者は、DC 電源またはソース・メジャー・ユニット (SMU) のいずれかを使用できます。SMU は電圧または電流を正確に印加すると同時に、電圧、電流を測定できる機器です。高次元の速度と精度、広範な動作範囲、優れた分解能、内蔵スweep機能を提供する点で、一般的な DC 電源とは異なっています。

ここでは、ダブル・パルス・テストに使用できるテクトロニクスの電源装置用の推奨オプションをいくつか紹介します。

- 高電圧電源：
 - 2657 A 高電圧ソース・メータ・ユニット (SMU)
 - 2260B-800-2、プログラマブル DC 電源
- ゲート・ドライブ回路への電源：
 - 2230 または 2280S シリーズの DC 電源

プロービングとアクセサリ

エンジニアが従来のシリコンデバイスから WBG デバイスへの設計の切り替えを検討する場合、次のような疑問が生じます。

- このテスト機器は SiC デバイスが表示する高速スイッチング・ダイナミクスを正確に測定することができるか？
- ゲート・ドライブ性能とデッドタイムを正確に最適化するにはどうすればよいのか？
- コモンモード・トランジェントは測定の精度に影響するのか？
- 観測されたリングングは実際のものか、それともプローブ応答の結果か？

従来のゲート電圧測定方法では、MMCX コネクタ付きの標準差動プローブを使用します。これは、ハイ・サイドでのゲート電圧測定において重要です。SiC パワー・デバイスのゲート電圧の測定は困難なものです。これはオシロスコープのグラウンドに対して高い DC オフセットと高い dv/dt を持つことのあるノードを基準とする低電圧信号 (約 20 Vpp) であるためです。

テクトロニクスの絶縁プローブは、これらのフローティング・ゲートの測定を正確に行う上で重要な役割を果たします。このプローブは、非絶縁プローブでは隠されてしまう高速フローティング信号の検出に役立ちます。IsoVu™ プローブ・テクノロジーは、光絶縁を使用してコモン・モード干渉を事実上排除します。これにより、100 V/ns 以上という高いスルー・レートの ± 60 kV の基準電圧で、正確な差動測定が可能になります。第 2 世代の IsoVu は 5 分の 1 のサイズでありながら、IsoVu 技術のすべてのメリットを継承しています。

またこのプローブは、広い周波数帯域とダイナミック・レンジ、優れた同相除去比を兼ね備えているため、DPT テストのあらゆるニーズに応えることができます。

IsoVu 測定システムは、業界標準の MMCX コネクタをテスト・ポイントの近くに挿入することで最高の性能を発揮します。これらのコネクタは、信号忠実度が高く、正確で再現性のある結果を得るために推奨されます。ロー・サイドでは、Vgs プロービング用に TPP とスクエア・ピンを MMC アダプタへ使用し、ハイ・サイドでは、TIVP と MMCX アクセサリを使用します。

電流プローブ

- Id 測定を正確に行うには、WBG 設定で電流プローブが必要です。テクトロニクスでは各種の電流プローブを用意しています。
- <mrk mtype="x-sdl-location" mid="cc6a37ac-4b4b-4284-ac78-99d2bfe947af" xmlns="urn:oasis:names:tc:xliff:document:1.2" />TCP0030A 型プローブは、TekVPI™ プローブ・インタフェースを装備したオシロスコープに直接接続して使用できる、高性能で

使いやすい AC/DC 電流プローブです。周波数帯域は 120MHz 以上であり、帯域が 120MHz を超え、5A と 30A の測定レンジが選択できます。また、難しい電流測定に求められる、1mA という低電流の測定能力と優れた確度も提供します。

- より高い電流では、TCP0150 型プローブでテストすることをお勧めします。テクトロニクスは、TCP のプローブ・ファミリに加えて、BNC コネクタを備え、BNC インタフェースに対応するあらゆる機器で利用できる TRCP シリーズ・ロゴスキー電流プローブも提供しています。ロゴスキー・プローブを使用することにより、バス・バーなどの大型の接続部品や、MOSFET または IGBT の小さなピンにも簡単に接続できます。

ロー・サイドでの DPT およびハイ・サイドでのダイオード逆回復のセットアップに推奨されるプロービングの詳細は次のとおりです。

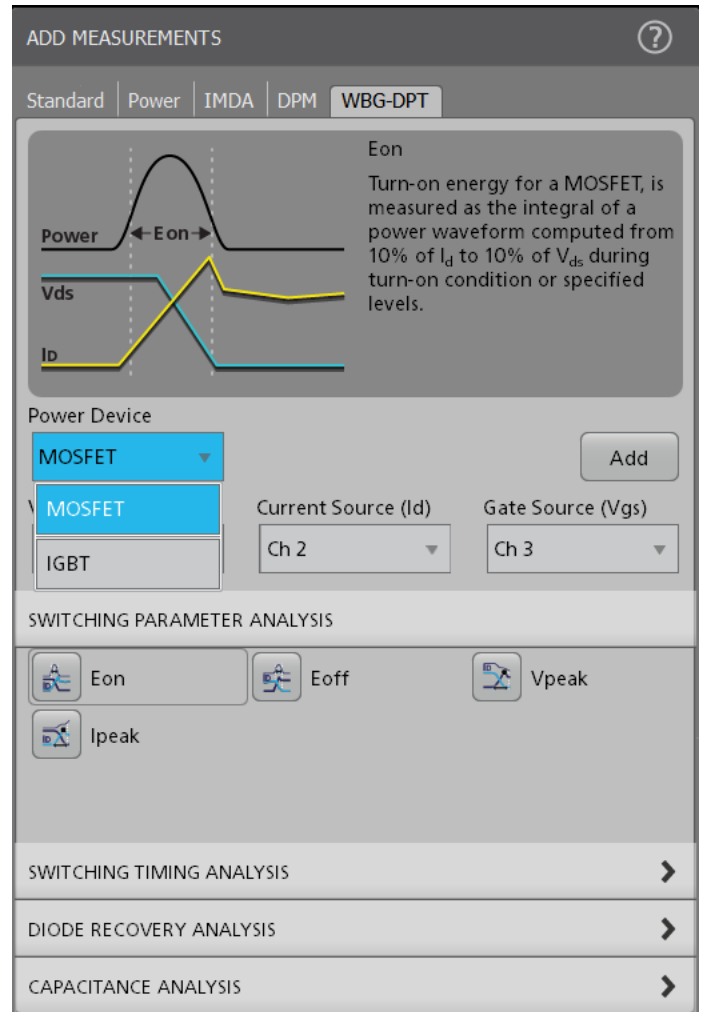
- ロー・サイド・プロービング
 - Ch1: Vds - TPP または THDP シリーズ電圧プローブ
 - Ch2: Vgs - TPP シリーズ (MMCX アダプタ・チップ付き)
 - Ch3: Id - TCP シリーズ電流プローブ
- ハイ・サイド・プロービング
 - Ch4: Irr - TCP - シリーズ電流プローブ
 - Ch5: Vds - THDP シリーズ電圧プローブ

ロー・サイドおよびハイ・サイドでの DPT に推奨されるプロービングの詳細は次のとおりです。

- ロー・サイド・プロービング
 - Ch1: Vds - TPP または THDP シリーズ電圧プローブ
 - Ch2: Vgs - TPP シリーズ (MMCX アダプタ・チップ付き)
 - Ch3: Id - TCP シリーズ電流プローブ
- ハイ・サイド・プロービング
 - Ch4: Vgs - TIVP 絶縁プローブ (MMCX アダプタ・チップ付き)
 - Ch5 : Vds - THDP シリーズ電圧プローブ

測定項目

オプションの WBG-DPT で提供される測定値は、下図に示すように、MOSFET や IGBT などのパワー・デバイスをテストするために使用できます。



電源プリセット

プリセット設定は、指定した V_{ds} および V_{gs} レベルでオシロスコープに最適な垂直軸スケール、水平時間ベース、サンプル・レート、トリガのソースとレベル、パルス数を設定するのに便利です。

WBG-DPT MEAS 1

EON

Max Voltage (V_{ds}) 25 V Max Current (I_d) 1 A Max Gate Voltage (V_{gs}) 10 V

Pulse Width 15 μ s

Generator Setup

Power Preset Power Preset uses the inputs above and preset the oscilloscope and generator for optimal Vertical, Horizontal, Trigger and Acquisition settings. WBG devices can operate at higher voltage and power ratings, handle with care.

Gate Stimulus Gate Stimulus sets the scope into Single Sequence. Configure AFG31000 series using Generator Setup. Turn on power supply with lower V_{cc} . If AFG31000 is connected, Gate Stimulus will generate double pulse signal on the AFG. Following that the signals of interest are acquired.

CONFIGURE DESKEW REFERENCE LEVELS GATING PASS / FAIL TESTING

オート・レベルは、JEDEC/IEC 規格に従ってパルス領域の開始と停止のレベルを示します。

WBG-DPT MEAS 1

EON

CONFIGURE

Pulse Region Second Pulse Label Eon

Voltage Source (V_{ds}) Ch 1 Current Source (I_d) Ch 2 Gate Source (V_{gs}) Ch 3

Levels Auto Custom ☒ Refine Edge

Start Level I_d 10% Stop Level V_{ds} 10%

DESKEW REFERENCE LEVELS GATING PASS / FAIL TESTING

デフォルトでは、パルス領域は規格に従って定義されています。たとえば、DPT の Eon は 2 番目のパルスで測定され、Eoff は 1 番目のパルスで測定されます。ただし、パルスはカスタム要件に従って設定できます。複数のパルス設定を選択して、3 つ以上のパルスをテストすることもできます。これにより、設計に基づいた優れた柔軟性がもたらされます。

一般に、設計者はダブル・パルス・テストを行うのではなく、異なるレベルのドレイン電流で複数パルスを使用してテストします。連続運転においてデバイスを複数回切り替える場合、これはパワー・デバイスに負荷がかかり、スイッチングの信頼性をチェックすることになる可能性があります。

WBG-DPT MEAS 1

?

EON

CONFIGURE

Pulse Region

Second Pulse

First Pulse

Second Pulse

Multiple Pulse

Auto

Custom

Current Source (Id)

Ch 2

Gate Source (Vgs)

Ch 3

Refine Edge

Label

Eon

Start Level

Id

10%

Stop Level

Vds

10%

DESKEW

REFERENCE LEVELS

GATING

PASS / FAIL TESTING

WBG-DPT MEAS 1

?

EON

CONFIGURE

Pulse Region

Second Pulse

Voltage Source (Vds)

Ch 1

Current Source (Id)

Ch 2

Gate Source (Vgs)

Ch 3

Levels

Auto

Custom

Set Levels In

%

Absolute

Refine Edge

Start Level

Vds

Id

Vgs

90%

Stop Level

Vds

Id

Vgs

10%

Start Search Direction

Forward

Backward

Stop Search Direction

Forward

Backward

この操作中は、複数のエッジのターン・オンおよびターン・オフのスイッチング・パラメータを測定することが重要です。複数パルスは測定設定の一部としてサポートされています。

実際の WBG 波形は理想的ではなく、ノイズが多いため、カスタムの開始レベルと停止レベルをパーセント単位で指定することでソースを定義できます。これにより、特に Vds と Id にノイズが多く、振動が含まれている場合にデバッグが容易になります。

WBG デスキュー

WBG-DPT MEAS 1

EON

CONFIGURE

DESKEW

Probe Resistance
100 mohm

Effective Inductance
10 nH

Bias Voltage
260 V

Differential Order
3

WBG Deskew

WBG Deskew will perform double pulse test twice to compute and set skew between Vds and Id. Turn on the power supply and perform Preset before running WBG Deskew. Use Generator Setup for gate stimulus automation. Above circuit parameters should be set iteratively to match the mathematical model.
Ch 1's deskew value is 0 s

REFERENCE LEVELS

GATING

PASS / FAIL TESTING

WBG デスキューは、パワー・デバイスが MOSFET または IGBT の場合、ドレイン～ソース間の電圧 (V_{ds}) とドレイン電流 (I_d)、またはコレクタ～エミッタ間の電圧 (V_{ce}) とコレクタ電流 (I_c) の間のスキューをそれぞれ計算します。このスキュー値は、オシロスコープで V_{ds} または V_{ce} 信号が構成されているソースに適用されます。

WBG デスキューは、従来のスコープを用いたデスキュー操作とは異なります。従来の方法では、プローブ間のスキューはテスト・セットアップで測定を開始する前に計算されます。WBG-DPT では、測定システムのスキューはアキュイジション後の操作として実行されます。

当社の方法では、WBG デスキューを実行するのにデバイスの接続を変更する必要はありません。このデスキューの方法では、取り込んだ I_d 、 V_{gs} 、回路パラメータ（プローブ抵抗、実効インダクタンス）に基づいて V_{ds} をモデル化します。演算によってモデル化された V_{ds} が作成され、演算として表示されます。取り込まれた V_{ds} 信号とモデル化され

た V_{ds} がオーバーラップされてスキューを計算し、このスキューが取得された V_{ds} 信号に適用されます。このデスキュー手順は、従来の方法に比べ簡単です。

スイッチング・パラメータ解析

ADD MEASUREMENTS

Standard
Power
IMDA
DPM
WBG-DPT

Eon
Turn-on energy for a MOSFET, is measured as the integral of a power waveform computed from 10% of I_d to 10% of V_{ds} during turn-on condition or specified levels.

Power Device
MOSFET

Add

Voltage Source (V_{ds})
Ch 1

Current Source (I_d)
Ch 2

Gate Source (V_{gs})
Ch 3

SWITCHING PARAMETER ANALYSIS

Eon
Eoff
Vpeak
Ipeak

SWITCHING TIMING ANALYSIS

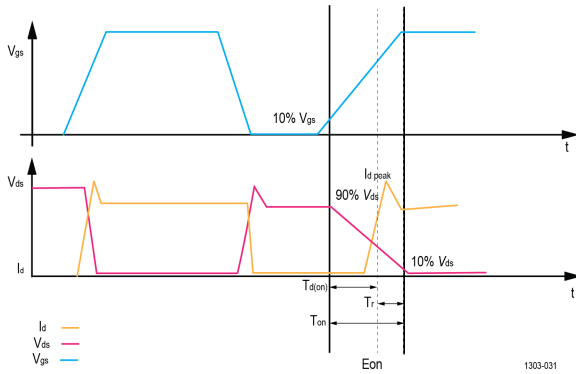
DIODE RECOVERY ANALYSIS

CAPACITANCE ANALYSIS

Eon

MOSFET のターン・オン・エネルギーは、ターン・オン状態または指定されたレベルにおける、 I_d の 10 % から V_{ds} の 10 % まで計算された電力波形の積分として測定されます。

IGBT のターン・オン・エネルギーは、ターン・オン状態または指定されたレベルにおける、 V_{ge} の 10 % から V_{ce} の 2 % まで計算された電力波形の積分として測定されます。



ターン・オン中の波形

WBG-DPT MEAS 1

EON

CONFIGURE

Pulse Region

Second Pulse

Label

Eon

Voltage Source (Vds)

Ch 1

Current Source (Id)

Ch 2

Gate Source (Vgs)

Ch 3

Levels

Auto

Custom

Refine Edge

Start Level

Id

10%

Stop Level

Vds

10%

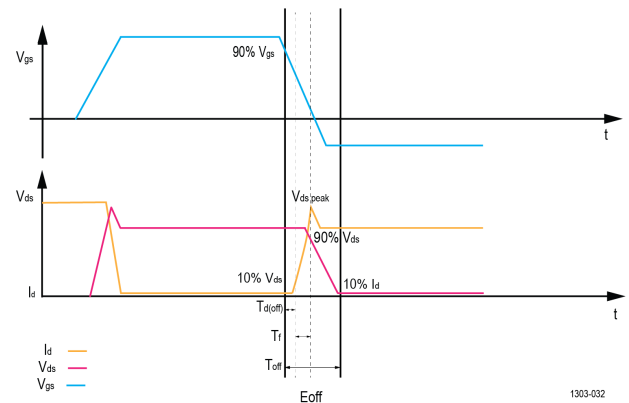
DESKEW

REFERENCE LEVELS

GATING

PASS / FAIL TESTING

IGBT のターン・オフ・エネルギーは、ターン・オフ状態または指定されたレベルにおける、 V_{ge} の 90 % から I_c の 2 % まで計算された電力波形の積分として測定されます。



ターン・オフ中の波形

WBG-DPT MEAS 2

EOFF

CONFIGURE

Pulse Region

First Pulse

Label

Eoff

Voltage Source (Vds)

Ch 1

Current Source (Id)

Ch 2

Gate Source (Vgs)

Ch 3

Levels

Auto

Custom

Refine Edge

Start Level

Vds

10%

Stop Level

Id

10%

DESKEW

REFERENCE LEVELS

GATING

PASS / FAIL TESTING

Eoff

MOSFET のターン・オフ・エネルギーは、ターン・オフ状態または指定されたレベルにおける、 V_{ds} の 10 % と I_d の 10 % の間で計算された電力波形の積分として測定されます。

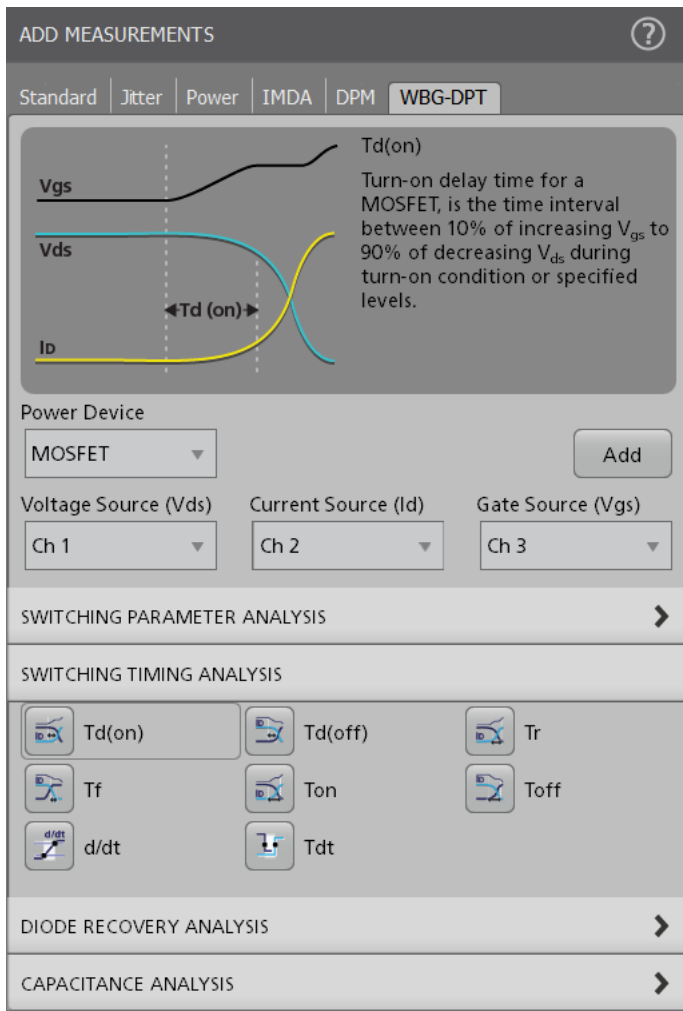
Vpeak

電圧ピークは、コレクタ電流またはドレイン電流パルスのターン・オフ状態中のパワー・デバイスの最大電圧ピーク値です。通常、電圧ピークは Eoff 領域で測定されます。

Ipeak

電流ピークは、コレクタ電流またはドレイン電流パルスのターン・オン状態中のパワー・デバイスの最大電流ピーク値です。通常、電流ピークは Eon 領域で測定されます。

スイッチング・タイミング解析



Td(on)

MOSFET のターン・オン遅延時間は、ターン・オン状態または指定されたレベルにおける、Vgs の増加の 10 % から Vds の減少の 90 % までの時間間隔です。

IGBT のターン・オン遅延時間は、ターン・オン状態または指定されたレベルにおける、Vge の増加の 10 % から Ic の増加の 10 % までの時間間隔です。

Td(off)

MOSFET のターン・オフ遅延時間は、ターン・オフ状態または指定されたレベルにおける、Vgs の減少の 90 % から Vds の増加の 90 % までの時間間隔です。

IGBT のターン・オフ遅延時間は、ターン・オフ状態または指定されたレベルにおける、Vge の減少の 90 % から Ic の減少の 90 % までの時間間隔です。

Tr

MOSFET の立上り時間は、ターン・オン状態または指定されたレベルにおける、Vds の 90 % と 10 % の間の時間間隔です。

IGBT の立上り時間は、ターン・オン状態または指定されたレベルにおける、Ic の 10 % と 90 % の間の時間間隔です。

Tf

MOSFET の立下り時間は、ターン・オフ状態または指定されたレベルにおける、Vds の 10 % と 90 % の間の時間間隔です。

IGBT の立下り時間は、ターン・オフ状態または指定レベルにおける、Ic の 90 % と 10 % の間の時間間隔です。

Ton

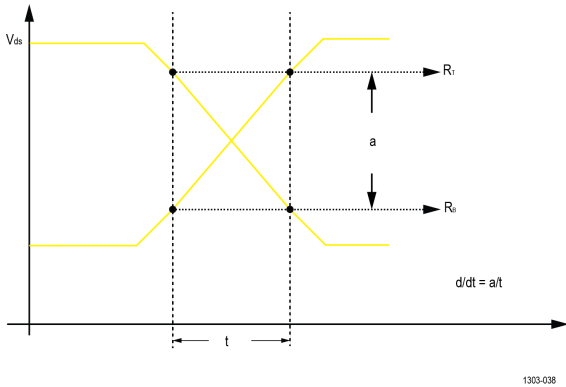
ターン・オン時間は、ターン・オン遅延時間と立上り時間の合計です。これは、パワー・デバイスをオフ状態からオン状態に切り替える入力端子での電圧パルスの立上り間の時間間隔です。

Toff

ターン・オフ時間は、ターン・オフ遅延時間と立下り時間の合計です。これは、パワー・デバイスをオン状態からオフ状態に切り替える入力端子での電圧パルスの立下り間の時間間隔です。

d/dt

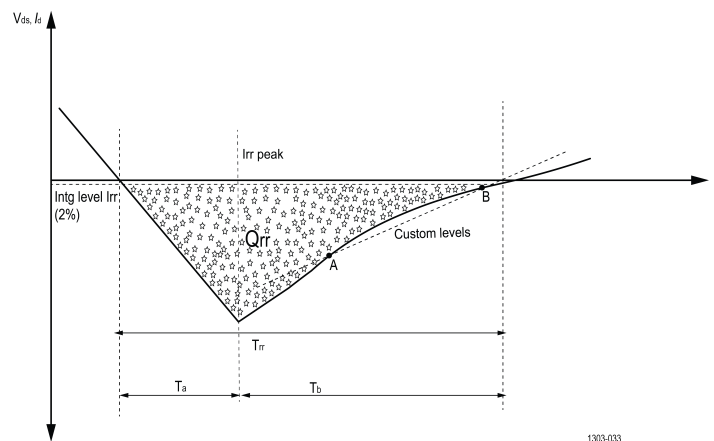
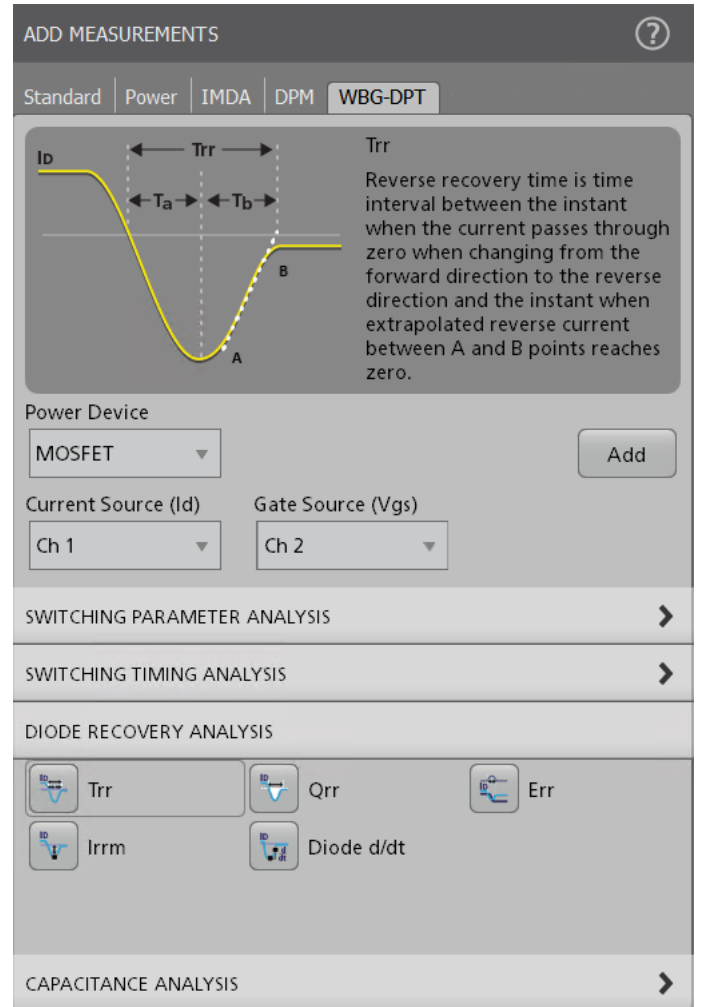
スイッチング d/dt は、電圧または電流がベースの基準レベルからトップの基準レベルに上昇するか、トップの基準レベルからベースの基準レベルに低下するときに、その変化率（スルー・レート）を測定します。



Tdt

デッドタイムは、同時スイッチング中のハイ・サイド MOSFET のオンにする時間とロー・サイド MOSFET のオンにする時間の間の時間遅延です。これは、あるゲート電圧の設定された立下がりエッジ・レベルと別のゲート電圧の設定された立上がりエッジ・レベルの間の時間間隔です。デフォルトの立上がりエッジと立下がりエッジのレベルは 50% です。

逆回復解析



ダイオードの電流の逆回復領域

Trr

逆回復時間 (Trr) とは、順方向から逆方向に変化するとき電流がゼロを通過する瞬間と、A 点と B 点の間の外挿された逆電流がゼロになる瞬間の時間間隔です。

T_{rr} は、[上図](#)に示すように、リアクタがそれぞれのピーク逆回復電流 I_{rr} で応答する 2 つのタイム・インターバル T_a と T_b で構成されます。 T_a は、低下してきた順方向電流がゼロ電流軸と交差した瞬間に始まり、リアクタの I_{rr} のピーク応答点で終了します。

逆回復電流の立上り時間(T_a)

T_a は、逆回復電流が最大逆ピーク値 I_{RM} に達するまでにかかる時間として定義されます。

逆回復電流立下り時間(T_b)

T_b は、逆回復電流（または外挿された電流）が逆ピーク値からゼロに回復するまでにかかる時間として定義されます。したがって、 T_{rr} は T_a と T_b の和となります。

回復ソフト係数(RSF)

RSF は、逆回復電流の立上り時間 (T_a) に対する逆回復電流の立下り時間時間 (T_b) の比率として定義されます。

Q_{rr}

逆回復電荷 (Q_{rr}) は、パワー・デバイスが指定された順方向電流条件から順方向バイアスのゲート条件を持つ指定された逆電圧条件に切り替わったときに、単一のコレクタ電流またはドレイン電流パルスの指定された積分時間中にパワー・デバイスから回復される電荷の合計です。

回復した電荷は次のように測定されます。

$$Q_{rr} = \int_{t_0}^{t_0+t_i} I_{rr} \times dt$$

ここで、

t_0 は、電流がゼロを通過する瞬間です。

t_i は指定された積分時間です（電流が I_{rr} の 2% に達したときになるのが望ましい）。

Err

逆回復エネルギー (Err) は、パワー・デバイスが指定された順方向電流条件から順方向バイアスのゲート条件を持つ指定された逆方向電圧条件に切り替わったときに、単一のコレクタ電流またはドレイン電流パルスの指定された積分時間中にパワー・デバイス内で消費されるエネルギーです。

スイッチング・エネルギーは、積分時間 t_i の間にデバイスの電圧と電流から製品が積分された結果です。

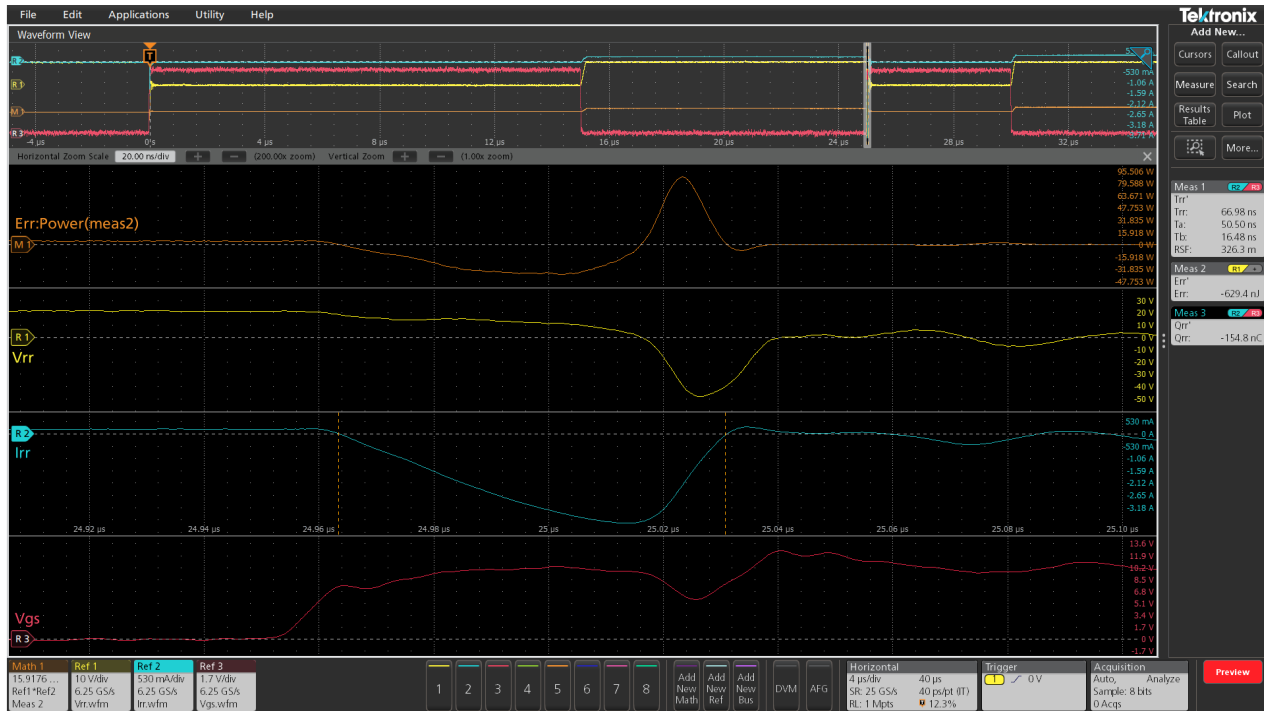
$$Err = \int_{t_0}^{t_0+t_i} V_R \times I_{rr} \times dt$$

I_{rrm}

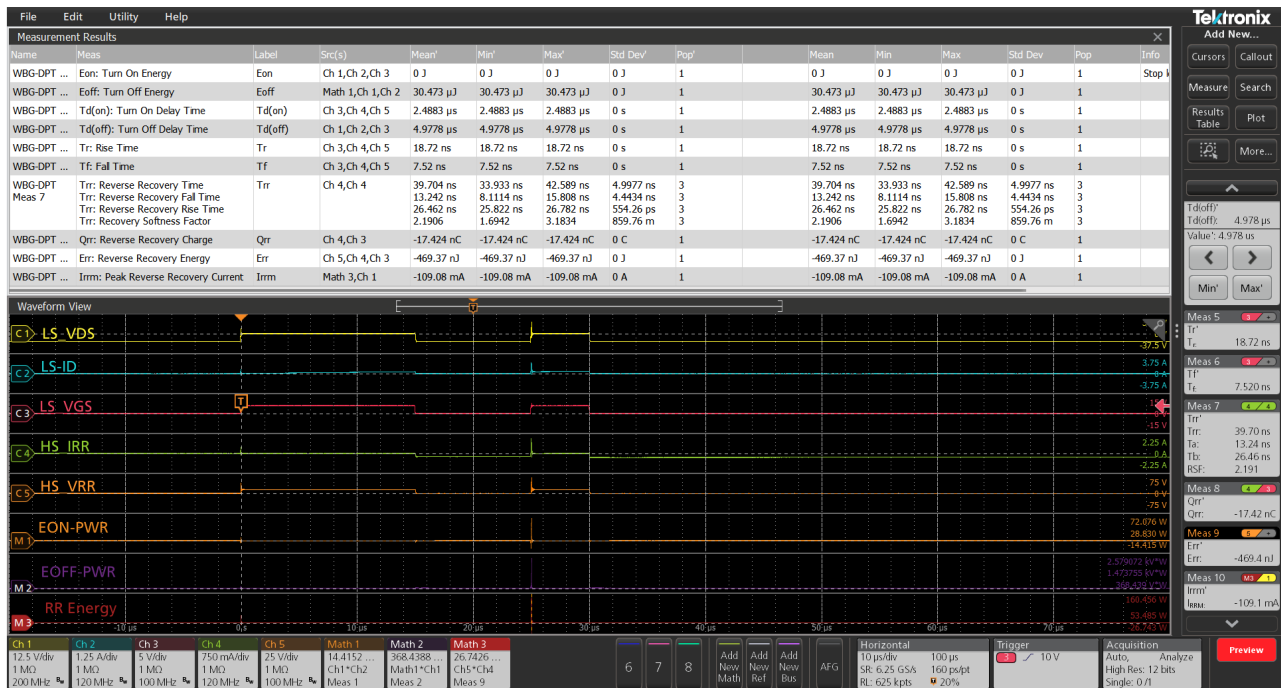
逆回復電流 (I_{rrm}) は、逆回復時間間隔中に発生する最大逆電流です。

ダイオード d/dt

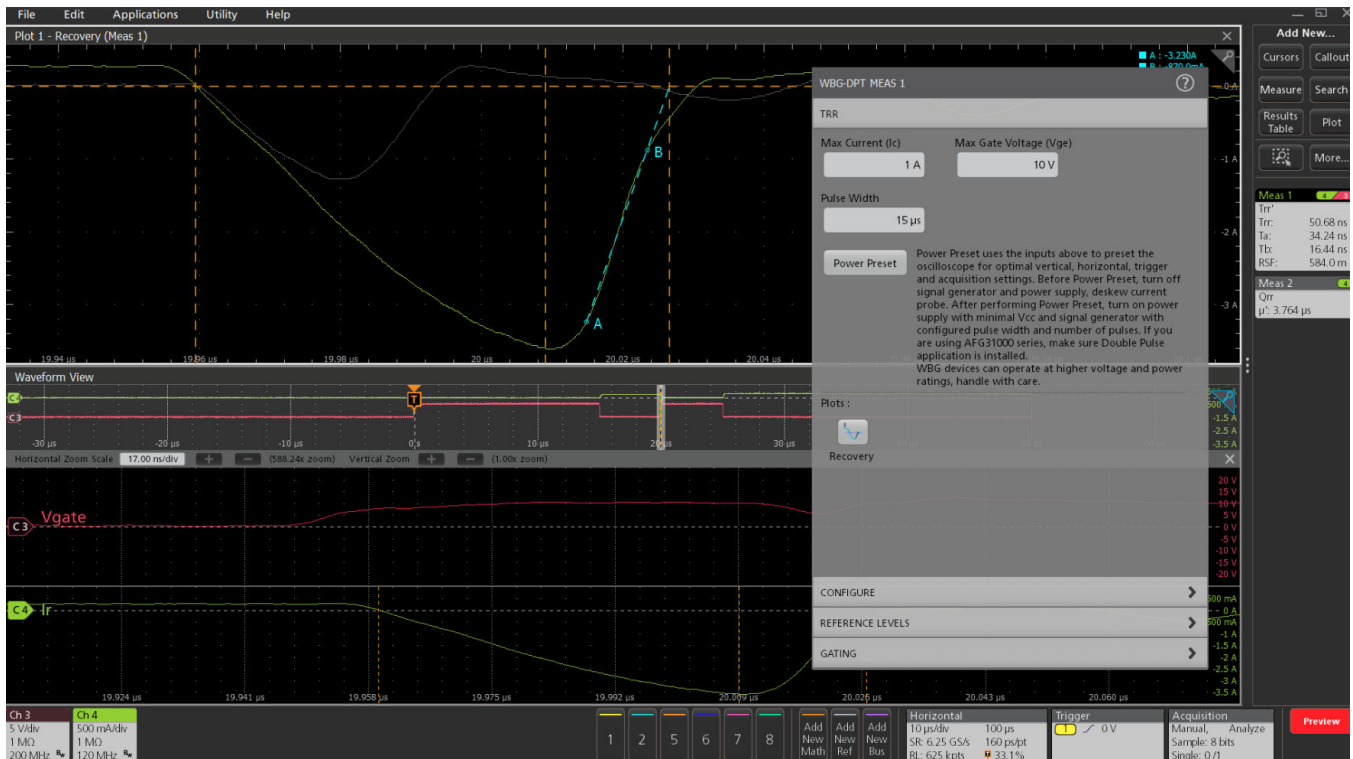
ダイオード d/dt は、指定された開始および停止の積分レベルにおける電圧または電流の変化率（スルー・レート）を測定します。ダイオード d/dt は立上りエッジまたは立下りエッジの間に測定できます。



この図は、ハイ・サイドで逆回復電流と電圧をキャプチャしたダイオード逆回復測定を示しています

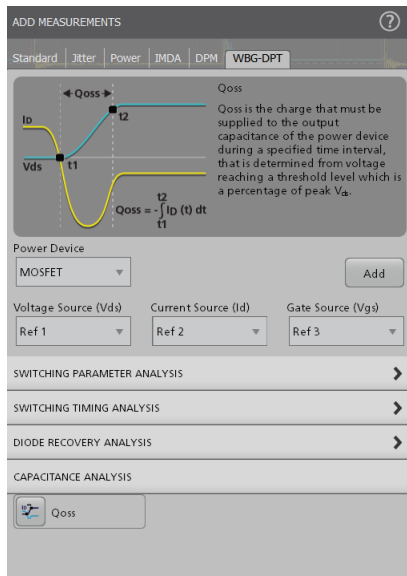


すべての測定値をまとめて表示し、スイッチング解析、ロー・サイドでのタイミング・パラメータ、ハイ・サイドでのダイオード逆回復測定を示しています



この図は、タイミング逆回復 (Trr) 測定のオーバーラップされたプロットを示しています。このプロットは測定設定から追加できます。

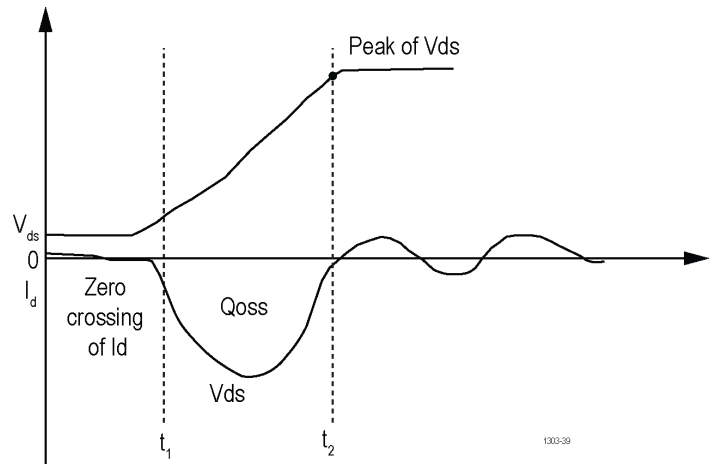
容量解析



Qoss

WBG-DPT アプリケーションの Qoss 測定値は、各スイッチング・サイクル中にパワー・デバイスの寄生出力容量に供給する必要がある電荷です。これは出力電荷を表します。出力電荷を正確に測定することはとても重要です。WBG デバイスのスイッチング速度と、電源投入時の SiC MOSFET ボ

ディ・ダイオードの容量性特性に直接影響するものだからです。

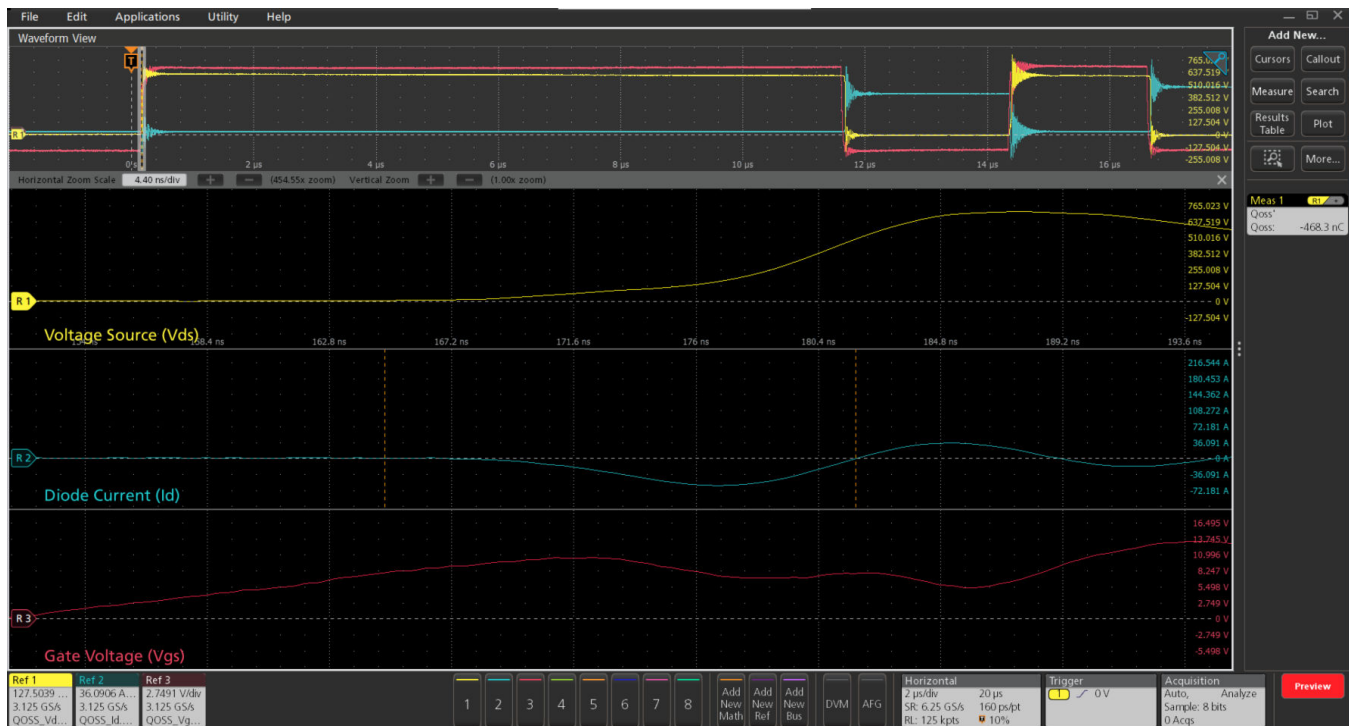


$$Q_{oss} = -\int_{t_1}^{t_2} i_r(t) dt$$

このとき、

t_1 は、電流がゼロを通過するときのインスタンスです。

t_2 は、指定された時間間隔です (V_{ds} がピーク電圧の 90 % に達したときが望ましい)。



ダイオード電流で測定される Qoss (アノテーション付き)

仕様

Switching Parameter Analysis (スイッチング・パラメータ解析) 測定パネル

測定	概要
Eon	設定されたレベルを使用し、ターン・オン領域においてパワー・デバイスで消散された電力を測定します。
Eoff	設定されたレベルを使用して、電源オフ領域中に電源で消費されるエネルギーを測定します。
Vpeak	ターン・オフ領域でのパワー・デバイスのピーク電圧を測定します。
Ipeak	ターン・オン領域でのパワー・デバイスのピーク電流を測定します。

Switching Timing Analysis (スイッチング・タイミング解析) 測定パネル

測定	概要
Td(on)	設定されたレベルを使用して、ターン・オン領域でのパワー・デバイスのターン・オン遅延時間を測定します。
Td(off)	設定されたレベルを使用して、ターン・オフ領域でのパワー・デバイスのターン・オフ遅延時間を測定します。
Tr	設定されたレベルを使用して、ターン・オン領域でのパワー・デバイスの立上り時間を測定します。
Tf	設定されたレベルを使用して、ターン・オフ領域でのパワー・デバイスの立下り時間を測定します。
Ton	パワー・デバイスのターン・オン時間を測定します。これは、ターン・オン遅延時間と立上り時間の合計です。
Toff	パワー・デバイスのターン・オフ時間を測定します。これは、ターン・オフ遅延時間と立下り時間の合計です。
d/dt	ドレイン～ソース間の電圧への変化率、または指定されたレベル間のドレイン電流の変化率を測定します。
Tdt	同時スイッチング時のパワー・デバイスの遅延時間を測定します。これは、最初のゲート電圧の立下がりエッジと2番目のゲート電圧の立上がりエッジ間の時間間隔です。

Diode Recovery Analysis (ダイオード・リカバリ解析) 測定パネル

測定	概要
Trr ¹	設定されたレベルを使用して、パワー・デバイスの逆回復時間を測定します。
Qrr	構成されたレベルを使用して、電源装置の逆回復充電を測定します。
Err	設定されたレベルを使用して、パワー・デバイスで消散された逆回復エネルギーを測定します。
Irrm	逆回復電流の統計を測定します。
ダイオード d/dt	指定されたレベル間の逆回復電圧または電流の変化率を測定します。

¹ TA、TB、および RSF は、この測定の一部として報告されます。

容量解析測定パネル

測定	概要
Qoss	各スイッチング・サイクル中にパワー・デバイスの寄生出力容量に供給する必要がある電荷を測定します。
プロット	アノテーション付き波形表示、Trr 測定の回復プロット。
レポート	MHT および PDF フォーマット、CSV フォーマットによるデータのエクスポート
消磁／デスキュー（静的）	各チャンネルのメニューからデスキュー（電圧プローブと電流プローブ）や消磁（電流プローブ）を実行可能
WBG デスキュー	スイッチング・デバイス上で Vds と Id 間のデスキューを実行 ²
測定ソース	ライブ信号（アナログ）、リファレンス波形、演算波形
パス／フェイル	指定された制限値に対して WBG-DPT 測定値をテストし、装置が故障した場合に実行するアクションを設定します ²

² 詳細については、[4/5/6 シリーズMSO ヘルプ](#)を参照してください。

ご注文の際は以下の型名をご使用ください。

モデル／ソフトウェア・ライセンス

製品名	型名	サポートされる機器	利用可能な周波数帯域
機器の新規購入時のオプション	4-WBG-DPT	4 シリーズ B MSO (MSO44B 型および MSO46B 型)	<ul style="list-style-type: none"> • 200 MHz • 350 MHz • 500MHz • 1GHz • 1.5GHz
製品アップグレード・オプション	SUP4-WBG-DPT		
フローティング・ライセンス	SUP4-WBG-DPT-FL		
機器の新規購入時のオプション	5-WBG-DPT	5 シリーズ B MSO (MSO54B 型、MSO56B 型、MSO58B 型)	<ul style="list-style-type: none"> • 350 MHz • 500MHz • 1GHz • 2GHz
製品アップグレード・オプション	SUP5-WBG-DPT		
フローティング・ライセンス	SUP5-WBG-DPT-FL		
機器の新規購入時のオプション	6-WBG-DPT	6 シリーズ B MSO (MSO64B 型、MSO66B 型、MSO68B 型)	<ul style="list-style-type: none"> • 1GHz • 2.5GHz • 4GHz • 6GHz • 8GHz • 10GHz
製品アップグレード・オプション	SUP6-WBG-DPT		
フローティング・ライセンス	SUP6-WBG-DPT-FL		

ソフトウェア・バンドル

サポートされる機器	バンドル・オプション	概要
4 シリーズ B MSO	4-PRO-POWER-1Y	Pro Power Bundle (1 年更新ライセンス)
	4-PRO-POWER-PER	Pro Power Bundle (永続ライセンス)
	4-ULTIMATE-1Y	Ultimate Bundle (1 年更新ライセンス)
	4-ULTIMATE-PER	Ultimate Bundle (永続ライセンス)
5 シリーズ B MSO	5-PRO-POWER-1Y	Pro Power Bundle (1 年更新ライセンス)
	5-PRO-POWER-PER	Pro Power Bundle (永続ライセンス)
	5-ULTIMATE-1Y	Ultimate Bundle (1 年更新ライセンス)
	5-ULTIMATE-PER	Ultimate Bundle (永続ライセンス)
	5-PRO-AUTO-1Y	Pro Automotive Bundle (1 年更新ライセンス)
	5-PRO-AUTO-PER	Pro Automotive Bundle (永続ライセンス)

表 (続く)

サポートされる機器	バンドル・オプション	概要
6 シリーズ B MSO	6-PRO-POWER-1Y	Pro Power Bundle (1 年更新ライセンス)
	6-PRO-POWER-PER	Pro Power Bundle (永続ライセンス)
	6-ULTIMATE-1Y	Ultimate Bundle (1 年更新ライセンス)
	6-ULTIMATE-PER	Ultimate Bundle (永続ライセンス)
	6-PRO-AUTO-1Y	Pro Automotive Bundle (1 年更新ライセンス)
	6-PRO-AUTO-PER	Pro Automotive Bundle (永続ライセンス)

推奨プローブ

プローブ・モデル	概要	数量
TCP0030A、TCP0150、または TRCP シリーズ	Id 測定用の電流プローブ	1
TIVP02 型、TIVP05 型、または TIVP1 型	ハイ・サイド Vgs 測定用の電圧プローブ	1
TPP0100、TPP0200、TPP0500B、または TPP1000	ロー・サイド Vgs 測定用の電圧プローブ	1
THDP0100、THDP0200、TMDP0200、TPP0850 ³ または TPP1000 型 ³	ロー・サイド Vds 測定用の電圧プローブ	1

推奨ファンクション・ジェネレータと電源

推奨ファンクション・ジェネレータ、ゲート・ドライバ・ソース

型名	アナログ・チャンネル	周波数レンジ	プラグイン機能
AFG31000 シリーズ任意波形／ファンクション・ジェネレータ	2 ⁴	25 MHz、50 MHz、100 MHz、150 MHz、250 MHz	AFG31000 のダブル・パルス・テスト・プラグイン・アプリケーション

推奨される電源

型名	定格電圧レンジ	定格電流	定格出力パワー
2470 SMU	最大 1000 V	最大 1 A	20 W
2260B-800-2	0 - 800 V	0 - 2.88 A	720 W
2657A 型	最大 3000 V	最大 120 mA	180 W

³ 絶縁された電源でしっかりと接地されている場合。

⁴ AFG31000 のダブル・パルス・テスト・アプリケーションには 2 チャンネル機能がないため、ロー／ハイ・サイドのダブル・パルス・テストにはマニュアルでのテスト設定が必要です。

ASEAN／オーストラレーシア (65) 6356 3900

ベルギー 00800 2255 4835*
中東欧諸国およびバルト諸国 +41 52 675 3777
フィンランド +41 52 675 3777
香港 400 820 5835
日本 81 (120) 441 046
中東、アジア、および北アフリカ +41 52 675 3777
中華人民共和国 400 820 5835
韓国 +82 2 565 1455
スペイン 00800 2255 4835*
台湾： 886 (2) 2656 6688

オーストリア 00800 2255 4835*

ブラジル +55 (11) 3759 7627
中央ヨーロッパおよびギリシャ +41 52 675 3777
フランス 00800 2255 4835*
インド 000 800 650 1835
ルクセンブルク +41 52 675 3777
オランダ 00800 2255 4835*
ポーランド +41 52 675 3777
ロシアおよび CIS 諸国 +7 (495) 6647564
スウェーデン 00800 2255 4835*
イギリスおよびアイルランド 00800 2255 4835*

バルカン半島諸国、イスラエル、南アフリカ、および他の ISE
諸国 +41 52 675 3777
カナダ 1 800 833 9200
デンマーク +45 80 88 1401
ドイツ 00800 2255 4835*
イタリア 00800 2255 4835*
メキシコ、中南米およびカリブ海域 52 (55) 56 04 50 90
ノルウェー 800 16098
ポルトガル 80 08 12370
南アフリカ +41 52 675 3777
スイス 00800 2255 4835*
米国 1 800 833 9200

* 欧州のフリーダイヤル番号つながらない場合は次の番号におかけください： +41 52 675 3777

詳細情報 Tektronix は、総合的に継続してアプリケーション・ノート、テクニカル・ブリーフおよびその他のリソースのコレクションを発展させ、技術者が最先端で仕事ができるように手助けをします。
Web サイト (jp.tek.com) をご参照ください。

Copyright © Tektronix, Inc. All rights reserved. テクトロニクス製品は、登録済および出願中の米国その他の国の特許等により保護されています。本書の内容は、既に発行されている他の資料の内容に代わるものです。また、本製品の仕様および価格は、予告なく変更させていただく場合がございますので、予めご了承ください。TEKTRONIX および TEK は Tektronix, Inc. の登録商標です。他の商品名全ては、各企業の商標および商標、登録商標です。

10 Sep 2024 61Z-73888-4

tek.com

Tektronix®