

電流・電圧プローブ遅延パラメータ測定器

TF2000



製品取扱説明書

製品ユーザーマニュアル

前 は
じ



本機器を安全にご使用いただくために

TF2000 プローブ遅延テスターには 1000V の高電圧電源が内蔵されており、本装置の動作中は、内部回路および出力ポートに 1000V の直流高電圧が存在する可能性があります。ユーザーの安全を確保するため、以下の安全上の注意事項を厳守し、以下の説明に従って使用してください。なお、注意事項に違反して操作を行ったことにより生じた問題について、当社は一切の責任を負いません。

- ◆ 内部回路および出力ポートに直流高電圧が存在する場合、本装置の液晶ディスプレイには電源電圧の値が表示されます。36Vを超える場合は危険ですので、いかなる配線作業も禁止されています。
- ◆ まずタッチスクリーン上で高電圧電源の遮断操作を行い、高電圧電源の電圧が36V未満まで放電されるのを待ってから、電流・電圧プローブの接続または取り外しを行ってください。
- ◆ 本装置は高電圧機器であるため、ユーザーによる分解や修理は行わないでください。そうしないと、重大な安全上の問題を引き起こす恐れがあります。
- ◆ 本装置は高電圧機器であるため、ユーザーは一定の電氣的基礎知識を有している必要があり、かつ本取扱説明書の指示に厳格に従って使用する必要があります。

1. 概要

パワーエレクトロニクス技術の分野において、パワーデバイスのオン損失 E_{ON} およびオフ損失 E_{OFF} を正確に測定するためには、電流プローブと電圧プローブ間の相対的な遅延パラメータ（スキュー）を極めて正確に取得し、それをオシロスコープの対応するチャンネルに入力して遅延補償を行う必要があります。そうしないと、オシロスコープが E_{ON} および E_{OFF} を計算する際に大きな誤差が生じます。

TF2000は、CNC高電圧電源、MOSFET、無誘導抵抗、同軸分流器、制御モジュール、タッチスクリーンなどの主要コンポーネントをすべて統合した、ポータブルな電流・電圧プローブ遅延測定器です。

業界初、個々の電流・電圧プローブの絶対遅延パラメータを正確に測定できる測定器

- 業界初、広帯域同軸分流器を精密な遅延基準として用いる手法
- 最大パルス電圧700V、最大パルス電流30Aで、高電圧・大電流のプローブの遅延パラメータを測定可能
- パルス立ち上がり時間は最大15nsで、遅延測定の精度が高い
- 2つの電流・電圧プローブ間の相対遅延を測定可能

本測定器の革新点は、回路内に遅延パラメータを追加することで、測定を必要としない広帯域同軸分流器を物理的に計算し、高精度な遅延基準チャンネルとして利用できる点にあります。これまでは、業界において、遅延パラメータの測定を必要としない電流または電圧センサーを遅延基準センサーとして用いる方法は見つかっていませんでした。

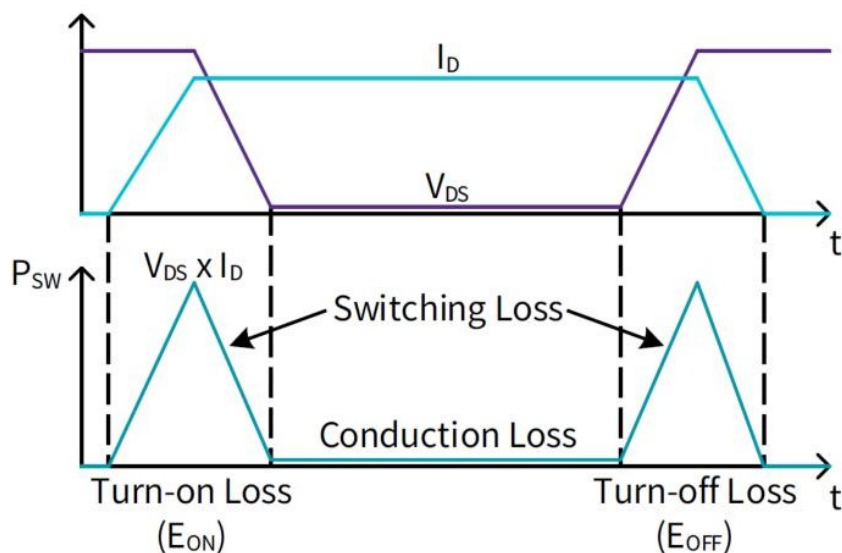
TF2000は、業界で初めて、高電圧（700V）・大電流（30A）の条件下で、単一の電流・電圧プローブの絶対遅延パラメータを測定することを実現し、2つの電流・電圧プローブ間の相対遅延も測定可能です。

電流・電圧プローブの絶対遅延パラメータとは、特定の電流または電圧プローブにおいて、入力から出力までの遅延パラメータを指します。この遅延パラメータは、電流・電圧プローブの回路構造と信号ケーブルの長さによって生じます。プローブメーカーは、各モデルごとに標準的な絶対遅延パラメータを提示しています。しかし、ユーザーが入力信号線や出力同軸ケーブルを変更した場合は、絶対遅延パラメータを再測定する必要があります。

TF2000は、視覚的なUIソフトウェア制御インターフェースを通じて、無感抵抗の抵抗値を設定し、出力パルス電圧の大きさ（最大700V）。ワンクリックで電流・電圧パルスの出力を簡単にトリガーでき、電流・電圧プローブの遅延測定を実現します。TF2000の全体サイズはわずか170×145×100mmで、持ち運びやデモンストレーションに非常に便利です。

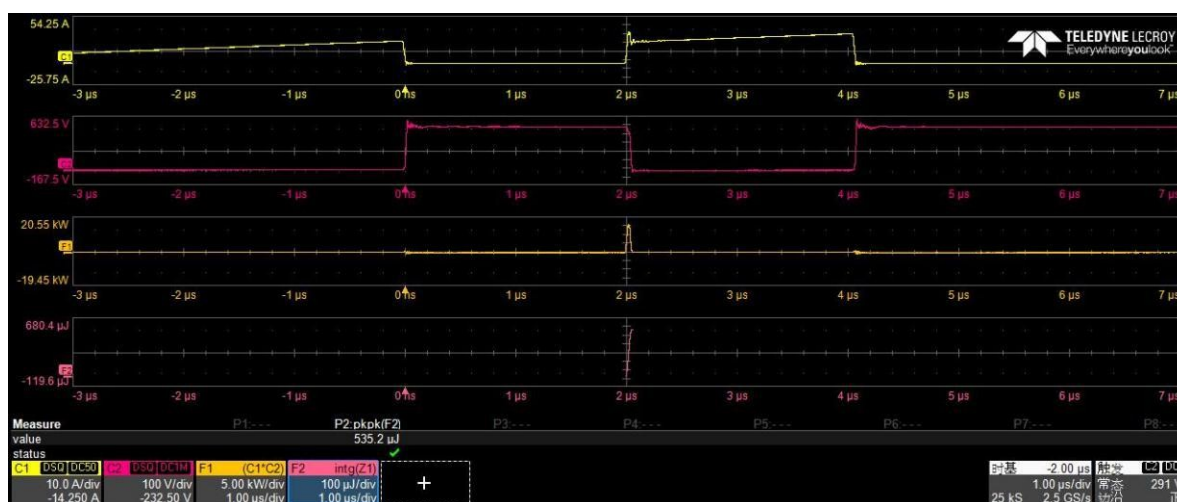
2. オン損失 E_{ON} およびオフ損失 E_{OFF} の測定

パワーデバイスのオン損失 E_{ON} およびオフ損失 E_{OFF} を測定する計算方法は、まず電圧と電流の波形を乗算して損失電力曲線を得て、その後、オンまたはオフ期間中の電力を積分することで E_{ON}/E_{OFF} を求めるものです。**MOSFET** の導通期間中の電力を積分すると、導通損失が得られます。



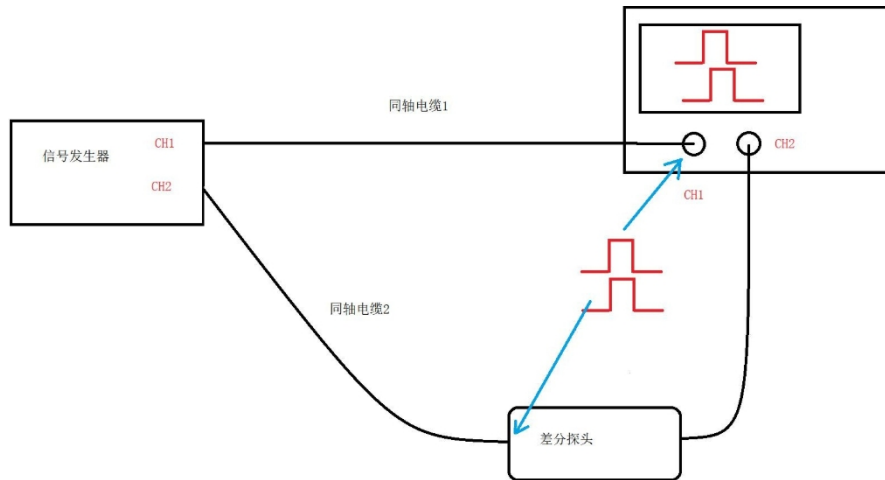
以下の測定事例では、電圧プローブと電流プローブを正確に7nsの相対遅延でオシロスコプの対応するチャンネルに入力し、遅延補正を行いました。その結果、オシロスコプは正確なオン損失 $E_{ON}=535\mu J$ を算出しました。

オシロスコプのチャンネル	CH1	CH2
テスト項目	ID	VDS2
プローブの種類	同軸分流器	高電圧差動プローブ
プローブ型番	CSD01M20	DP6150
1メートルの同軸ケーブルによる遅延	5.2ns	5.2ns
同軸分流器本体の遅延（長さ 30mm）	0.1ns	
高電圧差動プローブ本体の遅延		7.1ns
電圧・電流プローブの相対遅延	0	+7ns



三、電流・電圧プローブの絶対遅延パラメータを測定する既存の方法

絶対遅延パラメータを測定する基本原理は、遅延を測定または相殺できる基準チャンネルを見つける必要があるということである。



既存の絶対遅延パラメータの測定方法は上図の通りである。1台の関数信号発生器の2つのチャンネルCH1、CH2を用いて、同位相の2つの矩形波信号を生成し、一方の信号を同軸ケーブル1を介してオシロスコープの第1チャンネルに接続する。もう一方の信号は、同軸ケーブル2を介して

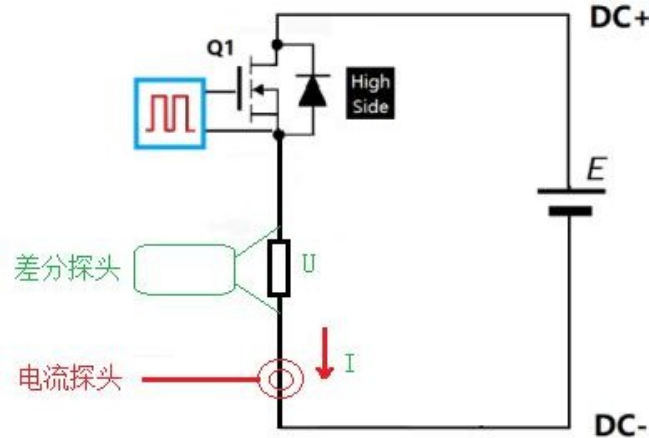
電圧プローブまたは電流プローブに接続されたテスト治具（テスト治具は電圧信号を電流信号に変換する装置）に接続する。同軸ケーブル1と同軸ケーブル2の長さは同じであるため、遅延も同一となる。したがって、オシロスコープのCH1入力端子に入力される矩形波信号と、差分プローブの入力端子に入力される矩形波信号は同位相であり、つまり両者の間には遅延が存在しない。

測定対象の電圧プローブまたは電流プローブの出力をオシロスコープの第2チャンネルに接続します。すると、オシロスコープの第1チャンネルと第2チャンネルの矩形波波形の間にある時間差が、測定対象の電圧プローブまたは電流プローブ自体の絶対遅延となります。

この方法の最大の欠点は、関数信号発生器が生成する方形波信号の振幅が一般的に $\pm 10\text{V}$ しかなく、電流プローブ測定治具で生成される電流も $\pm 0.2\text{A}$ しかなくことです。これほど小さな電流・電圧信号では、高電圧差動プローブ（ $700\text{V}\sim 7000\text{V}$ ）や電流プローブ（ $30\text{A}\sim 10000\text{A}$ ）を測定する際、オシロスコープ上の信号振幅が小さすぎるため、測定精度が大幅に低下し、場合によっては測定そのものが不可能になる。

4. 既存の電流・電圧プローブの相対遅延パラメータ測定方法：

電圧・電流プローブの相対遅延パラメータを測定する鍵は、完全に同期した2つの電圧および電流パルス信号を生成することにある。これは、無誘導の高電力抵抗に高電圧（数百Vに達することもある）のパルス電圧を印加することで実現できる。下図に示すように、Q1が導通すると、無誘導の高電力抵抗Rの両端における電圧パルスと電流パルスは完全に同期します。したがって、オシロスコープ上の電圧プローブと電流プローブの2つの波形の遅延差が、2つのプローブ間の相対遅延パラメータ（スキュー）となります。

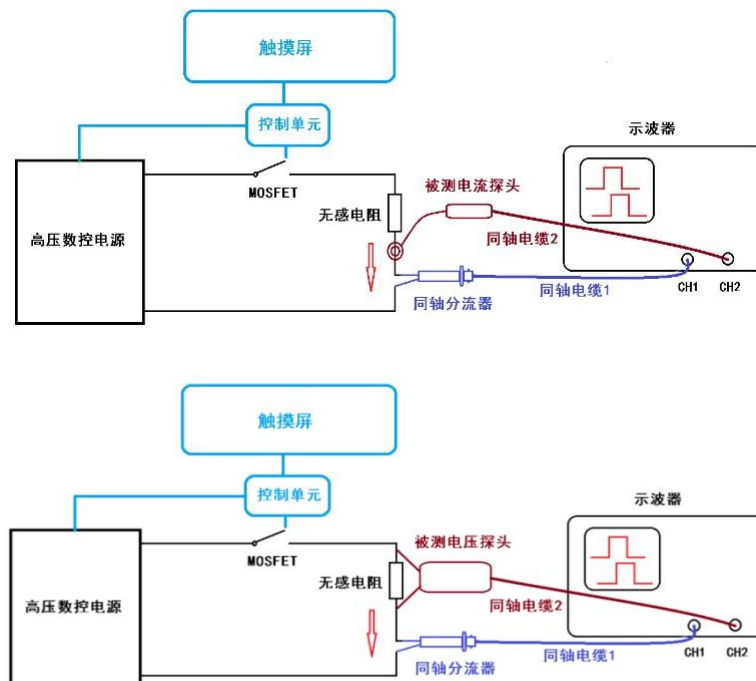


当社のDF6800オフセット校正治具は、このようにして2つの電圧・電流プローブ間の相対遅延パラメータ「スキュー (skew)」を測定します。

この方法の欠点は、特定のプローブの絶対遅延パラメータを提供できないことです。なぜなら、各電流または電圧プローブの絶対遅延パラメータが分かっているならば、2つのプローブ間の相対遅延パラメータ「スキュー」を直接計算できるからです。プローブ同士を2つずつ組み合わせて、手間をかけて相対遅延パラメータ「スキュー」を測定する必要はありません。

6. TF2000 プローブ遅延パラメータテスターの基本原理

TF2000は、CNC高電圧電源、MOSFET、無誘導抵抗、同軸分流器、制御モジュール、タッチスクリーンなどの主要コンポーネントをすべて統合した、携帯型の電流・電圧プローブ遅延テスターです。



ユーザーはタッチスクリーン上で高電圧パルスの電圧振幅を設定できます。ユーザーがトリガーボタンを押すと、MOSFETが導通し、無誘導抵抗に高電圧パルス（最大で数百ボルト）が発生します。同時に、立ち下がり過程でも完全に同期した電流パルス信号が発生します。無誘導抵抗であるため

であるため、この抵抗にかかるパルス電圧 U とパルス電流 I は同位相であり、つまりパルス電圧波形とパルス電流波形には遅延が生じません。

本装置の革新的な点は、回路に遅延パラメータを追加し、測定を必要としない広帯域同軸分流器を物理的に計算して、正確な遅延基準チャンネルとして利用できることです。これまでは、業界において、測定を必要としない遅延パラメータを持つ電流または電圧センサーを遅延基準センサーとして見つけることはできませんでした。

同軸分流器は筒状の抵抗体で構成されており、構造は非常に単純で、全長も一般的に30mm程度と短い。真空中の電磁波の伝播速度に基づくと、30mmの遅延時間は $t_1=0.1ns$ となる。これは、一般的な電流・電圧プローブの遅延パラメータである10nsと比較して、ほぼ無視できる程度である。また、同軸分流器の帯域幅は2GHzに達し、高速パルス電流信号を歪みなく出力電圧信号に変換することができる。パルスの立ち上がりエッジと立ち下がりエッジは非常に正確であり、遅延測定に有利である。

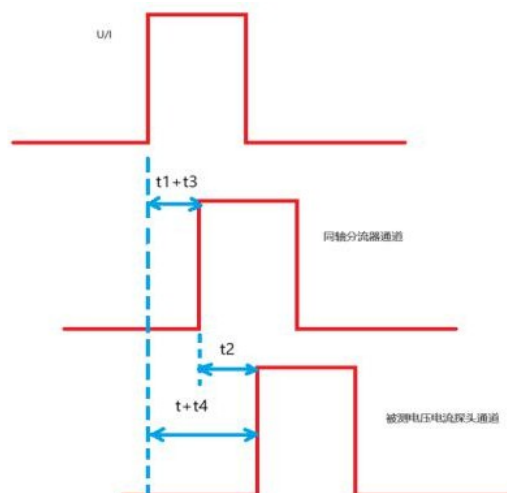
具体的な測定方法：

同軸分流器のパルス信号をオシロスコープの第1チャンネルに入力し、測定対象の電流または電圧プローブのパルス信号をオシロスコープの第2チャンネルに入力します。TF2000の無誘導抵抗にかかるパルス電圧 U とパルス電流 I は同位相であるため、オシロスコープに表示される遅延差は、これら2つのプローブ間の遅延差となります。また、同軸分流器のチャンネルの遅延パラメータは、測定を必要とせず物理的に計算できるため、これにより、もう一方の被測定電流または電圧プローブの遅延パラメータを測定することができます。

7. 電圧または電流プローブの絶対遅延測定の計算方法

CSD同軸分流器で検出されたパルス電流信号は、同軸ケーブル1を介してオシロスコープの第1チャンネルに入力される。同軸分流器の遅延は $t_1=0.1ns$ である。同軸ケーブル1の遅延は t_3 である。したがって、パルス電流信号がオシロスコープの第1チャンネルに到達するまでの総遅延は t_1+t_3 となる。被測定の電圧プローブまたは電流プローブの出力信号は、同軸ケーブル2を通じてオシロスコープの第2チャンネルに入力される。被測定電圧または電流プローブの絶対遅延は t 、同軸ケーブル2の遅延は t_4 であるため、被測定のパルス電圧または電流信号がオシロスコープの第2チャンネルに到達するまでの総遅延は $t+t_4$ となる。

オシロスコープ上で測定された第1チャンネルのパルス信号が、第2チャンネルのパルス信号より先行する時間差を t_2 と仮定する。



$$t_2 = t + t_4 - (t_1 + t_3) = t + t_4 - t_1 - t_3$$

したがって、測定対象の電圧または電流プローブの絶対遅延は $t = t_2 + t_1 + (t_3 - t_4)$ となり、以下の2つのケースが考えられます：

1. 同軸ケーブル1および2に、本機器に付属する遅延時間が完全に等しい2本の同軸ケーブル ($t_3 = t_4$) を使用した場合、測定対象の電圧・電流プローブの絶対遅延は $t = t_2 + 0.1 \text{ ns}$ となる
2. 同軸ケーブル1に、本機器に付属する遅延パラメータが $t_3 = 5.2 \text{ ns}$ であることが既知の同軸ケーブルを使用し、同軸ケーブル2に遅延パラメータ t_4 が未知の同軸ケーブルを使用する場合：

この場合、被測定電圧または電流プローブ＋同軸ケーブル2の合計絶対遅延は $t + t_4 = t_2 + t_1 + t_3 = t_2 + 5.3 \text{ ns}$ となる

8. 2つの電流・電圧プローブの相対遅延パラメータの測定

2つの電流・電圧プローブの相対遅延パラメータの測定は比較的簡単で、測定対象の2つのプローブを本装置に接続するだけでよい。オシロスコープ上で測定された第1チャンネルのパルス信号と第2チャンネルのパルス信号の遅延差が、2つのプローブの相対遅延パラメータとなる。

九、TF2000の使用方法

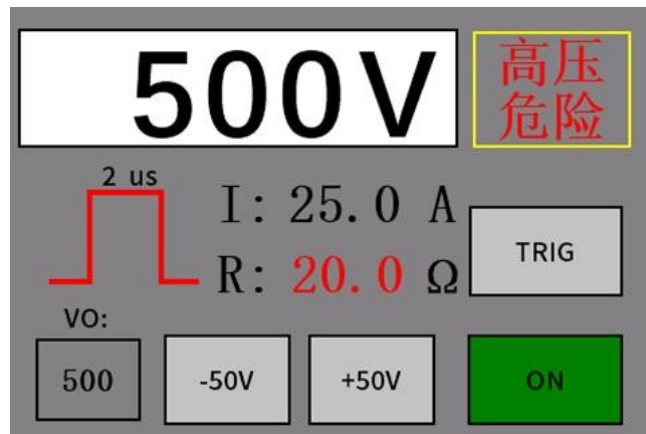
➤ 測定対象の電流または電圧プローブを接続し、同軸ケーブルでオシロスコープの2つのチャンネルに接続します。差動プローブは、本機の4mm赤・黒バナナジャックに直接差し込むことができます。



電流プローブは、無誘導抵抗に直接クランプできます。



- ▶ TF2000に24V電源アダプタを接続すると、本装置のタッチスクリーンが起動し、動作状態になります。

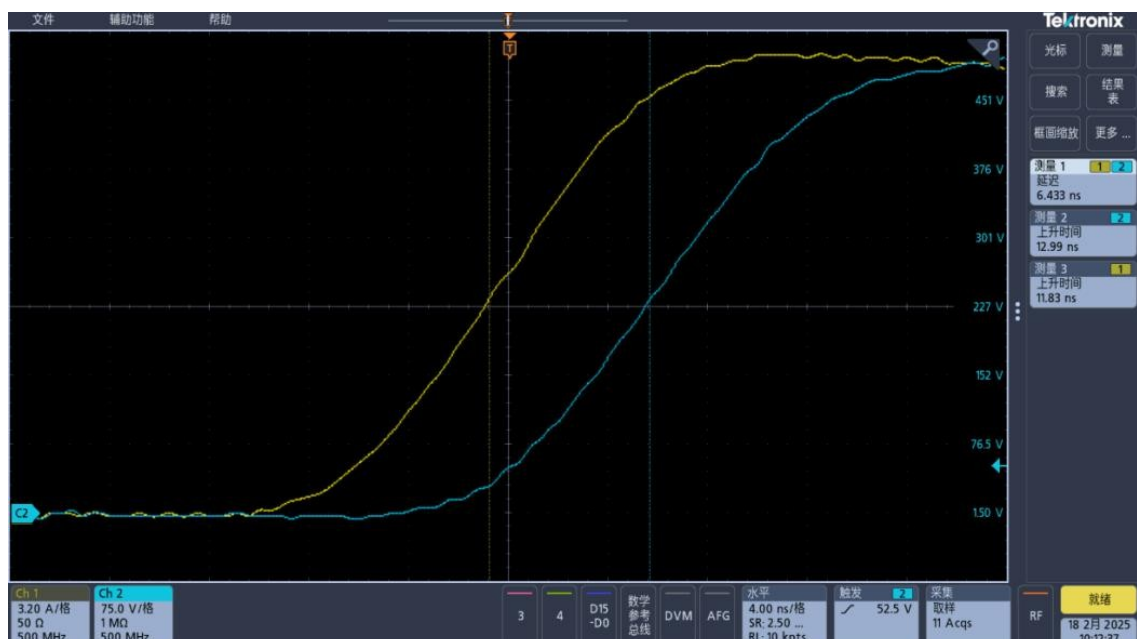


- ▶ 使用する無誘導抵抗の抵抗値を設定します。
- ▶ 必要なパルス電圧を設定すると、本装置は使用する無誘導抵抗の抵抗値に基づいて、出力パルス電流のピーク値を自動的に表示します。
- ▶ ON ボタンを押すと、高電圧電源が出力電圧を供給します。
- ▶ TRIG キーを押すと、本装置はパルス幅 2us の同期したパルス電圧およびパルス電流を出力します
- ▶ オシロスコープで2つのチャンネルの遅延を測定し、被測定プローブの遅延パラメータを算出します。下図は実際のテスト例です。

オシロスコープに表示される同軸分路器チャンネルのパルス電流波形は、高電圧差動プローブのパルス電圧波形より $t_2=6.4\text{ns}$ 先行しています。同軸ケーブル 1 および 2 には、本装置に付属する、遅延時間が完全に等しい 2 本の同軸ケーブルを使用しています。したがって、測定対象の高電圧差動プローブ本体の絶対遅延時間は：

$$t=t_2+0.1\text{ns}=6.5\text{ns}$$

したがって、測定対象の高電圧差動プローブ本体に、遅延パラメータが 5.2ns の同軸ケーブルを加えた場合の総遅延は 11.7ns となります



付録：本装置で測定可能な当社の電流・電圧プローブ

電圧プローブ	光絶縁型電圧プローブ	OPL6000/OPB6000 シリーズ	
	パッシブ電圧プローブ	P6251/P6501	
	高電圧差動プローブ	DP6000 (A/B/D) シリーズ DPX6000 (A/B/D) シリーズ P1300	
電流プローブ	高周波交流・直流電流プローブ	HCP8000 (HCPX8000/HCP8000C) シリーズ	
	ローシェルコイル電流プローブ	CP9000シリーズ CPX9000 シリーズ	
	同軸分流器	CSD*M シリーズ	

10. 梱包明細書

梱包明細書	
TF2000 本体	1個
BNCケーブル（CK-310）の遅延パラメータは 5.2ns	2本
24V 電源アダプター	1個
取扱説明書	1冊
保証書	1ページ

CYBERTEK

深セン市知用電子有限公司

SHENZHEN ZHIYONG ELECTRONICS CO.,LTD.

深セン市龍崗区黄閣北路天安デジタルシティ4号ビルA1702

Tel: 400 852 0005 / 0755-8662 8000

QQ: 400 852 0005

Eメール:cybertek@cybertek.cn

URL: <http://www.cybertek.cn>

© Zhiyong Electronics, 2025

中国にて2025年7月1日発行