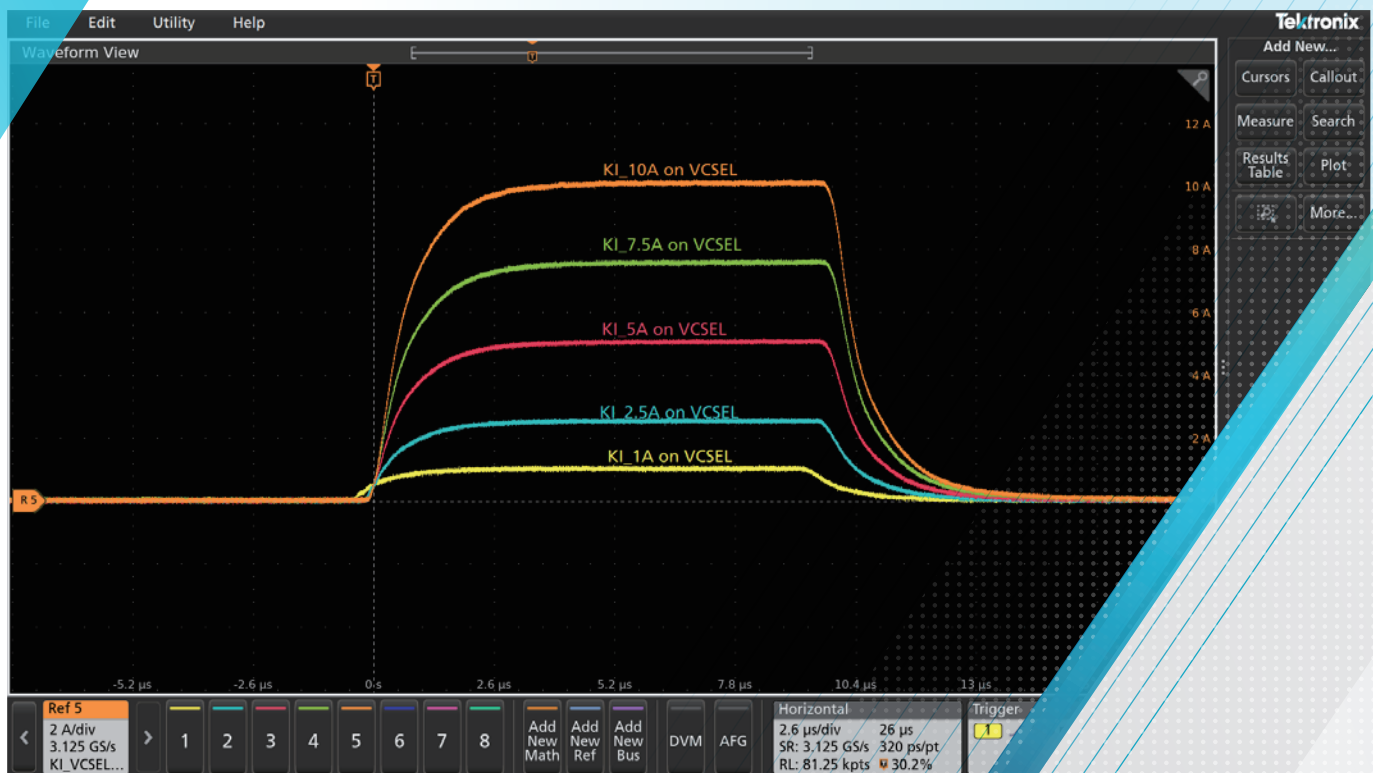


## 2601B-PULSE 型

# パルサー／システム・ソースメータによる 正確な $10\mu\text{s}$ パルス出力

## アプリケーション・ノート



## はじめに

急速に変化する光電子デバイス業界では、様々なテスト条件に対して迅速に対応できる試験装置が求められています。従来のソース・メジャー・ユニット (SMU) は、ほとんどの光デバイスの応答テストと測定に使われてきました。3D空間での距離と速度の測定に対する需要が高まるにつれ、垂直共振器面発光レーザ (VCSEL) が3Dセンシングの深度情報に広く使用されています。多くのアプリケーションでは、VCSELは数nsのパルス幅と1ns未満の立ち上がり時間で動作します。ただし、ウェハレベルまたはパッケージ・レベルのテストでは、数メートルのケーブルを備えているシステムでns秒レベルのパルスを生成することが難しいため、数十 $\mu$ sのパルスが使用されています。一部のハイパワーVCSELは最大10 Aを必要とします、短いパルス幅と数 $\mu$ sの立ち上がり時間でパルスを生成することが困難な場合があります。そのため、ケースレーは10A/10Vで最短10 $\mu$ sのパルス出力が可能なPulseMeter™テクノロジーを導入しました。このアプリケーション・ノートでは、ケーブル接続して最適化し、正確に10 $\mu$ sのパルスを生成する手法を紹介します。

## 配線のインダクタンス

様々なアプリケーションに適する様々なタイプのケーブルが存在しています。同軸ケーブルは、被試験デバイス (DUT) に高速信号を送信する用途で広く使用されています。各ケーブルには独自の特性があります、例えば、ケーブルのインピーダンスは容量とインダクタンスの関係を表しています。ケーブルのインダクタンスは、正確に10 $\mu$ sのパルスを印加する上で最も重要な要素です。このインダクタンスの決定に関係する変数は、中心導体の直径、外部シールドまでの距離、及び長さです (図1)。絶縁材に依存する同軸ケーブルの比透磁率は、通常1です。例えば、内径が1.0mm、外径が3.5mm、長さが1m、比透磁率が1の同軸ケーブルがある場合、インダクタンスは250nHになります。これは一般的な同軸ケーブルのインダクタンスです。外部シールドのないケーブルの場合、誘導は通常の同軸ケーブルの誘導よりもはるかに高くなる可能性があります。

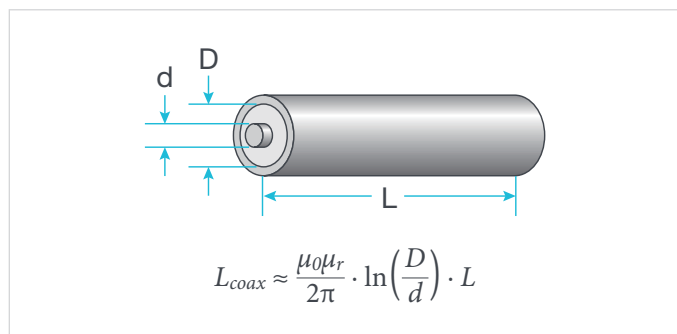


図1. 同軸ケーブルのインダクタンス

$L_{coax}$  = 同軸ケーブルのインダクタンス、単位はヘンリー (H)

$\mu_0$  = 自由空間の透過性 =  $4\pi \times 10^{-7}$

$\mu_r$  = 比透磁率 (通常、ほとんどの絶縁体で1)

D = 同軸ケーブルの外径

d = 同軸ケーブルの内径

L = 同軸ケーブルの長さ

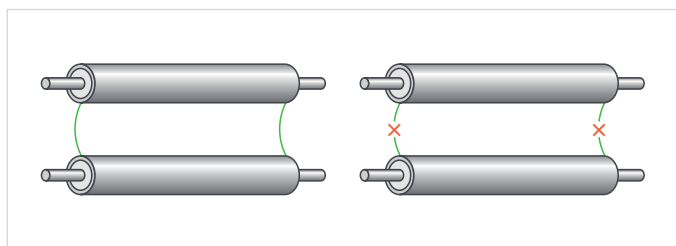


図2. シールドが接続された同軸ケーブル (左) シールドが切断された同軸ケーブル (右)

ほとんどの場合、図2に示すように、2本の同軸ケーブルが平行でDUTのHiとLow側に接続されます。2本のケーブルを使う場合のインダクタンスは1本のケーブルよりも高いはずですが。問題は、2本の場合のインダクタンスが1本の場合の2倍ではないことです。1本のケーブルのインダクタンスよりも3~6倍高い可能性があります。

例えば、250nHのインダクタンスを持つ1 mのケーブルは、2本の並列で500nHではなく1.5 $\mu$ Hになる可能性があります。インダクタンスは、ケーブルの配置ごとに異なる場合もあります。ケーブルが離れて配置される場合、余分なインダクタンス・ループが発生する可能性があります。2本のケーブルをシールドの両端でまとめることは、この問題を解決する効果的な方法であり、図2の左側の構成でのインダクタンスを約500nHまで減らします。

リングングは電流パルスの高誘導ケーブルに関連する最も大きな課題です。容量性負荷が電圧パルスの発振を引き起こす可能性があるのと同様、誘導性負荷は出力電流の安定性に悪影響を及ぼします。図3は、3つの異なる誘導負荷 (1 $\mu$ H、3 $\mu$ H、5 $\mu$ H) での100 $\mu$ s幅のパルスを示しています。これは、インダクタンスが大きいほど、パルス形状が不安定になることを示しています。パルスは短時間では安定しないため、この振動により正確な測定を行うことが困難になります。一部の計測器は、立上り時間を遅くしてより良いパルスを提供するように設計されていますが、その場合は安定するまでより長い時間が必要です。

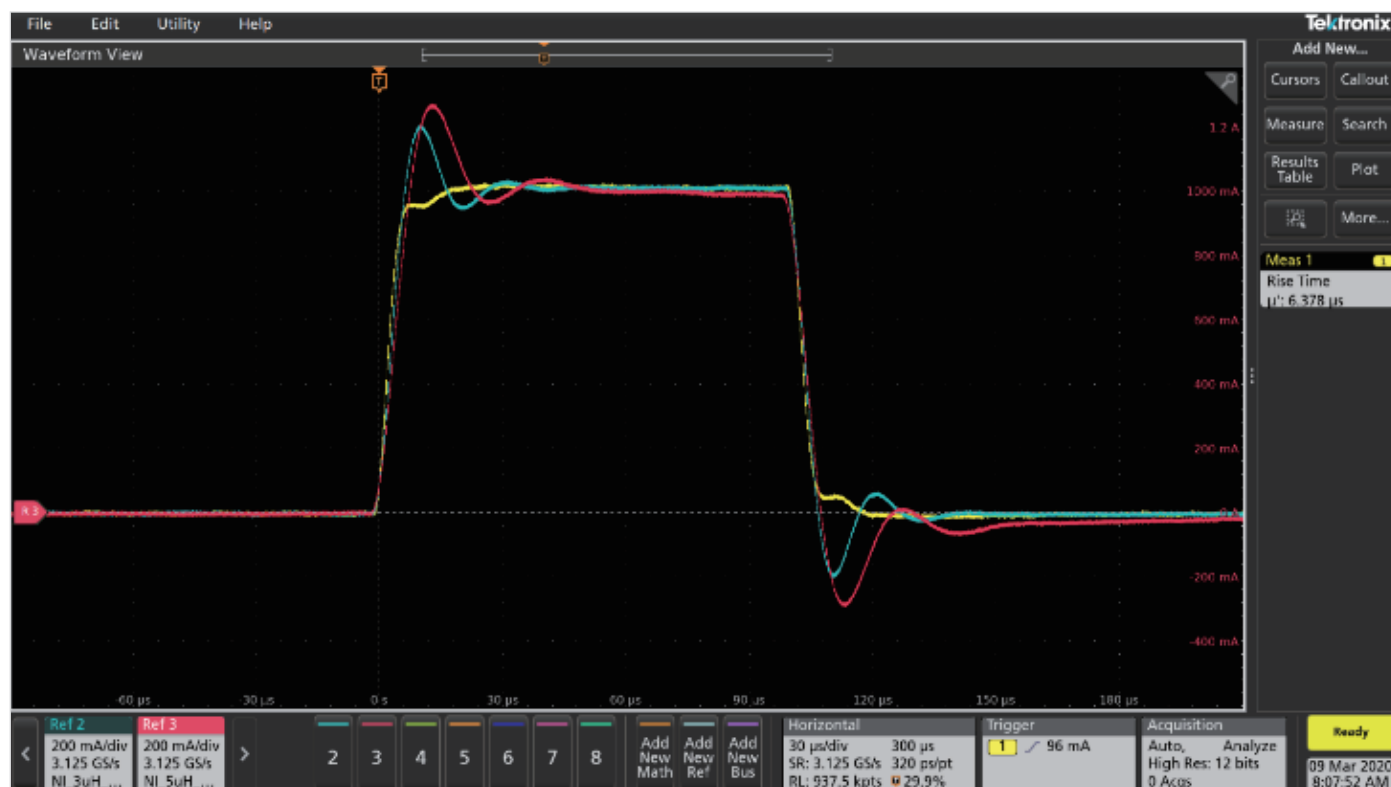


図3. インダクタンスは1 $\mu$ H(黄)、3 $\mu$ H(青)、5 $\mu$ H(赤)時の1A/100 $\mu$ sパルス

ケーブルのインダクタンスに関するもう1つの問題は、設定した電流を出力するためにパルスの立上りエッジと立下りエッジに必要な電圧のレベルです。図4、図5で示している通り、立上り時間が22 $\mu$ sのパルスは立上りエッジの部分で最大2Vまでしか上がりませんが、立上り時間が1.6 $\mu$ sの場合、最大12Vまで上がり、約10Vの電圧降下が生じます。インダクタンスは、パルスのエッジ中に機器に電圧負担をかけます。計測器は、このピーク電圧をサポートするか、立上り／立下りの速度を遅くする必要があります。高速パルスの高いピーク電圧のより深刻な課題としては、正確な電圧測定を行うために時間内に安定させることです。

ケースレーが提供するSC-182低インダクタンス・ケーブルは、1mあたりのインダクタンスが150nH未満であり、高速パルス・テストでのパフォーマンスが向上します。2本の1mケーブルの外部シールドを両端で短絡させると、インダクタンスは300nH未満になります。ケースレーは、1mあたり約350nHのインダクタンスを持つ通常の50 $\Omega$ 同軸ケーブルも提供しています。低インダクタンス・ケーブル同様、両端でシールドを短絡させるとインダクタンスが減少し、パルス性能が向上します。

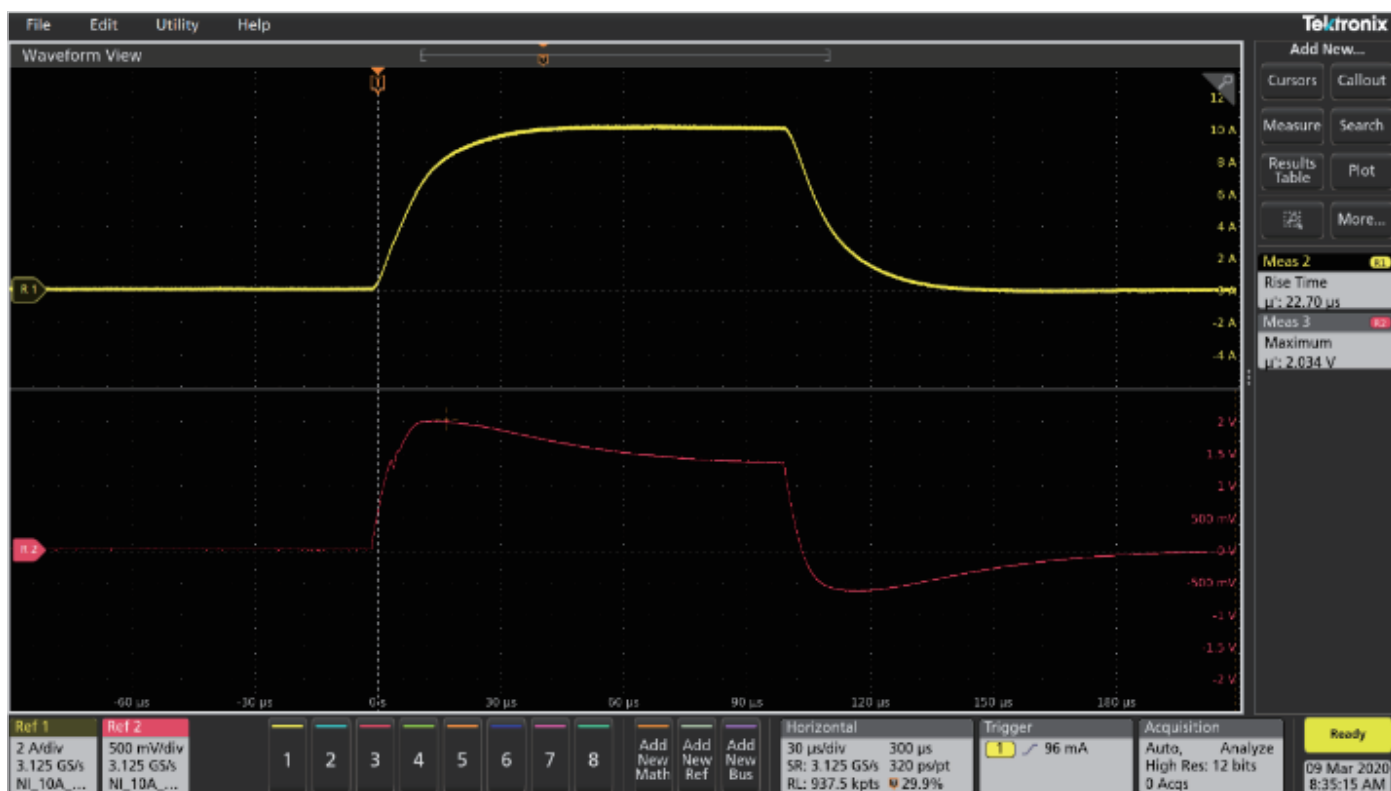


図4. 10Aパルス／1 $\mu$ Hインダクタンスで、立上り時間が22 $\mu$ sの場合

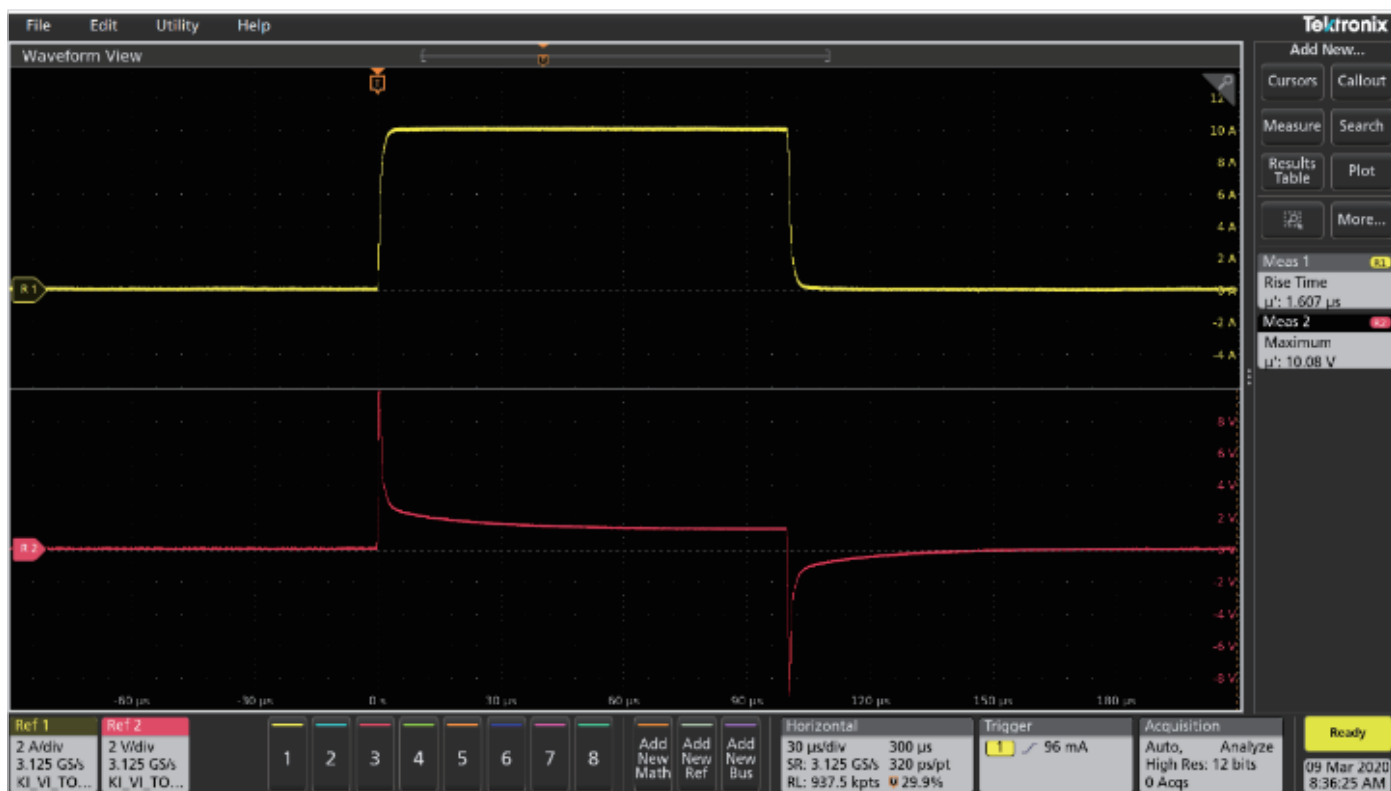


図5. 10Aパルス／1 $\mu$ Hインダクタンスで、立上り時間が1.6 $\mu$ sの場合

## 手動によるチューニングは不要

負荷及びケーブルの抵抗とインダクタンスがパルス・エッジに及ぼす悪影響への対処をサポートするために、「チューニング」という機能を提供する計測器は市場に存在しています。パルスの形状を調整するには、制御ループのゲイン対周波数の動作を変えるか、またはパルス・エッジのレートを変更する、2つの方法があります。負荷ケーブルの抵抗インダクタンスを変更するには、計測器を再調整する必要があります。

2601B-PULSE型パルサー／システム・ソースメータは最大 $20\Omega$ の負荷ケーブル抵抗と最大 $3\mu\text{H}$ のインダクタンスまでサポートします。全体の抵抗が $20\Omega$ 以下、そして全体のインダクタンスが $3\mu\text{H}$ であれば、パルス・エッジは実質的に変化しません。負荷ケーブルの抵抗が変化しても、高速かつ正確なパルスの形を維持できます。

図6は、DUTの抵抗がパルス形状にどのように影響するかを示しています。抵抗が高くなると、立ち上がりが遅くなります。これは通常のソース・メジャー・ユニットの典型的な動作です。高インピーダンス負荷は、電流源に電圧負担をかけます。この高いインピーダンスにより、帯域幅の低いループ・ゲインが増加するため、パルス・エッジが遅くなります。パルス電流レベルのスweep・テストは、光デバイスの光電流電圧 (LIV) 測定で一般的に使用されます。パルスは特定の電流レベルに合わせて一度調整されますが、その特性が他のすべての電流レベルに適用できるとは限りません。図7に示す通り、通常のSMUは一度チューニングされた係数により、すべての波形が平坦で安定したパルストップを備えているわけではありません。この掃引電流波形の不安定性は、不正確なLIV測定に反映されます。従って、狭い電流レンジを使うための制限を設定するか、他のすべての電流レベルに対してパルスを調整する必要があります。

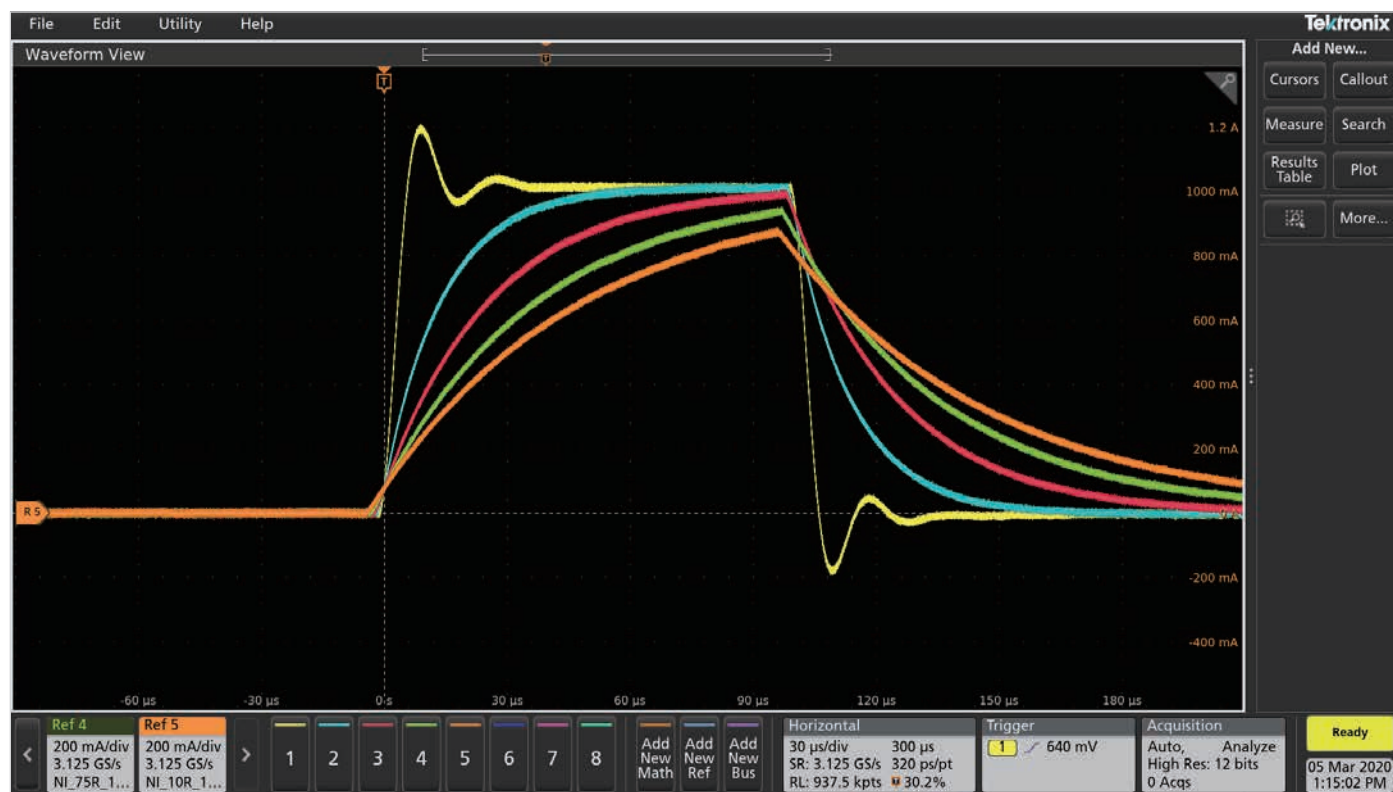


図6. 通常のSMUによる $1\text{A}/100\mu\text{s}$ のパルス出力。抵抗は $1\Omega$  (黄色) /  $2.5\Omega$  /  $5\Omega$  /  $7.5\Omega$  /  $10\Omega$  (オレンジ色)



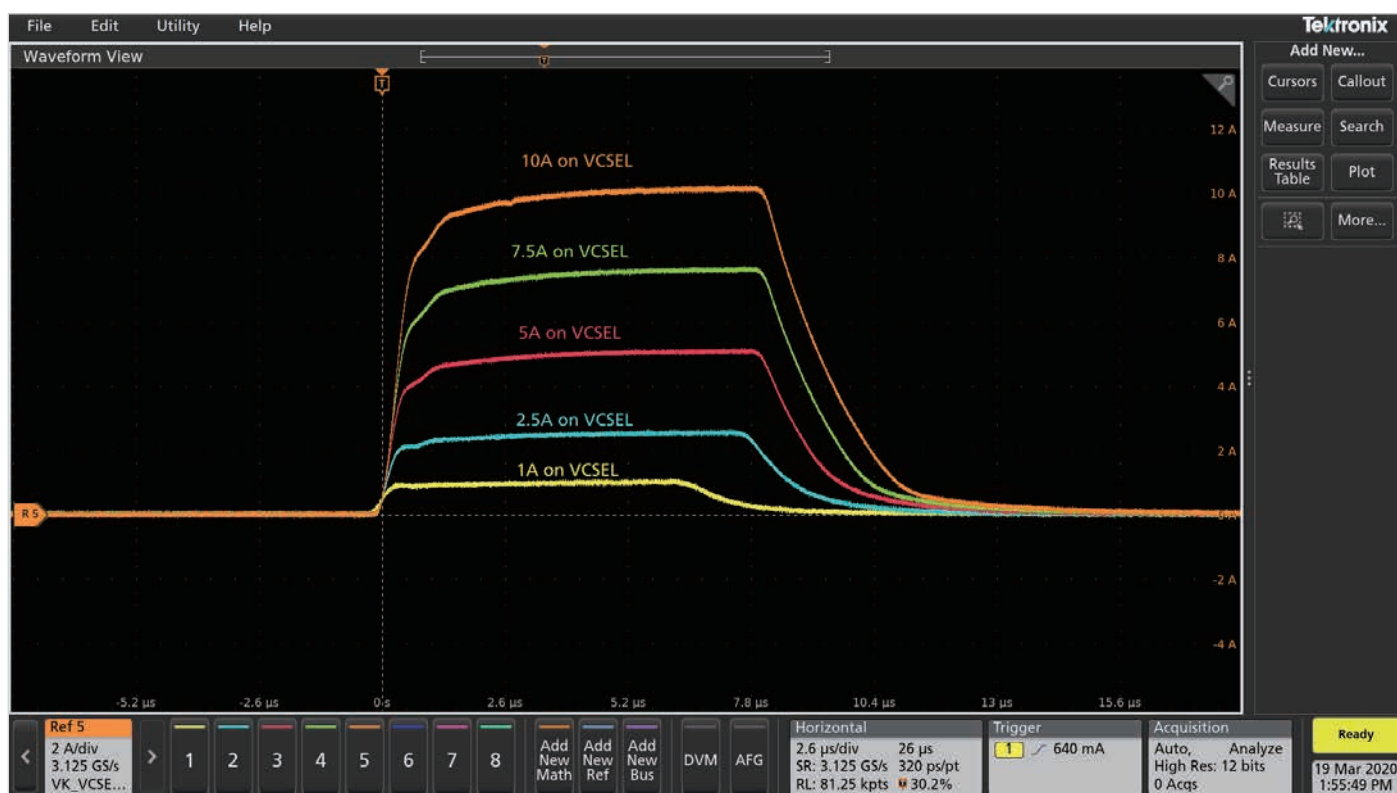


図7. VCSELに対する通常のSMUによる振幅スイッチ。1A (黄) / 2.5A (青) / 5A (ピンク) / 7.5A (緑) / 10A (オレンジ)

2601B-PULSE型はソース・メジャー・ユニットの全ての標準機能と高速パルス機能を一台に統合しています。最大10A/10Vで最短 $10\mu s$ のパルス出力することができ、さらにチューニング不要です。機器が通常範囲内で動作し、ケーブルとDUTを含めて合計 $3\mu H$ までのインダクタンスである限り、2601B-PULSE型は $10\mu s$ のパルスを正確に出力可能です。ケースレーの特許出願中のPulseMeterテクノロジーにより、幅広い負荷インピーダンスに対してオーバーシュートのない高速立ち上がりを実現できます。

図8は、3つの異なる負荷インダクタンスの場合で、 $10\text{A}/10\mu\text{s}$ パルスの出力結果を示しています。指定された最大負荷インダクタンスが $3\mu\text{H}$ であっても、パルス形状は調整なしで $5\mu\text{H}$ の負荷インダクタンスでも保持されています。図9は別の実験結果として、 $1\Omega$ から $10\Omega$ までのいくつか異なる負荷抵抗での $1\text{A}/10\mu\text{s}$ のパルス出力結果を示しています。 $10\Omega$ の抵抗は非常に高いインピーダンスであるため、通常、図6に示すように、立上りが遅くなるはずですが、ここではすべての波形形状はほぼ同じで、一つの波形のように見えます。



図8. インダクタンスは $1\mu\text{H}$ 、 $3\mu\text{H}$ 、 $5\mu\text{H}$ の場合、2601B-PULSE型による $10\text{A}$ パルスの出力波形

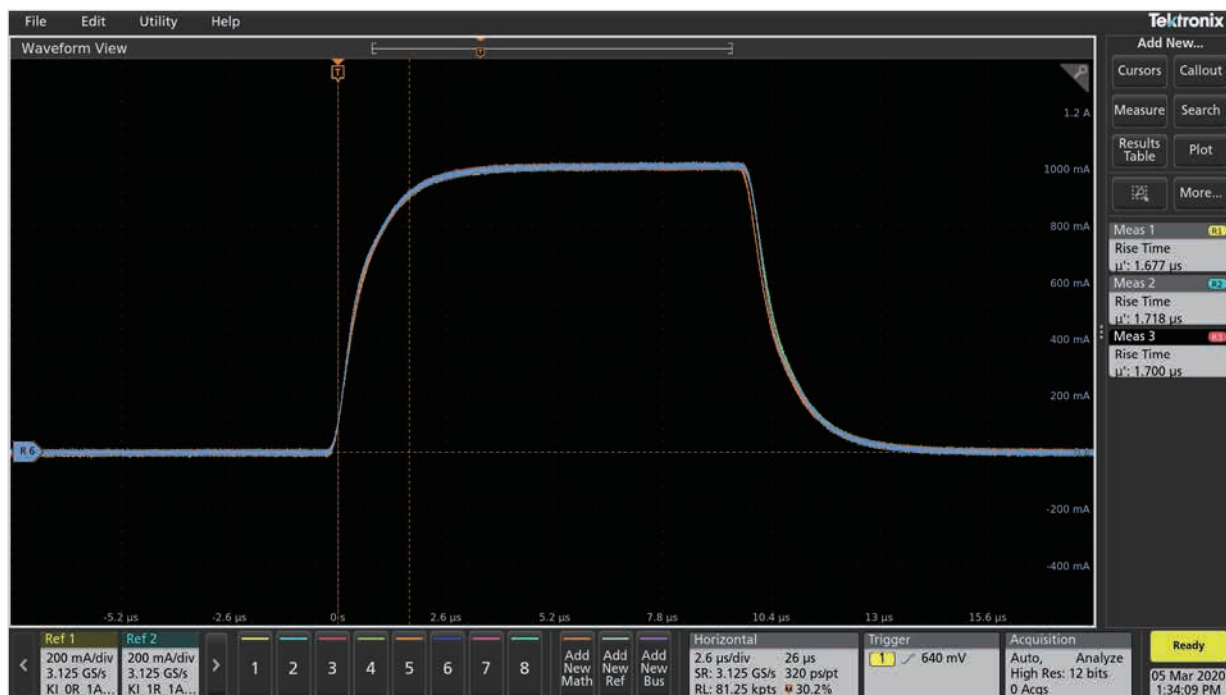


図9. 抵抗は $1\Omega$ 、 $2.5\Omega$ 、 $5\Omega$ 、 $7.5\Omega$ 、 $10\Omega$ の場合、2601B-PULSE型による $1\text{A}$ パルスの出力波形

図10は、通常LIV測定に使用される電流振幅スイープのタイプを示し、各電流レベルに対して同じ立上り時間とパルス幅を提供します。図7に比べ、図10は各電流レベルのフラット部分で同じパルス幅と同じ立上り時間を示しています。これにより、電流の変化は光パワーと光強度の変化に直接関連する環境でも、安定かつ一貫した光学測定が可能になります。

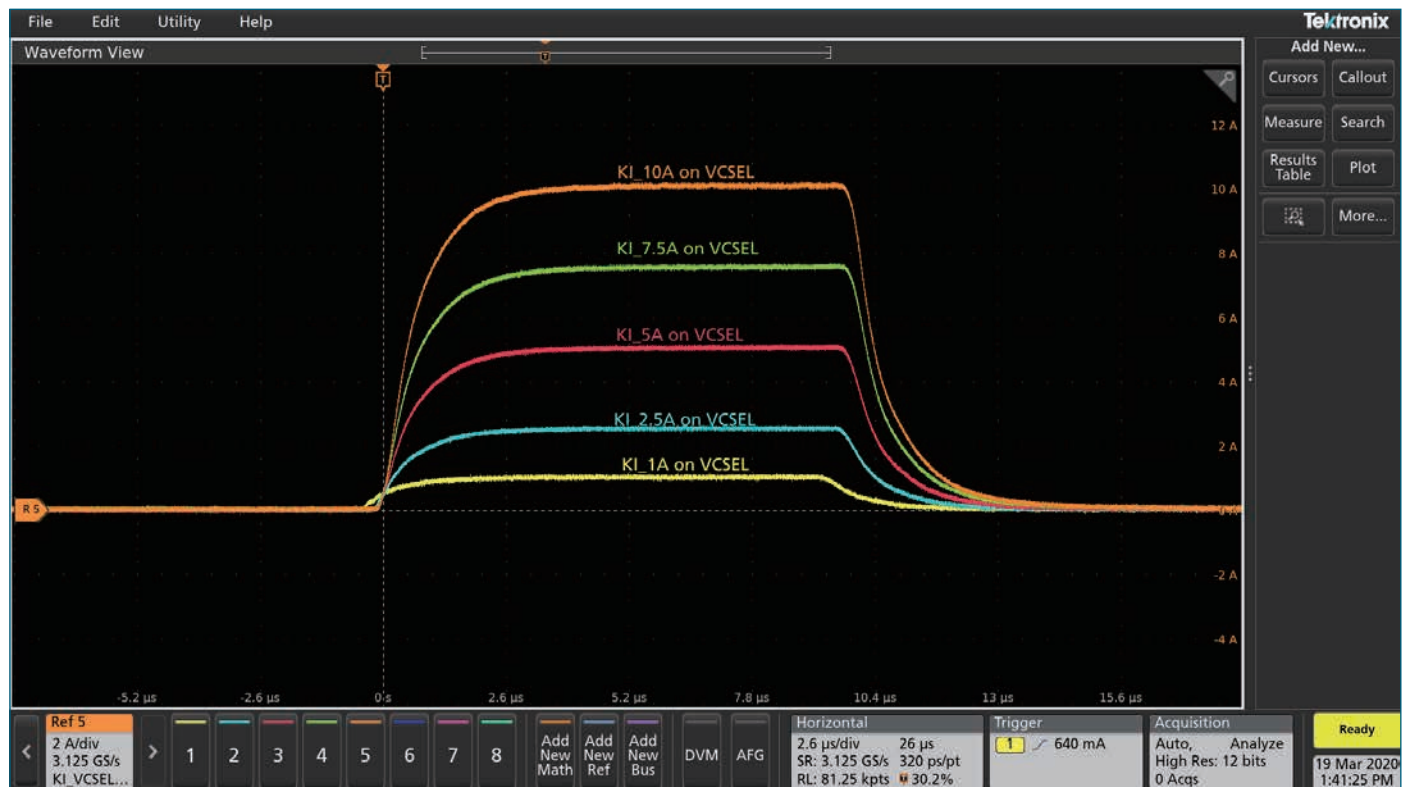


図10. VCSELの1A、2.5A、5A、7.5A、10Aにおける2601B-PULSE型によるパルス振幅スイープ

## 2601B-P-INT型インターロック／コネクタ・ボックス

2601B-PULSEには、2601B-P-INT型BNC変換用のコネクタ・ボックスが付属しています。2601B-PULSEの背面に取り付けた場合、同軸コネクタをSMUモードと高速パルスモード間で切り替えるために必要な相互接続を提供します。パルス測定とDC測定を自動的に切り替えることができます。つまり、外部スイッチングシステムなしで、デバイスのオン状態とオフ状態の両方の特性を測定できます。

2601-P-INTは、光デバイス試験におけるセーフティ・インターロック機能も提供します。2601B-PULSE型の出力電圧は安全面において危険はありません。ただし、この製品はレーザ・ダイオードとVCSELのテストで広く使用されるため、目の安全上の問題を引き起こす可能性があります。図11は、2601B-P-INTの光インターロック機能を示しています。この機能を有効にするには、2601B-P-INTのインターロック有効位置にジャンパを配置し、外部5 VDC電源を提供し、インターロックの状態を報告するように2601B-PULSEを設定する必要があります。インターロックされると、HIとLOが短絡され、2601B-PULSE型が光デバイスを起動できなくなります。



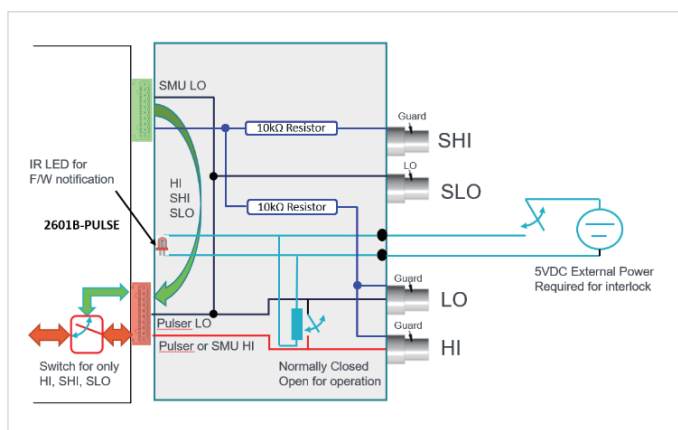


図11a. 2601B-P-INT型インターロック／コネクタ・ボックスのブロック図



図11b. 2601B-P-INT型インターロック／コネクタ・ボックスの接続

同軸ケーブルを使用する際のもう1つの考慮事項は、HIとLOのガードをDUT側の端で短絡し、ケーブルのインダクタンスを最小限に抑える必要があることです。ガード短絡により、ケーブルのシールド側で閉ループが形成されます。10Aの電流がHighからLowに流れると、パルスの立上りエッジで、シールドに一定量の電流が流れ、Low側からHigh側に逆流します。この電流誘導は防止できない自然現象です。検知ケーブルをHighとLow側からできるだけ離して配置するように、この電流による電圧検知ケーブルへの影響を抑えるように注意してください。

インターロック・ボックスは、出力をDUTに簡単に接続できるBNCコネクタもサポートしています。ただし、ガードなしの同軸接続のため、低電流測定での優れたパフォーマンスは期待できません。2601B-P-INTには、同軸接続のシールドにガードがあります。コネクタのシールドを使用する場合は注意が必要ですが、このガードは2601B-PULSEで最大40Vを伝送するため、安全上の問題にはなりません。ガードはグラウンドやLowに接続しないでください。ガード接続は、低電流測定で優れたパフォーマンスをサポートするだけでなく、オフ状態での電流測定中の短い電流のセトリングでもサポートします。ほとんどの光デバイスのテストでは、逆電流測定または逆電圧測定で低電流のソースと測定が必要です。

## パルスの設定について

高速パルスモードで機器を制御するには、2つの操作方法があります。1つ目は機器制御ソフトウェアKickStart (V2.3.0以降のバージョン) を使う方法です。Kickstartは2601B-PULSEをサポートし、完全な波形測定やパルス・トップ測定などの基本的な操作を提供します。図12は、 $3\text{A}/10\mu\text{s}$ パルスによる光デバイスの完全な波形測定を示しています。図13に示すI-V曲線測定は、光デバイス特性の基本測定です。KickStartは、テスト条件の設定、結果データの取得、データのプロットも簡単にサポートします。

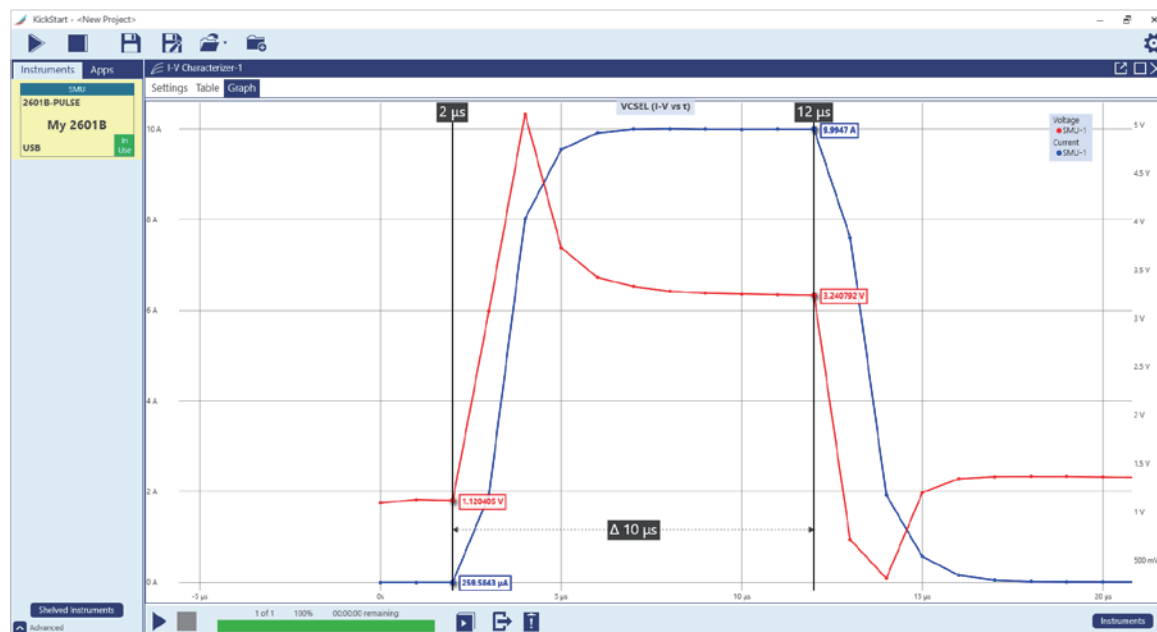


図12.  $3\text{A}/10\mu\text{s}$ の完全な波形測定

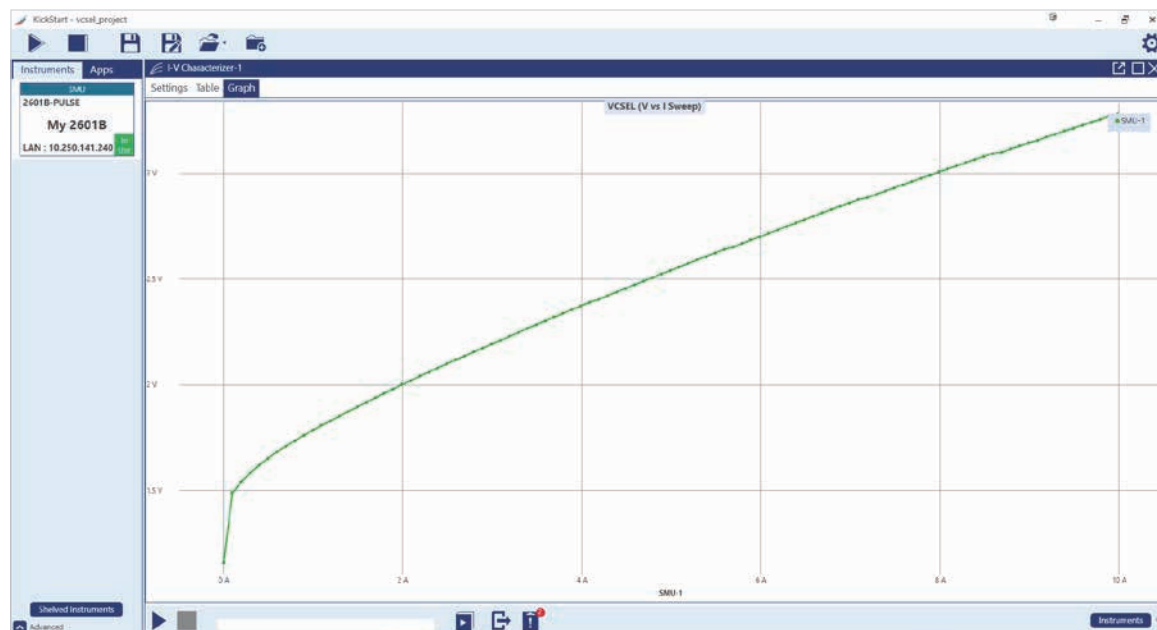


図13. パルス・スイープ測定 (0A～10A)

図14は、トリガ・モデルで10回パルスの電流スイープを実行するTSPスクリプトの簡単な例です。通常の2600シリーズSMUのトリガ・モデルとは多少の違いがあります。パルス周期、パルス幅、および測定開始を制御するために、通常のトリガ・モデルでこの測定を行うには、最低3つのタイマーが必要です。しかし、新しいパルス・トリガ・モデルでは、単一のトリガによるパルス周期の制御が十分であり、パルス幅 (smua.trigger.source.pulsewidth) と測定開始 (smua.trigger.measure.delay) に個別のコマンドがあります。2601B-PULSE型のリファレンス・マニュアルには、スクリプトの使用に関するすべての詳細と、トリガ・モデルを構築して短いパルスを生成する方法が記載されています。

<pre> reset() smua.nvbuffer1.clear() smua.trigger.count = 10 trigger.timer[1].count = 9 trigger.timer[1].delay = 1e-3 trigger.timer[1].passthrough = true trigger.timer[1].stimulus = smua.trigger.ARMED_EVENT_ID smua.trigger.source.action = smua.ENABLE smua.trigger.source.linear(1, 10, 10) smua.trigger.source.pulsewidth = 10e-6 smua.trigger.source.stimulus = trigger.timer[1].EVENT_ID smua.trigger.measure.action = smua.ENABLE smua.pulser.measure.delay = 9e-6 smua.trigger.measure.v(smua.nvbuffer1) smua.pulser.enable = smua.ENABLE smua.source.output = smua.OUTPUT_ON smua.trigger.initiate() waitcomplete() </pre>	<pre> -- Restore default settings -- Clear the measure buffer -- Set the number of pulses to 10. -- Generate additional trigger events for the pulse sweep -- Pulse period. -- First trigger passes through immediately -- Specify which event starts the timer. -- Enable source level changes during the sweep. -- Specify a 10-point linear pulse sweep from 1 A to 10 A. -- Set the source pulse width to 10 microseconds. -- Pulse start when the trigger timer event occurs -- Pulse Mode Enable -- 9 microseconds measure delay after pulse start -- Measure voltage and save in nvbuffer1 -- Enable pulse mode. -- Turn the source output on. -- Initiate the trigger model. -- Wait for pulse commands to complete. </pre>
---	---

図14. 10回のパルス掃引測定のTSPスクリプトの例

## まとめ

すべてのケーブルには独自の特性があり、短パルスのパフォーマンスに影響を与える可能性があります。このアプリケーションに同軸ケーブルを使用する場合は、ケーブルのインダクタンスを減らすために、HIケーブルとLOケーブルのシールドを両端で短絡することを強くお勧めします。最小のケーブル・インダクタンスの場合でも、様々なデバイスで10 $\mu$ s/10Aで正確なパルスを出力ことは、困難な場合があります。ケースレーは、仕様範囲内で動作している限り、あらゆる種類のデバイスにおけるチューニングを必要としない新しいPulseMeterテクノロジーを使用した2601B-PULSE型パルサー／システム・ソースメータをリリースしました。2601B-P-INTは、光学的安全のためのインターロックと、接続を変更せずに高電流パルス測定と低電流DC測定と一緒に使用できる便利なソリューションを提供します。

## 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／ケースレーインスツルメンツ

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** ヨッ! 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・13:00～17:00  
(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 © 2020, 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。

2020年5月 1KZ-61692-0