

## ニューフォーカス アプリケーションノート #1

## 高速検出器および高周波数技術の理解

## Insights into High-Speed Detectors and High-Frequency Techniques

## 高速フォトディテクタ

P1204~1211

電気付属品

P1252

高速伝送システムおよび短パルスレーザーの進歩により、現在では多くの用途で時間分解能の高い、すなわち高周波帯域幅に対応する光学検出器が必要とされています。その一例である高速フォトディテクタは、光学システムの周波数および応答時間を測定可能で、モードロックレーザーシステムのパルス測定や、周波数多重通信システムにおけるデータストリームの検出などを行うこともできます。高速フォトディテクタは、動的ポンププローブ分光法などの分光法において分解能の向上を実現するだけでなく、レーザーヘテロダイン法の実験およびミリ波信号の生成にも使用できます。しかしながら、対象となる光信号が極めて高速であっても、お使いのフォトダイオードや電気機器、つまりオシロスコープやスペクトルアナライザが広い周波数帯域幅に十分に対応していない場合、測定を行っても、システム内の最も反応速度が遅い部品と同程度の速度の信号しか得られません。そのため、高速光信号を高速電気信号に変換する高速フォトダイオードだけではなく、波形観察用のオシロスコープ、広帯域幅対応スペクトルアナライザ、バイアスネットワーク、コネクタおよびケーブルが必要になります。お使いの光信号の帯域幅から、システム全体の構成部品に必要な最小帯域幅を決定します。これを測定機器の選択時のガイドラインとしてください。

レーザーヘテロダインまたは光変調実験を行なう場合に、必要な周波数はとてもシンプルです。お客様の装置は、実験で最も高い周波数（通常は最も高い変調周波数）に対し、極めて平坦な応答性が必要です。オシロスコープおよびその他の時間領域の装置は、一般的に周波数の帯域幅を3-dB帯域幅で表します（パワーがDC入力時の値の半分に低下するときの周波数）。しかし、増幅器およびスペクトルアナライザでは、その周波数帯域幅を1-dB帯域幅（パワーがDC入力時の値の80%に低下するときの周波数）で表す場合があります。どちらの場合も、装置が適切な帯域幅を有することを確実にするには、最大周波数を決定し、安全のために20%の余裕を見た数値を上限の帯域幅として装置を決定してください。

時間領域におけるパルス計測の場合、必要な周波数帯域幅を決定するための絶対的な規則は存在しません。しかし、予測を行うためのよい方法があります。フォトダイオードは光子を電子に変換します。電子は光の強度に反応します。そこで、時間における強度のFWHM（半値全幅）を周波数における強度のFWHM（半値全幅）に関連付ければ、必要な周波数について何らかの見解が得られるでしょう。パルス形状がガウシアンで、FWHMが $\tau$ の場合、周波数におけるFWHMは単純に $0.44/\tau$ です。

$sech^2$ 型の変換限界パルスの場合、周波数におけるFWHMは $0.31/\tau$ です。これを3-dB帯域幅に使用すると、非常に高い値になります。これは、電気装置向けの3-dB地点は、電圧ではなくパワーが半分に低下するときを規定していることが理由です。同様に、これは電圧が $\sqrt{2}$ に低下するときを規定します。フォトダイオードを使用した電圧測定に興味があるの

ですから、より正確な帯域幅は、ガウシアンの場合 $0.31/\tau$ 、または $sech^2$ 型の場合 $0.22/\tau$ です。安全のために、帯域幅に20%の余裕を見ると、それぞれ約 $0.37/\tau$ および $0.26/\tau$ となります。平均すると、 $\tau$ がFWHMのとき、周波数3-dBの帯域幅はおよそ $0.4/\tau$ となります。

## 高速フォトディテクタの設計に関する検討事項

フォトダイオードをRC回路としてモデリングすることは、一般的に知られています。フォトディテクタの速度を制限する3つの基本的な要素があります。すなわち、キャリア拡散、空乏領域におけるドリフト伝搬時間、および空乏領域における静電容量です。3つのプロセスの中で最も低速なのは、領域の外側から高電場空乏領域に向かうキャリア拡散です。低速による影響を最小限に抑えるため、キャリアは空乏領域内またはその近傍で生成する必要があります。2番目のプロセスである伝搬時間は、キャリアが空乏領域内をドリフトし、デバイスの外に出て行くのに必要な時間です。十分な逆バイアスにより、これらのキャリアはその飽和速度（GaAsの場合は $3 \times 10^6$  cm/s）でドリフトします。最後に、デバイスの静電容量により、デバイスのRC時間定数が決定されます。Rは荷重抵抗（通常は50  $\Omega$ ）です。フォトダイオードの応答を最大化するため、伝搬時間は一般的にRC時間定数と同程度に設計されています。たとえば、GaAsの飽和速度を考えると、1-psの伝搬時間には空乏層が0.3  $\mu\text{m}$ 未満であることが要求されます。50  $\Omega$ システムでRCが同等の場合、静電容量は $<20$  fFでなければなりません。 $C = \epsilon A/d$ （GaAsの場合 $\epsilon = 13$ ）であり、ここで幅 $d = 0.3$  mm、 $A$ は領域です。お使いの有効なフォトダイオードの領域は最大で52.5  $\mu\text{m}^2$ 、または直径 $7 \mu\text{m}$ である必要があります。

## 電気装置

## ケーブル

測定精度を保つために必要な最小周波数帯域幅がわかり、適切な帯域幅を持つフォトダイオードを選択できました。フォトダイオードの後に配置するすべての電気部品は、この帯域幅を維持できなければいけません。まずケーブルから始めましょう。ラボで使用する一般的なケーブルはRG-58ですが、これは1~2 GHz以降の損失が高いです。Microwaveは受け入れ可能な損失が最大50 GHzのケーブルを取り扱っています。これらのケーブルの損失は受け入れられますが、無視できるものではありません。そのため、すべてのケーブルの長さを最小限に留めてください。

## コネクタ

次に忘れてはならないのが、すべてのコネクタも仕様を満たす必要があるということです。フォトディテクタにバイアスをかけるためのバイアスTも含まれます（注：New Focus™のフォトディテクタではバイアスTは不要です）。コネクタの周波数領域は、同軸構造の最初の円形導波モードの出現により制限されます。外側の導電体の直径を小さくすると、使用可能な最大周波数が増加しますが、空間を誘電体で充填すると、使用可能な最大周波数が小さくなります。ラボで最も豊富に見られるBNC (Bayonet Navy) コネクタは、最大2GHzまでは良好に動作します。SMA(サブミニチュアA)コネクタで良好です。空気を絶縁体として使用する3.5 mmコネクタはSMAコネクタと結合可能であり、34 GHzまで良好に動作します。2.92 mmまたはWiltron® Kコネクタは40 GHzまで良好であり、APC-3.5およびSMAコネクタと互換性があります。2.4-mmコネクタは50 GHzまで良好であり、1.85 mmまたはWiltron Vコネクタは65 GHzまで使用できます。Agilentは、SMA、SMC (7 GHzまで)、APC-7 (18 GHzまで) およびType N 50-Ω (18 GHzまで) コネクタの他に、3.5 mm、2.92 mm、2.4 mmおよび1.85 mmコネクタを製造しています。

すべてのコネクタの性能は、対となるコネクタとの接合部分の品質に影響されます。これらのコネクタの取扱いには十分な注意が必要です。恒久的に正しいトルク値に設定されたトルクレンチを使用して、オスの継手のナットを回します。このとき、コネクタの本体部分をしっかりと押さえ、回転しないようにしなければなりません。オスの継手のナットが堅くしめると、摩擦力が増加し、ナットと本体が固定されて本体が回転する場合があります。これはめっきをすり減らし、外側の結合部の周縁および両方のコネクタピンにキズをつける場合があります。コネクタが過剰トルクにより損傷すると、相手側のコネクタにも損傷を引き起こします。この損傷がコネクタの周波数性能を低下させます。加えて、メス側の部品をオス側にねじ込む際には、オスコネクタの継手のナットを強く固定しないでください。これは両方のコネクタを破損します。

## インストルメンツ (増幅器、オシロスコープなど)

電気装置として、AgilentおよびTektronixは50 GHzまでのデジタルオシロスコープおよび325 GHzまでのスペクトルアナライザを製造しています。New Focus™およびその他の企業では、20 GHzまでの増幅器を取り扱っています。測定精度には、目的の周波数帯域幅に対して極めて平坦な装置の応答が必要であるにご注意ください。これはつまり、増幅器の応答が平坦で、位相応答が周波数に対して線形でなければならないということです。お使いの装置がこれに該当しない場合、たとえば増幅器の位相応答が非線形である場合、測定結果に歪みが生じ、測定した波形が低速になってしまいます。

## 電気装置のまとめ

異なる周波数領域について見てみます。<1 GHz、DCから25 GHz、DCから60 GHzです。目的の最大周波数が1 GHz未満、またはパルス幅が400 ps以上の場合、APDが適切でしょう。また、BNCコネクタおよびRG-58ケーブルも適切です。

0~25 GHzまたはパルス幅16 ps以上の場合、PINまたはショットキーフォトダイオードが必要です。また、SMAコネクタおよび高性能なフレキシブルケーブルまたは半硬質ケーブルが適しています。バイアスTについては、Agilentが26.5 GHzまで良好に動作するものを製造しています。また、26.5 GHzまで良好な増幅器もあります。Agilentでは34 GHzまで良好なスコープ、22 GHzまたは26.5 GHzまで良好なスペクトルアナライザも製造しています。Tektronixも20 GHzまで良好なデジタルオシロスコープや、33 GHzまで良好なスペクトルアナライザを製造しています。

0~60 GHzまたはパルス幅が6.7 ps以上の場合、最高品質の装置を使用する必要があります。たとえば、1.85-mmまたはVコネクタ、超低損失ケーブル、単独で50 kHzまで良好に動作するAgilentおよびTektronixの最上級のオシロスコープなどです。Wiltronは60-GHz動作に適したバイアスTを取り扱っています。この周波数にまで拡大するには、スペクトルアナライザは外部の周波数ミキサを使用する必要があります。AgilentでもTektronixもこれに対応しています。

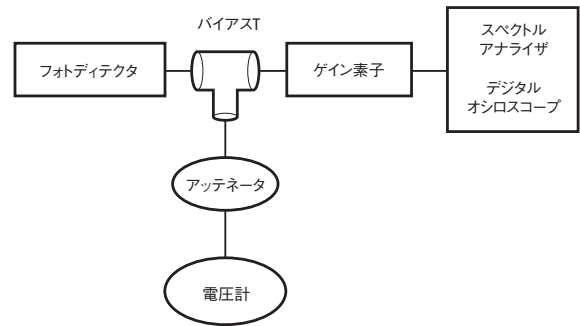


図1：実験的測定システム。

## 測定する

測定システムをセットアップする準備ができました。ほとんどのセットアップは図1と似ています。まず、フォトダイオードにバイアスをかけ、漏れ電流を計測します。漏れ電流は、数mA程度が好ましい値です。次に、光信号を適用します。フォトディテクタの活性化領域はおそらく約10 μmですので、十分に集光してください。最高性能を得るためには、生成したすべてのキャリアが空乏領域に入っている必要がありますので、ご注意ください。キャリアがこの高電場領域にないと、空乏領域に向かって拡散し、低速の長い応答（ロングテール）が計測されることになります。通信システムでは、応答が次の情報（ビット）と干渉すると、より大きなビットエラーの原因になります。フォトディテクタに集光する最善の方法は、電流計で光電流をモニターする（約1 μAの分解能）こと、およびスペクトルアナライザで信号を観察することです。スペクトルアナライザはデジタルオシロスコープよりもはるかに高感度です。モードロックレーザー光源のパルスを観察している場合、レーザーの繰り返し周波数で信号を観察する必要があります。New Focus™の検出器は、増幅バイアスマニターおよび内蔵型ネットワークを搭載することで、このプロセスを簡略化しています。最後に、デジタルオシロスコープで信号を観察します。

スコープを開始する最適な方法は、パワースプリッタを使用して信号の一部を分割し、トリガーに入れることです。十分な電圧がなければ、レーザーまたは目的の信号と同じ周波数で合成装置にトリガーをかけることを試してください。しかし、これを行う場合は信号と合成装置の間にタイミングジッターが存在することを考慮しなければなりません。これは、信号の拡大、その帯域幅の減少を引き起こします。タイミングジッターの量を低減するには、モードロッカーや他の合成装置に関わらず、波形を測定している装置に対して位相ロックした光源にトリガーをかけてください。

## 実際のパルス幅の測定

これから測定を行う実際のパルス幅は、光のパルス幅、フォトディテクタのインパルス応答幅、すべての電気装置のインパルス応答幅およびすべてのタイミングジッターのノイズの畳み込みとなります。インパルス応答幅とは、インパルスに似た（?機能に似た）入力に起因する出力応答の幅を指します。二重和を使用すると、寄与量を簡単に予測できます。ここで、測定したパルス幅は次の式で与えられます。

$$\tau_{\text{measured}} = \sqrt{\tau_{\text{optical}}^2 + \tau_{\text{photodiode}}^2 + \tau_{\text{jitter}}^2 + \tau_{\text{electrical}}^2}$$

$\tau_{\text{optical}}$ は光パルス幅であり、 $\tau_{\text{photodiode}}$ はフォトダイオードのインパルス応答（約 $0.4/f_{3\text{-dB}}$ ）、 $\tau_{\text{jitter}}$ はタイミングジッター（パルス間のレーザータイミング変動、合成装置のジッターなどを含む）、 $\tau_{\text{electrical}}$ は電気装置のインパルス応答です。各成分が二重和で寄与することにご注意ください。光信号およびフォトダイオードのインパルス応答が等しく、ジッターおよび電気装置のインパルス応答がそれよりもはるかに小さい場合、測定した信号は実際の光信号よりも約2倍大きくなります。

## 最小信号およびノイズ

図2はフォトダイオードおよび電気回路のシンプルなブロック図です（*Physics of Semiconductor Devices*, 2nd edition, S.M. Sze<sup>2</sup>を参照してください）。光信号および背景放射がフォトダイオードにぶつかり、外部の負荷抵抗器に電流を発生させます。 $P$ を平均光パワーとすると、平均光電流 $I_p$ は次の式で得ることができます。

$$I_p = \frac{q\eta P_{\text{opt}}}{h\nu}$$

ここで、 $q$ は電子電荷、 $h$ は量子効率、 $\eta$ は光の周波数です（ $R = \eta / 1.24$ 、ここで $R$ は応答速度、光パワーに対する光電流の割合です。電圧/ワットに変換するには、シンプルに負荷抵抗で積算してください）。100%の正弦変調信号の場合、rms光パワーは $P_{\text{opt}}/\sqrt{2}$ で与えられ、rms光電流（ $i_p$ ）は次の式で与えられます。

$$i_p = \frac{q\eta P_{\text{opt}}}{\sqrt{2}h\nu}$$

ショットノイズは周波数無依存のノイズであり、つまりホワイトノイズです。フォトダイオードの場合、このランダムノイズ（ $i_s$ ）は、背景放射（ $I_b$ ）および暗電流（ $I_d$ ）からの電流が原因です。暗電流は、空乏領域における電子正孔対の熱生成が原因です。フォトダイオードにも光電流によるショットノイズが存在します。合計ショットノイズ（平均二乗電流）は、次の式で得ることができます。

$$\langle i_s^2 \rangle = 2q(I_p + I_b + I_d)B$$

ここで、 $B$ は測定対象の帯域幅です。

フォトダイオードの同等の回路を図3に示します。 $i_p$ 、 $\sqrt{2}i_s$ 、 $C_j$ 、 $R_j$ および $R_s$ といった成分は、それぞれRMS光電流、ショットノイズ電流、接合静電容量、接合抵抗、および直列抵抗を表します。 $R_L$ は外部の負荷抵抗であり、 $R_i$ はその後に続く増幅器の入力抵抗です。逆バイアスをかけたショットキーダイオードでは、 $R_j$ が非常に大きくなり（ $>106 \Omega$ ）、代表値が50~500 Ωである $R_L$ の次に無視できます。通常、直列接続した $R_s$ は他の抵抗よりもはるかに小さいので、同様に無視できます。次に、熱ノイズ（Johnson noise）は次の式で与えられます。

$$\langle i_T^2 \rangle = 4kT(1/R_L)B + \langle i_s^2 \rangle$$

増幅器の入力抵抗は実際の抵抗による場合もよらない場合もあるので、 $R_i$ を原因とするノイズ電流を個別に $i_i$ として挙げています。上記の情報から、パワー/S/N比は次の式から得ることができます。

$$\begin{aligned} (S/N)_{\text{power}} &= \frac{i_p^2 R_{\text{eq}}}{(\langle i_s^2 \rangle + \langle i_T^2 \rangle) R_{\text{eq}}} \\ &= \frac{\frac{1}{2} (q\eta P_{\text{opt}}/h\nu)^2}{2q(I_p + I_b + I_d)B + 4kTB/R_L + \langle i_s^2 \rangle} \end{aligned}$$

ここで  $1/R_e = (1/R_L) + (1/R_i)$

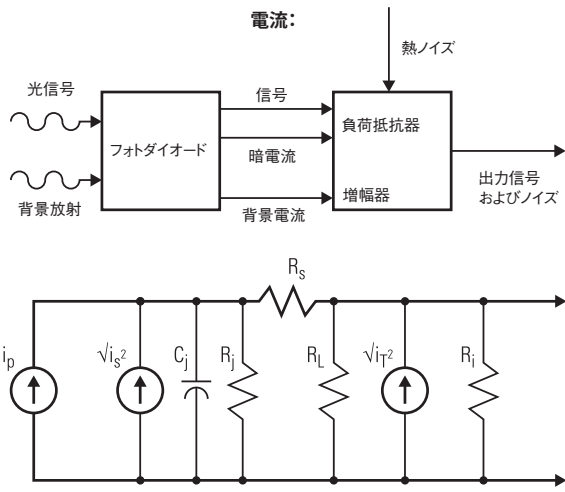


図3：フォトダイオードの等価回路

そこで、特定のS/N比を達成するために必要な光パワーの最小値は、次の式で求めることができます。

$$(P_{opt})_{min} = \frac{2hvB}{\eta} \left(\frac{S}{N}\right) \left\{ 1 + \left[ \frac{I_{eq}}{qB(S/N)} \right]^{1/2} \right\}$$

ここで、 $I_{eq} = I_b + I_d + 2kT/qR_{eq} + \langle i_i^2 \rangle / 2qB$ です。例を挙げると、 $I_b = I_d = 1 \mu A$ 、 $i_i = 0$ 、 $R_L = 50 \Omega$ のとき、 $I_{eq}$ の表現において熱ノイズの項が支配的であり、 $I_{eq} = 1 mA$ であるとわかります。

ここで、2つの制限について考えてみましょう。 $I_{eq}/qB(S/N)$ が単位元よりも大幅に低い場合と、高い場合の2つです。 $I_{eq}/qB(S/N)$ が単位元よりも大幅に低い場合、暗電流、背景電流および熱ノイズは非常に小さくなります。この場合、最小光パワーは、光信号に付随する量子ノイズにより決定されます。しかし、このような状態を達成することは非常に困難です。上記の例では、 $B(S/N)$ が $6.25 \times 10^{15} Hz$ よりもはるかに大きい必要があります。他方の制限では、背景放射または等価抵抗の熱ノイズ、あるいはその両方が優先します。この場合、最小光パワーは次の式で求められます。

$$(P_{opt})_{min} = \frac{2hv}{\eta} \left( \frac{BI_{eq}}{q} \right)^{1/2} \left( \frac{S}{N} \right)^{1/2}$$

フォトダイオードの感度を向上させるため、量子効率の増加、または等価抵抗の増加が求められる場合があります。1-Hzの帯域幅で、 $S/N$ 比が1となる（光信号が出力ノイズと正確に等しい）ために必要なノイズ等価電力、または光パワーは次のシンプルな式で得ることができます。

$$NEP = \sqrt{2} \left( \frac{hv}{\eta} \right) \left( I_{eq} / q \right)^{1/2} W / \sqrt{Hz}$$

ここで、New Focus™ 1000シリーズのフォトダイオードを検討するため、 $\langle i_i^2 \rangle = 0$ とします。これは、内部増幅器がなく、選択した外部増幅器は多種多様であるためです。この場合、負荷抵抗器からの熱雑音は、ノイズの優先的な発生源です。従って、 $I_{eq} = 2kT/qR_{eq}$ であり、 $R_L$ はmV/mW単位の応答速度であるので、最小光パワーを書き換えることができます。 $S=N$ と設定すると（つまり、光信号と出力ノイズが等しい場所で）測定できる最も弱い光信号を検出できます。たとえば、モデル1001およびモデル1004の内部負荷抵抗は100Ωであり、他のフォトダイオードでは50Ωです。これを使ってノイズ電流を計算すると、1001および1004で、 $i_T/BI$ は13 pA/Hzであり、モデル1011およびモデル1014では、18 pA/Hzでした。

$$\begin{aligned} (P_{opt})_{min} &= \frac{2hv}{\eta} \left( \frac{2kTB}{q^2 R_L} \right)^{1/2} \left( \frac{S}{N} \right)^{1/2} = \frac{\sqrt{2} h v i_T}{\eta q} \left( \frac{S}{N} \right)^{1/2} \\ &= \frac{\sqrt{2} i_T R_{eq}}{R} \left( \frac{S}{N} \right)^{1/2} \approx \frac{i_T R_{eq}}{R} \left( \frac{S}{N} \right)^{1/2} \end{aligned}$$

50-Ωシステムに接続したフォトダイオードでは（ $R_f = 50 \Omega$ ）、1001および1004の $R_{eq}$ は33Ωであり、その他では25Ωでした。 $S/N=1$ および帯域幅が1 Hzのときの最小光パワー（ $\lambda=0.532 \mu m$ ）を計算すると、1001および1004の最小光パワーは60 pWであることがわかります。1.3 mの101Xシリーズでは、最小光パワーは41 pWです。1-Hzの帯域幅とは、積分時間がおよそ1秒であることを意味しています。これは、他の装置がノイズを発生させないと仮定した場合の検出可能な最小光パワーです。現実には、電気装置のノイズ性能はこれよりもはるかに低い場合が多いので、3 nVでも検出できません。その結果、コンポーネントの中でも最も性能が低いものが、検出可能な最小パワーを決定することになります。たとえば、オシロスコープの最小感度が約1 mVだとすると、これが原因で、検出可能な最小感度はその約1 mVに支配されます。

### 周波数応答の検討

最後に、さまざまな周波数がどのように時間領域の測定結果に影響を与えるかについて述べます。目的の周波数に対して平坦な応答があれば最適です。ニューフォーカスのフォトダイオードは、DCから45 GHzまで個別に測定され、45 GHzまではかなり平坦な応答が確認されています。45 GHzを超えると、ダイオードの反応速度は急激に低下します。これは、寄生ダイオードのもう一方の極に連結しているダイオードのRC極が原因です。

スペクトルの反対側では、DCでも応答が平坦であることが重要です。DCで応答がなければ、原則的にAC接続となり、DCレベルを測定できなくなります。完全な変調深さを確保する方法がなくなり、長いパルスが大幅に歪むこととなります。他方で、もし応答がDCでピークとなる場合、時間領域における測定パルスは人工的にロングテールとなります。原因のひとつとして、集光が良好でなかったために、フォトダイオードが拡散効果により制限されたことが考えられます。キャリアはダイオードの活性領域の外側で発生します。その一方で、図4のように周波数がDCでピークとなった場合、これは集光の問題ではありません。この現象が測定に与える影響を予測する、簡単な方法があります。

フーリエ変換によって波形を時間領域から周波数領域に変換すると、周波数応答に影響があることにご注意ください。さらに、フーリエ分析は完全に線形なので、最も早い成分と最も遅い成分を合計することで波形をモデル化できます。たとえば、図5に示すパルスは人為的なロングテールを有します。最も早いパルスと遅いパルスの合計としてモデル化できます。 $t_{fast}$  および  $A_{fast}$  がFWHMであり、高速成分の振幅であるとして。同様に、 $t_{slow}$  および  $A_{slow}$  を低速成分とします。周波数曲線が図4に似ている場合、まず低速側の低い周波数の3-dB地点を決定し、次に高速側の高い周波数の3-dB地点を決定します。 $t_{slow}$  および  $t_{fast}$  は  $t=0.4/f$  に関連しているため、そこから  $t_{slow}$  および  $t_{fast}$  を特定できるはず。そうすると、DCまたは0周波数応答は時間曲線の下領域であることがわかります。たとえば、ガウシアンパルスの場合、DCでの振幅は時間領域のパルス幅と振幅に関連しています。パルス幅または振幅が大きくなるほど、DCの応答速度は速くなります。従って、 $K_1$  は  $t_{slow} A_{slow}$  に比例する一方、 $K_2$  は  $t_{fast} A_{fast}$  に比例します。図4では、 $K_{sum}=K_1+K_2$  です。ここで、時間領域と周波数領域で高速パルスに標準化します。すると、 $A'_{slow}$  は  $A'_{fast}$  に標準化され、および  $K'_{sum}$  は  $K_2$  に標準化されます。これは、 $K'_{sum} \approx 1 + A'_{slow} t_{slow} / t_{fast} = 1 + A'_{slow} f_{fast} / f_{slow}$  を意味します。従って、振幅とFWHMがわかれば、2つの成分を単純に合計することで、時間領域における波形がどのようになるかという、見解を得ることができます。

最後に、周波数応答の測定値から、DCから45 GHzまでの相対測定値が良好な精度でわかります。しかし、正確な絶対測定を行うことは非常に困難です。お使いのケーブル、コネクタ、および装置すべての応答速度を検討する必要があるからです。これらのうち、ひとつでも正確に把握できていないと、測定誤差が生じます。New Focus™のフォトダイオードで行ったように、ひとつひとつのコンポーネントの周波数応答速度を測定しなければなりません。自動ネットワークアナライザの助けを借りれば、面倒な作業も容易に行うことができます。

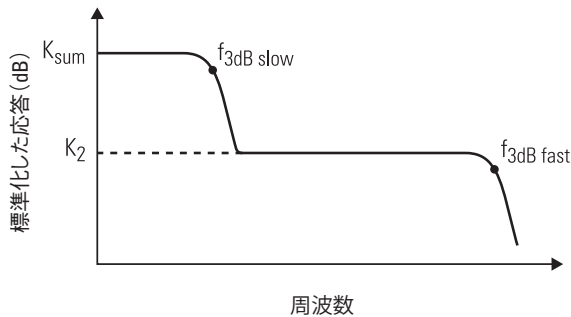


図4：DCでピークに達する周波数応答。f<sub>3dB slow</sub> は、K<sub>sum</sub>から3 dB低下したときのポイントであり、f<sub>3dB fast</sub> はK<sub>2</sub>から3 dB低下したときのポイントです。

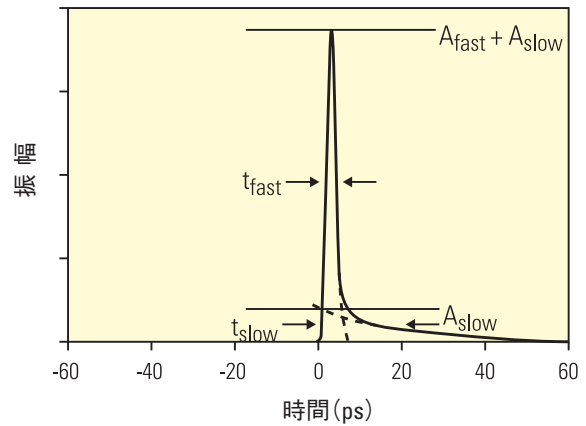


図5：図5に示すパルスは、2つのパルス（高速パルスと低速パルス）の合計としてモデル化できます。A<sub>fast</sub>およびt<sub>fast</sub>は、高速パルスの振幅およびFWHMであり、A<sub>slow</sub>およびt<sub>slow</sub>は、低速パルスの振幅およびFWHMです。

$$A'_{slow} \approx \frac{(K'_{sum} - 1) f_{slow}}{f_{fast}}$$

### まとめ

高速光測定では、高速光信号を生成するだけでなく、それを検出する必要があります。フォトダイオードおよびあらゆる電気装置を選択する際には、ケーブルおよびコネクタも含んで、信号精度を維持するために必要な周波数応答に留意してください。システム中でも最も低速なコンポーネントの速度に合わせた測定しかできませんので、ご注意ください。

### 参考文献

1. For technical assistance, suggestions for equipment selection, and additional references, contact New Focus.
2. Sze, S.M., **Physics of Semiconductor Devices**, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 1981.