

**AFBR-S4XX****SiPM(Silicon Photomultiplier)の概要****概要**

近年、光センシング技術は急速に進化し、さまざまな分野での応用が広がっています。通信、消費財、医療、ライフサイエンス、安全とセキュリティ、自動車など、さまざまな業界で使われています。これらの業界の多くでは、感度が低く低速の光検出器でも十分とされます。ただし、一部の業界では、感度と速度が重要になります。例えば、バイオメディカル（DNA シークエンシング、フローサイトメトリー、免疫測定分析など）、医療画像処理（X線、CT、分子画像処理など）、安全およびセキュリティ（放射線分光分析）、3D 測距（LiDAR）、高エネルギー物理学実験が挙げられます。これらの用途では、SiPM のような特殊な光検出器が重要な役割を果たします。

本書は、SiPM について、また、このデバイスが特定の光センシングに有用であるかどうかを考察する目的で作成されました。詳細については、Broadcom ([sipm@broadcom.com](mailto:sipm@broadcom.com)) に直接お問い合わせください。

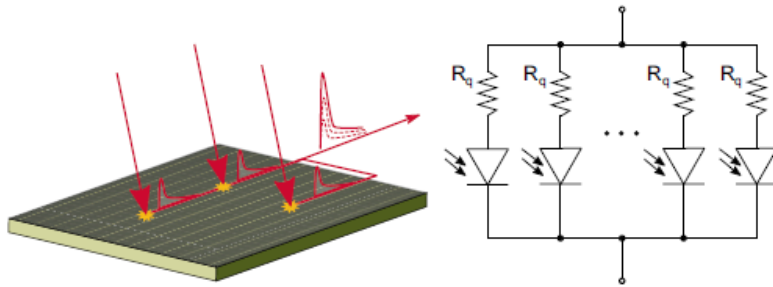
**概要**

SiPM は、高感度のソリッドステート光検出器です。内部増幅処理により、非常に高い S/N 比を実現し、精細な時間分解能で個々の光子を検出できます。従来の光検出に比べ、SiPM は個々の光子に対応する鋭い疑似デジタルパルスを出力します。

古典的なフォトダイオードでは、各光子が 1 個の電子と 1 個の正孔を作り、これらが電極に集められます。検出システム全体のノイズは、電極上の 1 つのキャリアによって誘導される信号よりも大きいため、このような条件では 1 つの光子を識別できません。逆バイアス電圧を上げると（さらに適切なドーピング構造を実装すると）、キャリア増倍領域に到達できます（アバランシェフォトダイオード（APD）の場合）。この電圧では、フォトダイオード内の電界が十分に高くなり、最初の電子がさらに電子をイオン化できるほどの高速まで加速されます（エネルギーを生成します）。これらの電子が再び加速され、より多くの電子をイオン化でき、電子なだれが始まります。ただし、イオン化の確率が限られているため、電子なだれはしばらくすると消滅します。このように、光によって生成された 1 つのキャリアが、デバイス内部で有限数のキャリアを生成しますが、これを利得と呼びます。APD 形態における利得と信号増幅は数百に達する場合があります。キャリアの増倍は統計的処理であり、イベントごとに変動するため、APD は、通常の写真ダイオードに比べて多くのノイズを発生します（過剰ノイズ指数）。

逆バイアスをさらに増大させると、降伏電圧に達します。この電圧を超えると、1 個の電子が自己持続的な電子なだれを引き起こすほどイオン化が進みます。電子なだれは、一旦始まると永続します。これを停止するため、クエンチング抵抗がダイオードに直列に接続されます。数十ナノ秒程度の時間が経過すると、ダイオードが完全にリセットされ、別の光子を検出できるようになります。従来型の写真ダイオードとは異なり、ダイオード接合部の電界は降伏電圧を十分に超えて動作するように最適化されています。このような検出器は、単一光子アバランシェダイオード（SPAD）と呼ばれます。

図 1 : SPAD の配置、SiPM 信号の形成、回路図



SPAD を降伏電圧より上にバイアスすることは、ガイガーモード動作とも呼ばれます。これは、1 個、2 個、または数百個の光子が同時に SPAD に当たっても、SPAD が常に同じ出力信号を発するためです (ガイガーミュラーカウンターに類似)。そのため、SPAD はオンかオフのどちらかとなり、1 個の光子が電子なだれを起こしたとしても、100 個の光子が電子なだれを起こしたとしても、オン状態は常に変わりません。この問題を克服するため、図 1 のとおり、複数の SPAD をアレイ状に並列接続します。このような SPAD のアレイは、SiPM と呼ばれます。

### PMT と SiPM の比較

最近まで、光電子増倍管 (PMT) といえは、1940 年代から入手可能な真空管であり、低光量/光子計数用途における唯一の選択肢でした。しかしながら、周囲光に対する弱さ、壊れやすくかさばるハウジング、磁場に対する敏感さ、高電圧が必要であることなどから、このセンサーを多くの用途に使用するのは困難です。速いタイミング、高い粒度と感度、堅牢性、コンパクトさ (携帯用) を考慮すると、SiPM には大きな利点があります。SiPM は、数十年前に導入されて以来、感度の向上、良好なタイミング性能、高い粒度でアレイを構築できる可能性、コンパクトさと頑丈さ、磁場に対する耐性、必要なバイアス電圧と出力の低さといった利点により、PMT に変わって普及してきました。詳細な比較については、以下の表を参照してください。

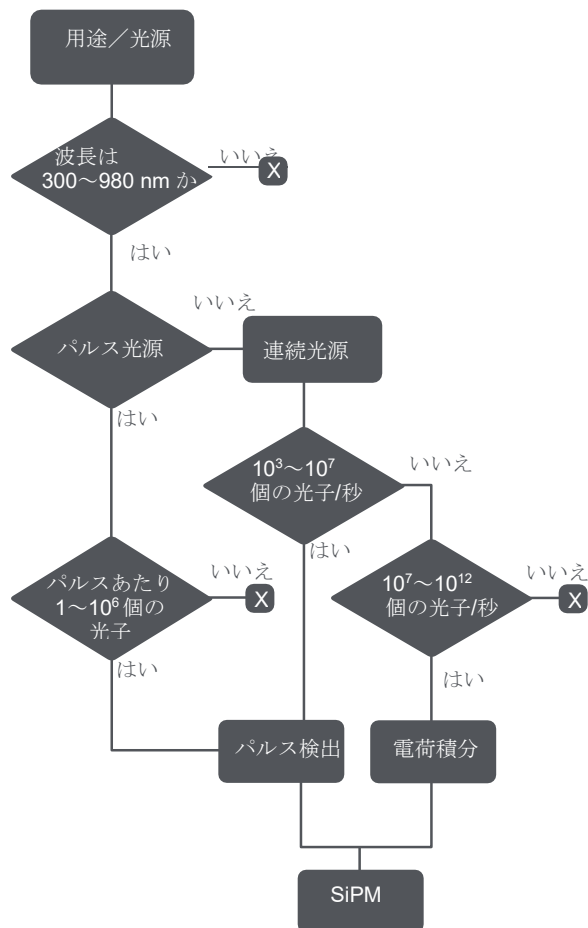
表 1 : PMT と SiPM の比較

特性	光電子増倍管 (PMT)	SiPM
感度	単一光子	単一光子
利得	最大 $10^7$	最大 $10^6$
動作電圧	800~2000 V	30~50 V
大面積	あり	あり、拡大縮小可能
高密度アレイ	なし	あり
高粒度/高分解能	なし	あり
ダークノイズ	低い	中程度
均一性	良好	極めて良好
応答時間	高速	非常に高速
光子計数分解能	良好	極めて良好
感温性	低い	中程度
周囲光への耐性	なし	あり
磁場への耐性	なし	あり
コンパクトさと軽量さ	なし	あり

### 簡易選択ガイド

図 2 は、特定の用途に対する SiPM の適合性に関する基本的な決定木を示しています。検出する光の波長、光源の種類 (パルス/連続)、光強度、光パルスの周波数について選択するようになっていきます。用途によっては、光子/パルス計数、電荷積分、またはその両方の組み合わせが読み出し方法となります。

図 2 : SiPM 用途決定ツリー



用途が所定の要件の範囲内にある場合、SiPM が光検出作業を行うための有力候補となります。その他の要件としては、形状面（受光面積、デバイスの体積）、周囲光に対する堅牢性、チャンネル数、粒度（つまり単位面積あたりのチャンネル数）、磁場、機械的耐久性が挙げられます。

Broadcom® SiPM センサーの技術的詳細については、[broadcom.com](https://www.broadcom.com) をご覧ください。

### Broadcom SiPM の製品番号

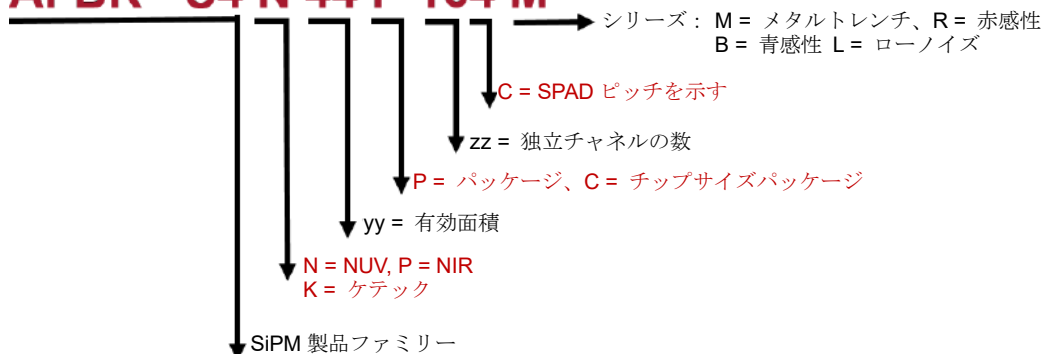
Broadcom は、以下の 2 種類の SiPM 製品を提供しています。

- **NUV SiPM** : 個々の SPAD は、EM スペクトルの近紫外線（NUV）から青色領域の光子に対する感度を最適化するため、p-on-n 設計で実現されています。
- **NIR SiPM** : 個々の SPAD は、EM スペクトルの赤色領域から近赤外線（NIR）領域の光子に対する感度を最適化するため、n-on-p 設計で実現されています。

対応する製品の製品番号には、デバイスの詳細情報が反映されています。

## AFBR-S4XyyPzzCW

## AFBR - S4 N 44 P 164 M



**AFBR-S4** : Broadcom の SiPM 製品の製品番号。

**X** : SPAD の pn 接合の **N** 構造 (p-on-n の場合) または **P** 構造 (n-on-p の場合) のいずれか、つまりピーク感度が青よりの光か赤よりの光かを表します。

**yy** : ダイの有効面積 ( $y \times y \text{ mm}^2$ )。

**P** : パッケージ化されたデバイスを示します。

**zz** : デバイスの独立チャンネル数を示します。

**C** : ダイの SPAD ピッチを示します (小数点以下を丸めている場合または 2 桁の場合があります)

**W** : (オプション) フロントエンドシリーズを示します。

### 例 : Broadcom の AFBR-S4N66P024M

この SiPM アレイは、NUV/青色光最適化 SiPM (AFBR-S4N66P024M) 用で、ダイの有効面積は  $6 \times 6 \text{ mm}^2$  (AFBR-S4N66P024M) です。パッケージ化されたデバイスには、SPAD ピッチ  $40 \mu\text{m}$  (AFBR-S4N66P024M) の 2 つの独立チャンネル (AFBR-S4N66P024M) が含まれています。このタイプの SiPM の **M** は、フロントエンドが Broadcom の NUV-MT 技術 (メタルトレンチ) を使用していることを示しています。

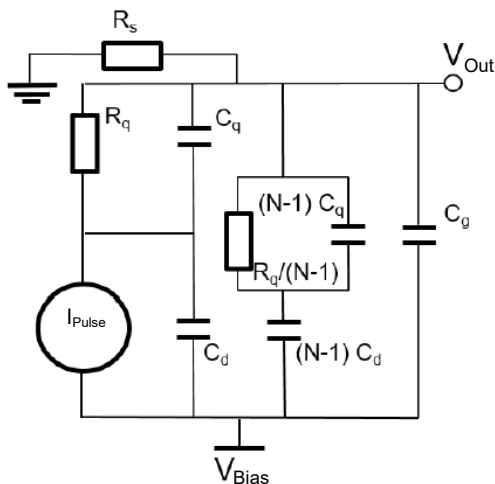
### SiPM 基本電気モデル

図 3 は、SiPM の基本的な電気モデルを示しています。作動中の SiPM SPAD の SiPM 電流パルス (信号) は、電流源によってモデル化できます。

このモデルの主なパラメーターは、以下のとおりです。

- $C_d$  : 単一 SPAD のキャパシタンス
- $R_q$  : クエンチング抵抗
- $C_q$  : クエンチング抵抗の寄生容量
- $C_d$  : グリッドの寄生容量

Broadcom SiPM の電気的特性および電気的パラメーターに関する詳細情報については、[sipm@broadcom.com](mailto:sipm@broadcom.com) までお問い合わせください。

図 3 : SiPM 基本モデル<sup>1</sup>

$C_d$  は、(SPAD ピッチのような) マイクロセル設計によって決定されるだけでなく、有効容量の空乏の程度にも強く依存します。

### SiPM 関連用語集

SiPM の紹介と同様に、その特性を表す新しい用語は以下のとおりです。

- **アフターパルス (AP)** : 相関ノイズの一形態。電子なだれの電荷担体をシリコン内に捕捉し、しばらくしてから放出されることがあります。SPAD はすでに (部分的に) 回復しているため、最初のパルスの次に 2 番目の遅延パルスが観測されることがあります。
- **降伏電圧** : この逆電圧を超えると、電子なだれが持続します。電子なだれは (通常はクエンチ抵抗を使用して) 停止させる必要があります。
- **クロストーク (CT)** : 相関ノイズの一形態。SPAD における電子なだれ過程では、光学光子が放出されることがあります。これらの光子は、SiPM のシリコンまたは保護ガラス層を通して伝搬し、隣接するセルをトリガーできます。その結果、出力においてダブルパルスが観測されます。
- **ダークカウントレート (DCR)** : 光パルスがなくても、信号は観測できます。これらの信号は、熱電子が電子なだれを引き起こすことによって発せられます。そのため、DCR は温度に依存し、通常は 10°C 上昇するごとに 2 倍になります。
- **暗電流 ( $I_D$ )** : 暗電流は、DCR、CT、AP に由来する累積電荷です。利得を使用して、以下の式で推計できます。

$$I_D \approx q \cdot DCR \cdot gain \cdot (1 + CT + AP)$$

注記 : より高次の CT も暗電流に寄与します。

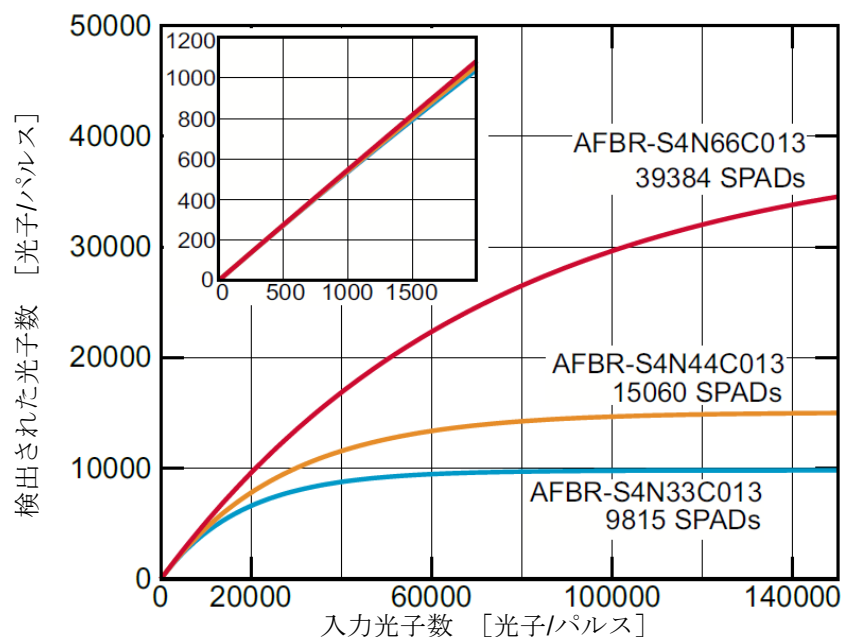
- **ダイナミックレンジ** : ダイナミックレンジは、SiPM あたりの SPAD 数により決まります。
- **フィルファクター (FF)** : FF は高感度面積に対する低感度面積の比率を示します。
- **利得** : トリガー後の電子なだれの間にはイオン化された電子 (電荷担体) の数。つまり、光子に反応して SiPM 信号を形成する電子の数です。たとえば、利得が  $10^6$  の場合、光子 1 個につき 100 万個の電子を SiPM の出力に集めることができます。
- **直線性/飽和** : 空間分布を想定すると、SiPM への光子の入射は確率論的です。光パルスあたりの強度が増大し、2 つの光子が同じ SPAD に当たる確率が増大するものの、1 つの光子の信号しか発せられない場合、SiPM の非線形応答が SiPM の SPAD 数で飽和することが観察されます。応答曲線、つまり作動した SPAD の数 ( $N_{\text{fired}}$ ) は、入力光子数  $N_{\text{photons}}$ 、SPAD の数 ( $N_{\text{SPADs}}$ )、光子検出効率 (PDE) によって以下のとおり表されます。

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{SPADs}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{N_{\text{photons}} \cdot PDE}{N_{\text{SPADs}}}} \right)$$

図 4 は、NUV-HD SiPM の 3 つのフォームファクターにおける典型的な飽和応答を示しています。

<sup>1</sup> F. Corsi et al., Modelling a silicon photomultiplier (SiPM) as a signal source for optimum front-end design, NIM A 572 1 pp. 416-418, 2007 を基に改変。

図 4 : SiPM の直線性、飽和効果、およびダイナミックレンジ - 7 V 過電圧 (54% PDE) でのデータ



**注記：** この曲線は、入力光子が光パルスまたは閃光として同時に（数 ps 以内に）SiPM に入射する場合に有効です。

**光子検出効率 (PDE)：** SiPM の光感度（量子効率に類似）。PDE は入射光の波長に依存し、過電圧が増大するにつれて増大します。PDE は、主として量子効率とフィルファクターの積です。たとえば、PDE が 40% ということは、10 個の光子のうち 4 個しか検出できないことを意味します。単純化して言うと、PDE は、量子効率、トリガー確率（つまり、電子が電子なだれを引き起こす確率）、フィルファクターの積です。

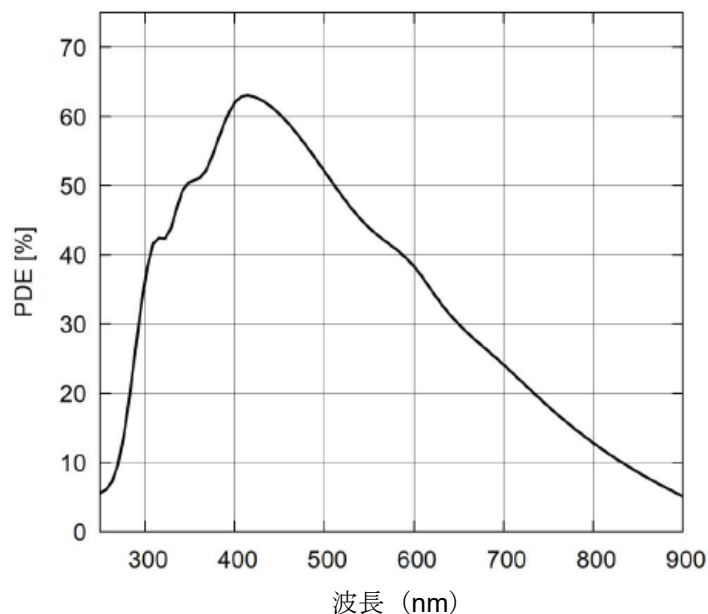
- **クエンチング抵抗：** 電子なだれを止めるための抵抗。
- **再充電時定数 ( $\tau$ )：** SPAD の再充電は、 $e^{-t/\tau}$  に比例する指数関数的な挙動に従います。再充電時間経過後、信号は  $1/e=37\%$  に戻り、5 回の時定数の経過後、信号はピーク振幅の 1% 未満に戻ります。このように、SiPM のダイナミックレンジは SPAD の数によって決まります。ただし、過電圧 (OV) を下げることで感度を下げることができるため、ある程度の範囲内で応答曲線を調整できます。
- **SiPM：** 並列に接続された SPAD のアレイ。
- **単一光子アバランシェダイオード (SPAD)：** 降伏電圧を超えてガイガーモードで動作する単一ダイオード構造の名称。
- **単一光子時間分解能 (SPTR)：** SPTR は通常、半値全幅 (FWHM) で測定され、1 個の光子を測定できる時間の精度を指します。1 つのパルス内で複数の光子が検出された場合、時間分解能は通常約  $1/(\sqrt{n})$  向上します。ここで、 $n$  は、パルス内で検出された光子の数です。

## 分光感度

Broadcom NUV-MT SiPM の分光感度は、250 nm 未満から 900 nm 以上の範囲に及び、420 nm でピークを示します（図 5 を参照）。過電圧を調整することで、全体的な感度（つまり PDE）を高めることができます（ただし、代わりに DCR とクロストークが増大します）。



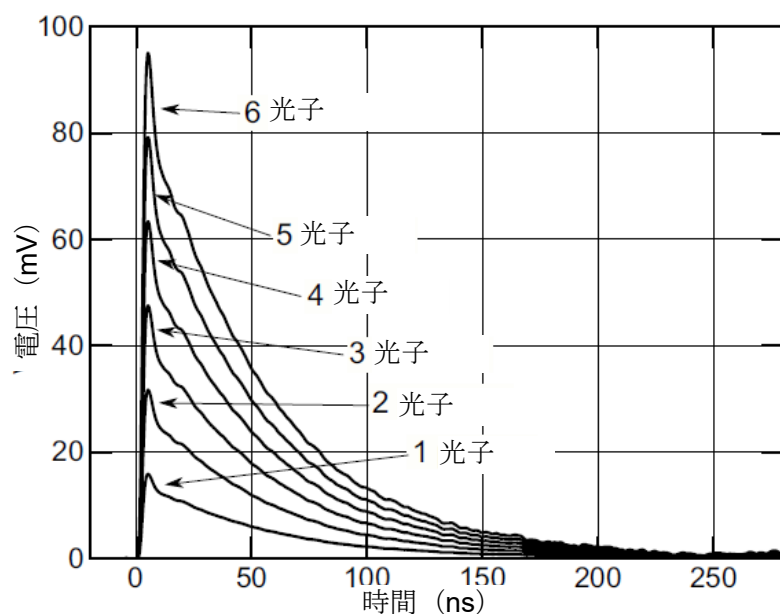
図 5 : Broadcom NUV-MT SiPM の分光感度



### 代表的な SiPM 信号

SiPM の高い真性利得により、単一光子さえも識別できるため、SiPM は、光子計数用途に使用できます。ただし、この真性利得にもかかわらず、信号は通常、プリアンプを使用して増幅する必要があります。図 6 は、利得が 2 V/A のトランスインピーダンス増幅回路を使用して増幅した後の典型的な SiPM 信号を示しています。

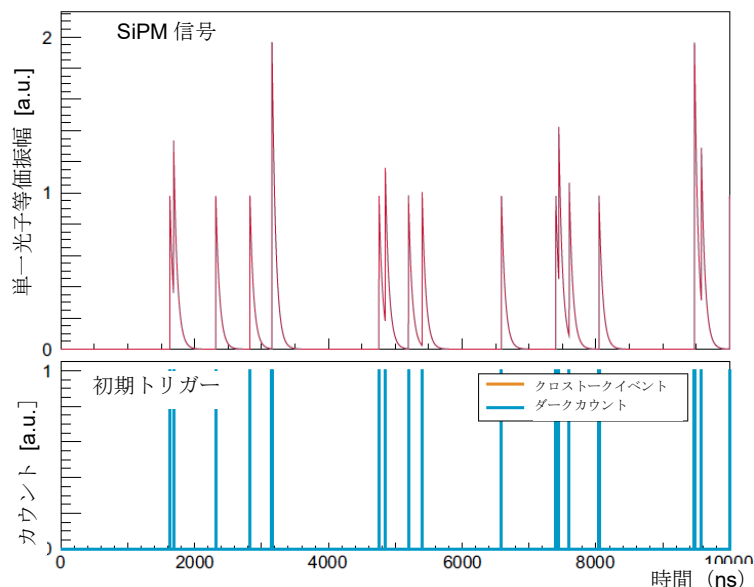
図 6 : 異なる光子数に対するパルス応答



一次近似では、数百ピコ秒の立ち上がり時定数と約 50 ナノ秒の再充電時定数を持つ二重指数関数を使用して信号を記述できます (NUV-HD 技術の場合)。

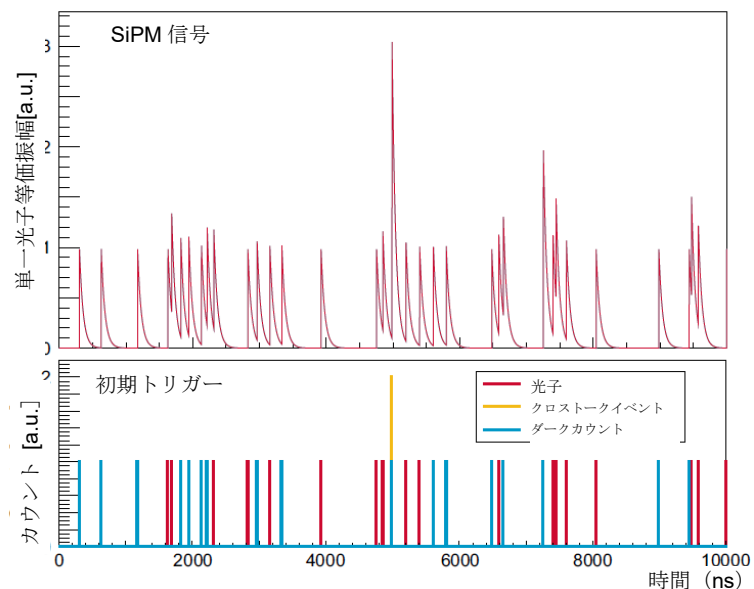
ダークカウントとクロストークの影響を視覚化し、より深く理解するために、いくつかの SiPM 信号波形をシミュレートしています。それにより、信号そのものだけでなく、信号の出所も示すことができます。図 7 にそのシミュレーション結果を示しています。この事例では、3 V の過電圧における AFBR-S4N44C013 SiPM の暗条件下での信号を示しています。このバイアスでは、DCR が 1.7 Mcps (25°C)、クロストーク確率が 9%、PDE が 43%です。

図 7 : 過電圧 3 V、25°Cにおける AFBR-S4N44C013 の暗条件下でのシミュレートされた SiPM 信号 (上) と初期トリガー (下)



シミュレーションで CW 光が追加した事例を示します。光源の出力は 2 pW で、AFBR-S4N44C013 SiPM の高感度面積 (つまり  $3.72 \times 3.72 \text{ mm}^2$ ) を照らしています。図 8 に結果を示しています。ダークカウントに起因するパルス数が実光子に起因するパルス数とほぼ同じであることがわかります。このシナリオでは、読み出しモードとしてパルス計数を使用すると、結果として約 2 倍の DCR (3.4 Mcps) が得られます。

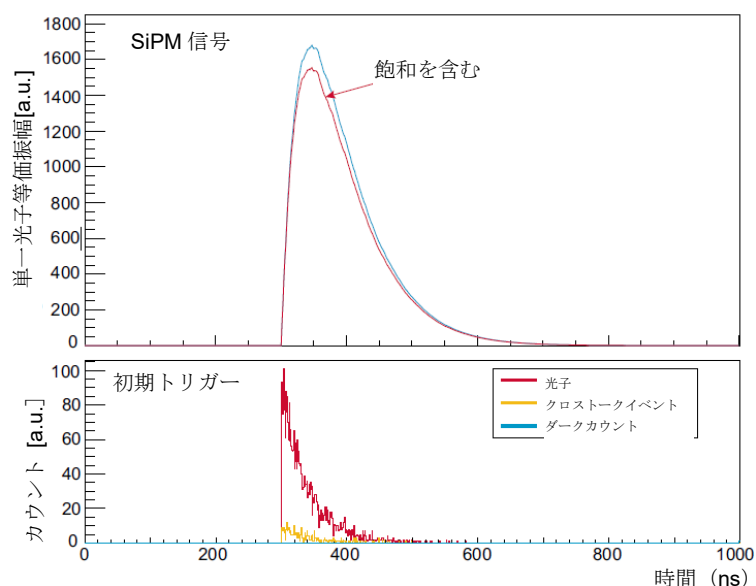
図 8 : CW 光応答としてシミュレートされた信号とトリガー



また、シンチレーションイベントのシミュレートを示します。そのために、LSO:Ce における高エネルギー光子吸収イベントのパラメーターが使用されています。より正確に言うと、このシナリオでは、511 keV のエネルギーが、32 光子/keV の光収率と 40ns の減衰時定数でシンチレーション材料に沈着します。図 9 は、得られた信号を示しています。



図 9: 511 keV のガンマ線からの SiPM 信号とトリガーのシミュレーション(LSO:Ce シンチレーターを使用)



この図では、信号のほとんどが実光子に由来しますが、ごく一部はクロストークに起因します。ダークイベントが光子数の推計に与える影響は無視できる程度のもので、2つの信号がシミュレートされています。1つは飽和効果を考慮したもの、もう1つはこれを考慮していないものです。飽和信号の振幅と面積は、飽和していない場合よりも小さいため、飽和はこの照明条件で一定の役割を果たします。

## 代表的な読み出しモード

最初の例では、読み出しモードは主に、検出すべき光信号の種類（パルス光源か、連続信号か、ゆっくり変化する信号か）によって選択されます。そのため、光子計数は、以下の2つの方法で実現できます。

- パルス光源（つまりシンチレーターやパルスレーザー）の場合、プリアンプ（たとえば、トランスインピーダンス増幅器）とディスクリミネータ/比較回路の組み合わせで実現されます。信号がしきい値を超えた場合、信号の振幅を、さらには積分値も（たとえば電荷積分器を使用して）測定できます。この積分値を単一光子の積分値で割ると、パルスの光子数になります（クロストークの補正が必要な場合があります）。

強い閃光は、高いしきい値を適用して信号振幅を測定することにより測定できますが、シンチレーターなどのより弱い信号に対して低いしきい値を設定すると、不必要にダークカウントやクロストーク事象に見舞われることがあります。この場合、パルス積分法を適用する必要があります。パルス積分に代わる方法として、あるしきい値を超える時間をパルスの強度に関連付ける、いわゆる **Time-over-Threshold (ToT)** 法が挙げられます。

また、研究環境では、多くの場合、信号がプリアンプの後でデジタル化され、得られた波形がオフラインで解析されるため、測定方法とデータ補正アルゴリズムに十分な柔軟性を持たせることができます。

- 連続波光源（CW レーザー、LED、蛍光、その他の発光方式）の場合、光強度は光子計数、電流測定、またはその両方の組み合わせによって測定できます。

- 光子計数は通常、光子レートを測定することによって実現されます。そのために、比較回路（またはディスクリミネータ）のしきい値は通常、単一光子振幅の半分に設定されます。単位時間あたりのしきい値超過回数から、光子レートがわかります（この場合、DCR と CT の補正を適用する必要があります）。

この検出モードのダイナミックレンジは、下限は DCR によって、上限は所定の回復時間に起因する信号の積み重ねによって限定されます。原則として、下限は DCR の約 10% です。ダイナミックレンジを広げる対策を取ることができます。過電圧を下げるか SiPM を冷却すれば、DCR が下がることで下限の感度が向上します。一方、たとえばポールゼロキャンセル回路を使用して、ダイナミックレンジの上限を引き上げることができます。

- 別の解決策として、SiPM によって引き込まれる電流を測定する方法が挙げられます。これにより、信号の積み重ねの限度を超えて、ダイナミックレンジの上限を引き上げることができます。mA の値に近づく場合は、温度安定化対策を考慮する必要があります。
- 光子計数と電流測定を組み合わせることで、ダイナミックレンジの下限と上限で最適な結果を得る

ことができます。

## 応答性、量子効率、光子検出効率の関係

光子検出効率 (PDE) は、通常 SiPM で使用される感度パラメーターであり、フォトダイオード、APD、PMT の QE (量子効率) と直接比較できます。

多くの場合、放射感度は、光検出器の感度のパラメーターとして提示されます。さまざまな検出器の感度を比較するために、所定の波長  $\lambda$  (ナノメートル単位) での量子効率 (QE) は、応答性 (または放射感度  $S$  [A/W]) を基に以下の式を使用して計算できます。

$$S = \frac{e\lambda}{hc} \cdot PDE \cdot G \cdot (1 + CT + AP)$$

$e$  は電子電荷、 $\lambda$  は光の波長、 $h$  はプランク定数、 $c$  は真空中の光の速度です。通常、SiPM の感度は光子検出効率 (PDE) として与えられます。PDE は、 $PDE = QE \times FF \times \epsilon$  を使用して近似できます。FF は幾何学的充填率、 $\epsilon$  は電子なだれトリガー確率です。PMT とフォトダイオードの場合、FF は 1 に等しいため、QE は PDE と同じ値を持ちます。なお、利得のある光センサーと利得のない光センサー (フォトダイオード、APD、PMT、SiPM) の比較では、QE と PDE は、放射感度  $S$  よりも有用なパラメーターです。これは、利得とノイズのパラメーターが前記の式に含まれているためです。たとえば、PDE が非常に悪い SiPM は、利得または相関ノイズが非常に高い場合、かなり大きな放射感度を示すことがあります。

センサーの利得は、フォトダイオードで 1、APD で数十から数百、SiPM と PMT で数百万です。

Copyright © 2019-2024 Broadcom. All Rights Reserved. 「Broadcom」という用語は、Broadcom Inc.および／またはその子会社を指します。詳細は、[www.broadcom.com](http://www.broadcom.com) をご覧ください。本書に記載されているすべての商標、商号、サービスマーク、ロゴは、それぞれの企業に帰属します。

Broadcom は、信頼性、機能、または設計を向上させるために、本書に記載されている製品またはデータを予告なく変更する権利を留保します。Broadcom が提供する情報は、正確かつ信頼できるものと考えられていますが、Broadcom は、本情報の適用または使用、および、本書に記載された製品や回路の適用または使用に起因するいかなる責任も負いません。また、Broadcom の特許権または他者の権利に基づく何らかのライセンスを譲渡することはありません。