

フォトンカウンタの検出効率を高める 改良アバランシェフォトダイオード設計

マイク・ホッジス

アバランシェフォトダイオード (APD) ベースのフォトンカウンタは他の光子計数法に比べて多くの利点を持っている。それらは、単一光子検出用にガイガーモードで動作させ、特定の課題に向けて最適化させることができる。

極端に微弱な光信号の検出が必要であるが、従来の検出器では信号と雑音の区別が難しい時、科学者と技術者は決まって単一光子計数を頼りにする。光子計数法は、天体観測ライダー、各種タイプの蛍光顕微鏡法、産業分野の粒度測定技術、新薬の発見、DNA 解析、さらに最近では量子暗号学などの特定用途向け産業、研究、通信技術など、さまざまな分野で見出される。

これらの用途に特有の要求は多岐にわたり、詳細な解析はこの記事の範囲を越えているが、いずれも非常に高効率で、低雑音の単一光子検出器が必要であるという点で共通している。

単一光子計数において、特定の光パワーレベルに対応する1秒あたりの光子数は下記の式で表される。

$$N(\lambda) = 5.03 \times 10^{15} \times \lambda \times P$$

ここで、 P は光出力 (W)、 λ は波長 (nm) である。例えば、405nm で 1fW の出力は毎秒約 2000 光子数に相当し、670nm で毎秒 100 光子の計数率はわずか 30aW のパワーレベルに対応する (図1)。

光子計数法

それぞれユニークな一組の性質をもつ多数のタイプの単一光子検出器が存在する。光電子増倍管 (PMT) は入射光子を内部で電子に変換し、それらの電子を増倍する特殊な真空管である。

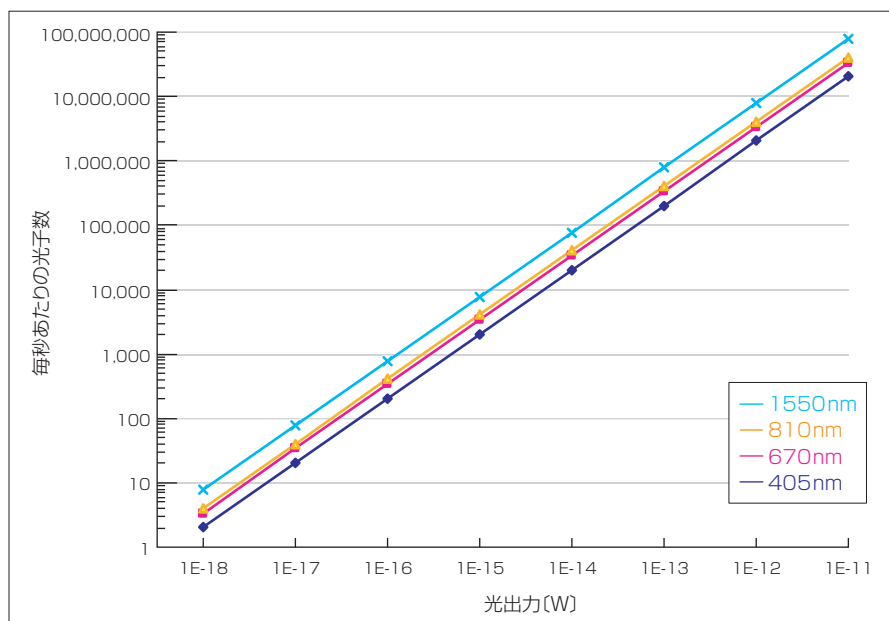


図1 単一光子検出器における出力と入射光子数との間の波長依存相関を示した。

電子増倍管はダイノードとして知られる一連の2次電極を備え、その各々が入射電子を吸収して追加の電子を放出する、いわゆるアバランシェ効果を発揮する。

ダイノードに対する電位はそれぞれ一定に維持され、ダイノードからダイノードへと順に高められている。電子はPMTを通してアノードへと加速され、そこで吸収されて電気パルスの形で出力信号を発生する。一般に、1~3kVの高電圧をPMTに印加する必要がある。

PMTは単一光子を検出するためにガイガーモードで使用される。しかしながら、非常に高い内部電流の発生に

より、これ以上の光子観察が不可能になる不感時間が生じるので、各光子イベント後にデバイスを電気的にリセットすることが不可欠である。分光特性の異なる各種カソード材料を検出波長範囲に従って選択できるが、従来型の真空管PMTは一般に比較的短い波長の青色からUVの範囲で最良の感度を示す。光電子増倍管は一般に広い活性面積(数ミリメートル直径)が特徴だが、暗雑音レベルが高く、アフターパルス(光子がまったく検出されないのに、偽の出力パルスが放出される効果)を起こしやすい。

最近になって、「シリコン光電子増

倍管」とも呼ばれている CMOS ベースのマルチ画素ガイガーモードシリコンアバランシェフォトダイオード (APD) も開発された。この技術は、従来の CMOS 技術による比較的低い製造コスト、低い動作電圧、大きな全アクティブ領域をもつコンパクトな構成、優れたタイミング解像度などの利点をもち、将来有望だ。

この APD は応答時間が極めて速く、非常に敏感なフォトダイオードである。垂直 $p-i-n$ ダイオードと違って、この APD は内部利得を使った衝撃イオン化によって電子正孔対のなだれを発生させる。そのための必須条件は、電子/正孔イオン化が十分に起きるように十分に高いバイアス電圧を印加して、APD の吸収領域を拡大することである。絶縁破壊電圧よりも低い電圧で動作させると、なだれは半導体中の摩擦損失によって瞬時に消滅する。

特別に作製された APD もまたガイガーモードで使用される。そこでは、なだれが維持されるように、バイアスは APD の絶縁破壊電圧よりも高く設定され、最高 10^8 までの内部利得が達成される。このような APD は一般に単一光子アバランシェフォトダイオード (SPAD) と呼ばれる。

今までのところ、ガイガーモード SPAD の暗雑音は汎用 APD のそれに比べて数桁低い。このことと汎用 APD の長波長領域における低い量子効率とが、単一元素 SPAD を多くの単一光子計数用途で優位に立たせる。

高利得での SPAD のガイガーモード動作は必然的に APD 内の非常に高い電流レベルを引き起こすので、デバイス故障を防ぐには適切な消滅回路を使ってこれを絶えず制御する必要がある。最も単純な形式のクエンチ回路はフォトダイオードと直列に配置された

電流制限抵抗器であり、その抵抗値を十分に大きくすれば、なだれを消滅させることができる。しかしながら、そのような回路は一般に回復時間が長いので、有効最大計数率が制限される⁽¹⁾。

この理由で、最も入手が容易な SPAD モジュールにおいても、なだれの開始を検出し、それから数ナノ秒以内に APD バイアスを絶縁破壊電圧以下に下げるアクティブクエンチ回路を特徴とする。その結果は、バイアスが事前レベルまで戻され、次の光子イベントの登録が可能になるまでの比較的短い不感時間(一般に約 50ns)である。この方法で、10MHz よりも上の最大計数率が容易に達成される。

現在入手可能な最良の SPAD モジュールは毎秒 10 カウント以下の暗計数率を示した。これは 10^6 以上のダイナミックレンジに相当する。商用の SPAD モジュールは、ユーザーがその SPAD によって最適性能を達成できるように、熱電冷却されたガイガーモード APD と最適化されたアクティブな消滅回路とをコンパクトな形状で構成している。

検出効率: 性能向上への鍵

光子計数用検出器の適切性を比較する時、いくつかの性能指数が使用されている。暗雑音、アフターパルス確率、不感時間などはすべて重要であるが、ほとんどの用途では検出効率が最重要である。この理由で、約 300nm から近赤外 (NIR) に及ぶ広いスペクトル範囲にわたって非常に高い量子効率 (QE) をもつ SPAD が一般に PMT よりも望ましいと見なされる。

光子計数モジュールの感度は QE またはパーセント値で表現した吸収された光子に対する生成された電子の比で与えられることが多い。あるデバイスのメーカーは、 $QE = (R_0 \times 1240) / \lambda \times 100\%$

によって QE と関連付けられる応答度 (A/W における) を指定することを好む。ここで R_0 は A/W における応答度であり、 λ はナノメートル単位の波長である。同様な雑音性能とアフターパルス確率をもつデバイスと比較する時、一般に最高の QE をもつ検出器が光子計数に最も適している。

QE は APD だけの効率の表現であるが、完全な SPAD モジュール全性能に対してはエレクトロニクスなどの他の要因も多少影響する可能性があることに注意する必要がある。この理由で、SPAD モジュールのデータシートにはしばしば光子検出効率 (P_d) または確率が記載されている。後者はモジュール出口で電気パルスを生じる入射光子のパーセント確率である。

SPAD を設計する時、検出効率と暗計数率のいずれもが APD に適用されたバイアス電圧に依存することに留意することが重要だ。先に議論されたように、APD は絶縁破壊電圧以上 ($V_{op} > V_{br}$) のガイガーモードで動作させる。ここで V_{op} と V_{br} の差は過電圧として知られ、それは特定のパラメータを最適化するために調整することができる (表 1)。

しかしながら、最適化は基礎となる APD 設計が十分に高い品質である場合にだけ成功し、それは、雑音を低減するために半導体の K 因子 (正孔対電子のイオン化特性の比) を最小に維持しながら最大の量子効率を得られるように設計された APD 構造を要求する⁽²⁾。独レーザコンポーネンツ社 (Laser Components) 検出器グループの超低 K (VLok) APD は具体的に光子計数用に設計され、670nm の波長で 10 カウント/s 以下の暗計数率と 80% 以上の検出効率を持つ SPAD モジュールを可能にする。

SPAD が伝統的に赤色と NIR 領域の光子計数に最適なデバイスであったの

表1 VLoK APDの検出効率と暗計数率の動作電圧による変動

動作電圧[V _{op}]	過電圧[V _b -V _{op}]	P _d at 405nm [%]	P _d at 670nm [%]	P _d at 810nm [%]	暗計数率[カウント/s]	アフターパルス[%]	不感時間[ns]
346.3	2.0	30	55	32	15.4	0.04	61
348.4	4.1	36	69	43	31.4	0.11	55
350.6	6.3	40	79	51	57.4	0.24	51
352.3	8.0	43	85	55	91.4	0.42	50
355.0	10.7	45	90	60	138.2	0.89	49

に対して、PMTはより短い波長で優れたQEをもつことからスペクトルの青色～紫外(UV)領域に優位性があった。しかし、最近のSPAD技術の進歩により、今日のSPADはUVからNIRまでの広い領域において高効率で使用できるようになった。1つの例はCOUNTblueシリーズであり、それらは基本的に、405nmで55%、532nmで70%の典型的な検出効率を示すVLoK APDのUV強化バージョンである(図2、3)。SPADモジュールのさらなる利点は低電圧DC電源(一般に+5または+12V)を使った直接動作ならびに特定の波長範囲に対して最適化することができる選択自由な光ファイバコネクタにある。

今日まで、SPAD開発の多くの努力はシリコンベースのデバイスに集中してきたが、より長い波長での単一光子計数に対する関心が強まり、結果として、ガイガーモードのヒ化ガリウムインジウム(InGaAs)APDも登場した。これらは最高20%またはそれ以上の検出効率で動作させることができるが、シリコン対応に比べて暗計数率がかなり高い。それらの開発は光ファイバによる長距離データ転送が必要な主として量子暗号技術の進歩によって促進された。ここでは、シリコン検出器の高い効率は短波長での高い光ファイバ伝送損失によって相殺されるが、1550nmまたはそれ以上での優れたファイバ伝送特性はInGaAs検出器の低いQEを補償する。

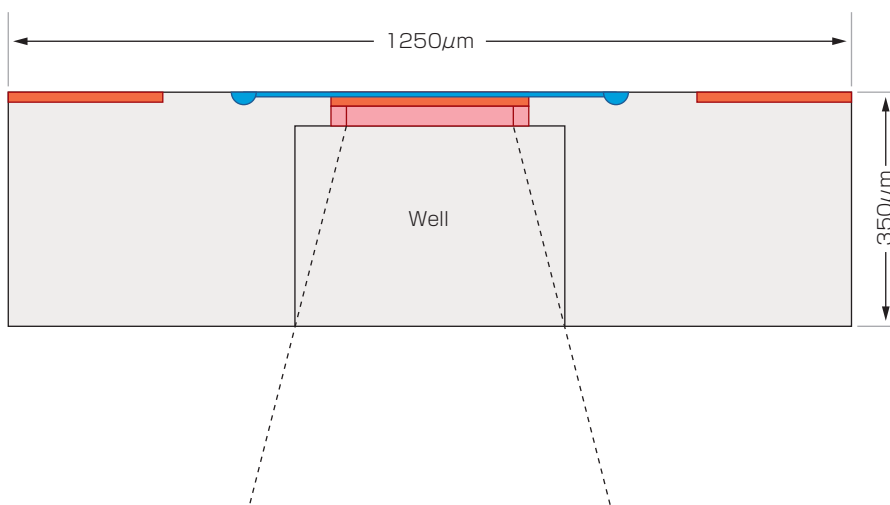


図2 上図はVLoK光子計数APDを示す。



図3 光子計数SPADモジュール(赤色と青色強化版)がファイバ結合配置において示されている。

参考文献

- (1) M. Stipcevic et al., Opt. Exp., 18, 17448(2010).
- (2) P.P. Webb et al., "Properties of Avalanche Photodiodes," RCA Review, 35, 234-278(June 1974).

著者紹介

マイク・ホッジス(Mike Hodges)は独レーザーコンポーネンツ社(Laser Components GmbH)のセールスエンジニアである。e-mail: m.hodges@lasercomponents.com;www.lasercomponents.com.