シリコン微光PDはフォトンを逃さない

ジョン・ウォレス

アバランシェフォトダイオードやシリコンフォトマルチプライヤの派生技術が微光検出ニーズに役立つ。必要とされればシングルフォトンカウンティングにも使える。

フォトダイオード、半導体ベース固体光計測デバイスは、一般にコンパクトで効率的であり、耐久性が高い。これら3つの特徴についてはフォトニクス技術者の満足度は特に高い。（4番目の特徴、ローコストは的を射ていることもあるが、アプリケーションによる）。

フォトダイオードは、吸収したフォトンから電子・ホール対を生成する。結果としての光電流によって入射光の特性が明らかになる。光電流に加えて、暗電流は、微光計測の重要要素になる。PIN接合を持つフォトダイオードは一般に、p-n接合のフォトダイオードよりも高速応答である。

多くの多様な半導体がフォトダイオードの基盤として使用でき、シリコン（Si）、インジウム・ガリウム・ヒ素（InGaAs）、ガリウムナイトライド（GaN）は3つの一般的な材料である。各材料は、それ固有の波長範囲を持っており、長波カットオフは材料のバンドギャップによって決まる。例えば、GaNは室温バンドギャップ3.4eV（365nm）。InGaAsは1.42～0.34eV（870nm～3.6μm）の範囲であるが、混合に依存する。Siのバンドギャップは1.1eV（1.1μm）なのでGaNは紫外（UV）で、Siは近紫外から可視を越えたところまでに使える。InGaAsは一般に、近赤外（NIR）で用いられる。

利用できる多くのタイプのフォトダイオードをカバーすると一冊の本を書くことになるので、ここでは範囲を1つのフォトダイオード材料（Si）と1つの極めて重要なアプリケーション、微光センシングに狭める。

APDとSiPM

アバランシェフォトダイオード（APD）は、多くの微光計測デバイスやシステムの心臓部にある。APDはリニアモードまたはシングルフォトン感度では、デバイスのブレイクダウン電圧の上、いわゆるガイガーモードで使用できる。ガイガーモードで動作する多くのAPDは、いわゆるシリコンフォトマルチプライヤ（SiPM）を形成するために長方形アレイに組み込むことができ、これは多くの微光アプリケーションで、従来の（非半導体ベース）光電子増倍管（PMT）と競合する。

米SensL社の販売・マーケティング担当VP、ウェイド・アプルマン（Wade Appleman）氏は、微光センシング市場は広く認められている幅広い技術カテゴリーに定着しているとの見解を披露している（**表1**）。

SensL社は、様々な形態のSiPMを提供している。これに含まれるのは、表面実装マイクロリードフレーム（MLP）スタイル、それに1×1、3×3、6×6mm^{2}面積の能動型ディテクタサイズがあるとアプルマン氏は記している。SensL社の最新SiPM、C-Seriesは、2014年8月に発売され、スペクトル範囲は300～800nm、ピークフォトンディテクション効率は（PDE）は420nmで41％となっている。

C-Seriesデバイスは、アプルマン氏によると暗雑音が非常に低く、暗計数率＜100kHz/mm^{2}である。他の特性としては、出力均一性±10％、ブレイクダウン電圧低下はデバイスからデバイスまで±250mVの範囲。

「SiPMは微光に感度があるアプリケーションで幅広く用いられている。医療イメージング、危機管理と脅威検出、

表1　微光センシングディテクタのカテゴリー

	PIN	PMT	APD	SiPM
利得	1	106	102	106
動作電圧	5V	KV	100～1000 V	<50 V
温度感度	低	低	高	低
機械的耐久性	高	低	中	高
周辺光感度	十分	不十分	十分	十分
スペクトル範囲	可変	青/UV	可変	可変
形状	小	大	小	小
コスト	低	高	高	低
大面積	いいえ	はい	いいえ	はい
磁場感度	いいえ	はい	いいえ	いいえ
雑音	低	低	中	低
応答時間	速い	速い	遅い	速い

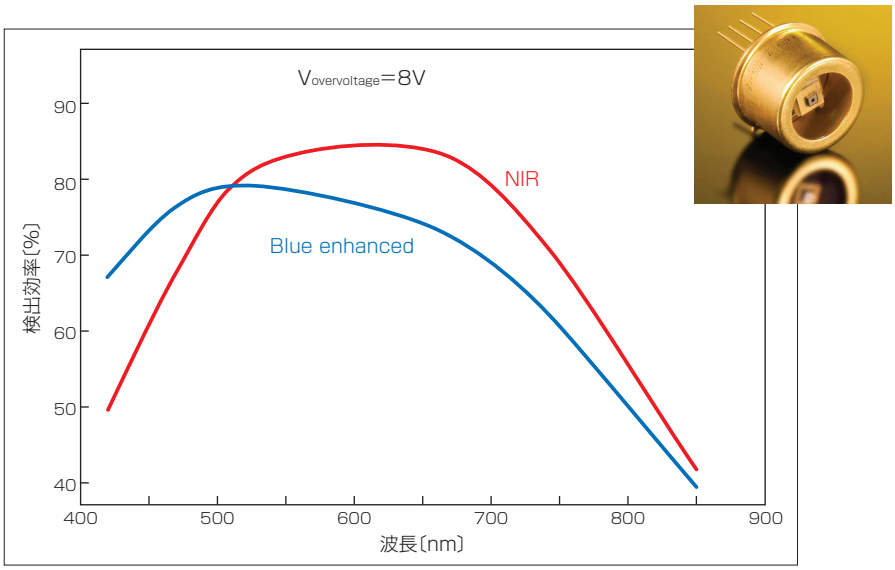


図1　レーザコンポーネンツ社のAPDは、競合製品よりも短い波長、NIRに最適化可能。TO-46キャンのフォトンカウンティングAPD（挿入図）は磁界の影響を受けない（資料提供：レーザコンポーネンツ社）。

自動車や産業用ライダを含む」とアプルマン氏は言う。「医療イメージングでは、最も一般的なアプリケーションは核医療陽電子放出型断層撮像法（PET）スキャナのディテクタとして用いている。この場合、ガン検出で用いられる全身スキャナには3万個を越える3mm SiPMディテクタが搭載されていることもある。放射線モニタリングや放射線特定では、SiPMはアイソトープ特定用にハンドヘルドページャサイズデバイスに用いられている、あるいは出荷コンテナやトラックのイメージングにガントリー型ポータブルスキャナでも用いられる。自動車では、自動車運転者支援（ADAS）アプリケーションで段々と興味深い利用法がでてきており、SiPMはPINダイオードやAPDの代わりに用いられる。その理由は、明るい光のアプリケーションでもよく見える、また一段と小さな反射レーザパルス信号を区別できるからだ」と同氏は説明している。

米レーザコンポーネンツDG社は、2004年にSiAPDの内製を始めた。400nmから850nmを越える波長範囲で動作するシングルフォトンAPDシリーズを生産している。デバイスの範囲には、エピタキシャルおよびリーチスルー構造が含まれる。アクティブエリアの径は230μm～3.0mmであり、シングルフォトンカウンティングモジュールでもある。リーチスルー設計では、電子増幅は薄い高電場領域で起こる、それに対して入射フォトンは遙かに厚い領域で吸収される。エピタキシャルデザインは、厚いウエハ上での製造を可能にするSi構造ステップを追加しており、これがなければ直列抵抗が大幅に増えることになった。

APDの大半は、個別パッケージであるが、トランスインピーダンスアンプリファイア（TIA）と組み合わせて高速レシーバを実現することも可能である、とドイツに本拠地のある米レーザコンポーネンツ社の販売担当エンジニア、ポール・ビュトナー氏（Paul Buettner）は言っている。完全なAPDモジュールも生産されており、これには温度補償された高圧バイアス電源も含まれて

omicron LASERAGE

LightHUBシリーズ

コンパクト
レーザー
コンバイナー

特　徴

- ２台、４台、最大６台のレーザー搭載可能
- ２６波長から異なる組合せ可能
- 偏波面保存シングルモードファイバー接続可能
- 自然空冷（冷却ファン無し）
- 小型一体整形の頑強なハウジングボックス
- 制御用ソフトウエア付属
- フィールドでのレーザーアップグレード可能

用　途

- フローサイトメトリ
- 共焦点顕微鏡
- オプトジェネティック
- マシンビジョン
- リプログラフィック
- テストと測定

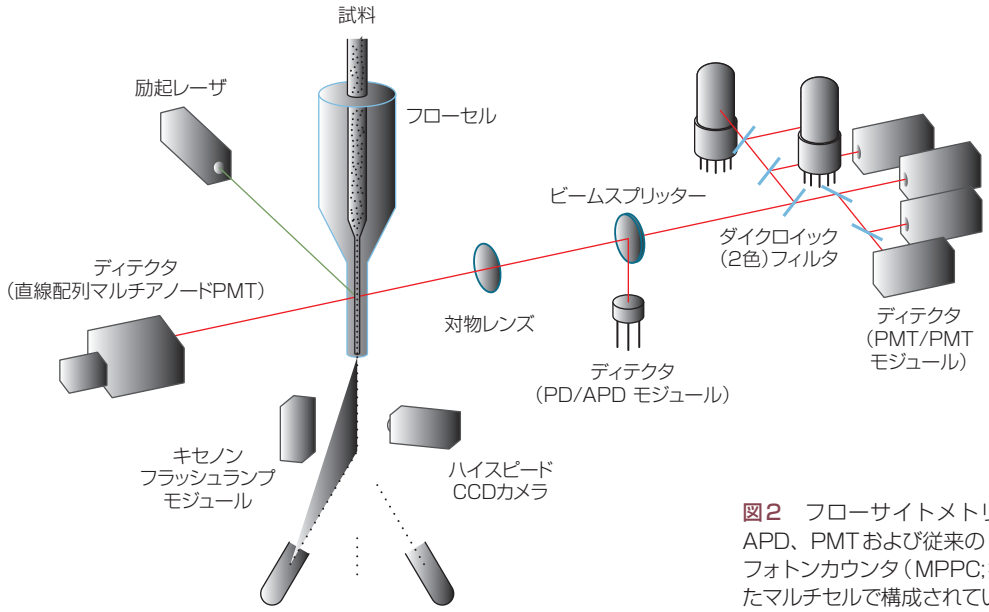
Omicron（オミクロン）社では、バイオ・理科学・OEMに最適で多彩な商品群をラインアップしています。
詳細については、弊社ホームページでOmicron社製品をご覧ください。

http://www.japanlaser.jp/

E-mail: lase@japanlaser.jp

JLC JAPAN LASER 株式会社日本レーザー

本　　社　〒169-0051 東京都新宿区西早稲田2-14-1
TEL: 03-5285-0863（直）
大阪支店　TEL: 06-6323-7286
名古屋支店　TEL: 052-205-9711



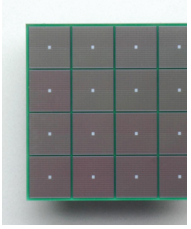


図2　フローサイトメトリのセットアップは、測定用にAPD、PMTおよび従来のPDを使用する。マルチピクセルフォトンカウンタ(MPPC;挿入図)は電気的に並列接続されたマルチセルで構成されている(資料提供:浜松ホトニクス)。

いる。

「これらはデバイスのブレイクダウンを越える電圧でバイアスがかけられている独自のディテクタであり、非常に高い電界が構造を貫いており、したがって単一のフォトンが電子雪崩を引き起こし、増幅プロセスが始まる」とレーザコンポーネンツDG社のGM、ドレイガン・グルビシック氏(Dragan Grubisic)は言う。「とは言え、デバイスが連続的にフォトンを検出できるようにするには、結果として起こる雪崩電流を、バイアスをブレイクダウン電圧以下に下げることで抑圧し、再度同じバイアスをブレイクダウン電圧以上に上げることが必要になる。シングルフォトンモードで動作するとき、APDは起爆装置(トリガー)として機能する、これらのデバイスがガイガーモードで動作すると言われる理由がここにある」。

レーザコンポーネンツDG社は、短波長とNIR(**図1**)に最適化した低雑音デバイスを2種類製造している、またブレイクダウン電圧が100Vのシングルフォトン APDも製造している。グルビシックによると、標準のシングルフォトン APDはブレイクダウン電圧が300～500Vにとどまっている。同氏の指摘によると、シングルフォトンAPDの主要なアプリケーションには、量子通信、光子相関分光法、粒度測定、共焦点顕微鏡などがある。

目的に合わせた応答

「APDのアバランシェ領域は電子を増幅するように設計されているので、NIRや青色フォトンの検出には別のソリューションが必要になるが、これは*p*層または*n*層からの照射によって行われ、関心のある波長に依存する」と浜松ホトニクスのマーケティングリサーチマネージャー、ガス・アセンチオス氏(Gus Asencios)は言う。「このタイプのディテクタは、パルス散乱のような非常に短い時間で微光レベルの検出が必要なときに一般に用いられる」。同氏によると、一般的なアプリケーションにはライダ、フローサイトメトリシステムの前方/側方散乱チャネルが含まれる(**図2**)。

光のレベルがフォトンカウンティングに近づくと、数桁高い利得のディテクタが必要になるが、まだ低い過剰雑音がある。アセンチオス氏の説明によると、浜松ホトニクスのマルチピクセルフォトンカウンタ(MPPC; SiPMの一種)ディテクタは1つのディテクタとして動作する並列接続マルチセルとなっている。ガイガーモードで動作させると、セルは10^5～10^6の利得を達成する。それらは個々にはONまたはOFFとなるが、並列接続すると結果として生ずる出力はONになっているいくつかのセルを代表するものになっており、これによって検出されたフォトンを正確に読み出すことができる。

「超低レベルの検出には、ダークカウントが信号対雑音比(SNR)低減に大きく貢献するが、このディテクタにおける全てのダークカウントが熱励起によるものではない。一部は光クロストークやアフターパルスが原因となっている」とアセンチオス氏は指摘する。これら2つの他の要素は、逆電圧が増すと、さらに歴然としてくる。また、それらがアバランシェ確率よりも高いレートで増加すると、SNRが悪化する。

「広い逆電圧レンジでダークカウント

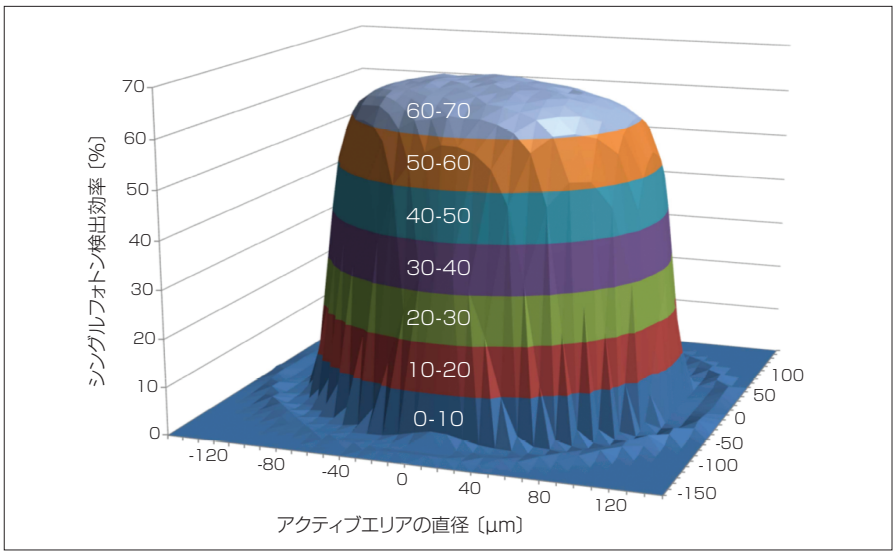


図3　円形Si APDのアクティブエリアでのシングルフォトン検出効率をプロットすると、ピーク効率は700nmで＞70%、エリア全体にわたり高い均一性が見られる（資料提供：エクセリタス社）。

が低いMPPCがあると、計測のSNRは向上し、環境温度動作を広くできる。これは可搬測定器にとって重要なメリットだ」とアセンチオス氏は言う。「例えば、ページャ（ポケベル）サイズ放射線測定器では、ダークカウントがさらに低くなることでエネルギー分解能が向上する、またより大きなシンチレータあるいは効率の低いシンチレータといっしょに使ったときに感度向上が得られる。広い温度範囲で暗電流が相対的に安定していると、システムは可搬機器でアクティブな温度制御無しで使える」。

米エクセリタス・テクノロジーズ社は、半導体材料としてSiまたはInGaAsを使用した気密封止のコンパクトなAPDを製造している。2つのスペクトル応答は相互に補完し合っており、Siは400～1100nm、InGaAsは1100で隣接して1700nmまでをカバーする。基本デバイスの改良には、帯域と利得の最適化が含まれる。

同社は、400～1060nmの範囲で動作するシングルフォトンカウンティングモジュールを造っている。そのモジュールに使用されているSiAPDは、同社によると、比類のないものである。円形エリア（180μm径）で、アクティブエリア全体で高い均一性を持ち、700nmでピークフォトン検出効率が70%を上回るという点で比類がない（**図3**）。そのデバイスは、欧州連合（EU）のRoHS指令2011/65/EUにも適合している。このフォトンカウンティングモジュールのアプリケーションは、業界が共有する数あるアプリケーションのなかで、天体観測から適応型オプティクス、超高感度蛍光検出まである。

離散増幅

米アンプリフィケーション・テクノロジーズ社は、SiPMに対して独自のアプローチを採用しており、いわゆる離散増幅フォトンディテクタ（DAPD）を造っている。この場合、個々のPDからの低レベルの電気信号が個別の「マイクロチャネル」で正確に決定されたレベルになるように内的に増幅され、次に1つのアナログ出力信号に統合される。

離散増幅アプローチは、高いフォトンディテクション効率と広いダイナミックレンジのような従来のトレードオフの一部を回避する、とアンプリフィケーション・テクノロジーズ社のCTO、ラファエル・ベン＝マイケル氏（Rafael Ben-Michael）は言う。DAPDのスペクトル感度は、特定の波長範囲、あるいは最高検出効率、もしくはスペクトル範囲全体のいずれかになるように、適切な反射防止コーティングを用いてカスタマイズできる。

DAPDは、非常に高速応答であり、高利得帯域製品である。ベン＝マイケル氏によると、これは低レベル信号の高速検出には必須である。例えば、1mm径アクティブエリアのDAPDで単一電子応答パルスは、利得レベル2.8×10^5で、半値全幅（FWHM）パルス幅約1.4 nsを示す。加えて、一連のパルスの時間分解能は300psあるいはFWHM以下である。

離散増幅の心臓部には、個別チャネルのバイナリ型増幅があり、同社のDAPD10Cフォトディテクタでは、室温で典型的な過剰雑音指数（アバランシェ増幅雑音の計測）が1.05以下となる。この過剰雑音レベルは実に、ベン＝マイケル氏によると、最良の極低温シングルフォトンディテクタで起こるよりも低い。結果的に、個別信号パルスにおけるフォトン数は高精度にカウントできる。

SiPMやシングルAPDのようなSiベースの微光検出デバイスの多くのメーカーは全て、独自の技術見解を持っている。多様なデバイスの区別は複雑であり、最終的には満たすべき特定のアプリケーションに基づいて、注意深く研究した後にしか決まらない。また、この集合には非フォトダイオードベースのPMTも入る、PMTは多くのユーザにとってまだ主要な競合にとどまっているからである。

LFWJ