より多くのチャンネルを獲得するガイガーモードAPD

岩井 雄司

ガイガーモードAPDのモノリシックアレイは医用画像から高エネルギー物理学までの応用に役立つ新しい研究ツールになった。

ガイガーモード・アバランシェフォトダイオード（APD）が普及するようになり、さまざまな企業が市場に参入するようになったため、この技術のさまざまな実装の舵を取ることは次第に難しくなってきた。APDはすべて同一の基本原理にしたがって動作するが、類似点はそこまでである。異なるガイガーモードAPDを分類する一つの簡単な方法は、含まれるマイクロピクセルの数による分類だ。

単一ピクセル実装は一般にSPAD（単一光子アバランシェダイオード）と呼ばれている。小型（約100μm）のため熱電冷却が容易であり、結果としてダークカウントが非常に少ない。SPADのフォトンカウンティング速度はリセット時間（または「不感時間」）に依存する。このリセット時間を短縮し，ダイナミックレンジを拡げるために、能動クエンチング回路が広範に研究されてきた[1]。

もう一つのタイプのガイガーモードAPDは、マルチピクセル実装（複数のマイクロピクセルのすべてが共通のカソードとアノードに共に結合されている）であり、これは伝統的な光増倍管（PMT）と同様に多光子イベントをカウンティングする能力をもつため、一般にシリコン光電子増倍管（SiPM）として知られている。この実装では、多光子イベントにトリガを加えて、それをタイミング測定に利用することもできる。

マルチピクセル実装が初めて市場に導入された時、多くの努力がこのデバイスの評価に向けられた。研究者たちが数十年にわたってPMTの物理と応用に取組んできたことを考えても、やるべきことはたくさんあった。比較的新しい固体技術は、成熟した真空技術の不足を克服することができるのだろうか？ マルチピクセルフォトンカウンティングデバイス（MPPC）SiPMについては誇大宣伝があったし、今でもある。浜松ホトニクスのアプリケーションエンジニアとしての私の主な任務の一つは期待管理である。どのような検出器をも超える能力をこのデバイスに期待しているユーザがいる一方で、MPPCがここ数十年間使用してきたPMTと同じようには動作しないと落胆しているユーザもいる。実際のところ、MPPCはPMTを単に置き換える後継機器などではまったくない。他のタイプの検出器と同様に、MPPCには MPPC自身のユニークな特性がある。

MPPC

MPPCのユニークな特徴の一つは単一光子パルス信号の波形である。ガウス形に近いパルス波形をもつPMTとは異なり、MPPCは立ち上り時間（t_r）は比較的短いが、パルス減衰時間（t_f）は比較的長い。これは、ユーザがオシロスコープでMPPCパルスを観測すると

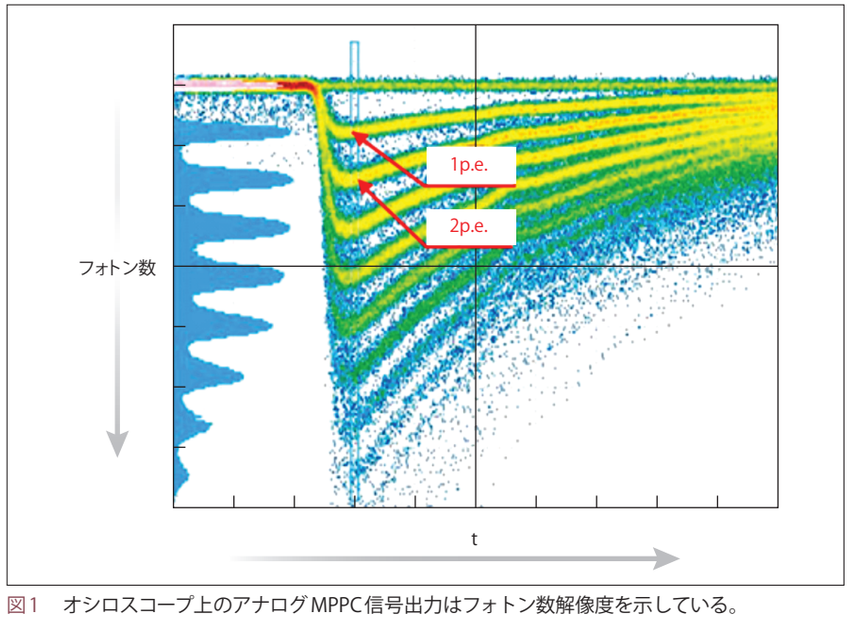

図1　オシロスコープ上のアナログMPPC信号出力はフォトン数解像度を示している。

きに、まず気付くことだ。MPPCの初期の主な用途が高エネルギー物理学と医用画像であったため、タイミング解像度が主要な関心キーパラメータであった。そして、いまでも短いt_rと高いパルス波高をもつパルス発生を目標とする研究が中心である（図1）。

単一光子タイミング解像度の初期結果は非常に有望であり、MPPCで最初に公開されたデータシートにおいて220 psのFWHMが報告された[(2)]。しかし、このMPPC動作のモデリングとシミュレーションが行われた後、初期の結果を改善するために微調整することが可能な一対のパラメータが同定された（図2）[(3)〜(5)]。

製造経験

MPPC内に変動があるときは常に、その性能に悪影響が及ぶ。タイミング解像度を改善する初期努力は、この変動性を制御することに集中した。試みられた最初のステップは、マイクロピクセルピッチを一定に保ちながらマイクロピクセルサイズを縮小することによって、クエンチング容量（C_q）とピクセル容量（C_d）の実際的な調整可能性を確かめることであった。ピクセルサイズの縮小だけでC_dが低下し、C_qが増加した。C_qはMPPC内のトレースの拡大によってさらに増加することが明らかになった。これら二つの変化による影響は、実際にオシロスコープ上ですぐに観測された。ピーク振幅が増大し、減衰時間が短縮し、パルス波形の均一性が向上した。

全工程に対して精密化を実施すると、他にも改善が観測された。50μmピッチ、3×3mmのMPPCのダークカウントが平均して2分の1に減少した。このような改善によって、MPPCは冷却せずに室温で容易に使用できるようになった。

アレイ

大面積のイメージャを必要とする陽電子放射断層撮影（PET）などの用途によってより大きなアレイへの関心が高まった。小型の2×2チャンネルアレイでさえ、PETスキャナで必要になる光学系とエレクトロニクスの複雑さをかなり緩和するであろう。MPPCの非磁性特性はそれだけでもPET応用にとって魅力的であるが、組立て済みのアレイを使って作業する能力はこれらのデバイスでの作業をさらに容易にした。MPPCの大面積アレイを作製するアプローチには2種類ある。個別の素子を整列させるか、あるいはモノリシックアレイを設計することだ。

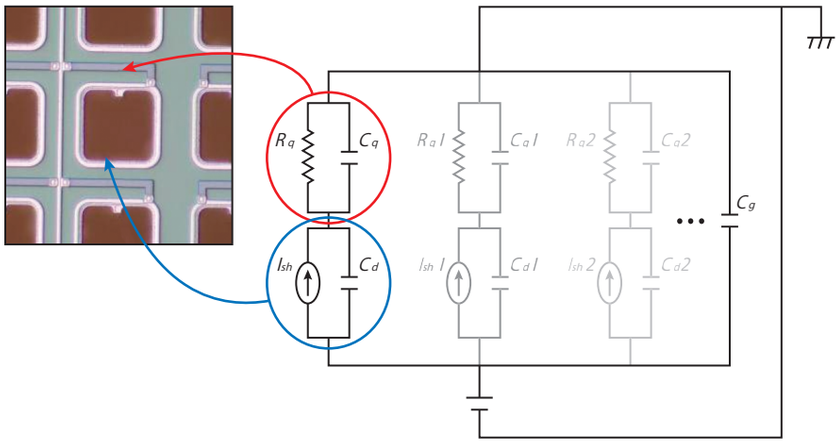

図2　MPPC周辺のパラメータのいくつかを微調整することによって装置のタイミング解像度を改善することができる。APDマイクロピクセルと直列に接続されたクエンチング抵抗（R_q）を使って、なだれ過程をリセットする。R_q値を下げると、パルス波高が増加する。クエンチング容量（C_q）または古典的なSSPMモデルにおける　R_qに並列な迷走容量はパルス立ち上りに向けて押し寄せられた電荷量が関与している。C_q値が高くなると、立ち上り時間は鋭くなる。ピクセル容量（C_d）はパルステイル末端の長さによって決まる。C_d値を低下させるとパルス立ち下がり時間が短縮する。

個別のMPPCを組合せてアレイを作製するのは比較的容易だ。全体的に均一な利得を保証するには、個々のMPPCに加えられた電圧を個別に調整するか、事前にMPPCを性能に基づいて分類しておかねばならない。複数のロットから個々のMPPCを選択し、分類することができるため、すべてのデバイスが同一ウエハから製造されている場合を別にすれば、この方法で利得が非常に均一なアレイを製造できる。

モノリシックアレイは降伏現象の観点で更に危険性が高い。ブレークダウン電圧の変動がある程度大きくなると、いくつかのチャンネルはガイガーモードでの動作ができなくなる。もう一つの極端な状態は一つのチャンネルの過電圧値が非常に高い場合だ。チャンネル間の差がさほど大きくなくても、アレイサイズが増大すると、間違いなく均一性が問題になる。シリコンウエハ上にそれと同じサイズのモノリシックMPPCアレイを形成することは可能であるが、検出器はウエハ上でも同じ利得不均一性に悩まされるであろう。

モノリシックアレイ作製の背後にあるもう一つの課題は、トレースレイアウトの設計である。アルミニウムトレース（導電線）のインピーダンスはパルス波形に深刻な影響を及ぼすため、これらのトレースの長さまたは幅のいかなる変化もアレイ内の各MPPCチャン

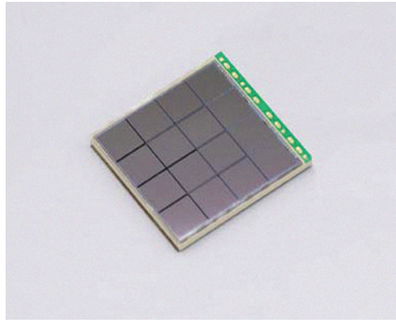

図3　S11828-3344Mは、3面タイル状の4×4チャンネル・モノリシックアレイ。均一なパルス波形を達成するために、各チャンネルからのトレースは等しい長さになるようにアレイの1面へとルーティングされた。

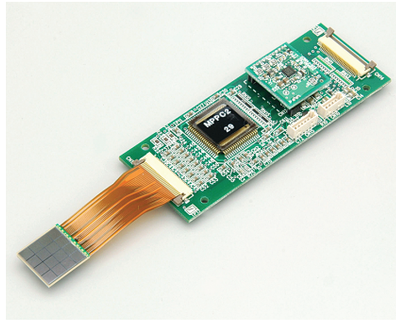

図4　フレックスケーブル上のモノリシック4×4チャンネルアレイを利用するMPPCモジュール。そのエレクトロニクスは高電圧電源、温度補償回路、本文中に登場する二つのASICで構成されている。

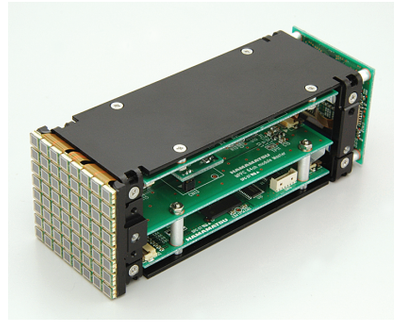

図5　一つの抵抗電荷分割回路網が8×8チャンネル分離MPPCモジュールで使われている。64の異なる出力ケーブルを使う代わりに、このスキームでは、出力をたった4ケーブルで処理することができる。

ネルから出力するパルス波形を変形させる。4×4チャンネルのモノリシックMPPCアレイの場合、そのトレースは各アルミニウムトレースの長さのすべてが最長チャンネルの長さに等しくなるようにルーティングされる（図3）。

エレクトロニクス

MPPCの利得は温度変動に敏感なため、出力を一定に維持する機構が必要になる。シリコンAPDと同様に、ブレークダウン電圧は温度が高くなるとシフトアップする。MPPCの場合、その温度係数は約56mV/℃であった。この問題を取扱うための様々な温度補償法が存在する。最も一般的なものは、温度に順じて過電圧を調整する方法である。熱電冷却器も温度を一定に保つために利用できるが、大規模かつ迅速な冷却はMPPCの数が多いため複雑な処理になる。

同様の複雑さは、実行される可能性のあるすべての読出しエレクトロニクスにも存在し、処理する信号の数が多くなるにつれ多数のコンポーネントが必要になる。大抵の用途では面積が制限因子になるため、MPPCアレイの信号増幅と処理を操作するための混合信号低雑音ICに多くの関心が集まった。

通常応用の16チャンネル信号特定用途向き集積回路（ASIC）は、個別アレイとモノリシックアレイを使ったモジュールとして現在入手可能である。このようなASICの要件は、低い入力インピーダンス、高い出力インピーダンス、100MHz以上の帯域幅、雑音を排除するクランプ電気回路などであった。この特別なASICは電流ミラー回路に基づいている。工程改善によってモノリシックアレイにおけるチャンネル間の利得差が最小化されたが、MPPCアレイのいかなる利得不均一性も相殺可能な分離32チャンネル・デジタル-アナログ変換器（DAC）ASICが開発された（図4）。

抵抗読出し方式は大型PMTアレイを読出すために医用画像分野で普及した。これと同一の読出し方式は分離64チャンネルMPPCアレイで実施されており、これは四つの位置符号化アナログ出力を提供する（図5）。

MPPCは、斬新だが未証明の技術から十分に理解された信頼できる技術へと急速に変化した。しかし、それでもなお多くの未開拓のアプリケーションが残っている。これからは、まさにMPPCにとっては期待できる時期だ。

参考文献
（1）S. Cova, et al., “Active-Quenching and Gating Circuits for Single-Photon Avalanche Diodes（SPADs）,” IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-29, 599-601（1982）.
（2）Multi-Pixel Photon Counter catalog from Hamamatsu Photonics K.K .
（3）F. Corsi et al., “Modelling a silicon photomultiplier（SiPM）as a signal source for optimum front-end Design,” NIM, A572（2007）.
（4）K.A. Wangerin et al., “Passive Electrical Model of Silicon Photomultipliers,” IEEE Nucl. Sci. Symp.（2008）.
（5）C.L. Kim, “Method to improve SSPM Timing Resolution: Pulse Shape,” Proc. Sci.（PoS）, Intl. Workshop on New Photon Detectors, PD09-010（2009）.
（6）H. Otono et al., “Study of the internal mechanisms of Pixelized Photon Detectors operated in Geiger-mode,” arXiv:0808.2541v1（Aug. 19, 2008）.
（7）“Characteristics and Use of Si APD,” technote from Hamamatsu Photonics K.K.
（8）K. Yamamura et al., “Production and Development status of MPPC,” Proc. Sci.（PoS）, Intl. Workshop on New Photon Detectors, PD09-017（2009）.
（9）K. Yamamoto et al., “Newly developed semiconductor detectors by Hamamatsu,” Proc. Sci.（PoS）, Intl. Workshop on New Photon Detectors, PD07-004（2007）.

著者紹介
岩井雄司は米Hamamatsu社（浜松ホトニクスの米国法人）のアプリケーションエンジニアである。
e-mai: yiwai@hamamatsu.com URL: http://sales.hamamatsu.com

LFWJ