

微細二次元ピクセル状光子検出器による単一光子検出技術

山下 了

Single-Photon Sensitive Device with Fine Pixel Avalanche Photodiodes Array

Satoru YAMASHITA

A series of new type of photo-detectors is recently developed with an array of numbers of fine pixels of avalanche photodiodes. They are “pixelated photon detector” and commercially available as SiPM or MPPC so on. The most innovative feature of the detector is to measure the number of photons by means of counting the number of pixels hit by the injected photons. The device is a new type of “digital photon counter” having large potential to be used as the next generation of the high performance photon sensor. In this report, we summarize the characteristics of the detector, structure and basic principles of its operation.

Key words: semiconductor, photon sensor, single photon sensitive, fine pixel detector

半導体光センサーにはさまざまなタイプのものがある。今回の記事はの中で、数十 μm 角の微細な半導体ピクセルを敷き詰めた光子検出器 PPD (pixelated photon detector) に関してのものである。PPD は内部構造・開発グループ・製造元などの違いにより、silicon photo-multiplier (SiPM) あるいは multi-pixel photon counter (MPPC) などとよばれる。従来型の光子センサーでは、入射光子の数に比例して生成される光電子あるいは電子・ホール対の数に比例した大きさの出力電気信号が得られるのに対して、この PPD では、それぞれの微細ピクセルはそこに光子が検知されたかどうかのオン/オフの信号を出すのみであり、微細ピクセルに1つだけ光子が入っても複数の光子が同時に入っても、同じ出力を出す。そのようなピクセルを敷き詰めることで、センサー全体に飛び込んできたいくつもの光子がいくつのピクセルをオンにしたかで光子の数をカウントするという逆転の発想を用いているところに、最大の特徴をもつ。出力がヒットしたピクセルの数でいわば「デジタル化」されているため、単一光子の検出能力、半導体検出器特有の高い量子検出効率、大量生産性と数テスラの強磁場下でも問題なく利用できるという優れた

特性をもつ。常温での使用、厚さ数ミリメートルの薄型、数十ボルトという比較的低いバイアス電圧で使用でき、信号増幅率も光電子増倍管 (PMT) と同程度まで上げることができる。一方で、後述するように出力には温度依存性や電圧依存性が強く、センサー全体の受光面積もまだ数ミリ角程度の小さなものしか実用化されていないなど、これからの開発の余地も大きい。近年すでに数万チャンネルなど多くの測定部をもつ素粒子物理学実験などで十分に実績を積んできた。今後、蛍光分析、分子生物学、素粒子・原子核・放射光等の加速器科学、宇宙空間における衛星観測装置、さらには強磁場内でも安定に動作することや小型安価であることなどを用いて、核磁気共鳴 (NMR) と併用した PET 等の先端医療機器の将来を大きく変える可能性をもつと期待されている。

この測定原理自体をはじめに持ち込んだのは、ロシアのグループである¹⁾。ロシアグループは1998年にロシア国内の特許を取得し、このセンサーを SiPM と名付けた。ロシアではじめて発案・開発され、間もなく日本・ドイツ・イタリアなどでも開発・製造が始まった。日本では、上記と同じ「デジタル計測」の原理を用いながらも、ロシア型

東京大学素粒子物理国際研究センター (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1) E-mail: satoru@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

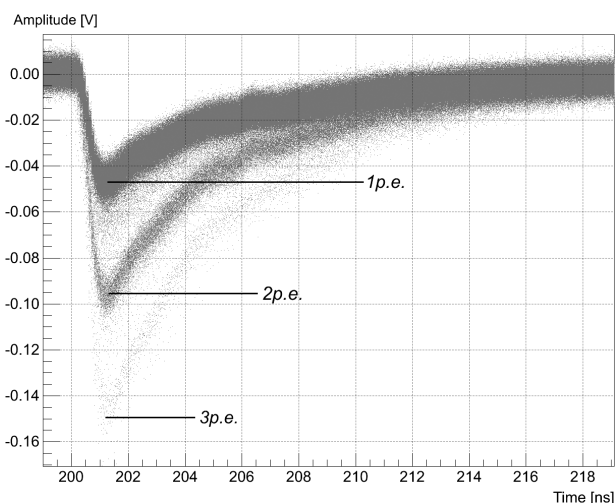


図1 PPDの波形(オシロスコープによるもの).

とは異なる内部構造をもつものを浜松ホトニクスが独立に開発²⁾, 製造を開始し, MPPCと名付けている. 近年ではMRS-APD, AMPD, SSPM等とよばれるバリエーションもある³⁾.

1. 特性の概要と基本的なしくみ

1.1 出力信号の様子と光検出器としての特徴

PPDからの実際の出力波形を図1に示す. オシロスコープ波形の一番濃いものは1つのピクセルがヒットしたときの波形であり, その下に2つがヒットしたものの, さらに下にうすく3つがヒットしたときの波形が見える. PPDは従来のPMTやアバランシ・フォトダイオード(APD)などと比較して, (1)光子の数をデジタル信号のように数えることができる, という最大の特徴に加え, APDの利点とPMTの利点を併せもったような以下の特徴がある. (2)可視光領域に対し, 半導体デバイスの特徴である高い量子効率(有効受光面では80%以上, 実効的には30~80%程

度)をもち, 単光子に対しても十分な感度がある. (3)バイアス電圧は100V以下と低く, PMTやHybrid-APDのような高電圧供給を必要としない. (4)増幅率は従来のAPD(典型的には $10^2 \sim 10^3$)より格段に高く, $10^5 \sim 10^6$ 以上に及ぶ. (5)数テスラの磁場中でも, 量子効率および増幅率にほとんど影響がない. (6)時間応答はPMT等と同様によく, タイムジッターも小さく, 時間分解能に優れている(例えば単光子当たりで250ピコ秒程度). (7)ガスカウンターなどで問題になる不感時間(デッドタイム)も短い(大量の光子が同時に入射した後でも数ナノ~数十ナノ秒後には復帰). (8)電圧分配(ブリーダー)を必要とせず, 数mmときわめて薄型の構造をもつ. (9)半導体チップのように安価に大量に生産できる可能性をもつ. (10)機械的な衝撃にも強い.

このように従来の光子検出装置と比較して多くの優位点もある一方, (1)単光子に相当する熱電子起因のノイズの頻度が比較的高い, (2)後述するPPDに特徴的なノイズ(アフターパルス, クロストーク)によりさらにノイズが相乗的に増加する, (3)おもにノイズ頻度で制限されて, センサー全体の受光面積を大面積にしにくい, (4)出力信号の大きさに対する温度依存性・バイアス電圧依存性が大きい, (5)放射線に対する耐性が現在までのところ比較的弱い, などの課題をもつ. これらについては後述する.

特にたくさんの光子検出器を用いるような加速器実験, 例えば多数のシンチレーターを用いた飛跡検出器や粒子のエネルギーを測定するカロリメーターの読み出しセンサーなどへの応用の可能性で, まずは実用が開始された. 現在までに大量のPPDを用いた物理実験として, 東海村の加速器J-PARCにおけるニュートリノ振動実験T2Kで京都大学の中家氏らのグループを中心に国際協力で行われ⁴⁾, 浜松ホトニクス製の667ピクセルをもつMPPCを総計で6万

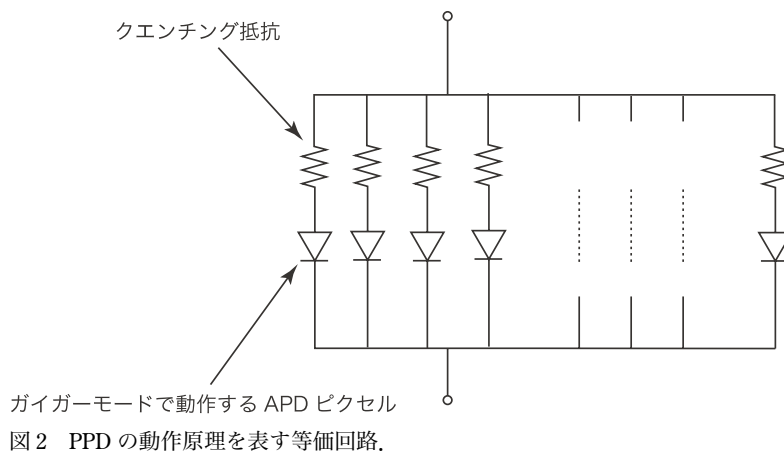


図2 PPDの動作原理を表す等価回路.

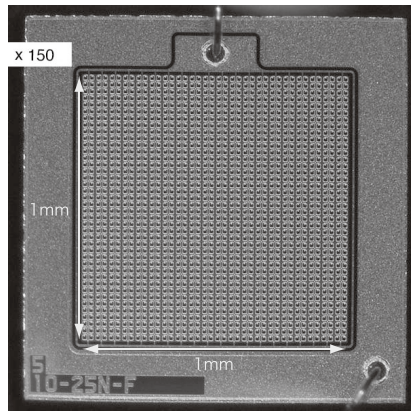


図3 PPD ピクセルの配置. 写真は 1600 ピクセルの MPPC (浜松ホトニクス) のもの.

個以上実装している. また素粒子物理分野の将来計画である国際リニアコライダの検出器での, γ 線あるいは電子・陽電子のエネルギーを測定する電磁カロリメーターという装置のために, たくさんの光子が入射しても測定が行える 1600 ピクセルをもつ MPPC を 2 千個近く用いたプロトタイプが, 信州大学の竹下氏らをはじめ信州大・九州大・神戸大・筑波大・韓国の大学などを中心に国際協力で作られ⁵⁾, 加速器を用いたテスト実験で期待通りの性能を得ている. 小林・益川理論の検証を行ったことで有名な B ファクトリー (高エネルギー加速器研究機構・KEKB) の高度化における Belle 測定器のアップグレードにおいても, 2 万個近くを実装する⁶⁾. 宇宙線分野では, 超高エネルギーガンマ線の測定などでの利用が検討されている.

1.2 動作原理

PPD の構造を最も単純に等価回路的に示すと図2のようになる. 微細ピクセルはどれも光子感知素子である APD の構造をもつ. 図中の APD ピクセルの部分それぞれが微細 (典型的には数 10~100 μm 角) な APD 素子を構成しており, これに増幅を収束させる役割をもつ抵抗 (クエンチング抵抗) が接続されている. センサー全体ではこの微細な APD とクエンチング抵抗のセット (ピクセル) が数十~数万個, デジタルカメラの CCD 素子のように平面内に配置され, 全体で 1 mm~1 cm 角程度の受光面をもつ (図3).

特徴的なことは, それを各ピクセルの出力が飽和する「ガイガーモード」(Geiger-mode) で動作させることと, 並列にその各ピクセルの出力を足し合わせることにある. 光が PPD に入射すると, たくさんある APD ピクセルのうちのいくつかのピクセルが光子を感知して, そこからガイガーモードにより飽和した一定の出力が得られる. これを並列に総和をとれば, 「いくつかのピクセルが光子を感知し

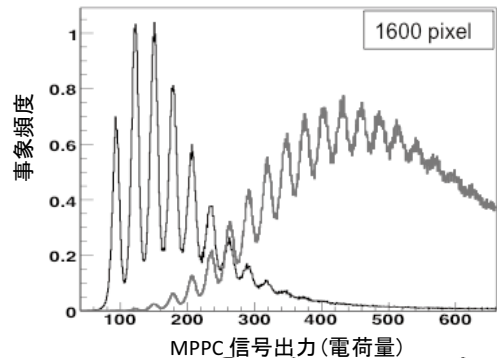


図4 MPPC (1600 ピクセル) の出力の電荷分布.

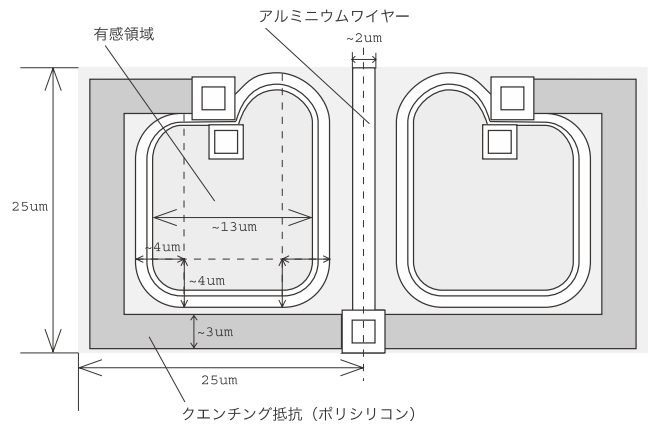


図5 ピクセルの受光面側の平面図.

たか」に応じた出力が得られる. もしひとつの PPD 内に並べられた APD ピクセルの数が全入射光子数に比べ十分大きい場合は (例えば 500 ピクセルあり入射光子数が 20 程度など), 2 個以上の光子が同時に同じ APD 素子に入る確率は無視できるため, ヒットするピクセルの数は入射光子の数の比例することになる. つまり, 非常に均一なバイナリーピクセルを多数配置し, その合計を出力するという手法を用いることで, 「光子を感知したピクセルの数によって入射した光子総数を数える」ことにより入射光子を 0, 1, 2, 3, 4... と勘定できることになる. 図4に PPD からの出力信号の波高分布を示す (浜松ホトニクス製, MPPC). 従来の PMT や APD の場合には増幅過程での各段階での統計ゆらぎなどで分離に限界があったが, この PPD では「原理的には完全にデジタル化することも可能」である. PPD が時にフォトンカウンターといわれるゆえんである.

ピクセルは受光面側から見ると, 例えば図5のようになる. 中央に APD の受光面があり, そこからクエンチング抵抗が出ている. 全体の厚みは, さらなる薄膜化を行わない場合は, 通常のシリコン基板の厚みである数百 μm ~ 1 mm 程度である. 入射光子が電子・ホール対を生成する深

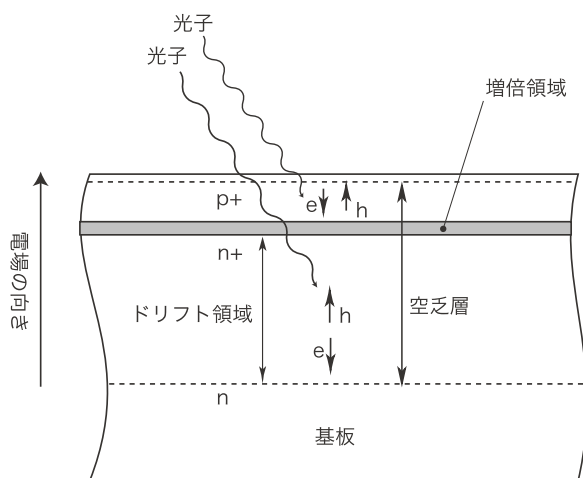


図6 ピクセルの断面の構造.

さは入射光子の波長によるが、シリコンによる光の吸収長で決まり、緑色光で数 μm と表面からごく浅い部分で吸収が起こる。一方、広い用途では赤色光や近赤外領域に感度が欲しい場合がある。この場合は、吸収は数十 μm にわたって起こる。この吸収が起こる場所と増幅が起こる層の深さ方向での位置関係、電場の向き（p-on-n か n-on-p か）と電場強度分布を調節・選択することでどの波長に最も感度をもたせるかが決まる。

APD 部分のピクセルごとの面積および深さ方向の構造で決まる静電容量は、後述するように信号の増幅率に直接関係する。ドーパントの濃度分布は電場分布を決定し、電場の構造が増幅層でガイガーモードが成長する閾値電圧を決定する。一方、クエンチング抵抗はその大きさや配置によって光子検出効率を決めるだけでなく、その抵抗値はピクセルの静電容量とあわせて信号の波形および電圧が元に戻るまでの復帰時間・不感時間を決定する。

2. 信号増幅のメカニズムと出力

2.1 増幅過程

図6にPPDのピクセル断面の概念図を示す。アバランシ・フォトダイオードは通常のフォトダイオードのようにpn接合の半導体にバイアス電圧をかけ、光子から電子・ホール対を生成する空乏層を創り出す。入射した光子がそこで電子・ホール対を創り、その電子が半導体内部での電場により加速・衝突を繰り返す、衝突において電子・ホール対を創ることを繰り返す雪崩（アバランシ）現象を用いることで信号増幅を行う。この増幅過程は電場強度が低いと、はじめにできた電子（あるいはホールやイオン）の数に比例した電気信号が取り出せるが、さらに高い電界中では増幅率が上がりすぎ、出力が飽和してしまうガイガー

モードとなる。PPDでは、電場が局所的に集中するようにp型・n型半導体へのドーパント濃度を調節する。温度や組成にもよるが、通常のシリコン半導体において室温ではだいたい $3 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 程度の電場があることが条件となる⁷⁾。この増幅層は典型的には数 μm の厚みをもつ。この強い電場の中で、素過程では電子およびホールが電場により互いに反対の方向に加速され、それが半導体中の価電子帯の電子と衝突して新たな電子・ホール対を生成する。通常のAPDが動作する「比例領域」では電子を起源とする増幅を考えるだけでよいが、PPDで利用するようなAPDよりも高い電場強度においては、ホールを起源とする電子・ホール対生成も起こりやすくなっていく。バイアス電圧がある一定の閾値を超えると、増幅層内の電場が十分に高くなり、この場合には電子とホールがそれぞれ違う方向に移動しながら電子とホールの対を生成し続けるため、増幅領域で常時電子とホールが互いに逆方向に行き交いながら永続的に増幅が持続する状態となる。これがガイガーモードでのPPD内部での雪崩現象となる。

2.2 クエンチング抵抗の作用と出力特性

PPDでは、ガイガーモードでの増幅を収束させるためにクエンチング抵抗を各微細ピクセルに配置している。ある微細ピクセルのAPDで信号増幅が始まりガイガーモードによる信号増幅が暴走しようとする時、誘起された電流が抵抗を流れることで電圧降下が起こり、そのためそのAPDの両端に印加されていたバイアス電圧が下がる。増幅すればするほど電流が流れ電圧が大きく降下する。そして電圧が一定の閾値以下に下がれば、電子・ホール対を作っていた電場が弱まり増幅は収まる。クエンチング抵抗にはポリシリコンなどの高抵抗材が用いられる。PPDの出力は一義的にはガイガーモードで動作する閾値の電圧 V_0 、実際に印加するバイアス電圧 V 、APDピクセル単体の静電容量 C （バイアス電圧により空乏層が生成された後の値）、およびクエンチング抵抗の抵抗値 R で決まる。目安のために典型的な値だけ記すと、 C は数十～数百fF程度、 R は数百k Ω ～数M Ω 程度、 V_0 は30～80ボルト、 V は V_0 から数ボルト上で動作する。ここで各APDにはバイアス電圧の分(CV)だけ電荷が蓄積されている。その電圧がクエンチ機構により V_0 まで下がったところで増幅は終了する。この間にコンデンサー C から漏れ出る電荷量は $C(V - V_0)$ である。よって、入射光子によって生成された電子・ホール対の数や抵抗値 R の大きさいかんにかかわらず、各APDから生じる電荷量は一定値となり、信号増幅率（ひとつの光電子・ホール対を起源として発生する信号の電子・ホール対の数） S は

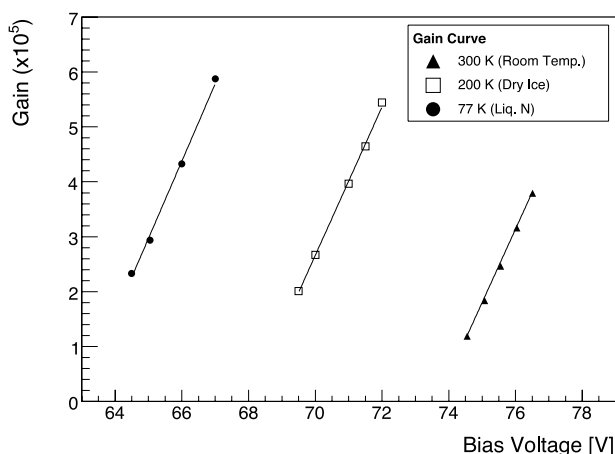


図7 電圧と増幅率の関係：3つの温度（77 K, 200 K, 300 K）での様子を示す。試験サンプルは1600ピクセルMPPC。

$$S = C(V - V_0) / e \quad (1)$$

という関係式で表される（ e は素電荷）。上記の典型的な値において増幅率 S は 10^5 から 10^6 のオーダーである。

波形に関しては、ガスカウンターのときと同様に内部の増幅過程・電子およびホール移動、および構造体としての静電容量なども関与するが、単純に言えば、(1) 初めの段階で瞬間的に増幅が起こり、(2) クエンチング抵抗に電流が誘起されて最大電流のところまで閾値の V_0 まで電圧降下が起こり、(3) そこからは時定数 $R \cdot C$ で決まる指数関数でのテールが伸びて、元のバイアス電圧 V まで復帰する、という過程を踏む。この復帰するまでの時間が各ピクセルの不感時間に相当する。信号のピーク電流 I_{\max} は $(V - V_0) / R$ となるので、例えば 50Ω の抵抗で読めば信号のピーク電圧は $I_{\max} \times 50 \Omega = (V - V_0) \times 50 \Omega / R$ となる。上記のことからわかるように、PPDの信号は基本的に以下のような特徴をもつ。

- 信号増幅率は印加バイアス電圧（ V ）と閾値電圧（ V_0 ）の差に比例する
- 信号増幅率は各ピクセルの静電容量に比例する
- 信号波形は指数関数的に回復し、その時定数は $R \cdot C$ で決まる

増幅の素過程は半導体中のフォノンとキャリアとの散乱の多寡に左右されるため、温度依存性がある。この温度による散乱確率の変化のため、例えば閾値電圧 V_0 は温度依存性が大きく、PPDでは典型的には温度が1度上昇すると V_0 は+50 mV程度シフトする。一方、増幅率自体は式(1)のようにバイアス電圧と閾値電圧の差に比例するため、温度が変化すると、同じバイアス電圧をかけていても、閾値電圧の変化の分だけ信号の増幅率が変化する。図7に3つの温度でのバイアス電圧と増幅率の測定値を

示す。

2.3 実装構造と量子効率、波形

各ピクセルの周囲には、ピクセルの端の部分での局所的な電場の集中を防ぐための特殊な構造（ガードリング）が配されることもある。抵抗およびガードリングなどによる面積は光子の不感領域となり、これが検出効率低下の最大要因となる。各ピクセルが大きく不感領域が小さいものでは量子効率は80%近くあるが、さらに微細に分割したものでは不感領域の占める比率が大きくなり、量子効率は30%程度に低下する。このため、抵抗などのサイズ・配置の工夫や入射面に回路部分をもたない回路背面からの光子入射や、内装する試みなどが開発項目のひとつとして進行中である^{8,9)}。

実際のPPDセンサーは、実装構造では浮遊容量が波形に影響を与える。特に光の入射面とクエンチング抵抗が立体的につくる浮遊容量は図2の単純な等価回路に現れていないが、抵抗を介さずにこの浮遊容量をバイパスして信号が漏れ出している状態を作り出す。液体窒素温度など低温に冷却した場合などでは、ポリシリコン製のクエンチング抵抗の抵抗値が大幅に増加するという性質があるために時定数が長くなり、結果としてバイパスされるスパイク成分の波高が相対的に大きくなり波形を乱す^{10,11)}。東京大学の太谷航氏らのグループでは、液体キセノン中（-100度近い低温）で動作させ、おもに紫外光からなる光子の大型検出器（スイスのPSI研究所での素粒子実験MEGの後継装置）を目指して、低温での安定動作および紫外光に感度のあるPPDの開発を浜松ホトニクスと共同で開発している。低温ではクエンチング抵抗の値が常温と大きく異なるため最適化が必要であり、また従来のPPDでは紫外光に対しては光子がその表層で吸収されてしまい、電子・ホールは増幅層に到達できなかったため感度をもつことが困難であった。太谷氏らのグループでは、表層を薄くして、紫外光にも10%近い量子効率をもたせることに成功している。

実装設計のための数値解析も、これまでは静的な電場計算にとどまっていたが、近年ではドイツ・イタリア・日本などで内部の三次元構造、電場強度分布、増幅の素過程および外部回路を再現する時間を追った動的シミュレーションが進行中である^{12,13)}。日本のグループは三次元半導体シミュレーションシステムHyENEXSS（(株)半導体先端テクノロジーズ）を基に進めている。デバイスシミュレーションを製作工程のプロセスシミュレーターと組み合わせることにより、半導体チップや従来の半導体検出器のように独自設計やオンデマンドでの製造への道がひらける可能

性が期待される。

3. 課題と今後

3.1 ノイズによる限界

一般的に PPD は、PMT での熱電子ノイズと同様の熱起源のノイズの頻度が高い（典型的には 1 mm^2 当たり数十～数百 kHz）。PPD では熱電子によるノイズだけではなく、前述したようにホール起源のノイズも増幅されて疑似信号となることが大きく異なる点である^{14,15}。これらのノイズは光子による本来の信号と同じ波形をもつ。PMT や通常の APD の場合と特に大きく事情が異なるのは、ホール起源のノイズに加え、後述する 3 つのタイプのノイズが相乗効果をもたらす、電圧をわずかに数ボルト上げていくだけで爆発的にノイズの発生率が増加することにある。許容できるノイズ頻度の範囲で動作させる限り、このノイズの爆発的な増加が増幅率の増加と大面積化を頭打ちしている。これまでのところ、 1 cm 角を超える安定な製品はまだない。

その他の課題としては、(1) 温度依存性：上述のように増幅の素過程が温度依存性をもつため、閾値電圧が温度に依存する。このため、通常の APD 同様に温度あるいは出力の常時のモニターが必要となることがある。また高温・低温などではクエンチング抵抗の値の変化などで波形なども大きく変化するので、最適化が必要である。また、(2) ダイナミックレンジの問題と量子効率：ひとつの PPD センサーで測定できる同時入射の最大光子数（ダイナミックレンジ）は PPD の測定原理上そのピクセル数で頭打ちされる。ダイナミックレンジを上げるためにピクセルを単に細分化していくと静電容量が下がり増幅率が下がり、また有効受光面積が減るため量子効率も悪化する。一方で、ピクセル数を増やすためにセンサーの面積を大きくしていくと高いノイズ頻度が障害となる。そして、(3) 放射線耐性：強い放射線環境下では半導体に格子欠陥が生じノイズを増加させる。高エネルギー加速器研究機構や東京工業大学などのグループの研究では 1 時間あたり 1 krad (10 グレイ) という高い γ 線環境下で数時間から半日程度の照射実験を行い、ノイズ頻度の大きな増加やそこからの復帰の様子などが報告されている。

PPD におけるノイズはおもに以下の 3 つに分けられる。特に高電圧下でのノイズ発生率の増加にはアフターパルスがおもな要因となり、時間的に連なったノイズがいつまでも続くことになる。

- 基本ノイズ：もともとの熱電子など内部起源の通常ノイズ（ここでは「基本ノイズ」とよぶ）であり、PMT などと同じ単光子相当の波高をもつノイズが時

間的にランダムに発生する現象である。

- アフターパルス：元となる基本ノイズの増幅時に発生した電子あるいはホールが格子欠陥などにいったんトラップされ、そこから時間が経ってから再放出されて増幅領域に到達し信号として現れる¹⁶。この再放出現象は粒子の崩壊現象のときの半減期のように時定数で表すことができ（典型的には数十～数百ナノ秒）、いくつかの成分がある。
- クロストーク：信号あるいはノイズの増幅時に発生した紫外光などが他のピクセルに入射することで、同時にセンサー内の複数のピクセルがヒットする現象。基本ノイズと異なり、光子 2 つ分あるいは 3 つ分などの波高をもつ PPD 特有のノイズの生成である。

アフターパルスからもクロストークやアフターパルスは生じ、ノイズ源となる電子・ホールがさらに増加し、それが種子となってさらにアフターパルスが起こり、そこからまたアフターパルスやクロストークが起こる。増幅率を上げるためにバイアス電圧を上げると、このサイクルが繰り返されることで爆発的にノイズの頻度が増していく。この爆発的に増加するノイズ頻度の軽減方法のひとつは、源となる浮遊電子・ホールを減らすことである。例えば PPD 自体の不要部分を削り、薄くすることで、大きく改善できると期待されている。ノイズの種子となるキャリア、特にホールがノイズ源になってしまうのを抑制することが期待される。薄膜化することはさらにキャリアを吸収・再放出する体積を減らすことになるため、高い動作電圧でノイズの頻度を急激に増加させる原因であるアフターパルスを減少させる効果ももつ。アフターパルスを減少させるには、格子欠陥など電子・ホールの吸収・再放出を行う部分を減らすことも、解決の方向として挙げられる。これは放射線耐性にも効果をもたらすかもしれない。ただし、製造時の性能が向上しても、放射線による損傷などで格子欠陥は成長することにも留意すべきである。クロストークは近隣への紫外光などの伝搬によるため、この伝搬を遮ることでクロストークを軽減する試みが以前から提案されている。これは例えばピクセル間に遮蔽材（吸収材）を置く場合と、逆にピクセル間に溝を掘って紫外光などをできるだけ外に逃がす場合の 2 通りが考えられる。これも構造的には従来のものと比べ手間がかかるが、性能を向上させるためには重要な開発項目である。

増幅率を桁違いに増加させ、しかもノイズレートを現状と同じあるいはそれ以下に下げることができないか。この目的のために、われわれは増倍層をもたない単純なコンデンサー（C'）を各ピクセルに並列に配置（受光面積を確保

するために積層構造で追加コンデンサーを配置する)し、かつその静電容量の割合 ($C/(C+C')$) だけクエンチング抵抗の抵抗値 R を減少させることを提案している¹¹⁾。この場合、ノイズ源となる電子あるいはホールは増倍層へのドリフトが可能な APD 内に限定されており、ノイズレートの増加は限られる。しかも、出力信号は静電容量の増加分だけ向上し、波形は (新しい $R \cdot C$ が元の $R \cdot C$ と同じため) 同じである。つまりは C を増やし R をその分減らし、ただし APD としての増幅面積・体積は保持したままという構造を作ることによってノイズを従来と同じに保ち、出力波形も同じ、動作領域も同じ、ただし増幅率を大幅に向上させるということが可能ということになる。近年発展している三次元デバイスプロセッシングの技術を駆使していけば、近い将来、さらに性能のジャンプができるのではないかと期待している。

文 献

- 1) V. Golovin and V. Saveliev: "Novel type of avalanche photodetector with Geiger mode operation," NIM A, **518** (2004) 560-564.
- 2) K. Yamamoto, K. Yamamura, K. Sato, S. Kamakura, T. Ota, H. Suzuki and V. S. Ohsuka: "Newly developed semiconductor detectors," *Proceedings of Science*, PD07-004 (2007).
- 3) D. Renker: "Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **567** (2006) 48-56.
- 4) M. Yokoyama, T. Nakaya, S. Gomi, A. Minamino, N. Nagai, K. Nitta, D. Orme, M. Otani, T. Murakami, T. Nakadaira, M. Tanaka, Y. Kudenko, F. Retiere and A. Vacheret: "Application of Hamamatsu MPPCs to T2K neutrino detectors," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **610** (2009) 128-130.
- 5) S. Uozumi: "Fine granular calorimeter with scintillator strips and new photon sensor readout," IEEE Trans. Nucl. Sci., **55** (2008) 1367-1371.
- 6) T. Abe *et al.*: "Belle II technical design report," KEK Report, **1** (2010).
- 7) C. Piemonte: "A new silicon photomultiplier structure for blue light detection," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **568** (2006) 224-232.
- 8) H. G. Moser: "Development of backside illuminated silicon photomultipliers at the MPI semiconductor laboratory," *Proceedings of Science*, PD07-05 (2007).
- 9) J. Ninković, L. Andriček, G. Liemann, G. Lutz, H. G. Moser, R. Richter and F. Schopper: "SiMPI — Novel high QE photosensor," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **610** (2009) 142-144.
- 10) H. Otono, S. Yamashita, T. Yoshioka, H. Oide, T. Suehiro and H. Hano: "Study of MPPC at liquid nitrogen temperature," *Proceedings of Science*, PD07-007 (2007).
- 11) H. Otono, H. Oide, S. Yamashita and T. Yoshioka: "On the basic mechanism of pixelized photon detectors," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **610** (2009) 397-399.
- 12) S. Tisa, F. Guerrieri and F. Zappa: "Monolithic array of 32 SPAD pixels for single-photon imaging at high frame rates," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **610** (2009) 24-27.
- 13) S. Tudisco, L. Lanzaò, F. Musumeci, L. Neri, S. Privitera, A. Scordino, G. Condorelli, G. Fallica, M. Mazzillo, D. Sanfilippo and G. Valvo: "Bi-dimensional arrays of SPAD for time-resolved single photon imaging," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **610** (2009) 138-141.
- 14) H. Oide, T. Murase, H. Otono and S. Yamashita: "Studies on multiplication effect of noises of PPDs, and a proposal of a new structure to improve the performance," Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **613** (2010) 23-28.
- 15) H. Oide, H. Otono, S. Yamashita, T. Yoshioka, H. Hano and T. Suehiro: "Study of afterpulsing of MPPC with waveform analysis," *Proceedings of Science*, PD07-008 (2007).
- 16) S. Cova, A. Lacaita, G. Ripamonti: "Trapping phenomena in avalanche photodiodes on nanosecond scale," IEEE Trans. Electron Devices, **12** (1991) 685-687.

(2012年8月7日受理)