

単一光子検出の進化

リチャード・サイモンズ

1世紀間の科学的進歩によって、量子通信や、次々と出現するその他の用途を可能にするものなど、未来の最も興味深い技術のいくつかが実現されている。

単一光子検出は、1分子蛍光、散乱による粒子特性評価、量子暗号から天文学やライダに至るまでの数多くの応用分野において、非常に重要な手段になっている。1つの光子がフォトダイオードの中、または金属表面に衝突するときに、1つの電子を生成するというその概念は、原理的には単純に見える。しかし、その単一電子の検出は、どれだけ簡単なのだろうか。

単一光子計数(シングルフォトンカウンティング)の進歩は、19世紀終盤の光電効果の発見に端を発している。その後1960年代には、シリコンアバランシェフォトダイオード(APD)においてこれが実現された。現在は、ターンキーモジュールによるシンプルなプラグアンドラン形式の光子検出が、OEM装置においても研究施設においても利用されている。単一光子検出は現在、ファイバネットワークにおいて宇宙や地下に実装されて、量子通信を可能にしている他、新しい単一分子や微粒子の特性評価にも採用されてお

り、将来に向けた開発や用途が次々と出現している。

初期の科学的発見

19世紀終盤、ハイน์リヒ・ヘルツ(Heinrich Hertz)が1887年に発表した見解をきっかけに、光、特にUV照射が帯電体に与える影響を調べる実験が行われるようになった。そして科学者らは、表面から放射される粒子(電子)の数は光度に比例するが、電子の最大運動エネルギーは放射周波数に比例すること、また、最小周波数以下では電子は放射されないことを発見した(図1)。

この取り組みと、マックス・プランク(Max Planck)の黒体放射に関する研究から、ノーベル賞を受賞したアインシュタイン(Einstein)の論文が生まれた。この論文では、光エネルギーは離散的なパケット(光子)で運ばれること、各パケットの中のエネルギーは、光の周波数に定数をかけた値に等しいこと(光電効果の説明)、十分に高い周

波数の光子のみが特定の物質から電子を放出するだけのエネルギーを持つことが提唱されている。光子は金属表面から電子を放出できるため、単一光子は、負に帯電した電子を探すことによって検出することができる。概念は単純で、多数の光子が多数の電子を放出する場合には、実装も比較的容易だが、単一電子の検出は複雑である。

技術進歩

1902年、オースティン(Austin)とスターク(Starke)は、陰極線管(Cathode Ray Tube : CRT)の中の電子ビームで衝撃を与えた金属表面は、表面への入射電子よりも多くの電子を放出することを発見し、これによって、二次放出が信号増幅に応用されるようになった。1934年、米RCA社は、光電陰極(光電効果によって電子を生成する)と二次放出段を同じ真空管の中に組み合わせ合わせた、初めての光電子増倍管(photomultiplier tube : PMT)を製造した(図2)。

このPMTの利得(増倍率)は約8で、単一光子に8つの電子を放出させることによって、その存在を証明することができた。光電陰極のさらなる改良と複数の増幅段によって、現在では線形モードで106の利得が標準的に得られる。

しかし、単一光子を検出するために、増倍段の電圧を増加させて利得を非常に高くすると、光電陰極からの単一の光電子によって非常に大きな電流が出力回路に生成される場合がある。この過程は自己持続する傾向にあるため、電流を検出してPMTをリセットするための制御電子回路が必要となり、増

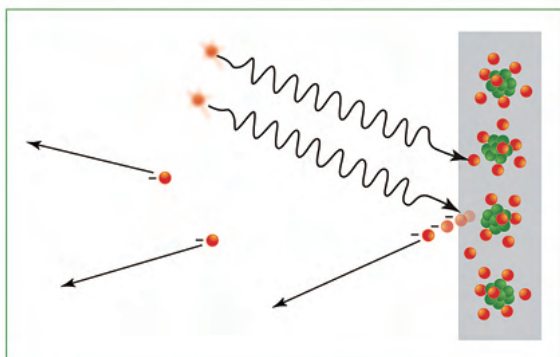


図1 固体における光電効果。

倍できる電子が存在しないために光子が検出されないデッドタイムが生じる。ガイガー計数管 (Geiger counter) に似た原理のこの動作方法は、ガイガーモードとして知られる。

光電陰極の効率は100%には程遠いため、すべての光子が電子を生成することにはならない。光電陰極の材料によって、反応する波長範囲は異なり、電子を放出する最小光子エネルギーも異なる。電子は、他の手段によっても放出される可能性があり(熱エネルギーによって電極から電子が放出する熱電子放出など)、「暗電子」が増加する。ガイガーモードで動作する場合、これは光子が存在しないのにカウントされる「ダークカウント」につながる。

PMTは、単一光子に至るまでの低レベルの光を検出できるため、天文学、核子物理学、生体計測など、多くの応用分野において重要な手段となっている。しかし、PMTは過度の刺激に非常に敏感で、周辺光にさらすと簡単に破損する。陽極と陰極には一般的に1~2000Vの電位差がある。低電圧回路によって光電流が簡単に測定できるように、陽極は低電圧に設定されるため、陰極は大きな負電圧となる。PMTは、磁界の影響も受けやすく、それによって電子の進む方向が曲がって目標からずれてしまい、利得が低下する可能性がある。従って、磁気シールドが陰極に必要な場合が多く、電気絶縁の追加が必要になる。

米ベル研究所 (Bell Laboratories) が1939年にpn接合を発明したことで、単一光子検出のための新たな手段となるフォトダイオードが登場した。pn接合は、1つの半導体結晶の中の異なるドーピング領域の境界である。p型領域(接合部の陽極側)には、結晶格子に存在するはずの電子が存在しない。電子が

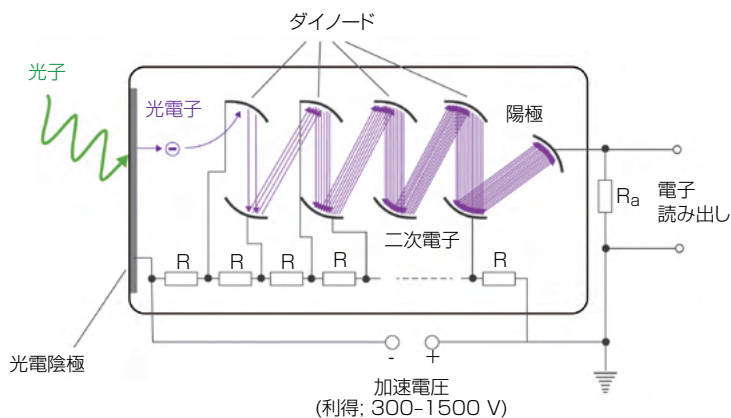


図2 一般的な光電子増倍器の構造図。

欠落している部分を「正孔」という。n型領域(陰極側)には、中性原子となるはずの結晶格子の外殻に過剰な電子が存在する。これによってダイオードが構成され、通常動作時には一方向にしか電流は流れない。最も簡単な形のフォトダイオードでは、pn接合を構成する物質によって、適切な放射周波数または波長で電子が放出され、接合部に光電流が生成される。逆バイアスをかけて陰極電圧を陽極よりも高くすると、この光電流を直ちに抽出して、フォトダイオードの光レベルに比例する電流を生成することができる。

p型領域とn型領域の間に非ドーピング領域(「真性」半導体)を追加すると、ドーピングレベルが高くなり、電荷キャリアを増やして動作速度を上げることができる。西澤潤一らが1950年に

発明したPIN接合も、フォトダイオードに理想的である。PINフォトダイオードは、光ファイバ通信から医療機器やレーザー警告システムに至るまでの多岐にわたる汎用的な用途で利用されている。しかしそれらはまだ、1つの光子から生成される電子は1つに限られている。

アバランシェフォトダイオード

PINフォトダイオードの中に内部電流利得領域を追加したものが、APDである(図3)。西澤博士らによって1952年に発明されたAPDは、慎重に設計されたドーピング構造によって高電圧に対応し、接合領域内に高電界を生成する。

この高電界によって加速された光電子が、衝突電離によって他の電子を放

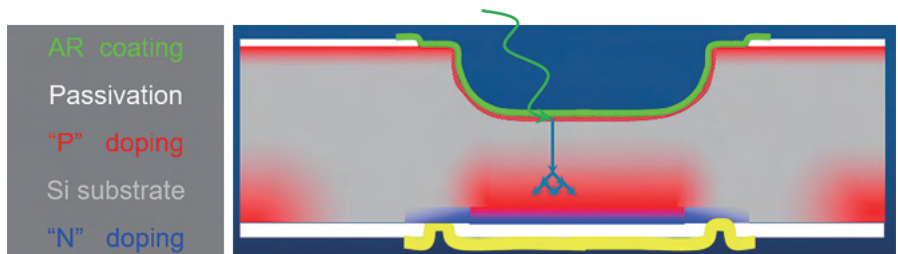


図3 一般的なアバランシェフォトダイオード(APD)の構造。

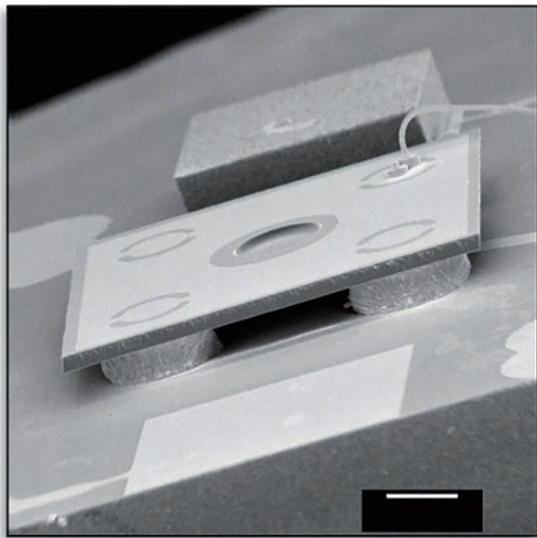


図4 単一光子検出用に最適化されたSLiK APD。

出し、標準で100の内部電流利得を生成する。つまり、1つの光子で100個の光電子が生成可能だが、これでもまだ、簡単な単一光子検出器を実現するには十分ではない。

1960年代に入り、RCA Canada社在籍のロバート・マッキンタイア氏(Robert McIntyre) (PMTを開発した企業のグループ会社で、米エクセリタス社は現在、同社の単一光子計数モジュール[Single Photon Counting Module: SPCM]を製造している)は、シリコン内のマイクロプラズマの不安定性の研究を行った。これを基に同氏は、APDのガイガーモードの動作を研究するようになった。高い逆バイアスを印加すると、APDの暗電流によって自発的に、自己持続するアバランシェが生成されるというものである。ガイガーモードのAPDでは、単一の光子によって、検出可能なレベルの電流が生成できる。しかし、単一の光子によってアバランシェが生成されて電流が生成された後、APDを制御する手段がなければ、APDは無用になってしまう。単一光子が検出された後、それ以外には全く何も起こらない。これ

ではとても実用には耐えない。

さらなる進歩

RCA社の取り組みは、実用的な単一光子検出器の探求において、2つの主要な進歩につながった。まず、シリコン結晶成長の改良によって1986年に誕生したのが、超低電離係数(super-low ionization coefficient[k-factor]: SLiK)のAPDである(図4)。SLiK APDは、光電子刺激がなく、暗電子刺激は無視できるため、直ちにアバランシェを引き起こすことなく、ブレイクダウン電圧以上にバイアス可能である。

APDの冷却により、電子の熱放出を著しく減少させて、入射光子を検出するための時間を長くすることができる。

インライン抵抗をバイアス回路に追加することにより、アバランシェを止めるための受動急冷回路が構成される(図5)。電流が流れ始めると、抵抗のバイアス電圧が低下してAPDの電圧が低下し、最終的には、光電流の統計的変動によって電圧はゼロまで低下し、自己起動できなくなる。これによって抵抗の電圧はゼロに戻り、すべての電圧がAPDに印加されて、次の光

子が検出できる状態になる。

RCA社が1987年に発表した「SPCM-100」は、温度制御、安定化された高電圧電源、ガイガーモードのAPD受動急冷回路を内蔵する、自己完結型のユーザーフレンドリーなデバイスだった。オンボードの論理回路によって、アバランシェ電流パルスを検出して、35nsのシンプルなTTLパルスを生成し、受動急冷回路によって、APDはわずか60ns後に次の光子検出の準備を整える。ダークカウント、タイミングジッタ、アフターパルスが低く、50%を超える光子検出効率(Photon Detection Efficiency: PDE)を備えるこの第1世代のモジュールは、単一光子研究を、PMTでは難しかった電磁スペクトルの赤色及び近赤外領域へと押し進めた。APDはバイアス電圧がかなり低く、磁界に対する耐性を備えるために、複雑なシールドが不要で、誤って周辺光にさらされた場合も影響を受けにくい。この進歩によって、単一光子検出は容易に達成可能となり、新しい発見や用途を実現するための有効な手段となった。

1990年にRCA Canada社はEG&G社となり、SPCMの開発は続けられた。受動急冷は、特許化された能動急冷回路に置き換えられ、抵抗にかかる電圧ではなく、アバランシェ電流を検出するロジックを利用することによって、APDのバイアスが能動的に制御されるようになった。パルス幅とデッドタイムの短縮、バイアス電圧制御の改善、シリコン純度の向上により、PDEは65%以上となり、ダークカウントレートは毎秒25カウントまで低下した。

EG&G社は1999年に、米パーキンエルマー社(PerkinElmer)の分析機器部門(Analytical Instrumentation Division)を買収し、SPCMのパルス幅

を20ns、デッドタイムを35nsに改良し、RoHS指令に準拠した。2010年には、パーキンエルマー社のオプトエレクトロニクス部門のスピンオフによって、米エクセリタス・テクノロジーズ社(Excelitas Technologies)が設立された。2011年には、制御電子回路の改良によって、PDEは70%まで引き上げられ、ダークカウントとアフターパルスについても業界をリードする水準が維持された。パルス幅とデッドタイムはさらに短縮されて、それぞれ10nsと24nsが達成されており、毎秒3700万回の単一光子イベントが確実に検出できるようになっている。

応用分野の拡大

単一光子検出の市場と応用分野は拡大し続けている。さまざまな用途に合わせて主要性能パラメータを最適化した、単一光子検出のためのさまざまなAPD技術が存在する。量産に向けてコストが重要となる、波長905nmの車載ライダーに対しては、CMOS構造の上にマイクロAPDを配置した、単一光子シリコンアバランシェ検出器が使用されている。新しいガイガーモードのヒ化インジウムガリウム(InGaAs)APDは、1.5 μm で単一光子を検出可能で、高出力のレーザによって、自動車の周囲の物体によって反射する光子の検出範囲を、大幅に拡大することができる。

量子鍵配送(Quantum Key Distribution: QKD)システムが、通信波長の光ファイバリンクに実装されることにより、単一光子検出用のInGaAs APDは、インフラや金融取引のセキュリティにおいても重要な役割を担うようになる。QKDは、通信を行う二者が、鍵を共有するために物理的に接触することなく、リモートからリアルタイムに安全な暗号鍵を設定すること

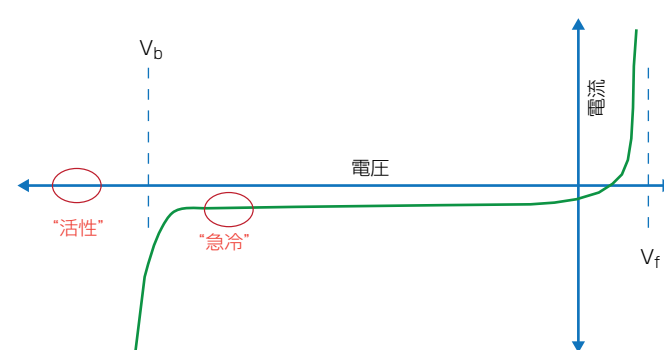


図5 APDの電流電圧曲線。「活性」状態と「急冷」状態が示されている。

を可能にする。QKDは既に、地上の自由空間リンク、衛星と地上をつなぐリンク、衛星間リンクで、シリコンAPDとInGaAs APDの両方を使用して実証されている。

帯域幅の増加に伴い、光子検出だけでなく、光子がAPD表面に到達してからシステム出力パルスが記録されるまでの時間遅延におけるジッタも、重要な性能パラメータになる。QKDは、さまざまな検出器に到着する光子シーケンスの比較を行うが、内部遅延時間のばらつきがあまりに大きいと、どの光子が比較されているのかわからなくなる。表面積が小さく構造が薄いAPDは、時間遅延のばらつきが非常に小さなアバランシェを生成できるため、大きなAPDと比べると検出性能は劣るが、タイミング精度が重要な応用分野ではそれが許容される。

単一の原子や電子の量子性を活用する多くの応用分野で、単一光子が検出できることも求められる。結晶欠陥にトラップされた単一電子は、一度に1つの光子しか放出しないため、この電子の相互作用を理解するには、単一光子検出器が必要である。もつれ光子対の作成にはまず単一光子が必要で、ここでも単一光子検出器が、単一光子源の特性評価と監視のための重要な手段となる。

ウエハ上のフィーチャサイズの微細化が進むにつれて、半導体ウエハ製造

施設の空気と水の清浄度が、施設の運用にとってより重要なものになる。検出効率が高くダークカウントが低い単一光子計数器は、超清浄作業空間における監視システムの重要な要素である場合が多い。検出効率が高いと、検出器応答を汚染レベルに変換する際の推定が最小限となり、汚染レベルの小さな増加を見落とす確率は減少する。また、ダークカウントが低く安定していると、誤検出や、不要でコストのかかる施設の稼働停止につながる恐れのある誤カウントが減少する。

最近では、微粒子や単一分子の検出が、単一光子検出の重要な応用分野になっている。この手法は、環境モニタリングや診断測定に対して最大限の感度を提供する。

SPCMは、天文学、フローサイトメトリー、蛍光寿命観測、粒子サイズ測定、風計測ライダーなどの分野に加えて、新しい分野や開発途上の分野を今後も支え続けていく。新しい分野としては、量子コンピューティング、QKD、1分子解析などが挙げられるが、これらに限定されるものではない。

著者紹介

リチャード・サイモンズ(Richard Simons)は、米エクセリタス・テクノロジーズ社(Excelitas Technologies)のローレベル光検出担当製品マネージャー。

e-mail: richard.simons@excelitas.com

URL: excelitas.com

LFWJ