

高いフレーム速度で動作する 单一光子計数カメラ

フランコ・ザッパ、シモーヌ・ティサ、ファブリチオ・グエルリエーリ、ニック・ベルトーネ

32×32画素構成の单一光子計数カメラは、それぞれの画素の内部にすべての電子回路を内蔵したアバランシェダイオードから構成されている。このカメラは毎秒10万フレームの速度で動作する。

单一光子アバランシェダイオード(SPAD)は、レーザレーダ、蛍光相関分光法、蛍光寿命イメージング、粒度測定などの用途に使われる。最近までのSPADは点検出器または画素数に制約のあるアレイ検出器に限られていた。単点検出器の1例にはイタリアのマイクロフォトンデバイス社(Micro Photon Devices)が製造する光子計数検出器がある(www.laserfocusworld.com/articles/226763を参照)。この光子計数検出器は特注のシリコンプロセスを使用して、毎秒10以下の暗計数と30ピコ秒(ps)のタイミング分解能を実現している。また、SPADの製造プロセスを最適化して最高の光学的スループットを実現し、SPADの消滅回路とタイミング回路をデバイス本体から分離して、このような性能レベルを可能にしている。

最高の検出効率、最低の暗計数(LFWJ 2008年10月号p.52またはwww.laserfocusworld.com/articles/335986を参照)および最速の分解能が必要になる用途では、このような点検出器が優れている。光学的に最適化されたSPADを構成し、電子回路を分離するアプローチは多点アレイ検出器にも拡張できるが、拡張可能な画素数には限界がある。電子回路を分離してそれぞれの画素を個別にアドレス可能にする方法は8素子モジュールに応用され、60素子にも適用された⁽¹⁾、⁽²⁾。しかしながら、電子

回路を画素から分離するには、複雑な半導体プロセスを使用した接続が必要になるため、このアプローチを数百個の画素に対して拡張することは難しく、実際には不可能だ。

32×32画素の光子計数カメラ

イタリアのミラノ工科大学SPADラボ(SPADlab, Politecnico di Milano)の研究グループは、すべての電子回路と計数器をそれぞれの画素に内蔵した32×32画素の单一光子計数アレイを開発した(図1)。それぞれの画素のサイズは100×100μmであり、画素のピッチ(画素間の距離)は100μmになる。SPADとすべての電子回路は複雑な電子回路とSPADを同時に加工できる標準の高圧CMOSプロセスを使用して作製された。

使用時のアレイは、画素が光子を検出すると、アバランシェ電流が発生し、画

素の可変負荷消滅回路(VLQC)がアバランシェ電流の検出、消滅およびSPADのリセットを行って、次の光子の検出を可能にする。一つのアバランシェ効果が終わると、クエンチング回路からの出力パルスが計数器へ送られる。計数器はデジタル回路から構成され、ユーザが選択したフレーム時間スロットのなかで検出された光子の計数と暗計数を行う。それぞれのフレームの最後に行われる動作では、ストップパルスがアレイの大域電子回路から送られる。この電子回路は、まず計数器が記録した事象数をストレージレジスタにいったん蓄積し、次にスタートパルスを発生して計数器をリセットする。その結果、新しいフレームのスタートが可能になる。

アレイのアーキテクチャ

32×32光子計数カメラのアーキテクチャは完全な並列動作機能を持つ(図2)。それぞれのフレームはストップ信号とその後のスタート信号がすべての画素に同時に流れで開始される。画素

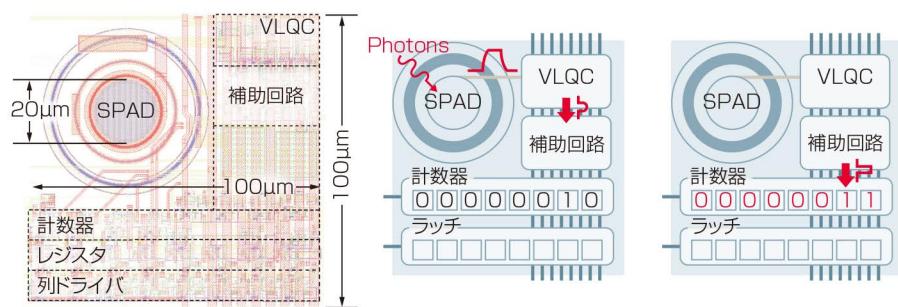


図1 32×32光子計数カメラの配置にはSPAD検出器、前面クエンチング回路および計数器が含まれている。光子がSPADを起動すると、VLQCがアバランシェ電流を検出し、回路を消滅し、SPADをリセットする(右)。計数データは補助回路から計数器へ送られる。(資料提供:ミラノ工科大学)

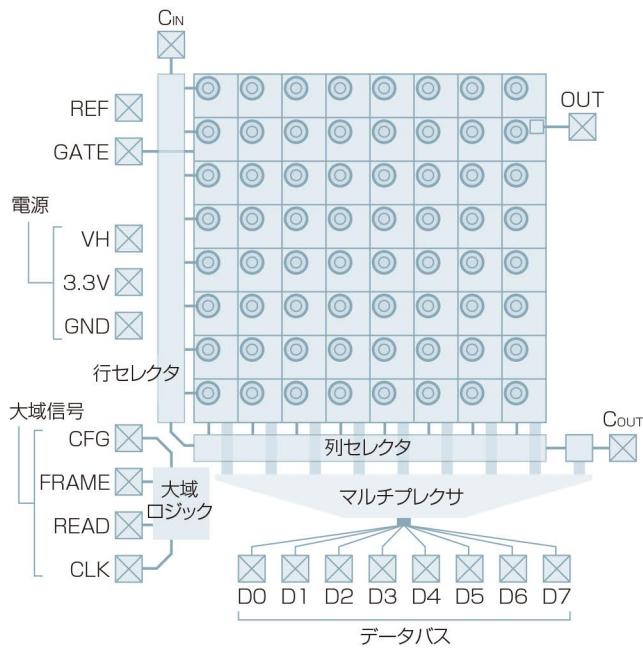


図2 イメージャの標準的なアーキテクチャを最も重要な入力/出力パッドとともに示している。この図は 8×8 アレイを例にして簡素化している。(資料提供:ミラノ工科大学)

はそれぞれのフレーム時間内に入射する光子の検出と計数を行い、同時に、ストレージレジスタにはその前のフレームのときに累積されたデータが保持されている。その結果、データは読み取られ、その時点のフレームのデータはアレイにより捕捉される。実現可能な最大のフレーム速度はアレイからのすべてのデータの読み取りに必要な時間による制約を受ける。100MHzのシステム同期信号を使うと、それぞれの画素のデータを10ナノ秒で読み取ることができる。したがって、32×32画素アレイの最大フレーム継続時間は、約10万フレーム/秒の連続フレーム速度に相当する10.25マイクロ秒になる。また、オンチップ大域電子回路からは撮像の柔軟性が得られ、ユーザはアレイから所望のすべてのサブ領域を選択できるため、全体のフレーム速度の増加が可能になる。例えば、10×10画素の領域を選択すると、フレーム速度の最大値は102万4000フレーム/秒になる。

この32×32イメージャの大きな利点は、非常に高いフレーム速度で非常に

低い光強度を測定でき、最低の光強度の場合はフレームごとに単一光子を測定できることにある。冷却方式のEM-CCDはフレームごとに単一光子を測定できる代替技術になるが、このデバイスは非常に低いフレーム速度しか得られない。しかし、SPAD技術にもいくつかの制約があるため、それぞれの用途に最適の技術を選択するには、その限界を理解しなければならない。

第1の問題は、それぞれのSPADは直径が $20\mu\text{m}$ であり、 $100 \times 100\mu\text{m}$ の画素に埋め込まれていることだ。その結果、充填率は3%という小さな割合になり、撮像のような用途に使うには充填率の増加が必要になる。ミラノ工科大学SPADラボの研究グループは、アレイでも90%の充填率を実現可能にするマイクロレンズアレイの組合せを検討している。

第2の問題は、SPADとEM-CCDの二つの検出器は動作原理が異なるため、低いフレーム速度のSPADアレイはEM-CCDほどの感度が得られないことにあら。EM-CCDの場合は画素中で発生し

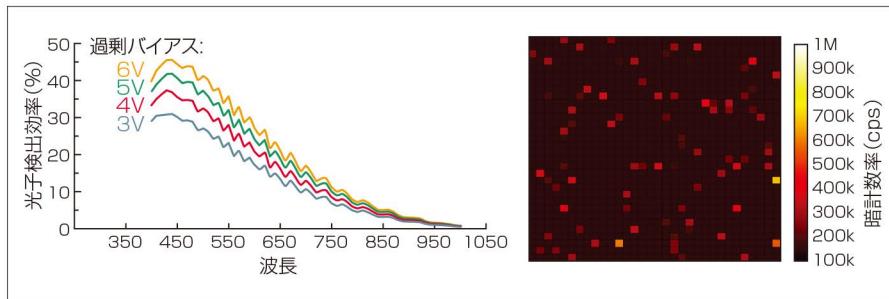


図3 32×32イメージヤの異なるバイアス電圧での光子検出効率(左)と標準的なデバイスの4V過剰バイアス電圧と室温での暗計数率を示している。(資料提供:ミラノ工科大学)

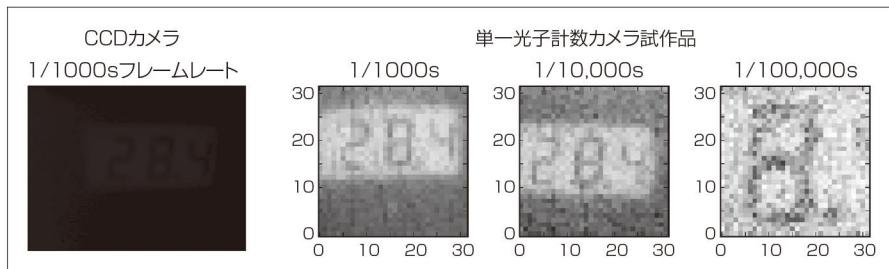


図4 1000フレーム/秒の速度で動作するCCDカメラの画像(左)と、同じ画像を1000フレーム/秒、1万フレーム/秒および10万フレーム/秒の速度で撮影した単一光子計数試作カメラの画像を比較して示している(右)。(資料提供:ミラノ工科大学)

たすべての電子が捕集され、出力段では限定された増倍が行われる(線形増幅)。したがって、光子の検出効率は量子効率と一致する。つまり、光子を検出し、電子・正孔対を発生する確率に依存する。このパラメータはEM-CCDでは非常に高く、90%のオーダーになる。さらに、画素は低温に冷却され、印加される電場は低いため、キャリアの熱発生率が非常に低い。つまり、長い露光時間(低いフレーム速度)の場合でも、検出器雑音は非常に低くなる。その結果、EM-CCDの内部増幅によって、後段における電子雑音の影響は大幅に低減する。

光子計数モードで動作するSPADアレイの場合、光子検出効率は発生した単一電子による巨視的アバランシェ効果を起動する確率と量子効率との積になる。この確率は1よりも低く、破壊電圧を超えた過剰バイアス電圧が大きくなると増加する。したがって、SPADアレイは非常に高い量子効率をもつが、

検出効率は量子効率と同じように高くなるわけではない。しかし、光子がいったんSPADにより検出されると、後段の電子雑音は役割をまったく果たさなくなり、著しく高速のフレーム速度を読み取り雑音の影響なしに実現することが可能になる。

もう一つの問題は、室温動作では少數の画素の暗計数率が10万個/秒よりも大きくなることだ。32×32光子計数カメラの場合、92%の画素は10万個/秒以下の暗計数率を持つ。つまり92%の画素はフレーム当たり最低1光子ま

での低い光強度を10万フレーム/秒またはそれ以上のフレーム速度で測定できる。しかし、この性能はEM-CCDの動作と同様に、SPADアレイを冷却すれば改善できることを強調したい。冷却すると100%の画素が上述の感度レベルで動作し、フレーム当たり1光子の感度を低いフレーム速度で得ることもできる。

CCDカメラと比較した高いフレーム速度の光子計数カメラの実験では優れた撮像特性が得られた(図4)。この簡単な実験で使用した光子計数カメラは、反射防止膜がなく、マイクロレンズを使用しない、つまり充填率がわずか3%のSPADアレイから構成されていたことを注記したい。

次の段階

マイクロフォトンデバイス社は単一光子計数カメラの商品化を検討している。同社CEOのロベルト・ビアシ(Roberto Biasi)は単一光子計数カメラの最初の試作品を今年1月のPhotonics West 2009で展示した。彼はこの展示会で、この技術への関心は撮像を越えて、高スループットスクリーニングにまで及んでいることを把握した。マイクロフォトンデバイス社は、このようなカメラを少數生産し、彼が商談したいいくつかのグループに供給して、この技術がスクリーニングの用途にも適しているかどうかを判断しようとしている。

参考文献

- (1) I. Rich et al., Advanced Photon Counting Techniques II, Proc. of SPIE 6771, 677113, (2007) 0277-786X/07/doi: 10.1117/12.749483.
- (2) F. Zappa et al., IEEE Phot. Tech. Lett. 17(3) p.657 (March 2005).

著者紹介

フランコ・ザッパ(Franco Zappa)はミラノ工科大学電子工学科の准教授、シモーネ・ティサ(Simone Tisa)はマイクロフォトンデバイス社のシニアデザイナー、ファブリチオ・グエルリエリ(Fabrizio Guerrieri)はミラノ工科大学の大学院生、ニック・ベルトーネ(Nick Bertone)はカナダのオプトエレクトロニクスコンポーネンツ社(Optolectronics Components)の社長。
e-mail: nick.bertone@optoelectronics.com