

# Quanta イメージセンサ (QIS) : すべての光子をカウントする

エリック・R・フォッサム、ケイトリン・アナグノスト

アバランシェ増倍なしで、室温で単一光子検出感度を示す QIS 技術は、回折限界未満のピクセルサイズと、画像再構成における多数の自由度をもたらし、分解能、感度、モーションブラー除去性能を高める。

Quanta イメージセンサ (QIS) と現在呼ばれるものにつながる、イメージセンシングとキャプチャーの新しいパラダイムが提唱されたのは2005年のことである<sup>(1)</sup>。QISでは、光電子が1個ずつカウントされ、空間と時間の光子数データを組み合わせから、イメージが計算される。

主流のCMOSイメージセンサ (CIS) の3D積層の裏面照射型 (BSI: Back Side Illumination) 製造プロセスを少し改変した、アバランシェ増倍を利用しないプロセスで実装された、室温の光子計数イメージセンサであるQISは、ジョット (jot) と呼ばれる、フルウェルキャパシティが低い、回折限界未満の特殊なピクセルで構成される。フルウェルキャパシティはわずか数エレクトロン

で、0.3e<sup>-</sup> RMS (Root-Mean Squared、二乗平均平方根) 未満という、ディープサブエレクトロンの読み出しノイズ (DSERN: Deep Sub Electron Read Noise) が、アバランシェ増倍を利用することなく達成されている。DSERNは、光電子の有無を表す、QISのバイナリ出力を可能にする。

QISには、数億、あるいは数十億ものジョットが含まれている場合があり、読み出し速度はおそらく1000フレーム毎秒 (fps: frames per second) を超え、1テラビット/秒もの生データレートを達成する。QISの積層アーキテクチャにおいて、高度なノイズ除去アルゴリズムを使用することにより、アプリケーション固有のデータ削減を行うことができ、平均でピクセル

あたり1光子未満という極めて低い光量下で、良好なグレースケールイメージを取得することができる。

QISのような光子計数イメージセンサは、CMOSイメージセンサや、その前身である電荷結合素子 (CCD: Charge Coupled Device) とは異なる方法でイメージを作成する。これらのデバイスでは、信号の光電荷がセンサ内でアナログ結合され、読み出しにおいて8~14ビットの分解能でデジタル変換される。フルウェルキャパシティは、ダイナミックレンジの上限を定め、読み出しノイズ (一般的に1~3e<sup>-</sup> RMSの範囲) は、下限を定める。モノクロセンサの場合、出力イメージピクセルは、1つのセンサピクセルに集められた電荷のデジタル変換値である。

一方、QISなどの光子計数イメージセンサでは、信号がオンチップまたはオフチップでデジタル結合され、ジョット値の時空間キュービクルからイメ

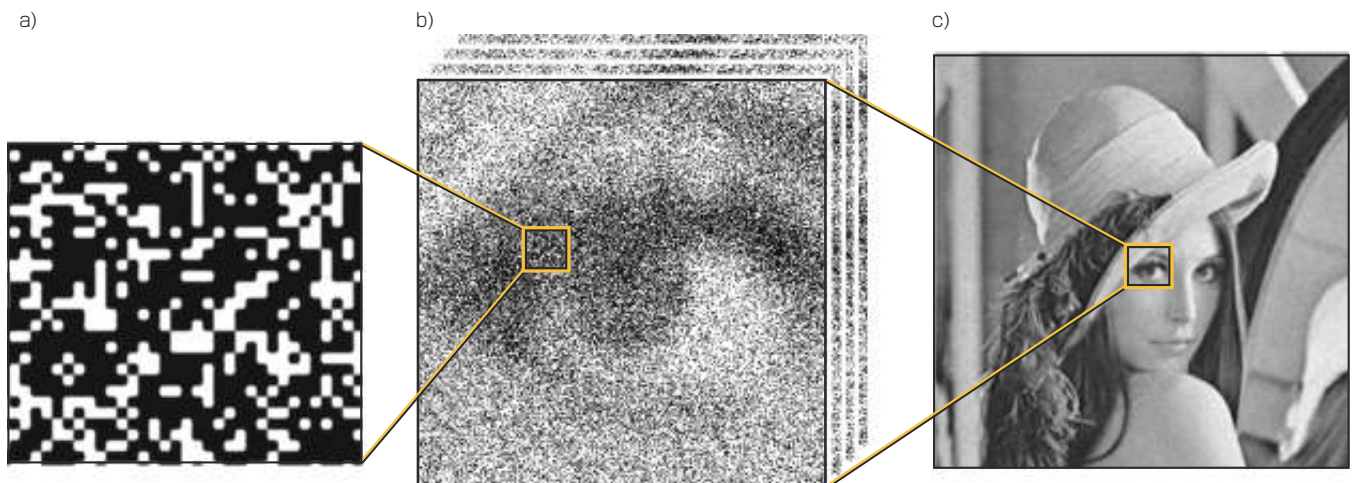


図1 シングルビットQISによるイメージのキャプチャーと計算を示す図。

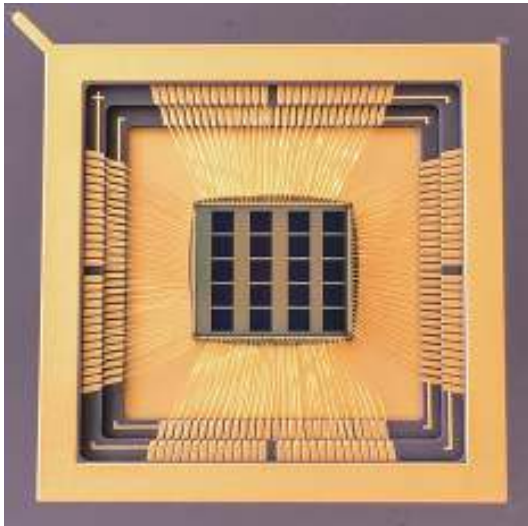


図2 ダートマス大のQISテストチップは、100万ジョットのQISアレイ20個で構成される。変更した45/65nmの3D積層BSI CISプロセスによって、TSMC社で作製された。

ージピクセルが計算によって形成される(図1)。一度に1つの光子をイメージ化するが(複数ビットのQISによって一度に複数の光子をイメージする場合もある)、QISの露光過多に対する本質的な許容度と、複数の高速露光手法を利用して、高いダイナミックレンジ(120dB以上)を達成することができる<sup>(2)</sup>。ただし、光子計数イメージセンサが高い性能を発揮できないケースが、1つ存在する。それは、多数の光子が同時にピクセルに到達する、フラッシュ撮影時である。

### 単一光電子の検出

単一光電子の検出は難しい。電荷が $1.6 \times 10^{-19}C$ と非常に小さく、電圧が一般的に、読み出し回路のノイズレベルよりも低くなるためである。科学用CMOS(sCMOS: scientific CMOS)を含むCMOSイメージセンサの入力換算読み出しノイズは、一般的に1~5e-RMSの範囲だが、光子計数には一般的に、DSERNレベルが求められる。そこで、ノイズを追加することなく利得を加えることが必要である。

米ダートマス大(Dartmouth College)が考案したQISは、ベースとし

てCISプロセスを使用し、ポンプゲートジョット(pump-gate jot)という新しいピクセルデバイス構造を作成するために小さな変更を加えた<sup>(3)</sup>。この構造は、検出容量が非常に低く、電子あたり数百 $\mu V$ という、他の読み出しノイズ源を十分に克服する変換利得を生成する。この変更以外の面では、BSIや3D積層など、高度に進化したCISプロセスの性質が維持されている。

シングルフォトンアバランシェダイオード(SPAD: Single Photon Avalanche Diode)や電子増倍CCD(EMCCD: Electron Multiplying CCD)検出器など、他のすべての光子計数デバ

イスは、アバランシェ増倍を利用して、光子検出のための十分な電荷増幅を達成するが、アバランシェ増倍の多数の欠点に対処する必要がある。

アバランシェプロセスは、電荷増幅のばらつきを引き起こす。デバイスの動作に必要な高い電界により、デバイスはシリコン欠陥に非常に敏感になり、ダークカウントレートが高くなり、性能と製造歩留まりが抑制される。デバイスは一般的にバイアス電圧やクロック電圧に非常に敏感で、高い電界は、クロストークや絶縁の必要性から、ピクセルサイズの縮小も難しくする。そのため、アバランシェ増倍を利用するデバイスは、QISよりもピクセル数が多く、分解能が低くなる傾向にある。一般的には、SPADアレイで数十万ピクセル、EMCCDで1メガピクセルとなる。

SPADはその動作の仕組みに基づき、光子数分解能にはあまり適さない。1個の光子がデバイスをガイガー(Geiger)モードへと促進し、次の計数の前にリセットが必要になることから、検出のデッドタイムが生じるためである。EMCCDも、さらなるノイズ源が存在するため、光子数分解能は難しい。その一方で、SPADは、光子到着時間の精度については、他を寄せ付けない

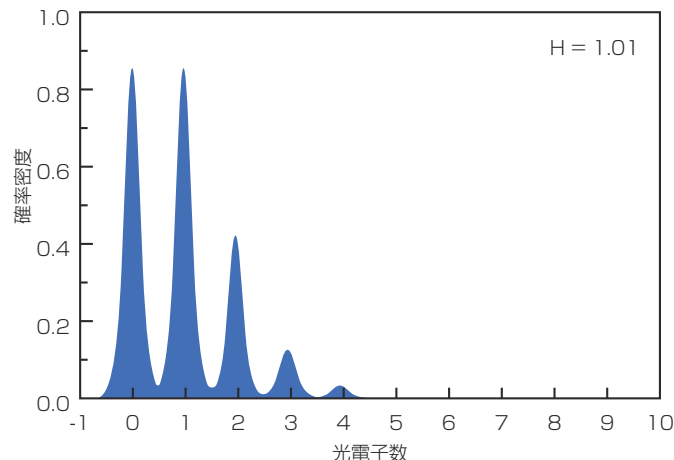


図3 2万回の読み出しによって単一のQISジョットから得られた、室温の光子計数ヒストグラムには、光電子の明らかな量子化が示されている。平均露光は1光電子で、読み出しノイズは0.175e-RMSである。

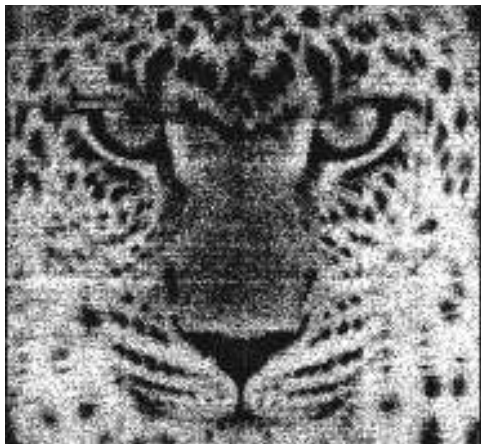


図4 1040fpsで動作する100万ジョットのデジタルシングルビットQISアレイからの最初のイメージには、フレームグラバ同期によるアーティファクトが現れている。



図5 ピクセルあたり平均0.87光電子でキャプチャーされた、3ビット(3b)のQIS計数イメージ。(提供: ギガジョット・テクノロジー社のJ・マ氏とS・マスーディアン氏)

適合性を示す。ピクセル内タイミング回路を追加したSPADは、TOF(Time Of Flight)イメージングに広く適用されている。

### 数百万ピクセルの光子計数テストデバイス

ダートマス大は、台湾TSMC社(Taiwan Semiconductor Manufacturing Corporation)と共同で、45/65nmの3D積層BSI CISプロセスでテストチップを実装した<sup>(4)</sup>。デバイス設計、レイアウト、検証、特性評価を、ダートマス大で実施した。

このテストチップは、100万ジョットのQISアレイ20個で構成されている。各アレイのピクセルピッチは1.1 μmで、読み出しを共有する。アレイの半

分はアナログ出力、残り半分は1ビットのデジタル出力で、複数の異なるジョット設計の特性評価を行った。アレイサイズのスケールリングが可能な、3D積層でクラスタ並列の読み出しアーキテクチャを実装した。読み出しノイズ、変換利得、ダーク電流などの一般的なイメージセンサパラメータを、アナログ出力で、比較的低速な出力速度で動作する高分解能A/Dコンバータ(ADC)を使って、テストした。バイナリ出力アレイは、1000fpsまたは1Gpix/sでテストした(図2)。

アナログ出力を測定するために、アレイを低光源で均等に照射し、シングルジョットデバイスからの出力信号を繰り返し測定した。光の量子性に基づき、異なる数の光子が各間隔で測定さ

れる可能性がある。この変動は、光子ショットノイズとしても知られる。出力信号電圧のヒストグラムを測定し、X軸を光電子数として、信号を変換利得によって正規化した(図3)。

2万回の読み出しから作成された光子計数ヒストグラムには、異なる電子数に対応する信号の明らかな量子化が示されている。相対ピーク高さは、ポワソン分布に従い、平均光電子数(quanta exposure)は、パターンによって特徴づけることができ、1.01e-となる。ピーク間隔は1秒で、実は、変換利得をより正確に決定することができる。

バレーとピークの比(V/P比)は、読み出しノイズを求めるためのかなり正確な手段であり、0.15 ~ 0.5e- RMSの範囲で、一般的に1/100e- RMS以内の精度で求めることができる。読み出しノイズが0.5e- RMSよりも大きい場合は、量子化は観測されない。例えば、変換利得が約21DN/e-のQISの読み出しノイズは、約0.17e- RMSで、アレイ内のジョットの平均値である0.21e- RMSよりもやや低くなる。このデバイスの遅延とダーク電流に問題はなく、室温において、遅延は測定できないレベルで、平均ダークカウントレートは0.16e-/sである。量子効率(QE: Quantum Efficiency)は、3D積層BSIプロセスの標準的な値で、QEのピークは、500nm付近で80%半ばである。

デジタル出力アレイ性能も、クラスタ並列アーキテクチャにおいてオンチップに搭載されている、シングルビットのデジタル量子化器によって測定した。ダートマス大の100万ジョットQISによる最初のイメージには、フレームグラバのアーティファクトがいくらか存在している(図4)。1000fps出力の場合で、100万ジョットのシングルビットQISアレイの総消費電力は、



表1 光子計数イメージセンサの比較

	CIS QIS <sup>4</sup>	SPAO QIS <sup>5</sup>	EMCCD <sup>6</sup>
ピクセルピッチ	1.1 μm	8.0 μm	5.5 μm
開口率	100%	27%	50%
アレイサイズ	1024 X 1024	320 X 240	1920 X 1080
平均読み出しノイズ	0.21e- RMS	0.12e- RMS	0.45e- RMS
ピクセルダークカウントレート	0.16Hz	47Hz	4Hz
総消費電力	26mW	報告なし	報告なし
出力レート	1.1Gpix/s	1.2Gpix/s	0.06Gpix/s

わずか26mWだった。1000fpsで動作するギガジョットアレイの総消費電力を2.6Wにするには、消費電力をさらに10分の1に低減する必要がある。しかし、技術ノードの微細化と回路設計の改良により、その目標はまもなく達成可能になる見込みである(図5)。

## QISとSPAD

QISは、さまざまな種類の光子計数ピクセルで実現することができる。ダートマス大のデバイスは、CISのプロセスをベースとしつつアバランシェ増倍を利用しないことにより、ピクセルサイズの縮小、消費電力の低減、ダークカウントレートの低下を達成しており、おそらくは製造歩留まりを向上させる。このようなデバイスを、用途に応じて1000万ピクセル、1億ピクセル、10億ピクセルに拡大することは、容易に想像できる。

CISに基づくQISデバイスは、マルチビットモードに拡大可能である。シングルビットの量子化の代わりに、低ビット深度の量子化(3bなど)を適用することにより、高速読み出しや消費電力を大きく損なうことなく、磁束容量を高める。

量産段階に入ったTOFイメージン

グのような時間分解の分野において、SPADアレイは10年以上前から存在し、かなり成熟した状態にある。QISの概念が考案されて以来、SPADは、予測されるQISの性能と動作の多くを適切に実証するために使われている<sup>(5)</sup>。

3D積層技術と、SPADピクセルのさらなる縮小に伴い、将来的にはSPADの性能で、低分解能(100万~1000万ピクセル)のQISが実現可能である。しかし、CISプロセスを使用することには本質的なメリットがあり、ピクセル数と分解能を比類ないレベルで増加させるとともに、ダイサイズ、

## 謝辞

エリック・R・フォッサムは、当研究室の博士課程にこれまでに在籍した学生と現在在籍している学生による先駆的な取り組みに感謝している。特に、現在はギガジョット・テクノロジー社に所属するジアジュ・マ氏(Jiaju Ma)とサーレハ・マスーディアン氏(Saleh Masoodian)、そしてダコタ・スターキー氏(Dakota Starkey)とウェイ・デン氏(Wei Deng)に謝意を表す。また、米ラムバス社(Rambus)と台湾TSMC社の支援にも深く感謝している。

## 参考文献

- (1) E. R. Fossum, "What to do with sub-diffraction limit (SDL) pixels? - a proposal for a gigapixel digital film sensor (DFS)," IEEE Workshop on CCDs and Adv. Image Sensors, Karuizawa, Japan (Jun. 2005).
- (2) E. R. Fossum et al., Sensors, 16, 8, 1260 (Aug. 2016).
- (3) J. Ma and E. R. Fossum, IEEE J. Electron Devices, 3, 2, 73-77 (Mar. 2015).
- (4) J. Ma et al., Optica, 4, 12, 1474-1481 (December 2017).
- (5) N. A. W. Dutton et al., Sensors, 16, 7, 1122 (2016).
- (6) See <https://goo.gl/JkxWgG>.

## 著者紹介

エリック・R・フォッサム(Eric R. Fossum)は、米ダートマス大(Dartmouth College)のセイヤー工科大学院(Thayer School of Engineering)エマージングテクノロジー主任教授(John H. Krehbiel Sr. Professor)、ケイトリン・アナグノスト(Kaitlin Anagnost)は同博士課程1年目の学生。URL: [www.dartmouth.edu](http://www.dartmouth.edu) e-mail: [eric.r.fossum@dartmouth.edu](mailto:eric.r.fossum@dartmouth.edu)

コスト、消費電力を低減し、製造歩留まりの向上とダイあたりコストの低下をもたらす(表1)。

## QISの応用分野

QIS、SPADアレイ、EMCCDなどの光子計数イメージセンサは、私たちの身の回りの世界を、一度に1光子ずつ、明らかにする。生命科学や天文学における科学用イメージングなどの超低光量分野や、航空宇宙・防衛・セキュリティなどの低光量分野において、光子計数イメージングは不可欠である。

低消費電力のQISデバイスは、低光量のモノのインターネット(IoT: Internet of Things)の分野においても、特に画像形成のための計算がクラウドで実行される場合に、適用できる。その他の潜在的な応用分野として、量子暗号や映画撮影などが、ダートマス大からスピノフした新興企業である米ギガジョット・テクノロジー社(Gigajot Technology)によって研究されている。計算イメージングには無数の可能性が秘められているので、QISデバイスがゆくゆくはスマートフォンに利用されるようになる可能性もある。