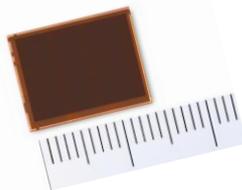


暗闇でも色再現性の高いカラー撮影を実現し暗視用カメラに革新 世界最高画素数の320万画素 SPAD センサーを開発

キヤノンは、検出した微弱な光の粒子を独自の画素構造により効率よくとらえ、大量の電子に増倍させることで、暗闇でもフル HD（約 207 万画素）を超える世界最高^{※1}の 320 万画素のカラー撮影が可能な 13.2mm×9.9mm の超小型 SPAD センサーを開発しました。2022 年後半より生産を開始します。また、本成果は、2021 年 12 月 11 日より開催されている IEDM^{※2}において、非常に競争率の高い Late News Papers^{※3}に採択されました。



*表記は有効画素部分のサイズ

13.2mm×9.9mm の 320 万画素 SPAD センサー（プロトタイプ）

SPAD センサーは、画素に入ってきた光の粒子（以下、光子）を 1 つひとつ数える仕組み（フォトンカウンティング）を採用しています。また、1 つの光子が雪崩のように増倍し、大きな電気信号を出力します。CMOS センサーは、溜まった光の量を測定する仕組み（電荷集積）で、集めた光を電気信号として読み出す際に画質の低下を招くノイズも混ざってしまいがちですが、SPAD センサーは仕組み上、読み出す際にノイズが入らないため、暗い所でもわずかな光を検出し、ノイズの影響を受けずに被写体を鮮明に撮影したり、対象物との距離を高速・高精度に測定したりすることができます^{※4}。

今回開発した SPAD センサーは、画素内に光子を反射させる独自の画素構造により、有効画素面全体で効率よく光子を検出し利用できます。同一照度下において、一般的な CMOS センサーの 10 分の 1 の画素面積で、同等の撮影が可能です。そのため、小さなデバイスにも搭載可能な超小型でありながら、近赤外線域を含む感度が大幅に向上し、星の出ていない闇夜よりも暗い 0.002 lux（ルクス）^{※5}の環境下において 320 万画素での動画撮影を実現します。暗視や監視用のカメラに本 SPAD センサーを搭載することで、暗闇でも、あたかも明るい場所で撮影したかのように、明るい場所にて肉眼で見た色と同じ色で対象物の動きを捉えられるようになります。

キヤノンは 2022 年後半より、自社のセキュリティ用ネットワークカメラ製品に搭載する SPAD センサーの生産を開始します。革新的なセンサーを搭載し、安心・安全な社会の構築に貢献する製品の競争力を高めます。

また、SPAD センサーは、100 ピコ秒（100 億分の 1 秒）レベルの非常に速い時間単位で情報を処理することができるため、光の粒のような、高速に動くものの動きをとらえることが可能です。フル HD を超える高解像度、わずかな光をとらえられる高感度性能に加え、この高速応答の特長を生かして、自動運転や医療用の画像診断機器、科学計測機器などに用いるセンサーとして幅広い活用が見込まれるため、積極的に外販活動を展開し、社会の変革やさらなる発展に寄与してまいります。

※1 SPAD センサーにおいて。2021 年 12 月 14 日現在。（キヤノン調べ。）

※2 International Electron Devices Meeting（国際電子デバイス会議）の略。半導体デバイス分野で最も権威のある国際学会。

※3 最先端技術を盛り込む論文として、IEDM の採択論文の中でも非常に競争率が高い枠組み。

※4 SPAD センサーの仕組みや CMOS センサーとの違いの詳細は、下記 URL のキヤノンテクノロジーサイトをご覧ください。
URL：<https://global.canon/ja/technology/spad-sensor-2021.html>

※5 星明りの明るさの目安が 0.02lux、星の出ていない闇夜（やみよ）の目安が 0.007lux とされている。

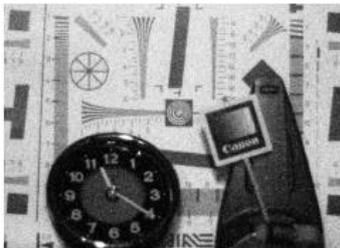
<SPAD センサーを用いた撮影例>

今回開発した SPAD センサーを搭載した試作カメラ*で、一般的な動画撮影で使用されている 1/30 秒の速度で動画撮影を行いました。3 枚の画像は、動画を静止画に切り出したものです。

SPAD センサーで、室内の環境下において、フル HD を超える 320 万画素の高解像度を生かしたカラー画像を撮影することができました(a)。また、星の出していない闇夜 (0.007lux 程度) よりも暗い 0.002 lux の条件下でも、背景にある解像パターンに加え、動きのある時計の針やメトロノームにつけた濃淡のあるチャートも含め、鮮明な画像を得ることができました(b-1)。さらに、実験室で人工的に作り出した暗室で肉眼では周囲が認識できないほど真っ暗な 0.0003 lux の環境下でも被写体が認識可能な画像を得られました(b-2)。



(a) 室内



(b-1) 0.002lux

*星の出していない闇夜よりも暗い環境



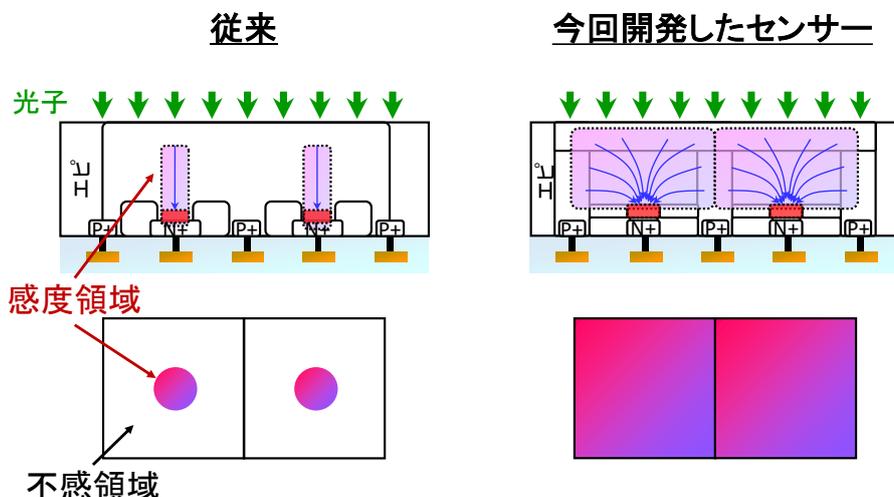
(b-2) 0.0003lux

*肉眼では周囲が認識できない暗さに相当

* レンズは、キャノンのレンズ交換式カメラに用いられる EF50mm F1.2L USM (2007 年 1 月発売) を使用。
(a)は RGB カラーフィルターを使用。(b)はカラーフィルターなし。(a)、(b)ともに画像処理などの後処理なし。

<SPAD センサーの構造とその特性>

従来の裏面照射型 SPAD センサーは、電界のかかっている空間 (感度領域) の光子しか検出できず、画素を小さくすると感度が低下してしまう課題がありました。今回開発した SPAD センサーは、独自の電荷収集型の構造により、感度領域が画素全体に広がるため、近赤外線を含めた光子を効率よく集められます。そのため、光子の利用効率率はほぼ 100%で、6.39 μm ピッチでの画素の微細化と高感度の両立を実現しました。これにより、星の出していない闇夜よりも暗い 0.002lux でも世界最高画素数の 320 万画素の鮮明な画像を得ることができるようになりました。



従来の裏面照射型 SPAD センサー (左) と電荷収集構造を持つ SPAD センサー (右) の断面図と平面図のイメージ

また、受光素子の感度領域に光子が届く効率を高める独自の電荷収集型の構造により、(1)近赤外線域の感度、(2)低ノイズ、(3)超高速検出（時間分解能）と高感度の両立の3つの指標で優れた特性を示しています。

(1) 近赤外線域の感度

光をより多くとらえることができると値が大きくなる PDE（Photon Detection Efficiency：光子検出効率）は、従来の自社開発 SPAD センサーに比べ、可視光線域から近赤外線域^{*}にかけて大幅に向上しました。近赤外線が持つ物質を透過しやすい性質を利用して、霧などで視界のよくない状況下での監視や距離測定、産業用の異物検査などで効果を発揮します。

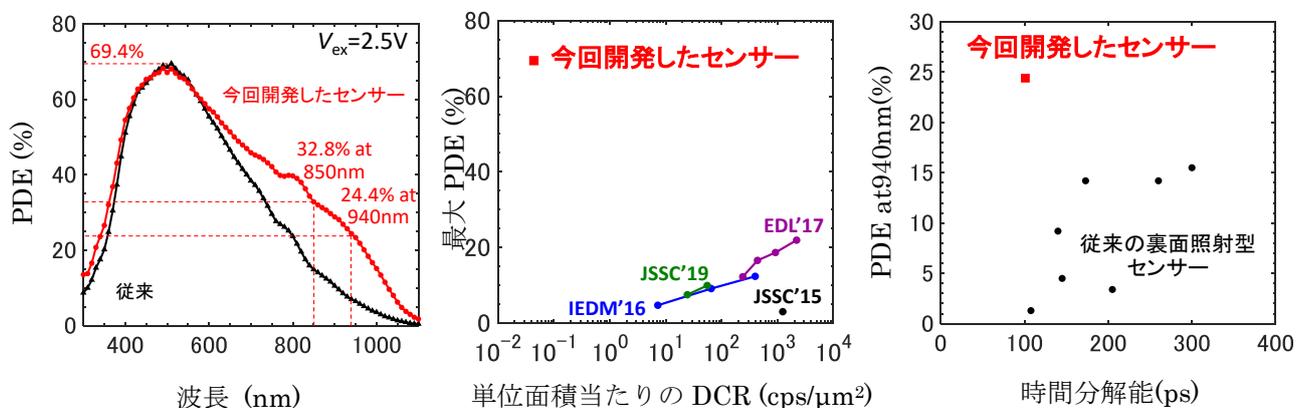
^{*}電磁波の一種で、可視光線（人の目で見ることができる波長）の赤色に近い 700~2500 nm の波長。人の目で見ることができないが、可視光線に近い特性を持つため「見えない光」として、家庭用電気機器類のリモコンや赤外線通信などに応用されている。

(2) 低ノイズ

ノイズが少なければ値も小さくなる DCR（Dark Count Rate：ダークカウントレート）を小さくしようとすると、一般的に PDE は減少してしまう傾向があります。しかし、今回開発した SPAD センサーは、DCR を抑えつつ、PDE は 69.4%の値を示しています。

(3) 超高速検出（時間分解能）と高感度の両立

どのくらいの時間で光子が検出可能かを示す時間分解能を短くしようとすると、PDE は低下傾向になりますが、100 ピコ秒（100 億分の 1 秒）の時間分解能を示しながら、近赤外線域である波長 940nm での PDE は 24.4%と高い値を示しています。



(1) 光子検出効率の波長特性
(従来の自社 SPAD 開発品との比較)

(2) ダークカウントレートと
最大光子検出効率 (Vex=2.5V)

(3) 時間分解能と光子検出効率
(Vex=2.5V)

これらの特性により、暗い所でも明るい所で撮影したかのようなカラー画像を得ることができ、暗い屋外や人のいない真っ暗な自動生産現場などで使用されるセキュリティ用ネットワークカメラ、暗闇での生態研究用カメラなどに活用できます。

また、1秒間に約 30 万 km（地球 7.5 周分）の速さで動く光の軌跡をもとらえることができる時間分解能と高感度性能の両立を生かし、自動運転での距離測定や AR（拡張現実）、VR（仮想現実）、MR（複合現実）などにおける高速で高精度な 3次元空間情報の把握にも活用が期待されます。さらに、医療分野では、医療用の画像診断装置のカメラ部や顕微鏡などに用いることにより、生体内の微弱で極めて短時間の光を発するような蛍光物質の挙動や位置をとらえることができ、初期のがん細胞など、初期段階の病気や部位の特定に役立つことが期待されます。