

可視域外の光を検出する 半導体設計の進歩

バヴェル・マリノフスキー、ニコラス・パバドプロス、ジウォン・リー

ピン留め薄膜フォトダイオード構造の集積化により、薄膜イメージセンサの可能性が切り拓かれた。

ベルギーの研究者らは、薄膜イメージセンサにピン留めフォトダイオード構造を集積することに初めて成功した。ピン留めフォトゲートとトランスファゲートを組み込むことにより、波長 $1\mu\text{m}$ を超える領域での薄膜イメージセンサの優れた光吸収特性を活かし、可視域外の光をコスト効率良く検出できるようになるのだ。この斬新なアプローチにより、自律走行から環境モニタリングに至るまで、さまざまな用途への道が切り拓かれる。

シリコンの限界克服

シリコンベースのイメージセンサは可視光の検出に優れている。しかし、短波赤外 (SWIR) や赤外 (IR) のような長い波長光を検出する用途、例えば、家

庭ごみの分別を支援するカメラや、煙や霧を「見通す」自律走行車などといった用途に幅広く対応するには、シリコン以外の半導体材料が必要となる。

III-V 族材料を使用すればこの課題に対処できるが、製造コストが高いため、大規模展開が不可欠な自動車分野での利用は制限される。そこで有望視されている代替材料が、有機化合物や量子ドットなどの薄膜ベースの吸収体だ。このような材料は優れた光吸収特性を有しており、従来の相補型金属酸化膜半導体 (CMOS) 読み出し回路にも集積しやすいという利点がある。

ピン留めフォトダイオード構造による障壁の打破

とはいえ、薄膜吸収体を使用した IR

センサを組み込むと、主に SNR (信号対雑音比) の低下から、画質の劣化につながるという課題がある。ところが最近の開発により、こういった課題が初めて克服された。使用する材料そのものを変えるのではなく、ピン留めフォトダイオード (PPD) 構造を用いるのである。PPD 構造は、1980 年代から長年培われてきたシリコン CMOS イメージセンサ技術を活用するものだ⁽¹⁾。

PPD 構造は、トランジスタゲートと特殊な光検出器構造 (ピン留めフォトダイオードと呼ばれる) を備えており、ノイズを大幅に低減できるため、シリコンベースのイメージセンサの市場において圧倒的な地位を確立している。そのため、kTC ノイズや直前のフレーム残像の影響を受けずにトランジスタをリセットでき、電荷を完全に排出できる一種の「スーパースイッチ」の役割を担う。しかし、2つの異なる半導体システムの集積が複雑なゆえに、薄膜ベースのセンサに PPD 構造を組み込むことはこれまで実現できなかった。

イメージセンサ アーキテクチャの飛躍

最近の Nature Electronics 誌の論文において、薄膜ピクセルの読み出し回路への PPD 構造の組み込みに成功したことをベルギー imec (Interuniversity Microelectronics Centre) の当チームは発表した (図1)⁽²⁾。この概念実証は、

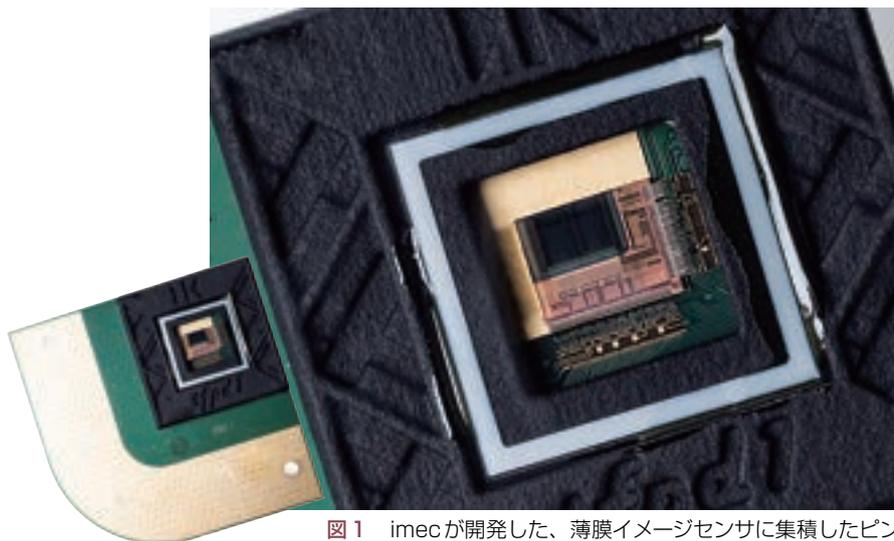


図1 imecが開発した、薄膜イメージセンサに集積したピン留めフォトダイオード構造 (画像提供: imec)

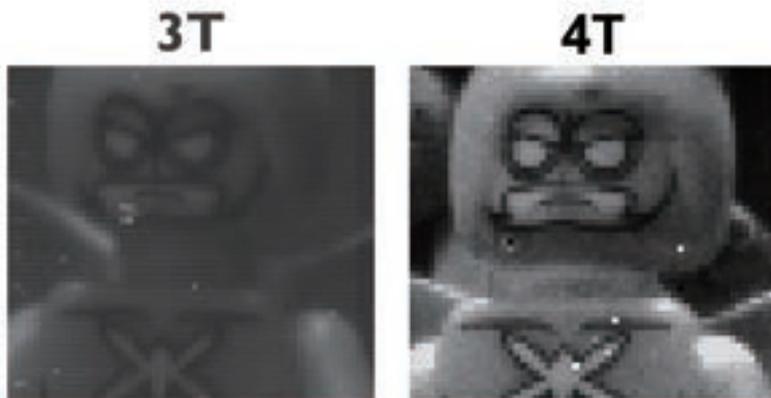


図2 3Tおよび4Tイメージセンサの画質比較(画像提供:imec)

薄膜材料とフォトダイオードの両方に関する当チーム内の専門知識を活用し、現在の薄膜画素アーキテクチャの限界を超えるものである。本画素を構成する個々のコンポーネントは長年存在し、他の用途ではその価値が証明されてきたが、今回の概念実証は、可視域外の光検出において、その総合的な価値と汎用性を実証するものだ。

フォトゲートトランジスタには、薄膜フォトダイオードと互換性があり、かつシリコン読み出し回路に組み込むことができる、インジウム・ガリウム・酸化亜鉛(IGZO)を選定した。本IGZOトランジスタはメモリ技術をはじめとするさまざまな用途において、その有効性がすでに実証されている⁽³⁾。

次に、本IGZOトランジスタを、CMOS読み出し回路上に直接、薄膜有機フォトダイオードとモノリシックにハイブリッド化した。このウエハレベルの後処理により、大規模かつ低コストの製造が可能となり、大規模な用途への道が切り拓かれる。

このように開発した4T(トランジスタ4個)SWIRイメージセンサは、読み出しノイズ6.1eという低い値を示した。従来の3T(トランジスタ3個)リファレンスセンサのノイズ100e-超に比べて大幅な低減である(図2)。このノイズ低

減により、さらなる高SNRを実現できる。その結果、画像の正確さと詳細さが向上する。さらに、信号を誘起するのに必要な光子数が少なくてすむため、微弱な信号でも画像変換できるのだ。

リニアリティの向上:精度の鍵

当チームは追跡調査により、このPPD画素構造を組み込むことで、画像再現の精度を示す指標であるリニアリティも向上することを実証した。また、フォトダイオードのバイアスを固定することで、有機薄膜フォトダイオードをベースとしたイメージセンサの暗電流を効果的に低減(72%に低減)し、リニアリティを向上(誤差を59%低減)させた。フォトゲートを組み込むことにより、撮影されたシーンをさらに忠実に表現できるようになった。これは、正確な画像再現が重要視される用途においては不可欠なことだ。

参考文献

- (1) See <https://tinyurl.com/3sa6j59t>.
- (2) J. Lee et al., Nat. Electron., 6, 590-598 (2023); <https://doi.org/10.1038/s41928-023-01016-9>.
- (3) See <https://tinyurl.com/yzm5r923>.

著者紹介

パヴェル・マリノフスキー(Pawel Malinowski)は、ベルギーのimecにてピクセル・イノベーションのプログラマー・マネージャー、ニコラス・パパドプロス(Nikolas Papadopoulos)は、同じくimecにて薄膜ピン留めフォトダイオードのプロジェクト・リーダー、ジウォン・リー(Jiwon Lee)は、imecの客員教授および韓国の浦項工科大(POSTECH)の助教授。
e-mail:jiwolee@postech.ac.kr URL:www.imec-int.com/en

それ以上に、初期の画素構造は電荷から電圧への変換ゲインを最大化するように設計されており、そのため浮遊拡散容量が制限され、高フルウェル容量を実証できなかった。第2世代の画素構造は、新設計の画素(ピッチ5 μ m)で1メガ電子を超える高フルウェル容量を実現した。その結果、3T画素のダイナミックレンジ82dBに比べて100dB超のダイナミックレンジを確保でき、最も暗い光から最も明るい光まで、高SNR画素で幅広い光強度を検出できることを実証している。

薄膜ベースイメージセンサの加速的実用化

当チームの画素アーキテクチャにより、ペロブスカイト吸収体や量子ドットなど、有望な薄膜フォトダイオードにも新たな機会が開かれる。フォトダイオードは読み出し回路から分離され、後処理によって集積化されるため、当チームが使用する吸収材料は、読み出し回路と集積化する前に厳密な最適化を行う必要がない。

当チームの斬新な4T画素アーキテクチャによって、モノリシック薄膜ベースのイメージセンサの実用化を加速できる。当アーキテクチャの利点は、シリコンイメージセンサでは全く対応できていない、あるいは十分に対処できていないような新規用途において、触媒として活用されていこう。