

情報センシングの研究開発動向

秋田純一^{†1}, 関根 寛^{†2}, 廣瀬 裕^{†3}, 安富啓太^{†4}, 栃木靖久^{†5}

1. まえがき

映像情報メディアのさまざまなシステムにおいて、その入力部にあたるカメラはシステム全体の品質を大きく左右する重要な技術である。カメラを構成する部品の中でも、像情報を時空間サンプリングし電気信号に変換するイメージセンサは、最も重要なデバイスである。現在、イメージセンサは、スマートフォンやデジタルカメラなどの電子機器に広く搭載されているが、車載やセキュリティ、IoTなどへの活用により、その活躍の場がさらに広がりつつある。

本稿は、2020年3月以降の2年間におけるイメージセンサやカメラ等の画像情報のセンシング分野における技術進展を、情報センシング研究委員会の構成員が分担して記述したものである。以降、2章では近年進化が著しい単一光子検出(Single-Photon Avalanche Diode: SPAD)型イメージセンサについて、3章では自動運転技術の進展に伴って重要性が増している車載カメラ用センサ、4章ではLidarや顔認証などのユーザインタフェースでも利用場面が増えている測距センサ、5章ではイメージセンサの進化の根底にある画素微細化について、それぞれ説明する。

2. SPAD センサ

近年、光の最小単位である「光子(フォトン)」を検出することができるSPADと呼ばれる受光素子技術に注目が集まっている。この技術は自動運転や医療用の画像診断機器、科学計測機器、暗視用カメラなど、産業分野から学術分野にまでさまざまな応用が期待されており、実用化が進みつつある。技術開発の大きな潮流としては、高解像度化、画素微細化、および画素微細化に伴うトレードオフ特性の克服が挙げられる。

高解像度化に関しては、2007年に100万画素アレイの実現がSPAD開発の重要なマイルストーンであることがEPFLのE. Charbon教授より提唱¹⁾されて以来、2019年末に世界初となる100万画素SPADイメージセンサを実現したとの報告がMorimoto (EPFL, キヤノン)らよりなされた²⁾。180 nm CMOSプロセスを用いた表面照射型センサで、画素ピッチは9.4 μm である。この報告とほぼ同時期に、CMOSイメージセンサ画素の構造を基調とした縦型APDという独自の方式において、同じく100万画素のイメージセンサがOkino (パナソニック)らより報告された³⁾。このように100万画素を超えるようなSPADセンサが登場し、今後さらなる高解像度化が市場から望まれる中、画素微細化技術への注目が非常に高まったのがこの2年間である。このニーズに応えるように、CMOSセンサの画素微細化を飛躍的に向上させた技術である、裏面積層技術を取り入れたSPAD画素開発報告が2020年12月にIto (SSS: ソニーセミコンダクタソリューションズ)らによりなされた⁴⁾。画素ピッチ10 μm の画素において、CMOSセンサで培ったマイクロレンズ技術や画素分離技術を駆使することで、波長940 nmのPDE (Photon Detection Efficiency)は14.2%、DCR (Dark Count Rate)と呼ばれる暗時ノイズは室温下で0.03 cps/($\mu\text{m}^2 \cdot \text{pixel area}$)、クロストークは0.3%を実現している。2021年2月には、このSPAD技術を用いて、車載用LiDAR向けの直接ToF (Time of Flight)方式測距センサ(d-ToFセンサ)の報告がKumagai (SSS)らよりなされた⁵⁾。試作されたLiDARモジュールとしては、フレームレート20 fps、背景光117 kluxの環境下において、最大測距離200 mを測距誤差30 cm以内の精度で実現している。同学会ではイメージャ用途を想定したSPADイメージセンサの開発成果についてもOgi (SSS)らより報告がなされた⁶⁾。このほか、SPADならではの画素微細化技術として、IEDM 2021のLate News Papersに採択された、MorimotoおよびIwata (キヤノン)らによる電荷収集型SPADと呼ばれる新規デバイス構造を採用した320万画素の裏面積層型SPADセンサの報告⁷⁾が大きな注目を集めた。電荷収集型SPADセンサのコンセプト自体は、これ以前の2020年6月に報告⁸⁾がなされており、画素微細化により顕在化する課題(PDE低下、

†1 金沢大学

†2 キヤノン株式会社

†3 パナソニック株式会社

†4 静岡大学

†5 ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社

"Information Sensing" by Junichi Akita (Kanazawa University, Kanazawa), Hiroshi Sekine (Canon, Inc., Tokyo), Yutaka Hirose (Panasonic Corp., Tokyo), Keita Yasutomi (Shizuoka University, Shizuoka), Yasuhisa Tochigi (Sony Semiconductor Solutions Corp., Atsugi)

DCR悪化、およびそれらのトレードオフ)を根源的に解決できることが示された。文献⁷⁾ではこの技術によって、画素ピッチ6.39 μm において波長940 nmのPDEは24.4%、室温下でのDCRは1.8 cps、時間分解能は100 psを実現しており、高感度化、低ノイズ化、さらに超高速検出と高感度の両立を高いレベルで実証した。同学会において、Shimada (SSS) らからも裏面積層型の画素ピッチ6 μm のSPAD画素アレイの開発報告がなされた⁹⁾。波長940 nmのPDEは20.2%、室温下でのDCRは19 cps、時間分解能137 psを実現している。その後のISSCC 2022では、文献⁷⁾のSPAD技術を取り入れ、信号処理回路に画素毎露光期間制御および適応型クロックドリチャージ駆動を用いた100万画素SPADイメージセンサについての報告がOta (キヤノン) らよりなされた¹⁰⁾。高ダイナミックレンジと低消費電力を両立させるために、画素毎露光期間制御が提案され、消費電力0.37 W、ダイナミックレンジ143 dBの性能を実現している。このほか、同学会では画素間相関によって背景光除去が可能な64 \times 64画素のフラッシュLiDAR向けSPADセンサの報告¹¹⁾や、四分探索アルゴリズムに基づく画素内ヒストグラムTDCを搭載した80 \times 60画素のフラッシュLiDAR向けSPADセンサの報告¹²⁾がなされ、SPAD技術開発の盛況ぶりが垣間見られた。

以上に述べた通り、この2年間の間にもSPAD技術は大きく進歩し、その勢いは加速の一途を辿る。今後、更なる技術開発によって、このSPAD技術はイメージングおよびセンシングの世界に革新を起こすことが予感される。

3. 車載センサ

2020年に道路交通法が改訂され、公道において自動運転レベル3の走行が可能となったことで¹³⁾、CMOSイメージセンサ(CIS)メーカー各社が各種車載カメラ用CISの商品ラインアップの増強を発表している^{14)~16)}。特筆すべきは、これら車載用CISは民生品よりもはるかに厳しい車載規格(AEC-Q100¹⁷⁾、IATF 16949¹⁸⁾)を、性能仕様を落とさずに満たしていることである。そのためには、低欠陥を実現するプロセス技術、故障検知回路やフェール・セーフ設計技術に加え、品質マネジメントも要請される。これらの要請に対応した各社の総合的な技術力は格段に高くなったといえる。一方、人の運転操作を介さないレベル4にむけて、高速走行時の早期危険予知に基づく安全確保を目的とした長距離測距センサの開発が進められている。センサの主流は、SPADを用いた飛行時間測定型(ToF) CISである。中でも、オンセミコンダクターはいち早く車載規格(AEC-Q102)をクリアしたシリコンフォトマルチプライヤーアレイの商品化を発表している¹⁹⁾。長距離ToFシステムの実証としては、パナソニックがメガピクセルで250 mレンジの実証を発表して以来³⁾、測定可能距離延長、距離分解能と精度の向上、検知可能被写体反射率の低減、耐光性・耐温

度性・耐候性の性能指数が急速に向上している。ソニーは、積層型SPADで太陽光環境下(117 klux)で、90%反射率被写体を200 mレンジまで、10%反射率を150 mまで測距可能な、MEMSミラースキャン方式の直接ToF-CISを発表している⁵⁾。東芝は、2次元のSPADアレイとADコンバータ(ADC)と時間-デジタル変換(TDC)を1チップ化した、デュアルデータコンバータ搭載したSoCをハイブリッド実装したLiDARにより、70 klux背景光下で200 mレンジの測距システム²⁰⁾、さらに最新の結果として超小型(「手のひらサイズ」)で300 mまで測距可能なシステムを発表している²¹⁾。また、奈良先端大、立命館大、東海大のグループは短パルスタイムゲート方式の間接ToFセンサを用いて、複数露光情報から耐濃霧性の高い測距システムを報告している²²⁾。今後は、これら基本測距性能の確立に加えて、干渉やマルチパスなどのアーティファクトを低減する技術の開発(例えば、Samsungの105 klux下での干渉キャンセル技術²³⁾)が進み、よりいっそう実用化に近づいていくと予想される。

4. iToF 距離イメージセンサ

ToF距離イメージセンサは、スマートフォンやタブレットなどのモバイル端末、HoloLens2のようなAR/MR向けの装置、車載向けのLiDARなど民生用・産業用ともに広く展開され始めている。ここでは、多画素化に優位性を持つ間接ToF法(iToF)センサについて、最近の動向を述べる。より詳細な技術動向は、最近報告されたレビュー論文^{24) 25)}およびIISW2021レビュー記事²⁶⁾を参照されたい。

ISSCC 2018において、Microsoftから1 M画素のiToFセンサの報告²⁷⁾があり、これに追随する形で、Samsung (ISSCC 2021²⁸⁾)、ソニー (IEDM2020²⁹⁾)から1.2 M画素iToFセンサの報告があった。これらのセンサでは、従来10 μm 程度であった画素ピッチが、3.5 μm まで縮小された。いずれも裏面照射型であるが、文献^{28) 29)}では積層技術が使用されている。特に、文献²⁹⁾ではCu-Cu接続による画素レベルの積層技術が適用されている。画素縮小に伴う信号電子数が低下に対して、電荷領域でのストレージによる低雑音化(3-4電子レベル^{27) 28)}と、変調周波数の向上させることで、距離精度が改善されている。SN比の向上や低消費電力のために、2 \times 2や4 \times 4などのビニングモードを備えており、電荷領域でのビニング²⁸⁾、列回路でのビニング^{4) 5)}が使われている。

多画素化においては低消費電力化が重要となる。これに対し、ロックイン画素部分の駆動電圧を下げたり、ドライバ毎に駆動タイミングをずらしてピーク電力を下げるといった対策が取られている^{27) 28)}。駆動タイミングのずれは測距FPN(Fixed Pattern Noise)を悪化させるが、文献²⁸⁾では“Multiple-interleaving”という蓄積時間内で時間ずれを掃引する手法が提案された。これに加えて、同センサを

用いて Wiggling Error - 光源・ゲート駆動の高調波によって生じる波打つ誤差 - の低減手法も提案された³⁰⁾。

ToF 距離センサの光源として、屋外では太陽光スペクトルの弱まる 940 nm 帯の利用が好ましいが、センサ側の量子効率の低下が課題となる。これに対して、SOI の支持基板を完全空乏化し近赤外感度を向上させる構造が提案された³¹⁾。最近の報告では、同構造で 18 μm 角の画素、60% 以上の量子効率を得られている³²⁾。画素縮小に伴い、クロストークを防ぐことも重要となる。クロストークを抑えながら感度を高める手法として、Deep Trench Isolation (DTI) と裏面での散乱・回折構造を利用した構造が提案されている。裏面で入射した光をわざと曲げ、DTI での反射を利用して実質的な光路長を伸ばしている。ソニーは逆ピラミッド構造を利用した回折²⁹⁾、Samsung から浅く形成したトレンチ構造を利用した散乱構造²⁸⁾ が報告された。関連した研究として、金属グレーティングによる表面プラズモン回折と DTI を用いた構造の提案、シミュレーションによる検討が報告された³³⁾。このほか、より太陽光スペクトルがより低く、かつ人間の目に対して安全性の高い SWIR 光 (例えば 1.4 μm など) を利用するために、Ge 薄膜層を光吸収に用いて、これを Si ベースの回路ウエハを画素レベルで積層した Ge-on-Si 型 iToF センサも報告されている³⁴⁾。

屋外・中距離向けにマルチタップと距離判別によるハイブリット ToF 方式に関する提案³⁵⁾があった。4 タップ以上のロックイン画素と、複数のサブフレームを利用することで、40 m@屋外 (100 klux) でも、1% 以下の距離精度が達成できる計算例が示された。また、3次元計測スキャナ向けの高精度 ToF センサでは、ジッタ低減を図ることで 50 μm 以下の距離精度を実現するセンサの報告があった^{36) 37)}。

5. 微細化

主にスマートフォンの進化とともに、画素の微細化が進んでいる。2018 年から 2020 年の間で 0.9 μm □ から 0.7 μm □ まで微細化が進み、2022 年現在に至るまで微細化の進化は留まるところを知らない。単純に画素を微細化するだけでなく、飽和電荷数 Full Well Capacity (FWC)、感度、ノイズといった主要画素特性の劣化をいかにして抑制するかについて多くの報告がされている。

微細化のトレードオフ項目としてまず挙げられる FWC について、検討が活発にされた。FWC enhancement (詳細非開示) の導入により、Y. Jay Jung ら (OmniVision 社) は、0.7 μm □ 画素において FWC 7,000 e- を達成し³⁸⁾、さらに M. Uchiyama らは 0.61 μm □ 画素において FWC 5,000 e- を達成したと報告した³⁹⁾。Jongun Park ら (Samsung 社) は、Photo Diode (PD) の N 型ドーズ量増加と STI を浅くすることにより PD 体積を増加させ、0.64 μm □ 画素において 0.7 μm □ 画素と同等の FWC 6,000 e- を達成し⁴⁰⁾、Sungbong Park らはさらに Front Deep-Trench Isolation (FDTI) 幅を

縮小することで 0.56 μm □ 画素においても FWC 6,000 e- を維持している⁴¹⁾。

続いて高感度化に関しても進展が見られた。In-Sung Joe ら (Samsung 社) は、0.64 μm □ 画素において、隣接カラーフィルタ間分離部に従来配備していたメタルをなくすことで、量子効率を従来比 23% 向上させた⁴²⁾。Seokho Yun ら (Samsung 社) は、0.8 μm □ 画素において、カラーフィルタ上に Meta-Photonic Color-routing と呼ぶ TiO_2 によるピラーを形成し光波長ごとに屈折方向を変える技術により、カラーフィルタにおける光損失を抑え感度を 20% 改善した⁴³⁾。

低ノイズ化についてここでは、変換効率を向上しノイズ電子数を低減するアプローチと、デバイス構造を進化させノイズそのものを低減するアプローチとにわけて述べる。Leo Anzaigra ら (Gigajot 社) は、Floating Diffusion (FD) と Transfer Gate の間にスペースを設けることで FD 容量を低減する Pump Gate 技術を 0.8 μm □ 画素に適用し、ランダムノイズ 0.8 e-rms を達成した⁴⁴⁾。Sung-in Kim ら (Samsung 社) は 0.64 μm □ 画素において、ソースフォロアアンプを Planer 型から Fin 型にすることで、対 Planer 比で RTS 出力を 32% に、ランダムノイズを 81% に低減している⁴⁵⁾。K. Nakazawa ら (Sony Semiconductor Solutions 社) は、0.7 μm □ 画素において、PD 部と画素トランジスタ部を別々のウエハで積層する 2 層トランジスタ画素積層構造によって、ソースフォロアアンプサイズを拡大しランダムノイズを低減する CIS を報告した⁴⁶⁾。

いよいよ画素サイズが可視光波長と同程度となり、どこまで微細化が進むかこれまで以上に注目が高まると予想される。Jae Ho Kim ら (Samsung 社) は、現行構造で 0.45 μm □ まで MTF 改善のポテンシャルを有し、更なる微細化に向けては新たな技術が必要と述べている⁴⁷⁾。この先どのような技術が主流になるか、また画素微細化がどこまで進むのか注目しつつ、さらなる発展を期待する。

(2022 年 3 月 30 日受付)

〔文 献〕

- 1) E. Charbon, IISW, pp.246-249 (2007)
- 2) K. Morimoto, et al: Optica 7, 346-354 (2020)
- 3) T. Okino et al: ISSCC, pp.96-97 (2020)
- 4) K. Ito et al: IEDM, pp.347-350 (2020)
- 5) O. Kumagai et al: ISSCC, pp.110-111 (2021)
- 6) J. Ogi et al: ISSCC, pp.114-115 (2021)
- 7) K. Morimoto and J. Iwata et al: IEDM, pp.450-453 (2021)
- 8) K. Morimoto, ISSW (Int. SPAD Sensor Workshop) (2020)
- 9) S. Shimada et al, IEDM, pp.446-449 (2021)
- 10) Y. Ota et al, ISSCC, pp.94-95 (2022)
- 11) E. Manuzzato et al, ISSCC, pp.96-97 (2022)
- 12) S. Park et al, ISSCC, pp.98-99 (2022)
- 13) 政府広報, <https://www.gov-online.go.jp/useful/article/202004/1.html> (2020)
- 14) Semiconductor Portal Inc., <https://www.semiconportal.com/archive/editorial/technology/chips/200929-onsemisubar.html> (2020)
- 15) 日経クロス Tech., <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/05679/>

- 16) <https://www.ovt.com/press-releases/omnivision-demonstrates-industrys-first-8-megapixel-lfm-image-sensor-system-for-forward-looking-automotive-camera-systems-at-ces-2022/>
- 17) Automotive Electronics Council (AEC), <http://aecouncil.com/AECDocuments.html>
- 18) 日本品質保証機構, https://www.jqa.jp/service_list/management/service/iatf16949/
- 19) 日本経済新聞, https://www.nikkei.com/article/DGXLRS606003_U1A300C2000000/ (2021.3.4)
- 20) 崔ほか: IST Tech. Report, **45**, 34, IST 2021-61 (2021)
- 21) <https://www.global.toshiba/jp/technology/corporate/rdc/rd-topics/22/2203-02.html> (2022.3.18)
- 22) 櫛田ほか: IST Tech. Report, **45**, 34, IST 2021-66 (2021)
- 23) Seo et al: Symposium on VLSI Circuits, JFS4-7 (2021)
- 24) K. Yasutomi and S. Kawahito: IEICE Trans. Electron., p.2021CDP0004 (2022)
- 25) C. Bamji et al: IEEE Transactions on Electron Devices, pp.1-15 (2022)
- 26) 安富, 映情学誌, **76**, 2, pp.206-209 (2022)
- 27) C.S. Bamji et al: ISSCC, pp.94-96 (2018)
- 28) M.-S. Keel et al: ISSCC, pp.106-108 (2021)
- 29) Y. Ebiko et al: IEDM, p.33.1.1-33.1.4 (2020)
- 30) M.-S. Keel et al: IISW, p. R21, (2021)
- 31) S. Lee, Sensors, **20**, 1, Art. No.1 (2020)
- 32) 河西ほか: ITE創立70周年記念大会, 33E-5 (2020)
- 33) A. Ono, K. Hashimoto and N. Teranishi: Opt. Express, **29**, 14, p.21313 (2021)
- 34) C.-L. Chen et al: ISSCC (2020)
- 35) S. Kawahito, K. Yasutomi and K. Mars: IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society, **2**, pp.38-49 (2022)
- 36) T. Furuhashi, K. Yasutomi, R. Hatada, M. Tamaya, K. Kagawa and S. Kawahito: Opt. Express, **29**, 23, p.38324 (2021)
- 37) K. Yasutomi et al: ISSCC, pp.100-101 (2022)
- 38) Y. Jay Jung, et al: IEDM, pp.16.3.1-16.3.4 (2020)
- 39) Masayuki Uchiyama, et al: IISW, pp.5-8 (2021)
- 40) JongEun Park, et al: ISSCC, pp.122-123 (2021)
- 41) Sungbong Park, et al: ISSCC, pp.108-109 (2022)
- 42) In-Sung Joe, et al: VLSI, JFS4-3 (2021)
- 43) Seokho Yun, et al: IEDM, pp.30.1.1-30.1.4 (2021)
- 44) Leo Anzaigra, et al: IISW, pp.17-20 (2021)
- 45) Sung-in Kim, et al: IISW, pp.122-125 (2021)
- 46) K. Nakazawa, et al: IEDM, pp.30.4.1-30.4.2 (2021)
- 47) Jae Ho Kim et al: IISW, pp.13- 16 (2021)



秋田 純一 (あきた じゅんいち) 1998年, 東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了。1998年, 金沢大学助手, 2000年, 公立はこだて未来大学講師, 2004年, 金沢大学講師, 2008年, 同准教授を経て, 2011年より, 同大学教授。集積回路, 特に高機能イメージセンサと, その応用システム, 特にインタラクティブシステムに関する研究に従事。正会員。博士(工学)。



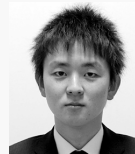
関根 寛 (かんね ひろし) 2014年, 東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻修士課程修了。同年, キヤノン(株)入社。以来, CMOSイメージセンサおよびSPADセンサの設計, 研究開発に従事。正会員。



廣瀬 裕 (ひろせ ゆたか) 1987年, 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年, 日本電気(株)入社。1996年, Princeton大学大学院博士課程修了。同年, 日本テキサス・インスツルメンツ(株)入社。2001年, 松下電器産業(株)(現パナソニック(株))入社。イメージセンサ, 化合物デバイスの開発等に従事。Ph.D.(電気工学)。正会員。



安富 啓太 (やすとみ けいた) 2011年, 静岡大学大学院博士課程修了。現在, 静岡大学電子工学研究所・学術院工学領域准教授。Time-of-Flight距離イメージセンサ, 時間分解イメージセンサの開発に従事。2015年, 本学会鈴木記念奨励賞受賞。博士(工学)。正会員。



栃木 靖久 (とちぎ やすひさ) 2014年, 東北大学大学院工学研究科技術社会システム専攻博士課程修了。2014年, ソニー(株)入社。現在, ソニーセミコンダクタソリューションズ(株)にて, CMOSイメージセンサの研究開発に従事。博士(工学)。正会員。