2章 技術トピック(1)

～有機CMOSイメージセンサの開発動向～

町田 真一[†], 西村佳壽子[†], 穴戸三四郎[†], 三宅 康夫[†], 徳原 健富[†],
柳田 真明[†], 中田 学[†], 村上 雅史[†], 原田 充[†], 井上 恭典[†]

キーワード: ワイドダイナミックレンジ, グローバルシャッター, 有機光電変換膜, 積層構造, 近赤外

1. まえがき

近年, CMOSイメージセンサ(CMOS Image Sensor: CIS)は, 高解像度, 高フレームレート, 高感度といった特長でCCDに替わって撮像素子の主流となってきた. しかしながら通常のCISでは, 露光やシャッター動作を行毎に順次走査し行うローリングシャッター動作を伴う. CCD同様の画像歪みの生じないグローバルシャッター動作には画素部にメモリの追加が必要となり, 受光面積縮小による飽和電荷量の減少などから限られた用途に留まっていた^{1)~3)}.

また, センシング分野ではワイドダイナミックレンジ(Wide Dynamic Range: WDR)に加えて不可視情報を捉えることのできるイメージセンサも望まれている. 近赤外光(near-infrared: NIR)などを用いて取得したセンシング結果を可視画像と組合せれば, 距離情報や分光情報を色情報に付与することができる.

これら次世代のイメージセンサに求められる性能を実現する技術として, 筆者らで開発している有機CMOSイメージセンサの最新動向を紹介する.

2. 有機CMOSイメージセンサの画素構造と光電変換の原理

筆者らで開発している有機CISの画素断面模式図を図1(a)に示す. 有機光電変換膜(Organic Photoconductive Film: OPF)を読み出し回路の設けられたCMOSチップ上に積層した構造となっており, それぞれを独立した領域に形成可能なことから, 受光面積の圧迫なく広い回路領域を得ることができる. センサに入射した光は画素毎に設けられたマイクロレンズ, カラーフィルタを介してOPFに吸収され, 電

(a) 有機CMOSイメージセンサ断面図 (b) OPFの感度特性

図1 有機CMOSイメージセンサの断面図と光電変換特性

子正孔対が生成される. 発生した正孔はOPFに印加される電界強度に応じて画素電極側に引き抜かれ, 信号電荷としてシリコン(Si)基板上に形成した浮遊拡散層(Floating Diffusion: FD)に蓄積される. OPFの感度は図1(b)に示すように, OPF上部の透明電極(Indium Tin Oxide: ITO)に印加する電圧(V_{ITO})により制御することが可能である. 筆者らは, この特有の積層構造と, 電圧により光電変換特性を制御可能な点に注目して技術開発を行っている.

3. 123 dBの完全同時WDR技術

従来のCISでは, 露光時間の異なる複数の画像を合成することでWDR化を図っていた^{4)~6)}. しかし, 時間差のある複数画像データを処理するため, 動体画像は歪んでしまうという課題があった. そこで, 筆者らは積層構造を活かした1画素2セル構造の提案を行った⁷⁾.

3.1 1画素2セル構造

1画素2セル構造では, 図2に示すようにOPFで光電変換した信号電荷を捕集する画素電極を大小に分割する. 暗い被写体を捉える高感度セルの画素電極は, 感度向上のため大面積とし画素の中心部に配置し, 明るい被写体を捉える高飽和セルの画素電極は高感度セル境界部に小面積で配置している. センサに入射した光は, この画素電極サイズに応じた信号量がそれぞれの画素電極に捕集される.

さらに, 高飽和セルは飽和電荷量を拡大する大きな電荷蓄積容量 C_s を搭載している. この画素構成により, 画素電極面積に応じた感度比10倍と, 容量 C_s による飽和電荷蓄

[†] パナソニック株式会社 テクノロジーイノベーション本部 センサ・デバイス研究所

"The Latest Trend of Organic CMOS Image Sensors" by Shin'ichi Machida, Kazuko Nishimura, Sanshiro Shishido, Yasuo Miyake, Takeyoshi Tokuhara, Masaaki Yanagida, Manabu Nakata, Masashi Murakami, Mitsuru Harada and Yasunori Inoue (Institute for Sensors and Devices, Technology Innovation Division, Panasonic Corporation, Osaka)

図2 1画素2セル構造

積容量比10倍とで、従来のCIS比100倍のWDRを実現している。

3.2 有機CMOSイメージセンサ固有のノイズ抑制

有機CISの積層構造は集光感度比や、飽和電荷量の拡大に有効だが、光電変換部であるOPFと電荷蓄積部であるSi基板が金属配線を介して接続されるため、信号電荷をリセットする際に発生するリセットノイズが課題となる。

リセットノイズは図3の回路図に示すリセットトランジスタ(RST Tr.)でFDをリセットする際に発生する。このノイズは、FDで発生したノイズの逆相の信号をフィードバックアンプ(FBAMP)によりFDへフィードバック(負帰還)することで抑制できる⁸⁾。筆者らはノイズ抑制の高速化を実現するために新たに「容量結合型ノイズキャンセル回路」を開発した⁷⁾。

回路は4トランジスタ(増幅用SF Tr., 選択用SEL Tr., リセット用RST Tr., フィードバック用FB Tr.), 2容量(安定化容量 C_s , カップリング容量 C_c)から構成される。本回路では、ノイズキャンセル時の負帰還ループのゲインを $-A$ とした場合に、RST Tr.のノイズを $1/(A \times C_c/C_{fd})$,

図3 容量結合型ノイズキャンセル回路

FB Tr.のノイズを $1/\sqrt{(A \times C_s/C_c)}$ に比例して抑制できる。Aと C_s/C_c の両方またはどちらかを大きく設計することで、ノイズは5 μ sの時間で $25 e^-$ から $1.6 e^-$ まで抑制可能となる。また、 C_c を用いてFDと分離されたFB Tr.を制御することで、負帰還制御のロバスト性を向上し、高速かつ安定したノイズキャンセルを実現できる。

3.3 123 dB WDR撮像とLEDフリッカレス撮像

図4に試作した1画素2セルセンサで撮像した画像を示す。明暗差の非常に大きい高輝度ランプ前後の被写体(車や人形)を黒沈みや白飛びすることなく撮像することに成功している。大小二つのセルを同時に露光して読出することができるため、高速な動体に対しても時間ずれなく正確なセンシングが可能になる。

さらに、本画素構成は近年車載カメラで課題となっているLED標識のフリッカ対策にも有効である。高飽和セルで100倍明るい被写体を捉えることができるため、露光時間を短くすることなく、1フレーム期間に渡り露光し続けることができる。したがって、図5に示すようにLED点灯のタイミングに依らず、すべての行においてLED点灯を捉えることができ、特別な構成や信号処理を追加することなく

図4 ワイドダイナミックレンジ撮像例

図5 LEDフリッカレス撮像例

図6 光電変換制御グローバルシャッタの動作イメージ

LEDフリッカレス撮像を実現できる。

4. 光電変換制御グローバルシャッタ

従来のCISでは、画素内にメモリーを設けることでグローバルシャッタ機能の実現を図っていたため、メモリー部が光電変換部面積を圧迫し飽和電荷量が減少するという課題があった。そこで筆者らは、OPFに印加する電圧を変化させることのみで光電変換効率を制御することが可能な、光電変換制御グローバルシャッタ技術を開発した^{9) 10)}。これにより、飽和電荷量の減少がないグローバルシャッタ機能を実現できる。さらに、光電変換部と電荷蓄積部が縦方向に分離されており遮光が容易なため、寄生感度の抑制も可能である。

図6(a)にグローバルシャッタの動作イメージを示す。露光時は V_{ITO} をHighとし、光電変換された信号電荷をFDに保持する。他方、非露光時は V_{ITO} を下げ、上下電極間の電位差をゼロ近傍にする。OPF内に電界が生じないため、光入射によりOPF内で発生した電子正孔対は電極側に引き抜かれることなく、再結合し消滅させることができる。ITO電極は全画素で共通に接続されているため、露光の開始と終了のタイミングが全画素で同一となるグローバルシャッタを実現できる。その後、非露光状態で行走を行い、FDに蓄積された信号電荷を順次読出す。

この動作は多重露光にも応用できる。図6(b)のようにHigh期間の異なる V_{ITO} をパルス状に複数印加すれば、露光時間の異なる多重露光が可能となる。また図6(c)に示すように異なる波高値の V_{ITO} パルスを複数印加すれば、感度の異なる多重露光が可能となる。これにより、図6(d)に示すように1回の撮像で感度の濃淡から動体の形状・動作方向を正確かつ瞬時に捉えることができる。このように、ITO電極に印加する電圧制御のみで多機能なグローバルシャッタが可能となる。

図7 多機能グローバルシャッタの撮像例

図7に実際の撮像例を示す。図7(a)のローリングシャッタモードでは動体の画像が歪むのに対して、図7(b)のグローバルシャッタモードでは高速に回転する扇風機の羽根の形を正確に捉えることができている。また、図7(c)の露光時間を変えた多重露光では1回の撮像でも最適露光条件を得ることができ、羽根に書かれている文字が認識できる。図7(d)の感度の異なる多重露光では、ボールの軌跡を捉え、感度の濃淡から動き方向の情報を得ることに成功している。OPFがFDの面積を圧迫しないため、従来CIS¹⁾比10倍の業界最高飽和210 ke⁻を3 μ m画素チップで実現している¹⁰⁾。

5. 近赤外感度可変技術による電子IRカットフィルタ

従来のCISでカラー画像とNIR画像を取得しようとする場合、可動式のIRカットフィルタを挿抜する方法が最も一般的であり、多くのデイトカメラに搭載されている。しかし、可動機構はカメラの小型化を阻むため好ましくない。メカレスで同様の機能を持たせるためにRGBカラーフィルタ配列の一部をNIR透過フィルタに変更してNIR画素を構成する方式も考えられる^{11) 12)}。しかし、この方式では有効画素領域においてNIR信号取得に使用可能な画素数が少なくなり解像度が低下するという課題がある。

また、CISは光電変換部をSiで構成するが、Siは光学吸収端における光学遷移が間接遷移であるために吸収係数が低い¹³⁾。十分なNIR光量を吸収するためには光電変換部を数 μ m～数十 μ mの厚みにしなければならず、入射光の隣接画素への漏れ込みを防ぐ工夫(ディープトレンチアイソレーションなどの素子分離技術)が必要になる。このような背景から、限られた厚みのなかでNIR光の利用効率をさらに高めるために、表面微細構造を利用した実効的な光路長拡大技術も報告されている¹⁴⁾。

他方、OPFでは吸収係数がSiのそれよりも高くなるよう材料を設計・合成することができると、同じ感度を得るために必要な光電変換部の厚みを薄くできる。加えて、目的の波長に応じて材料の吸収スペクトルを任意に調整できるためNIR撮像には好適の光電変換材料といえる。

5.1 積層構造を利用した感度波長帯域の電子制御

OPFの感度波長をNIRまで拡張すると、カラー撮像時の色再現性を担保するために従来同様にNIR信号を除去する手段が必要になる。そこで、筆者らはOPFの感度が電圧に依存することに着目し、図8(a)に示すような抵抗分割に着想を得た積層構造を用いることでNIR感度の電子制御を可能にした¹⁵⁾。積層されたOPFは全画素共通のITO電極と画素電極に挟まれた構造をしており、 V_{ITO} は、RGB-OPFの抵抗(R_{RGB})とNIR-OPFの抵抗(R_{NIR})の比によって分配される。この抵抗比を適切に設計することで、一つの電圧供給源でそれぞれのOPFにかかる電圧 V_{RGB} と V_{NIR} を制御するという思想である。

図8(b)のように $R_{RGB} > R_{NIR}$ となるようにそれぞれのOPFを設計すると、 V_{ITO} はRGB-OPFに優先的に印加されるため、RGB-OPFの感度曲線が先に立ち上がる。 V_{ITO} を大きくするとNIR-OPFにも十分な電圧が印加されるようになり、NIR-OPFの感度曲線が立ち上がる。積層光電変換膜(Stacked OPF)の感度曲線は両者の重ね合わせになるため、2段の閾値をもつような特性となる。したがって、 V_{ITO} を変化させることでRGB-OPFのみが感度をもつ状態(図中 $V_{ITO}:L$)と、RGB-OPFとNIR-OPFの両方が感度をもつ状態(図中 $V_{ITO}:H$)とを全画素同時に切替えることができる。

図8 NIR感度制御の設計思想と分光感度スペクトル

図8(c)に試作したイメージセンサの分光感度スペクトルを示す。 V_{ITO} によってセンサの感度波長領域が異なることが見て取れる。 $V_{ITO}:H$ のときは、分光感度は可視光領域からNIR領域まで伸びる。NIR領域で最大感度を与える波長800 nmでの感度は可視光領域での感度と同程度を示す。他方、 $V_{ITO}:L$ とするとRGB-OPFのみが感度をもつ状態へと遷移し、波長700 nm以上に対する感度は消失する。このように電圧のみでイメージセンサのNIR感度をオン/オフ可能な、いわば電子IRカットフィルタ機能を実証できた。今回の試作では、オンチップカラーフィルタを実装していないが、便宜上 $V_{ITO}:H$ の場合をRGB+NIRモード、 $V_{ITO}:L$ の場合をRGBモードと呼ぶことにする。なお、NIR-OPFに用いる材料によって、最大感度を与える波長は任意に変更することができ、より長波長に感度をもたせることも可能である。この波長選択性が有機CISの大きな特長の一つである。

この特徴によれば、可動式IRカットフィルタは不要で、読出し回路も1画素につき一つでよい。積層数に応じて読出し回路が増える方式^{16) 17)}に比べて簡便な構造であり、画素サイズ縮小や多画素化に向いている。また、R、G、BそれぞれのカラーフィルタがNIRに対して同程度の透過率を持てば、従来のペイヤー配列を使うこともでき、カラー、NIRともに解像度ロスを防いだ高精細な撮像が可能になる。

5.2 電子IRカットフィルタ機能を利用した撮像例

試作チップを使った撮像例をいくつか示す。以下の例はすべて被写体に可視光照明とNIR照明の両方を照射し、イメージセンサの撮像モードを切替えることで2種類の画像を取得した。

夜間の監視を想定した例を図9(a)に示す。可視光のみに感度をもつRGBモードで撮像した結果では暗い場所の情報は取得できないが、RGB+NIRモードで撮像することにより暗所の視認性が向上する。当然ながら明るいシーンでは

図9 電子IRカットフィルタ機能を使った撮像例

図10 動体のフレームバイフレーム撮像例

RGBモードでの撮像によって色情報を取得することもできる。従来のデイトナイトカメラと異なり挿抜式のIRカットフィルタが不要になるため、構成部品の削減やカメラの耐久性向上が期待できる。また、物質を透過するNIRの特徴を利用し、物質内部の情報を非破壊で取得することもできる。図9(b)に示すようにRGBモードでは醤油の入った水槽の奥は視認することができないが、RGB+NIRモードで撮像することで水槽の奥に置かれたボトルのラベルがはっきりと認識できる。全画素を用いてNIR撮像ができるため、肉眼では捉えられない埋もれた情報を高精度に取得できる。

さらに、NIR感度を高速に電子制御できることで、フレームごとに感度波長領域を切替えた撮像も実現できる。この特長を利用し、高速に動く被写体の色情報とNIRを用いた不可視情報をわずか1フレームの差で交互に取得することができる。例えば、図10に示すように、NIRでのみ見えるQRコード等を用いた産業カメラシステムなどに応用できる。RGBモード撮像で色情報を含む外観検査を行い、RGB+NIRモード撮像で不可視QRコードの読取りを行うといったことを一つのイメージセンサで実現できる。不可視情報で生産・流通管理が行えるため、商品のデザインを損ねずにトレーサビリティを持たせるといった応用につながる。

6. むすび

筆者らが開発を進めている有機CISの最新動向について紹介した。イメージセンサの技術進化に対する社会の要求は「美しく撮る」だけでなく、「正確に撮る」、「次の動きを予測する」、「見えないものを撮る」などへとシフトしてきている。これは、イメージセンサの出力結果を人が見るのではなくモノが見る市場が広がっていることが大きな理由の一つであろう。筆者らは、光電変換部と信号処理部とを独立に設計するというアプローチでこうしたニーズに応えることを目指している。

また、有機光電変換材料のもつ波長選択性を積極利用したイメージセンサは不可視波長のイメージセンシングにおいて大きな潜在的魅力を秘めており、材料およびセンサデバイスのさらなる技術進化に尽力していきたいと思う。

(2017年11月30日受付)

〔文 献〕

- 1) M. Sakakibara et al.: "An 83dB-Dynamic-Range Single-Exposure Global-Shutter CMOS Image Sensor with In-Pixel Dual Storage", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.380-381 (Feb. 2012)
- 2) B. Wolfs et al.: "3.5 μ m global shutter pixel with transistor sharing and correlated double sampling", Proc. IISW, pp.397-400 (June 2013)
- 3) T. Kondo, et al.: "A 3D Stacked CMOS Image Sensor with 16Mpixel Global-Shutter Mode and 2Mpixel 10000fps Mode Using 4 Million Interconnections", Proc. Symp. VLSI Circuits, pp. C90-C91 (June 2015)
- 4) A. Y.-C. Chiou and C.-C. Hsieh: "A 0.4V Self-Powered CMOS Imager with 140dB Dynamic Range and Energy Harvesting", Proc. Symp. VLSI Circuits, pp. C86-C87 (June 2015)
- 5) W. Wakashima et al.: "A Linear Response Single Exposure CMOS Image Sensor with 0.5e⁻ Readout Noise 76ke⁻ Full Well Capacity", Proc. Symp. VLSI Circuits, pp. C88-89 (June 2015)
- 6) N. Akahane et al.: "A 200dB Dynamic Range Iris-less CMOS Image Sensor with Lateral Overflow Integration Capacitor using Hybrid Voltage Current Readout Operation", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.300-301 (Feb. 2006)
- 7) K. Nishimura et al.: "An Over 120dB Simultaneous-Capture Wide-Dynamic-Range 1.6e⁻ Ultra-Low-Reset-Noise Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.110-111 (Jan. /Feb. 2016)
- 8) M. Ishii et al.: "An ultra-low noise photoconductive film image sensor with a high-speed column feedback amplifier noise canceller", Proc. Symp. VLSI Circuits, pp. C8-C9 (June 2013)
- 9) M. Takase et al.: "First demonstration of 0.9 μ m pixel global shutter operation by novel charge control in organic photoconductive film", IEDM Tech. Dig., pp.30.2.1-30.2.4 (Dec. 2015)
- 10) S. Shishido et al.: "210ke⁻ Saturation Signal 3 μ m-Pixel Variable-Sensitivity Global-Shutter Organic Photoconductive Image Sensor for Motion Capture", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.112-113 (Jan. /Feb. 2016)
- 11) S. Koyama et al.: "A day and Night Vision MOS Imager with Robust Photonic-Crystal-Based RGB-and-IR", IEEE Trans. Electron. Devices, 55, 3, pp.754-759 (Mar. 2008)
- 12) W. Kim et al.: "A 1.5Mpixel RGBZ CMOS Image Sensor for Simultaneous Color and Range Image Capture", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.392-393 (Feb. 2012)
- 13) M.A. Green: "Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients", Solar Energy Mater. Solar cells, 92, 11, pp.1305-1310 (Nov. 2008)
- 14) S. Yokogawa et al.: "IR sensitivity enhancement of CMOS Image Sensor with diffractive light trapping pixels", Sci. Rep. 7, 3832 (2017)
- 15) S. Machida et al.: "A 2.1-Mpixel Organic Film-Stacked RGB-IR Image Sensor with Electrically Controllable IR Sensitivity", IEEE J. Solid-State Circuits, 53, 1, pp.229-235 (Jan. 2018)
- 16) T. Sakai et al.: "Color image sensor with organic photoconductive films", IEDM Tech. Dig., pp.30.3.1-30.3.4 (Dec. 2015)
- 17) Y. Takemoto et al.: "Multi-storied photodiode CMOS image sensor for multiband imaging with 3D technology", IEDM Tech. Dig., pp.30.1.1-30.1.4 (Dec. 2015)

町田 真一 まちだ しんいち 2013年、千葉大学大学院融合科学研究科博士後期課程修了。同年、パナソニック(株)入社。以来、有機CMOSイメージセンサの研究開発に従事。博士(理学)。

西村佳壽子 にしむら かずこ 1995年、大阪大学工学部制御機械工学科学士課程修了。同年、松下電器産業(株)(現パナソニック(株))に入社。以来、半導体、高速A/D変換器、光通信用LSI、RFチューナ、CMOSイメージセンサ等の開発に従事。

矢野三郎 ししどさんしろう 2006年、立命館大学理工学部電気電子工学科学士過程修了。2011年、奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科博士後期課程修了。同年、パナソニック(株)入社。CMOSイメージセンサ開発に従事。博士(工学)。

三宅 康夫 みやけ やすお 2007年、豊橋技術科学大学電気電子工学専攻修士課程修了。同年、パナソニック(株)に入社。CMOSイメージセンサの製品開発、有機CMOSイメージセンサの研究開発に従事。

徳原 健富 とくはら たけよし 2013年、東京大学工学系研究科電気系工学専攻修士課程修了。同年、パナソニック(株)に入社。以来、有機CMOSイメージセンサの研究開発に従事。

柳田 真明 やなぎだ まさあき 2010年、法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年、パナソニック(株)に入社。以来、CMOSイメージセンサの製品開発、有機CMOSイメージセンサの研究開発に従事。

中田 学 なかた まなぶ 2005年、同志社大学工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年、松下電工(株)(現パナソニック(株))に入社。以来、有機デバイス開発に従事。現在、有機CMOSイメージセンサの研究開発に従事。

村上 雅史 むらかみ まさし 1999年、同志社大学工学部電子工学科修士課程修了。同年、パナソニック(株)に入社。以来、CMOSイメージセンサに関わる研究開発を担当。現在、有機CMOSイメージセンサの研究開発に従事。

原田 充 ほらだ みつる 1991年、長岡技術科学大学材料開発工学専攻修士課程修了。同年、パナソニック(株)に入社。以来、熱硬化・紫外線硬化接着剤、導電性接着剤、蛍光体などの材料開発を担当。現在、有機CMOSイメージセンサの研究開発に従事。

井上 恭典 いのうえ やすのり 1985年、京都大学工学研究科金属加工学修士課程修了。同年、三洋電機(株)に入社。以来CMOS SOCのプロセス、デバイス技術の開発に従事。2012年以降、パナソニック(株)にて、有機イメージセンサの開発責任者として研究開発に従事。工学博士。