

セル内電子増倍センシング技術の開発と撮像素子への適用

三洋電機株式会社 研究開発本部
 アドバンスドデバイス研究所
 ナノデバイス研究部 担当課長
 清水 竜

1. はじめに

光、温度、圧力や音など、我々の生活環境に含まれる多様な情報を感知して電気信号に変えるセンサデバイスが、日々の生活に欠かせないものとなって久しい。図1に近年のセンサに要求される事項を示しているが、中でも、情報検知における『高感度化』は、センサに対する普遍的な要求と位置づけられる。

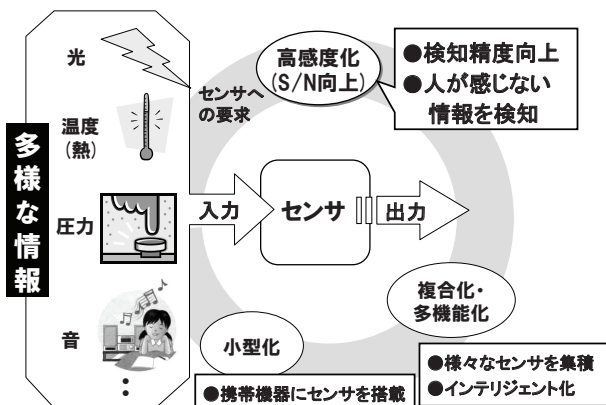


図1 センサへの要求

例えば、監視カメラ・車載カメラ等に利用されるイメージセンサにおいては、暗所撮像の要求が高く、高感度化が期待される代表的な例である。暗所撮像は検知する光の量が極端に減少するため、ノイズの影響を抑えながら(S/Nの劣化を最小限にしながら)信号伝送することが重要となる。

図2は、測定情報が入力され、電荷の形で検出され、電圧の形で出力されるセンサにおける信号の

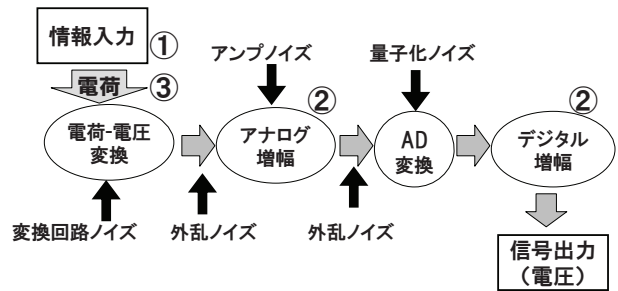


図2 センサの信号伝送の流れ

流れを示している。この過程で、様々な形のノイズが重畳されるため、特に微小信号を伝送する場合には、最終的な電圧出力段階でのS/Nが劣化し問題となる。

このような情報入力が微量な場合には、信号を増幅する必要が生じるが、表1にその方式を比較する。

①の情報入力部を大型化して信号を増やす方式は、最も良好にS/N特性を改善できるが、一方で、デバイスの小型化に対して不利であり、高感度化と小型化はトレードオフの関係にある。情報入力部を大型化しなくても、②のように後段のアナログまたはデジタルのアンプでゲインアップする方法も用いられているが、本質的には信号もノイズも同等に増幅してしまうため、S/N特性が向上することはない。

表1 信号増幅方式の比較

方式	低ノイズ(高感度)	小型化(アレイ化)	コスト
① 情報入力部の大型化 入力部が受ける情報を増やす	○	△	△
② 電圧増幅法(アナログ、デジタル) アンプで増幅	△~×	○	○
③ 電子増倍法 信号電荷そのものを増倍	○	○	○

これに対して我々は、情報入力部で発生した信号電荷を、その直前で電荷のまま増幅する③の電子増倍法に着目し、センシングの最小単位である単位セル毎に増幅・出力する『セル内電子増倍センシング技術』を開発するとともに、その効果をイメージセンサの暗視性能向上という形で実証した。

2. 固体素子における電子増倍技術

前述のように、信号経路が後段に進んでノイズが重畳する前に(図2参照)、情報入力直後の電荷段階で信号を増幅させることができれば、最終の電圧出力時点でのノイズの影響が低減できるため、特に微小信号時のS/N特性を改善することが期待できる。

この電荷段階での信号増幅、いわゆる電子増倍としては、光電子増倍管と呼ばれる一種の真空管を用いる方法が有名である。また、小型化が期待できる固体素子に関しては、電荷転送手段として実績のあるCCD転送技術を用い、転送経路内に意図的に高電界領域を形成することにより、電界強度に応じた電子増倍現象が得られることが報告されている[1]。この効果を用いて暗所でのイメージセンサの撮像性能を向上させる、『電子増倍型CCDイメージセンサ』は、小型で低照度時の感度・画質を向上させるデバイスとして知られている[2][3]。これらは画素領域の電荷をシリアルに転送し、共通の出力部で順次出力する、CCDイメージセンサの構成に対し非常に適合性が良い(図3参照)。

電荷は、4本単位でシリアルに並べられた『電子増倍レジスタ』と呼ばれる多数本の転送ゲートにより同図上に示す矢印の方向に順次転送される。この際、 Φ_4 に、信号電荷の衝突電離による電子-正孔対の形成(インパクトイオン化)が起こせるだけの電圧をかけることにより、 Φ_2 の蓄積ゲート下から Φ_4 の増倍ゲート下への転送時に信号電荷が増倍するようになっている。また、これら2本のゲート下領域間を隔てるように設けた、 Φ_1 、 Φ_3 のゲートで、転送を制御している。この4本で構成される最小単位の繰り返しユニット数と、 Φ_4 に加えられる電圧により、信号の増幅率が決定される(一回の増倍転送に際して、インパクトイオン化現象が発生する確率は小さいため、多段の転送ユニットを通過させる必要がある)。同図下に示すよう

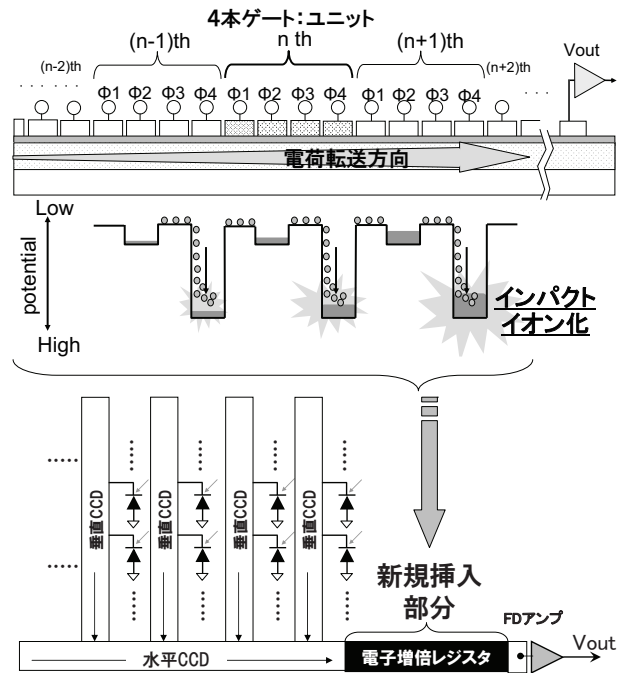


図3 電子増倍CCDの増倍転送部構成
(上:電子増倍レジスタ断面、下:センサ平面構成)

に、通常の垂直CCD→水平CCDの転送を経て、この電子増倍レジスタに入力する段階で信号レベルが微小であった場合でも、このレジスタ部分を経て最終的に信号電荷が増幅された状態ならば、同図の“Vout”段階以降で重畳するノイズの影響が相対的に小さくなり、結果としてS/Nを改善できる。

一方、この多段転送を用いたCCD電子増倍方式のデメリットとしては、シリアル順次転送のため出力速度が制限されたり、撮像エリア内に配列された画素毎の独立制御が不可能である点が挙げられる。

そこで我々は、個々の受光セル内に電子増倍、電荷-電圧変換機能を有し、直接アドレス指定による読出しが可能な『セル内電子増倍センシング技術』を新規に開発し、『電子増倍機能を持つCMOSイメージセンサ』を実現した。更にこれを用いて暗視環境での撮像性能向上効果を評価することにより、微小信号の増幅効果を確認した[4][5]。

3. 新規デバイス構造および駆動方式

3-1. 回路構成

今回我々が開発した撮像素子は、全体的には、マトリクス状に配置された画素群と信号読み出し用の水平・垂直コーダ、およびアナログフロントエンドで構成され、カラ

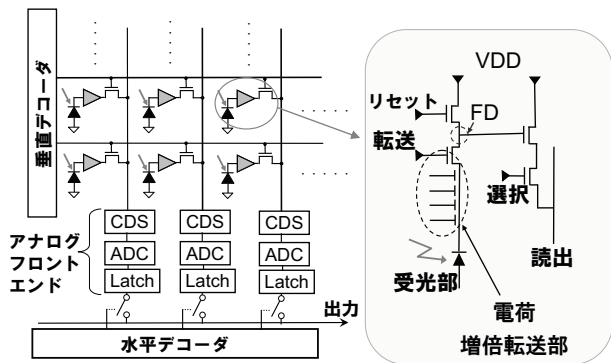


図4 全体ブロック図と画素内回路構成

ム処理型CMOSイメージセンサとなっている(図4左)。特徴としては、各画素内のフォトダイオードの直後に、電子増倍転送部を持つことが挙げられる(図4右)。

画素内の回路について更に詳述すると、光電変換を行なうフォトダイオードが形成された受光部と信号検出のために設けられたフローティングディフュージョン(FD)領域の間に、各画素同時に同期制御される4本の制御ゲートが付加されている。

この結果、各画素内に構成された電子増倍転送部が、それぞれの画素内で一齐に電荷段階での信号増幅を行ない、各画素のFD以降でのノイズの影響を低減できる構造となっている。

3-2. 増倍動作

画素構造の断面図を図5に示す。各々の画素は前述の通り、画素領域全体で同期制御される4本のゲート($\Phi 1 \sim \Phi 4$)と、従来のCMOSセンサと同様に水平及び垂直方向のデコーダ制御で順次制御される転送ゲート($\Phi 5$)を持っている。それぞれのゲートは、印加バイアスのクロック制御により電荷を転送する機能を有している。

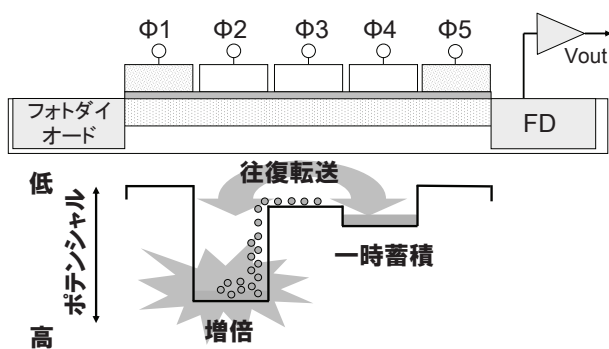


図5 画素内断面模式図

前述の電子増倍CCDと同様に、1回の転送におけるインパクトイオン化確率は低いため、有意な信号増幅を行うためには、インパクトイオン化を連続して何回も行なう必要がある。そこで我々は、増倍転送を画素内で往復しながら繰り返し行なう『往復増倍転送』という全く新しい方式を開発した。往復増倍転送方式では、信号増幅を行なう増倍転送部と、それに対して両端で信号漏れを防止するポテンシャルバリアが必須となる。従って、前者の往復転送制御のために3本($\Phi 2$ 、 $\Phi 3$ 、 $\Phi 4$)、後者のバリアのために2本($\Phi 1$ 、 $\Phi 5$)からなる合計5本の制御ゲートを有する。

この図においては、 $\Phi 2$ ゲートに電界加速によるインパクトイオン化が起こせるだけの電圧を印加することにより、直下の領域に深いポテンシャル窪みを実現する『増倍』ウエルを形成している。信号電荷が $\Phi 4$ ゲート直下の『一時蓄積』ウエルから、 $\Phi 2$ ゲート直下の『増倍』ウエルに転送される際に、形成されたポテンシャル段差によりエネルギーを受け、インパクトイオン化による信号電荷の増倍が起こる。

増倍された電荷は、再度 $\Phi 4$ ゲート直下の『一時蓄積』ウエルに戻され、この状態からさらに $\Phi 2$ ゲート直下に転送され、増倍ウエルでの電界加速が再度行なわれる。この動作を任意回数繰り返すことにより往復増倍転送が実現される。こうして各画素一齐に同じタイミングで電子増倍が行なわれ、所望のレベルまで増倍された信号電荷は $\Phi 4$ ゲート下の『一時蓄積』ウエルに蓄積され、 $\Phi 5$ のゲートが開く読出しタイミングまで待機する。

本構造では、増倍回数が増倍ゲートの繰り返しユニット数で規定される電子増倍CCDとは異なり、往復転送回数を制御することにより、出力信号レベルを調整することが可能となる(電子増倍CCDでは出力の調整のため電圧制御機構が必要となる)。また、増倍終了後、一時蓄積ウエルに最終の信号電荷を同時に転送し、デコーダ制御で順次読み出すため、イメージエリアの全画素に対し、露光開始、露光終了、さらには増倍のタイミングを揃えることが可能であり、高速で動作する被写体に際しても、読出し順に起因する二次元歪みを抑制できるという特徴を持っている。

3-3. 駆動シーケンス

電子増倍型CMOSイメージセンサの駆動タイミングチャートを図6に示す。駆動シーケンスは4つのフェーズに分けられる。

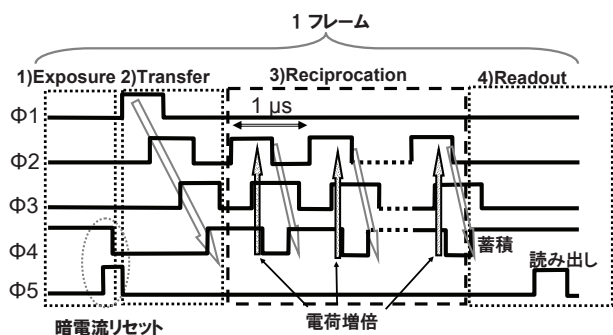


図6 駆動タイミングチャート

1)Exposure:

全画素同時に露光を開始し、フォトダイオードで受光により生じた電荷の蓄積を行なう。この露光期間に往復増倍転送部で蓄積されてしまう意図しないノイズ電荷(暗電流)は、あらかじめ特定領域(本例ではΦ4ゲート直下)に集められ、光電変換された信号電荷がフォトダイオードから導入されてくる直前に、FD側に排出される。

そして露光期間が終了すると、全画素で蓄積された電荷が一斉にフォトダイオード領域から増倍転送ユニットに送り出される。

2)Transfer:

Φ1~Φ4のゲートを順にONすることで、フォトダイオードに蓄積された信号電荷をΦ4ゲート下に転送する。

3)Reciprocation:

Φ3のゲートをOFFした状態でΦ2のゲートをONし、高電界を作り出す。続いて、Φ3のゲートをONすることで電荷をΦ4ゲート直下からΦ2ゲート直下に転送し、インパクトイオン化を起こす。次に、Φ2ゲート直下に転送された増倍電荷は、Φ3・Φ4のゲートが順にONされることで再びΦ4ゲート直下に戻される。駆動周波数として1MHzを用いているため、増倍転送駆動の周期は約1μsである。所望の増倍率が得られる回数分、繰り返し駆動を行って増倍した後、Φ4ゲート直下に信号電荷を蓄積し、Φ5ゲートによる読み出しが開始されるまで電荷を保持する。

4)Readout:

Φ5のゲートをライン毎に順次ONし、読み出しを行なう。

4. 実験結果

セル内電子増倍センシング技術の有効性を実証するため、0.35μm、2-poly、4-メタルプロセスを用いて試作したイメージセンサのチップ写真を図7に示す。

11万画素の解像度を、1/3型の光学サイズと、10μmの画素ピッチにより実現している。イメージセンサとしてのデバイス仕様は表2に示す通りである。

4-1. 増倍特性

試作したイメージセンサにおいて、増倍ゲート(Φ2)に印加する電圧や、往復転送回数を変化させて動作させ、11万画像から抽出した32×32画素について増倍率を評価した結果を図8に示す。

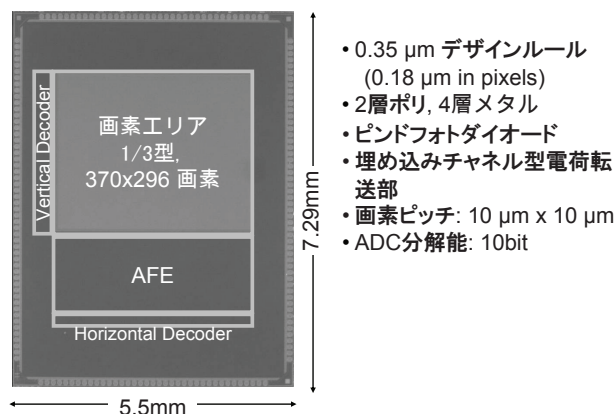


図7 試作イメージセンサのチップ写真

表2 デバイス仕様

ピクセルサイズ	10×10 μm ²
光学サイズ	1/3 型
センサータイプ	CMOS Image Sensor
駆動電圧	3.3V/12.5V
画素数	370×296
フレームレート	30frames/s
飽和電圧	700mV
感度(非増倍時)	800mV/lx·s
暗電流	40-ele/s
ノイズフロア	10-ele
ENF(F)	1~1.4
増倍ゲイン	1~100

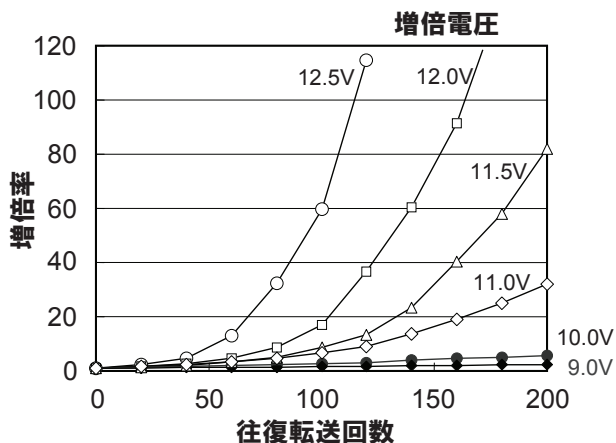


図8 信号増幅特性

各画素でそれぞれ光電変換と電圧検出まで行なうCMOSイメージセンサにおいて、往復転送回数及び印加電圧に応じて信号増幅、すなわちセル内での電子増倍効果が得られることを初めて実証することができた。

この際、信号増幅率は往復転送回数に対して指数関数的に増加しており、アバランシェ効果は見られていない。すなわち本デバイスの1回の増倍転送においては、インパクトイオン化は最大1回しか発生せず、出力ゲインは完全に増倍転送回数だけで制御できる条件下で使用していることになる。

4-2. S/N特性の評価

次に、電子数(明るさ)に対するS/N特性を評価した結果を示す。図9は、信号出力の強度とばらつきによりS/Nを評価し、電子増倍を行った場合と、行わなかった場合について比較した結果である。

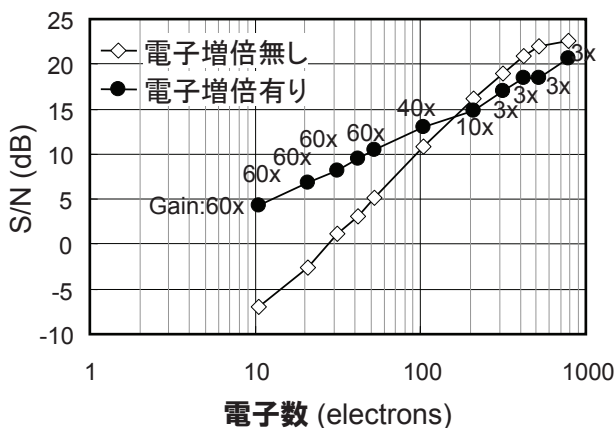


図9 S/N特性の評価結果

グラフより、今回のセル内電子増倍の動作が少電子数、すなわち低照度環境下でのS/Nを向上させていることが判る。

これは本開発の狙い通り、各画素で増倍を行なうデバイスにおいても、フォトダイオード直後で微小信号電荷を増倍することにより、後段で重畳される画素内ノイズの影響を良好に低減できていることを示している。一方で、高照度環境下でのS/Nは電子増倍に特有のExcess Noise[6]の影響により改善しない。このように、照度に応じたS/N特性の面で、電子増倍という現象の特性が観測できた。

尚低照度環境で用いた増倍60倍の条件は、100回の往復転送で実現しているため(図8参照)、1MHz動作での所要時間は1フレームあたり100 μ sと、一般的なイメージセンサのフレームレート(30-60fps)に対して極めて短時間であった。

4-3. 増倍特性の面内ばらつき評価

本センサは各々の画素に独立した電子増倍ユニットを持つため、一つの電子増倍レジスタを各画素で共有している電子増倍CCDと比較して、画素間の増倍ばらつきが増倍動作に伴い増大することが懸念される。そこで我々は、増倍ゲインの面内ばらつきを評価した。

増倍率の面内ばらつきの評価結果を図10に示す。横軸は電子増倍の往復転送回数、縦軸は増倍率と標準偏差(左)と増倍率で規格化した標準偏差(右)を示している。評価画素数は11万画面から抽出した32 \times 32の1024画素であり、異なる4段階の照度においてそれぞれ連続32回の撮像を行

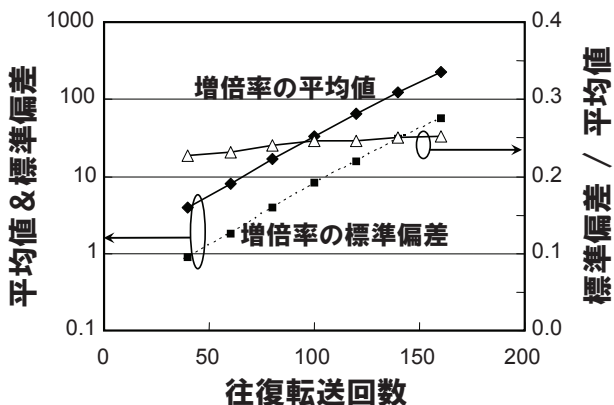


図10 増倍率の面内均一性評価

い、各点における出力ばらつきを吸収するようにしている。グラフ内にプロットされている1点がそれぞれ、この1024点からの統計データである。

面内増倍率の標準偏差は往復転送回数を増すにつれて増大しているが、面内の平均値自体もそれと並行するように上昇し、平均値で規格化した標準偏差は増倍転送回数に依存せず、ほぼ一定であることが確認できた。

これにより、往復転送回数の増加に起因して増倍率の面内ばらつきが視覚上の劣化をもたらすことはなく、多数回の往復転送条件においても良好な画像取得ができるということが示された。

4-4. 2次元画像撮像結果

低照度環境下(0.4lx)での撮像画像を図11に示す。

左図(a)に全くゲインをかけないリファレンス画像を示しているが、暗所であるため殆ど何も見えていない。

それに対して60倍のデジタルゲイン付加により、右上図(b)のように、明暗の境界のみ認識できている。しかしながらこの図では、中間階調が失われ二値化傾向が見られている。

下図(c)に(b)と同じ60倍のゲインを、電子増倍で付加した例を示す。この場合は中間階調も良好に得られ、(b)のデジタルゲインではノイズに埋もれ判別できない四隅の模様も判別可能になっている。

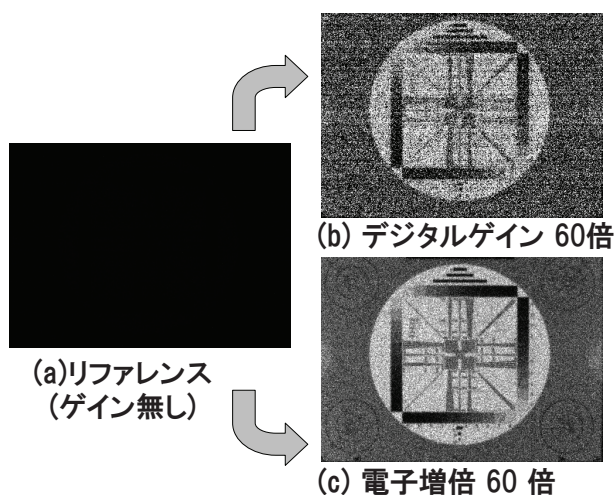


図11 暗所(0.4 lx)での2次元画像取得例

5. ま と め

センサが検知する情報を、セル内の情報入力部の直近で、電荷の状態のままセル毎に増幅する、『セル内電子増倍センシング技術』を開発し、その効果をイメージセンサの暗視性能向上という形で実証することができた。

本技術をイメージセンサに適用すると、スミア・フリー、高速読出し、ランダムアクセスなどのCMOSイメージセンサ特有のメリットに、従来CMOS型では不利であった高感度性能を付加することができ、高機能かつ暗視性能に優れた小型イメージセンサが実現できる。

一方、このセル内電子増倍センシング技術は、情報を電荷の形で検出するセンサであれば、イメージセンサ以外への展開も可能である。例えば、赤外光を吸収して特性変化する薄膜を情報入力部に用いて、電荷量の変化を高感度に検出する二次元温度イメージャ、セル毎に異なるガス種に対する反応性を持たせ多種のガスを高感度で検出する複合ガスセンサ、またはウイルス等極端に質量の小さい物質のセンシングにも適用可能と思われる。これらを例とした様々な用途に対して、電子増倍のもたらす高感度化と、セル毎での並列処理構造による高速処理やセル選択性等の利点が、有効になっていくだろう。

今後さまざまな種類の情報検知技術と、半導体基板内での電荷転送を利用したセル内電子増倍技術とを連携するセンサ信号処理技術の開発が進み、更なるアプリケーションが広がっていくことを期待するものである。

■ 参 考 文 献

- [1] S. K. Madan, et al., "Experimental Observation of Avalanche Multiplication in Charge-Coupled Device", IEEE trans. Electron Devices, vol. ED-30, pp. 694-699, June 1983.
- [2] J. Hynccek, "Impactron-A New Solid State Image Intensifier", IEEE trans. Electron Devices, vol. ED-48, No.10., pp. 2238-2241, Oct. 2001.
- [3] Paul Jerram, et al., "The LLLCCD:Low Light Imaging without the need for an intensifier", Proc. SPIE, vol. 4306., pp. 178-186, 2001.
- [4] Ryu Shimizu, et al., "A Charge Multiplication

CMOS Image Sensor Suitable for Low Light Level Imaging”, ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 50-51, Feb., 2009.

- [5] 大野俊和他, “電荷増倍型CMOSイメージセンサの開発”, 映像情報メディア学会技術報告, 33(18)[2009.3] pp. 5-8
- [6] M. S. Robbins, et al., “The Noise Performance of Electron Multiplying charge-coupled devices”, IEEE trans. Electron Devices, vol. 50. Issue:5, pp. 1227-1232, May. 2003.

■ 謝 辞

本稿をまとめるにあたりご助言をいただいた、三洋電機(株) 研究開発本部アドバンスデバイス研究所の、井上所長、深瀬部長、秋月部長、及び実験データの取得と議論につきご協力いただいた同研究所の、有本護、中島勇人、実沢佳居、大野俊和、能勢悠吾、渡邊敬輔、大山達史の各氏に感謝します。



清水 竜(しみず りゅう)

1987年 神戸大学 工学部(電気) 卒業

1987年 三洋電機(株) 入社

入社～1989年

シンクロトン放射光応用技術の研究開発

1989年～2004年

光リソグラフィ、LSIプロセスインテグレーションの研究開発

2004年～現在

イメージセンサデバイス・プロセスの研究開発、
現在に至る

担当業務専門技術分野:

センサデバイス・プロセス技術の研究開発

