

研究種目： 基盤研究(A)
 研究期間： 2007～2009
 課題番号： 19206040
 研究課題名（和文） 極端明暗撮像を可能にするフォトンカウンティング撮像デバイスに関する研究
 研究課題名（英文） A Study on Photon-Counting Image Sensors for Extremely Wide Dynamic Range Imaging
 研究代表者
 川人 祥二 (KAWAHITO SHOJI)
 静岡大学・電子工学研究所・教授
 研究者番号： 40204763

研究成果の概要（和文）：本研究では、極端な明暗差にも対応できる広ダイナミックレンジ特性と超高感度特性とを両立する次世代の撮像デバイスの実現を目的とし、相関多重サンプリングとノイズヒストグラムを用いた熱ノイズ及びRTS(Random Telegraph Signal)ノイズの低減等に関して研究を行ったものである。これらを試作撮像デバイスに適用し、ヒストグラムのメジアンで1.1電子という極めて低雑音の特性、ノイズヒストグラムやトランジスタの駆動電流スイッチングでRTSノイズが低減されることが初めて示された。

研究成果の概要（英文）：In this study, photon counting image sensors for extremely wide dynamic range imaging have been investigated. The proposed noise reduction methods using correlated multiple sampling and histogram-based RTS (random telegraph signal) noise reduction are applied to an implemented prototype image sensors. The measurement results show that very low noise level of 1.1e⁻ as median of the noise histogram can be attained and the histogram-based RTS noise reduction methods are effective for reducing RTS noise.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2008年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2009年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
年度			
年度			
総計	23,100,000	6,930,000	30,030,000

研究分野：撮像デバイス

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：極端明暗撮像，無雑音検出，広ダイナミックレンジ，相関多重サンプリング処理，RTSノイズ，1電子制御

1. 研究開始当初の背景

従来のフォトンカウンティングレベルの超高感度撮像技術は、すべて衝突電離を基本原理とする電子増倍を用いている。電子増倍は、1光子に対して多数の電子を発生す

ることから、ダイナミックレンジの犠牲の上に成り立つ原理であるといえる。本研究では、電子増倍によらない新しい原理のフォトンカウンティング撮像方式に基づき、極端な明暗差にも対応できる広ダイナミッ

クレンジ特性と超高感度特性とを両立することができる次世代の撮像デバイスの実現を目指すものである。超高感度撮像技術としては、イメージンテンシファイアの利用、HARP撮像管、電子打ち込みCCD等が実用化されている。最近CCDの出力段で、インパクトイオン化による電子増倍を用いた高感度CCDイメージセンサが開発され、バイオイメージング分野での応用が進みつつある。これらは、いずれも光電子増倍を用いるもので、1フォトンによって多数の電子を発生させるため、ダイナミックレンジが犠牲になるとともに、高電圧を用いることなどから簡便な取り扱いができない等の課題がある。バイオイメージングや分光計測等の分野において、フォトンカウンティングレベルの超高感度特性と広ダイナミックレンジを満たすことができるデバイスの実現が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、光電子増倍によらない原理に基づくフォトンカウンティング撮像の実証を最終的な目的とするとともに、信号処理機能を撮像デバイス上に集積化できる CMOS 撮像デバイスの特徴を活かし、1電子以下のノイズレベルと 90dB 以上の広いダイナミックレンジとの両立が可能とする実用的にも新しい価値を有する超高感度撮像デバイスの実現を目指すものである。

3. 研究の方法

撮像デバイス上に集積化し、ランダムノイズ低減を図る信号処理アルゴリズムについて考察し、アルゴリズムレベルでのシミュレーション、回路シミュレーション等によってその効果を予測する。これらの処理回路を実際に集積化した CMOS 撮像デバイスを実際に設計・試作する。画素内トランジスタとして、ノイズを最小にするトランジスタ構造・サイズの調査を目的とした TEG (Test Element Group) チップを試作する。これらの特性測定によって、提案する信号処理方式のノイズ低減効果やダイナミックレンジの評価、デバイスと信号処理回路を含めた特性評価を行う。その結果に基づき、さらなる低ノイズ化の実現に向けた改良設計・試作に活用する。

4. 研究成果

図1は、本研究者が提唱したマルチステップ量子化を用いたフォトンカウンティング撮像の効果を示すノイズ電力の計算結果を示している。横軸は、等価ノイズ電子数を

示しており、縦軸は、量子化後のノイズ電力と量子化前のノイズ電力の比である。マルチステップ量子化を用いると、等価ノイズ電子数が 0.4 以下になると、その効果が表れ、0.1 以下では、量子化効果により無雑音検出が可能となる。実際、別の計算結果では、等価ノイズ電子数が 0.1 の場合、10,000 回の信号の積算をデジタル領域で行っても、積算後のノイズは殆ど現れない。

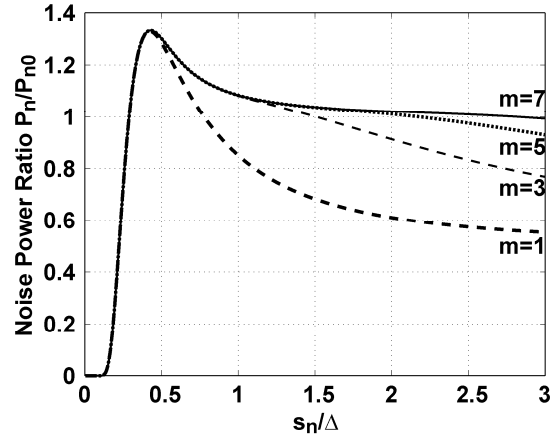


図1 量子化によるノイズ低減効果。

このように等価ノイズ電子数として 0.1 電子の達成が、電子増倍を用いないフォトンカウンティングを実現する究極のノイズレベルであり、本研究課題の最終目標でもある。

この目標に向けて、増幅型画素回路における内部トランジスタが発生するノイズの低減が必要となる。その手法として、カラム並列型相関多重サンプリングと呼ぶ高利得ノイズキャンセル回路を提案し、これを実際に CMOS 型撮像デバイスに適用して、そのノイズ低減効果を確認した。さらに、トランジスタの $1/f$ ノイズ、RTS (Random Telegraph Signal) ノイズの低減に効果があると期待されるサンプリングと同期した駆動電流スイッチングの効果についても確認した。

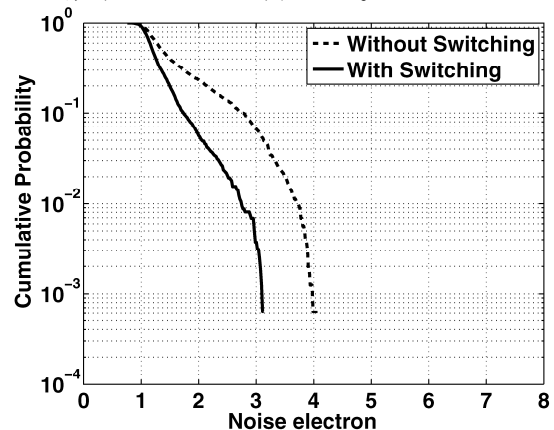


図2 ノイズ振幅と累積確率

図2に、その測定結果を示す。これは、幾つかの構造及びサイズの駆動トランジスタをもつ画素について、それぞれ約2000画素からなるプロトタイプ撮像デバイスを試作し、その中の1種類についての測定結果であり、2000画素のノイズ振幅に対するヒストグラムから求めた累積確率を示している。駆動電流スイッチングを用いない場合でも10%の画素では、ほぼ1電子以下が達成されている。駆動電流スイッチングは、RTSノイズが支配的となる大きな比較的ノイズ振幅をもつ画素に対して効果があり、分布が左方向(低ノイズ側)に移動していることが分かる。劇的な変化ではないが、駆動電流スイッチングがCMOS撮像デバイスのRTSノイズの低減に効果があることが初めて示された。

さらに効果的にRTSノイズ低減を図る方式として、多重サンプリングにより得られたサンプル値のヒストグラムを用いてRTSノイズの低減を図るHBRC(Histogram-Based RTS-Noise Canceling)法を提案し、これを試作したCMOS撮像デバイスのRTSノイズの大きい画素に適用し、そのノイズ低減効果を確認した。図3にその測定結果を示す。RTSノイズの緩和時間が長い(Slow Relaxation)と緩和時間が長い(Fast Relaxation)RTSノイズが表れている画素出力に、HBRC法と、単純な相関多重サンプリング(CMS)法を適用した結果を示す。サンプリング回数が少ない場合は、顕著なノイズ低減効果が見られないが、サンプリング回数を30以上に増やすと、いずれに方式も、大きなノイズ低減効果が得られる緩和時間が長いRTSノイズに対して、HBRC法の方がより高いノイズ低減効果が得られている。128回のサンプリングでは、約1/10にノイズ低減がなされている。

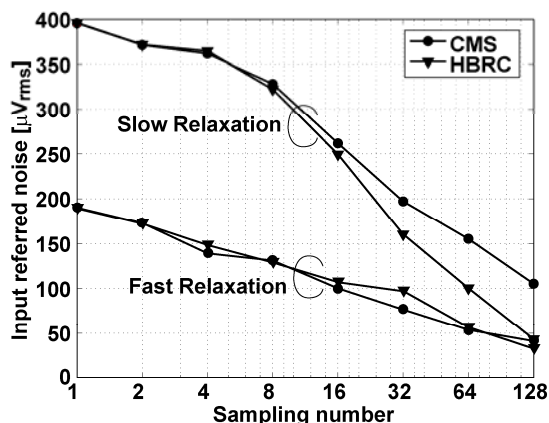


図3 CMS法、HBRC法のノイズ低減効果

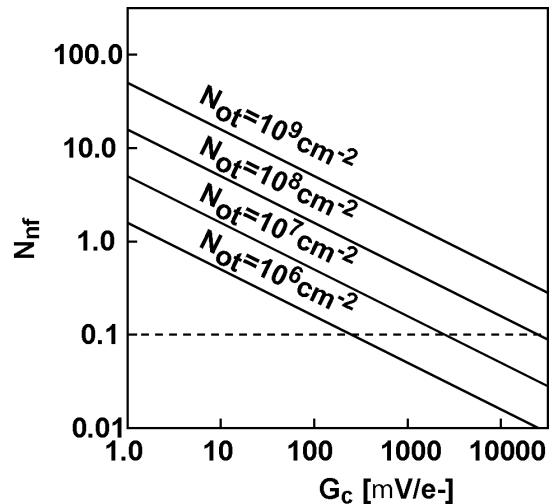


図4 トランジスタ1/fノイズが支配する場合の変換利得と等価ノイズ電子数

現状では、ノイズレベルは比較的ノイズの低いピクセルでも約1電子をやや下回る程度にとどまっているが、これはトランジスタの1/fノイズが制限を与えていることがわかっており、特殊な検出構造を用いて極めて高い変換ゲインが実現できれば、1/fノイズがあっても目標とする0.1電子の達成の可能性がある。図4は、その計算結果であり、パラメータNotは、1/fノイズを発生するMOSFETのチャンネルの実効トラップ密度である。Not=10⁷cm⁻²程度は実現可能であり、このとき変換利得として1電子あたり3mVを実現できれば、0.1電子を達成できる可能性がある。

HBRC法は、サンプル値をカラムでA/D変換し、デジタル領域での処理でノイズを低減するものであるため、積算によってダイナミックレンジが失われないため、極低ノイズと広いダイナミックレンジの両立が可能である。これに必要なカラムでA/D変換を行うあらゆる方式を考案し、実際に試作して、その性能を評価している。A/D変換器のみで2.5電子、画素まで含めて4.5電子のノイズレベルと71dBのダイナミックレンジが13ビットのデジタル出力において得られている。カラム並列A/D変換器単体で71dBのダイナミックレンジは、発表当時(2009年2月)においてもっとも高い性能である。

フォトンカウンティングレベルの低ノイズ化は、信号を読み出す際にトランジスタが発生するノイズが、その実現を困難にしている。半導体内で完全に空乏化された領域での電界制御により1電子の単位で移動を繰り返す撮像方法を取れば、半導体内でフォトンカウンティングと同じ動作が行える。このような発想を、時間分解撮像に応用し、微弱な蛍光寿命をサブナノ秒の分解能で計測することができることを試作によって初めて示した。これは、本研究から派生した重要な成果

であり、バイオイメージングの分野での有用な撮像技術となるものである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- 1) M. A. Mustafa, S. Itoh, S. Kawahito, “Reduction of random telegraph signal (RTS) noise in CMOS image sensors using histogram analysis,” Journal of Automation, Mobile, Robotics & Intelligent Systems, Vol.3, No.4, pp. 202-203, 2009. 査読有
- 2) S. Shafie, S. Kawahito, I. A. Halin, W. Z. W. Hasan, “Non-linearity in wide dynamic range CMOS image sensors utilizing a partial charge transfer technique,” MDPI Sensors, vol.9,no.12,pp. 9452-9467, 2009. 査読有
- 3) J. H. Park, S. Aoyama, T. Watanabe, K. Isobe, S. Kawahito, “A high-speed low noise CMOS image sensor with 13-b column-parallel single-ended cyclic ADCs,” IEEE Trans. on Electron Devices, vol.56,no.11, pp2414-2422,2009. 査読有
- 4) H. J. Yoon, S. Itoh, S. Kawahito, “A CMOS image sensor with in-pixel two-stage charge transfer for fluorescence lifetime imaging,” IEEE Trans. Electron Devices, vol.56, no.2, pp. 214-221, 2009. 査読有
- 5) A. Shafie, S. Kawahito, H. J. Yoon, S. Ito, “A dynamic range expansion technique using dual charge storage in a CMOS APS and multiple exposures for reduced motion blur,” J. Inst. Image Inf. TV Eng., vol.62, no.12, pp. 2037-2044, 2008. 査読有
- 6) S. Shafie, S. Kawahito, S. Itoh “A dynamic range expansion technique for CMOS image sensors with dual charge storage in a pixel and multiple sampling,” MDPI sensors 2008, vol.8, pp.1915-1926,2008. 査読有
- 7) S. Kawahito, “CMOS imaging devices for new markets of vision systems,” IEICE Trans. Electron., vol. E90-C, no.10, pp.1858-1868,2007 (invited paper). 査読有

[学会発表] (計 28 件)

- 1) 川人祥二, “高速低ノイズ撮像のためのコラム読み出し回路の設計技術,” 映像情報メディア学会情報センシング研究会 3 月研究会, 2010.3.26, 東京.
- 2) S. Kawahito, “Column readout circuit design for high-speed low-noise imaging,” 2010 IEEE Int. Solid-State Circuits Conf., 2010.2.11, San Francisco.
- 3) 川人祥二, “CMOSイメージセンサーの現状と将来,” 映像情報メディア学会東海支

部技術講演会, 2010.1.27, 浜松.

- 4) S. Kawahito, “Recent progress of CMOS imaging devices,” The 16th International Display Workshops, 2009.12.11, Miyazaki.
- 5) 川人祥二, “CMOS イメージセンサの技術動向,” 電子ジャーナル第 216 回 Technical Symposium, 2009.9.25, 東京.
- 6) M. A. B. Mustafa, S. Itoh, S. Kawahito, “Reduction of random telegraph signal (RTS) noise in CMOS image sensors using histogram analysis,” Inter-Academia 2009, 2009.9.16, Kazimierz.
- 7) 川人祥二, “CMOSイメージセンサの最新技術動向,” アドバンテスタアカデミー講演会, 2009.7.8, 群馬.
- 8) S. Kawahito, S. Suh, T. Shirei, S. Ito, “Noise reduction effect of column-parallel correlated multiple sampling for CMOS image sensors,” Int. Image Sensor w/s, 2009.6.28, Bergen.
- 9) A. Matsuzawa, G. Gielen, M. Hershenson, S. Kawahito, S. Dosho, “How to design the future mixed signal LSI’s,” SASIMI2009, 2009.3.10, 沖縄.
- 10) J. H. Park, S. Aoyama, T. Watanabe, T. Akahori, T. Kosugi, K. Isobe, Y. Kaneko, Z. Liu, K. Muramatsu, T. Matsuyama, S. Kawahito, “A 0.1e-Vertical FPN 4.7e- Read Noise 71dB DR CMOS Image Sensor with 13b Column-Parallel Single-Ended Cyclic ADCs,” 2009 IEEE Int. Solid-State Circuits Conf., 2009.2.10, San Francisco.
- 11) 志礼拓磨, 徐成昊, 伊藤真也, 川人祥二, “CMOS イメージセンサ画素内アンプのカラム並列ノイズ低減処理の検討,” 映像情報メディア学会情報センシング研究会 12 月研究会, 2008.12.17, 東京.
- 12) 川人祥二, “ナノスケールデバイスを用いた無雑音・超広ダイナミックレンジイメージング,” 静岡大学 21 世紀 COE プログラム「ナノビジョンサイエンスの拠点創成」成果発表会, 2008.12.16, 浜松.
- 13) 飯田哲也, 川人祥二, 伊藤真也, “イメージセンサの読み出し回路における傾斜リセット動作のノイズ低減効果,” 電子情報通信学会集積回路研究会 12 月研究会, 2008.12.11, 東京.
- 14) 川人祥二, “超高速・超広ダイナミックレンジ・超立体感を実現する集積機能イメージングデバイスとその展望,” ViEW2008 ビジョン技術の実利用ワークショップ, 2008.12.5, 横浜.
- 15) 川人祥二, “CMOS イメージセンサの開発動向と展望,” 有機デバイス研究会

- 第 75 回研究会, 2008.11.21, 浜松.
- 16) H.J. Yoon, S. Itoh, S. Kawahito, “A CMOS Image Sensor using Two-Stage Charge Transfer Technique for Fluorescence Lifetime Imaging,” Euro Sensors 2008, 2008.9.10, Dresden.
 - 17) 川人祥二, “CMOS フォトンカウンティングイメージセンサと実現に向けた課題,” 第 59 回ニューパラダイムコンピューティング研究会, 2008.7.26, 豊橋.
 - 18) S. Kawahito, J-H. Park, K. Isobe, S. Suhaidi, T. Iida, T. Mizota, “A CMOS Image Sensor Integrating Column-Parallel Cyclic ADCs with On-Chip Digital Error-Correction Circuits,” 2008 IEEE Int. Solid-State Circuits Conf., 2008.2.4, San Francisco.
 - 19) S. Kawahito, S. Ito, “Noise calculation model and analysis of high-gain readout circuits for CMOS image sensors,” SPIE Electronic Imaging 2008, 2008.1.30, San Jose.
 - 20) 川人祥二, 志礼拓磨, 伊藤真也, 河合信宏, “多重サンプリングとノイズヒストグラムを用いた CIS 画素内アンプの RTS ノイズ低減,” 映像情報メディア学会情報センシング研究会 12 月研究会, 2007.12.4, 東京.
 - 21) H. J. Yoon, S. Kawahito, “A CMOS Image Sensor for Fluorescence Lifetime Imaging of Sub-Nanosecond Time-Resolution,” 映像情報メディア学会情報センシング研究会 12 月研究会, 2007.12.4, 東京.
 - 22) S. Kawahito, S.Ito, “Low-Noise Design of Interface Circuits for Integrated Sensors,” 第 24 回センサ・マイクロマシンと応用シンポジウム, 2007.10.17, 東京.
 - 23) S. Kawahito, “CMOS Sensors for Smart and Advanced Imaging,” the 3rd Korean-Japanese Student Workshop, 2007.10.31, Hamamatsu.
 - 24) S. Kawahito, “A RTS Noise Reduction Technique for High-sensitivity CMOS Image Sensors,” the 9th Takayanagi Kenjiro Memorial Symp. / the 4th Int. Symp. Nanovision Science, 2007.10.30, Hamamatsu.
 - 25) H. J. Yoon, S.Kawahito, “A CMOS Image Sensor for Fluorescence Lifetime Detection,” The 6th Int. Conf. on Global Research and Education, 2007.9.27, Hamamatsu.
 - 26) S. Kawahito, “Signal Processing Architectures for Low-Noise High-Resolution CMOS Image Sensors,” Custom Integrated Circuits Conf., 2007.9.19, San Jose.
 - 27) H. J. Yoon, S. Kawahito, “Fluorescence Lifetime Detection Based on CMOS Image

Sensor,” 映像情報メディア学会 2007 年年次大会, 2007.8.31, 東京.

- 28) S. Kawahito, N. Kawai, “Column Parallel Signal Processing Techniques for Reducing Thermal and Random Telegraph Noises in CMOS Image Sensors,” Int. Image Sensor Workshop, 2007.6.9, Maine.

〔図書〕(計 4 件)

- 1) 角南英夫, 川人祥二 編著, 著者川人祥二他 10 名, 丸善, 半導体デバイスシリーズ 2 メモリデバイスイメージセンサ, 2009, pp161-190, pp267-288.
- 2) 三村秀典, 原和彦, 川人祥二, 青木徹, 廣本宣久, コロナ社, ナビジョンサイエンスー画像技術の新展開ー, 2009 pp.65-134.
- 3) 川人祥二 他, 技術情報協会, CCD/CMOS イメージセンサ 高精細・高画質化技術と最新応用, 2008, pp.187-198
- 4) 川人祥二 他 14 名, シーエムシー出版, CMOS イメージセンサの最新動向-高性能化、高機能化から応用展開まで-, 2007, pp.125-138

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 4 件)

- 1) 名称: 半導体素子及び固体撮像装置
発明者: 川人祥二
権利者: 静岡大学
種類: 特許
番号: 特願 2008-330572
出願年月日: 平成 20 年 12 月 25 日
国内外の別: 国内
- 2) 名称: 巡回型 A/D 変換器、イメージセンサデバイス、及びアナログ信号からデジタル信号を生成する方法
発明者: 川人祥二, 朴鐘皓, 青山聡, 磯部圭吾
権利者: 静岡大学, ブロックマン・ラボ
種類: 特許
番号: 特願 2008-269001
出願年月日: 平成 20 年 10 月 17 日
国内外の別: 国内
- 3) 名称: 高速電荷転送フォトダイオード、ロックインピクセル及び固体撮像装置
発明者: 川人祥二, 竹下裕章
権利者: 静岡大学
種類: 特許
番号: 特願 2008-198872
出願年月日: 平成 20 年 7 月 31 日
国内外の別: 国内
- 4) 名称: イメージセンサ

発明者: 川人祥二
権利者: 静岡大学
種類: 特許
番号: 特願 2007-315048
出願年月日: 平成 19 年 12 月 5 日
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 2 件)

- ① 名称: A/D converter with noise cancel function
発明者: S. Kawahito
権利者: National University Corporation Shizuoka University
種類: 特許
番号: Patent no. US 7598896
取得年月日: 2009.10.6
国内外の別: 外国
- ② 名称: デジタルノイズキャンセル機能をもつイメージセンサ
発明者: 川人祥二
権利者: 静岡大学
種類: 特許
番号: 特許第 4366501 号
取得年月日: 2009.9.4
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川人 祥二 (KAWAHITO SHOJI)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号: 40204763