

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22246049

研究課題名（和文）サブ10ピコ秒時間分解能をもつ超高速電荷変調型撮像デバイスに関する研究

研究課題名（英文）A study on imaging devices with sub-10 picosecond ultra high-speed charge modulators

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、極短時間の光の変化を画素単位で捉える排出制御型電荷変調素子 DOM (Draining Only Modulator) を用いた高時間分解撮像デバイスとバイオイメージング、超高分解能 3 次元計測への応用について研究を行った。DOM 素子を用いて試作した蛍光寿命イメージセンサにより 2.5ns と 10ns の蛍光寿命の差を明確に区別したイメージングが可能であることを示した。DOM 素子を用いた TOF3 次元計測に対しては、極短時間パルス光に対する素子応答を用いた高分解能距離計測方式を考案し、試作により 300 μ m の分解能(2ps の時間分解能)を得た。

研究成果の概要（英文）：

In this study, highly time-resolved imaging devices using the DOM (draining only modulator) pixels for the observation of extremely high-speed phenomena are investigated for next-generation biomedical imaging and time-resolved 3D imaging. FLIM (fluorescence lifetime imaging microscopy) for HeLa cells stained with 2.5ns and 10ns fluorescence materials has been successfully demonstrated using an implemented FLIM imager. A new technique using an impulse response of the DOM pixels is introduced for high-resolution TOF range imaging and the range resolution of 300 μ m (time resolution of 2ps) has been successfully demonstrated with an implemented chip.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
23年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
24年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
総計	25,400,000	7,620,000	33,020,000

研究分野：工学

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：電子デバイス・集積回路・撮像デバイス

1. 研究開始当初の背景

極短時間の光の現象を画像として捉える時間分解撮像は、生命科学、先端医療・医学の発展に重要な役割を果たしている。従来の時間分解撮像には、ストリークカメラ、

光電子増倍管を用いたやゲート付イメージインテンシファイア(GII)等が主に用いられてきたが、これらの電子管の構造を用いた装置は、信頼性、寿命、装置が大掛かりで

高価といった問題が常につきまとう。一方半導体を用いて時間分解撮像を行う素子 SPAD(Single Photon Avalanche Diode)の研究が、最近デルフト工科大等幾つかの機関で行われている。SPAD を用いた撮像デバイスは、画素毎に複雑な時間-デジタル変換回路 TDC(time-to-digital converter)が必要であるため、撮像速度と空間解像度の両立が困難である。

2. 研究の目的

本研究では、極めて短時間のうちに生じている光の変化を捉える機能をピクセルに導入した新概念の半導体撮像デバイスと応用に関して研究を行う。特に、本研究者の考案による電荷排出動作のみを用いる排出制御型電荷変調素子 DOM(Draining Only Modulator)は、1 フォトンで発生した光電子をサブピコ秒の時間分解能で検出する上で本質的な構造であり、その優れた性能を試作によって実証する。DOM 素子を応用した 10 ピコ秒分解能で蛍光の減衰過程を画像化する半導体 FLIM(fluorescence lifetime imaging microscopy)センサ、サブ 100 μm 分解能をもつ光飛行時間型 3 次元形状計測デバイスを試作し、次世代バイオイメージング、微小空間用 3 次元カメラ等、新しい画像・計測機器の創出に貢献する。

3. 研究の方法

DOM 素子の構造や形状等を変えた各種の画素パターンを集積した基本特性評価用センサ及び、基本構造となる埋め込みダイオードの不純物濃度分布を解析するためのテストパターンを試作する。これにより得られた不純物濃度分布等パラメータを用いて、デバイスシミュレーションを行い、試作した DOM 基本素子とシミュレーション結果の比較検討により、DOM 素子の構造の最適化を図る。その結果に基づき、高速応答性、量子効率等に関して優れた特性を有する DOM 素子を採用した蛍光寿命イメージセンサを試作し、特性評価を行う。試作した蛍光寿命イメージセンサを、細胞に対する蛍光寿命イメージングに応用する。3 次元形状計測デバイスに関し、DOM 素子の応答速度の最適化、またその高速応答に必要なピクセル内ドライバ等周辺回路についてデバイス及び回路シミュレーションについて検討する。その結果に基づき、時間分解能を 10 ピコ秒以下に高めた微小空

間用 3 次元形状計測デバイスを実際に試作し、サブミリメータの距離分解能が得られることを確認する。

4. 研究成果

試作した蛍光寿命イメージセンサを図 1 に示す。0.18 μm CMOS イメージセンサプロセスを用い、320 \times 256 画素の DOM 素子アレイと画素部の高速駆動回路、低ゲイン(x1)と高ゲイン(x32)を有する読み出し回路等を集積している。図 2 は、本センサの単位画素を用いて、

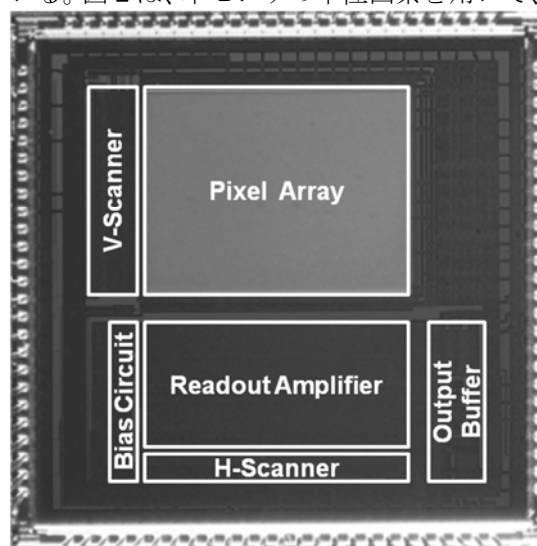


図 1 蛍光寿命イメージセンサ

▲ Blue Acrylic Screen ▲ Orange Acrylic Screen
 □ Green Acrylic Screen ○ Green Quantum Dot

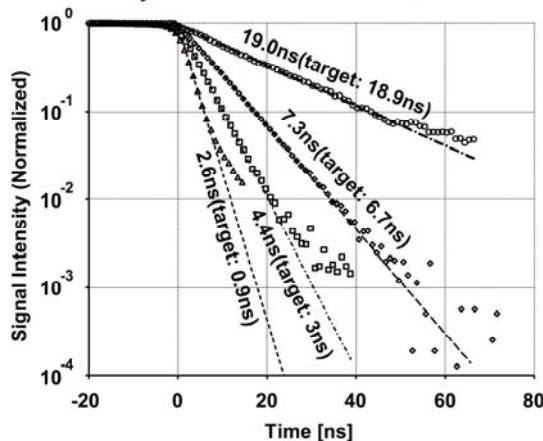


図 2 蛍光減衰過程の測定

図 2 は、本センサの単位画素を用いて、4 種類の寿命を有する蛍光物質の蛍光減衰過程を測定した結果である。減衰特性の傾きから寿命を求めることができ、TCSPC 法で測定した目標値との関係を図 3 に示す。短い寿命程、目標値と差が大きくなっているが、これは、DOM 素子の応答特性による真性寿命が影響していることによる。この素子寿命の影響は、その時間応答特性を考慮してデコンボリ

ューションにより取り除くことができ、本素子によって 1ns 程度までの高精度計測が可能であると考えられる。

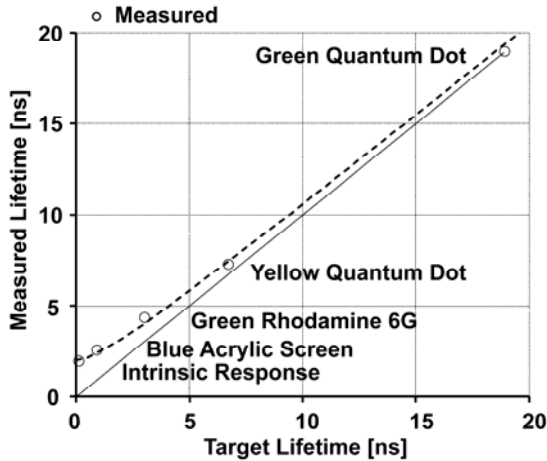


図 3 蛍光寿命の目標値と測定値の関係

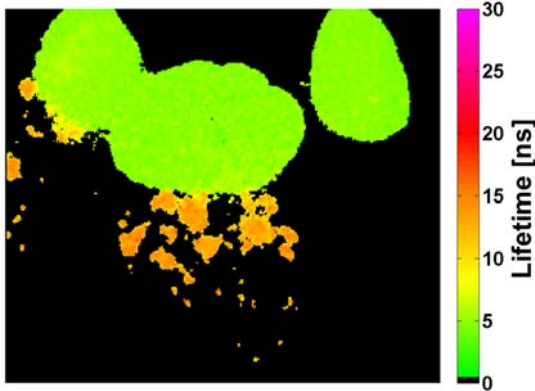


図 4 HeLa 細胞の蛍光寿命画像

以上の基礎的な検討を踏まえ、試作した蛍光寿命イメージセンサと励起光パルス幅 70ps の半導体レーザを顕微鏡に装着し、蛍光寿命顕微鏡を構成した。これにより、Hoechst (寿命 2.5ns) と、Q-dot (525nm, 寿命 10ns) でそれぞれ染色した HeLa 細胞の蛍光寿命イメージングを行った。得られた蛍光寿命画像を図 4 に示す。30ns までの寿命をカラーで示しているが、寿命による細胞の区別、また染色部位の違いなどが良好に見て取れる。

DOM 素子を用いた TOF3 次元計測に対しては、極短時間パルスで発生する光電流波形の立ち上がり部だけに検出時間窓を設定して検出することで高分解能化を図る方式を考案し、低濃度厚膜エピ基板を用いた 0.11μm CMOS イメージセンサプロセスを用いて、120×120 画素及びテスト画素からなる TOF3D 計測センサを試作した。現状では、単一画素のみの動作を確認し、その性能を評価した。提案する極短時間パルス光に対する DOM 素子の応答を用いた TOF 距離計測法の原理図を図 5 に示す。3

つの時間窓 (TW(1), TW(2), TW(3)) で計測を行う。これらによる信号を、それぞれ N_1, N_2, N_3 とすると、TOF(= t_d) は、次式により求められる。

$$t_d = T_1 - T_0 \sqrt{2 \frac{N_2 - r_d N_3}{N_1 - r_d N_3}} \quad (1)$$

ここで、 r_d は、繰り返し周期に対する時間窓の比 (デューティ比) である。図 7 に、短時間光パルス (100ps, $\lambda=445\text{nm}$) に対する DOM 素子の応答の測定結果を示す。立ち下がり部では 250ps という高速応答が得られた。

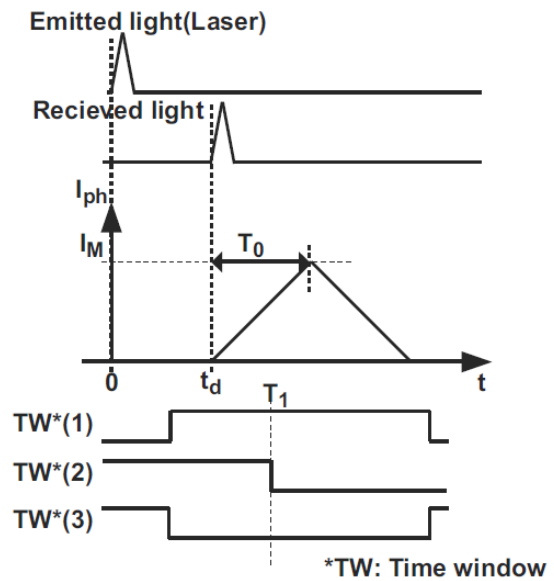


図 5 素子のインパルス応答を用いた TOF 距離計測法

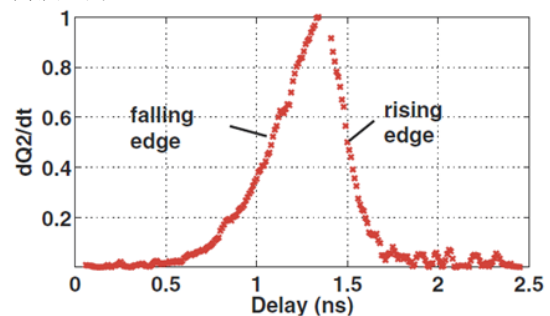


図 6 短時間光パルスに対する DOM 素子応答

図 7 は、3mm の段差を有する測定対象物を、自動ステージで 1 次元走査し、1 次元距離分布を測定した結果を示している。このように、数 mm の奥行きを持つ対象物がサブミリメートルの分解能で計測できていることが視覚的な判断できる。対象物に底部に対して、計測値のゆらぎを求めると、約 1mm_{pp} 、標準偏差で約 $300\mu\text{m}$ が得られた。 $300\mu\text{m}$ の距離分解能は、2ps の時間分解能

に相当し、当初目標の 10ps を大きく上回る性能を得ることができた。

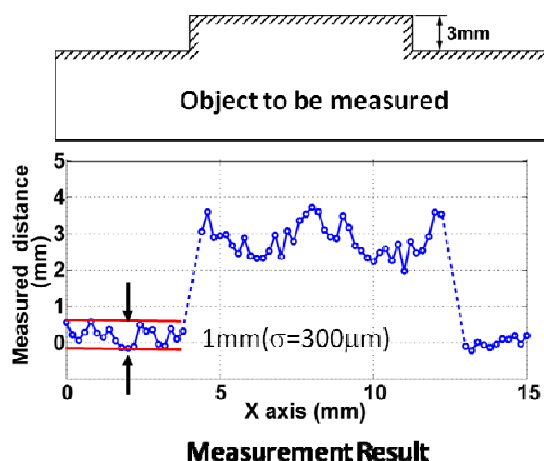


図 7 3mm の段差をもつ対象物の距離計測結果

DOM 素子を用いた高距離分解イメージセンサの信号の読み出しには、本研究者が考案した、低ノイズ広ダイナミックレンジのカラム並列型 A/D 変換回路を用いている。この A/D 変換方式(折り返し積分・巡回型)は、ピクセル出力に対して、多数回サンプリングし、積分処理を行うことでノイズ低減を図り、折り返し特性により、広いダイナミックレンジを得るものである。32 回のサンプリングによって約 1.1 電子のノイズレベルを得ている。

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. W. Seo, T. Sawamoto, T. Akahori, Z. Liu, T. Iida, T. Takasawa, T. Kosugi, T. Watanabe, K. Isobe, S. Kawahito, "A low-noise high-dynamic-range 17-b 1.3-Megapixel 30-fps CMOS image sensor with column-parallel two-stage folding-integration/cyclic ADC," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 59, no. 12, pp. 3396-3400, Dec. 2012. 査読有
- [2] Z. Li, S. Kawahito, K. Yasutomi, K. Kagawa, J. Ukon, M. Hashimoto, Hirohiko Niioka, "A time-resolved CMOS image sensor with draining-only modulation pixels for fluorescence lifetime imaging," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 59, no. 10, pp. 2715-2722, Oct. 2012. 査読有
- [3] K. Mars, S. Kawahito, "Response-time acceleration of a frontend amplifier for high output impedance sensors," IEICE Trans. Electronics, vol. E95-C, no. 9, pp.1543-1548 (2012). 査読有

- [4] M.-W. Seo, S.-H. Suh, T. Iida, T. Takasawa, K. Isobe, T. Watanabe, S. Itoh, K. Yasutomi, S. Kawahito, "A low-noise high intrasene dynamic range CMOS image sensor with a 13 to 19b variable-resolution column-parallel folding-integration/Cyclic ADC", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.47, No.1, pp. 272-283, Jan. 2012. 査読有
- [5] I. A. Halin, A. Din, I. Aris, M. M. Isa, S. Shafie, S. Kawahito, "Selection of amplifier for optimized charge transfer in active pixel CMOS time of flight (TOF) image sensors", IEICE Electronics Express, Vol. 8, No.22, P1913-1919, Nov.2011. 査読有
- [6] K. Yasutomi, S. Itoh, S. Kawahito, "A two-stage charge transfer active pixel CMOS image sensor with low-noise global shuttering and a dual-shuttering mode," IEEE Trans. Electron Devices, vol.58, no.3, pp.740-747, Mar.2011. 査読有
- [7] T. Watanabe, J.H. Park, S. Aoyama, K. Isobe, S. Kawahito, "Effects of native-bias operation and optical stress on dark current in CMOS image sensors," IEEE Transactions on Electron Devices, vol.57,no.7, pp.1512-1518, Jul.2010.査読有

[学会発表] (計 38 件)

- [1] 川人祥二, "極低ノイズピクセルデバイスとエレクトロニクス", 日本物理学会第 68 回年次大会, 29aHF-6, 広島大学, 広島, 2013.3.29.(招待講演)
- [2] 川人祥二, 見崎龍, 関宏司, 徐珉雄, 今井快多, 安富啓太, 香川景一郎, "電荷変調画素を用いた蛍光相関 CMOS 撮像デバイス," 電気学会 バイオ・マイクロシステム研究会, BMS-13-011, 電気学会研究会資料バイオ・マイクロシステム研究会, pp.1-3, 東京大学, 東京 2013.3.26.(招待講演)
- [3] 川人祥二, "イメージセンサの高機能・高性能化技術とベンチャービジネス," DIA2013 動的画像処理実用化ワークショップ, 基調講演, 講演概要集, 静岡大学, 浜松, 2013.3.8.(招待講演)
- [4] 川人祥二, 安富啓太, 香川景一郎, "CMOS 光飛行時間距離画像センサの高分解能化," 第 127 回微小光学研究会, 微小光学研究グループ機関誌 MICROOPTICS NEWS, vol.31, no.1, pp. 41-46, 東海大学, 東京, 2013.3.7.(招待講演)
- [5] 川人祥二, "高速度・高感度イメージセンサの開発とベンチャー事業化," 「新アプリ討論会」, 産業技術総合研究所, 東京, 2013.1.24. (招待講演)
- [6] 川人祥二, "超イメージセンサの技術動向," 日本工業技術振興協会・映像情報メ

- ディア学会共催公開講演会「次世代超イメージセンサ技術」, 特別講演, 東京理科大学, 東京, 2013.1.16.(招待講演)
- [7] 川人祥二, “最先端CMOSイメージセンサ,” 映像情報メディア学会冬季大会特別企画8「最新のイメージセンサ技術と将来」, 特別企画8-3, 2012年冬季大会講演予稿集, 東京理科大学, 東京, 2012.12.19.(招待講演)
- [8] 李卓, 安富啓太, 香川景一郎, 川人祥二, “時間分解CMOSイメージセンサー用蛍光寿命デコンボリューション法,” 映像情報メディア学会冬季大会, 2012年冬季大会講演予稿集, 11-4, 東京理科大学, 東京, 2012.12.19.
- [9] 川人祥二, “高速度イメージセンサの低ノイズ化技術と課題,” 第146回次世代画像入力ビジョンシステム部会定例会, 東京理科大学, 東京, 2012.12.6.(招待講演)
- [10] K.Mars, S.Kawahito, “Low Noise Readout Circuits Interface Using a Capacitive- Feedback Frontend Amplifier for High Output Impedance Sensors,” 19th Int. Display Workshops in conjunction with Asia Display 2012, INP4-3, Proc. Int. Display Workshops, Vol.19, pp. 1529-1532, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan, Dec. 6, 2012.
- [11] K.Yasutomi, Z.Li, K.Kagawa, J.Dong, M.Ogata, E.Y.Park, S.Kawahito, “Time-Resolved CMOS Image Sensor with DOM Pixels for Fluorescence Lifetime Imaging,” The 14th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium, Session6-4, Proceedings S6-4-1 - S6-4-5, Shizuoka University, Hamamatsu, Japan, Nov.28,2012.
- [12] 川人祥二, “多重サンプリング折り返し積分処理を用いた高感度高ダイナミックレンジCMOSイメージセンサの開発”, 第20回カメラ技術セミナー, 第20回カメラ技術セミナープログラム pp36-46, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 東京, 2012.11.22.(招待講演)
- [13] 安富啓太, 李卓, 香川景一郎, 新岡宏彦, 橋下守, 川人祥二, “排出制御電荷変調素子DOMによる蛍光寿命CMOSイメージセンサ”, 映像情報メディア学会情報センシング研究会, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.36, No.50, pp.1-4, 静岡大学, 浜松, 2012.11.21.
- [14] K.Kagawa, K.Yasutomi, S.Kawahito, “Scientific custom CMOS imagers and applied systems”, The Second Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP 2012), Session6, Tokushima University, Tokushima, Japan, Nov.20, 2012.(Invited)
- [15] M-W. Seo, T.Takasawa, S.Kawahito, T.Sawamoto, “A Low Noise Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor with Low-Noise Transistors and 17b Column-Parallel ADC,” IEEE SENSORS 2012, No.1368, pp2204-2207, Taipei Intl. Convention Center, Taiwan, Oct.31,2012.
- [16] S.Kawahito, “A Highly Time-Resolved Imaging Device Using Two-Dimensional Electric Field Modulation”, Special Workshop Time-Resolved Single-Photon Technology: From Fundamentals to Imaging Applications, Delft University of Technology, Delft University, Netherlands, Sep.17, 2012.(Invited)
- [17] S.Kawahito, K.Kagawa, “Single photoelectron manipulation and detection with sub-nanosecond resolution in CMOS imagers”, IPCN International Workshop, IPCN1-6, University of Orleans, France, Sep.7, 2012.(Invited)
- [18] S. Kawahito, “History and prospect of low-noise CMOS image sensors”, PIXEL2012, Session4, Hotel Listel INAWASHIRO, Fukushima, Japan, Sep.4, 2012.(Invited)
- [19] 児玉雅俊, 安富啓太, 韓相萬, 香川景一郎, 川人祥二, “高距離分解能TOFイメージセンサのためのDOM画素構造の検討”, 映像情報メディア学会年次大会, 2012年年次大会講演予稿集, 19-1, 広島市立大学, 広島, 2012.8.30.
- [20] 白グスル, 韓相萬, K.Kamel, 安富啓太, 香川景一郎, 川人祥二, “時間分解型CMOSイメージセンサのためのLEF制御型電荷変調画素構造”, 映像情報メディア学会年次大会, 2012年年次大会講演予稿集, 17-3, 広島市立大学, 広島, 2012.8.30
- [21] 川人祥二, 李卓, 韓相萬, 安富啓太, 香川景一郎, “高時間分解撮像デバイスとその応用”, 第76回半導体・集積回路技術シンポジウム, 講演論文集, pp43-46, 東海大学, 神奈川, 2012.7.5.(招待講演)
- [22] M-W Seo, T. Akahori, Z. Liu, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, “A 1.2 e- temporal noise CMOS image sensor with 17b column-parallel ADC and itsapplication”, 第6回新画像システム・情報フォトニクス研究討論会, 予稿集 pp67-68, 大阪大学, 大阪, 2012.6.22.
- [23] S. Kawahito, “VLSI Innovations will be diverse”, 2012 Symposia on VLSI Circuits, Hilton Hawaiian Village, USA, Jun. 14, 2012.(Invited)
- [24] 川人祥二, “CMOSの基礎知識と開発動

- 向”, Optics & Photonics International 2012 VISION Japan 併設 VISION 特別セミナー, パシフィコ横浜, 横浜, 2012.4.25.
- [25] 安富啓太, 李卓, 香川景一郎, 新岡宏彦, 橋本守, 右近寿一郎, 川人祥二, “排出制御による時間分解型 CMOS イメージセンサの蛍光寿命計測実験”, 応用物理学会関係連合講演会, 16p-B9-9, 早稲田大学, 東京, 2012.3.16.
- [26] Z. Li, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Ito, M. Hashimoto, S. Kawahito, “Design and Implementation of CMOS Image Sensor with Draining Only Modulation Pixels for Fluorescence Lifetime Imaging”, The 13th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium, S3-10-1 - S3-10-3, Shizuoka University, Hamamatsu, Nov. 17.2011.
- [27] S. Han, K. Yasutomi, S. Kawahito, “A CMOS Time-of Flight Range Image Sensor Using Draining Only Modulation Structure”, 2nd Korea-Japan Joint Symposium and Graduate Students Forum, P63, 慶北大学, 韓国, Sep. 6.2011.
- [28] M-W. Seo, S. Suh, T. Iida, T. Takasawa, K. Isobe, T. Watanabe, S. Itoh, S. Kawahito, “Low Noise High Dynamic Range CMOS Image Sensor with Folding-Integration/Cyclic ADCs”, 2nd Korea-Japan Joint Symposium and Graduate Students Forum, P66, 慶北大学, 韓国, Sep. 6.2011.
- [29] M.-W. Seo, S.-H. Suh, T. Iida, T. Takasawa, T. Akahori, K. Isobe, T. Watanabe, S. Itoh, K. Yasutomi, S. Kawahito, “A Low-Noise Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor Using a Column-Parallel Folding-Integration /Cyclic ADC”, 映像情報メディア学会年次大会, 2011 年年次大会講演予稿集, 14-1, 成蹊大学, 東京, 2011.8.26.
- [30] 韓相萬, 安富啓太, 川人祥二, “電荷排出変調構造を用いた TOF 距離画像センサ”, 映像情報メディア学会年次大会, 2011 年年次大会講演予稿集, 4-1, 成蹊大学, 東京, 2011.8.24.
- [31] S. Kawahito, Z. Li, K. Yasutomi, “A CMOS image sensor with draining only modulation pixels for sub-nanosecond time-resolved imaging,” Proc. 2011 Intl. Image Sensor Workshop, pp.185-188, Onuma Prince Hotel, Hakodate, Jun.11. 2011.
- [32] 川人祥二, 李卓, 安富啓太, “蛍光寿命イメージセンサの画素構造と分解能に関する考察,” 映像情報メディア学会情報センシング研究会, 東京理科大学, 東京, 2011.5.27.
- [33] Z. Li, K. Yasutomi, T. Takasawa, S. Itoh, S. Kawahito, “A CMOS image sensor with draining only modulation pixels for fluorescence lifetime imaging,” IS&T/SPIE Electronic Imaging 2011, The Moscone Center, San Francisco, Jan.26.2011.
- [34] S. Kawahito, “CMOS high-speed image sensors-pixel devices, circuits and architectures-,” 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials, G-6-1, pp.1150-1151, 東京大学, Tokyo, Sep.24.2010. (Invited)
- [35] 川人祥二, “CMOS 機能集積センサ,” 電子情報通信学会 2010 年ソサイエティ大会, 大阪府立大学, 大阪, 2010.9.15. (エレン賞記念講演)
- [36] S. Kawahito, “Time-resolved image sensors for bio-imaging,” Pusan National University-Shizuoka University Joint Workshop, 静岡大学, 静岡, 2010.8.18.
- [37] 川人祥二, “CMOS イメージセンサ高性能化技術,” 電子ジャーナル第 543 回技術セミナー, 総評会館, 東京, 2010.7.27. (招待講演)
- [38] 川人祥二, “機能集積 CMOS イメージセンサの技術動向と展望,” マシンビジョン研究会第 1 回交流会, 東北経済産業局, 仙台, 2010.7.2. (招待講演)

〔図書〕 (計 1 件)

1. Handbook of 3D Machine Vision: Optical Metrology and Imaging, Song Zhang 編著, 著者 Shoji Kawahito 他, 第 10 章「Time-of-Flight Technique」, pp.253-273 担当, Taylor & Francis 社, 2013.3.15.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

[1]

名称: 距離計測装置

発明者: 川人 祥二、安富啓太

権利者: 国立大学法人静岡大学

種類: 特許

番号: 特願 2013-100657

出願年月日: 2013 年 05 月 10 日

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

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし