

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220905

研究課題名(和文) ラテラル電界制御電荷変調素子による超高時間分解撮像デバイスと応用開発

研究課題名(英文) Ultra Highly Time Resolved Imaging Devices Using Lateral Electric Field Controlled Charge Modulators and Their Applications

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 151,100,000円

研究成果の概要(和文)：ラテラル電界制御電荷変調素子(LEFM)に基づき、サブピコ秒に至る極めて高い時間分解能による光信号計測を超並列的に行う超高時間分解撮像デバイスとその応用に関して研究を行った。微小空間での光飛行時間距離計測の実現に道を開く140 μm (単一フレーム)、40 μm (100フレーム平均)等の他に例を見ない極めて高い距離分解能を達成した。また極微弱光に対する蛍光寿命計測等において、応答時定数180ピコ秒、時間分解能14ピコ秒の高分解能を達成するとともに単一細胞に対する蛍光寿命像を得ることに成功し、微小半導体チップを活用した癌検出内視鏡等次世代バイオメディカルイメージング機器実現への道を開く成果を得た。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have investigated ultra-highly time-resolved imaging devices based on the lateral electric field charge modulator (LEFM) having a sub-picosecond time resolution and their applications. Toward the goal of 3D imaging for small space like in human body, a time-of-flight range imaging device having the resolution of 140 μm for single frame measurement and 40 μm with averaging 100frames has been realized. In fluorescence lifetime microscopy for weak fluorescence signals, an implemented imager having its intrinsic lifetime of 180ps and resolution of 14ps has been realized and a fluorescence lifetime image for a single cell has been successfully obtained. These results lead to the developments of the next-generation biomedical imaging tools using the small-size semiconductor sensor chips, which can be used for tumor detection in an endoscope.

研究分野：工学、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・機器 先端機能デバイス 撮像デバイス 時間分解撮像 バイオイメージング

1. 研究開始当初の背景

生命科学、先端医療の発展には、光を用いたイメージング技術が極めて重要な役割を果たしている。極短時間のうちに生じる現象や反応を観る超高時間分解撮像がその常套手段であり、内視鏡や埋植観測等が中心となる今後のバイオ・メディカルイメージングに向けて、微小空間での多点同時計測を可能にする半導体集積デバイスを用いた超高時間分解撮像技術が求められている。本研究者は、電界制御により単一光電子の高速輸送制御を行う DOM (Draining Only Modulator) を用いた高時間分解撮像デバイスを提案し、高い時間分解能と空間解像度を両立できることを実証してきた。本 DOM の動作原理を進展させ、より高い時間分解能と機能性を実現できるラテラル電界制御電荷変調素子 LEFM (Lateral Electric Field Modulator) を着想し、次世代の超高時間分解撮像のキーデバイスとして、その重要性を確信していた。

2. 研究の目的

本研究では、微小空間での光飛行時間距離計測や、1 分子蛍光等の極微弱光に対する蛍光寿命計測等において、ピコ秒、サブピコ秒の極めて高い時間分解能での検出と、その超並列的検出(高い空間分解能)を両立する超高時間分解撮像デバイスとその応用に関して研究を行う。これを実現する新概念の超高速電荷変調素子である LEFM を用いた超高時間分解撮像デバイスが、他に類を見ない本質的に優れた時間分解性能を有すること、また従来の点計測走査型から、面計測並列型へと時間分解撮像に革命的進展をもたらすデバイスとなることを試作と応用計測によって実証する。これにより、生命科学、先端医療の発展、イメージング関連産業の振興に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

ラテラル電界制御電荷変調素子 LEFM (図 1) は、電荷輸送路の電界制御を、その側面に設けた複数のゲートによる横方向電界により行い、高速電子輸送制御を行う素子である。1 タップ型、2 タップ型を基本として、3 タップ以上のマルチタップ型が実現可能である。

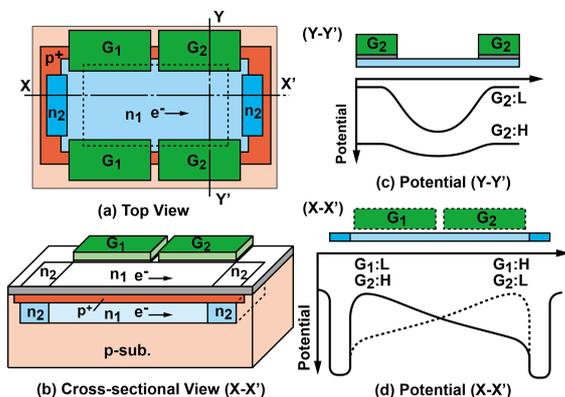


図 1 ラテラル電界制御電荷変調素子

LEFM の形成条件の確立、構造最適化を図り、基本素子としてサブピコ秒の時間分解能が達成可能であることを実験的に示すための基本ピクセル素子群を試作し、その基本的な特性を評価する。その結果を踏まえて、本素子を応用した光飛行時間距離画像センサや、蛍光寿命撮像デバイスを開発し、応用計測において、その優れた時間分解性能を明らかにする。また、これらの時間分解撮像デバイスが、医療や生命科学の分野にもたらす実用的価値を明らかにするため、自家蛍光の寿命を用いた癌等の病巣の検出法としての有効性の評価、蛍光相関分光法(FCS)による細胞内分子の挙動解析における有用性の評価等を行う。

4. 研究成果

(1) 光飛行時間 3 次元形状計測半導体素子によるサブ mm・サブ 100 μ m 分解能の達成

光飛行時間(TOF)型半導体距離センサの分解能をサブ 100 μ m まで高めることができれば、病巣部の 3 次元形状を計測する内視鏡の実現可能性等、医学や科学計測に多大なインパクトが期待される。ラテラル電界制御電荷変調素子(LEFM)の中で、まず 1 タップ型 LEFM(DOM 素子)において超高速光応答特性を達成し、132 \times 120 画素の超高距離分解撮像デバイスの試作に成功した。半導体 TOF 撮像デバイスとして世界で初めてサブミリメートル(標準偏差:300 μ m)の距離分解能を得た[論文 12(Optics Express (IF=3.3))]. 時間分解能では約 2 ピコ秒を達成した。また高時間分解撮像デバイスで問題となる駆動パルススキューのオンチップ補正技術を開発し、標準偏差で 8 ピコ秒まで低減できることを示し、超高時間分解撮像デバイスの困難な問題の 1 つに解決の目途が立った。この技術によって 1mm の段差をもつ微小な対象物の 3 次元形状の計測にも成功した(図 2)[学会発表 23(ISSCC2014), 論文 9(IEEE Trans. ED (IF=2.6))]. さらに高分解能化を目指し、高いノイズ相関性と光の利用効率を高めた 3 出力 LEFM を用いた TOF 距離画像センサ(192 \times 4 画素)を開発し、1 フレームでの距離分解能 140 μ m(時間分解能 930fs)を達成した[学会発表 4(IISW2017)]. 計測時間を長くした場合(100 フレーム平均)では距離分解能 40 μ m(時間分解能 270fs)以下を達成し、最終目標としたサブピコ秒の時間分解能を実証することができた。半導体 TOF 撮像デバイスによるサブピコ秒の時間分解能の達成は、世界初である(これらを含む最新の成果は発表準備中)。内視鏡等による微小空間での 3 次元形状計測の可能性を秘めた画期的な成果と言える。

(2) 微弱光に対する高時間分解撮像デバイスの試作の成功とバイオメディカルイメージングへの応用可能性の実証

極微弱光に対する超高時間分解計測には、

光電子超高速変調とともに、kTC ノイズキャンセルのための電荷 2 段転送構造の実現が必要である。これを実現した 2 タップ型電荷変調ピクセルによる時間分解撮像デバイスの開発に成功した。当初計画（平成 27 年度末までに、256 × 256 画素の蛍光寿命撮像デバイスで、数 10ps の寿命を計測）に対して、現時点で 512 × 256 画素、180ps のデバイス応答時間、14ps の時間分解能（図 3）、1.7 電子の読み出しノイズを得ており、また細胞に対する蛍光寿命画像計測にも成功する等、当初計画を超える成果を得た [学会発表 15 (ISSCC2015)]。なお ISSCC (国際固体素子回路会議) は、半導体集積回路分野で最も権威のある国際会議である。また本論文は IEEE J. Solid-State Circuits における ISSCC 特集号対象論文として選定され (上位評価の約 1~2 割の論文)、その拡張論文が Peer-review 後採択、出版された [論文 8 (IEEE J. Solid-State Circuits (IF=4.2))]。

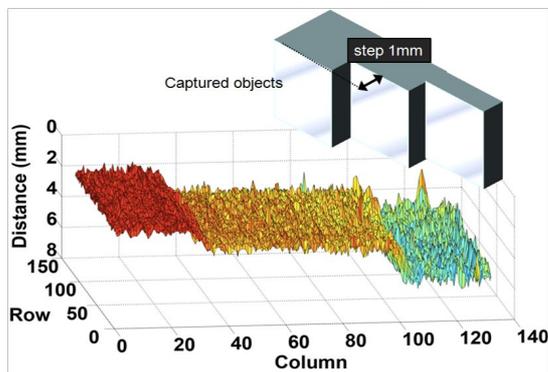


図 2 サブ mm 分解能での 3 次元形状計測。

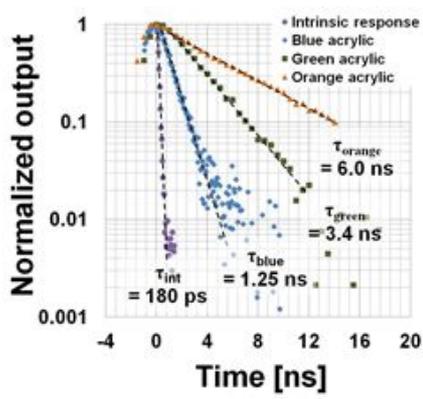


図 3 100 ピコ~ナノ秒の蛍光寿命計測。

単一細胞による蛍光等極微弱な蛍光に対する蛍光寿命イメージング及び蛍光寿命による高速ライブイメージングに向けて、より信号対雑音比の高い時間分解撮像を可能にする 4 タップサブナノ秒の極短時間窓を有する電荷変調ピクセル (128 × 128 画素の撮像素デバイス) の実現にも成功した。4 タップ電荷変調ピクセルにより、3 フレームで蛍光の減衰曲線が計測でき、複数の寿命による高速ライブイメージングの実現の可能性が示された (図 4)。また、図 5 に示すように、2 つの蛍光寿命試薬で染色した単一細胞 (HeLa 細

胞) に対して、ナノ秒オーダー分解能での蛍光寿命像の取得に成功した。

本撮像デバイスの応用として、生体細胞内の自家蛍光物質 (FAD, NADH) に対する蛍光寿命撮像によって癌細胞を直接検出できる内視鏡の実現に向けた基礎的な結果を得ることを目標としている。医学系の連携研究者の協力を得て、癌化したラットの大腸の組織片等の生体試料に対する癌部の蛍光寿命計測を実施し、癌部と正常部の間で寿命の差異が観測される等の結果を得た。また香川は、このような計測に Phasar 法を適用することにより、複数の寿命を区別して測定する手法を考案し、癌化した組織片に適用して癌部と正常部の蛍光寿命の差異をより明確に計測できる可能性を見出している。これらはまだ初期的な段階で、その正当性の検証が必要であるものの蛍光寿命による癌の内視鏡病理診断実現にむけたデータが得られ始めた。

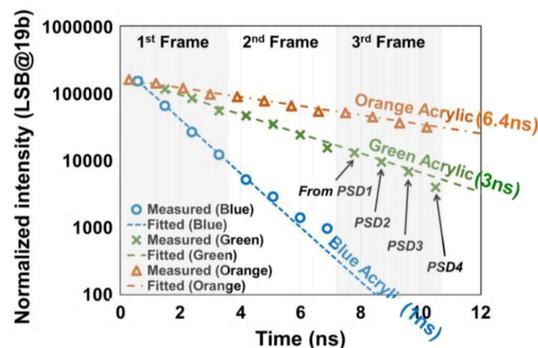


図 4 4 タップ電荷変調ピクセルによる 3 フレームによるマルチ蛍光寿命計測。

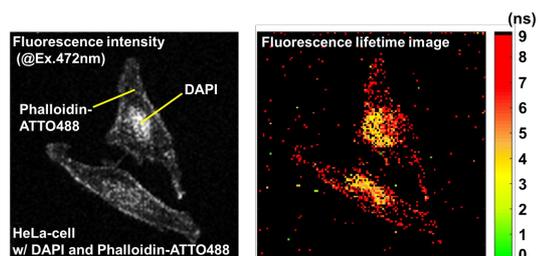


図 5 単一細胞 (HeLa cell) における DAPI (3-4ns)、ATTO488 (5-6ns) の蛍光寿命像。

(3) 超高感度光電子検出器の発明と試作による極低ノイズ性能 (0.3 電子) の実証

極微弱蛍光イメージングの性能を高める上で超高感度光電子検出器の実現が必要である。極微小な静電容量により極めて高い光電子検出感度をもつ RGL (Reset-gate-less) 検出器ピクセルを発明し (特願 2015-185718)、これを用いて試作した実験的撮像デバイスにおいて、画素平均の実効値で 0.27 電子という極めて低ノイズの性能を得た [論文 10 (IEEE EDL (IF=2.8))]。図 6 は、0.24 電子のノイズレベルを得たピクセルでの信号ヒストグラムであり、低ノイズ化によりポアソン統計に従う光子数に関係した信号ピークが観測された (フォトンカウンティング撮像

の可能性)。図7は、0.29 電子の極低ノイズ性能をもつ撮像デバイスで得た画像と1.1 電子、2.4 電子の性能に設定した画像の比較を示しており、0.3 電子未満の極低ノイズの達成により、低フォトン数のイメージングにおける極めて高いコントラストを得ている(光電子増倍以外の原理で、0.3 電子の極低ノイズイメージングに世界で初めて成功) [論文5(Sensors (IF=2.7))]. また、700×720 画素のイメージセンサにおいて、毎秒 30 フレーム以上の撮像速度に対して画素平均の実効値で 0.44 電子という極めて低ノイズの性能を実証した[学会発表 15(ISSCC2015)].

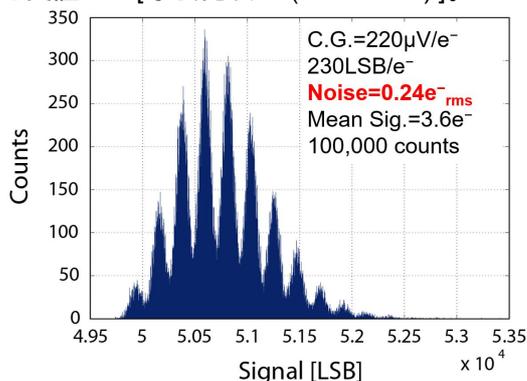


図6 光電子検出ヒストグラム.

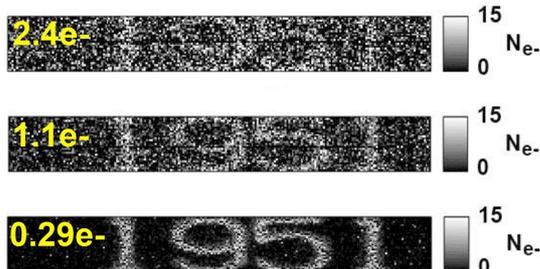


図7 RGL 検出器ピクセル撮像デバイスによる撮像例.

(4) その他の成果

本素子が近赤外でも高い感度を有することに着目し、時間分解NIRS(近赤外分光)による脳活動イメージングへの応用を検討した。ラットの脳に対する時間分解血液動態計測を実施し、脳内血液の酸素飽和度の変化に伴う吸収係数、等価散乱係数の変化を観測できることが示された[学会発表 11(IMBC2015)].

インフルエンザウイルスやノロウイルスの検出に有用な新しいバイオイメージング用蛍光体(Quantum dot: CdZnSeS/ZnSeS)の開発において、微小蛍光体の蛍光寿命計測に本蛍光寿命撮像デバイスが有用であることを示した[論文 4 (Biosensors & Bioelec. (IF=7.5), 論文 7 (J. Mat. Chem. B (IF=4.7))].

10×10 画素多点 FCS センサに応答時間 1μs のイメージンテンシファイアを組み合わせることで、フォトンカウンティング感度で 1MSps の多点同時連続計測を可能とする顕微鏡システムを構築した。多点計測データから EGFP, ローダミンの自己相関関数が取得できることを示した。

LEFM の高速シャッタを活用したマルチアパーチャ方式による超高速 CMOS イメージセンサを試作し、200Mfps の超高速撮像を実証 [Optics Express, vol.24, no.4, pp.4155-4176 (2016)(IF=3.3)].

ピクセル内において多数の高速時間窓による電荷変調を行うことで時間分解能の向上を図った 8 タップ LEFM ピクセルの試作に成功し、最短で 3.3 ナノ秒の 8 つの連続した時間窓を用いて蛍光寿命計測が行えることを示した(発表準備中)。

多焦点誘導ラマン散乱(SRS)イメージングの実現を目指し、LEFM による高速復調原理を用いたロックインピクセルを開発し、巨大オフセット光の中に埋もれた微弱 SRS 信号の検出(ラマンスペクトル計測)に成功した[論文 2,6 (Sensors(IF=2.7))].

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 38 件)

M.-W. Seo, Y. Shirakawa, Y. Kawata, K. Kagawa, K. Yasutomi, S. Kawahito, "A Time-Resolved Four-Tap Lock-In Pixel CMOS Image Sensor for Real-Time Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy", IEEE J. Solid-State Circuits, 査読有, vol.53, (2018) (In Press).

K. Mars, D-X. Lioe, S. Kawahito, K. Yasutomi, K. Kagawa, T. Yamada, M. Hashimoto, "Label-Free Biomedical Imaging Using High-Speed Lock-In Pixel Sensor", Sensors, 査読有, 2017.17, 2581, pp. 1-15, (2017) DOI: 10.3390/s17112581.

M.-W. Seo, S. Kawahito, "A 7ke- SD-FWC 1.2e-rms Temporal Random Noise 128×256 Time-Resolved CMOS Image Sensor with Two In-Pixel SDs for Biomedical Applications", IEEE Trans. Biomedical Circ. and Sys., 査読有, Vol.11, No. 6, pp.1335-1343(2017), DOI: 10.1109/TBCAS.2017.2738322.

O. Adegoke, M.-W. Seo, T. Kato, S. Kawahito, E-Y. Park, "An ultrasensitive SiO₂-encapsulated alloyed CdZnSeS quantum dot-molecular beacon nanobiosensor for norovirus," Biosensors and Bioelec., 査読有, vol.86, pp.135-142(2016), DOI: 10.1016/j.bios.2016.06.027.

S. Kawahito, M.-W. Seo, "Noise Reduction Effect of Multiple-Sampling Based Signal-Readout Circuits for Ultra-Low Noise CMOS Image Sensors", Sensors, 査読有, No.16, 1867, pp.1-19 (2016), DOI:10.3390/s16111867.

D-X. Lioe, K. Mars, S. Kawahito, K. Yasutomi, K. Kagawa, T. Yamada, M. Hashimoto, "A Stimulated Raman Scattering CMOS Pixel Using a High-Speed

Charge Modulator and Lock-in Amplifier”, Sensors, 査読有, 532, pp.1-16 (2016), DOI:10.3390/s16040532.

O. Adegoke, M-W. Seo, T. Kato, S. Kawahito, E. Y. Park, “Gradient band gap engineered alloyed quaternary/ ternary CdZnSeS/ZnSeS quantum dots: an ultrasensitive fluorescence reporter in a conjugated molecular beacon system for the biosensing of influenza virus RNA,” J. Materials Chem. B, 査読有, pp. 1-11, (2016), DOI:10.1039/c5tb02449h.

M-W. Seo, K. Kagawa, K. Yasutomi, S. Kawahito et al.(7名,7番目) “A 10 ps time-resolution CMOS image sensor with two-tap true-CDS lock-in pixels for fluorescence lifetime imaging”, IEEE J. Solid-State Circuits, 査読有, vol.51, no.1, pp.141-154(2016), DOI:10.1109/JSSC.2015.2496788.

K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, et al.(6名,6番目), “A submillimeter range resolution time-of-flight range imager with column-wise skew calibration”, IEEE Trans. Elec. Dev., 査読有, vol.63, no.1, pp. 182-188(2016). DOI:10.1109/TED.2015.2447525.

M-W. Seo, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, “A 0.27e-rms read noise 220- μ V/e-conversion gain reset-gate-less CMOS image sensor with 0.11- μ m CIS process”, IEEE Electron Device Letters, 査読有, vol.36, no.12, pp.1344-1347 (2015). DOI: 10.1109/LED.2015.2496359.

S-M. Han, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, et al.(6名,6番目), “A time-of-flight range image sensor with background cancelling lock-in pixels based on lateral electric field charge modulation”, IEEE J. Electron Devices Society, 査読有, vol.3, no.3, pp. 267-275 (2015). DOI:10.1109/JEDS.2014.2382689.

K. Yasutomi, T. Usui, S-M. Han, T. Takasawa, K. Kagawa, S. Kawahito, “An indirect time-of-flight measurement technique with impulse photocurrent response for sub-millimeter range resolved imaging”, OPTICS EXPRESS, Vol.22, No.16, pp. 18904-18913 (2014), DOI: 10.1364/OE.22.018904.

[学会発表](計209件)

M-W. Seo, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, “Advanced CMOS Image Sensors for Scientific, Biomedical, and Industrial Imaging Applications”, 14th Int. SoC Design Conf.(2017), 招待講演.

S. Kawahito, “Image Sensors for Automotive Applications,” Symp. VLSI Circ. (2017), 招待講演.

S. Kawahito, “Time-Resolved CMOS Image Sensors and Their Future Prospects”, MEMS Engineer Forum (2017), 招待講演.

K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito et al.(6人,6番目), “A high-resolution time-of-flight range image sensor with 3-tap lateral electric field charge modulator,” Int. Image Sensor Workshop (2017).

K. Yasutomi, S. Kawahito, “Lock-in Detection Based Time-of-Flight CMOS Image Sensors”, 23rd Int. Display Workshops/Asia Display(2016), 招待講演.

S. Kawahito, “3D-stacking architecture for low-noise high-speed image sensors”, 3rd Int. Workshop on Image Sensors and Imaging Systems (2016), 招待講演.

S. Kawahito, “Highly Time-Resolved CMOS Image Sensors Using High-Speed Carrier Modulation Techniques”, Int. Conf. Solid State Devices and Materials (2016), 招待講演.

S. Kawahito, “Recent Progress of CMOS Image Sensors and Their Future Prospects”, IEICE Special Lecture at Kyungpook National University (2016), 招待講演.

S. Kawahito, “Low-Noise Image Sensors”, Forum, 2016 Int. Solid-State Circuits Conf., (2016), 招待講演.

S. Kawahito, M-W. Seo, K. Yasutomi, K. Kagawa, “Highly Time-Resolved Image Sensors and Their Applications”, The 1st International Conference on Advanced Imaging(1st ICAI 2015), (2015), 招待講演.

K. Sobue, M-W. Seo, M. Niwayama, K. Kagawa, K. Yasutomi, S. Kawahito, “Time-Resolved Transmittance Measurement for Biological Tissues with a High Time-Resolution CMOS Lock-In Pixel Imager,” Eng. Medicine Biology Conf. (EMBC) (2015).

S. Kawahito, “CMOS Image Sensors and Their Impacts on Medical Imaging”, OIST Mini Symp.“New Medical Imaging and Advanced Cancer Therapy (BNCT) Instrumentation” (2015), 招待講演.

S. Kawahito, “Lost Art? Analog Tricks and Techniques from the Masters”, IEEE Int. Solid-State Circ. Conf.(ISSCC)(2015), 招待講演.

M-W. Seo, K. Kagawa, K. Yasutomi, S. Kawahito et al.(9人,9番目) “A 10.8ps-Time-Resolution 256 x 512 Image Sensor with 2-Tap True-CDS Lock-In Pixels for Fluorescence Lifetime Imaging”, IEEE Int. Solid-State Circ.Conf.(ISSCC)(2015).

F. Mochizuki, K. Kagawa, M-W. Seo, K. Yasutomi, S. Kawahito et al.(9人,9番目), “Single-Shot 200Mfps 5x3-Aperture Compressive CMOS Imager”, IEEE Int.

Solid-State Circ. Conf.(ISSCC)(2015).
S. Kawahito, " Highly Time Resolved Photonic Imaging Devices and Their Applications ", THU-CAS-JSPS Joint Symp. " Emerging Photonics " (2014),招待講演

K. Kagawa, K. Yasutomi, S. Kawahito, " Multi-Point and Multi-Aperture Time-Resolving CMOS Image Sensors ", Int. Symp. Optical Memory(2014),招待講演.

S. Kawahito, " Highly Time-Resolved CMOS Image Sensors and Their Applications ", The 7th Asia-Pacific Conf. Transducers and Micro/Nano Technologies(2014), 招待講演.

S. Kawahito, K. Yasutomi, " CMOS Time-of-Flight 3D Image Sensors with Electric Field Modulation ", Collaborative Conference on 3D & Materials Research (CC3DMR)2014, (2014), 招待講演.

S. Kawahito, " Innovation in charge domain global shutter technologies ", Image Sensors 2014(2014), 招待講演.

⑲ K. Yasutomi, S. Kawahito, " High-resolution TOF range imagers with lateral electric field Modulators ", Time of Flight Imaging Devices and Applications Workshop,(2014), 招待講演.

⑳ S. Kawahito, " Low Noise High Dynamic Range CMOS Image Sensor ", SEMICON Korea 2014, (2014), 招待講演.

㉑ K. Yasutomi, T. Usui, S. Han, T. Takasawa, K. Kagawa, S. Kawahito, " A 0.3mm- Resolution Time-of-Flight CMOS Range Imager with Column-Gating Clock-Skew Calibration ", IEEE Int. Solid-State Circ. Conf.(ISSCC)(2014).

㉒ S. Han, T. Takasawa, T. Akahori, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, " A 413x240-Pixel Sub-Centimeter Resolution Time-of-Flight CMOS Image Sensor with In-Pixel Background Canceling Using Lateral-Electric-Field Charge Modulators ", Int. Solid-State Circ. Conf.(ISSCC)(2014).

㉓ S. Kawahito, " Low Noise Circuits Techniques for CMOS Sensors ", IEEE EDS Seminar at UPM (2013),招待講演.

〔図書〕(計1件)

Nanophotonic Information Physics -Nanointelligence and Nanophotonic Computing-, M. Narue 編著, N. Tate, M. Ando, M. Ohtsu, S. Kawahito, 他著者26名, pp.145-159, Springer社(2014).

〔産業財産権〕

出願状況(計20件)

名称: 光電変換素子及び固体撮像装置
発明者: 川人祥二、徐珉雄、安富啓太、白川雄也
権利者: 国立大学法人静岡大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-164162

出願年月日: 2016/8/24

国内外の別: 国内

名称: 半導体素子及び固体撮像素子

発明者: 川人祥二、徐珉雄

権利者: 国立大学法人静岡大学

種類: 特許

番号: 特願 2015-185718

出願年月日: 2015/9/18

国内外の別: 国内

名称: 電荷変調素子及び固体撮像装置

発明者: 川人祥二、安富啓太、韓相萬

権利者: 国立大学法人静岡大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-022516

出願年月日: 2014/2/7

国内外の別: 国内

取得状況(計1件)

名称: イメージセンサ

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: US 9,832,409 (基礎出願: 特願

2014-022344 2014/2/7 出願)

取得年月日: 2017/11/28

国内外の別: 国外

〔その他〕

ホームページ

<http://www.idl.rie.shizuoka.ac.jp/>

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

香川 景一郎 (KAGAWA, Keiichiro)

静岡大学・電子工学研究所・准教授

研究者番号: 30335484

(3)連携研究者

安富 啓太 (YASUTOMI, Keita)

静岡大学・電子工学研究所・助教

研究者番号: 50621661

徐 珉雄 (SEO, Min-Woong)

静岡大学・電子工学研究所・特任准教授

研究者番号: 40749389

高松 哲郎 (TAKAMATSU, Tetsuro)

京都府立医科大学・医学研究科・教授

研究者番号: 40154900

山本 条太郎 (YAMAMOTO, Johtaro)

北海道大学・先端生命科学研究科・特任助教

研究者番号: 20585088