

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04921

研究課題名(和文)飽和電荷数1億個超・線形応答を有する革新的な微小光量差検出イメージセンサの創出

研究課題名(英文) Establishment of innovative small light amount difference image sensor with linear response 100 million electron full well capacity

研究代表者

黒田 理人(KURODA, Rihito)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40581294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,200,000円

研究成果の概要(和文)：画素当たり1億個超の飽和電荷数と線形応答を有し、強い光の中から微小な光量変化を高感度・高速に計量するイメージセンサ技術創出を目指して、高容量密度と低リーク電流を両立する画素内光電荷蓄積キャパシタ形成技術と、蓄積光電荷の上澄みレベルの高精度信号検出技術の研究を行った。試作チップで190～1100nmの広波長帯域、2430万個の飽和電荷数、71dBのSNRを得た。フレーム平均化により1億個超の飽和電荷数相当の80dBのSNRがリアルタイム撮像で達成できることを示した。吸光イメージングにより、サブppmのオゾン水やアセトン、半導体製造用ガス、グルコース等の2次元微量濃度分布を非破壊で可視化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、2次元画素アレイを有するイメージセンサにおいてこれまで取り組まれていなかった強い光の中から微小な光量差を検出する機能実現に挑戦し、70dBを超えるSNRといったこれまでにない撮像性能を実証した。その結果、今まで見えなかった無色透明な液体、ガスの微量な2次元濃度分布の可視化・濃度計量を可能とする高精度な2次元吸光イメージングを実証し、医療、食品、農業、環境分野での活用が大いに期待される。本研究の成果はX線センサ等の高飽和性能が要されるイメージセンサの性能を飛躍的に向上させることが出来る。これらは新しい計測技術の創出や新たな学理の発見、新規産業創出の貢献に資する。

研究成果の概要(英文)： Aiming for the establishment of a small light amount difference image sensor technology, in-pixel photo-charge integration capacitors with high capacitance density and low leakage current and signal readout method to accurately detect potential level of accumulated photo-charge were researched. A prototype chip developed in this research demonstrated a 190-1100nm wide spectral response, 24.3M photoelectron full well capacity and 71.3dB SNR. Using the frame averaging method, 80dB SNR real-time imaging is to be available, which accounts for over 100M photoelectron signal. In addition, using a non-destructive light absorption imaging with the developed image sensor, two-dimensional concentration images of sub-ppm order concentration ozonated water, acetone gas, process gas for semiconductor equipment, and glucose were visualized.

研究分野：半導体集積回路

キーワード：電子デバイス・機器 センシングデバイス 撮像素子 吸光イメージング

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

イメージセンサは情報機器、医療、防犯、車載、エネルギー・環境、農業、インフラ、宇宙、防衛等、様々な分野で広く利用されている。情報入力技術の要であるイメージセンサ技術の進歩は、豊かで安心・安全な生活・環境を提供し、未来を切り開いていく原動力となる。光を用いた分析技術の一つである分光分析手法は、分光光度計、原子吸光分析、高速液体クロマトグラフといった定性・定量分析装置から、近年研究開発が盛んに行われている波長情報を2次元画像として得る分光イメージングまで様々な場面で用いられている。中でも吸光分析法は元素の同定や濃度の計量に有効であるが、高精度な分析には数十～数百 ppm といった微小な割合の光量変化を高精度に検出する必要がある。ここで、光検出器・イメージセンサに入射する光量はフォトンショットノイズにより、平均光量の平方根で時間的・空間的にゆらぎ、強い光量から微小な割合の光量変化を検出する吸光分析等の分析手法においては、精度を律則する主要因となっている。分析精度を向上させるには光信号量を増加させ、下式に示す信号/ノイズ比 (SNR) を増加させることが最も効果的である。

$$SNR = 20 \cdot \log \left( \frac{N_{signal}}{N_{noise}} \right) \approx 20 \cdot \log(\sqrt{N_{signal}}) \text{ [dB]}$$

ここで、 $N_{signal}$ 、 $N_{noise}$  は光検出器における光信号電荷数と入力換算ノイズ電荷数を示す。強い光量条件下では  $N_{noise}$  は  $N_{signal}$  の平方根であるフォトンショットノイズ成分に近似できる。数十～数百 ppm の光信号変化の割合を高精度に検出するには 80dB 以上の SNR が必要であり、そのため光検出器の飽和電荷数を 1 億個以上に向上させる必要がある。現状では単体フォトダイオード等に大容量キャパシタを外付けして電荷を積分したり、長大な画素形状のリニアアレイセンサを用いたりして飽和電荷数を稼いでいる。一方、2次元空間分解能を有するアクティブ型のエリアイメージセンサにおいては、飽和電荷数は1画素当たり僅か5千～数万個に限られる。光量に対して対数応答をするイメージセンサがあるが、非線形な応答は高精度な分析用途には不向きである。このように、現状のイメージセンサ技術では、分析器並みの精度を2次元に配置された各画素レベルで実現することが出来ていない、という課題があった。

### 2. 研究の目的

本研究では、図1に他の既存技術と比較した位置づけを示すように1億個超の飽和電荷数と線形応答により80dB以上のSNRを実現して強い光の中から微小な光量変化をリアルタイムに2次元で撮像する革新的なイメージセンサ技術を創出することを目的とした。本研究のイメージセンサの光電変換特性のコンセプトを図2に示す。

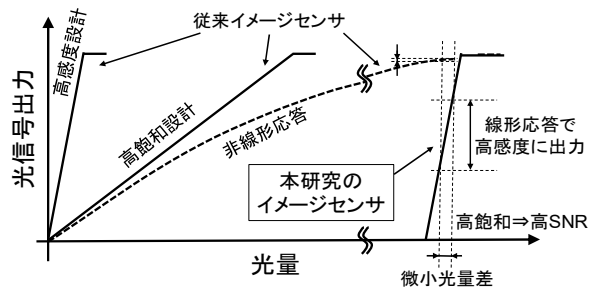
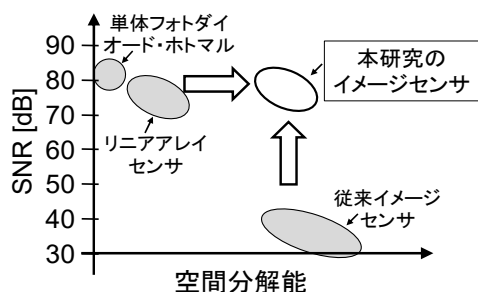


図1. 本研究のイメージセンサの位置づけ。 図2. 本研究のイメージセンサの光電変換特性。

本研究の目的が達成されれば、数十～数百 ppm オーダーの光量差の検出・計量をリアルタイム・2次元で行うことが出来るようになり、現状の高精度な分析装置に空間分解能を加えることや、光トモグラフィの高精度化や高解像度化に資することが出来る。またデジタルカメラ・スマホカメラのように日常的に使用するアプリケーションにも適用することが出来るようになれば、血糖値のモニタリング等の生体状態の非侵襲リアルタイム計測、食品検査、農作物の育成状況のモニタリング等、人々の安心安全な暮らしを支える革新的な技術となり得る。

### 3. 研究の方法

(1) 画素毎の飽和電荷数を増加させ、1億個とする。そのために  $50\text{fF}/\mu\text{m}^2$  以上の高容量密度かつ低リーク電流な画素内光電荷蓄積キャパシタ構造とその形成方法を明らかにする。

(2) 微小な光量変化を高感度・高速に線形応答で計量する光信号計測方法を確立する。そのために、蓄積光電荷の上澄みを計量するスキミング光信号検出画素回路・動作方式を創出する。

(3) 上記(1-2)で明らかにした画素構造・回路構成を導入したイメージセンサを設計・試作して性能を測定し、190～1100nmの広波長範囲においてSNRが80dB以上の高精度な光計量性能を2次元の撮像結果として実証する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 高容量密度・低リーク電流な画素内光電荷蓄積キャパシタ構造と形成技術

1億個の飽和電荷数を実現する構成例として、画素内に1.6Vの信号レンジを確保できる10pF以上の容量を形成する必要がある。本研究では $16\mu\text{m}$ 角以下の画素サイズを目標とし、画素面積の80%をメモリに割り当てることを想定し光電荷蓄積キャパシタの容量密度目標値を $50\text{fF}/\mu\text{m}^2$ 以上と定めた。本キャパシタは光電荷を蓄積するため、蓄積期間内に生じるリーク電荷量はフォトンショットノイズ成分より十分小さく抑制する必要がある、 $10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$ 以下の低リーク電流性能が求められる。デジタル値を保持するDRAM用のキャパシタはリーク電流が大きすぎてそのままでは適用できない。一方、アナログメモリ用の素子である配線層間に形成するMetal-Insulator-Metal (MIM) キャパシタの容量密度が $1\sim 2\text{fF}/\mu\text{m}^2$ 程度、Si基板に形成するMetal-Oxide-Silicon (MOS) キャパシタが $4\sim 6\text{fF}/\mu\text{m}^2$ 程度となっており、これらのキャパシタ素子については低リーク電流特性を維持しつつ、1桁程度の容量密度増加が必要である。

本研究では目的を達成するために、①高誘電率絶縁膜を用いたMIMキャパシタと、②Si基板に形成するトレンチ形状の側面に容量を形成するトレンチキャパシタの構造と形成技術に取り組んだ。

①については、Atomic Layer Deposition (ALD)法によって成膜する $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜を用いたMIMキャパシタの試作に取り組み、下地材料との反応を抑制しつつ酸素欠損を低減するためのALDプロセス及び成膜後処理の条件を見出し、 $10^{-9}\text{A}/\text{cm}^2$ 以下の低リーク電流と $10\text{fF}/\mu\text{m}^2$ の容量密度を両立した。一方、1桁を超えるような容量密度向上を達成するには、高誘電率膜だけではなく、実効表面積を増加させる手段が重要であることも明らかになった。

②については、Siフォトダイオードと同一基板上の画素内に集積可能なトレンチキャパシタ構造と、フォトダイオード基板と光電荷蓄積キャパシタ基板とを画素毎に接続する3次元集積化を見越したさらなる深堀トレンチキャパシタ構造との方針を分けて取り組んだ。

前者では、トレンチ型キャパシタの形成技術と画素内集積化技術の確立に取り組み、深さ $1.8\mu\text{m}$ で、容量密度約 $24\text{fF}/\mu\text{m}^2$ を有するトレンチキャパシタ構造を見出した。また、図3に画素断面構造を示すように、近赤外光の高感度化のために導入した極低不純物濃度シリコン基板に製造するCMOSイメージセンサの画素内に集積化するためのフォトダイオードとの分離構造、および光電荷を適切にフォトダイオードに輸送させるためのポテンシャル勾配の形成方法を明らかにし、後述するイメージセンサでの性能実証を行った。

後者では、深さ $12\mu\text{m}$ のトレンチ側壁にシリコン酸化膜を形成するディープトレンチキャパシタ構造単体のチップを設計、試作し、本研究の目標を上回る、 $90\text{fF}/\mu\text{m}^2$ を超える容量密度を得た。ここで、平面型のキャパシタに対するトレンチ側壁を用いた実効表面積の増大効果は約25倍であった。絶縁破壊耐圧は8Vを超えており、絶縁膜の薄膜化を行えばさらなる容量増加が見込める。また、本技術のさらなる進化の方向として、トレンチ深さをさらに深めると共にトレンチ側壁を粗面化して実効表面積をさらに増加させること、さらには絶縁膜に高誘電率薄膜を適用することで、 $250\text{fF}/\mu\text{m}^2$ を超える容量密度が得られる見込みを得ている。これは、将来的に飽和電荷数を高めたまま画素サイズを縮小したイメージセンサの高解像度化することに資するものである。

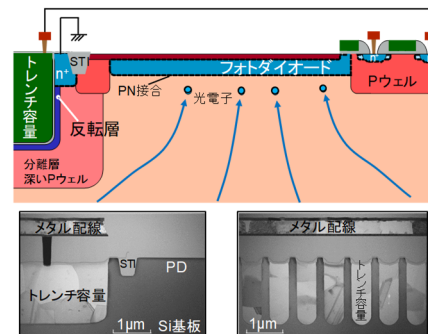


図3. 画素内トレンチキャパシタの集積構造と断面透過型電子顕微鏡像。

##### (2) 微小な光量変化を高感度・高速に線形応答で計量する光信号計測方法

強い光の中から微小な光量変化を検出するために、蓄積部に収集された光電荷の上澄みレベルを高感度、線形応答で計量するための光信号計測方法の確立に取り組んだ。

1つ目の手法は図4にポテンシャルの模式図を示すように、大容量キャパシタを用いた光電荷蓄積部の飽和付近に位置する光信号レベルを読み出した直後に、光電荷蓄積部に光信号レベルに所定のリファレンス電圧を書き込み、光信号の読み出しと同じ信号経路を通じてリファレンス信号を読み出す方式である。本方式の特徴は、光電荷の蓄積を開始する前に行うリセット電圧 (VR1) とリファレンス電圧 (VR2) とを分ける点である。光信号レベルとリファレンス信号との差分を増幅させて信号を形成する。この方法により、光電荷蓄積部の飽和付近で微小に変化する信号レベルを高ゲインな回路を適用して読み出すことが出来る。また、画素

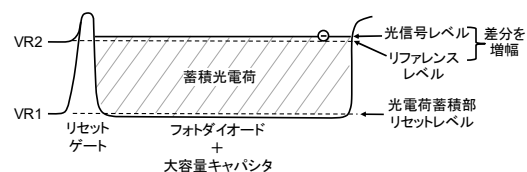


図4. 光電荷蓄積部のリセット電圧とリファレンス電圧とを独立に制御する方式の微小光量変化計測方法を表わすポテンシャル図。

内の同一のソースフォロワ回路を用いて信号レベルとリファレンスレベルと短時間の間隔で読み出すことにより、ソースフォロワ回路の画素毎のオフセット電圧ばらつき、および低周波ノイズを抑制できる効果がある。本方式では、従来の信号読み出し回路からの変更を抑制しつつ、微小光量変化を計量することが出来る。後述するイメージセンサの信号読み出し方式に実装した。

2つ目の手法は、図5に示す、大容量キャパシタを用いた光電荷蓄積部と電荷電圧変換を行うフローティングディフュージョンとをスキミングゲートによってポテンシャル分離し、光電荷蓄積部からスキミングゲートのポテンシャル障壁を超えてフローティングディフュージョンへ溢れた移動したわずかな光電荷を高い電荷電圧変換ゲインで電圧信号に変換する読み出し方法である。本方式では、光電荷蓄積部とフローティングディフュージョンの容量比で電荷電圧変換時の信号増幅を行うことが出来る。例えば、10pFの容量を有する光電荷蓄積部に対して10fFのフローティングディフュージョン容量を設ければ、電荷電圧変換時に1000倍の信号増幅が出来る。本方式に基づく駆動方法について回路シミュレーションを用いて検証した。その結果、スキミングゲートに所定の電圧をパルス印加してフローティングディフュージョンへ電荷を移動させる場合と、図6に示すように、スキミングゲートにカウンタ信号と同期したランプ波を印加し、画素信号出力の変化によって比較器が反転する時間を計測することでAD変換を行う場合とで、それぞれ見込み通りの感度と良好な線形性が得られることを見出した。

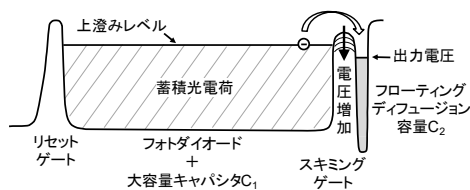


図5. スキミングゲート方式を用いた微小光量変化計測方法を表わすポテンシャル図。

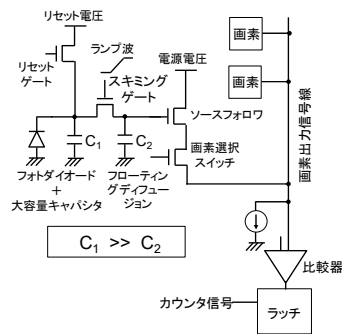


図6. 画素アレイ1列分の回路図。

### (3) イメージセンサによる性能実証

(1) および (2) で明らかにした素子・回路構成を導入したイメージセンサを設計、試作してその性能を実証した。具体的には、最小加工寸法  $0.18\ \mu\text{m}$ 、1層ポリシリコン、5層メタル配線層を有するCMOSイメージセンサプロセスを用いて、(1) で明らかにしたトレンチキャパシタを集積化した画素と、(2) で明らかにした微小光量変化計測方法を搭載した、画素サイズ  $16\ \mu\text{m}$  角、画素数  $128 \times 128$  のCMOSイメージセンサを設計、試作した。高容量密度トレンチキャパシタを画素内に搭載することで、表面照射型のチップながら、1.6pFの画素内容量と53%の開口率を両立している。また、シリコン中の侵入長が長い近赤外光の高感度化のために低不純物濃度基板を用いてフォトダイオード空乏層を延伸させると共に、侵入長が数nmと短く、光子エネルギーの高い紫外光に対する高感度化・高耐光性を両立するために急峻な不純物濃度プロファイルを有するフォトダイオード表面高濃度層を導入した。図7にチップ写真を示す。

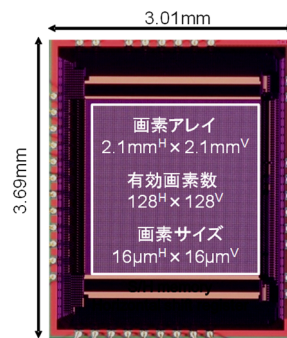


図7. 試作チップ写真。

図8に試作したCMOSイメージセンサを用いて取得した光電変換特性およびSNRの特性を示す。信号は、光電荷蓄積部のリセット電圧とリファレンス電圧とを独立に制御する方式の微小光量変化計測方法を適用している。画素辺り1回の露光にて2430万電子の飽和電荷数、71dB超のSNRを実測で得た。結果より、8回のフレーム平均回数によって本研究の目標に掲げている1億個の飽和電荷数相当、80dBのSNRを実質的に得ることが出来ることを見出した。本CMOSイメージセンサの最高フレームレートは最高685枚/秒であることから、十分なリアルタイム性を有するビデオレートにて80dB超のSNRを実現して強い光の中から微小な光量変化を2次元で撮像出来る見込みを得た。本イメージセンサの画素面積当たりの飽和電荷数は  $95\text{ke}^-/\mu\text{m}^2$  であり、これは単一露光、線形応答のイメージセンサとして世界最高の特性となっている。また、高容量密度キャパシタを横型オーバーフロー蓄積容量として用いることで広ダイナミックレンジ撮像が出来る駆動方式も実装しており、線形応答で130dB超のダイナミックレンジ性能が得られることを確認している。

図9は本CMOSイメージセンサの分光感度特性で

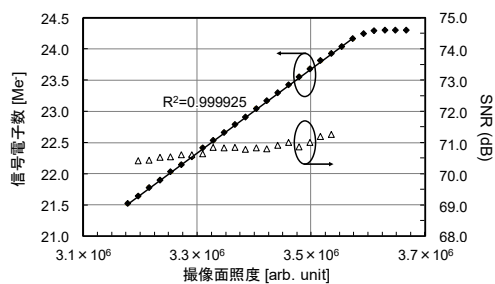


図8. 光電変換・SNR特性。

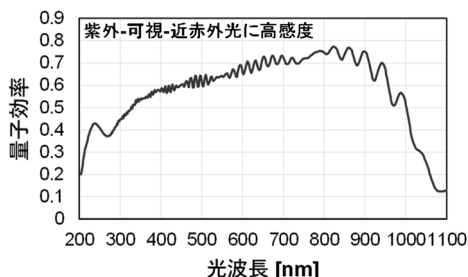


図9. フォトダイオード量子効率の光波長依存性。

ある。導入技術によって 190~1100nm の広光波長帯域に渡って極めて高いフォトダイオード量子効率を得ている。分光分析においては、分析対象の物質によって特性波長が変化する。イメージセンサの光波長帯域が広ければ、様々な分析対象に広く適用することが出来る。

図 10 に示す本 CMOS イメージセンサを搭載した吸光イメージングシステムを構築し、様々な計測対象に応用した結果を得た。具体的には紫外吸光を用いた低濃度オゾン水、アセトンガスの可視化を行い、1ppm 以下の濃度のオゾン水の対流の可視化、空気中のアセトン蒸気の可視化に成功した。また、半導体製造装置用の真空チャンバー内のガス濃度分布を可視化するために、吸光イメージングシステムをチャンバーに取り付けて、減圧下における NO<sub>2</sub> のガス濃度分布を可視化することに成功した。さらに、非侵襲血糖値モニタリングに資する近赤外光を用いたグルコース濃度分布の計量実験を行い、1050nm の LED 光源を用いた近赤外吸光イメージングによって、良好なグルコース濃度の検量線を得ると共に、5mg/dl の精度で生理食塩水中のグルコースが拡散する様子を捉えることに成功した。血液を用いたグルコース濃度の検量線を得る実験も実施した。

また、近赤外光に対するさらなる高感度化と高解像度化のためのイメージセンサの改良として、シリコン基板の薄膜化と裏面負バイアス印加による、光感度の向上と解像度の改善の効果を確認した。さらに、フォトダイオード基板と光電荷蓄積容量を形成した基板とを画素毎の電氣的接続を有する 3 次元集積化することで、1 画素辺り 1 億個を超える飽和電荷数を実現できる見込みを得る共に、前述したキャパシタの容量密度向上によって高解像度化に資する画素サイズ縮小の可能性を見出し、本技術の発展が今後も期待できることを示した。また、本研究の成果は X 線センサ等の高飽和性能が要されるイメージセンサの性能の飛躍的向上にも資するものである。

以上、本研究では、画素に集積可能な高容量密度キャパシタ技術と、微小な光量変化を高感度に捉える信号読み出し方式を備えた、微小な光量変化をリアルタイムに 2 次元で撮像するイメージセンサ技術を創出し、医療、食品、環境分野等での活用に資する吸光イメージング応用を実証した。

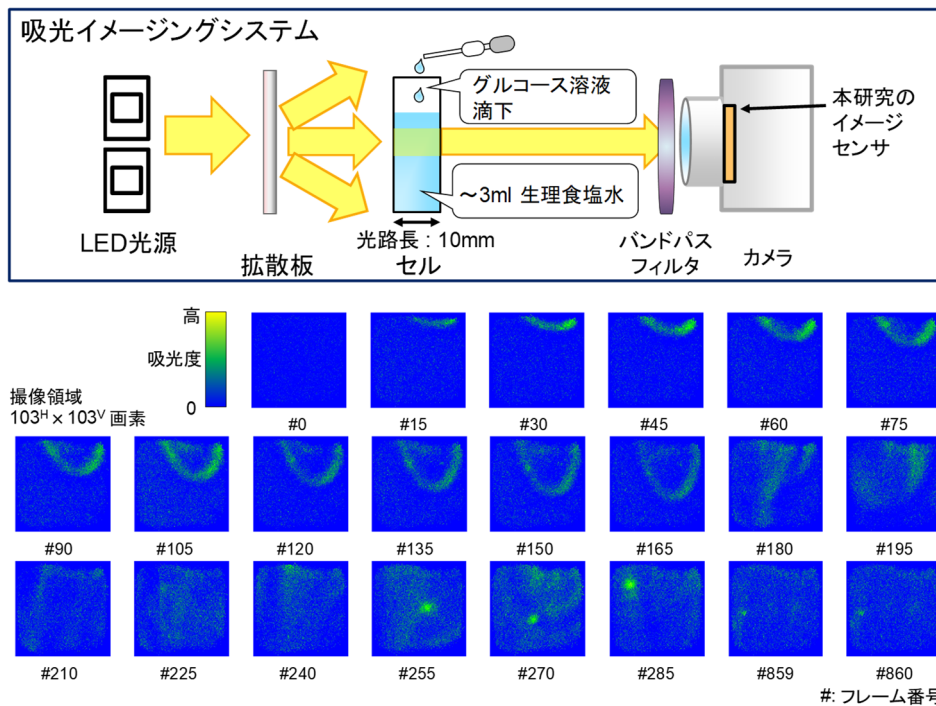


図 10. 透過型吸光イメージングシステム（上図）と 1050nm の LED を用いて、5mg/dl のグルコース溶液を滴下した様子を 30 フレーム/秒で撮像した吸光イメージング画像（下図）。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Yhang Ricardo Sipaubá Carvalho da Silva, Rihito Kuroda and Shigetoshi Sugawa	4. 巻 19
2. 論文標題 A Highly Robust Silicon Ultraviolet Selective Radiation Sensor Using Differential Spectral Response Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2755-1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s19122755	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yhang Ricardo Sipaubá Carvalho da Silva, Rihito Kuroda and Shigetoshi Sugawa	4. 巻 20
2. 論文標題 An Optical Filter-Less CMOS Image Sensor with Differential Spectral Response Pixels for Simultaneous UV-Selective and Visible Imaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 13-1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20010013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Manabu Suzuki, Yuki Sugama, Rihito Kuroda and Shigetoshi Sugawa	4. 巻 20
2. 論文標題 Over 100 Million Frames per Second 368 Frames Global Shutter Burst CMOS Image Sensor with Pixel-wise Trench Capacitor Memory Array	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1086-1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20041086	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Maasa Murata, Rihito Kuroda, Yasuyuki Fujihara, Yusuke Otsuka, Hiroshi Shibata, Taku Shibaguchi, Yutaka Kamata, Noriyuki Miura, Naoya Kuriyama, Shigetoshi Sugawa	4. 巻 67
2. 論文標題 A High Near-Infrared Sensitivity Over 70-dB SNR CMOS Image Sensor With Lateral Overflow Integration Trench Capacitor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES	6. 最初と最後の頁 1653-1659
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TED.2020.2975602	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Rihito Kuroda, Akinobu Teramoto and Shigetoshi Sugawa	4. 巻 6
2. 論文標題 Impacts of Random Telegraph Noise with Various Time Constants and Number of States in Temporal Noise of CMOS Image Sensors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ITE Transactions on Media Technology and Applications	6. 最初と最後の頁 171-179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3169/mta.6.163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinya Ichino, Takezo Mawaki, Akinobu Teramoto, Rihito Kuroda, Shunichi Wakashima, Tomoyuki Suwa and Shigetoshi Sugawa	4. 巻 6
2. 論文標題 Statistical Analyses of Random Telegraph Noise in Pixel Source Follower with Various Gate Shapes in CMOS Image Sensor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ITE Transactions on Media Technology and Applications	6. 最初と最後の頁 163-170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3169/mta.6.163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yasuyuki Fujihara, Yusuke Aoyagi, Maasa Murata, Satoshi Nasuno, Shunichi Wakashima, Rihito Kuroda, Kohei Terashima, Takahiro Ishinabe, Hideo Fujikake, Kazuhiro Wako and Shigetoshi Sugawa	4. 巻 6
2. 論文標題 A Multi Spectral Imaging System with a 71dB SNR 190-1100 nm CMOS Image Sensor and an Electrically Tunable Multi Bandpass Filter	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ITE Transactions on Media Technology and Applications	6. 最初と最後の頁 187-194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3169/mta.6.187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinya Ichino, Akinobu Teramoto, Rihito Kuroda, Takezo Mawaki, Tomoyuki Suwa, Shigetoshi Sugawa	4. 巻 39
2. 論文標題 Statistical Analysis of Threshold Voltage Variation Using MOSFETs With Asymmetric Source and Drain	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Electron Device Letters	6. 最初と最後の頁 1836-1839
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LED.2018.2874012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kohei Terashima, Kazuhiro Wako, Yasuyuki Fujihara, Yusuke Aoyagi, Maasa Murata, Yosei Shibata, Shigetoshi Sugawa, Takahiro Ishinabe, Rihito Kuroda, Hideo Fujikake	4. 巻 E101-C
2. 論文標題 High Speed and Narrow-Bandpass Liquid Crystal Filter for Real-Time Multi Spectral Imaging Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE TRANSACTIONS on Electronics	6. 最初と最後の頁 897-900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.E101.C.897	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Kuroda, M. Suzuki, S. Sugawa	4. 巻 11051
2. 論文標題 Over 100 million frames per second high speed global shutter CMOS image sensor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 110510B-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2524492	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke Aoyagi, Yasuyuki Fujihara, Maasa Murata, Hiroya Shike, Rihito Kuroda, Shigetoshi Sugawa	4. 巻 58
2. 論文標題 A CMOS image sensor with dual pixel reset voltage for high accuracy ultraviolet light absorption spectral imaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SBBL03-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/aaffc1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hidekazu Ishii, Masaaki Nagase, Nobukazu Ikeda, Yoshinobu Shiba, Yasuyuki Shirai, Rihito Kuroda, and Shigetoshi Sugawa	4. 巻 58
2. 論文標題 A high-sensitivity compact gas concentration sensor using ultraviolet light absorption with a heating function for a high-precision trimethyl aluminum gas supply system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SBBL04-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/aafe69	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 Kuroda R., Sugawa S.	4. 巻 10328
2. 論文標題 A high sensitivity 20Mfps CMOS image sensor with readout speed of 1Tpixel/secfor visualization of ultra-high speed phenomena	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceeding of SPIE	6. 最初と最後の頁 1032802-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2270787	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Furukawa K., Teramoto A., Kuroda R., Suwa T., Hashimoto K., Sugawa S., Suzuki D., Chiba Y., Ishii K., Shimizu A., Hasebe K.	4. 巻 56
2. 論文標題 Formation technology of flat surface with epitaxial growth on ion-implanted (100)-oriented Si surface of thin silicon-on-insulator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 105503-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.56.105503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Teramoto A., Saito M., Suwa T., Narita T., Kuroda R., Sugawa S.	4. 巻 38
2. 論文標題 Hole-Trapping Process at Al2O3/GaN Interface Formed by Atomic Layer Deposition	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Electron Device Letters	6. 最初と最後の頁 1309-1312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LED.2017.2734914	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Park H., Teramoto A., Kuroda R., Suwa T., Sugawa S.	4. 巻 57
2. 論文標題 Experimental investigation of localized stress-induced leakage current distribution in gate dielectrics using array test circuit	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 04FE11-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.04FE11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ichino S., Mawaki T., Teramoto A., Kuroda R., Rark H., Wakshima S., Goto T., Suwa T., Sugawa S.	4. 巻 58
2. 論文標題 Effect of drain current on appearance probability and amplitude of random telegraph noise in low-noise CMOS image sensors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 04FF08-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.04FF08	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計39件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 22件)

1. 発表者名 Hidekazu Ishii, Masaaki Nagase, Nobukazu Ikeda, Yoshinobu Shiba, Yasuyuki Shirai, Rihito Kuroda, and Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 High Sensitivity Compact Gas Concentration Sensor with Heating Function for High Precision Trimethyl Aluminum Gas Supply System
3. 学会等名 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Aoyagi, Yasuyuki Fujihara, Maasa Murata, Hiroya Shike, Rihito Kuroda, and Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 Dual Pixel Reset Voltage CMOS Image Sensor For High SNR Ultraviolet Light Absorption Spectral Imaging
3. 学会等名 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hsin Jyun Lin, Akinobu Teramoto, Hiroshi Watanabe, Rihito Kuroda, Kota Umezawa, Kiichi Furukawa, and Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 Improved Conductance Method for Interface Trap Density of ZrO <sub>2</sub> -Si interface
3. 学会等名 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Rihito Kuroda, Manabu Suzuki and Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 High Speed Global Shutter CMOS Image Sensors Toward Over 100Mfps
3. 学会等名 Ultrafast imaging and particle tracking instrumentation and methods 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Rihito Kuroda, Manabu Suzuki and Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 Over 100Mfps high speed global shutter CMOS image sensor
3. 学会等名 32nd International Congress on High-Speed Imaging and Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaya Saito, Akinobu Teramoto, Tomoyuki Suwa, Kenshi Nagumo, Yoshinobu Shiba, Rihito Kuroda and Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 Effects of Process Gases and Gate TiN Electrode during the Post Deposition Anneal to ALD-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Dielectric Film
3. 学会等名 American Vacuum Society 65th International Symposium & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Rihito Kuroda, Shinya Ichino, Takezo Mawaki, Tomoyuki Suwa, Akinobu Teramoto, and Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 RTS noise characterization and suppression for advanced
3. 学会等名 4th International Workshop on Image Sensors and Imaging Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名	M. Murata, R. Kuroda, Y. Fujihara, Y. Aoyagi, H. Shibata, T. Shibaguchi, Y. Kamata, N. Miura, N. Kuriyama and S. Sugawa
2. 発表標題	A 24.3Me- Full Well Capacity CMOS Image Sensor with Lateral Overflow Integration Trench Capacitor for High Precision Near Infrared Absorption Imaging
3. 学会等名	2018 IEEE International Electron Devices Meeting ( 国際学会 )
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	M. Yamamoto, R. Kuroda, M. Suzuki, T. Goto, H. Hamori, S. Murakami, T. Yasuda and S. Sugawa
2. 発表標題	A CMOS Proximity Capacitance Image Sensor with 16 $\mu$ m Pixel Pitch, 0.1aF Detection Accuracy and 60 Frames Per Second
3. 学会等名	2018 IEEE International Electron Devices Meeting ( 国際学会 )
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	Takeru Maeda, Yuya Omura, Akinobu Teramoto, Rihito Kuroda, Tomoyuki Suwa, and Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題	Resistance Measurement Platform for Statistical Analysis of Next Generation Memory Materials
3. 学会等名	2019 IEEE International Conference on Microelectronic Test Structures ( 国際学会 )
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	村田真麻, 藤原康行, 青柳雄介, 黒田理人, 須川成利
2. 発表標題	高紫外光感度・高飽和CMOSイメージセンサを用いたサブppmオーダのオゾン水対流のイメージング
3. 学会等名	映像情報メディア学会技術報告・情報センシング研究会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名 鈴木学, 黒田理人, 須川成利
2. 発表標題 バーストCDS動作を用いた撮影速度1億2500万コマ/秒の高速CMOSイメージセンサ
3. 学会等名 映像情報メディア学会技術報告・情報センシング研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 市野真也, 寺本章伸, 黒田理人, 間脇武蔵, 諏訪智之, 須川成利
2. 発表標題 ソースとドレインが非対称のMOSFETを用いた電気的特性ばらつきの統計的解析
3. 学会等名 シリコン材料・デバイス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒田理人
2. 発表標題 紫外・可視・近赤外光帯域・高感度イメージセンサと分光イメージングへの応用展開
3. 学会等名 光とレーザーの科学技術フェア2018 イメージセンサーオープンセミナー(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 黒田理人
2. 発表標題 A 24.3Me- Full Well Capacity CMOS Image Sensor with Lateral Overflow Integration Trench Capacitor for High Precision Near Infrared Absorption Imaging
3. 学会等名 電気学会「ナノエレクトロニクス基盤ヘテロ集積化・応用技術調査専門委員会」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本将大, 黒田理人, 鈴木 学, 後藤哲也, 羽森 寛, 村上真一, 安田俊朗, 横道やよい, 須川成利
2. 発表標題 0.1aFの検出精度を有するCMOS近接容量イメージセンサ
3. 学会等名 映像情報メディア学会技術報告・情報センシング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村田真麻, 黒田理人, 藤原康行, 大塚雄介, 柴田 寛, 柴口 拓, 鎌田 浩, 三浦規之, 栗山尚也, 須川成利
2. 発表標題 横型オーバーフロー蓄積トレンチ容量を有する飽和電子数2430万個・近赤外高感度CMOSイメージセンサ
3. 学会等名 映像情報メディア学会技術報告・情報センシング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hyeonwoo Park, Tetsuya Goto, Rihito Kuroda, Akinobu Teramoto, Tomoyuki Suwa, Daiki Kimoto, Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 Impact of SiO <sub>2</sub> /Si Interface Micro-roughness on SILC Distribution and Dielectric Breakdown: A Comparative Study with Atomically Flattened Devices
3. 学会等名 International Reliability Physics Symposium 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shinya Ichino, Takezo Mawaki, Shunichi Wakashima, Akinobu Teramoto, Rihito Kuroda, Phillipe Gaubert, Tetsuya Goto, Tomoyuki Suwa, Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 Statistical Analysis of Random Telegraph Noise in Source Follower Transistors with Various Shapes
3. 学会等名 2017 International Image Sensor Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Rihito Kuroda, Akinobu Teramoto, Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 Impact of Random Telegraph Noise with Various Time Constants and Number of States in CMOS Image Sensors
3. 学会等名 2017 International Image Sensor Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuyuki Fujihara, Yusuke Aoyagi, Satoshi Nasuno, Shunichi Wakashima, Rihito Kuroda, Kohei Terashima, Takahiro Ishinabe, Hideo Fujikake, Kazuhiro Wako, Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 A Spectral Imaging System with an Over 70dB SNR CMOS Image Sensor and Electrically Tunable 10nm FWHM Multi-Bandpass Filter
3. 学会等名 2017 International Image Sensor Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Manabu Suzuki, Masashi Suzuki, Rihito Kuroda, Yuki Kumagai, Akira Chiba, Noriyuki Miura, Naoya Kuriyama, Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 10Mfps 960 Frames Video Capturing Using a UHS Global Shutter CMOS Image Sensor with High Density Analog Memories
3. 学会等名 2017 International Image Sensor Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hyeonwoo Park, Tomoyuki Suwa, Rihito Kuroda, Akinobu Teramoto, Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 Experimental Investigation of Localized Stress Induced Leakage Current Distribution in Gate Dielectrics Using Array Test Circuit
3. 学会等名 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takezo Mawaki, Akinobu Teramoto, Rihito Kuroda, Shinya Ichino, Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 Analysis of Random Telegraph Noise Behaviors of nMOS and pMOS toward Back Bias Voltage Changing
3. 学会等名 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shinya Ichino, Takezo Mawaki, Akinobu Teramoto, Rihito Kuroda, Hyeonwoo Park, Takeru Maeda, Shunichi Wakashima, Tetsuya Goto, Tomoyuki Suwa, Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題 Impact of Drain Current to Appearance Probability and Amplitude of Random Telegraph Noise in Low Noise CMOS Image Sensors
3. 学会等名 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Gaubert P., Kircher A., Park H., Kuroda R., Sugawa S., Goto T., Suwa T., Teramoto A.
2. 発表標題 Atomically flat interface for noise reduction in SOI-MOSFETs
3. 学会等名 2017 International Conference on Noise and Fluctuations (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kohei Terashima, Takahiro Ishinabe, Kazuo Wako, Yasuyuki Fujihara, Yusuke Aoyagi, Maasa Murata, Satoshi Nasuno, Shunichi Wakashima, Rihito Kuroda, Yosei Shibata, Shigetoshi Sugawa, Hideo Fujikake
2. 発表標題 Narrow-Bandpass Liquid Crystal Filter for Real-Time Multi Spectral Imaging Systems
3. 学会等名 International Display Workshops (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名	Takahiro Ishinabe, Kohei Terashima, Kazuhiro Wako, Yasuyuki Fujihara, Yusuke Aoyagi, Maasa Murata, Satoshi Nasuno, Shunichi Wakashima, Rihito Kuroda, Yosei Shibata, Shigetoshi Sugawa, Hideo Fujikake
2. 発表標題	High-speed multi-bandpass liquid-crystal filter using dual-frequency liquid crystal for real-time spectral imaging system
3. 学会等名	SPIE PHOTONICS WEST 2018 (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	Manabu Suzuki, Masashi Suzuki, Rihito Kuroda, Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題	A Preliminary Chip Evaluation toward Over 50Mfps Burst Global Shutter Stacked CMOS Image Sensor
3. 学会等名	IS&T International Symposium on Electronic Imaging 2018 (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	Maasa Murata, Yasuyuki Fujihara, Yusuke Aoyagi, Rihito Kuroda, Shigetoshi Sugawa
2. 発表標題	Spectral Absorption Imaging with an Over 70dB SNR CMOS Image Sensor
3. 学会等名	電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	黒田理人, 寺本章伸, 市野真也, 間脇武蔵, 若嶋駿一, 須川成利
2. 発表標題	画素SFで発生するランダムテレグラフノイズの統計的解析 ~ トランジスタ形状・時定数・遷移数の影響 ~
3. 学会等名	映像情報メディア学会技術報告・情報センシング研究会
4. 発表年	2017年

1. 発表者名 青柳雄介, 藤原康行, 村田真麻, 那須野悟史, 若嶋駿一, 黒田理人, 寺島康平, 石鍋隆宏, 藤掛英夫, 若生一広, 須川成利
2. 発表標題 SNR 70dB超のCMOSイメージセンサと半値幅10nmのチューナブルマルチバンドパスフィルタを用いた分光イメージングシステム
3. 学会等名 映像情報メディア学会技術報告・情報センシング研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石井 秀和, 永瀬 正明, 池田 信一, 志波 良信, 白井 泰雪, 黒田 理人, 須川 成利
2. 発表標題 紫外吸光とチャージアンプ回路を用いた高感度・小型リアルタイムガス濃度計
3. 学会等名 電子情報通信学会・シリコン材料・デバイス研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 朴 賢雨, 黒田 理人, 後藤 哲也, 諏訪 智之, 寺本 章伸, 木本 大幾, 須川 成利
2. 発表標題 局所的ストレス誘起ゲートリーク電流の統計的分布の解析とSi表面平坦化工程による低減
3. 学会等名 電子情報通信学会・シリコン材料・デバイス研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 市野 真也, 間脇 武蔵, 寺本 章伸, 黒田 理人, 若嶋 駿一, 須川 成利
2. 発表標題 高精度アレイテスト回路計測技術を用いたソースフォロアトランジスタの動作条件変化によるランダムテレグラフノイズの挙動解析
3. 学会等名 電子情報通信学会・シリコン材料・デバイス研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 黒田 理人, 鈴木 学, 鈴木 将, 須川 成利
2. 発表標題 撮像速度1000万コマ/秒を超える高速度CMOSイメージセンサ技術の進展
3. 学会等名 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 寺島康平, 石鍋隆宏, 若生一広, 藤原康行, 青柳雄介, 村田真麻, 那須野悟史, 若嶋駿一, 黒田理人, 柴田陽生, 須川成利, 藤掛英夫
2. 発表標題 リアルタイム分光イメージングシステム用の高速ナローバンドパス液晶フィルタ
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 黒田 理人
2. 発表標題 高速化・高感度化技術の今後
3. 学会等名 次世代画像入力ビジョンシステム部会・映像情報メディア学会共催公開講演会『イメージセンサ30年の進歩と更なる発展』（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木学, 鈴木将, 黒田理人, 須川成利
2. 発表標題 最高撮像速度5000万コマ/秒を有するプロトタイプグローバルシャッタ高速CMOSイメージセンサ
3. 学会等名 映像情報メディア学会技術報告・情報センシング研究会
4. 発表年 2018年

## 〔図書〕 計2件

1. 著者名 黒田 理人	4. 発行年 2017年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 17
3. 書名 車載センシング技術の開発と ADAS、自動運転システムへの応用 第2章 第1節 CMOSイメージセンサの広ダイナミックレンジ化技術	

1. 著者名 黒田 理人	4. 発行年 2017年
2. 出版社 日本工業出版	5. 総ページ数 5
3. 書名 光アライアンス2017年12月号 三次元積層を用いた先進CMOSイメージセンサ技術	

## 〔出願〕 計0件

## 〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 受光デバイスおよび受光デバイスの信号読み出し方法	発明者 須川成利、黒田理人	権利者 国立大学法人東北大学
産業財産権の種類、番号 特許、6671715	取得年 2020年	国内・外国の別 国内

## 〔その他〕

-

## 6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----