

氏名	なすの さとし 那須野 悟史
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成29年3月24日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)技術社会システム専攻
学位論文題目	広ダイナミックレンジCMOSイメージセンサの 光波長広帯域化とその応用に関する研究
指導教員	東北大学教授 須川 成利
論文審査委員	主査 東北大学教授 須川 成利 東北大学教授 長平 彰夫 東北大学教授 中村 健二 東北大学准教授 黒田 理人

## 論文内容要旨

科学計測, 医療, 農業などの分野において, 2次元の波長情報を取得する分光イメージングの利用が拡大しており, 通常のカラー画像では行うことが出来ない物体の検出, 成分分析, 濃度計測等に应用されている. 分光イメージング用途のイメージセンサには, 様々な特性波長を有する分析対象に対応するため, また発光・吸光の輝度差の大きい被写体を解析するために感度光波長帯域の広帯域化, 高感度・広ダイナミックレンジ(DR)化が求められる. しかし, これまでのイメージセンサ技術では紫外・可視・近赤外光の広光波長帯域における高感度化と紫外光の長期間の照射による感度・暗電流の経時劣化の抑制とを両立することが困難であり, さらに広DR化技術と組み合わせることが出来ておらず分光イメージングに適したイメージセンサの創出が課題であった. 本論文は, こうした背景に鑑み, 広光波長帯域・高紫外光照射耐性フォトダイオード(PD)形成技術をCMOSイメージセンサの画素PDに適用し, 広DR横型オーバーフロー蓄積容量(LOFIC)技術と融合しつつ高感度化を進展させ, さらに2次元で複数の波長情報をリアルタイムに取得可能とする分光イメージングシステムへの応用を行った成果をまとめたものであり, 全文5章からなる.

第1章は, 分光イメージング向けのイメージセンサにおける要求性能として, 広い感度波長帯域, 高感度・広ダイナミックレンジ性能, 高フレームレートについて示した. また, 各要求性能を達成するために解決すべき技術的課題を示した. 1つ目の課題は, 紫外光はSiに対する侵入長が短く, 光子の有するエネルギーが高いことから, 紫外光に対する感度が低く, さらに感度と暗電流の経時変化を生じることである. 2つ目の課題は, 従来の4トランジスタ型の画素回路において, 電荷電圧変換はフローティングディフュージョン(FD)で行うため, 電荷電圧変換ゲインはFD容量( $C_{FD}$ )に反比例し, 一方で飽和電荷量は $C_{FD}$ に比例する関係にあり, 感度とダイナミックレンジのトレードオフ関係に陥ることである. これらの背景を鑑みて本研究では, 広光波長帯域・紫外光高信頼性PDを広ダイナミックレンジCMOSイメージセンサの画素内PDに適用するとともに高感度化を図り, 光波長広帯域化, 紫外光高信頼性化, 高感度・広ダイナミックレンジ化, 低ノイズ化を実現するイメージセ

ンサを創出すること，またこのイメージセンサを応用しリアルタイムに複数の波長情報を取得可能な分光イメージングシステムを創出することを目的とした。

第2章では，広DR・広光波長帯域CMOSイメージセンサの構成と要素技術について論じている。分光分析機器の10年間使用の積算光量に相当する重水素ランプを用いた紫外光照射加速試験によっても感度劣化が生じないPDの不純物濃度プロファイルを明らかにすると共に，LOFIC用の高容量密度容量素子の構造，光感度向上のためのフローティングディフュージョン容量を低減する構造，埋込チャンネルを用いた低ノイズ画素ソースフォロワの素子構造の検討を行った。これらの検討結果より，PDでは，Si最表面の濃度を $10^{18}\text{cm}^{-3}$ でかつ急峻な濃度勾配を形成しドリフト電界をSi極表面の紫外光侵入領域まで形成することで，紫外光に対する感度と，実機動作を想定した紫外光照射に対しても感度と暗電流の経時変化が抑制できることを確認した。またLOFICでは画素開口率向上が可能であり高照度時の電荷蓄積が可能で，高容量密度で使用電圧範囲が広い低しきい値のMOS容量が最適であるという設計指針を得た。またFDでは， $C_{FD}$ の構成成分を解析することで， $C_{FD}$ の大きい割合を占めるゲートオーバーラップ容量，PN接合容量の低減が， $C_{FD}$ 低減に有効であることを確認した。そこで，FD周辺部のゲートオーバーラップ容量低減のためLDD注入の除去と，PN接合容量低減のためFD部のチャンネルストップイオン注入を除去することで $C_{FD}$ 低減を実現する設計指針を得た。また画素SFに，チャンネルを $\text{SiO}_2/\text{Si}$ 界面に形成する表面チャンネル構造を用いた場合，ゲート下を通過する電荷が酸化膜中のトラップに捕獲，放出されることにより，信号電圧が時間的に2値あるいはそれ以上の離散的な値をランダムに取り，S/Nの悪化を引き起こす。そこで，チャンネル形成部を $\text{SiO}_2/\text{Si}$ 界面から遠ざけた埋め込みチャンネル構造を形成することで，ゲート酸化膜中のトラップの影響を緩和でき，低ノイズ読み出しを実現する設計指針を得た。併せて，これらを統合してCMOSイメージセンサを製造するために各素子の総熱負荷量が変わらないように，イオン注入，アニールの順序を最適化したプロセスフローを明らかにした。

第3章では，第2章で論じた広光波長帯域・紫外光高信頼性PD，低容量FD，LOFICを導入した広DR CMOSイメージセンサチップを設計，製造して，性能を測定評価した結果について論じた。試作したCMOSイメージセンサは有効画素数 $1280\text{V}\times 960\text{H}$ で，画素アレイ端に複数種類画素形状のテストパターンを配置し，これらを測定することで画素レイアウトの最適形状を示した。また低容量FD構造とLOFICの導入により $240\mu\text{V}/e^-$ の電荷電圧変換ゲイン，101dBのDR性能，広光波長帯域・紫外光高信頼性PDの導入により190-1100nmの光波長感度帯域を得て，また，分光分析機器10年以上の連続動作に相当する紫外光照射に対しても，感度と暗電流の劣化が起こらない事を実証した。このCMOSイメージセンサを用いて，紫外光，可視光，近赤外光源下で人間の手，しめじの撮像を行った結果を図1に示す。可視光では観察ができなかった，しみ，血管，しめじの損傷箇所を鮮明に捉えることで，広光波長感度帯域でかつ輝度差の大きい被写体においても撮像が可能であることを実証した。



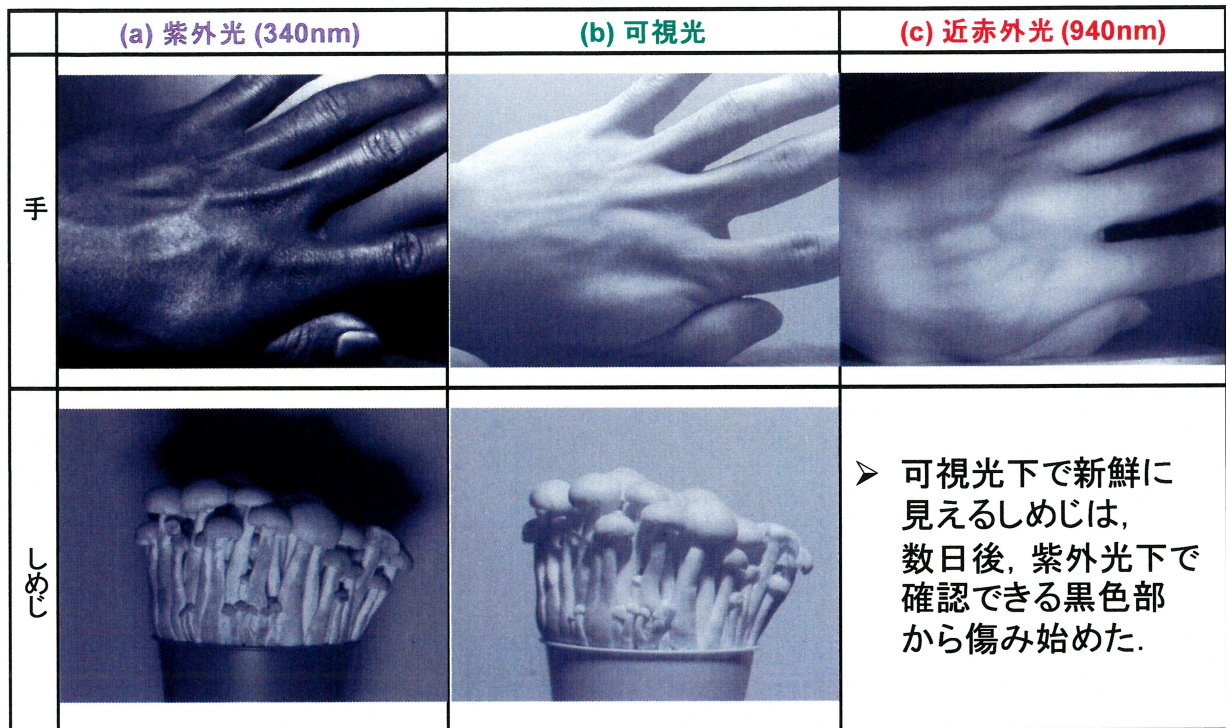


図1 広光波長帯域・広ダイナミックレンジ CMOS イメージセンサによる撮像結果

第4章では、第3章で論じたイメージセンサ技術を応用したリアルタイム分光イメージングシステムについて論じている。分光イメージング用途に好適な撮像速度 240 フレーム/秒、VGA タイプの CMOS イメージセンサを設計、試作し、複数の中心光波長を有する LED 光源を時分割で切り替える分光イメージング方式と組み合わせた高可搬性システムを構築した結果を論じた。ここで、紫外光から近赤外光の広光波長帯域において撮像を行う際に、光波長毎の屈折率の違いにより色収差の問題が生じる。そこで、色収差を抑制したアクロマティックレンズを組み合わせることで紫外光から近赤外光まで色収差が生じないアクロマティックレンズ光学系を構築した。本分光イメージングシステムを用いて、LED をイメージセンサと同期して駆動させることで 190-1100nm の紫外光から近赤外光までの任意の波長を色収差なくリアルタイムに分光イメージングが可能であることを実証した。

本研究で創出した高輝度紫外光源下でも感度変化のない、紫外光から近赤外光まで感度を有する広ダイナミックレンジ CMOS イメージセンサ、また本センサを用いて被写体の位置情報や波長情報を必要とする農業、医療等の幅広い分野に有用なリアルタイム分光撮像システムを実現するための指針を明らかにした。

# 論文審査結果の要旨

科学計測，医療，農業などの分野において，2次元の波長情報を取得する分光イメージングの利用が拡大しており，通常のカラー画像では行うことが出来ない物体の検出，成分分析，濃度計測等に応用されている．分光イメージング用途のイメージセンサには，様々な特性波長を有する分析対象に対応するため，また発光・吸光の輝度差の大きい被写体を解析するために感度光波長帯域の広帯域化，高感度・広ダイナミックレンジ (DR) 化が求められる．しかし，これまでのイメージセンサ技術では紫外・可視・近赤外光の広光波長帯域における高感度化と紫外光の長期間の照射による感度・暗電流の経時劣化の抑制とを両立することが困難であり，さらには広 DR 化技術と組み合わせることが出来ておらず分光イメージングに適したイメージセンサの創出が課題であった．本論文は，こうした背景に鑑み，広光波長帯域・高紫外光照射耐性フォトダイオード (PD) 形成技術を CMOS イメージセンサの画素 PD に適用し，広 DR 横型オーバーフロー蓄積容量 (LOFIC) 技術と融合しつつ高感度化を進展させ，さらに2次元で複数の波長情報をリアルタイムに取得可能とする分光イメージングシステムへの応用を行った成果をまとめたものであり，全文5章からなる．

第1章は，序論である．

第2章では，広 DR・広光波長帯域 CMOS イメージセンサの構成と要素技術を論じている．分光分析機器の10年間使用の積算光量に相当する重水素ランプを用いた紫外光照射加速試験によっても感度劣化が生じない PD の不純物濃度プロファイルを明らかにすると共に，LOFIC 用の高容量密度容量素子の構造，光感度向上のためのフローティングディフュージョン容量を低減する構造，埋込チャネル用いた低ノイズ画素ソースフォロワの素子構造，及びこれらを統合して製造するプロセスフローを明らかにしている．これは重要な成果である．

第3章では，第2章で論じた広光波長帯域・紫外光高信頼性 PD，低容量 FD，LOFIC を導入した広 DR CMOS イメージセンサチップを設計，製造して，性能を測定評価した結果について論じている．試作した CMOS イメージセンサにおいて， $240\mu\text{V/e}$  の電荷電圧変換ゲイン，101dB の DR 性能，190-1100nm の光波長感度帯域を得て，また，分光分析機器10年以上の連続動作に相当する紫外光照射に対しても，感度と暗電流の劣化が起こらない事を実証している．これは極めて有用な成果である．

第4章では，第3章で論じたイメージセンサ技術を応用したリアルタイム分光イメージングシステムについて論じている．分光イメージング用途に好適な撮像速度240フレーム/秒，VGAタイプの CMOS イメージセンサを設計，試作し，複数の中心光波長を有する LED 光源を時分割で切り替える分光イメージング方式と組み合わせ，色収差を抑制したアクロマティックレンズを有する高可搬性システムを構築した結果を論じている．LED をイメージセンサと同期して駆動させることで190-1100nm の紫外光から近赤外光までの任意の波長を用いたリアルタイム分光イメージングを行う性能を有することを実証している．これは極めて重要かつ有用な成果である．

第5章は，結論である．

以上要するに本論文は，190-1100nm の広光波長帯域・高感度・広 DR CMOS イメージセンサの要素技術を明らかにし，設計，製造して，その性能を実証し，リアルタイム分光イメージングシステムへの応用を行った成果をまとめたものであり，集積回路工学，画像電子工学に寄与するところが少なくない．

よって，本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める．