博士学位論文要約（平成29年３月）

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

那須野　悟史

指導教員：須川 成利，　研究指導教員：黒田 理人

A Study on Wide Spectral Response and Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor and Its Application

Satoshi NASUNO

Supervisor: Shigetoshi SUGAWA,　Research Advisor: Rihito KURODA

A highly UV-light sensitive and robust CMOS image sensor with a wide dynamic range (DR) was developed and evaluated. The CMOS image sensor was formed by introducing following all structures of lateral overflow integration capacitors, the PDs which has a thin surface p^+ layer with a steep dopant concentration profile and a buried channel source follower driver. The process technology was a 0.18-μm 1-polycrystalline silicon 5-metal CMOS process with buried pinned PD. By using the developed image sensor, a spectral imaging system with different wavelength of LEDs has been developed. The developed CMOS image sensor technology described in this study is expected to be utilized in various fields such as scientific instrumentation, factory automation and medical device.

1. はじめに

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グに適したイメージセンサの創出が課題であった．

本研究は，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 [1-2] 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[3]と融合しつつ高感度化を発展させ，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る．

2. 広 DR・広光波長帯域 CMOS イメージセンサの設計・試作

要求性能を実現するCMOSイメージセンサを設計するために図1の画素等価回路図に示すように画素構造の検討を行った．PD では分光分析機器の 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，埋め込みチャネル[4]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 $10^{19}cm^{-3}$ 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な，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．

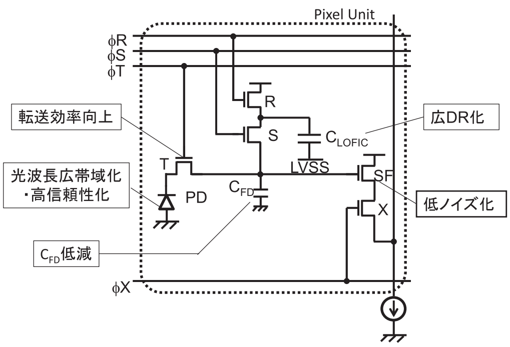

図 1 画素等価回路図と実現性能

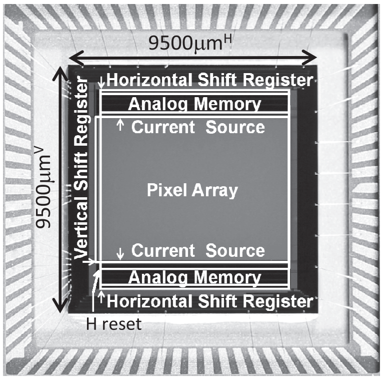

図 2 チップ写真

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 [5]．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，チャネルを SiO_2/Si 界面に形成する表面チャ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，チャネル形成部を SiO_2/Si 界面から遠ざけた埋め込みチャ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．以上の検討結果より得られた設計指針をもとに作製した広 DR・広光波長帯域 CMOS イメージセンサのチップ写真と画素断面構

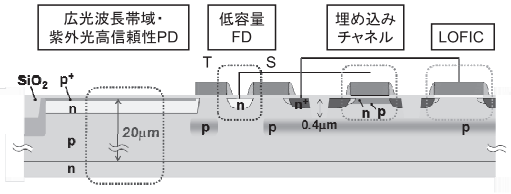

図 3 画素断面構造図

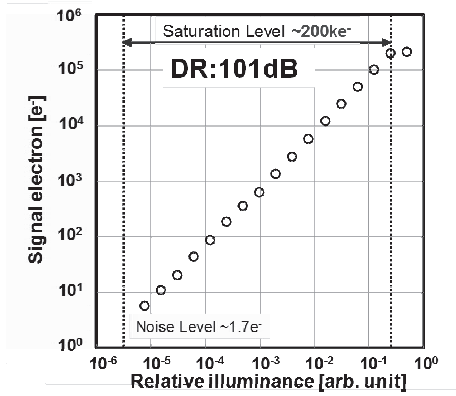

図 4 光電変換特性

造図を図 2，図 3 にそれぞれ示す．作製したイメージセンサは有効画素数 $1280^H \times 960^V$，画素ピッチ 5.6 μm，プロセステクノロジーは 0.18 μm 1P5M CMOS プロセスである．

3. 広 DR・広光波長帯域 CMOS イメージセンサの測定結果

図 4 は，作製したイメージセンサの光電変換特性で，図中のプロットは高感度な第 1 信号と高飽和な第 2 信号を合成したものである．LOFIC と埋め込みチャネルトランジスタの導入により，暗時ノイズは,1.7e$^-$，飽和電子数は約 20 万 e$^-$，ダイナミックレンジは 101dB と，画素内に複数素子を作り込むながら従来の LOFIC イメージセンサと同等の広ダイナミックレンジ性能を実現した．また，低容量 FD 構造の導入により 240μV/e$^-$の電荷電圧変換ゲインを実現した．

図 5 に，実機動作 10 年に相当する 220 時間の紫外光照射前後における分光感度特性を示す．なお紫外光源には重水素ランプを使用しており，220 時間照射後の光強度は，180，204，300 nm においてそれぞれ 82.9，120.6，31.7 μW/cm^2 である．結果より，190-1100nm の広い波長帯域で高い感度を有し，かつエネルギーが高い紫外光の照射に対しても感度劣化はほとんどないことを確認した．また，暗電流は

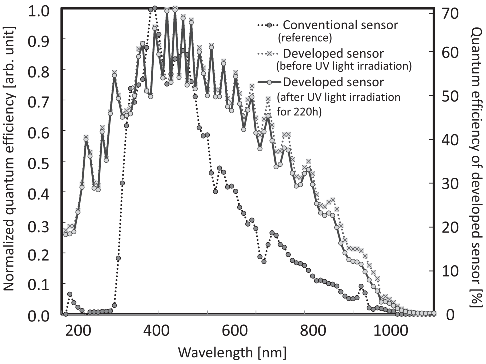

図 5 分光感度特性

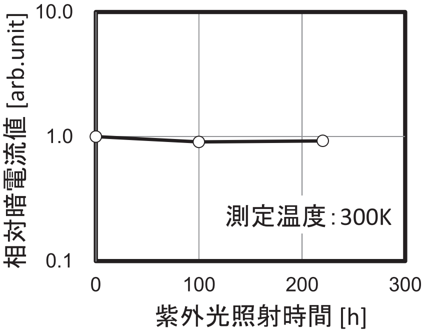

図 6 暗電流測定結果

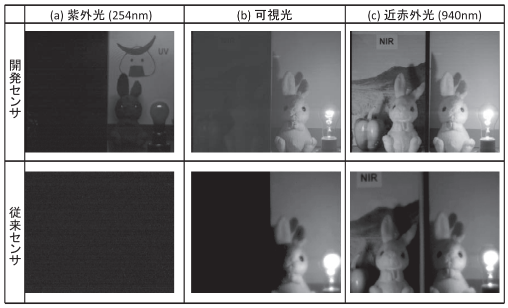

図 7 撮像結果(従来センサ比較)

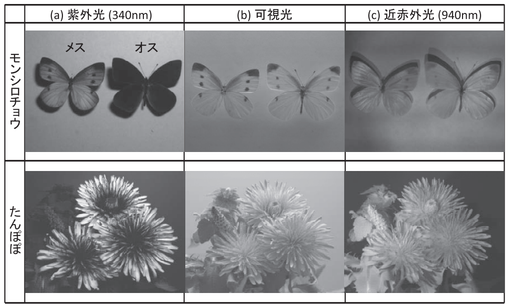

図 8 撮像結果(開発センサを使用)

60℃で 6.4e$^-$/(sec･µm^2)で紫外光照射による暗電流の増加が発生しないことを実証した(図 6).

図 7 に近赤外光に感度を有する従来センサと比較した，本イメージセンサの撮像結果を示す．各撮像条件は，(a)では被写体の右半分に紫外光，(b)は被写体の右半分に可視光，(c)では被写体の左半分に近赤外光を照射しながら行った結果である．撮像結果より，(a)では，従来センサによる撮像では全面が黒色であり紫外光の撮像が行えないのに対し，開発したイメージセンサでは，白紙部分は白く，日焼け止めクリームで描いた絵は紫外光が吸収されはっきりと黒く写り，紫外光の感度向上が実現できていることを確認した．また，(b)の結果では，低 C_{FD} 構造と LOFIC の導入により，被写体暗部から電球内部のフィラメント部の形状まではっきりと確認することができた．最後に，(c)の結果では，赤外光源で照らされた左側の被写体をはっきりと撮像することができた．図 8 は開発した CMOS イメージセンサを使用して撮像を行った結果で，上段がモンシロチョウ(左：メス，右：オス)，下段がたんぽぽを被写体に用いている．撮像条件は，左から紫外光，可視光，近赤外光を照射している．可視光では観察ができなかった，モンシロチョウの性別の判別，たんぽぽでは蜜の位置を知らせるためのネクターガイドを鮮明に捉えることで，作製したイメージセンサが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．

以上の撮像結果より，開発した CMOS イメージセンサは，被写体の暗い部分から，電球の明るい部分まで同時に撮像可能な広いダイナミックレンジ性能と，紫外光･可視光･近赤外光における広い光波長帯域で高い感度を実現できたと言える．

4. リアルタイム分光撮像システムの設計･試作･測定結果

前節で示したイメージセンサ技術を応用することで，リアルタイムに複数の波長情報を同時に取得可能にする分光撮像システムの設計･試作･測定を行った．LED 時分割光源切り替え方式において時間分解能が課題であるが，イメージセンサのフレームレートが向上できれば，分光イメージング用途に好適な分光方式である．そこで，イメージセンサの読出し回路にパイプラインアナログメモリとセグメント分割方式を用いることで，波長毎に大きな遅延なく分光撮像を実現する設計指針を得た．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

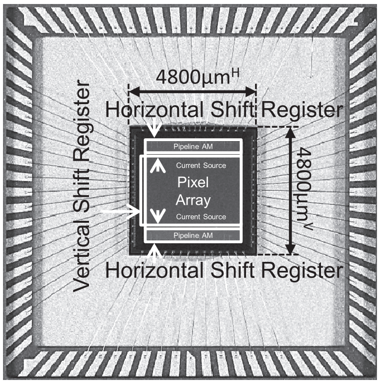

図 9 チップ写真

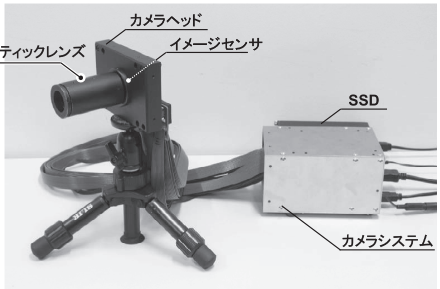

図 10 リアルタイム分光撮像システム

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．設計したイメージセンサのチップ写真を図 9 に，作製したリアルタイム分光撮像システムを図 10 にそれぞれ示す．

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．

パイプラインアナログメモリとセグメント分割読出し方式により，図 11 に示す撮像結果から最高撮像速度 240 フレーム/秒で撮像が行えることを確認した．また，図 12 は紫外光，可視光，近赤外光の LED 光源をイメージセンサのフレームに同期させ，モンシロチョウを被写体に動画撮影を行った1フレーム分の結果を示している．これらの撮像結果より，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撮像可能であることを実証した．

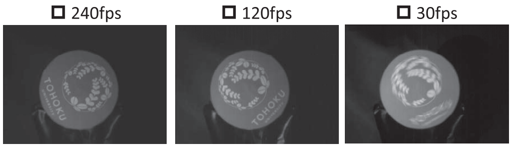

図 11 撮像結果

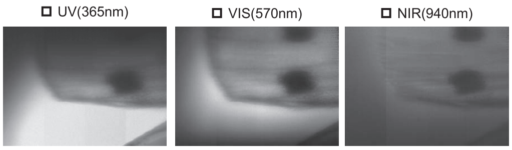

図 12 撮像結果

5. まとめ

広光波長帯域・高紫外光照射耐性 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技術と融合しつつ高感度化を発展させ，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．作製したイメージセンサの測定を行うことで，190-1100nm の広波長帯域で感度を持つこと，実機動作 10 年相当の強い紫外光照射に対しても感度変化と暗電流増加が起こらない事を達成した．以上より，PD 技術を周辺回路に影響することなく，LOFIC を用いた光センサプロセスに適用することができ，イメージセンサの紫外光高感度化・信頼性向上に有効であることを確認した．すなわち，短期間のメンテナンスなしに，広波長帯域での感度，広ダイナミックレンジが要求される多くの場面で利用可能であるといえる．

文献

1) S. Sugawa, N. Akahane, S. Adachi, K. Mori, T. Ishiuchi, and K. Mizobuchi, ISSCC, pp.352-353(2005)
2) S. Nasuno, S. Wakashima, F. Kusuhara, R. Kuroda and S. Sugawa, ITE Transactions on MTA, 4, pp.116-122(2016)
3) R. Kuroda, T. Nakazawa, K. Hanzawa, and S. Sugawa, IISW, pp.38-41(2011)
4) A. Yonezawa, A. Teramoto, R. Kuroda, H. Suzuki, S. Sugawa, and T. Ohmi, IRPS, pp.3B5.1-3B5.7(2012)
5) F. Kusuhara, S. Wakashima, S. Nasuno, R. Kuroda and S. Sugawa, ITE Transactions on MTA, 4, pp.91-98(2016)