

修士学位論文要約（平成31年 3 月）

高飽和 CMOS イメージセンサを用いた 吸光分光イメージングに関する研究

大塚 雄介

指導教員：須川 成利

A study on absorption spectral imaging using high saturation CMOS image sensor

Yusuke OTSUKA

Supervisor: Shigetoshi SUGAWA

In this paper, High signal to noise ratio (SNR) CMOS Image sensor (CIS) using lateral overflow integration capacitor (LOFIC) for high precision absorption spectral imaging is discussed. The dual pixel reset voltage (VR) is introduced in order to remove pixel source follower (SF) fixed pattern noise and improve the precision of absorption imaging. By using dual VR, fixed pattern noise is removed and high SNR is obtained simultaneously. A new CMOS image sensor was designed and fabricated and evaluated. The developed CIS exhibited 71dB SNR, 15Me⁻ full well capacity, 120dB wide dynamic range, 190-1100nm wide spectral sensitivity with a resistance to UV light irradiation and 38.7 μ Vrms low fixed pattern noise. Using the developed CIS, normalized vegetation index NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) was measured.

1. はじめに

CMOS イメージセンサ(CIS)は様々な分野で活用されており、近年では、CIS を用いた分光イメージングが盛んに研究開発されている¹⁻²⁾。分光イメージングは光の発光・反射・吸収を用いる 3 つの方式に分けることができる。発光・反射光の分析では高い感度と広いダイナミックレンジレンジが要求され、吸光分析では高い信号対ノイズ比(SNR)が要求される。吸光分析とは測定サンプルの光の吸収から物質の濃度を定量的に求める手法である。検出精度を決める SNR は高照度下において信号電子数のみで決まるため、高飽和なセンサの方が高精度に測定可能である。吸光分析を二次元に拡張した吸光イメージングでは濃度分布を可視化でき、また被計測領域を絞り込むことで精度を向上させることができる。CIS を吸光分析に用いるためには 70dB 以上の SNR(信号電子数 10⁷e⁻相当)と光への線形応答が求められる。15Me⁻の飽和電荷量を持つ吸光イメージング向け高飽和 CMOS イメージセンサが報告されている³⁻⁴⁾。これらセンサでは高い飽和電荷量を実現しているが、画素 SF のしきい値電圧(V_{th})ばらつきによる固定パターンノイズが出力信号に残留する問題があった。本研究では吸光分析において飽和電荷量を高めつつ、画素のリセット電圧を 2 つ設けることで固定パターンノイズを低減する読み出し方式 Dual VR⁵⁾を持つ CIS の開発とその応用を目的とする。

2. 広光波長帯域・高飽和 CIS の設計・試作・測定

高飽和と広光波長帯域感度を達成したプロトタイプ CIS を設計・試作した。埋込完全空乏型 PD を有する 0.18 μ m 1-poly-Si and 5-metal CMOS image sensor process を用いて試作を行った。図 1 にチップ写真を示す。10⁷ 電子の飽和電荷数の達成のため横型オーバーフロー蓄積容量 LOFIC⁶⁾を画素に適用した。広ダイナミックレンジ LOFIC 動作モードと、高 SNR と低固定パターンノイズを同時に実現する Dual VR モードを実装した。Dual VR モードでは画素のリセット電圧をフォトダイオード(PD)のリセット電圧と、リファレンス電圧で切り替え、画素内から読み出した高飽和な光信号とリファレンス信号の差分をとることで高飽和かつ低固定パターンノイズを実現する。図 2 に SNR 特性の測定結果を示す。1500 万電子の飽和電荷数と 71dB の SNR を達成した。紫外光に高感度な PD⁷⁾を適用した。また PD の空乏層を伸ばし、Si に対する侵入長が長い近赤外光における高い量子効率を実現するため、低濃度 P 型 Si ウェーハ($\sim 10^{12}$ cm⁻³)を用いた。図 3 に分光感度特性測定結果を示した。190nm から 1100nm における高い量子効率を達成した。図 4 に全有効画素における画素出力換算固定パターンノイズ特性を示した。38.7 μ Vrms の低固定パターンノイズ性能を確認した。

3. 広光波長帯域・高飽和 CIS の応用

農業応用に向けた基礎実験として、正規化植生指標 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) の測定を行った。NDVI は植物の活性度や分布を表す規格化された指標であり、1 に近づくほど活性度が高いことを示す⁸⁾。植物の吸収波長域である赤の光(600nm~700nm)と、反射波長域である近赤外の光(750~850nm)の反射率を用いて算出できる。植物の吸収波長域である赤の光植物の葉に 630nm と 850nm の LED の光を照射し、その様子を開発したセンサを用いて撮影した。今回の実験では健康状態の良いサンプル A と健康状態の悪いサンプル B の異なる 2 つの葉を測定した。NDVI の測定結果を図 5 に示す。測定結果より、サンプル A の方が NDVI の値が高いことが確認できた。光波長 850nm は植物の葉の葉緑素の反射帯域であり、画像内の白い点々はその粗密が見えている可能性がある。

4. まとめ

高精度な吸光分析に適応可能な低固定パターンノイズ・高飽和 CMOS イメージセンサを提案した。70dB 以上の SNR と紫外から近赤外の広光波長帯域における高い量子効率を同時に実現する CIS の基礎技術を構築し、分光イメージングへ応用することにより、提案技術の有用性を実証した。

文献

- 1) Y. Garini, et al, International Society for Analytical Cytology, Cytometry Part A 69A, pp.735-747, 2006.
- 2) Y. Fujihara, et al, IEEE Sensors 2016, 1842, 2016.
- 3) Y. Fujihara, et al, IISW, pp.47-50, 2017.
- 4) Y. Fujihara, et al, IISW, pp.47-50, 2017.
- 5) Y. Aoyagi, et al, SSDM, pp.595-596, 2018.
- 6) S. Sugawa, et al, ISSCC, Digest Tech, pp.352-353, 603, 2005.
- 7) R. Kuroda, et al, ITE Tran. MTA, pp.123-130, 2014.
- 8) K. Ito, et al, Journal of the Remote Sensing Society of Japan, pp. 41-49, 4, 16, 1996.

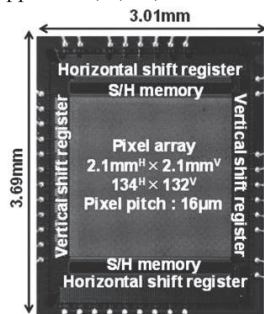


図 1. センサチップ写真

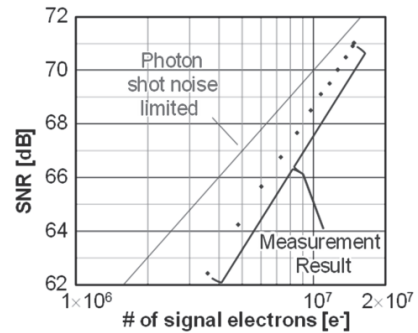


図 2. SNR 特性

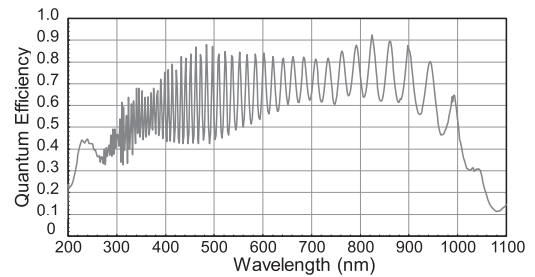


図 3. 分光感度特性

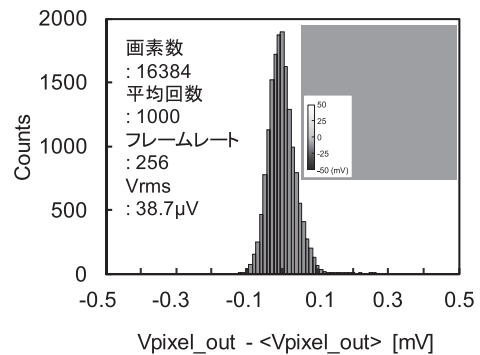


図 4. 全有効画素数における
固定パターンノイズ特性

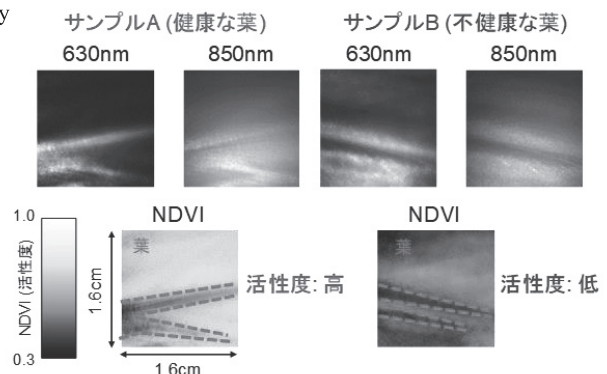


図 5. NDVI 測定結果