

修士学位論文要約（令和 4 年 3 月）

微小光量差検出イメージセンサの高 SNR 化・ 多画素化とセンシング応用に関する研究

中山 翔太

指導教員：黒田 理人

A Study on Small Light Amount Difference Image Sensors for SNR and Spatial Resolution Improvements and Sensing Applications Thereof

Shota NAKAYAMA

Supervisor: Rihito KURODA

Basic research on blood glucose absorption imaging as an application of light absorption imaging using image sensors was conducted. The results of this study will contribute to more convenient and safer blood glucose monitoring. When realized, the more than 600 million diabetics in the world will be able to measure their blood glucose levels more easily and safely. In addition, the experimental system was improved based on the problems found in the basic research. In addition, by applying 3D stacking and SiN insulator deep trench capacitors, The SNR of the micro-light intensity difference detection image sensor has been further improved. Additionally, the prospect of pixel count reduction was demonstrated. This research technology will lead to the spread of more accurate and versatile absorption imaging applications and contribute to the realization of Society 5.0.

1. はじめに

society5.0における基盤技術の1つとして、CMOSイメージセンサ(CIS)を用いたセンシング技術への期待が高まっている^[1]。その1つである吸光分析は、測定対象を透過する光の吸収割合から物質の濃度を定量的に求める手法である。式(1)のランベルト・ベールの法則から物質の濃度を計算することができる。

$$C = -\frac{1}{\alpha L} \log_{10} \frac{I_1}{I_0} = \frac{A_\lambda}{\alpha L} \quad (1)$$

ここで、 C は濃度[mol/m³]、 α は吸光係数[m²/mol]、 L は光路長[m]、 I_0 は入射光強度、 I_1 は透過光強度、 A_λ は吸光度である。CISの各画素で吸光分析を行う吸光イメージングでは、濃度分布の可視化や対象領域の絞り込みによる精度向上が可能であり、その測定精度は以下の式で表される信号対雑音比(SNR)で決定される。

$$SNR = 20 \log \left(\frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig}^2 + \left(\frac{n_{sys}}{CG}\right)^2}} \right) \approx 20 \log(\sqrt{N_{sig}}) [dB] \quad (2)$$

ここで N_{sig} は信号電子数、 n_{sys} はシステムノイズ電圧、 CG は電荷電圧変換ゲインである。システムノイズが無視できる状況においては $\sqrt{N_{sig}^2}$ で表されるフォトンショットノイズが支配的な成分となるため、(2)式の

ように近似することができる。この式より、単体PDを用いた一般的な吸光分析機と同等以上の精度である80dB程度の高SNRを達成するには、100Me-以上の高飽和電子数が必要となる。本研究の目的は、微小光量差検出イメージセンサの高SNR化、多画素化及びその応用を行うことである。

2. 高 SNR センサを用いた血糖吸光イメージングの基礎研究

近年、生活習慣の変化などを理由に糖尿病患者の割合は増加しており、血糖値測定の需要が高まっている。既存の測定機器は非侵襲性やリアルタイム性に課題があり、非侵襲かつリアルタイムに血糖を測定できるデバイスが必要である。著者等の研究グループでは、24ff/μm²の高密度トレンチ容量を用いた2段の横型オーバーフロー蓄積容量(LOFIC)によりダイナミックレンジ120dB超、最高SNR70dBを達成した高SNR平面CISを開発した^[2]。これを用い血糖を主ターゲットとした非侵襲血液吸光イメージングに関する実験を行った。構成した実験系のポイントとして、血管を模擬するためセルに血液が流れるようにした点、分離、凝固を阻止するために攪拌している点、温度変化による影響をなくすため血液温度を一定に保つようにした点がある。実験系で測定した検量線の測定結果を図1に示す。医療機器として認可されるためには、図のAゾーンに95%以上の点が入る必要がある。図2に、生体の撮影方法の検討のため、ブタ耳を撮影した画像を載

せる。ブタ血管のイメージングに成功したが、血管のみ抽出して解析するためには解像度を高める必要があることが明らかになった。

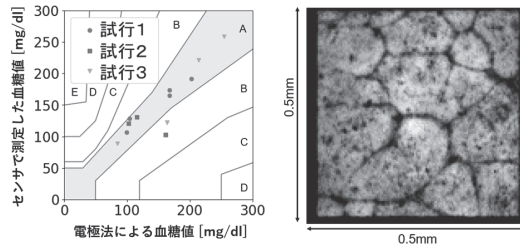


図1:測定した検量線 図2:撮影したブタ耳

3. 汎用的な吸光イメージングに向けた高解像度センサ及び小型撮像システム

実験を通じ明らかになった解像度という課題に対して、高 SNR センサの多画素化を行った。一般に解像度向上のために画素縮小を行うと飽和性能が下がり SNR が低下するため、画素アレイ拡大による高解像度化を行った。SH 容量に、高用量密度トレンチ容量を使用することで従来と同じ容量を 3 分の 1 の面積に作り込み、画素アレイ拡大に必要な面積を確保した。これにより性能を損なわず画素数を 3 倍以上に向上させることに成功した。

4. 高精度測定に向けた3次元裏面照射型センサの設計・試作・評価

飽和性能向上のため、トレンチ容量の面積を拡大すると同一基板上的 PD が小さくなり感度が低下するという課題があった。そこで画素ごとの電気的接続を有する3次元積層構造を用い図 3 のように容量 LOFIC2 に並列に大きな容量を接続することで、高 SNR と裏面照射化による開口率向上を目指した。

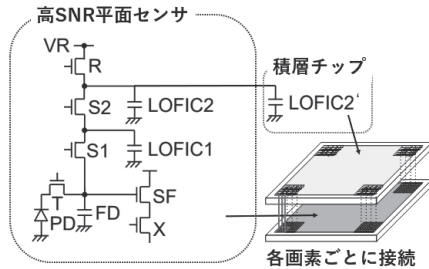


図3:開発したセンサの回路図

積層チップに用いる高密度容量として、低リーク電流と 255fF/μm² の高容量密度を両立する SiN 絶縁膜粗面ディープトレンチキャパシタを採用した。積層する容量と SNR の関係を検討し、容量が大きくなるとシステムノイズの影響が大きくなるため、ノイズ低減が必要となることがわかった。その解決策として、相関多重サンプリングをチップ内に採用した。積層を行う前段階として、2 段 LOFIC を搭載した裏面照射チップを設計した。3 次元裏面照射型センサを設計した。

LOFIC2 の容量を 58.5pF まで拡大し、SNR79dB を達成する見込みを得た。試作した裏面照射チップの照度と SNR の関係を図 4 に示す。また、積層時の単位面積あたりの飽和電子数と SNR の関係を図 5 に、性能諸元を表 4-1 に示す。

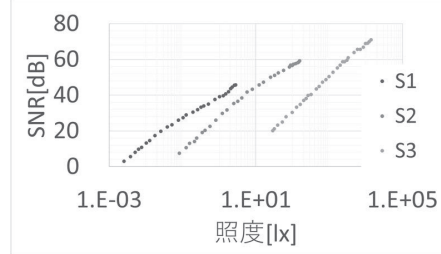


図4:高 SNR 平面センサの SNR 特性

表 4-1: 積層したセンサの性能諸元

電源電圧	3.3V
開口率	100%
有効画素数	200 ^H × 200 ^V
飽和電子数	430Me ⁻
見込み最高 SNR	79dB

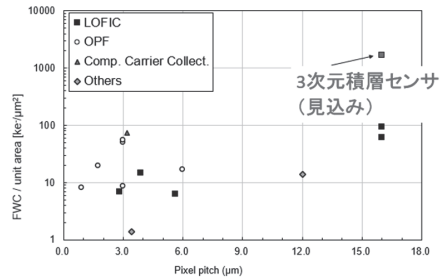


図5:画素ピッチと飽和電子数の関係

5. まとめ

本研究では、CIS の吸光イメージング応用として、血糖吸光イメージングに向けた基礎研究を行った。また、基礎研究を行う上で見出した課題に基づき CIS を改良した。さらに、3 次元積層及び SiN 絶縁膜粗面ディープトレンチキャパシタを適用することで、微小光量差検出イメージセンサのさらなる高 SNR 化を行った。本研究技術は、より高精度かつ汎用的な吸光イメージング応用の普及に繋がり、Society 5.0 の実現に寄与できると考えられる。

文献

- 1) Society 5.0 - 科学技術政策 - 内閣府. 内閣府.
- 2) Fujihara, Y., Murata, M., Nakayama, S., Kuroda, R. & Sugawa, S. IEEE Transactions on Electron Devices 68, 152–157 (2021).