

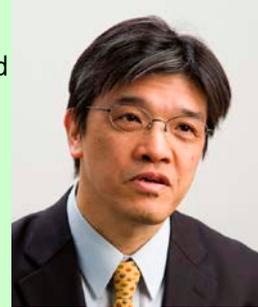
超高速ハイブリッドカスケード光電荷変調による  
極限時間分解撮像デバイスと応用開拓

Ultimately-Time-Resolved Imaging Devices Using Ultrafast Hybrid  
Cascade Photo-Charge Modulators and Their Applications

課題番号：18H05240

川人 祥二（KAWAHITO SHOJI）

静岡大学・電子工学研究所・教授



研究の概要

時間分解イメージングの分解能の極限を追求するハイブリッドカスケード光電荷変調素子と称するピクセル内蔵素子と、これによる高時間分解撮像デバイスを開発し、光飛行時間測距、蛍光寿命、近赤外分光血液動態イメージング等に応用することにより、本素子が生命科学、医学・医療等の分野に新たな価値をもたらす可能性を検証する。

研究分野：工学、電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：光電荷変調素子、高時間分解撮像、バイオメディカルイメージング、先端光計測

1. 研究開始当初の背景

生命科学、先端医療・医学の発展には、イメージング技術が重要な役割を果たしている。特に、極めて短時間のうちに起こる時間軸の信号変化に着目した高時間分解イメージングは、信号強度のみでは取得困難な情報を細胞や組織から引き出すことができ、またその定量性に優れた特徴から、今後の発展が大いに期待されている。そのデバイスには、光を極限的分解能（振幅・空間・時間）で捉え、微小空間の中で超並列的に行うことが求められ、その要求に応える半導体による超高時間分解イメージングデバイス技術を確立することが望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、極微弱可視光、近赤外光、高背景光下の微弱光等を検出対象とし、それらを極限的時間分解能で計測することを可能とするハイブリッドカスケード光電荷変調素子と称するピクセル内蔵素子と、これを用いた超高時間分解能撮像デバイスを開発し、その優れた性能と機能性を応用計測によって実証する。これにより生命科学、先端医療の発展、先端科学計測等の発展に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

ハイブリッドカスケード光電荷変調素子は、

埋込フォトダイオードの p+領域を電極化し、その複数の p+領域を制御ゲートとして直下の光電子の走行チャネルの電位分布変調を行い、高速光電子輸送制御を行うことを基本原理とする（図 1）。この素子構造を TPD (Tapped Pinned Diode) 構造と称する。大受光面のマルチタップ変調に適し、多窓時間分解による高分解能化や電荷変調構造のカスケード接続による新機能を発現させることができる。

本素子の形成条件の確立、構造最適化を行うとともに、その応用計測において最大限の性能が発揮できるようにデザインされた時間分解撮像デバイスを開発する。これを、各種の応用光計測に適用し、その有用性を明らかにする。特に、癌検出内視鏡を目指した自家蛍光の蛍光寿命イメージング、時間・空間分解法により、定量性を高めた血液動態（脳活動）近赤外分光イメージング、誘導ラマン散乱分光計測による無染色バイオイメージン

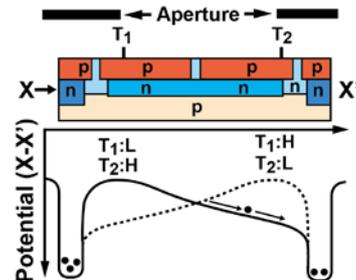


図 1 光電荷変調素子の基本構造 (TPD)。

グ、サブ 100  $\mu\text{m}$  の超高分解能、高背景光下での TOF 測距撮像等に応用し、応用光計測分野に新しい価値をもたらす可能性を検証する。

#### 4. これまでの成果

本研究課題のハイブリッドカスケード光電荷変調素子の基本構造である TPD 構造を用いた光電荷変調素子として、基板表面を電極化して静的バイアスを与える段階 (STAGE1)、さらに基板表面部を複数の電極に分割し、ゲートとして用いて動的に制御する段階 (STAGE2) について、8 タップ光電荷変調素子を試作し、いずれも良好な変調特性を得ている。6  $\mu\text{m}$  の開口を持つ図 2 (左) の構造のセンサにより、7 窓短パルス TOF 計測を行い、6.5m において 6mm の高い分解能を得る等、多タップ (5 タップ以上) の光電荷変調ピクセルが TOF イメージングに有用であることを初めて実証した [Y. Shirakawa 他, Sensors, 2020 (IF=3.031)]。STAGE2 の TPD 構造による 8 タップ光電荷変調素子の試作にも成功し、応答時定数  $< 1\text{ns}$  の高速応答が、10  $\mu\text{m}$  に近い開口と近赤外波長 850nm において得られた。

高時間分解ピクセルの応用として、カリフォルニア大学アーバイン校の E. Gratton 教授らとの共同研究により、広視野蛍光寿命イメージング (FLIM) を用いた定量計測を実施した。デジタル周波数領域 FLIM に、本研究の FLIM イメージセンサ (2 タップ LEMF ピクセル) を適用し、ローダミン B を温度センサとして用いた細胞の局所的な温度分布イメージング (図 3) が可能であること、NIH-3T3 細胞を用いた FRET 計測において、平均 FRET 効率の定量計測が可能であることを示した [Chen 他, J. Biophotonics, 2019 (IF=3.763)]。

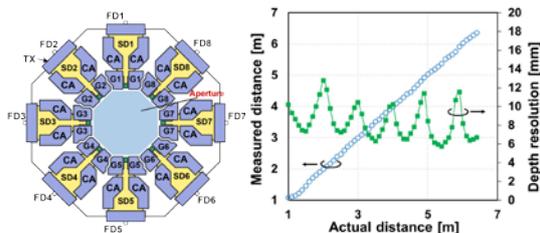


図 2 8 タップ変調素子と 7 窓 TOF 計測

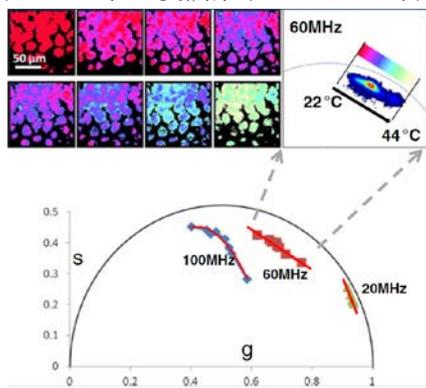


図 3 FLIM による細胞内温度分布計測。

その他、光電荷変調素子を用いた間接 TOF 撮像デバイスによる距離分解能の最高記録の更新 ( $\sigma = 64 \mu\text{m}$ ) [K. Yasutomi 他, IEEE J. Solid-State Circuits, 2019 (IF=5.173)] 等の成果を得ている。

#### 5. 今後の計画

本研究の光電荷変調素子の主要部である TPD (Tapped Photo Diode) 構造及び、低ノイズ化・高機能化のための電荷ストレージ構造、カスケード変調構造等、時間分解撮像デバイスのピクセル基盤技術を確立する。これにより、幾つかの主要な応用光計測において性能実証することを目的とした時間分解撮像デバイスの設計・試作を進める。

試作された時間分解撮像デバイスを用いた応用光計測として、多タップ、近赤外高感度、超高速変調等の特徴を活かした FLIM, 時間分解 NIRS, TOF 計測, SRS (誘導ラマン散乱), レーザスペckルコントラスト撮像等を実施し、提案素子の価値を検証する。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

学術雑誌論文・国際会議発表・国内会議発表

1. Y. Shirakawa, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Aoyama, \*S. Kawahito, “An 8-tap CMOS lock-in pixel image sensor for short-pulse time-of-flight measurements”, Sensors, 査読有, vol.20, no.4, pp.1-16 (2020)
  2. K. Yasutomi, Y. Okura, K. Kagawa, \*S. Kawahito, “A sub-100 $\mu\text{m}$ -range-resolution time-of-flight range image sensor with three-tap lock-in pixels, non-overlapping gate clock and reference plane sampling”, IEEE J. Solid-State Circuits, 査読有, Vol.54, No.8, pp.2291-2303 (2019)
  3. H. Chen, N. Ma, K. Kagawa, S. Kawahito, M. Dignan, \*E. Gratton, “Widefield multifrequency fluorescence lifetime imaging using a two-tap complementary metal-oxide semiconductor camera with lateral electric field charge modulators”, J. Biophotonics, 査読有, Vol.12, Issue 5, pp.1-9, (2019)
- 他 101 件 (全 104 件)

#### 受賞

1. Best Presenter Award, Lioe De Xing, “CMOS Image Sensor with Lock-In Pixels for Biomedical Applications”, 2019 IEEE Int. Circuit and System Symp., 2019.9.19 他 3 件 (全 4 件)

#### 7. ホームページ等

<http://www.idl.rie.shizuoka.ac.jp/kawahito@idl.rie.shizuoka.ac.jp>