

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分  
平成28年3月18日現在

ラテラル電界制御電荷変調素子による超高時間分解撮像  
デバイスと応用開発

Ultra Highly Time Resolved Imaging Devices Using  
Lateral Electric Field Controlled Charge Modulators  
and Their Applications



課題番号：25220905

川人 祥二 (KAWAHITO SHOJI)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究の概要

本研究では、微小空間での光飛行時間距離画像計測や細胞内の1分子蛍光の寿命の多点同時計測等、次世代バイオ・メディカルイメージングに求められる極めて高い時間分解能と超並列的検出(高空間分解能)を両立する超高時間分解撮像デバイスとその応用に関して研究を行う。

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：電子デバイス・機器、先端機能デバイス、撮像デバイス、時間分解撮像

1. 研究開始当初の背景

生命科学、先端医療の発展には、光を用いたイメージング技術が極めて重要な役割を果たしている。極短時間のうちに生じる現象や反応を観る超高時間分解撮像がその常套手段であり、内視鏡や埋植観測等が中心となる今後のバイオ・メディカルイメージングに向けて、微小空間での多点同時計測を可能にする半導体集積デバイスを用いた超高時間分解撮像技術が求められている。本研究者は、電界制御により単一光電子の高速輸送制御を行うDOM (Draining Only Modulator)を用いた高時間分解撮像デバイスを提案し、高い時間分解能と空間解像度を両立できることを実証してきた。本DOMの動作原理を発展させ、より高い時間分解能と機能性を実現できるラテラル電界制御電荷変調素子LEFM (Lateral Electric Field Modulator)を着想し、次世代の超高時間分解撮像のキーデバイスとして、その重要性を確信していた。

2. 研究の目的

本研究では、微小空間での光飛行時間距離計測や、1分子蛍光等の極微弱光に対して、その蛍光寿命等の計測において、ピコ秒、サブピコ秒の極めて高い時間分解能での検出と、その超並列的検出(高い空間分解能)を両立する超高時間分解撮像デバイスとその応用に関して研究を行う。これを実現する新概

念の超高速電荷変調素子であるLEFMを用いた超高時間分解撮像デバイスが、他に類を見ない本質的に優れた時間分解性能を有すること、また従来の点計測走査型から、面計測並列型へと時間分解撮像に革命的進展をもたらすデバイスとなることを試作と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、イメージング関連産業の振興に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

ラテラル電界制御電荷変調素子LEFM(図1)は、電荷輸送路の電界制御を、その側面に設けた複数のゲートによる横方向電界により行い、高速電子輸送制御を行う素子である。1タップ型、2タップ型を基本として、3タップ以上のマルチタップ型が実現可能である。

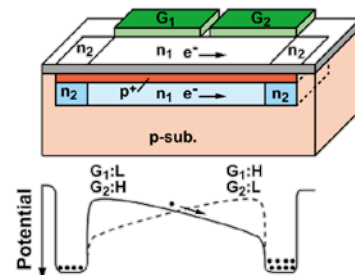


図1 ラテラル電界制御電荷変調素子

LEFMの形成条件の確立、構造最適化を図り、基本素子としてサブピコ秒の時間分解能が

達成可能であることを実験的に示すための基本素子群を試作し、その基本的な特性を評価する。その結果を踏まえて、本素子を応用した光飛行時間距離画像センサや、蛍光寿命撮像デバイスを開発し、応用計測において、その優れた時間分解性能を明らかにする。また、これらの時間分解撮像デバイスが、医療や生命科学の分野にもたらす実用的価値を明らかにするため、自家蛍光の寿命を用いた癌等の病巣の検出法としての有効性の評価、蛍光相関分光法による細胞内分子の挙動解析における有用性の評価等を行う。

#### 4. これまでの成果

提案する時間分解撮像デバイスの高い時間分解能を、光飛行時間(TOF)を用いた距離画像計測において実証するため、1タップ出力のLEFMピクセルを用いた132×120画素からなる距離画像センサを試作し、極短時間パルスを用いたインパルス応答計測法を用いて、300 $\mu\text{m}$ の距離分解能を達成した(Optics Express (IF=3.5), 2014)。これは、時間分解能2ピコ秒に相当し、最終目標にも迫る性能を実現した。更なる高距離分解能を目指して3タップ出力のLEFMを用いた距離画像センサ(200×4画素)を試作し、1フレームの信号で150 $\mu\text{m}$ (時間分解能:2ピコ秒)、100フレーム平均で、42 $\mu\text{m}$ (時間分解能:280フェムト秒)の距離分解能を達成した(発表準備中)。半導体TOF距離画像センサで、サブミリ領域の分解能を得たのは、本研究が初めてである(図2)。

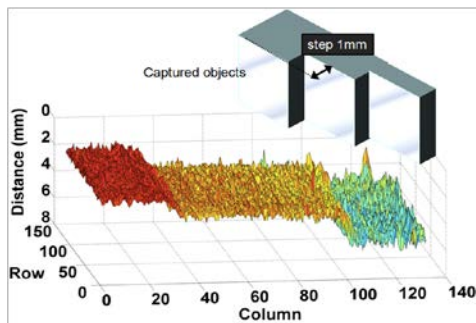


図2 サブミリ分解能TOF距離画像計測.

極微弱蛍光を扱うバイオイメージングにおける時間分解計測では、kTCノイズキャンセルのため2段電荷転送機構をもつ電荷変調素子を実現する必要がある。これにも成功し、試作した蛍光寿命イメージセンサ(512×256画素)において、デバイス応答180ピコ秒、時間分解能14ピコ秒(長観測時間では10ピコ秒)を得た(IEEE J. Solid-State Circuits (IF=3.7), 2016)。また細胞に対する蛍光寿命イメージングにも成功した(図3)。生体組織の自家蛍光に対する寿命イメージングも実施し、癌細胞における自家蛍光物質の寿命変化(正常細胞からの相対的变化)が確認されている。

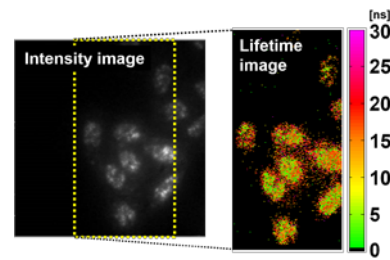


図3 CHO細胞の蛍光寿命像.

その他、時間分解近赤外分光(EMBC, 2015)、微小蛍光体の寿命計測(J. Materials Chem. B (IF=4.7), 2016)等の応用計測や200Mfpsの超高速撮像(Optics Express, 2016)のピクセルへの応用、本デバイスの性能を飛躍的に向上する0.3電子の極低ノイズ電荷検出器(IEEE Electron Device Lett. (IF=2.8), 2015)の試作にも成功している。

#### 5. 今後の計画

光飛行時間距離画像計測では、サブ100fsの時間分解能(距離分解能サブ10 $\mu\text{m}$ )など可能な限りの極限的性能を追求する。蛍光寿命イメージセンサについては、10ピコ秒オーダーの寿命の高精度計測と生体組織の自家蛍光(FAD, NBDH, コラーゲン)に対する蛍光寿命イメージングを本格的に実施し、自家蛍光寿命による癌組織についての新しい医学的知見の獲得を目指す。また、8タップ出力LEFM等時間分解ピクセルの高性能・高機能化を進めるとともに、それらの応用計測を多角的に展開する。

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む) 発表論文

1. K. Yasutomi, T. Takasawa, K. Kagawa, S. Kawahito et al., "An indirect time-of-flight measurement technique with impulse photocurrent response for sub-millimeter range resolved imaging", Optics Express, vol.22, no.16, pp. 18904–18913 (2014).
2. M-W. Seo, K. Kagawa, K. Yasutomi, S. Kawahito, "A 10 ps time-resolution CMOS image sensor with two-tap true-CDS lock-in pixels for fluorescence lifetime imaging", IEEE J. Solid-State Circuits, vol.51, no.1, pp.141-154 (2016), 他122件。

#### 受賞

1. 技術振興賞進歩開発賞, 川人祥二, "超高感度広ダイナミックレンジイメージセンサの開発", 映像情報メディア学会, 2014. 6. 3. 他2件。

#### ホームページ等

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