

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760275

研究課題名(和文)高時間応答撮像素子による真空管レス・ストリークカメラに関する研究

研究課題名(英文)A study on tube-less streak cameras with time-resolved CMOS image sensors

研究代表者

安富 啓太 (Yasutomi, Keita)

静岡大学・電子工学研究所・助教

研究者番号：50621661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：時間分解型イメージセンサを用いた、真空管を必要としない固体撮像素子による新たなストリークカメラについて検討した。時間分解型イメージセンサには排出制御電荷変調(DOM)素子を用いることで、高時間分解能化を図ることができる。

本研究では、このDOM素子のサイズを小型化することで高速化を図り、100ピコ秒以下の光電流応答が得られることをデバイスシミュレーションによって明らかにした。さらに、ストリーク撮像を行うための極短パルス生成回路および走査回路を提案し、画素アレイに供給可能であることを示した。これらの検討により、ストリークカメラとして250ピコ秒程度の分解能が得られる見通しを得た。

研究成果の概要(英文)：In this study, a tube-less streak camera with a time-resolved(TR) CMOS image sensor have been investigated. The proposed TR-CMOS image sensor has DOM (draining-only modulation) pixels, a delay-based pulse generator, and a readout circuitry. The delay-based pulse generator in combination with an in-pixel logic allows us to create and to provide a short gating clock to the pixel array. From 3D device and SPICE simulation results, a tube-less streak camera with 250 ps resolution can be achieved.

A prototype time-resolved CMOS image sensor with the proposed pixel is designed and implemented using 0.11 um CMOS image sensor technology. The image array has 30(Vertical) x 128(Memory length) pixels with the pixel pitch of 22.4um.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学

キーワード：撮像デバイス ストリークカメラ 時間分解 真空管レス 排出制御型変調 ロックインピクセル

1. 研究開始当初の背景

バイオセンシングをはじめとして、時間分解イメージングが広く注目されており、これを実現する撮像デバイスの一つにストリークカメラが挙げられる。ストリークカメラは非常に高い時間分解能が得られるものの、その根幹であるストリーク管には真空管が使われており、非常に高価であると同時に、大規模な装置になるという問題が本質的に避けられない。加えて、電子掃引のために 1kV 以上の高電圧を要するため、安全性の問題や高電場により測定環境に影響を与えてしまうといった問題もある。真空管を用いずに固体撮像素子単体でストリークカメラを実現できれば、これらの問題をすべて解決できる。

2. 研究の目的

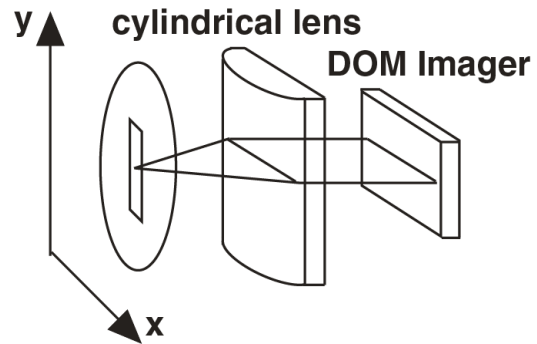
本研究では、本研究者が提案している排出制御型電荷変調素子 DOM(Draining Only Modulator)を発展させた高時間応答 CMOS イメージセンサによって、ストリーク管を用いずに極めて高い時間応答と時間分解能を持つストリークカメラの実現を目指すものである。

3. 研究の方法

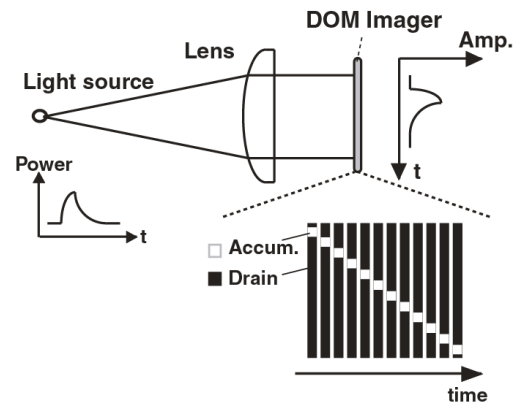
図 1 に提案するストリークカメラの原理を示す。簡単な光学系と電荷変調 CMOS イメージセンサによって構成される(図 1(a))。まず、シリンドリカルレンズを用いて、光を一方向だけに光を拡げ、イメージセンサのある行に様に光を照射する。図 1 (b)は 1 行のみの動作を示しており、単位時間ごとに蓄積動作の行を走査させる。これにより、行方向は時間軸割り当てられるため、ストリーク撮像を実現できる。

本手法においては、光を分散させているために、メモリ長 M とすると原理的に感度が $1/M$ まで低下する。例えば、128 個のメモリ長の場合には、1 画素当たりの光量は $1/128$ となる。したがって、単発現象を捉える用途には向かない。しかしながら、蛍光寿命計測など光源と同期させて繰り返し計測が可能な用途の場合には、(1)ロスなく電荷を蓄積、(2)低雑音読み出しが実現されれば、実用上問題ないレベルまで感度を高めることができる。例えば、106 回繰り返し蓄積した場合には、 $M=128$ でも約 1000 倍の感度を得ることができる。

本研究の最も重要な点であるストリークカメラとしての時間分解能は、(1)DOM 素子の光電流応答、(2)列方向の単位走査回路、(3)画素に供給された時間窓幅によって決定づけられる。したがって、これらを 3次元デバイスシミュレーション、回路シミュレーションによって、時間分解能をどの程度まで高めることができるかを明らかにする。さらに、上記のシミュレーションに基づき、CMOS イメージセンサを設計・試作した。



(a)



(b)

図 1 提案するストリークカメラシステム

4. 研究成果

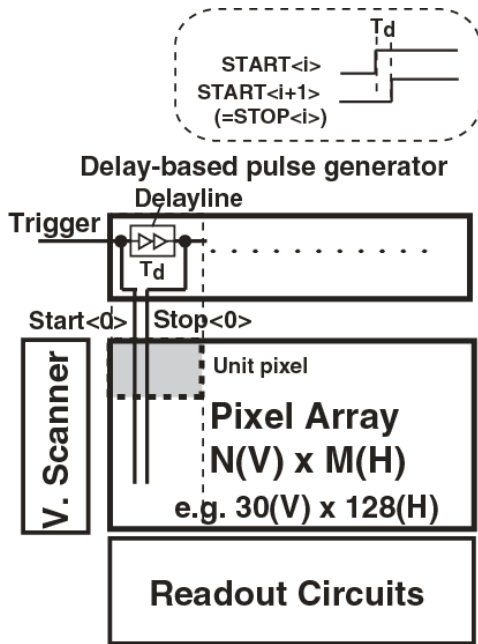
本研究の主な成果は、以下の通りである

- (1) DOM 素子の小型化および最適化を図り、3次元デバイスシミュレーションによって 80 ピコ秒程度の光電流応答が実現できることが明らかとなった。
- (2) 遅延回路に基づく走査回路によって数 100 ピコ秒での走査が行えることをシミュレーションによって確認した。
- (3) 画素内に極端パルス生成回路を集積化することで、画素アレイ上でストリーク撮像の実現を図った。メモリ長 128, 幅 30 行の時間分解イメージセンサを設計し、寄生容量を含めた回路シミュレーションにより、260 ピコ秒程度の短パルス信号を供給できることを確認した。

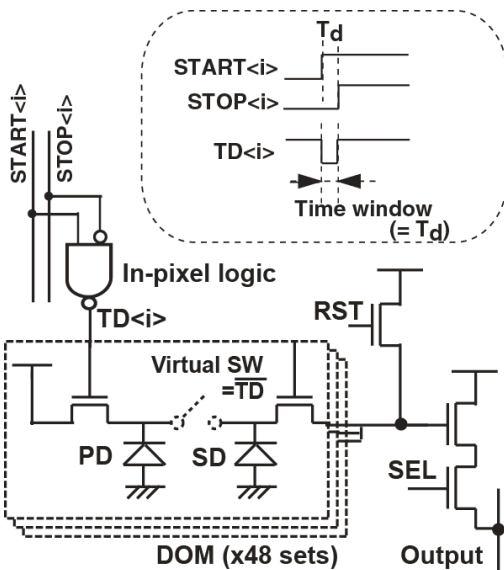
以上のことから、250 ピコ秒程度の時間分解能を有するストリークカメラの実現の見通しを得た。以下に各項目について詳細に述べる。

(1) センサーアーキテクチャ

図 2(a)に提案する時間分解型イメージセンサを示す。画素アレイは、横方向が時間軸、縦方向は空間軸となる。提案する遅延ベースパルス発生回路は遅延回路の前後の信号を、それぞれ蓄積開始信号 $START<i>$ 、終了信号



(a)時間分解型イメージセンサ



(b)

図 2

(a)提案する時間分解型イメージセンサ

(b)画素構成およびクロックタイミング

STOP<i></i>として画素列に供給する。START<i></i>から単位遅延時間 t_d 遅れた信号が STOP<i></i>であり、これは START<i></i>+1>(次の列の開始信号)に等しい。したがって理想的には、蓄積時間と時間軸のステップが等しくなるため、出力はそのままストリーク画像となる。ここでは、簡単化のために1種類の遅延回路のみを示しているが、実際には異なる遅延時間を有する複数のパスを設け、様々な遅延時間を発生させることができる。

(2)画素構成と DOM 素子の小型化による高速化

図 2(b)に画素構成を示す。画素は複数個の DOM 素子と画素内ロジック回路、読み出し回路から構成される。前述したように、提案するストリークカメラではロスのない電荷蓄積および高速な電荷転送が必須である。これを実現するために、DOM 素子を用いている。DOM 素子は TD が ON 時には受光部(PD)で発生した電荷をすべて排出され、蓄積部(SD)には転送されない(仮想的な SW が OFF であることと等価である)。一方で、OFF 時には受光部(PD)から蓄積部(SD)への電荷転送され、電荷が信号として蓄積される(仮想 SW は ON 状態)。したがって、TD のみによって信号の取捨選択が行われる。DOM 素子は信号経路に転送ゲートが存在しないため、繰り返し蓄積を行っても信号電化が失われず、また高速に受光部から蓄積部へ転送できる特長を持つ。高速な電荷変調は転送路が短いほど実現が容易であるが、転送路が短くなると受光部も小さくなり、感度の低下を招く。そこで、DOM 素子で単位ピッチを $2.8\mu\text{m}$ まで低減させ、単位画素にこれを複数個並べることで、感度を保ちつつ変調速度の高速化を図った。画素サイズを $22.4\mu\text{m}$ とし、画素内バッファなどを考慮しても、48 個の DOM 素子を並べることができる。

図 4 に蓄積動作時にパルス光を入力した際の SD における電子電流の応答のデバイスシミュレーション結果を示す。パルス幅は 200 ピコ秒、入射光波長は 450nm であり、ほぼ横方向の電荷転送で決まる条件とした。電流は 80ps 以内で急峻に立ち上がり、パルスの形状が観測出来ている。パルス幅も入力とほぼ同じ 200ps であった。したがって、非常に高速な転送が実現できており、高い時間分解能が期待できる。

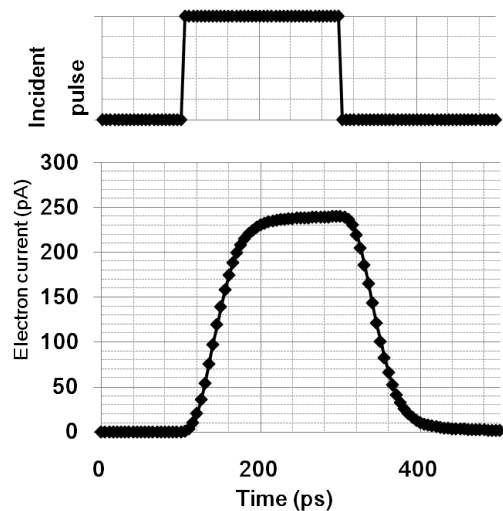


図 4 光パルスに対する光電流の変化
(入射光波長 450nm)

図 5 に電荷変調特性のデバイスシミュレーション結果を示す。本シミュレーションでは、一定の入射光(550nm)を照射し、TD ゲートの

バイアス電圧を変化させたときの SD で電子電流を観測している。TD の電圧が大きくなるにつれて、SD へ流れる電子電流は小さくなり、TD=4V においては蓄積時の 0.9%以下(=SD の寄生感度)となり、良好な変調特性が得られている。また、変化の大部分は 2.0V-3.2V 付近の間で起こっており、TD パルスはこの部分が重要であることを意味している。

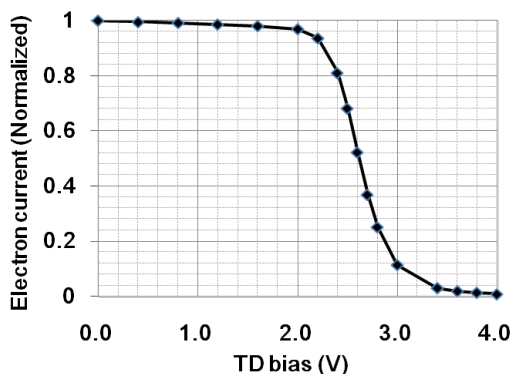


図5 TD 電圧に対する電荷変調特性

(3)遅延回路に基づく走査回路と極短パルス生成回路

回路シミュレーションにより、遅延に基づくパルス走査回路から生成された START と STOP 信号を画素内バッファに入力した際の TD パルスの出力を観測した。縦方向に 30 画素を並べた場合を想定し、画素内における電源ラインなどの寄生素子を加味している。その結果、260 ピコ秒の短パルスが画素アレイに供給されることを確認し、列の単位走査時間は 230ps が確認された。

上記のデバイス・回路シミュレーション結果に基づき、時間分解型イメージセンサを試作した。今後、試作したイメージセンサの評価およびストリークカメラへの実装を行っていく。

時間分解型イメージングは CMOS イメージセンサで実現されることによって、安価で手軽に行うことが可能となり、応用の幅が広がることが期待される。本研究成果は、ストリークカメラだけでなく時間分解型イメージセンサに応用できる技術に関するものであり、今後派生した成果が期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- 1) K.Yasutomi, T.Takasawa, S.Kawahito, "Dark Current Characterization of Low-noise Global Shutter Pixels Using Pinned Storage Diodes," ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol.2, No.2, pp.108-113, Apr. 2014 査読有

〔学会発表〕(計 4 件)

- 1) K.Yasutomi, S-M.Han, M-W.Seo, T.Takasawa, K.Kagawa, S.Kawahito, "A time-resolved image sensor for tubeless streak cameras," IS&T/SPIE Electronic Imaging, Feb. 2014
- 2) T.Usui, K.Yasutomi, S-M.Han, T.Takasawa, K.Kagawa, S.Kawahito, "An indirect time-of-flight measurement technique for sub-mm range resolution using impulse photocurrent response," IS&T/SPIE Electronic Imaging, Feb. 2014
- 3) K.Yasutomi, T.Usui, S.-M.Han, M.Kodama, T.Takasawa, K.Kagawa, S.Kawahito, "A Time-of-Flight Image Sensor with Sub-mm Resolution Using Draining Only Modulation Pixels," Proc. 2013 Intl. Image Sensor Workshop, pp.357-360, Jun. 2013
- 4) 安富 啓太, 韓 相萬, 徐 珉雄, 香川 景一郎, 川人 祥二, "真空管レス・ストリークカメラのための時間分解型イメージセンサの検討," 電気学会 バイオ・マイクロシステム研究会, BMS-13-013, pp9-12, Mar. 2013

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 時間分解イメージセンサのセキュア補正

発明者: 川人祥二、安富啓太

権利者: 静岡大学

種類: 特許

番号: 特願 2013-100657

出願年月日: 平成 25 年 5 月 10 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

安富 啓太 (Keita Yasutomi)

静岡大学・電子工学研究所・助教

研究者番号: 50621661