

令和元年5月31日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04358

研究課題名(和文)10Gfps超高速シリコン撮像素子の開発

研究課題名(英文)Development of 10Gfps ultra-high speed silicon image sensor

研究代表者

下ノ村 和弘 (Shimonomura, Kazuhiro)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：80397679

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：(1)光電変換層の限界時間分解能の式を理論的に導いた。シリコンイメージセンサについては11.1 psである。(2)既存技術で50 psを達成できることを示した。(3)時間分解能10 nsのイメージセンサを開発した。このセンサを搭載したカメラを用いて、イメージセンサによる撮影としては世界で初めて「飛翔する光」の撮影に成功した。(4)このセンサに接合して各画素を直接駆動する駆動回路を開発した。(5)このセンサで撮影した画像の時空間的クロストークの補正アルゴリズムを開発した。(6)再現性がある被写体を微弱光超高速撮影するための、画素内に連続画像信号の積算機能を備える画像信号積算センサを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(1)超高速現象の撮影ができる。シリコンイメージセンサはレーザやホログラフィ、ストリークカメラ等を使った撮像装置より遅いが、用いたデジタルカメラは利便性が格段に高いので、広い応用がある。実利用においては大きな利点である。(2)蛍光の減衰特性やイオンや光の飛行時間を利用する時間計測型先端計測機器(FLIM, TOF-MS, LIDER等)が時空間計測型になり、面的に同時に高速度計測できるようになる。(3)高速ファイバ通信のセンサになる。

研究成果の概要(英文)：(1) The highest frame rate of photoelectron conversion layers is theoretically derived. For silicon image sensors, the limit is 11.1 ps. (2) Based on the analysis, practical ultra-high-speed image sensor structures are proposed. They can achieve the temporal resolution of 50 ps to 100 ps. (3) The resolution of 10 ns has been achieved with a backside-illuminated multi-collection-gate image sensor and applied to light-in-flight imaging. Since Abramson in 1976, many scientists have challenged the topic. Our achievement is the first success in the world as light-in-flight imaging with a silicon image sensor. (4) A driver circuit to decrease the resolution to 1 ns stacked to the sensor was designed and fabricated. (5) An algorithm to suppress the spatio-temporal crosstalk is developed. (6) An ultra-high-speed image signal accumulation sensor is developed, which stores very weak image signals of high-speed objects by accumulating image signals in each pixel, keeping the order of the frames.

研究分野：画像センシング

キーワード：超高速撮像 撮像素子 マルチ電荷収集ゲートイメージセンサ

1. 研究開始当初の背景

超高速撮像素子は、蛍光寿命計測や飛行時間計測のような時間計測型先端分析機器を、面的に同時に時間計測できる時空間計測型へと革新する。FLIM (蛍光寿命顕微法) や Lifetime SPS (感圧塗料寿命計測) では、蛍光の減衰特性を利用して特定の分子の存在や環境を測定する。TOF-MS (飛行時間型質量分析装置) ではイオンの電荷と質量による飛行速度差で分子を分別する。いずれも将来的には、1 ns 以下の時間分解能が必要となる。申請者らは、高い感度を持ち、超高速で撮影できる撮像素子構造として、裏面照射マルチ電荷収集ゲート撮像素子 (BSI-MCG: Backside Illuminated Multi-Collection-Gate Image Sensor) を提案してきた。

2. 研究の目的

サブナノ秒の時間分解能の裏面照射マルチ電荷収集ゲート撮像素子を開発する。

3. 研究の方法

研究内容は以下の通りである。(1) BSI MCG image sensor の設計、試作、評価。(2) 信号電子の軌道の分析に基づく最短時間分解能の式の理論的誘導。(3) 試作した素子を搭載したカメラを用いたテスト撮影による成果の実用性の評価。

研究の進め方は以下の通りである。(1) 研究分担者によるイメージセンサ構造の分析と設計、(2) IMEC (ヨーロッパ最大の電子技術の研究機関) との協働によるプロセス開発とイメージセンサの試作。(3) 協力企業によるカメラの試作。(4) 研究協力者との協働による試験撮影 (今回の被写体は光の飛翔)。

4. 研究成果

(1) 主要な成果

主要な成果は以下の通りである。(1) 光電変換層の限界時間分解能の式を理論的に導いた。シリコンイメージセンサについては 11.1 ps である¹⁾。(2) 既存技術で 50 ps を達成できることを示した²⁾。(3) 時間分解能 10 ns のイメージセンサを開発した²⁾。このセンサを搭載したカメラを用いて、イメージセンサによる撮影としては世界で初めて「飛翔する光」の撮影に成功した。(4) このセンサに接合して各画素を駆動する専用駆動回路を発明した³⁾。この回路を載せた駆動回路チップを開発した。駆動回路チップに電荷収集ゲートの容量と同じ容量を接合して評価した結果、センサチップを 1 ns の時間分解能で駆動できることがわかった³⁾。

駆動回路チップをセンサチップに接合すれば、時間分解能 1 ns を達成できるはずであった。接合に失敗した。リスク回避のために、通常のイメージセンサと同様に、受光面外から水平に駆動電圧を送付するセンサチップも開発していた。このチップが 10 ns で動いた。それでも世界最高速である。半導体チップの接合技術は急激に進んでいるので、非常に近い将来 1 ns は達成できる。

(2) 超高速化の意義

シリコンイメージセンサの撮影速度に上限はあるだろうか? 感度は 1 フォトンが検出できれば良い。表 1 に示すように、すでにこの条件は達成されている。空間解像度はレーリーの条件から、通常の光学系を用いる限り数 100 nm 以下にはできない。一方最先端のイメージセンサの画素サイズは 600 nm である。従ってイメージセンサの感度と空間分解能は既にほぼ限界に達している。

シリコンイメージセンサの限界時間分解能は約 10 ps であることは筆者らが理論的に証明した¹⁾。光の飛翔を撮影したイメージセンサの時間分解能は 10 ns であるから時間分解能については 1,000 倍の伸びしろがある。ダイナミックレンジは測定可能な測定値の幅と最小値 (限界時間分解能) の比とする。ダイナミックレンジには理論的上限がない。画素数は多い方が良いし、撮影枚数も多い方が良い。広い波長幅の光で撮影すると可視光では見えない様々の現象が見える。以上を考慮するとイメージセンサのさらなる性能向上のためには以下の課題がある。

表 1 イメージセンサの分解能と計測範囲³⁾

	分解能			ダイナミックレンジ
	A 理論限界	B 達成	B/A	
感度	1 Photon (1e-)	1 e- (0.3 e- rms)	1	SN比
空間	0.3 μm	0.6 μm	2	$\sqrt{\text{画素数}}$
時間	11 ps	10 ns	1,000	撮影枚数

(1) 時間分解能の向上、(2) 波長分解能の向上、(3) 感度・時空間および波長のダイナミックレンジの拡大、(4) 組み合わせ性能の向上、(5) インテリジェント機能の充実、(6) 撮影以外の適用分野への拡大

科学技術用途では(1), (2)が基本項目である。(3)に対する要望も強い。民生用では(3)~(6)にも努力が傾注されている。このようにイメージセンサへの社会の要望に対して大学で進めるべき研究という観点からも本研究で得られた成果の意義は大きい。

構造的には近い将来のイメージセンサチップと機能性チップの3次元接合技術の汎用化が(1)~(6)の技術開発を支える。

以下では、本研究で得られた超高速イメージセンサについて概要を説明する。

(3) 裏面照射マルチ電荷収集ゲートイメージセンサ

構造

図1に裏面照射マルチ電荷収集ゲートイメージセンサの1画素の構造を示す。

図1(a)に示すように、裏面に入射した光で生じた電子からなる信号電荷は表面に向かう。表面側にはp-wellがある。この目的は以下の2つである。

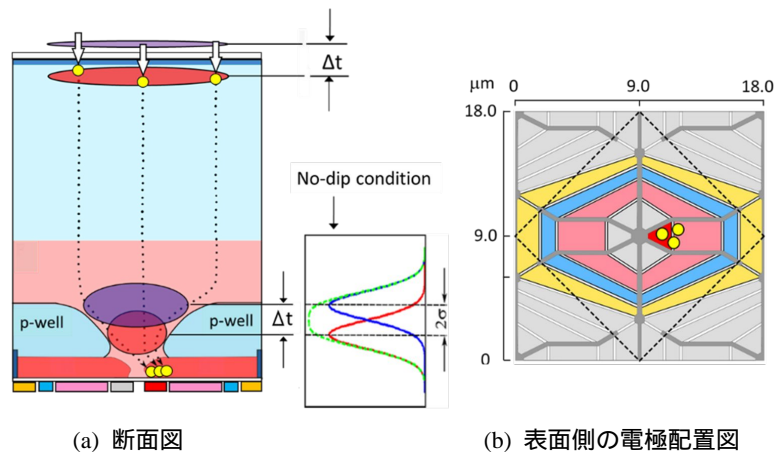


図1 裏面照射マルチ電荷収集ゲートの1画素

(1) 信号電荷を中心

に集める。(2) p-well より上層の光電変換層と下層の回路層をポテンシャル的に分離する。

電子は p-well の相対的に低い電位の反発を受けて、p-well の上面を中心に開けられた孔に向かって集まる。p-well による水平電位は直線になるように設計している。これは、最小勾配最大化の条件を満たし、画素端から画素中心直前までの p-well 上の信号電荷の平均到達時間を理論的に最小化する。

図1(b)に示すように、表面側には電荷収集ゲート6枚が花びらのように配置されている。これらに順次高い電圧をかければ、p-well の中央に開いている孔を通して表面側に届いた信号電荷は、順に電荷収集ゲートを通して、隣接するアナログメモリに転送され、保存される。これにより、電荷収集ゲートのドライバの能力が十分であれば、信号電荷が裏面から表面の中心に届く時間の広がりの間隔で連続6枚の画像を撮影できる。表2(後述)に示すようにこのときの時間分解能は1 ns 程度である。

開発したイメージセンサ

1 ns で光は 30 cm 進む。当初、1 m 程度離れて置いた鏡の間を往復する光を撮影する予定であった。このため、イメージセンサチップとドライバチップを接合し、48 画素を単位としてドライバチップから近距離で駆動電圧を送るイメージセンサを設計した。しかし接合に失敗した。したがって通常のイメージセンサと同様に受光面の外から水平に

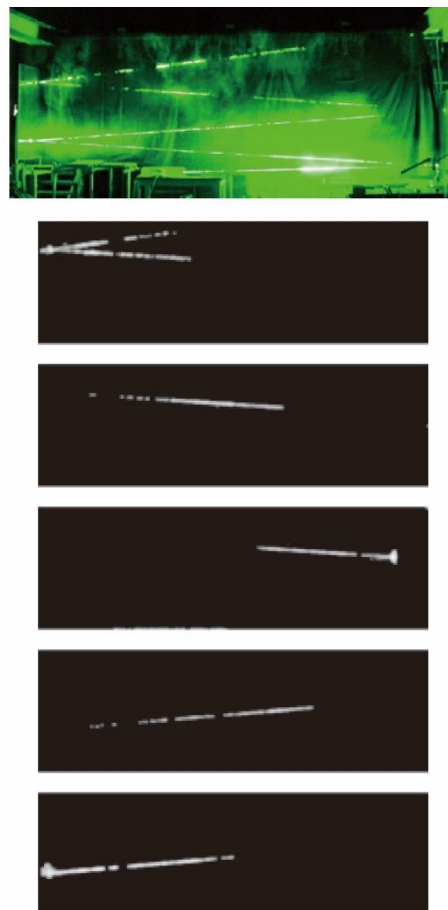


図2 1億枚/秒の超高速撮像素子による光の飛翔の撮影. 連続10枚中の連続する5枚. 上は通常のビデオカメラで撮影(1コマのみ写っている).

駆動電圧を送る素子で光の飛翔を撮影した。このため、時間分解能は 10 ns となった。

画素数は $512 \times 576 \times 2$ の約 60 万画素で千鳥配置である。電荷収集ゲートの 1 個をドレーンに接合したので連続撮影枚数は 5 枚になった。奇数行と偶数行を交互に使うことによって 30 万画素で連続 10 枚撮影できる。

(4) 飛翔する光の撮影

時間分解能が 10 ns になったので 10 倍長い光路長を必要とした。大きい鏡を 7.43 m 離れて設置し、その間を反射しながら進むパルスレーザー光を撮影した。パルス幅はピークの 1/2 幅で 5 ns である。図 2 に、家庭用ビデオカメラの 1 枚に写ったレーザー光と、レーザー光の飛翔の画像を示す。連続 10 枚の画像の中の連続する 5 枚を示す。世界ではじめてイメージセンサで光の飛翔が撮影された。

(5) イメージセンサの限界時間分解能

図 3(a)に図 1 の構造における信号電荷の軌跡の例を示す。図 3(b)に信号電荷の裏面からある深さまでの到達距離と、それまでの経過時間の関係を示す。時間分解能は裏面から表面までの電荷の到達時間ではなく、広がりで決まる。この図から時間分解能を著しく低下させているのは p-well 上の水平方向の電荷の移動であることがわかる。

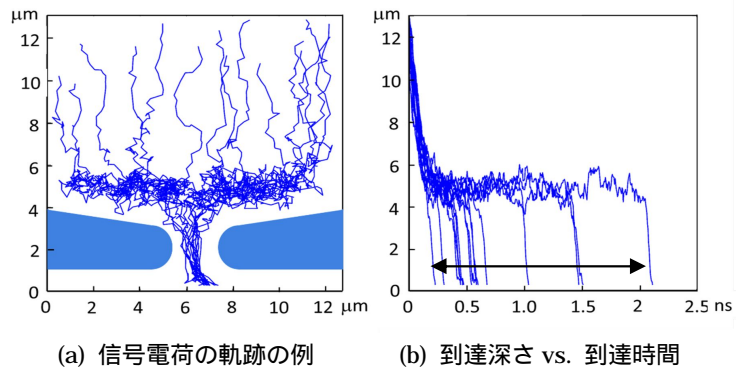


図 3 信号電荷の挙動のモンテカルロシミュレーション

図 3(b)より、到達時間を広げる支配的要因は、裏面の画素中心で生じた信号電荷が表面に達する時間と、画素端部で生じた信号電荷が p-well 上を中心に達するまでの時間との差による混合であることが予想される。大別すると到達時間の分散には以下の要因がある。

- (1) 垂直方向の混合、(2) 垂直方向のランダム運動による拡散、(3) 水平方向の混合、(4) 水平方向のランダム運動による拡散

垂直方向混合は、光の光電変換層への侵入深さの分布により、信号電荷の生成地点から表面までの距離が異なることによる。通常、光電変換層厚さは感度を考慮して光の平均侵入深さの 1~3 倍にする。これらがコンパラブルであるために光の侵入長分布が垂直方向の到達時間の分散に大きく影響する。

垂直方向の 2 つの要因を避けることはできない。画素の中心に置かれた直径が無限小のパイプ状の光電変換層を考え、裏面側の画素中心の無限小の面積に光を集光するという理想的な条件を想定すると、水平運動の影響はない。これを条件とすれば理論的限界時間分解能の式を導くことができる¹⁾。

この式を厳密に定式化することができる。しかし、初等関数では表せない。近似式を導く一般的な方法は、厳密表現を極限的な条件のまわりに級数展開して、その 2 次以上の項までを採用する方法である。しかしこの方法で良い近似式を導くことができなかった。

光電変換層の厚さが厚い場合や、垂直拡散係数が大きい場合は到達時間分布は正規分布に漸近する。2 つの正規分布を重ねると、図 1 に示すように、平均値が標準偏差の 2 倍に等しいときにピークが 1 個になり分離できない。この指標は空間分解能に対するレーリーの条件の考え方と類似している。ただしレーリーの場合は分散の原因は回折である。

到達時間分布が正規分布に漸近することを最初に仮定すると、式の展開はやや複雑になるが、最終的に極めて簡単な限界時間分解能 Δt の近似式を導くことができる。

得られた式は厳密表現の数値計算結果やモンテカルロシミュレーション結果とほぼ完全に一致する。またシリコンに限らず光電変換層に対して一般的に成り立つ。

光電変換層の厚さ W が光の平均侵入深さより薄いと、感度が急激に下がる。したがって厚さの実用的限界は $W =$ である。これらの条件に、波長 550 nm の緑色光、温度 300°K の条件を加え、得られた式を最小にする電界 (25kV/mm) を代入すると、シリコンイメージセンサの

理論的限界時間分解能は 11.1 ps となる。

(6) 実用的な水平運動の抑制技術 - ガイドパイプと電荷収集ピラミッド -

ガイドパイプ

直径無限小のシリコンパイプのかわりに細い正方形パイプを考える。表面が<100>面であれば壁面は垂直の<100>面であるから、この構造は既存技術で直ちに作る事ができる。1 辺の長さを徐々に大きくして信号電荷の動きをモンテカルロシミュレーションしてみた。画素サイズは 12.7 μm とした。これは画素内に多くのアナログメモリを備えるためである。光電変換層の厚さは 12 μm とした。これは 650 nm の赤色光の平均侵入長 4 μm の 3 倍である (W=3)。

モンテカルロ法で信号電荷の水平方向の運動の影響を観察しつつ、ガイドパイプの直径を広げた。直径が 4 μm のとき時間分解能 Δt は 49 ps となった。このときの開口率は 10% である (表 2 参照)。

電荷収集ピラミッド

裏面照射であるから開口を絞りにたくない。また軟 X 線は短距離で集光できないので、ガイドパイプの外部を通過する 90% の X 線が無効になる。また光の集光のためにマイクロレンズを付けると、後述の科学技術計測用途では電子線やイオンを直接受けることができない。

シリコンの<100>面を適切な条件下でエッチングすると 54.7 度の方向に<111>面が現れる。これにより図 4 のようなピラミッドを作ることができる。1 画素のポテンシャル分布を図 4 に示す。信号電荷が図 4 の左側のように、ピラミッドの壁面に衝突することを避けるために以下を導入した。

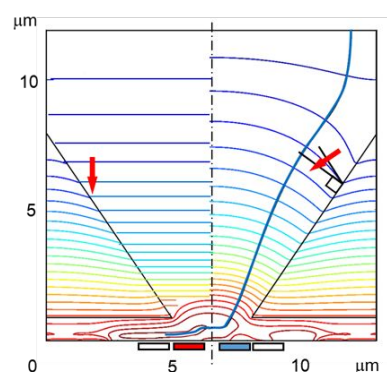


図 4 Convex pyramid による電荷収集

- (1) 信号電子を反発させるために、壁面に 200 nm の厚さの p 型ドーパ
- (2) 表面側から迎えるために画素中心に深い局所的な n ドーパ

ポテンシャルシミュレーションの結果を図 4 の右側に示す。モンテカルロ法による時間分解能の計算結果は 87.5 ps となった。一旦、壁面に衝突した電荷は消滅するものとした (安全側の仮定)。このとき表面側の電荷収集ゲートの 1 個に集まる信号電荷の割合は 98% となった。

p-well、ガイドパイプ、電荷収集ピラミッドによる電荷収集と時間分解能のモンテカルロシミュレーション結果を表 2 に示す。

表 2 中心への信号電荷の収集とポテンシャル分離のための構造の比較

Structure	p-well	Light/electron guide pipe	Convex silicon pyramid
Cross Section			
Temporal resolution 2σ	990.0 ps	49.0 ps	87.5 ps
Vertical Field	5 kV/cm*	25 kV/cm*	25 kV/cm*
Collection Ratio***	100%	100%	98%
Dark current	less	middle	large
X-ray	Applicable	Low efficiency	Ideal
Technical feasibility	Already applied	Existing technology	Process improvement
Requirement	Linear built-in potential****	Micro lens/light guide necessary	High-quality convex pyramid unavailable

5 . 主な発表論文等

[査読付き論文] (計 4 件)

- 1) Etoh, T. G.; Nguyen, A. Q.; Kamakura, Y.; Shimonomura, K.; Le, T. Y.; Mori, N. The Theoretical Highest Frame Rate of Silicon Image Sensors. *Sensors* **2017**, 17(3), 483. <https://doi.org/10.3390/s17030483>

- 2) Nguyen, A. Q.; Dao, V. T. S.; Shimonomura, K.; Takehara, K.; Etoh, T. G. Toward the ultimate-high-speed image sensor: from 10 ns to 50 ps. *Sensors* **2018**, **18**(8), 2407. <https://doi.org/10.3390/s18082407>
- 3) Zhang C.; Dao, V. T. S.; Etoh, T. G.; Charbon, E. Pixel parallel localized driver design for a 128 x 256 pixel array 3D 1Gfps image sensor. *Selected Papers from 31st Int. Congress on High-speed Imaging and Photonics. Proc. SPIE* **2017**, 10328, 7. DOI:10.1117/12.2268877.

〔学会発表〕(計 28 件)

Takeharu Etoh, Hitoshi Nakano, Kohsei Takehara, Kazuhiro Shimonomura, "The "Light-in-Flight" Imaging with a Silicon Image Sensor operating at 10 ns," 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋, 2018.

〔図書〕(計 1 件)

Etoh, T. G.; Nguyen, A. Q. Evolution of high-speed image sensors, in *The Micro-World Observed by Ultra-High-Speed Cameras: We see What you Don't See*, edited by Tsuji, K., Springer, New York City, **2017**, 81-102. DOI:10.1007/978-3-319-61491-5_4

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

光の飛翔の映像は NHK の全国放送等で報道された。

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：安藤 妙子
ローマ字氏名：(ANDO, Taeko)
所属研究機関：立命館大学
部局名：理工学部
職名：准教授
研究者番号：70335074

研究分担者氏名：江藤 剛治
ローマ字氏名：(ETOH, Takeharu)
所属研究機関：大阪大学
部局名：工学研究科
職名：客員研究教員・招へい教授
研究者番号：20088412

(2) 研究協力者

アン・クアン・グエン：(NGUYAN, Anh Quang)
ヴ・ツルオン・ソン・ダオ：(DAO, Vu Truong Son)
鎌倉良成：(KAMAKURA, Yoshinari)
エドアルド・シャーボン：(CHARBON, Edoardo)
チャオ・ツァン：(ZHANG, Chao)