

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02204

研究課題名(和文) 開口率100%、10Gfpsの超高速シリコン撮像素子の開発と先端計測技術への適用

研究課題名(英文) Development of ultra high-speed silicon image sensor with temporal resolution of 10Gfps and its application to advanced measurement technology

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) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：これまでに裏面照射マルチ電荷収集ゲート撮像素子を提案し、100Mfps(時間分解能10ns)の超高速撮像素子を開発した。本研究では、画素内電荷収集ゲートを分岐させるブランチング構造を提案し、これにレジスティブゲートを採用することで、時間分解能に寄与する画素中央部での水平混合を抑制できることを示した。さらに、シリコンよりも吸収係数が大きい光電変換材料としてゲルマニウムを用いることで、光電変換層における時間分解能が大きく向上できることをシミュレーションにより示した。これらの要素を併用することで、時間分解能100 psを実現できる見通しが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

撮像素子の理論的限界時間分解能を示し、それに迫るための要素技術を提案した。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の先端分析機器を時空間計測型へと進化させ、FLIM(蛍光寿命顕微法)やDPSP(ダイナミック感圧塗料計測)、TOF-MS(飛行時間型質量分析)などの発展に寄与する。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a Backside Illuminated Multi-Collection-Gate Image Sensor and developed an ultra high-speed image sensor with a temporal resolution of 100 Mfps. In this study, we proposed a branching structure that branches the charge collection gates in each pixel, and showed that horizontal mixing of electrons in the center of the pixel, which can be a factor of limitation of the temporal resolution, can be suppressed by employing resistive gates in this structure. Furthermore, we have shown through simulation that the use of germanium as a photodiode, which has a higher absorption coefficient than that of silicon, can significantly improve the temporal resolution in the photoelectric conversion layer. The combination of these elements shows the prospect of achieving a temporal resolution of 100 ps.

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撮像素子

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の先端分析機器の空間解像度を向上し、時空間計測型へと発展させる。例えば、FLIM(蛍光寿命顕微法)やDPSP(ダイナミック感圧塗料計測)では、蛍光の減衰特性を利用する。TOF-MS(飛行時間型質量分析)ではイオンの質量差による飛行速度差で分子を分別する。これまでに、超高速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、100Mfps(時間分解能 10ns)の超高速撮像素子を開発して、「飛翔する光」の撮影に成功するなど、提案構造の技術的妥当性を実証した。さらに、光電変換層の限界時間分解能の式を理論的に導き、シリコンイメージセンサについては可視光(550 nm)に対して 11.1ps であることを示した。

2. 研究の目的

理論限界に近い時間分解能と、実用性を考慮した感度や撮影枚数を備えるシリコン撮像素子を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 既存の BSI-MCG 撮像素子に対して撮影枚数を向上させるために、画素内電荷収集ゲートを分岐させるブランチング構造を提案した。

(2) 光電変換層における時間分解能を向上させるために、シリコンよりも吸収係数が大きい光電変換材料としてゲルマニウムを用いた場合の特性について検討した。

4. 研究成果

(1) ブランチング構造をもつイメージセンサ

BSI-MCG 撮像素子はバースト型であり、撮影中は各画素内のメモリに撮影した画像を保存(in situ storage)し、撮影後にゆっくり素子外に読み出す。画素内メモリ数が撮影枚数を決めるが、画素内に作り込めるメモリ数に限りがあるため、連続撮影枚数が少ない。そこで、マルチ電荷収集ゲートイメージセンサの撮影枚数を増やすために、**図 1**に示すブランチングイメージセンサを提案した。裏面(図では上面)に入射した光で生成した信号電子を、画素中心の多角形のガイドゲートに集める。その周りの6つの電荷収集ゲートを、外側に向かってそれぞれ2つのゲートに分岐することで、撮影枚数は12枚となる。インタレス撮影では24枚である。全転送経路を実質的に空乏化できるので、この撮影枚数に対しては原理的にノイズレス超高速撮影ができる。最終段の画像信号保存手段は12個のフローティングディフュージョンであり、メモリチップの接合で撮影枚数を十分大きくできる。分岐ごとに駆動速度が1/分岐数になるので、この構造においては画像信号の転送速度は、ブランチングがない場合に比べて1/12になる。これによりノイズレベルも低減できる。

また、時間分解能に寄与する水平ドリフト層中央部での水平混合を抑制するために、画素中央のガイドゲートの転送方向速度の最大化(電位プロファイルの直線化)が有効であると考えた。このために、**図 2**に示すレジスティブゲート(resistive gate)を適用することを提案した。CCDでは通常は各ゲートの電極の中央に1個のコンタクトを備える。これにより、電圧を変えた直後のみ電流が生じるが、ゲート中央部の電位がややフラットになる(**図 2(a)**の点線)。レジスティブゲートは、電荷の転送のために各電極の両端にコンタクトを有するゲートであり、これによりコンタクト間のポテンシャルは直線化される。**図 2(b), (c)**では、8角形のガイドゲートに

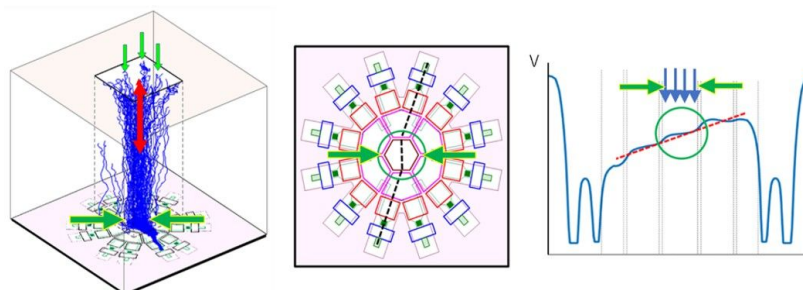


図 1 ブランチングイメージセンサ。モンテカルロシミュレーションによる電子群の軌跡(左)、表面側のゲート構造(中)、画素の点線に沿うポテンシャル(右)。

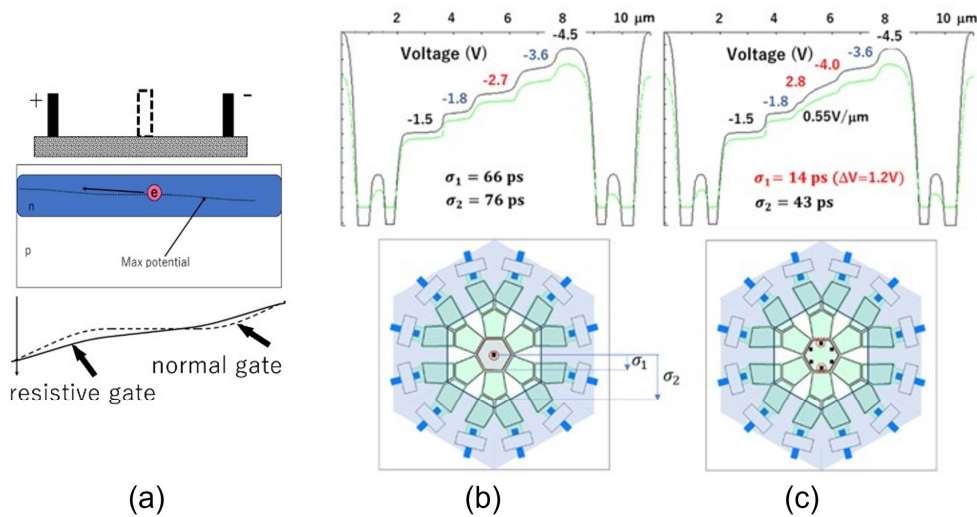


図2 レジスティブゲート構造。(a) 2個のコンタクトを持つ resistive gate と 1個のコンタクトの通常のゲート, (b) 通常のゲートと (c) resistive gate のポテンシャルの比較。

レジスティブゲートを適用した例を示す。ガイドゲートから隣接する第1分岐ゲートへの到達時間の標準偏差は66 psから14 psと約1/5になる。レジスティブゲートには電極電流による消費電力増加などの課題があるものの、極限の超高速撮影を目指すために有効である。

(2) ゲルマニウムフォトダイオードによる光電変換部の時間分解能の向上

シリコンより吸収係数が大きく、飽和ドリフト速度が大きい材料を使えばシリコンの限界時間分解能を超えることができる。そこで、ゲルマニウムをフォトダイオードとして用いる開発の可能性と課題を検討した。ゲルマニウムの可視光域の吸収係数はシリコンのその数十倍である。一方、飽和ドリフト速度についてはシリコンの約2/3でほとんど変わらないことから、シリコンの数十分の1の時間分解能が期待される。限界電界をドリフト速度が飽和値の95%に達するときの値で定義する。ゲルマニウムの限界電界下の拡散係数はシリコンの数倍であるので時間分解能の正確な値は、これまでに導いた限界時間分解能の理論式やモンテカルロシミュレーションを用いて求める必要がある。

図3は、シリコンとゲルマニウムに波長550 nmの光を入射したときの電子の到達時間の標準偏差をモンテカルロシミュレーションで求めた結果である。到達時間分布が正規分布で近似で

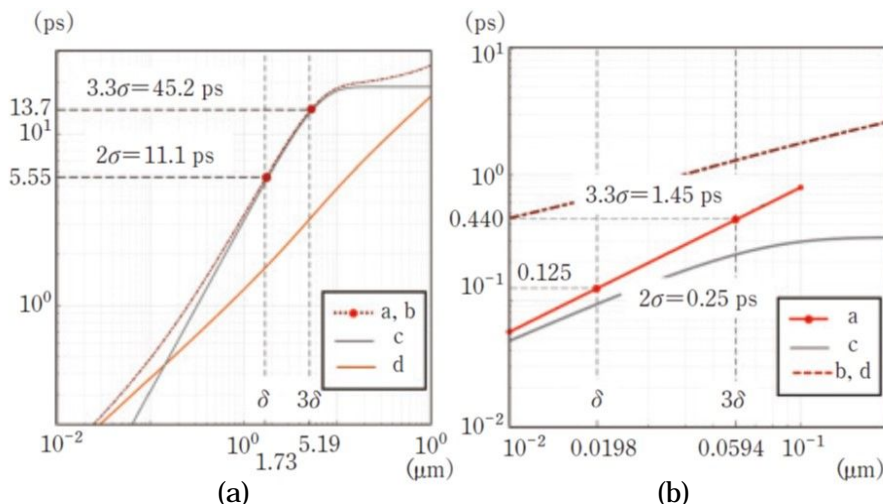


図3 シリコン PD とゲルマニウム PD の限界時間分解能 (入射光: 550nm)。(a)シリコン, (b)ゲルマニウム (横軸: フォトダイオードの厚さ, 縦軸: 到達時間の標準偏差; a: MC シミュレーション, b: 限界時間分解能の理論式, c: 混合効果, d: 拡散効果)。

きるものとして、検出面における到達時間分布の標準偏差 σ に対して、理論的限界時間分解能を 2σ 、実用的限界時間分解能を 3σ とした。図 3 より、シリコンの場合の理論的限界時間分解能は 11.1 ps、実用的限界時間分解能は 48.2 ps であること、ゲルマニウムの場合の理論的限界時間分解能は 0.25 ps、実用的限界時間分解能は 1.41 ps であることが示された。ゲルマニウムを可視光のフォトダイオード材料として使う場合、大きな暗電流、高品質ゲルマニウム単結晶薄膜の形成技術や pn 接合形成技術などの課題はあるものの、シリコンの場合の限界よりはるかに小さい時間分解能のイメージングを実現できることが示唆された。ゲルマニウム PD を前述のレジスティブゲートを備えたブランチング画素構造と併用することで、時間分解能 100 ps を実現できる見通しが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ngo Nguyen Hoai, Shimonomura Kazuhiro, Ando Taeko, Shimura Takayoshi, Watanabe Heiji, Takehara Kohsei, Nguyen Anh Quang, Charbon Edoardo, Etoh Takeharu Goji	4. 巻 21
2. 論文標題 A Pixel Design of a Branching Ultra-Highspeed Image Sensor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2506 ~ 2506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21072506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ngo Nguyen Hoai, Etoh Takeharu Goji, Shimonomura Kazuhiro, Ando Taeko, Matsunaga Yoshiyuki, Shimura Takayoshi, Watanabe Heiji, Mutoh Hideki, Kamakura Yoshinari, Charbon Edoardo	4. 巻 69
2. 論文標題 Toward Super Temporal Resolution by Suppression of Mixing Effects of Electrons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Electron Devices	6. 最初と最後の頁 2879 ~ 2885
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TED.2022.3168617	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Thanushan Kugathasan, Taeko Ando, Dominik Dannheim, Takeharu Goji Etoh, Magdalena Munker, Heinz Perneggera, Angelo Rivetti, Kazuhiro Shimonomura, Walter Snoeys	4. 巻 979
2. 論文標題 Monolithic CMOS sensors for sub-nanosecond timing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164461	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nguyen Hoai Ngo, Anh Quang Nguyen, Fabian M. Bufler, Yoshinari Kamakura, Hideki Mutoh, Takayoshi Shimura, Takuji Hosoi, Heiji Watanabe, Philippe Matagne, Kazuhiro Shimonomura, Kosei Takehara, Edoardo Charbon, Takeharu Goji Etoh	4. 巻 20
2. 論文標題 Toward the Super Temporal Resolution Image Sensor with a Germanium Photodiode for Visible Light	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6895
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20236895	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Takeharu Goji Etoh, Tomoo Okinaka, Yasuhide Takano, Kohsei Takehara, Hitoshi Nakano, Kazuhiro Shimonomura, Taeko Ando, Nguyen Ngo, Yoshinari Kamakura, Dao Vu Truong Son, Anh Quang Nguyen, Edoardo Charbon, Chao Zhang, Piet De Moor, Paul Goetschalckx, Luc Haspeslagh	4. 巻 19
2. 論文標題 Light-in-Flight imaging by a silicon image sensor: Toward the theoretical highest frame rate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 No.2247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s19102247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 高野 保英, 沖中 知雄, 竹原 幸生, 中野 人志, 下ノ村 和弘, 林 直樹, 三井 鷹, 江藤 剛治	4. 巻 39
2. 論文標題 1億枚 / 秒のマルチフレーミングセンサによる飛翔する光の撮影	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 可視化情報学会論文集	6. 最初と最後の頁 pp.35-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3154/tvsj.39.35	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Nguyen Hoai Ngo, Takayoshi Shimura, Heiji Watanabe, Kazuhiro Shimonomura, Yoshinari Kamakura, Takeharu Goji Etoh
2. 発表標題 A Branching Image Sensor for Sub-nanosecond Burst Imaging
3. 学会等名 映像情報メディア学会情報センシング研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nguyen Hoai Ngo, Takayoshi Shimura, Heiji Watanabe, Kazuhiro Shimonomura, Hideki Mutoh, Takeharu Goji Etoh
2. 発表標題 Super-temporal-resolution Image Sensor -Beyond the Theoretical Highest Frame Rate of Silicon Image Sensors-
3. 学会等名 映像情報メディア学会情報センシング研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Nguyen H. Ngo, Takayoshi Shimura, Taeko Ando, Heiji Watanabe, Kazuhiro Shimonomura, Yoshinari Kamakura, Hideki Mutoh, T. Goji Etoh
2. 発表標題 Dynamic Crosstalk Analysis for Branching Image Sensors
3. 学会等名 2021 International Image Sensor Workshop (IISW) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Goji Etoh, Nguyen Hoai Ngo, Kazuhiro Shimonomura, Taeko Ando, Takayoshi Shimura, Heiji Watanabe, Hideki Mutoh, Yoshinari Kamakura, Edoardo Charbon
2. 発表標題 Toward Super Temporal Resolution by Controlling Horizontal Motions of Electrons
3. 学会等名 2021 International Image Sensor Workshop (IISW) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江藤剛治, ゴグエン ホアイ, 下ノ村和弘, 安藤妙子, 松長誠之, 志村孝功, 渡部平司, 武藤秀樹, 鎌倉良成, エドアルド シャーボン
2. 発表標題 信号電子の水平運動の制御によるスーパー時間分解へのアプローチ
3. 学会等名 映像情報メディア学会情報センシング研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江藤剛治, ゴホアイ グエン, 渡部平司, 志村孝功, 松永誠之, 廣瀬裕, 武藤秀樹, 下ノ村和弘
2. 発表標題 レジスティブゲートを備えるブランチング撮像素子
3. 学会等名 映像情報メディア学会情報センシング研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江藤剛治, 下ノ村和弘, 安藤妙子, 松長誠之, 廣瀬裕, 志村考功, 渡部平司, 鎌倉良成, 武藤秀樹
2. 発表標題 信号電子の混合効果の抑制によるスーパー時間分解を目指して
3. 学会等名 電子情報通信学会シリコン材料・デバイス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nguyen Hoai Ngo, Anh Quang Nguyen, Vu Truong Son Dao, Kazuhiro Shimonomura, Takeharu Goji Etoh
2. 発表標題 Simulation Study on a Backside-Illuminated Cascade-Collection-Gate Image Sensor
3. 学会等名 IEEE International Conference on Communications and Electronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Goji Etoh, Nguyen Ngo, Anh Quang Nguyen, Yoshiyuki Matsunaga, Taeko Ando, Kohsei Takehara, and Kazuhiro Shimonomura
2. 発表標題 Evolution of BSI Multi-Collection-Gate Image Sensors -From Light-in-Flight imaging to Giga-fps Continuous Imaging-
3. 学会等名 2019 International Image Sensor Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nguyen Ngo, Anh Quang Nguyen, Yoshiyuki Matsunaga, Taeko Ando, Kohsei Takehara, Kazuhiro Shimonomura, Takeharu Goji Etoh
2. 発表標題 A Simulation Study on a Cascade-pipeline BSI Multi-Collection-Gate Image Sensor
3. 学会等名 映像情報メディア学会情報センシング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江藤剛治, ゴグエン, 松長誠之, 安藤妙子, 下ノ村和弘
2. 発表標題 光の飛翔の連続撮影を超えて ~X線・赤外線超高速撮影に向けて~
3. 学会等名 映像情報メディア学会情報センシング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D.Dannheim,T.Etoh,T.Kugathasan,M.Muenker,H.Pernegger,A.Rivetti,K.Shimonomura,W.Snoeys
2. 発表標題 Monolithic CMOS sensors for sub-nanosecond timing
3. 学会等名 12th International Hiroshima Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking detectors (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	江藤 剛治 (Etoh Takeharu) (20088412)	立命館大学・総合科学技術研究機構・教授 (34315)	
研究分担者	安藤 妙子 (Ando Taeko) (70335074)	立命館大学・理工学部・教授 (34315)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------