

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630159

研究課題名(和文) 粒子シミュレーション法を用いた1Gfps超高速撮像素子の解析と設計

研究課題名(英文) Analysis of ultra-fast image sensor with Monte Carlo device simulation technique

研究代表者

鎌倉 良成 (Kamakura, Yoshinari)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70294022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：裏面照射(BSI)画素周辺記録型撮像素子(ISIS)の高速撮像限界に対する考察をモンテカルロ(MC)デバイスシミュレーション法を用いて行った。個々の電子の確率的な挙動を追跡するMCシミュレーションが、固体撮像素子の極限の動作性能を目指した解析に非常に適していることを示すと同時に、時間分解能を律速する物理機構について理論的な分析を行った。発生した光電子が、収集ゲートに到達するまで要する走行時間のばらつきが撮像時間分解能を律速する原理的要因となり、その抑制のためには、光電子を収集ゲートまで導く経路の電位分布設計が重要であることを示した。

研究成果の概要(英文)：A device simulation analysis for the Backside Illuminated In-situ Storage Image Sensor (BSI ISIS) is carried out by using the full-band Monte Carlo (MC) method. The theoretical minimum temporal resolution depends on the travel time distribution of signal photoelectrons from the generation sites to the collection site, and thus the stochastic MC method can become a powerful tool for assessing the performance limits of the high-speed image sensor. This study has demonstrated the fundamental mechanisms affecting the travel time distribution of photoelectrons, and suggested the design guidelines to realize ultra-fast image sensors.

研究分野：半導体工学

キーワード：イメージセンサ デバイスシミュレーション 超高速撮像 モンテカルロ法

1. 研究開始当初の背景

1991年に世界初のデジタル記録型高速ビデオカメラ(4,500枚/秒)が江藤らによって開発されて以来、同グループは高速ビデオカメラの撮影速度の世界記録を次々に塗り替えてきた(2002年100万枚/秒[1], 2011年1,600万枚/秒[2]). 今後更なる高速化(目標:10億枚/秒 = 1 Gfps [3])の実現には、撮像固体素子の動作機構に対するより精緻な理解、すなわち光吸収により発生した電子挙動物理の正確な把握、が必須となる。本研究では、これまで主に極微細Si-MOSFETの電気伝導解析用を開発され、膨大な知見と検証が積み上げられてきた「フルバンド・モンテカルロ(MC)シミュレーション法」を超高速度撮像素子の解析と設計に応用する。

研究代表者の鎌倉は、これまで半導体中のキャリア(電子と正孔)を粒子でモデル化し、その伝導を計算機解析するMC法の開発と応用に対して、20年間に渡る研究実績(企業研究所~大学)を有する。これらの一連のシミュレーション・モデリング技術が、江藤らが目指す次世代超高速度撮像素子の設計・検証に極めて有用との着想から、本計画がスタートした。

2. 研究の目的

超高速度撮像素子の更なる高速化(目標:10億枚/秒 = 1 Gfps)を実現するため、既存ツールでは解析できない現象を取り扱うことのできる新たなシミュレータを開発する。この目的達成には、フルバンド・モンテカルロ法(極微細トランジスタの解析等に用いられてきた)によるシミュレーション技術が極めて有用と考えられる。撮像素子の時間分解能を律速する究極の要因と考えられる「統計的ゆらぎ」を計算機上で再現することで、動作限界に關与する本質的な物理過程の明確化とその制御法の考察を行う。さらに、本研究で得られた新しいツールを用いて、1 Gfps超の速度と光子計数感度を有する撮像素子の新動作原理および新構造策定を目指すとともに、デバイスシミュレーション分野においても新規応用、新規方法論の創出に寄与を果たす。1 Gfpsという未踏の超高速度撮影が、科学技術分野に与えるインパクトは極めて大きく、高速物理現象の可視化による理解、バイオサイエンス分野の時間領域蛍光分析、TOF MS等の先端計測手段の飛躍的性能改善など、多様な学術領域の進展に影響を与える可能性がある。

3. 研究の方法

(1) 解析対象素子

各画素に多数のメモリを作り込み、撮影中は画像信号を撮像素子外に読み出すことなく、全画素同時に画素内メモリに記録することで、100万枚/秒の高速撮影を達成した画素周辺記録型撮像素子(ISIS: In-situ Storage Image Sensor)が報告されている[1]. さらに、これを裏面照射型(BSI: Backside Illuminated)にし、高感度化とともに、表

面側に高い自由度で金属配線を行うことで、画素内メモリへの信号転送時間を1桁向上させ、1,600万枚/秒が達成された[2]. 各画素に複数の収集ゲートを設け、生成した電荷を順次収集すれば、原理的には光電子が収集ゲートの一つに到達するまで要する走行時間のばらつきが時間分解能を決める因子となると考えられている[3], [4]. 図1にBSI ISISの断面模式図を示す[4]. 生成した信号電子のメモリへの迷入を防ぐためにn層中に作ったpウェルでメモリを保護した構造となっており、また裏面への入射光が表面側のメモリに届かないようy方向は30μm以上の厚さにする必要がある。本研究では、このような半導体素子構造中の電子走行を特にその統計ばらつきに着目しながらシミュレーション解析し、高速度撮影の速度限界についての一考察を試みた。

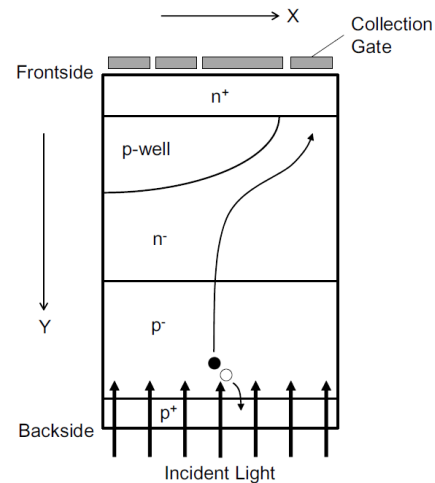


図1: BSI ISISの断面構造に関する模式図. 1画素の半分を表示. 左端が画素端, 右端が画素中央部に相当する.

(2) シミュレーション方法

ドリフト-拡散方程式(流体シミュレーション法)は、半導体素子中のキャリア輸送を解析する上で大変有用であり、基礎から応用にわたる幅広い用途に用いられている。しかしながら、本研究の最終目標である高速度撮影の限界を迫るためには、電荷の粒子性や、伝導の確率的揺らぎが速度限界に本質的に關わる因子となる。この解析には、個々のキャリアの動き、すなわち電界による加速と散乱(フォノン, イオン化不純物, 衝突電離, 等)の繰り返しを計算機上で直接模擬するモンテカルロ(MC)シミュレーション[5]が最適であると考えた。

MC法は、半導体デバイスシミュレーションの形態の一種であり、個々のキャリアを粒子としてモデル化することから粒子シミュレーション法ともよばれる。流体シミュレータと比べ計算時間は重いものの、エネルギーバンド構造やキャリア散乱確率などの精緻な物

理モデルを組み込むことができる[6]ため、基礎的な輸送特性解析やパラメータ抽出などに主に用いられてきた。特に高電界印加時に発生する高エネルギーキャリア、いわゆるホットキャリアの挙動解析を得意とする。今回は、文献[6]で報告されたフルバンドMCシミュレータ(高エネルギー領域のエネルギーバンド構造をテーブルとして取り込むことで高精度化を図ったMC法の一つ)を応用し、撮像素子内の光電子の輸送解析を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 基本輸送量のシミュレーション結果

まずは、シミュレータの精度を確認するため、いくつかの基本輸送量のシミュレーション結果を示す。図2は、バルクSi中の速度-電界曲線の実験値[7]との比較である。一様電界中の電子の運動を長時間(> 1 ns)追跡し、その変位からドリフト速度を計算した(図2(a))。電界強度が数kV/cmを上回ると、電界とドリフト速度の線形関係が徐々に外れはじめ、最終的には飽和する特性を良好に再現している。これは、電子の平均運動エネルギーが格子系のそれを上回る、「ホットエレクトロン効果」によるものである(図2(b))。低電界下では、電子が電界による加速で得たエネルギーは、結晶原子との衝突(フォノン放出散乱)によって速やかに失われ、電子系と格子系の温度は釣り合った状態となる。しかしながら、電界が強くなると、フォノン放出による電子エネルギー散逸が追い付かなくなり、その結果電子エネルギーが上昇する。高エネルギー電子はより頻繁にフォノン散乱を受けるため、電界方向にそれ以上速く移動しにくくなり、ドリフト速度が飽和する( $v \sim 10^7$  cm/s)。

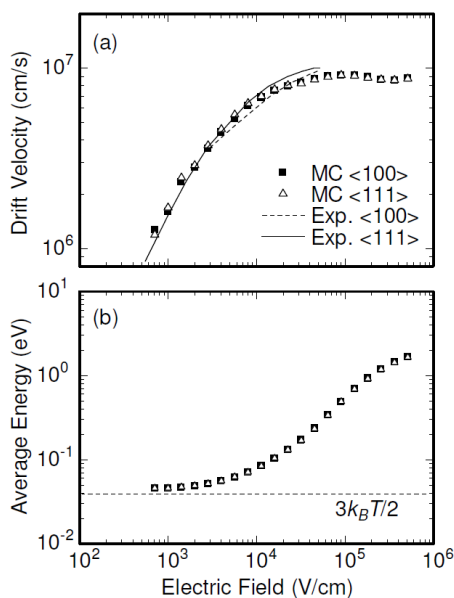


図2: バルクSi中の電子輸送に関するMCシミュレーション結果。(a)ドリフト速度の電界依存性と実験値[7]の比較。(b)平均エネルギーの電界依存性。それぞれ温度は300 Kを仮定し、電界印加方向として $\langle 100 \rangle$ と $\langle 111 \rangle$ 方向を取った場合を示した。

図3は、電子拡散係数のシミュレーション結果である。こちらも実験値[7]との概ね良好な一致が確認できる。ここで、高電界領域においては、電界に対して平行と垂直な方向で拡散係数が異なる値を示すことにも注目したい。すなわち、ホットエレクトロンはドリフト方向に対して横に広がりやすい性質があり、これは今回想定する素子中の電子の走行時間解析にも影響を与える輸送特性といえる。

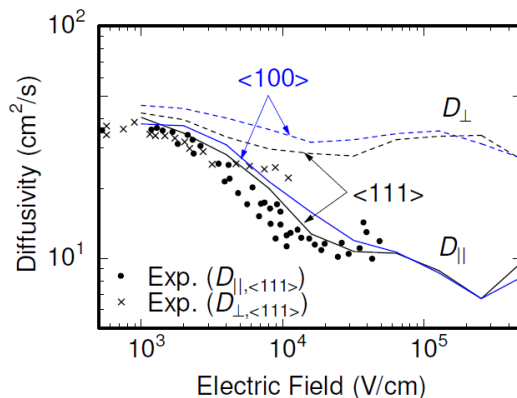


図3: バルクSi中の電子拡散係数に関するMCシミュレーション結果と実験値[7]の比較。電界に対して平行( $D_{\parallel}$ )と垂直方向( $D_{\perp}$ )の拡散係数を求めた。温度は300 Kを仮定し、電界印加方向として $\langle 100 \rangle$ と $\langle 111 \rangle$ 方向を取った場合を示した。

##### (2) 撮像素子中の電子輸送解析

フルバンドMCシミュレータを用いて、BSI ISIS中で発生した光電子の走行時間解析を行った。素子構造としては文献[4]にて提案・設計されたものを仮定し、その際計算された内部電位分布のグリッドデータを参照テーブルとして取り込んだ電位固定型のMCシミュレーションを実施した。なお、本報告にて示す解析では、簡単のため光電子の動きを2次元平面内のみに限定しているが、より現実的な3次元シミュレーションも実施可能である。

図4にシミュレーション結果の一例を示す。裏面近傍で発生した光電子が、空乏層電界によって表側へと加速され、最終的に画素内メモリ領域に到達するまでの挙動を追跡した。ここで、電子の初期位置( $x_0, y_0$ )としては、 $x$ 軸方向には等間隔に、一方 $y_0$ は減衰定数 $\tau = 0.9 \mu\text{m}$ (緑色光吸収を想定)を有する指数分布に従う乱数を用いて決定した。また、電子初期エネルギーは0を仮定した。フォノン散乱によって進行方向を頻繁に変えながらも、電界から受ける力の向きに電子はドリフトし、最終的には意図したとおり画素内メモリ部まで到達する様子が確認できる。

電子走行時間の分布を調べるため、同じシミュレーション結果を、横軸を時間にとってプロットし直したものが図5である。一定の電位スロープを下る時の電子の挙動は比較

的揃っており、そのばらつきの主要因は発生位置  $y_0$  の違いである。一方、表側近くまで電子が到達し、次に p ウエル上で  $x$  方向に移動して画素メモリに吸収されるまでの行程では大きなばらつきが確認された。図 5(b)には電子運動エネルギーの変化を示したが、ほとんどの部分でホット化していることがうかがえる。図 4 に示したように空乏層中の  $y$  方向電界強度は 10 kV/cm を超えており、 $D$  も減少していると考えられる。

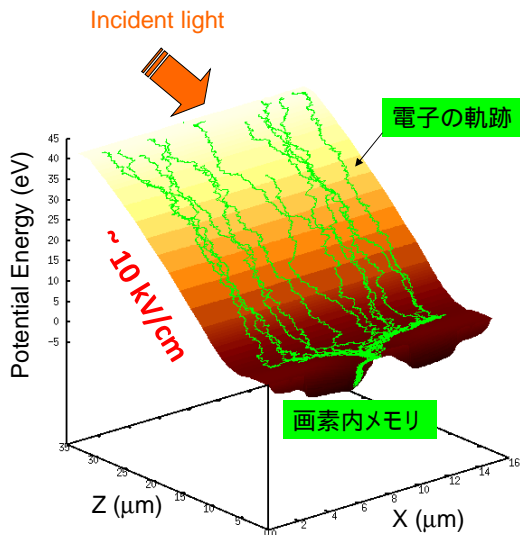


図 4: BSI ISIS 構造中の電子軌跡の MC シミュレーション結果。ポテンシャル分布上にプロットした。裏面近傍で発生した 14 個の電子が表面側に設けた画素内メモリ領域に到達するまでの挙動を追跡している。

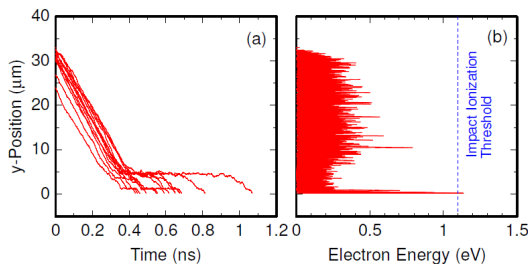


図 5: MC シミュレーションで求めた電子挙動。(a)  $y$  (深さ) 方向の位置の時間依存性。(b) 電子エネルギーの時間依存性。

到達時間分布をより詳細に確認するため、MC 粒子数  $10^3$  個のシミュレーションを行った。その際、電子初期位置として、次の 3 通りの場合を比較した。

- (1)  $x_0$ :  $(0 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m})$  の一様乱数,  
 $y_0$ : 減衰定数 =  $0.9 \mu\text{m}$  の指数分布に従う乱数
- (2) 全て画素中央部  $(x_0, y_0) = (7.5 \mu\text{m}, 32 \mu\text{m})$  に固定
- (3) 全て画素辺縁部  $(x_0, y_0) = (1 \mu\text{m}, 32 \mu\text{m})$  に固定

結果を図 6 に示す。より現実の状況に近い(1)の場合、時間の長い側に大きく裾を引いた分布が得られた。撮像時間分解能の考察には、分布の平均や分散のみならず、こうしたテイル部への配慮も重要である。(1)の分布のテイル成分は、 $y$  方向の走行ばらつきによるものではなく、電子初期位置や  $x$  方向の走行ばらつきによるところが大きいと考えられる。実際、(2)の結果は(1)に比べてばらつきが小さい。一方、(3)は(2)と比べ平均の到達時間の差はそれほど大きくない( $\sim 0.3$  ns)ものの、分布のテイルの引き方に顕著な違いが見られ、稀に極めて長い走行時間( $> 2.5$  ns)を示す電子が確認された。

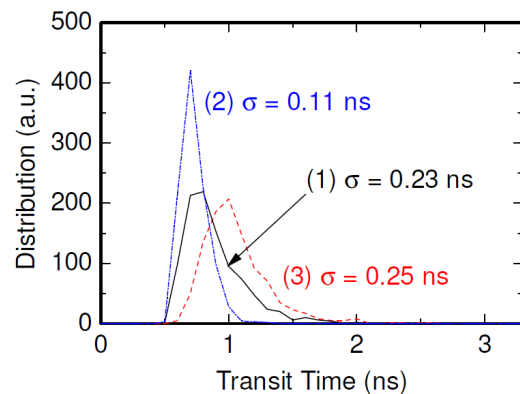


図 6: MC シミュレーションで求めた電子走行時間分布。 $10^3$  個の電子が画素内メモリ部に到達するまで要した走行時間の分布を示している。電子の初期位置の決定法として本文中に示した(1)~(3)を用いた時の結果を比較した。

図 7 に、(3)で見られた電子軌跡の例を示す。 $y$  方向に対するドリフトを終えた電子が画素辺縁部に滞留し、それが異常に長い走行時間を示していたことが分かった。

先に述べたように、撮像素子の時間分解能の原理的な限界は、光電子がメモリ部に到達するまでの走行時間分布により律速されるものと考えられる。そのばらつき幅を縮小するためには、 $x$  方向の収集を如何に行うかが



重要であり、ドーピング濃度分布の適切な設計により光電子を画素中央部に導く電位勾配を作りこむ必要がある。さらに、画素上にマイクロレンズを形成し中央部に光を導く対策も有効であると考えられる[4]。

今回の MC シミュレーションでは考慮していないが、インパクトイオン化によるアバランシェ増倍効果も注目すべき点である。実際、図 5(b)からは、イオン化しきい値エネルギー(=バンドギャップ)を超えるような電子が、メモリ領域侵入時に発生していることが確認できる。しかし、信号増幅が期待できる一方で、走行時間ばらつきにキャリア増倍効果が及ぼす影響は未だ良く分かっておらず、今後 MC シミュレーションを用いた検討が必要である。

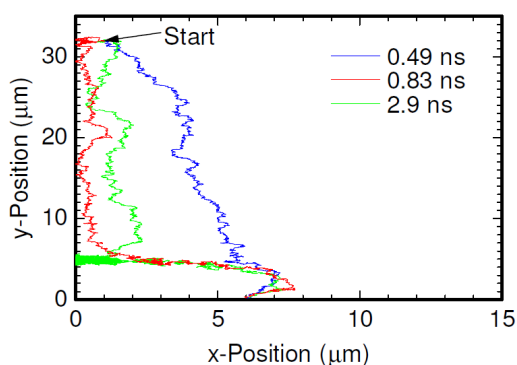


図 7: 電子軌跡のシミュレーション結果。矢印で示した同一地点からスタートしたにもかかわらず、異なる走行時間を示した 3 通りの結果を比較している。

#### <引用文献>

[1] T. G. Etoh, D. Poggemann, A. Ruckelshausen, A. Theuwissen, G. Kreider, H.-O. Folkerts, H. Mutoh, Y. Kondo, H. Maruno, K. Takubo, H. Soya, K. Takehara, T. Okinaka, Y. Takano, T. Reisinger, C. Lohmann, "A CCD image sensor of 1 Mframes/s for continuous image capturing of 103 frames," Digest of Technical Papers, ISSCC2002, 46-47.

[2] T. G. Etoh, D. H. Nguyen, S. V. T. Dao, C. L. Vo, M. Tanaka, K. Takehara, T. Okinaka, H. v. Kuijk, W. Klaassens, J. Bosiers, M. Lesser, D. Ouellette, H. Maruyama, T. Hayashida, T. Arai, "A 16 Mfps 165 kpixel backside-illuminated CCD," Digest of Technical Papers, ISSCC2011, 406-407.

[3] T. G. Etoh, V. T. S. Dao, T. Yamada, and E. Charbon, "Toward One Giga Frames per Second Evolution of In-situ Storage Image Sensors," Sensors, vol. 13, no. 4, pp. 4640-4658, 2013.

[4] V. T. S. Dao, K. Shimonomura, Y.

Kamakura, and T. G. Etoh, "Simulation analysis of a backside-illuminated multi-collection-gate image sensor," ITE Trans. on MTA, vol. 2, no. 2, pp. 144-122, 2014.

[5] C. Jacoboni and L. Reggiani, "The Monte Carlo method for the solution of charge transport in semiconductors with applications to covalent materials," Rev. Mod. Phys., vol. 55, no. 3, pp. 645-705, 1983.

[6] T. Kunikiyo, M. Takenaka, Y. Kamakura, M. Yamaji, H. Mizuno, K. Taniguchi, and C. Hamaguchi, "A Monte Carlo simulation of anisotropic electron transport in silicon including full band structure and anisotropic impact ionization model," J. Appl. Phys., vol. 75, no. 1, pp. 297-312, 1994.

[7] C. Jacoboni, C. Canali, G. Ottaviani, and A. A. Quaranta, "A review of some charge transport properties of silicon," Solid-State Electron., vol. 20, pp. 77-89, 1977.

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表](計 9 件)

鎌倉良成、下ノ村和弘、江藤剛治、"モンテカルロシミュレーション法を用いた高速撮像素子の解析," 電子情報通信学会集積回路研究会(ICD), 2014 年 7 月 3 日~2014 年 7 月 4 日、大社文化プレイスうらら館(島根県出雲市)

T. G. Etoh, V. T. S. Dao, K. Shimonomura, E. Charbon, C. Zhang, Y. Kamakura, and T. Matsuoka, "Toward 1Gfps: Evolution of Ultra-high-speed Image Sensors: ISIS, BSI, Multi-Collection Gates, and 3D-stacking," International Electron Devices Meeting, 2014 年 12 月 15 日~2014 年 12 月 17 日, San Francisco, USA.

南谷夏海、Dao Vu Truong Son、下ノ村和弘、江藤剛治、鎌倉良成、"超高速撮像素子におけるアバランシェ増倍効果のシミュレーション解析", 第 62 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月 11 日~2015 年 3 月 14 日、東海大学(神奈川県平塚市)

南谷夏海、Dao Vu Truong Son、下ノ村和弘、江藤剛治、鎌倉良成、"10Gfps を目指したアバランシェ増倍型超速撮像素子のシミュレーション解析" 映像情報メディア学会情報センシング研究会(IST)、2015 年 5 月 8 日、東京理科大学森戸記念館(東京都新宿区)

V. T. S. Dao, T. G. Etoh, K. Shimonomura, Q. Nguyen, N. Hayashi, Y. Kamakura, C. Zhang, E. Charbon, P. Goetshalckx, L. Haspelslagh, P. De Moor, "Toward 10 Gfps; Factors limiting the frame rate of the BSI MCG image sensor,"

2015 International Image Sensor Workshop,  
2015年6月8日~2015年6月11日, Vaals,  
The Netherlands.

Dao Vu Truong Son, Quang Nguyen Anh,  
Kotaro Kitagawa, Kazuhiro Shimonomura,  
Takeharu Etoh, Yoshinari Kamakura,  
Natsumi Minamitani, "Toward 10 Gfps:  
Factors Limiting the Frame Rate of the BSI  
MCG Image Sensor," 映像情報メディア学会  
情報センシング研究会, 2015年9月18日,  
機械振興会館.

Vu Truong Son Dao, Anh Quang Nguyen,  
Kazuhiro Shimonomura, Yoshinari Kamakura,  
Natsumi Minamitani, Chao Zhang, Eduardo  
Charbon, Luc Haspeslagh, Paul  
Goetshhalckx, Piet De Moor, and T. Goji  
Etoh, "A Structure of an Image Sensor  
Operating at 1Gfps," International  
Conference on Advanced Technology in  
Experimental Mechanics, 2015年10月4日  
~2015年10月8日, ロワジールホテル豊橋  
(愛知県豊橋市).

南谷夏海、Vu Truong Son Dao、下ノ村和  
弘、江藤剛治、鎌倉良成、森伸也、"モンテ  
カルロ法による超高速イメージセンサの解  
析" 電子情報通信学会シリコン材料・デバイ  
ス研究会、2015年11月5日~2015年11月6  
日、機械振興会館(東京都港区)

Natsumi Minamitani, Vu Truong Son Dao,  
Kazuhiro Shimonomura, Takeharu Goji Etoh,  
Yoshinari Kamakura, and Nobuya Mori,  
"Analysis of Ultra-High-Speed Image  
Sensor with Monte Carlo Simulation,"  
International Symposium on Advanced  
Nanodevices and Nanotechnology, 2015年  
11月29日~2015年12月4日, Hawaii, USA.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鎌倉 良成 (KAMAKURA, Yoshinari)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 70294022

### (2) 連携研究者

江藤 剛治 (ETOH, Takeharu)  
立命館大学・総合科学技術研究機構・教授  
研究者番号: 20088412