

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：82118

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25109001

研究課題名(和文) 3次元半導体検出器で切り拓く新たな量子イメージングの展開

研究課題名(英文) Interdisciplinary research on quantum imaging opened with 3D semiconductor detector

研究代表者

新井 康夫 (ARAI, Yasuo)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：90167990

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 41,790,000円

研究成果の概要(和文)：本領域研究では、半導体を用いた量子イメージングセンサと読み出し集積回路を一体化したSOIピクセル検出器技術を開発し、素粒子・宇宙・放射光・質量分析等の分野に応用した。8つの計画研究班及び14の公募研究により、検出器開発が進むと共に、様々な科学実験への応用が行われた。成果の例としては、荷電粒子の位置検出において世界で初めて1ミクロンを切る性能を示し、ノイズレベルを8電子にまで低下させる等の結果を得た。また大型センサを内蔵したカメラシステムを開発し、放射光実験に投入することも出来た。本総括班は、これらの研究をまとめるとともに、各種研究会を主催し領域研究の運営を行なった。

研究成果の概要(英文)：In this research, monolithic semiconductor detectors having quantum imaging sensors and readout circuits have been developed, and these detectors are applied to various scientific fields such as elementary particles, cosmology, synchrotron-light source, mass analysis, so on. There are 8 planning research and 14 public researches. Some examples of achievements are; demonstration of less than 1 micron tracking resolution first in the world, detector noise level reduction to less than 8 electron etc. Further more, complete camera system including large sensors is built and used in synchrotron-light experiments. This summary group handled these researches and developments, and hosted various kinds of meetings.

研究分野：高エネルギー物理実験

キーワード：イメージング 先端機能デバイス 放射線 素粒子実験 粒子線 X線 3次元半導体 量子線

### 1. 研究開始当初の背景

半導体技術の進歩に伴って、半導体を用いた量子（可視光、赤外線、X線、ガンマ線、電子、陽子、中性子、荷電粒子、等々）を検出する半導体量子検出器の重要性が高まっている。特に2次元検出器として、量子線のイメージング画像を取得する際は、高速読み出しが必要となり、同じく半導体を用いた集積回路と一体化する事が要となる。

しかしながら、通常量子センサ部には高電圧を印加した高純度シリコンを用いる必要があり、集積回路と一体化させる事は難しく、両者は別々に製造され、その後大量の小金属パンプを使って接続されるハイブリッド方式が現在の主流である。

一方、1990年代中頃から、2種類のシリコン・ウエハを張り合わせた Silicon-on-Insulator (SOI) 技術が登場した。この技術を上手く使えば、センサと回路を一体化できることに着目し、本新学術領域研究をスタートさせる事となった(図1)。

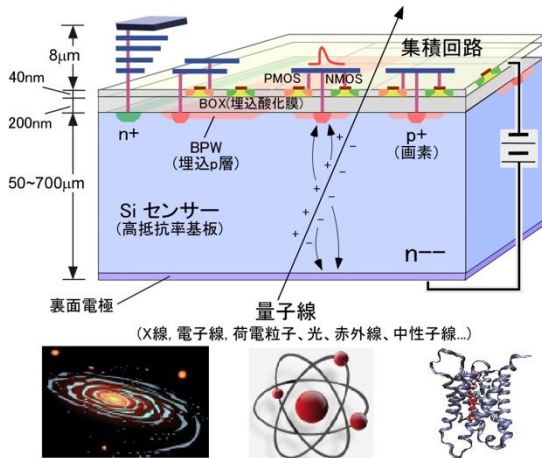


図1. SOI ピクセル量子検出器の概念図。様々な分野の研究に最適化した検出器の開発を行い、新しいサイエンスを切り拓く。

### 2. 研究の目的

X線・赤外線・荷電粒子線等の量子線を用いた測定では、量子それぞれを可視化する事が重要である。超微細画素の半導体センサによりこれら量子線データを高速・大量に取得し、画像として再構成を行うと、予期せぬ構造の発見や知見を得る事が可能となる。

例えば、個々の量子の検出を行い、そのエネルギーと到来数を精密計数することで、ダイナミックレンジ 10 桁以上の高コントラスト画像を得ることが可能である。さらに、到来時刻、波長、偏光特性、荷電粒子の種類と運動エネルギーなど、量子それぞれが持つ物理量の同時計測も原理的に可能である。これらの実現は、量子イメージングの究極の目標であるが、既存の計測デバイスの性能や機能は、これらの要求からは程遠く、素核・宇宙・物質・生命科学に飛躍的進展をもたらす量子イメージングデバイスが求められている。

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、二種類のシリコン層を絶縁層を介して張り合わせたシリコン基板技術 SOI を用い、高感度センサと集積回路とをピクセル内で3次元的に一体化させた放射線イメージング検出器の開発に成功している。SOI 検出器は、センサと回路が一体として半導体微細加工技術で製造され、裏面照射により理想的な量子効率を実現できる。また2つのシリコン活性層を持ち、単一量子の検出と量子エネルギー計測を同時に行うデバイスなど、従来型デバイスでは実現できない理想的な新機能を実現できる将来性を持つ。

本領域研究では、新たなデバイスの創出と、革新的な計測手法を実現する新しい融合研究領域をつくり、ひいては新しい科学的発見を加速する事を目的とした。

### 3. 研究の方法

この新学術領域研究では8つの計画研究班と7つの公募研究(2年毎、計14件)がある。それぞれの研究タイトルは、表1の通りである。5年間の研究期間のうちに、8回の国内研究会と下記に示す3回の国際会議を開催した。これらを総括班が取り仕切った。

- 2015.6/3-5 International Workshop on SOI Detector (SOIPIX2015) @ 仙台
- 2016.7/14-15 China-Japan Mini Workshop on SOIPIX @ 北京
- 2017.12/11-15 International Workshop on SOI Detector (HSTD11 & SOIPIX2017) @ 沖縄

この他、ほぼ3ヶ月おきに各研究班の代表が集まる総括班会議を行い、領域の運営について話し合った。また、領域のWebページの整備、パンフレットの作成、研究会の資料集作成等の仕事も行った。

### 4. 研究成果

詳しい研究成果は個々の研究班の成果報告を見ていただきたいが、以下に主な研究成果をまとめる。

- Si層を増やした Double SOI 技術を開発し、放射線耐性を100倍以上向上させ、回路の安定化も図ることが出来た。
- 高エネルギー荷電粒子測定用の検出器として、世界で初めて1μmを切る位置分解能を実現し、日本で計画されている International Linear Collider (ILC) 計画で要求される、時間・位置を多重同時計測する検出器の実現に目処をつけた。
- センサ部構造として、新たに Pinned Depleted Diode (PDD) 構造を考案し、リーク電流を100分の1に低減させ、また電荷収集効率を100%近くまで向上させる事が出来た。
- X線自由電子レーザー実験・放射光実験に利用して、超高速にナノ構造を解析することを可能にする高ダイナミックレンジ 380

表 1. 新学術領域内研究班と課題名

研究班	研究課題名
A01	SOI 3次元ピクセルプロセスの研究
A02	SOI 技術を用いた極低ノイズ・高速イメージングデバイスの研究
B01	宇宙最初期ブラックホールの探査研究を実現する衛星搭載X線精密イメージングの開拓
B02	ダストに隠された宇宙の物質進化を暴く 極低温 SOI 赤外線イメージングの開拓
C01	高輝度加速器実験のための素粒子イメージング
C02	X線自由電子レーザーによる超高速ナノ構造解析用検出器
D01	放射光を用いた空間階層構造とダイナミクス研究のためのイメージング
D02	投影型イメージング質量分析による迅速で高解像度な生体内分子イメージング
A01-I	PSS-SOI 高分解能検出器の開発および応用
A01-II	ワイドレンジプラズモンフィルタを実装した SOI 量子イメージセンサの開発
A02-I	軟 X 線用の背面反射回折環二次元イメージング機構の開発
A02-II	究極のエネルギー分解能を持つ大面積 X 線検出器の開発
B01-I	XRPIXの位置分解能向上とG2格子不要のX線タルボ干渉計の開発
B01-II	中性子星の磁場構造を解き明かす X 線偏光イメージャーの開発研究
C02-I	SOI 技術を用いたイメージセンサの重粒子線への応用
A01-III	2光子ガンマ線検出型高感度分子イメージング装置(TPCCT)の実証開発
A01-IV	ワイドレンジプラズモンフィルタ実装 SOIPIX センサによる可視近赤外イメージング
A02-III	一体型 SOI 検出器によるデバイリング計測及び残留応力・材料評価の高速高精度化
A02-IV	SOI 技術を用いた極低温可視光カメラと極低温光学系の開発
A02-V	SOI ピクセル検出器による自己像直接検出型タルボ・ロー干渉計の高度化
B01-III	光子計数ピクセル検出器で実現する G2 格子不要の X 線タルボ干渉計
B01-IV	衛星搭載 X 線 SOI 検出器を用いた太陽アクシオン地上探索

万画素 X 線カメラの開発を行い、世界最高レベルの 185M 電子/100  $\mu\text{m}^2$  のダイナミックレンジを達成した。

- X 線の到来と同時にトリガー信号を外部に出すことができる X 線衛星搭載用検出器 (XRPIX) を開発し、X 線と宇宙線バックグラウンドとの区別を行う事ができるようにした。同時に位置情報も出すことにより、X 線入射位置近傍の画素情報のみを読み出せるようになり、読み出し時間を大幅に短縮できた。センサ構造や回路の工夫により、ノイズレベルを 8 電子まで削減し、216 eV@6.4 keV のエネルギー分解能を達成した。これらの成果が認められ、次期 X 線衛星 FORCE 用検出器の有力候補になった。
- 急峻な特性を持ち超低消費電力回路の実現の可能性を秘めた Super Steep Transistor を考案し、特性結果を得た。
- 17  $\mu\text{m}$  ピクセルの積分型 SOI 検出器による 3次元 CT 撮影に成功した(図 2)。

この他、学生や若手研究者に対しては、毎年設計講習会を開催し、センサや集積回路の設計の仕方を教えた。これにより、半導体検出器の設計技術を持った多くの若手研究者が育ち、今後の日本の検出器技術を支えて行ってくれる人材を育てた。



図 2. 放射光 X 線を用いた SOI 検出器で撮影した小魚の 3次元 CT 像。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 73 件)

(領域研究班で発表された英文論文)

"Performance study of double SOI image sensors", \*T. Miyoshi, Y. Arai, Y. Fujita, R. Hamasaki, K. Hara, Y. Ikegami, I. Kurachi, R. Nishimura, S. Ono, K. Tauchi, 2018 J. Inst. 13 C02005, DOI:10.1088/1748-0221/13/02/C02005.

"Diode Characteristics of a Super-Steep Subthreshold Slope PN-Body Tied SOI-FET for Energy Harvesting Applications", \*Takayuki Mori, Jiro Ida; Shun Momose; Kenji Itoh; Koichiro Ishibashi; Yasuo Arai, IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2018, Vol. 6, pp. 565 - 570. DOI:10.1109/JEDS.2018.2824344

"Development of monolithic pixel detector with SOI technology for the ILC vertex detector", \*M. Yamada, S. Ono, T. Tsuboyama, Y. Arai, J. Haba, Y. Ikegami, I. Kurachi, M. Togawa, T. Mori, W. Aoyagi, S. Endo, K. Hara, S. Honda and D.

Sekigawa, 2018\_JINST\_13\_C01037.  
DOI:10.1088/1748-0221/13/01/C01037.

Kamehama, S. Kawahito, S. Shrestha, S. Nakanishi, K. Yasutomi, A. Takeda, T. Go Tsuru, Y. Arai, "A Low-Noise X-ray Astronomical Silicon-On-Insulator Pixel Detector Using a Pinned Depleted Diode Structure", Sensors 2018, 18, 27; DOI:10.3390/s18010027.

M. Yamada, S. Ono, T. Tsuboyama, J. Haba, Y. Ikegami, I. Kurachi, M. Togawa, K. Hara, Y. Arai, et al., Development of monolithic pixel detector with SOI technology for the ILC vertex detector, Journal of Instrumentation, D13(2018) C01037-C01037, DOI:10.1088/1748-0221/13/01/C01037.

"SOI monolithic pixel technology for radiation image sensor", \*Y. Arai, T. Miyoshi, and I. Kurachi, 2017 IEEE Electron Device Meeting (IEDM17), Invited Talk, Session 16.2, pp. 389-392. Pages: 16.2.1 - 16.2.4. DOI:10.1109/IEDM.2017.8268401.

"Front end electronics of double SOI X-ray imaging sensors", \*T. Miyoshi, Y. Arai, Y. Fujita, K. Hara, Y. Ikegami, I. Kurachi, K. Tauchi, T. Tsuboyama, M. Yamada, S. Ono, R. Nishimura, and R. Hamasaki, iWoRiD 2016, 2017 JINST 12 C02004, DOI:10.1088/1748-0221/12/02/C02004.

"SOI Monolithic Pixel Detector Technology ", \*Y. Arai, Proceedings of Science, PoS(Vertex 2016)029. DOI:10.22323/1.287.0029

"Tradeoff Between Low-Power Operation and Radiation Hardness of Fully Depleted SOI pMOSFET by Changing LDD Conditions", \*I. Kurachi, K. Kobayashi, M. Mochizuki, M. Okihara, H. Kasai, T. Hatsui, K. Hara, T. Miyoshi, and Y. Arai, IEEE Trans. on Elec. Dev., Vol. 63, pp. 2293-2298, June 2016. DOI:10.1109/TED.2016.2552486.

M. Itou, T. Go Tsuru, T. Tanaka, A. Takeda, H. Matsumura, S. Ohmura, H. Uchida, S. Nakashima, Y. Arai, I. Kurachi, K. Mori, R. Takenaka, Y. Nishioka, T. Kohmura, K. Tamasawa, C. Tindall, "The first back-side illuminated types of Kyoto's X-ray astronomy SOIPIX", Nucl. Instr. and Meth. A831 (2016), pp. 55-60, DOI:10.1016/j.nima.2016.04.012.

〔学会発表〕(計 48 件)

(主な国際学会招待講演)

Y. Arai, "SOI Pixel Detector, ~ Looking into the History of the Universe ~", Inaugural Symposium: Tomonaga Center for the History of the Universe, March 26, 2018, Tsukuba(Japan), Invited Talk.

Y. Arai, "High Resolution SOI Pixel Detector", Dec. 11, 2017, HSTD11 & SOIPIX2017, Okinawa(Japan), Invited Talk.

Y. Arai, "SOI monolithic pixel technology for radiation image sensor", 2017 IEEE Electron Device Meeting (IEDM17), Dec. 4-6, San Francisco(USA), Invited Talk.

Y. Arai, "SOI Monolithic Pixel Detector Technology", The 25th International workshop on vertex detectors, September 26-30, 2016, La Biodola, Isola d'Elba(ITALY), Invited Talk.

Y. Arai, 2015.3.28-31 National Symposium on

Particles, Detectors and Instrumentation, Madurai(India). 'Radiation image sensor with Silicon-On-Insulator technology', Invited Talk.

Y. Arai, "Lapis SOI Technology and Activities", Invited Talk, Sep. 17, 2014, Workshop on CMOS Active Pixel Sensors for Particle Tracking (CPIX14), Bonn(Germmany).

Y. Arai, "Past & Future of the Silicon-On-Insulator Pixel Detector", Feb. 25, 2014, Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR14), Novosibirsk(Russia), Invited Talk.

Y. Arai, 'Progress on Silicon-on-Insulator Monolithic Pixel Process', VERTEX2013 Conf., Sep. 15-20 2013, Lake Starnberg(Germany), Invited Talk.

〔図書〕(計 2 件)

"Analog Electronics for Radiation Detection (Devices, Circuits, and Systems)", Editor Renato Turchetta, Chapter 5 'Time-to-Digital Converter', Y. Arai, ISBN-10: 1498703569, ISBN-13: 978-1498703567, CRC Press (2016), pp. 91-120.

"Radiation Imaging Detectors Using SOI Technology", Y. Arai and I. Kurachi, Synthesis Lectures on Emerging Engineering Technologies, Morgan & Claypool Publisher (2017/2/15), ISBN-13: 978-1627056960. 70 pages.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 5 件)

名称：半導体装置  
発明者：新井康夫、葛西大樹、沖原将生  
権利者：高エネ研、ラピスセミコンダクタ(株)  
種類：特許  
番号：特願 2017-157859  
出願年月日：2017 年 5 月 22 日  
国内外の別：国内

名称：  
RADIATION-DAMAGE-COMPENSATION-CIRCUIT  
AND SOI-MOSFET  
発明者：倉知郁生、新井康夫、山田美帆  
権利者：高エネ研  
種類：特許  
番号：PCT/JP2016/079797  
出願年月日：2016 年 10 月 6 日  
国内外の別：国外

名称：電磁波検出素子及び固体撮像装置  
発明者：川人祥二、安富啓太、三浦規之、葛西大樹、沖原将生  
権利者：静岡大、ラピスセミコンダクタ(株)  
種類：特許  
番号：特願 2014-127700  
出願年月日：2014 年 6 月 20 日  
国内外の別：国内

取得状況 (計 4 件)

名称：半導体装置の製造方法  
発明者：新井康夫、葛西大樹、沖原将生

権利者：高エネ研、ラピスセミコンダクタ(株)  
種類：特許  
番号：特許第 6202515 号  
取得年月日：2017 年 9 月 8 日  
国内外の別： 国内

名称：半導体装置およびその製造方法  
発明者：新井康夫、葛西大樹  
権利者：高エネ研、ラピスセミコンダクタ(株)  
種類：特許  
番号：特許第 6108451  
取得年月日：2017 年 3 月 17 日  
国内外の別： 国内

名称：半導体装置及半導体装置の製造方法  
発明者：新井康夫、葛西大樹、沖原将生  
権利者：高エネ研、ラピスセミコンダクタ(株)  
種類：特許  
番号：中国 No.2015062900081170  
取得年月日：2015 年 10 月 14 日  
国内外の別： 国外

名称：SEMICONDUCTOR DEVICE AND METHOD FOR  
MANUFACTURING SEMICONDUCTOR DEVICE  
発明者：Yasuo Arai, Masao Okihara, Hiroki  
Kasai  
権利者：高エネ研、ラピスセミコンダクタ(株)  
種類：特許  
番号：US 8,963,246 B2  
取得年月日：2015 年 2 月 24 日  
国内外の別： 国外

〔その他〕

領域ホームページ、<http://soipix.jp/>  
SOI 検出器ホームページ、  
<http://rd.kek.jp/project/soi/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

新井 康夫 (ARAI, YASUO)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・教授  
研究者番号： 90167990

### (2) 研究分担者

幅 淳二 (HABA, Jyunji)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・教授  
研究者番号： 60180923

三好 敏喜 (MIYOSHI, Toshinobu)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・講師  
研究者番号： 20470015

### (3) 連携研究者

坪山 透 (TSUBOYAMA, Toru)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・講師

研究者番号： 80188622

川人 祥二 (KAWAHITO, Shoji)  
静岡大学・電子工学研究所・教授  
研究者番号： 40204763

鶴 剛 (TSURU, Takeshi)  
京都大学・理学研究科・教授  
研究者番号： 10243007

栗津 邦男 (AWADU, Kunio)  
大阪大学・工学研究科・教授  
研究者番号： 30324817

岸本 俊二 (KISHIMOTO, Shunji)  
高エネルギー加速器研究機構・物質構造  
科学研究所・教授  
研究者番号： 00195231

和田 武彦 (WADA, Takehiko)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・  
助教  
研究者番号： 50312202

初井 宇記 (HATSUI, Takaki)  
理化学研究所・放射光科学総合研究  
センター・チームリーダー  
研究者番号： 40332176