

領域略称名：量子イメージング
領域番号：2508

平成30年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「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」

(領域設定期間)

平成25年度～平成29年度

平成30年6月

領域代表者 (高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・
教授・新井 康夫)

目 次

| | |
|--|----|
| 1. 研究領域の目的及び概要 | 4 |
| 2. 研究領域の設定目的の達成度 | 6 |
| 3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況 | 9 |
| 4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況 | 10 |
| 5. 主な研究成果（発明及び特許を含む） | 12 |
| 6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等） | 15 |
| 7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況 | 20 |
| 8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む） | 22 |
| 9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度 | 26 |
| 10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況 | 27 |
| 11. 総括班評価者による評価 | 28 |

研究組織 (総：総括班, 支：国際活動支援班, 計：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究, 公：公募研究)

| 研究項目 | 課題番号 研究課題名 | 研究期間 | 代表者氏名 | 所属機関 部局・職 | 構成員数 |
|-----------------|---|-----------------------|-------|----------------------------|------|
| X00 総 | 25109001 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 | 平成25年度 ～ 平成29年度 | 新井 康夫 | 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授 | 10 |
| A01 計 | 25109002 SOI 3次元ピクセルプロセスの研究 | 平成25年度 ～ 平成29年度 | 新井 康夫 | 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授 | 4 |
| A02 計 | 25109003 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 | 平成25年度 ～ 平成29年度 | 川人 祥二 | 静岡大学・電子工学研究所・教授 | 4 |
| B01 計 | 25109004 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 | 平成25年度 ～ 平成29年度 | 鶴 剛 | 京都大学大学院・理学研究科・教授 | 6 |
| B02 計 | 25109005 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 | 平成25年度 ～ 平成29年度 | 和田 武彦 | 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教 | 6 |
| C01 計 | 25109006 高輝度加速器実験のための素粒子イメージング | 平成25年度 ～ 平成29年度 | 坪山 透 | 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師 | 8 |
| C02 計 | 25109007 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 | 平成25年度 ～ 平成29年度 | 初井 宇記 | 理化学研究所・データ処理系開発チーム・チームリーダー | 5 |
| D01 計 | 25109008 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 | 平成25年度 ～ 平成29年度 | 岸本 俊二 | 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授 | 5 |
| D02 計 | 25109009 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 | 平成25年度 ～ 平成29年度 | 粟津 邦男 | 大阪大学・工学研究科・教授 | 5 |
| 統括・支援・計画研究 計 9件 | | | | | |
| A01-I 公 | 26109502 PSS-SOI 高分解能検出器の開発および応用 | 平成26年度 ～ 平成27年度 | 島添 健次 | 東京大学・工学系研究科・助教 | 2 |
| A01-II 公 | 26109505 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 | 平成26年度 ～ 平成27年度 | 小野 篤史 | 静岡大学・電子工学研究所・准教授 | 1 |

| | | | | | |
|--------------|---|---------------------------|--------|------------------------|---|
| A02-I 公 | 26109504 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 | 平成 26 年度 ～ 平成 27 年度 | 佐々木 俊彦 | 金沢大学・人間科学系・教授 | 1 |
| A02-II 公 | 26109508 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 | 平成 26 年度 ～ 平成 27 年度 | 石野 宏和 | 岡山大学・自然科学研究科・准教授 | 2 |
| B01-I 公 | 26109506 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 | 平成 26 年度 ～ 平成 27 年度 | 林田 清 | 大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授 | 2 |
| B01-II 公 | 26109503 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 | 平成 26 年度 ～ 平成 27 年度 | 平賀 純子 | 関西学院・理工学部・准教授 | 1 |
| C02-I 公 | 26109501 SOI 技術を用いたイメージセンサの重粒子線への応用 | 平成 26 年度 ～ 平成 27 年度 | 松村 彰彦 | 群馬大学・重粒子線医学推進機構・助教 | 6 |
| A01-III 公 | 16H00944 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 | 平成 28 年度 ～ 平成 29 年度 | 島添 健次 | 東京大学・工学系研究科・助教 | 3 |
| A01-IV 公 | 16H00947 ワイドレンジプラズモンフィルタ実装 SOIPI X センサによる可視近赤外イメージング | 平成 28 年度 ～ 平成 29 年度 | 小野 篤史 | 静岡大学・電子工学研究所・准教授 | 1 |
| A02-III 公 | 16H00946 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 | 平成 28 年度 ～ 平成 29 年度 | 佐々木 敏彦 | 金沢大学・人間科学系・教授 | 3 |
| A02-IV 公 | 16H00950 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 | 平成 28 年度 ～ 平成 29 年度 | 石野 宏和 | 岡山大学・自然科学研究科・准教授 | 2 |
| A02-V 公 | 16H00948 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 | 平成 28 年度 ～ 平成 29 年度 | 志村 考功 | 大阪大学大学院・工学研究科・准教授 | 3 |
| B01-III 公 | 16H00949 光子計数ピクセル検出器で実現する G 2 格子不要の X 線タルボ干渉計 | 平成 28 年度 ～ 平成 29 年度 | 林田 清 | 大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授 | 2 |
| B01-IV 公 | 16H00945 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 | 平成 28 年度 ～ 平成 29 年度 | 小貫 良行 | 東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教 | 1 |
| 公募研究 計 14 件 | | | | | |

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

研究領域の目的

目に見えない 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、2次元、3次元、さらに時間軸を加えた4次元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、ノイズを極小として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、原理的に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、荷電粒子の種別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。しかし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本質的に優れた量子イメージングデバイスの開発が求められている。

このような要求に対し、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 Silicon-On-Insulator (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革新的な放射線イメージング検出器(図 1 左)の開発に成功し、実用センサとしての技術の成熟を図ろうとしている。この SOI ピクセル検出器は、究極の量子イメージングを実現する上で理想的な構造を有している。つまり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、SOI の 2 つの Si 活性層をセンサと処理回路として独立に最適化し、裏面照射により理想的な量子効率を実現できる。また2つの活性層のいずれにも能動素子を形成することができ、この 2 重活性層を利用することで、単一量子の検出と極低ノイズでの量子エネルギー計測を同時に行うデバイスなど、CCD 等の従来型デバイスでは実現できない、量子イメージングにとって理想的な新機能を SOI 検出器は実現できる将来性を持つ。

このような新奇 SOI ピクセル検出器の物理的特性と最適構造の探求について、学術的な興味をもつ半導体デバイス研究者と、新たなイメージング測定を求めていた多分野の先端計測研究者が集まり、全く新しい形の研究開発集団として本領域研究を提案する事となった。本領域研究によって、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。

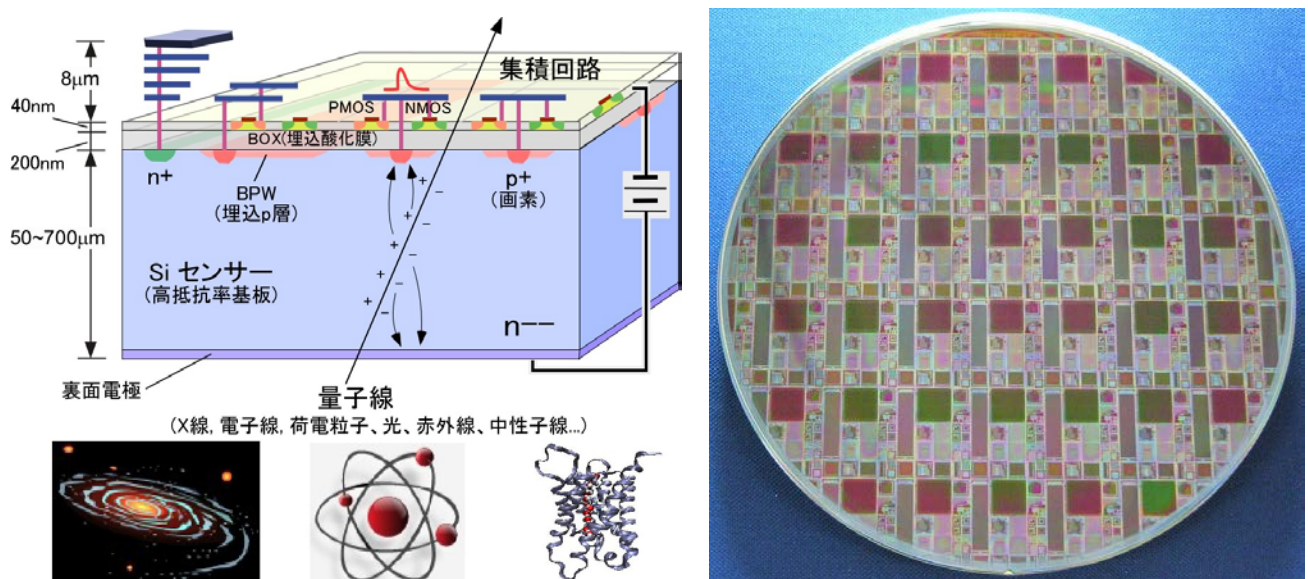


図 1. (左) SOI ピクセル検出器の概念図。放射線により下部センサで発生した電荷は電場により電極に集められ、絶縁層上の集積回路により処理される。これにより宇宙から生命までのさまざま分野で使える検出器を開発し、新たな研究領域を拓く。(右) KEK で行った様々なチップを載せた SOI Multi Project Wafer (MPW) ランのウエハー (8 インチ)。各区分に様々な設計のチップが載っている。

研究領域の概要

本計画では、SOI ピクセル検出器を通じて量子イメージング原理を革新し、素核・宇宙・物質・生命科学の新たな領域を開拓することを目指す。また、多分野の研究者が協力する事により新たな学術領域を創出し、期間内に各計画研究で日本独創の革新的機能を持つ SOI ピクセル検出器を完成させる(図 2)。計画研究を4つの大きなグループに分け、それぞれ以下のような役割を果たす。

コア技術グループ・A01 プロセスと A02 デバイス班は協力して、SOI による量子イメージングへの新しいデバイス構造を創造し、最適化及び極限性能を追求する。B～D の各班と連携、融合的研究を展開し、新機能 SOI ピクセル検出器を開発する。

宇宙グループ・X 線班(B01)は、低ノイズで精密分光の行える X 線カメラを完成する。トリガー信号出力と高速読み出しを可能とし、X 線 CCD では不可能な超低バックグラウンドを実現し、宇宙最初期ブラックホール探査研究を行う。赤外線班(B02)は、SOI のヘリウム温度動作を活かし、熱励起暗電流雑音を極限まで減らした、光赤外線イメージセンサを実現する。期間内に気球実験を行い、ダストに隠された宇宙の物質進化を暴く。両班は協力して、衛星搭載品の実用化を行う。

先端加速器グループ・素粒子班(C01)は、ピクセル毎に高度なデータ処理回路を持つ高機能検出器を完成する。次世代素核実験の標準検出器を確立し、ヒッグス粒子などを通じて標準理論の枠組みの研究を行う。XFEL 班(C02)は、1 光子計測と大信号計測を両立させ、X 線自由電子レーザー (XFEL) 実験に投入し、検出器に制約されない実験を可能にする。両班は協力し高輝度放射線下で高性能動作する検出器を開発する。

生体・物質構造グループ・放射光班 (D01) では、遷移金属酸化物、有機強誘電体などの電子状態や局所構造の外場応答・時間依存性を測定するため、現在の CCD 検出器の 10 倍以上の速度で時間分割分光/回折測定が行える、高精細・高速読み出し可能な X 線イメージングデバイスを開発する。分子イメージング班 (D02) は、投影型イメージング質量分析に必要なイオンの位置と飛行時間の同時測定を実現し、空間分解能 1 μm での測定を可能にする。1 画像取得を、従来必要だった数十時間スキャンから数分で取得できるようにし、測定の劇的な質的変化をもたらす。

本領域は上記のように、半導体デバイスを専門とする A 班と、高度な計測システムを実現する B,C,D 班がお互いの領域に深く入り込み、一体となって今までにないものを生み出す。この点に連携の最重要ポイントがあり、また本領域の要となる。総括班はこの実現の為、強力なリーダーシップのもと、相互レビュー、共同研究コーディネータの設置、融合研究体制の構築、評価手法の融合等を実行していく。

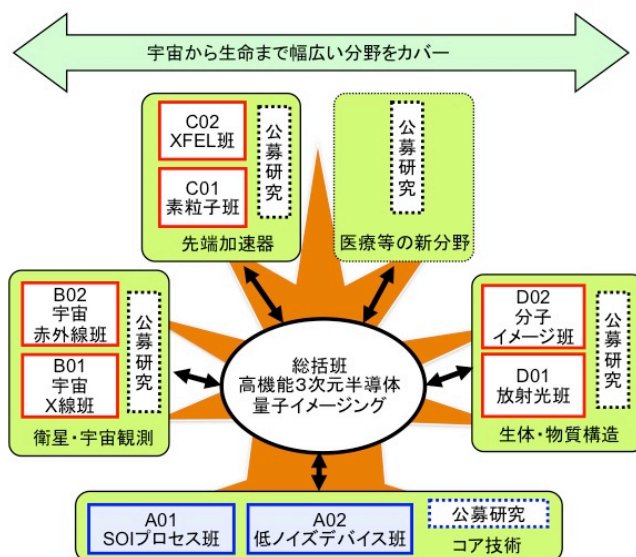


図 2. (左)本領域の研究戦略。SOI 検出器をコアに、プロセス・デバイス・放射線耐性等の様々な面の研究を行い、新たな量子イメージング手法を確立。宇宙・素粒子・物質・生命等のさまざまな分野において、新たな領域を切開く。(右)SOI ピクセル検出器技術をコアに、様々な分野の研究者が協力して、新たな量子イメージング分野を切開く。

2. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

本領域では、3次元積層半導体技術を用いて、量子センサと高集積回路とを一体化した検出器を、様々な分野の研究者が連携し設計・製作・試験を行い、新たなサイエンスを切り拓くことを目的とした。下記のような成果を上げることが出来、領域としては当初の目標はほぼ達成出来たと考える。

- ・半導体放射線検出器による高エネルギー荷電粒子の飛跡位置測定において、世界で初めて $1\ \mu\text{m}$ を切る精度を達成した。
- ・シリコン薄膜層を追加した Double SOI ウェハ技術の開発により、クロストークを 20 分の 1 に減少させ、放射線耐性を従来よりも 100 倍以上向上させた。
- ・新たな Pinned Depleted Diode (PDD) 構造を創出し、リーク電流を 100 分の 1 以下に減少し、電荷収集効率を 100% 近くに向上させた。
- ・高ダイナミックレンジ・高精細・大面積の SOPHIAS 検出器によるカメラシステムを完成させ、XFEL SACLA、SPring-8 等の様々な実験で実用化した。
- ・センサ構造、回路の改良により XRPIX 検出器のノイズレベルを 8 電子まで減少させ、216eV (3.4%) FWHM @ 6.4 keV のエネルギー分解能を達成した。またイベント駆動型読み出しを実証し、次期 X 線衛星 FORCE への検出器候補として認められた。

以下に各研究班の達成度状況を記す。

A01: SOI 3次元ピクセルプロセスの研究

本研究班では、基本となる SOI ウェハ・プロセスの改良・開発を行い、同時に各研究班の為の相乗りプロセス (Multi Project Wafer : MPW) を主導した。

MPW ランは 2013 年度から 2016 年度まで毎年 1 回行い、最終年度は 2 回の MPW ランを行った。ラン毎に、プロセス改良を重ね、放射線耐性を従来の 1 k Gy(Si) から 100 k Gy(Si) まで向上させ、構造の工夫で集積度を 2 倍に向上させる等の成果をあげた。

各研究班からは、毎回 20 件程度の設計が集まり、後半では大面積検出器も搭載した (図 3)。またチップの厚さも用途に応じて $75\ \mu\text{m}$ から $500\ \mu\text{m}$ までのものまで各種製作できるようになった。さらに独自開発した SOI 層を 2 重にした Double SOI ウェハの実用化も行った。また非常に急峻な立ち上がり特性を持った Super Steep Transistor が開発され、究極の低消費電力デバイスとして期待されている。これらの研究成果により、初期の目標を十分達成できたとと言える。

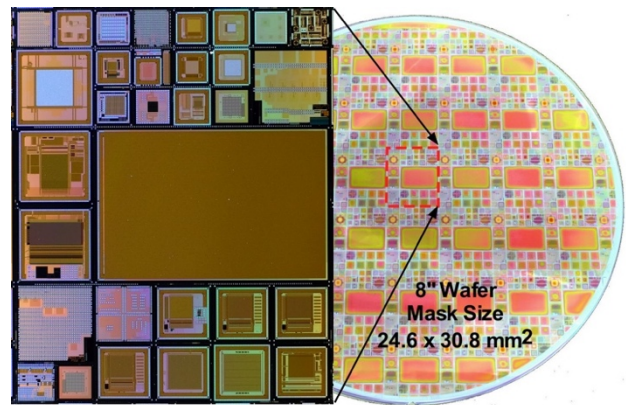


図 3. 大面積チップ及び多くの試験チップを載せた MPW ラン。

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

本研究班では SOI ピクセル検出器を B, C, D 班の各サイエンス分野に応用し、その計測性能を格段に向上させるため回路・デバイスの要素技術開発を目標とした。

特に新たに考案した Pinned Depleted Diode (PDD) 構造 (図 4) により、バックゲート電位を固定化させながら、基板全体を空乏化して電荷検出部にキャリアを高速に導く電界を形成することができるようになった。絶縁層 (BOX) 下のセンサ部は中性化することによりリーク電流の発生が従来の 100 分の 1 以下に抑えられ、電荷検出部縮小化による低容量化により、従来のものより 6 倍以上変換利得の高い $187\ \mu\text{V/e}$ を達成した。この結果、回路の工夫と合わせ、ノイズレベルを従来の 60 電子程度から 8 電子以下にまで削減させた。

これらの成果は、B, C, D 班の検出器の開発に活かすことが出来たと同時に、海外の研究者からの注目も受け、十分当初目標を達成したと言える。

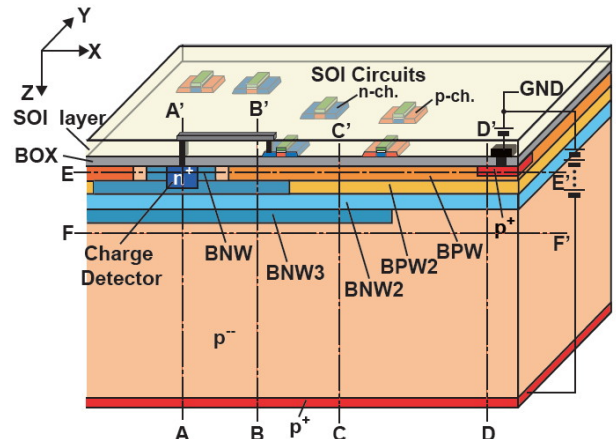


図 4. SOI-PDD 構造図の概観。センサ部への多層の埋め込み層により、発生電荷を電荷検出部に誘導すると同時に、リーク発生源である酸化膜との界面は中性化しリーク電流を抑えた。

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

本研究では X 線エネルギーの高分解能測定、裏面薄膜処理開発による低エネルギー X 線検出、ヒットトリガー信号を使った荷電粒子バックグラウンド低減方式の研究、敷詰型の検出器開発等を行う事を目的とした。

最初は、小さな素子(2.4mm 角-6.0mm 角)の製作からスタートしたが、早期に当初目標のイベント駆動撮像分光に成功し、最終的に図 5 に示す XRPIX7(15.3 x 24.6 mm²)を設計・製作した。このチップは 36 μm 角のピクセルを約 23.3 万画素持ち、X 線がヒットすると直ちにトリガー信号を出し、ヒットしたピクセルの周り 8x8 画素を高速に読み出すことが出来る。この素子は、このままレイアウトを水平方向に反転し 2 倍のサイズとすることで、次期 X 線天文衛星 FORCE に搭載することが出来る。PDD 型ピクセル構造を持つ他の試験素子において、約 1 μs の時間分解能と 216eV(3.4%)FWHM@6.4 keV の分光能力の両立を達成した。イベント駆動シリコンピクセル検出器で、この分光能力を発揮する検出器は他に存在せず、世界一と言える。本研究の成果を受け、XRPIX を主観測装置とする X 線天文衛星 FORCE が宇宙科学研究所のワーキング・グループとして認められ、また学術会議の大型研究計画にも選定された。またこの検出器を用いた公募研究も進み、新たに 6 つのサイエンス領域を切り拓いた。十分当初目標を達成したと言える。



図 5. これまでで最大の面積を持つイベント駆動型 X 線ピクセル検出器 XRPIX7. 36 μm 角ピクセル、23.3 万画素(15.3 x 24.6mm² 角)。

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

本研究では、極低温動作する CMOS SOI 読みだし集積回路(ROIC)を開発し、光赤外線検出器と組み合わせることで、高画素 遠赤外線イメージセンサを実現することを目的とした (図 6)。

ROIC 用のパルスチューブ冷凍機式クライオスタットを開発し、ROIC の設計・評価や側面入射型検出器の開発を進めた。そして、2x5, 5x5, 9x9, そして 32 x 32 素子の読み出し集積回路を開発した。

検出器に関しては、ブロッキング層を薄層化した側面入射素子の開発に成功した。薄層化し効率よく光吸収層に電場が印加されるようにした結果、キャビティー無しで 1.5A/W と高い光電流変換効率を達成した。

シリコン基板支持型ゲルマニウムセンサは、検出器への不純物ドーピング濃度を最適化することで、目標の波長 200 ミクロンでの感度向上に成功した。Ge と Si の熱膨張係数の違いによる冷却時の破損を回避するため、シリコン保持基板の貼り付け技術も開発した。これらにより、ほぼ要素技術の開発は終了したと言える。

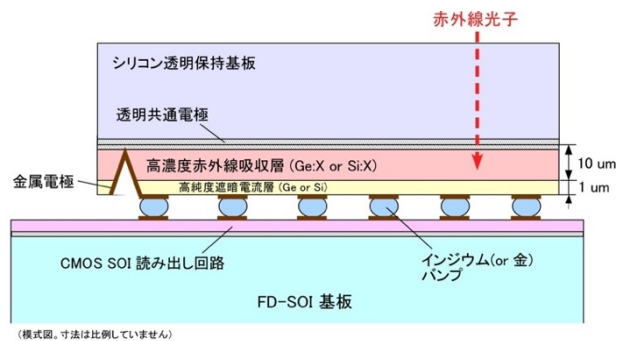


図 6. Hybrid 型赤外線イメージセンサー断面図。SOI の極低温動作による読み出し回路と、高濃度赤外線吸収層等を積層することで、高画素・遠赤外線検出器の開発を行った。

C01: 高輝度加速器実験のための素粒子イメージング

本研究では、高エネルギービームの衝突実験で発生した、荷電粒子の崩壊点位置を高精度に測定する二次元飛跡検出器を実現することを目指した。この目的の為、8 μm 角というこれまでで最小面積を持つ SOI 検出器 FPIX(Fine Pixel)と、画素内に多数のメモリを持った International Linear Collider(ILC)実験用 SOFIST (SOI sensor for fine measurement of space and time) 検出器を開発した。

ビーム実験の結果、FPIX により世界で初めて 1 μm を切る位置分解能 0.7 μm を達成した(プレス・リリース)。また SOFIST においても、電荷量と時間の測定がほぼ仕様通り出来る事を確認し、ILC 実験用崩壊点検出器として世界をリードすることが出来、十分当初目的を達成できた。

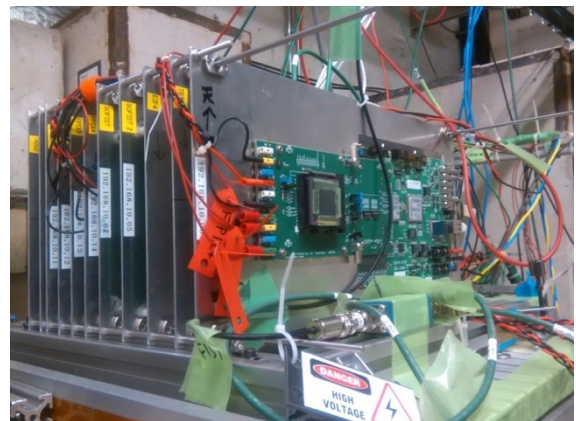


図 7. Fermilab での SOI 検出器ビーム実験の様子。FPIX, SOFIST 等の検出器を重ねて配置し、120 GeV 陽子を照射することにより、通過位置の測定を行った。

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

本研究ではXFEL用検出器 SOPHIAS(図 8)を完成させ、カメラシステムとして実用化し、XFEL 実験に投入する事を目的とした。実際に XFEL ビームにより動作が確認されると同時に、SPring-8等の複数実験に導入され使用された。大面積(66 mm x 30 mm)の SOPHIAS を製造するためには、パターンを重ねながら露光する Stitching という技術を開発しなければならなかったが、企業側の協力もあり、様々な課題を解決し実現することが出来た。この経験は後に大チップ開発に取り組む他計画班にも参考となる。

この検出器は、諸外国で開発されている検出器の目標性能と比較しても極めて大きなダイナミクスレンジを持ち、世界最高レベルの性能を実現できており、当初目的を達成した。

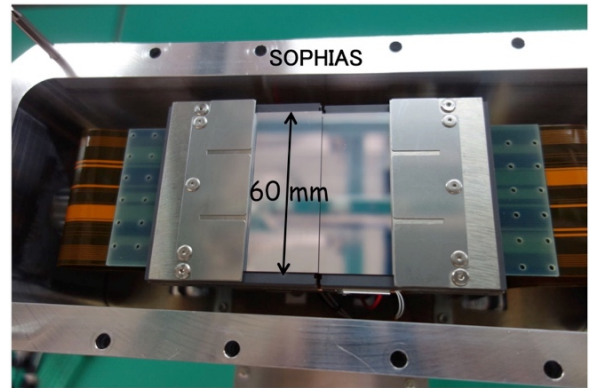


図 8. SOPHIAS センサを2枚並べたカメラシステム。

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

本研究では、放射光 X 線を用いた機能性物質構造の外場応答とダイナミクスの研究を行う為の SOI 検出器の開発を目的とした。

微細画素のパルス計数型 SOI センサ開発のため、通常分離して配置される NMOS と PMOS トランジスタを合体させる Active Merge 技術を開発し、六角形の画素サイズ $2,340 \mu\text{m}^2$ というこのクラスでは世界最小画素を持ったセンサ(CNPIX)を開発した。CNPIX と同様の機能を持った試験チップ CPIXPTEG2 を KEK 放射光において試験している様子を図 9 に示す。

これにより CNPIX の開発に目処を付けることが出来、当初目的をほぼ達成した。

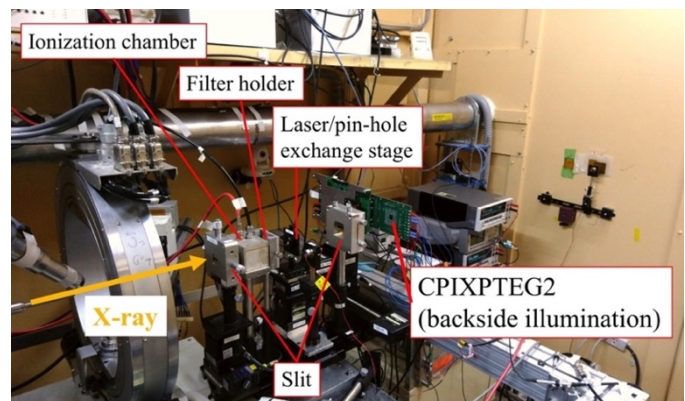


図 9. CPIXPTEG2 チップの X 線ビームによる試験

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

イオンの到達位置と飛行時間を同時かつ高頻度に測定できる SOI 検出器(MALPIX)を開発し、投影型イメージング質量分析装置に搭載することで、生体組織切片や細胞内における脂質、タンパク質などの生体分子や薬剤分子などの高スループットイメージングを実現することを目的とした。図 10 のように micro-channel plate(MCP)にイオンが入射することで MCP から放出される電子群を MALPIX 表面の電極パッドで受ける構造とし、閾値を超えた時点の時刻をピクセル内メモリに記録する。試作・評価を繰り返し、最終年度には $13.75 \times 15.3 \text{ mm}^2$ の大面積センサ MALPIX8 を製作し、評価した。繰り返し 1 kHz での測定、単一イオンを検出可能な感度を有すること、目標時間分解能 1 ns での基本動作を確認し、実用化に向けた準備をほぼ終えた。

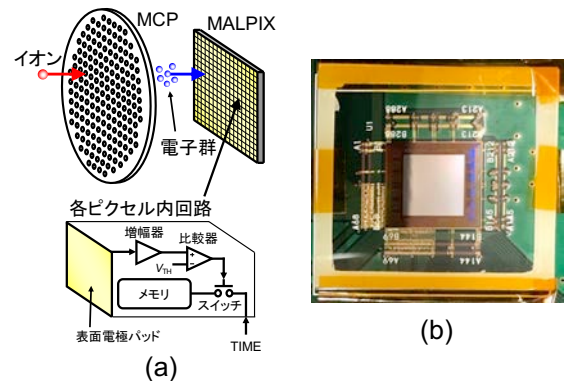


図 10. (a) MALPIX の概略図、および (b) 最終年度に製作した MALPIX8 の写真。

公募研究:

医学応用から産業応用、さらには宇宙・素粒子実験まで、当初の目論見通り多様な研究を取り入れることが出来た。

例えば A01-III 班では A01, B01 との連携により、ガンマ線反跳飛跡の非同期撮像の原理検証に成功した(図 11)。計画研究班と連携することで、公募研究でも研究を大きく進める事が出来た。

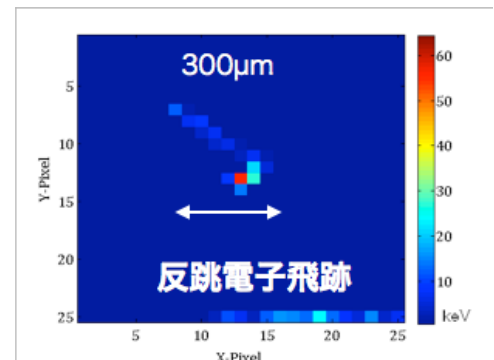


図 11. ガンマ線のコンプトン散乱による反跳電子の飛跡。

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

問題点1 SOI ウェハ入手問題

SOI 検出器に使用するウェハは、下部に高純度のシリコンを貼り付けた特殊なものを使用する必要がある。通常の SOI ウェハは Czochralski (Cz) 法により作成されたウェハを貼り付けているが、放射線センサとするには Floating Zone (FZ) 法による高純度ウェハが必要となる。そもそも高純度の 8 インチ FZ ウェハは流通量が少ない為、半導体商社に常に連絡を取り、良いウェハが流通した際にすぐに入手しておく必要がある。

次に、入手した FZ ウェハを SOI ウェハに加工する必要があるが、市場の中心が 10、12 インチウェハになっており、8 インチの製造ラインが限られるため、半導体市場が好景気の際は、ラインが一杯となり納期が 1 年以上となる事もある。

問題点1 に対する対策

我々が使用するウェハ枚数は数が少なく、企業からは優先度を下げられてしまうことがあるので、常に先を見越してウェハ手配を行った。幸い企業の協力もあり、本研究で行った MPW ランに対しては必要なウェハ枚数をなんとか確保することが出来た。今後は購入枚数を増やし交渉力が強まるよう、連携の輪をさらに広げると共に、産学連携の取り組みを強化する事が重要であると考えている。

問題点2 ウェハの反り問題

2017 年の初期に MPW ランに投入したウェハに関し、ウェハが反るという問題が発生した。ウェハを搬送する際、真空吸着を行うが、この際ウェハの反りが 200 μm 以上あると吸着出来なくなる。それまでに投入した MPW ランにおいても、反りがやや大きい傾向が見られていたが、それほど大きな問題とはなっていなかった。

問題点2 に対する対策

反りが増加した原因は特定されていないが、プロセスとして反り量が大きくなるないように層間膜の種類を変更して反り量の変化を実験した(図 12)。

その結果、層間膜の材質を変更し配線プロセスの各段階でストレスを小さくすることで反り量をこれまでのプロセスより 50 μm 以上削減することが出来た。これにより制限値の 200 μm を十分下回り、余裕を持たせる事が出来るようになったので、以降はこの改良プロセスを使用することとした。

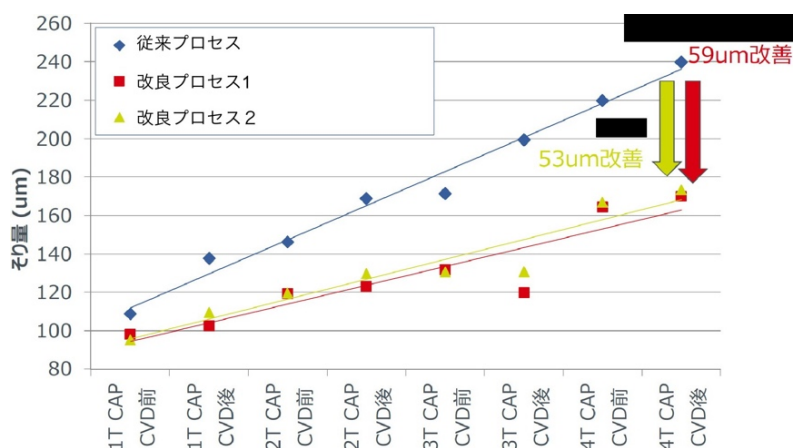


図 12. ウェハ反り改良プロセスの結果。層間膜のストレスを少なくすることで反りを 50 μm 以上減少させることが出来た。

4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

<審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

審査結果の所見における指摘は以下の通りであった。

「本研究領域は...、素核・宇宙・物質・生命科学のフロンティアへの展開を目指すユニークな提案であり、重要な要素技術として領域を設定して推進するに値する。一方で、**(1) 開発のための開発とならないよう領域としての目標をより明確にすべきと思われる。**...公募研究の採択予定件数が少ないため、共用設備の利用等により、1 件当たりの上限額を小さくするなど、**(2) より多くの公募研究を採択できるようにすべきである。**」

指摘を受けた2点に対し、下記のような対応を行った。

(1) 各計画研究及び公募研究はそれぞれ明確な学術目的を持って開発をスタートしており、技術開発班とサイエンス研究班とは頻りに交流を行い、両者の開発ベクトルは一致させる事が十分出来たと考える。3ヶ月毎の総括班会議では、全体議論を行い、常に領域研究として目指す方向を確認した。また、年に2回各地で研究会(図 13)を開催し、2日間にわたりポスターセッションを含め、様々な講演を行い、研究者・学生の交流を深めた。これにより、領域として共通の目標を明確に持ち一致団結して研究を進めることが出来た。

(2) 当初計画では5件の公募研究を予定していたが、多くの応募があった事と指摘を受けた点を考慮し、H25年、H27年公募とも7件の公募研究を採択した。



図 13. 2017年6月宮崎大学での研究会。多くの若手研究者が育った。

<中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況>

多くの所見をいただきましたが、主な指摘事項に対する対応状況を以下に記します。

* アウトリーチ：「... 検出器ユーザーの裾野を拓げるようなアウトリーチ活動とともに、各分野のサイエンスへの展開が望まれる。」

研究会に外部の研究者を呼ぶと同時に、学会・展示会等でも多くの発表を行った。この結果、公募研究以外の独自プロジェクトも多くスタートした（電子顕微鏡用検出器、高精度中性子検出器、超電導検出器用読み出し回路等）。また様々な学会・団体からの講演依頼も多くいただき、2017年度だけで領域代表は10件以上の招待講演を行った。

* サイエンスの展開：「開発した検出器による各分野のサイエンスへの展開が強く望まれる。一方、需要が限られていることから、コスト高になる学術研究用の検出器作製のための半導体プロセスについて、将来的な継続性のための方策が必要である。」

上に述べたように、計画研究・公募研究に採択された研究以外にも徐々に様々なサイエンスへの展開は進んでいる。半導体プロセスの継続のためには需要を増大させる事が必要だが、サイエンスへの展開だけでは大きな需要を作り出すことはなかなか難しい。この為、計測関係の企業への働きかけも行って来た。まだ、

大きな流れはできていないが、一部では企業との共同研究もスタートした。今後も半導体検出器の開発を継続するために、量子検出器の学会や企業とのコンソーシアム設立等の準備も行っている。

*** 若手人材の育成：「設計・作製に関わる若手人材の育成を含めて進めてほしい。」**

毎年、設計及び試験方法の講習会を開催し若手人材を育ててきた。講習会を通じて知り合った学生は、ネットを通じて情報交換を行なうようになった。また、MPW ランの余った領域を使って、学生等にも実際に設計を行わせた結果、検出器・回路の設計に興味を持つ人材が増えた。この結果、図 13 の写真からもわかるように、多くの若手が育った。

しかしながら、研究者として安定した職を得ることは依然として難しく、基礎学問における検出器開発の重要性をもっと強く主張していく必要があると感じている。一方これまでの経験から、設計技術を習得した研究者は、企業にとっても貴重な人材となりうるので、産業界への就職の道は比較的開けていると思われる。

*** 国民への説明：全体的に報告書に難解な表現が多い。... 国民への説明の観点からも、非専門家であっても内容が把握できるよう留意されたい。**

2015年の仙台での国際会議の際は、「宇宙と素粒子の謎を解き明かす最先端の3次元半導体検出器」と題して3人の後援者による一般向け講演会を行い、高校生からお年寄りまで多くの方にお集まりいただく事が出来た(図 14)。

また、企業からの関心も高くは、これまでに、(株)アドバンテスト、(株)IHI、(株)テクノセンター、(株)ラピス・セミコンダクタ、(株)リガク、(株)テクノエクス、(株)ジョブス、(株)島津製作所、社団法人・半導体商社協会等においてセミナーを行なった。また、企業向けの専門誌「Yano Eplus」においても紹介された。

この他、幕張・お台場・つくば等で開催される計測機器関連の展示会には積極的に出展し、多くの参加者から問い合わせをいただいた。

SOI検出器で $1\mu\text{m}$ を切る世界最高の位置分解能を示し、国際会議で発表した際は、プレスリリースも行い、マスコミにも取り上げていただくことが出来た。引き続き終了領域研究で、これまでの成果をわかりやすく発信することに努めている。

一般講演会
宇宙と素粒子の謎を解き明かす
最先端の3次元半導体検出器

開催日時
2015年6月6日
13:30-16:00 (開場13:00)

会場
エルパーク仙台 6階
ギャラリーホール
(仙台市青葉区一番町4-11-1 仙台三越定禅寺通り店)

webページ
<http://epx.phys.tohoku.ac.jp/soipix2015/>

お問い合わせ先: 022-795-5730 (量子実験グループ 石川)

主催
東北大学大学院理学研究科物理学専攻 素粒子実験グループ
東北大学 工学部 量子情報工学専攻 量子情報工学グループ

後援
文部科学省科学研究補助金「量子情報科学研究」
「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」

講演者
山本 均 教授 (東北大学)
新井 康夫 教授 (東北大学)
齋 剛 教授 (京大)

図 14. 2015 年 6 月仙台での一般向け講演会ポスタ。

5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、**本研究課題により得られたものに厳に限ること**とします。

[計画研究]

A01: SOI 3次元ピクセルプロセスの研究

SOI 層を2重にした Double SOI ウエハー(図 16)を独自に開発し、放射線耐性の向上やクロストークの削減に効果が得られた。放射線照射試験では、中間 Si 層に適切なバイアスをかけることで 100kGy(Si)の照射後でも、照射前とほぼ同様に動作することが確認された(図 15)。また、中間 Si 層に高電圧をかける事で、酸化膜中にトラップされたホールを抜く研究も行った。クロストークに関しても中間 Si 層を入れる事で、Single SOI に比べてクロストーク量が 20 分の1程度まで減少することが確認された。Double SOI に関しては特許を取得した。

また、わずかなゲート電圧により電流値が大幅に変化する究極の低消費電力トランジスタ Super Steep Transistor も SOI を使って開発され、IOT 等への幅広い応用が期待されている。

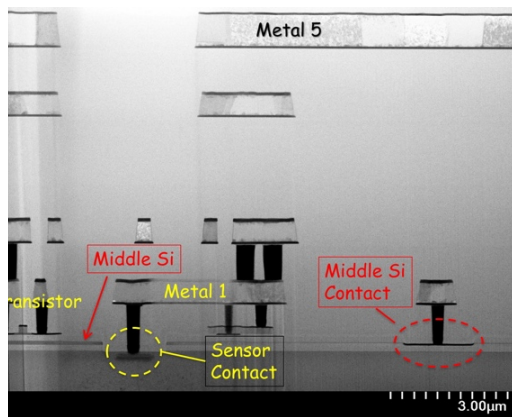


図 16. Double SOI ウエハの断面構造。
(特許取得)

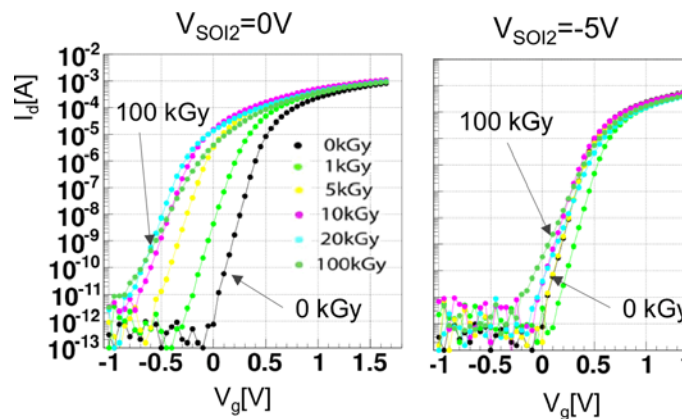


図 15. トランジスタの I_d - V_g 特性の放射線照射量による変化。
(左) 中間 Si 層を 0V のままにした場合。(右) 中間 Si 層に -5V を印加した場合。100 kGy 照射後でも、ほぼ照射前の特性を維持する事が出来た。

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

新たな電極構造 Pinned Depleted Diode(PDD)(図 4)を導入することにより、図 17 のような電場構造をピクセル領域に作る事が出来、電荷収集効率と変換ゲインを向上させる事が出来た。またセンサ部シリコンと酸化膜(BOX)の界面を中性化する事で、リーク電流も 2 ケタ減少させる事が出来た。

これに加え、多くの研究班と共同でセンサ開発を行い、その過程で、3 件の特許を出願した。

1. 半導体装置及び固体撮像装置, 川人祥二, 安富啓太, 三浦規之, 葛西大樹, 沖原将生, 特願 2018-053429, 出願日 2018 年 3 月 20 日
2. 電磁波検出素子及び固体撮像装置, 川人祥二, 安富啓太, 亀濱博紀, 特願 2014-127700, 出願日 2014 年 6 月 20 日
3. 「デジタル回路及び A/D(Analog/Digital)変換回路並びにデジタル信号処理方法」、池辺将之 渡辺佳織、特願 2015-093073、2015 年 4 月 30 日

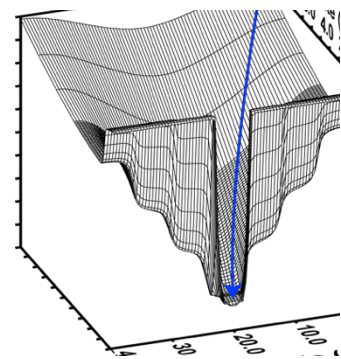


図 17. PDD 構造を持ったピクセルの電場構造。空乏層内で発生した電子は全て小さな電荷検出部に集まる。

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

宇宙最初期に誕生する超巨大ブラックホール「ファーストブラックホール」を探査・研究し、銀河も含めた形成と進化を読み解くことが本研究の科学的最終目標である。このため、広帯域、精密撮像、精密分光とともに、反同時計測による低バックグラウンド性能が必要であり、マイクロ秒の時間分解能を持つ X 線 SOIPIX 検出器 XRPIX の開発を行った。A01,A02, C01 班との協力のもと、回路レイアウトの配置による電荷収集効率の改善、埋め込み P 層の小面積化および電荷有感型アンプの導入によるゲイン向上、差動増幅器の導入によるフロントエ

ンド回路の簡素化等を行った。開発の最大の難関であったイベント駆動時の分光性能劣化の原因が、回路層のデジタル回路動作によるセンサ層への干渉であることを突き止め、A01、A02 と協力し、Double SOI および PDD を導入することで解決に成功した。また、衛星搭載に必要な放射線耐性を持つことも確認した。最終的に、必要な 40keV までの広帯域性能とイベント駆動可能な 23.3 万画素の大型素子と、イベント駆動による 6.4keV X 線に対するエネルギー分解能 216eV (FWHM)を実現した(図 18)。この結果、ブラックホールの探索計画として、XRPIX を主検出器とする次世代の広帯域 X 線精密撮像分光天文衛星 FORCE への提案が認められた。

スパースな量子を検出する高時間分解能の精密撮像分光器として理想的な性能を持つ XRPIX の開発成功により、次のような新たな基礎物理学分野の創出にも繋がった；アクシオン探索、低質量暗黒物質探索、宇宙 X 線タルボ干渉計観測、弱い等価原理(重力質量と慣性質量の等価)検証。さらに宇宙観測ンガンマ線カメラの研究開発が始まり、X 線撮像蛍光分析分野への応用の提案も受けた。

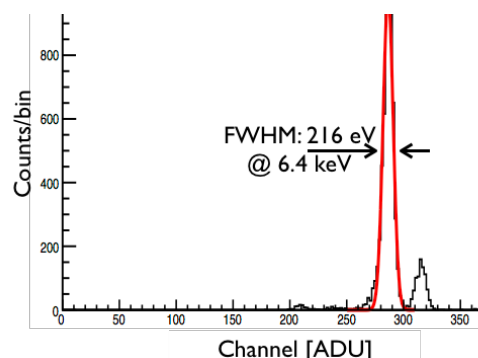


図 18. XRPIX6E でイベント駆動モードで測定した ^{57}Co の X 線スペクトル。トリガ型シリコン X 線ピクセル検出器として、世界最高の性能である。

ンプト

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

星間塵による吸収の影響を受けず、星の生成や銀河の進化を正確に評価できる遠赤外線イメージセンサーは、光赤外線天文学では極めて重要なデバイスである。このため、分子線結晶成長技術による高感度遠赤外線検出器「Blocked Impurity Band(BIB)型ゲルマニウム」と、FD-SOI CMOS プロセスを用いて開発した極低温動作読みだし集積回路(Readout Integrated Circuit; ROIC)を積層させた新たな多画素遠赤外線画像センサーの開発を行った。極低温で使用する際の熱膨張係数の違いの問題を、薄い GeBIB 検出器を厚い Si wafer で支持することで緩和させた。平成 29 年度にバンブ作業を行い、世界初となる 32x32 素子 BIB 型ゲルマニウム遠赤外線画像センサーを完成させた。また、気球実験用の 5x5 素子画像 BIB 型ゲルマニウム遠赤外線検出の試作も行った。シリコン基板支持型ゲルマニウム検出器の開発を行う過程で、不純物(ガリウム)濃度を従来 1E16/cc から 8E16/cc に高めることで、有効波長を 160 ミクロンから目標の 200 ミクロンを越え 240 ミクロンまで伸長できることを実験により確認した。

また、これとは別に SOI のハンドルウエハ部を赤外線センサとする全く新たな検出器構造も考案し設計を行った(図 19)。

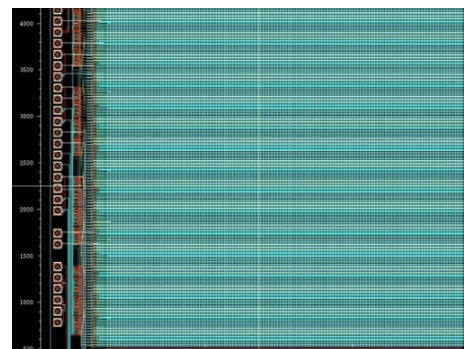


図 19. SOI のハンドルウエハ部を赤外センサとした、新しいモノリシック赤外センサ試験チップ(128x128ピクセル)。

C01: 高輝度加速器実験のための素粒子イメージング

International Linear Collider(ILC)計画等の将来実験では、薄く高成能な崩壊点検出器が必要となる。我々は Fermilab で行った陽子ビーム実験において、SOI 検出器のひとつである FPIX 検出器(8 μm 角画素)により、高エネルギー荷電粒子に対し半導体検出器で世界で初めて 1 μm を切る位置分解能 0.7 μm を得た(プレス・リリース)(図 20)。

また ILC 実験条件に合わせ開発を行った SOFIST 検出器では、20~30 μm 角ピクセルエリア内に 2 ないし 3 つのメモリを持たせる事に成功し、こちらもビーム実験において、十分な位置・時間分解能が得られる事を実証した。

これらの成果により、SOI 検出器により ILC 実験の要求に十分答えられることを世界に向け実証出来た。

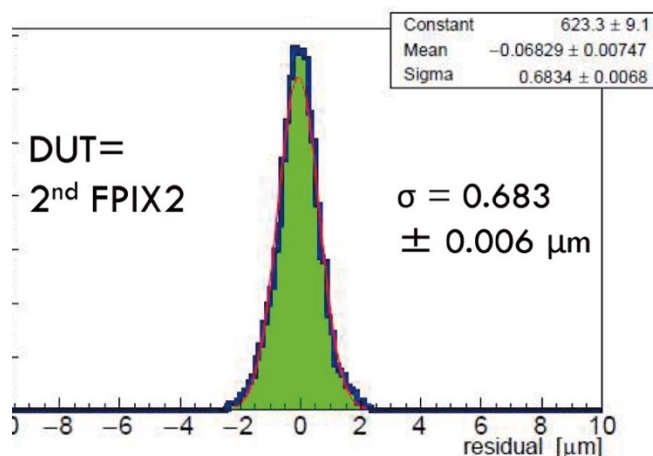


図 20. Fermilab での 120 GeV 陽子ビームを用いた SOI 検出器によるビーム通過位置の測定分解能。世界で初めて 1 μm を切る 0.7 μm 分解能を達成した。

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

XFEL や放射光実験では、広いダイナミックレンジと高精細画素を持つ X 線検出器が求められている。今回開発に成功した SOPHIAS センサは、諸外国で盛んに開発されているセンサの目標性能と比較しても極めて大きなダイナミックレンジを持ち、画素サイズも $30\ \mu\text{m}$ と小さく、 $1.9\ \text{M}$ 画素を持つ SOI 検出器としてはこれまでで最大($64.77 \times 26.73\ \text{mm}^2$)のものである。またピクセル面積に対するピーク信号は 185Me という世界最高レベルを達成した。

このような性能を持った高精度検出器が他にほとんど無いことから SOPHIAS は SPring-8 のいくつかの実験にも使用されるようになった。結果の一例を図 21 に示す。単色 X 線用い磁区の観察が空間分解能 $50\ \text{nm}$ で磁気イメージングを行う事に成功した。

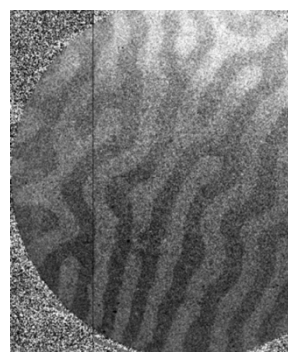


図 21. SOPHIAS 検出器による GdFeCo 合金膜 (厚さ $5\ \mu\text{m}$) の磁気イメージング。

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

SOI 検出器の高精細・高機能性を利用し、放射光実験における新たな検出器開発を行った。積分型検出器では、データ読み出し速度を向上させる事で 3 次元 CT 撮像を可能にした。KEK の放射光ビームラインで、世界で初めてチタン水素化物分布の三次元的可視化を行った(図 22)。これにより水素の拡散係数のより正確な評価を可能とした。まだ、分解能は十分では無いが、水素吸蔵機構のいっそう精密な理解が可能となった。

データの読み出しには SEABAS という独自開発のボードを用いて行っているが、システムの改良を行い、従来の 3 倍以上の速度でのデータ転送(Gbit Ethernet の理論値の 97%)という高速転送が可能とした。また、世界最小面積を持つ六角形の画素の計数型検出器の開発も行い、試験を進めた。

この他、C02 班と連携し、SOPHIAS 検出器の評価を KEK 放射光で行い、市販検出器と比較して、X 線近接ピークの分離が良いことを示し、SOI で実現できる高精細検出器の優位性を示した。

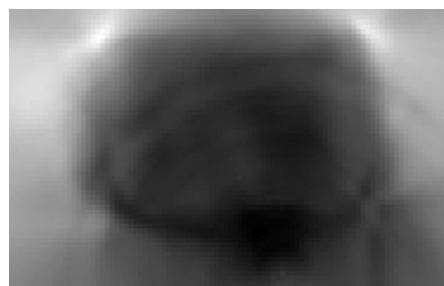


図 22. SOI 検出器を用いたチタン水素化物を含むチタン片サンプルに対する位相差イメージング(DEI 法)

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

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の実現に向け、イオンの入射位置と到達時間の両者を同時かつ高頻度に測定可能な半導体ピクセル検出器の開発を行った。試作と評価を繰り返すことで、グレイコードカウンタ、ピクセル内メモリ、および目標時間分解能 $1\ \text{ns}$ を得るための回路である time memory cell (TMC) などに見られた課題を改善した。平成 27 年度に新たな課題として見つかった検出感度の問題について、シミュレーションや検出器の配置を見直す事で改善し、単一イオンを検出可能な感度を得られていることを確認した。平成 29 年度には、これまでの試作センサの評価結果を反映させて、 192×192 ピクセルで $13.75 \times 15.3\ \text{mm}^2$ の最終試作センサ MALPIX8 (図 23)、同センサを動作させるための回路基板、および制御プログラムを作製し、目標としていた時間分解能 $1\ \text{ns}$ での動作を実現した。

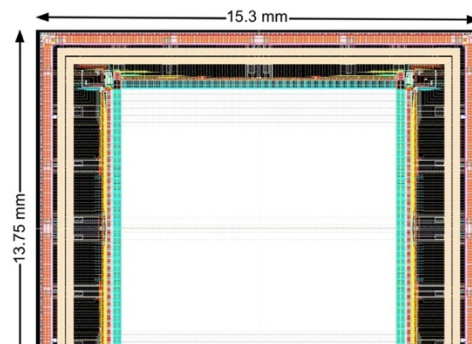


図 23. 到来イオン(電子)の位置と時間を同時に計測する MALPIX8 検出器のレイアウト。

公募研究:

タルボ干渉計、プラズモンフィルター、PET 等、多様な研究成果が生まれた。また、金属を対象とした小型で高速な X 線残留応力測定装置も開発された(図 24)。従来の装置では測定時間が 1 分以上かかり大型であることから用途が限られていたが、これを SOI 検出器により測定時間 1 秒以下にし直径 $6\ \text{cm}$ の管内の測定も可能であるなど、大幅に小型高速化した。このため、測定対象が飛躍的に拡大し、レールの走行疲労検査や金属製品の全数検査など実用化に向けて、多くの企業と共同研究が進み始めた。

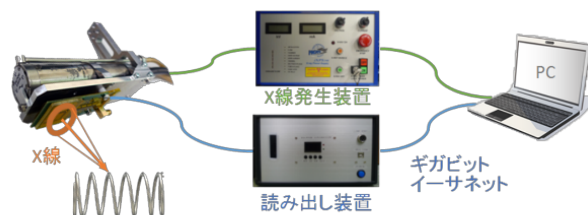


図 24. SOI 検出器を用いた X 線残留応力測定装置

6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したものについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

1. 領域ホームページ、<http://soipix.jp/>

A01 (計画・新井)

[雑誌論文] (全て査読あり)

- ▲"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, <https://doi.org/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. <https://doi.org/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.
- ◎▲"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

[国際会議発表]

- Yasuo Arai, "High Resolution SOI Pixel Detector", Dec. 11, 2017, HSTD11 & SOIPIX2017, Invited Talk.
- Y. Arai, "SOI monolithic pixel technology for radiation image sensor", 2017 IEEE Electron Device Meeting (IEDM17), Dec. 4-6, San Francisco, 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, Yasuo Arai, 'Radiation image sensor with Silicon-On-Insulator technology', Invited Talk.

[書籍]

- "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 (2016/4/26).
- "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.

[特許]

- 「半導体装置の製造方法」特許第 6202515 号 (2017.9.8)
- 「半導体装置およびその製造方法」特許番号 第 6108451 (2017.3.17)
- 放射線被曝耐性 SOI トランジスタ, 特願 2015-199200 (2015.10.7),
- RADIATION-DAMAGE-COMPENSATION-CIRCUIT AND SOI-MOSFET, PCT/JP2016/079797 (2016.10.6),

[受賞]

- 高エネルギー加速器科学奨励会諏訪賞、「SOI 技術を使った革新的ピクセルセンサーの実現」、新井康夫、倉知郁生。2018年2月23日科学新聞。

A02 (計画・川人)

[雑誌論文] (全て査読あり)

- ◎▲S. Shrestha, *S. Kawahito, H. Kamehama, S. Nakanishi, K. Yasutomi, K. Kagawa, N. Teranishi, A. Takeda, T. Go Tsuru, I. Kurachi, Y. Arai, "A Silicon-on-Insulator-Based Dual-Gain Charge-Sensitive Pixel Detector for Low-Noise X-ray Imaging for Future Astronomical Satellite Missions", Sensors 2018, 18(6), 1789, <https://doi.org/10.3390/s18061789>

2. ©▲H. 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.
3. ©▲A. Takeda, T. Go Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, H. Matsumura, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T. Kohmura, S. Nakashima, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, and S. Shrestha, Improvement of Spectroscopic Performance using a Charge-sensitive Amplifier Circuit for an X-Ray Astronomical SOI Pixel Detector, 2015, JINST, 10, C06005, doi:10.1088/1748-0221/10/06/C06005
4. M-W. Seo, *S. Kawahito, K. Yasutomi, K. Kagawa, N. Teranishi, "A Low Dark Leakage Current High-Sensitivity CMOS Image Sensor With STI-Less Shared Pixel Design," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.61, Issue6, pp.2093 – 2097, June 2014.
5. *M. Ikebe, "Recent progress in the technology linking sensors and digital circuits", *IEICE Electronics Express*, Vol.11, No.3, pp.2014-2023, 2014.2.10.

[学会発表]

1. ©S. Shrestha, H. Kamehama, K. Yasutomi, K. Kagawa, N. Teranishi, A. Takeda, T-Go Tsuru, Y. Arai, S. Kawahito, "Event-Driven Dual-Gain Fully-Depleted SOI Based X-Ray Detector for High Energy Particle Imaging", 2017 INTERNATIONAL IMAGE SENSOR WORKSHOP, Hiroshima, Japan, 2017.6.2
2. S. Kawahito, "Highly Time-Resolved CMOS Image Sensors Using High-Speed Carrier Modulation Techniques", 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2016), Ibaraki, Japan, 2016.9.27, 招待講演
3. S. Kawahito, M-W. Seo, K. Yasutomi, K. Kagawa, N. Teranishi, "Ultra-High Sensitivity Wide Dynamic Range Image Sensors Using High Conversion-Gain Detectors and Multiple-Sampling-Based Readout Techniques", International Forum on Detectors for Photon Science (IFDEPS)2016, Yamanashi, Japan, 2016.2.29, 招待講演
4. ©H. Kamehama, K. Yasutomi, K. Kagawa, S. Kawahito, et al., "Fully Depleted SOI Pixel Photo Detectors with Backgate Surface Potential Pinning", 2015 International Image Sensor Workshop (IISW 2015), 3.05, 2015 International Image Sensor Workshop, Vaals, The Netherlands, 2015.6.8.

[図書]

1. 池田将之 (第4章担当), 次世代自動車の運転支援システムと求められる制御技術, 第4章 次世代自動車の運転支援システムを実現するセンサ・カメラ・通信技術, "CMOSイメージセンサの広ダイナミックレンジ (HDR) 撮像・HDR圧縮技術", (株)技術情報協会, 2015年8月 確定、総ページ数 約500ページ (うち12ページ担当)
2. Makoto Narue 編著, N. Tate, M. Ando, M. Ohtsu, S. Kawahito, 他著者26名, 第6章「Single Photoelectron Manipulation and Detection with Sub-Nanosecond Resolution in CMOS Imagers」, pp.145-159 担当, Springer社, 2014.

B01 (計画・鶴)

[雑誌論文](全て査読あり)

1. ▲*O. Shunichi; T. G. Tsuru; T. Tanaka, H. Uchida, A. Takeda, et al., "Reduction of cross-talks between circuit and sensor layer in the Kyoto's X-ray astronomy SOI pixel sensors with Double-SOI wafer", *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, Vol. 831, 2016, pp. 61-64.
2. ▲*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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.04.012>.
3. ©▲*A. Takeda, T. Go Tsuru, T. Tanaka, H. Uchida, H. Matsumura, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T. Kohmura, S. Nakashima, S. Kawahito, K. Kagawa, K. Yasutomi, H. Kamehama, and S. Shrestha, Improvement of Spectroscopic Performance using a Charge-sensitive Amplifier Circuit for an X-Ray Astronomical SOI Pixel Detector, 2015, JINST, 10, C06005, doi:10.1088/1748-0221/10/06/C06005.
4. ©▲*H. Matsumura, T. Go Tsuru, T. Tanaka, A. Takeda, Y. Arai, K. Mori, Y. Nishioka, R. Takenaka, T. Kohmura, S. Nakashima, T. Hatsui, Y. Kohmura, D. Takei, T. Kameshima, Improving charge-collection efficiency of SOI pixel sensors for X-ray astronomy, 2015, NIM A, 794, 255-259, doi:10.1016/j.nima.2015.05.008.
5. ▲Investigation of charge-collection efficiency of Kyoto's X-ray astronomical SOI pixel sensors, XRPIX, *H. Matsumura, T. G. Tsuru (8名中2番目), S. Nakashima, 2014, NIM A, 765, 183-186.

[学会発表]

1. T. Tsuru, et al., "Spectral Performances of Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor in the Frame and Event-Driven Readout Modes", SPIE Space Telescopes and Instrumentation 2016, Edinburgh, UK
2. "Kyoto's X-ray Astronomical SOI pixel sensor – XRPIX", T. G. Tsuru (22名中1番目), in SOIPIX2015, held in Sendai, Japan, June 3-4, 2015

B02 (計画・和田)

[雑誌論文](全て査読あり)

1. H. Makitsubo, *T. Wada, H. Kataza, M. Mita, T. Suzuki, K. Yamamoto, "Fabrication and Analysis of Three-Layer All-Silicon Interference Optical Filter with Sub-Wavelength Structure toward High Performance Terahertz Optics", *J. of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 38, pp.206-214 (2017). Doi:10.1007/s10762-016-0328-z.
2. ▲*T. Wada, Y. Arai, S. Baba, M. Hanaoka, Y. Hattori, H. Ikeda, H. Kaneda, C. Kochi, A. Miyachi, K. Nagase, H. Nakaya, M. Ohno, S. Oyabu, T. Suzuki, S. Ukai, K. Watanabe, K. Yamamoto, "Development for Germanium Blocked Impurity Band Far-Infrared Image Sensors with Fully-Depleted Silicon-On-Insulator CMOS Readout Integrated Circuit", *J. of Low Temperature Physics* 184, 217-224 (2016). Doi:10.1007/s10909-016-1522-z.
3. ▲*K. Nagase, T. Wada, H. Ikeda, Y. Arai, M. Ohno, M. Hanaoka, H. Kaneda, S. Oyabu, Y. Hattori, S. Ukai, T. Suzuki, K....

Watanabe, S. Baba, C. Kochi, K. Yamamoto, "A Demonstration of TIA Using FD-SOI CMOS OPAMP for Far-Infrared Astronomy", J. of Low Temperature Physics 184, 449-453, (2016). Doi:10.1007/s10909-016-1551-7.

4. ▲*M. Hanaoka, H. Kaneda, S. Oyabu, M. Yamagishi, Y. Hattori, S. Ukai, K. Shichi, T. Wada, T. Suzuki, K. Watanabe, K. Nagase, S. Baba, C. Kochi, "Development of Blocked-Impurity-Band-Type Ge Detectors Fabricated with the Surface-Activated Wafer Bonding Method for Far-Infrared Astronomy", J. of Low Temperature Physics 184, 225-230, (2016). Doi:10.1007/s10909-016-1484-1.

[学会発表]

1. 和田武彦、「宇宙・天文と MEMS 技術」、『共用施設から生まれるイノベーション』～ナノテクが拓く未来～(2018/3/9)--文部科学省 平成 29 年度 微細加工ナノプラットフォームコンソーシアム シンポジウム--、東京大学武田先端知ビル、2018 年 3 月 9 日 (招待講演)
2. 和田武彦、「Cryo-SOI 極低温集積回路と Ge:Ga 遠赤外線検知器を用いた 3D 積層遠赤外線イメージセンサーの開発」、TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」第 2 回 3 次元積層半導体量子イメージセンサー研究会、つくば国際会議場、2018, (招待講演)
3. 和田武彦、鈴木仁研、「SPICA の中間赤外線・遠赤外線検出器」、第 5 回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ、2015 年 12 月 7-9 日、東北大学理学研究科 青葉サイエンスホール (招待講演)

[社会・国民への発信]

1. 天文・天体物理若手夏の学校にて赤外線センサーの開発に関する講演を行った。和田 武彦、「赤外線画像センサの基礎と開発の実際」、2014 年度第 44 回天文・天体物理若手夏の学校、招待講演

C01 (計画・坪山)

[雑誌論文](すべて査読有)

1. ▲*M. Yamada, S. Ono, T. Tsuboyama, J. Haba, Y. Ikegami, I. Kurachi, M. Togawa, K. Hara, 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.
2. ▲*S. Ono, M. Togawa, M. Yamada, T. Tsuboyama, K. Hanagaki, et al., Development of a pixel sensor with fine space-time resolution based on SOI technology for the ILC vertex detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 845(2017) 139-142, DOI: 10.1016/j.nima.2016.04.119
3. ▲*S. Ono, M. Yamada, T. Tsuboyama, Y. Arai, I. Kurachi, M. Togawa, T. Mori, A monolithic pixel sensor with fine space-time resolution based on silicon-on-insulator technology for the ILC vertex detector, Proceedings of science, 055, 2017. DOI: 10.22323/1.287.0055
4. ▲*M. Asano, D. Sekigawa, K. Hara, T. Tsuboyama, et al., Characteristics of non-irradiated and irradiated double SOI integration type pixel sensor, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 831(2016)315-321.DOI: 10.1016/j.nima.2016.03.095
5. ▲*M. Yamada, Y. Arai, Y. Fujita, R. Hamasaki, Y. Ikegami, I. Kurachi T. Miyoshi, R. Nishimura K. Tauchi, T. Tsuboyama, Compensation for radiation damage of SOI pixel detector via tunneling, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 831(2016) 309-314, DOI: 10.1016/j.nima.2016.04.110

[学会発表]

1. S. Honda, Total Ionization Damage Compensations in Double Silicon-on-Insulator Pixel Sensors, TIPP 2014, 2-6 June 2014, Amsterdam, The Netherland
2. K. Hara, Initial Characteristics and Radiation Damage Compensation of Double Silicon-on-Insulator Pixel Device, VERTEX2014, 15-19 Spe. 2014, Macha Lake, The Czech Republic.

[新聞発表]

1. 「世界最高精度の放射線測定センサーを開発」、筑波大学 & KEK プレスリリース、つくばサイエンスニュース、大学ジャーナル ONLINE、オプトロニクスオンライン、www.tsukubai.ac.jp/attention-research/p201706231400.html.

C02 (計画・初井)

[雑誌論文](すべて査読有)

1. ◎▲ "Improving charge-collection efficiency of SOI pixel sensors for X-ray astronomy", *H Matsumura, TG Tsuru, T Tanaka, A Takeda, Y Arai, K Mori, Y Nishioka, R Takenaka, T Kohmura, S Nakashima, T Hatsuji, Y Kohmura, D Takei, T Kameshima, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 794 (2015) 255-259.
2. "Development of Experimental Methodology for Highly Efficient Wafer-Level Evaluation of X-Ray Radiation Effects on Semiconductor Devices", *T. Kudo, K. Kobayashi, S. Ono, T. Watanabe, H. Kinoshita, M. Okihara, and T. Hatsuji, IEEE Trans. Nuclear Science, Vol.61, Issue 3, 10.1109/TNS.2014.2321766 (2014)
3. "X-ray imaging detectors for synchrotron and XFEL sources", *Takaki Hatsuji, and Heinz Graafsma, IUCrJ, 2015, Vol. 2(3), p. 371-383. 学術雑誌 invited review

[学会発表]

1. “シリコンX線 2 次元検出器の課題と解決策”, *初井宇記、小野峻、亀島敬、工藤統語、尾崎恭介、小林和生、桐原陽二、遠茂谷誠彦、矢橋牧名, 第 27 回日本放射光学学会年会、2015.1.12、広島市
2. *Takaki Hatsuji, "X-ray Imaging Detectors at SACLA: Current Status and Future Perspectives", (6th Ringberg Meeting on Science with FELs, Schloss Ringberg, Germany, Feb. 22nd, 2015)
3. *N. Teranishi, and T. Hatsuji, "X-ray image sensors for SACLA and future Ultimate Storage Ring Light Sources", Workshop on Active CMOS Pixel Sensors for Particle Tracking (CPIX14) (Bonn, Germany, 2014).

4. *Takaki Hatsui (invited review), "Developments of Detectors for XFEL experiments", Workshop on Crystallography at XFEL Sources, (IUCr Congress, Montreal, Canada, August 5th, 2014)

[受賞]

1. 高エネルギー加速器科学奨励会小柴賞、「SOI技術を用いた広ダイナミック・レンジX線イメージセンサーの開発」、初井宇記。2018年2月23日科学新聞

D01 (計画・岸本)

[雑誌論文]

1. ▲*R. Hashimoto, Y. Arai, N. Igarashi, R. Kumai, Y. Lu, T. Miyoshi, R. Nishimura, Q. Ouyang, Y. Zhou and S. Kishimoto, "Evaluation of a pulse counting type SOI pixel using synchrotron radiation", J. of Instrumentation, Vo. 12, 2017, C03061. 査読有
2. *Y. Zhou, Y. Lu, R. Hashimoto, R. Nishimura, S. Kishimoto, Y. Arai and Q. Ouyang, "Synchrotron beam test of a photon counting pixel prototype based on Double-SOI technology", Y. Zhou, Y. Lu, R. Hashimoto, R. Nishimura, S. Kishimoto, Y. Arai and Q. Ouyang, JINST 12(2017) C01037. 査読有
3. ▲*R. Hashimoto, Y. Arai, N. Igarashi, R. Kumai, T. Miyoshi and S. Kishimoto, "Test results of a counting type SOI device for a new X-ray area detector", AIP Conference Proceedings 1741, 040031 (2016). 査読有
4. ▲*Ryo Hashimoto, Noriyuki Igarashi, Reiji Kumai and Shunji Kishimoto, "Application of SOI Area Detectors to Synchron Radiation X-ray Experiments", SOIPIX2015, arXiv:1507.07732 [physics.ins-det], 2015, pp. 07732-1~6. 査読無

[学会発表]

1. R. Hashimoto, Y. Arai, N. Igarashi, R. Kumai, T. Miyoshi and S. Kishimoto, "Test results of a counting type SOI device for a new X-ray area detector", 8th International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging. 2016, セストリレバンテ (イタリア) .
2. 橋本 亮, 新井 康夫, 五十嵐 教之, 熊井 玲児, 三好 敏喜, 西村龍太郎, 岸本 俊二, 「計数型 SOI TEG の放射光 X 線による評価 (2)」、日本物理学会、2016年9月13-16.
3. R. Hashimoto, Y. Arai, N. Igarashi, R. Kumai, T. Miyoshi and S. Kishimoto, "Test results of a counting type SOI device for a new X-ray area detector", International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2015), 2015年7月6-10日。

D02 (計画・粟津)

【発表論文】(すべて査読有)

1. *Y. Tachibana, Y. Nakajima, T. Isemura, K. Yamamoto, T. Satoh, J. Aoki, M. Toyoda: "High spatial resolution laser desorption/ionization mass spectrometry imaging of organic layers in an organic light-emitting diode," Mass Spectrom. 5, A0052 (2016).
2. H. Kannen, *H. Hazama, Y. Kaneda, T. Fujino, and K. Awazu: "Development of laser ionization techniques for evaluation of the effect of cancer drugs using imaging mass spectrometry," Int. J. Mol. Sci. 15(7), 11234-11244 (2014).
3. *間久直, 守口直輝, 藤野竜也, 粟津邦男: "マトリックス支援レーザー脱離イオン化を用いた薬剤のイメージング質量分析に向けたゼオライトによるイオン化効率の向上," 電学誌 C 134(5), 657-663 (2014).
4. *J. Aoki, S. Ikeda, and M. Toyoda: "Observation of accumulated metal cation distribution in fish by novel stigmatic imaging time-of-flight mass spectrometer," J. Phys. Soc. Jpn. 83(2), 023001 (2014).

【国際会議発表】

1. H. Hazama, T. Hondo, H. Matsuoka, J. Aoki, Y. Kawai, Y. Fujita, M. Ikebe, Y. Arai, M. Toyoda, K. Awazu: "Development of a position and time sensitive ion detector MALPIX for stigmatic imaging mass spectrometry," 2nd Workshop on SOI Pixel Detector, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, Onna, Okinawa, Japan (14 Dec. 2017).
2. Y. Fujita, Y. Arai, T. Hondo, H. Matsuoka, H. Hazama, Y. Kawai, J. Aoki, M. Toyoda, K. Awazu: "Development of a pixel ion detector for a stigmatic time-of-flight imaging mass spectrometry," 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Hyatt Regency, Atlanta, GA, USA (25 Oct. 2017).
3. J. Aoki, Y. Kawai, Y. Fujita, H. Hazama, T. Hondo, K. Awazu, M. Toyoda, Y. Arai: "Development of a time and position sensitive ion detector for a stigmatic imaging mass spectrometer," 64th ASMS Conference on Mass Spectrometry and Allied Topics, Henry B. González Convention Center, San Antonio, TX, USA (6 Jun. 2016).

A01-I, III (公募・島添)

[雑誌論文](すべて査読有)

1. *Yoshihara, Y., Shimazoe, K., Mizumachi, Y., & Takahashi, H. (2017). Evaluation of double photon coincidence Compton imaging method with GEANT4 simulation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 873, 51-55.
2. *Koyama, A., Shimazoe, K., Wiest, F., Iskra, P., Ganka, T., Schneider, F. R., ... & Takahashi, H. (2017). Fabrication and characterization of a 500- μm -pitch 64-channel silicon photomultiplier prototype. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.
3. *Shimazoe, K., Yoshihara, Y., Fairuz, A., Koyama, A., Takahashi, H., Takeda, A., ... & Arai, Y. (2016). Electron Pattern Recognition using trigger mode SOI pixel sensor for Advanced Compton Imaging. Journal of Instrumentation, 11(02), C02030.

A01-II, IV (公募・小野)

[学会発表]

1. *Atsushi Ono, Atsutaka Miyamichi, Hiroki Kamehama, Keiichiro Kagawa, Keita Yasutomi, Shoji Kawahito, "Multi-band plasmonic color filters with corrugated metallic thin film," AOPC2017, Beijing, China, Jun. 4th-6th, 2017(招待講演).
2. *Atsushi Ono and Atsutaka Miyamichi, "Plasmonic Color Filter of Corrugated Metallic Thin Film," The 37th PIERS in Shanghai, Shanghai, China, Aug. 8th-11th, 2016. (招待講演)

[特許]

1. 特願 2016-126742、光学素子、それを含む撮像素子、光学素子の製造方法、及び撮像素子の製造方法

[受賞]

1. Best Presentation Award, The 4th International Symposium toward the Future of Advanced Researches in Shizuoka University 2018, Atsutaka Miyamichi (2018年3月6日)
2. 第30回高柳研究奨励賞, 浜松電子工学奨励会, 小野篤史 (2016年12月11日)

A02-I, III (公募・佐々木)

[解説記事、査読無し]

1. *佐々木敏彦、三井真吾、新谷正義、重要部品の検査のためのリアルタイム X 線残留応力測定装置、ケミカルエンジニアリング、63 巻、pp.23-27、2018.

[学会発表]

1. 三井真吾、佐々木敏彦、SOI 検出器を用いた $\cos \alpha$ 法応力測定、平成 29 年度日本非破壊検査協会非破壊検査総合シンポジウム、2017
2. 三井真吾、佐々木敏彦、西村龍太郎、三好敏喜、新井康夫、一体型 SOI 検出器を用いたリアルタイム X 線応力測定装置の開発、日本非破壊検査協会第 10 回現場指向 X 線残留応力測定法研究委員会、2017.

A02-II, IV (公募・石野)

[雑誌論文]

1. ▲"SOIKID, SOI pixel detector combined with superconducting detector KID," *H. Ishino, A. Kibayashi, Y. Kida, Y. Yamada, Proceedings for SOIPIX2015, arXiv:1507.01326 査読無
2. ▲「フォノン・フォトン検出用 Kinetic Inductance Detector」*石野宏和、樹林敦子、山田要介、岡本晃範、喜田洋介、羽澄昌史、佐藤伸明、神代暁、山森弘毅、信学技報 IEICE Technical Report, SCE2014-42 (2014) 43-47, 査読無

A02-V (公募・志村)

[学会発表]

1. R. Hosono, T. Shimura, et al., "Improvements of Grating-based X-ray Phase Contrast Imaging with a Microfocus X-ray Source by a SOI Pixel Detector, SOPHIAS", HSTD11 & SOIPIX2017, (Okinawa, Japan, December 10 - 15, 2017).
2. 細野 凌、志村考功、他、"マイクロフォーカス X 線源と振幅格子を用いた多波長 X 線位相イメージング-SOI ピクセル検出器による高度化-", 精密工学会 2017 年度秋季大会。

B01-IV (公募・小貫)

[学会発表]

1. Background Modelling and Pixel Clustering for Low-Background Axion-WIMP Search Pilot Experiment, Alejandro Mora, 第 72 回日本物理学会年次大会, 大阪大学 2017-03/17-20.

C02-I (公募・松村)

[学会発表]

1. SOI イメージセンサを用いた治療用炭素線測定 2015, 松村彰彦, 日本医学物理学会学術大会, 北海道大学, 2015-09/19.

7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

この領域研究では計画班を大きく4つに分け、コア技術(A01/A02)班、宇宙(B01/B02)班、先端加速器(C01/C02)班、生体・物質構造(D01/D02)班とし、これに公募研究を追加し研究を進めている。これらはまた、センサ技術を担う A01/A02 班と、サイエンスを目指す B01~D02 班に分ける事もできる。これらは複雑に連携しているが、大雑把なつながりを図 25 に示す。総括班はこれらの研究を効率的に進め、各研究班間の連絡・調整を行う役割を担っている。また、共同研究コーディネータは、具体的に必要なアドバイス、共同研究のプロモーション等を行い、さらに連携を深めるように働いた。

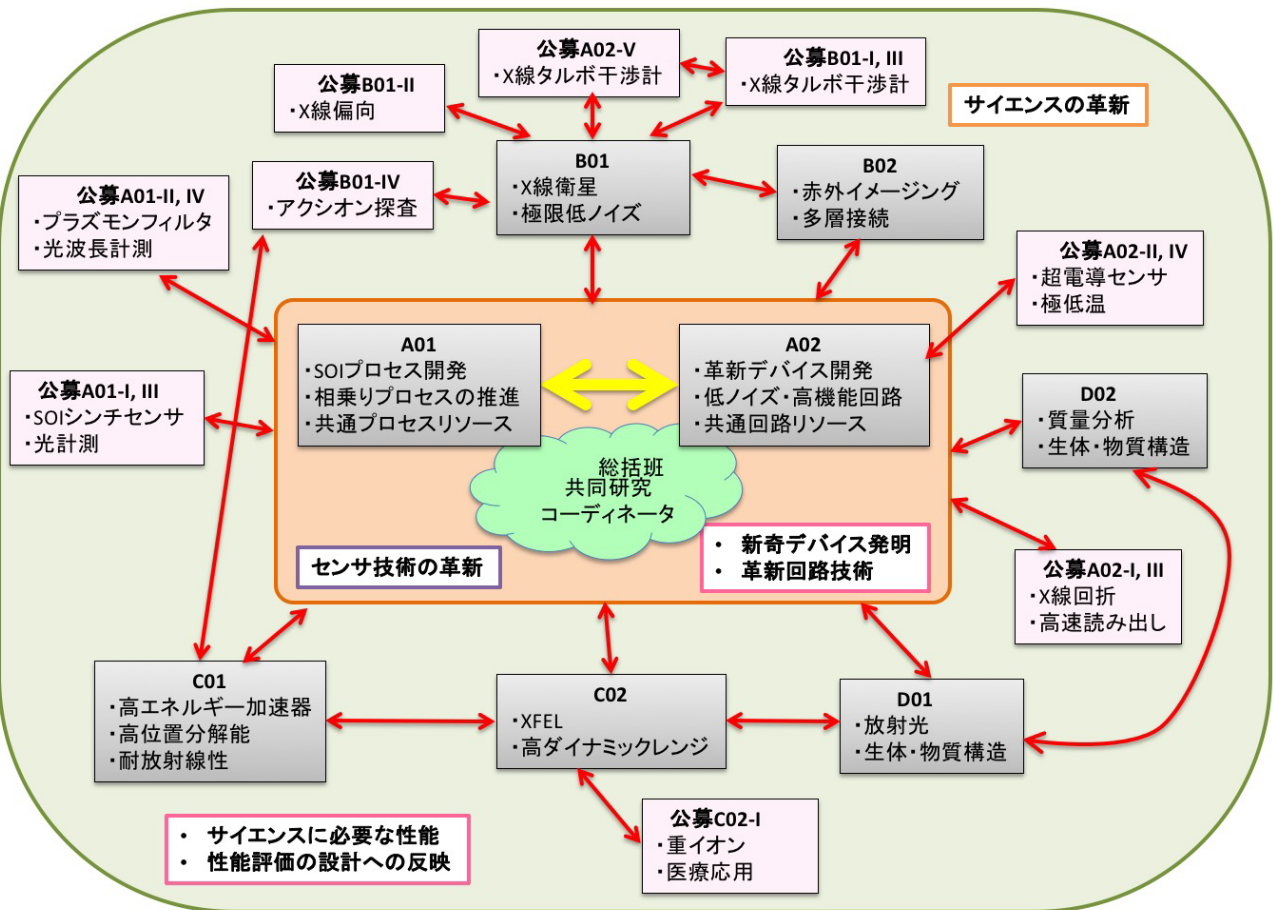


図 25. 研究項目と各計画研究班の連携状況の概略。

これらの連携の中で、キーとなる研究項目に関し、以下に状況を示す。

・センサ技術開発

SOI のセンサ技術に関する研究項目では主に A01 班と A02 班が協力して研究を行い、新奇デバイスの発明や革新的な回路技術の研究に勤めた。これらの結果は、他の研究班にも紹介され、とりいれられた。

・SOI プロセス開発

A01 班を中心にプロセス開発を行ったが、各種測定はサイエンス班に多く行ってもらった。また得られた結果を反映させ、次の機会のプロセスに変更が生じる場合は全体に対しアナウンスを行ってきた。各種ノウハウや新たなライブラリは Web 上で管理され、領域内で共有された。

・極限環境計測

実際の実験環境で要求される極限環境計測(放射線耐性、極低温動作等)では B01/B02 班、C01/C02 班で共通な項目も多く、協力して研究を行う事が出来た。

・共通回路リソース

各研究班で新たに開発した回路やセル・レイアウトは A01 班により管理され、順次公開していった。また、毎年行った講習会の際も紹介され、そのまま使われたり、参考にされたりした。

・低ノイズ測定・回路

低ノイズ測定はすべてのサイエンスにおいて必須の項目であり、A02 班を中心に新たなセンサ構造、回路構成等の提案があり、この結果は B01~D02 班の検出器に生かされてきた。一例として B01 班が開発した XRPIX 検出器のノイズ削減の歩みを図 26 に示す。試作を重ねる毎に、徐々に変換ゲインが上がりノイズレベルが下がって行った様子がわかる。すでに、要求とするノイズレベル 10 電子は下回り、究極の目標とする 3 電子にも近づいてきた。

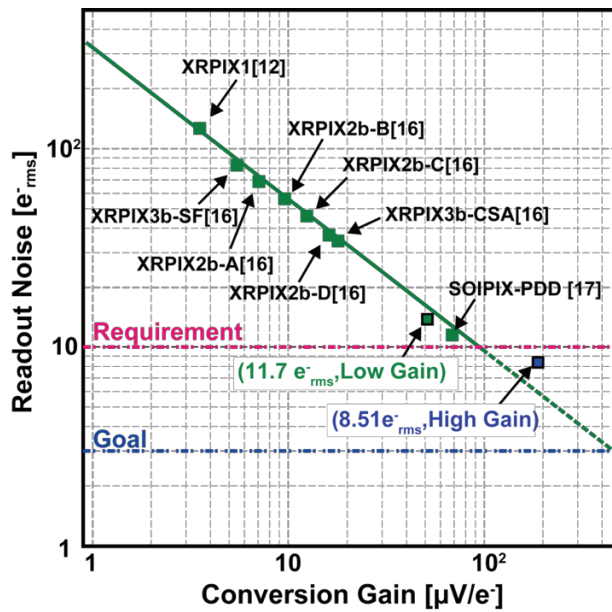


図 26. B01 班が開発した XRPIX シリーズ検出器の変換ゲインとノイズのプロット。試作を重ねる毎に性能が向上していった様子がわかる。

・カメラシステム

C02 班では、冷却装置及び読み出しシステムを備えたカメラシステムの開発も行われた(図 27)。これは D01 班でも利用されたと共に、同様システム開発を考えている他の研究班の参考ともなっている。また大面積検出器製造の際に開発された stitching 技術は、将来他の検出器の大型化の際にも役に立つ。



図 27. SOPHIAS 検出器カメラシステム (C02 研究班)。

8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む。）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

領域研究内では、総括班会議等においてそれぞれの施設の持つ計測器等の紹介を随時行い、相互利用している。一例を挙げると、プロービングシステム、半導体パラメータアナライザ、ノイズ測定システム、温度測定システム、恒温槽、真空チャンバー、レーザ照射システム、高電圧電源等である。

また放射線耐性試験の為に、幾つかのチップを同時に照射して相互にチップを融通したりしている。特に C02 研究班が理研に構築した自動 X 線ウエハー照射装置(図 28 左)は、ウエハー内の特定の素子にバイアス電圧を与えながら自動的に次々と X 線照射を行うことができるものである。A01 班はこれを利用することで多くのデータを集めることができ、トランジスタ特性の解析に非常に役立った。また、この結果を回路シミュレータ SPICE のモデル内に組み込む試みも行われ、放射線損傷を受けた状態での動作もシミュレーションできるようになった。

このほか、KEK において開発した読み出しボード(SEABAS2, 図 28 右)は各種センサチップの試験に欠かせないものとなっており、ほとんどすべての研究班が保持することとなっている。このボード上には個々のセンサを制御する為の FPGA が載っており、センサー毎にカスタマイズされたプログラムを載せる必要があるが、Web 上でそれぞれのセンサーに対するプログラムを公開することで、初心者でも比較的簡単に新しいセンサに対するプログラムを作成できるようになっており、メーリングリストの利用により疑問点に対しては経験者が答える体制ができています。

さらにデータ収集ソフトや解析プログラム等も、相互に融通されている。また、新しい学生等わからない点がある際は、メーリングリストに質問を流す事で、適宜経験者が回答し、知識が伝授されている。

この他、毎年行ってきた MPW ランでは、数ヶ月前より事前申し込みを行ってもらう事により、チップエリアの不足や空きエリアが出ないように相互に交渉を行った。エリアの一部は、講習会に参加した学生に解放され、実際に試作に参加する事により、設計の経験を積ませる事が出来た。

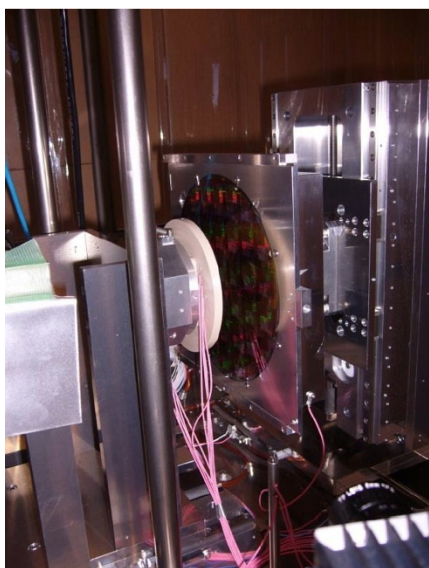


図 28. (左)ウエハーへの X 線自動照射装置。(右)SOI 検出器読み出しボード SEABAS2(SOI Evaluation Board with SiTCP)と INTPIX4 センサ・サブボード。

・研究費の使用状況（（１），（２），（３）を合わせて３ページ以内）

（１）主要な物品明細（計画研究において購入した主要な物品（設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。）について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。）

| 年度 | 品名 | 仕様・性能等 | 数量 | 単価（円） | 金額（円） | 設置(使用)研究機関 |
|------------------------|------------------------|---------------------------|-------------|------------|------------|------------|
| 25 | 携帯型 SOI 検出器表示装置 | (株)ティーエーシー社製 | 1 | 4,999,050 | 4,999,050 | 高エネ研 |
| | 液体ヘリウム冷凍機 | アイアールラボ CD-HDL-10 | 1 | 4,955,580 | 4,955,580 | 名古屋大学 |
| | E D A ソフトウェア一式 | CADENCE 社 Virtuoso シリーズ | 1 | 4,200,000 | 4,200,000 | 静岡大学 |
| | SOPHIAS 電源 | 中央電機計器製作所製 SOPHIAS 電源 | 2 | 2,098,425 | 4,196,850 | 理研 |
| | 赤外線サーモグラフィ | FSV-2000 | 1 | 3,423,000 | 3,423,000 | 理研 |
| | 計数型ピクセルウエハ製造 | ラピスセミコンダクタ(株)社製 | 1 | 2,795,520 | 2,795,520 | 高エネ研 |
| | 水冷静音サーバー | RC Server CalmIII | 1 | 2,499,000 | 2,499,000 | 静岡大学 |
| 26 | SOI 冷却装置 | CRT-P007-HTN | 1 | 2,255,040 | 2,255,040 | 京都大学 |
| | 質量分析用高圧電源 | アルテック(株)製 Model 13159 | 1 | 6,245,640 | 6,245,640 | 大阪大学 |
| | 任意波形ジェネレータ | テクトロニクス AWG5002C | 1 | 3,520,800 | 3,520,800 | 静岡大学 |
| | 半導体デバイスアナライザ | アジレントテクノロジー社製 B1500A | 1 | 3,358,800 | 3,358,800 | 高エネ研 |
| | フーリエ変換赤外分光器 | ABB 社、DA8X 用 | 1 | 2,548,800 | 2,548,800 | 名古屋大学 |
| | 積層型 GeBIB ディテクター | 東北マイクロテック、TNT-DC150327-1 | 1 | 2,484,000 | 2,484,000 | 宇宙科学研 |
| | 27 | 相乗りプロセス・チップ及び特殊プロセス・ウエハ | ラピスセミコンダクタ製 | 1 | 25,920,000 | 25,920,000 |
| イオン化用紫外レーザー | | EKSPLA 社製 NL202-TH-EH | 1 | 5,994,000 | 5,994,000 | 大阪大学 |
| 冷凍器 | | インフラッド・ラボラトリーズ | 1 | 4,560,840 | 4,560,840 | 名古屋大学 |
| SOI 検出器シングルセンサーシステム | | 株式会社ヘルヴェチア製 | 1 | 4,557,600 | 4,557,600 | 理研 |
| マルチチャンネルアナライザ | | セイコーEG&G DS-P1000 | 1 | 2,376,000 | 2,376,000 | 高エネ研 |
| 低雑音イベント駆動読出しセンサ試作 | | 0.20um SOI | 1 | 2,851,200 | 2,851,200 | 静岡大学 |
| X線 XFEL2 次元検出器信号処理システム | | NI 社製 | 1 | 2,008,368 | 2,008,368 | 理研 |
| 28 | FDSOI 基板型極低温読み出し集積回路 | ラピスセミコンダクタ製、MX1850-1K4 | 1 | 2,808,000 | 2,808,000 | 宇宙科学研 |
| | SOI ピクセル相乗りウエハプロセス | | 1 | 23,760,000 | 23,760,000 | 高エネ研 |
| | 卓上型迅速診断用凍結マイクローム | ラピスセミコンダクタ(株)製 | 1 | 2,300,400 | 2,300,400 | 大阪大学 |
| | 低雑音 SOI-CMOS イメージセンサ試作 | ライカバイオシステムズ・ヌスロフ社製 CM1100 | 1 | 2,209,680 | 2,209,680 | 静岡大学 |
| | | 0.20 μm SOI | | | | |

| | | | | | | |
|----|------------------------------------|-------------------|---|------------|------------|------|
| 29 | S0I ピクセル相乗り ウエハプロセス及び 反り評価試験 | ラピスセミコンダ クタ(株) | 1 | 19,656,000 | 19,656,000 | 高エネ研 |
| | S0I ピクセル相乗り ウエハプロセス | ラピスセミコンダ クタ(株) | 1 | 18,000,000 | 18,000,000 | 高エネ研 |
| | X線検出器用試験チッ プ | ラピスセミコンダ クタ(株) | 1 | 4,752,000 | 4,752,000 | 高エネ研 |

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成25年度】

・旅費

1. 英国オックスフォード大学との研究打合せ（大阪-オックスフォードの交通費、宿泊費、3名）1,287,613円 D02班
2. VERTEX2013 国際会議（ドイツ、ベルグ）に参加（つくば-ベルグの交通費、宿泊費）626,380円 A01班
3. SAFARI Consortium meeting(オーストリア、ウイーン)に参加(東京-ウイーンの交通費、宿泊費) 466,400円 B02班

・人件費・謝金

1. 特任研究員の雇用（1名×7カ月+1名×6カ月） 3,563,396円 D02班
2. 実験支援業務員の雇用 2,255,030円 X00班
3. 事務補助員の雇用 1,180,880円 X00班

・その他

1. 低振動パルスチューブ冷凍機式クライオスタットの開発 9,135,000円 B02班
2. X線自由電子レーザー2次元検出器ソフトウェア 8,872,500円 C02班
3. X線ピクセル検出器開発用計数型 TEG (CPIXPTG1) 設計一式 4,147,500円 D01班

【平成26年度】

・旅費

1. ASMS2014 国際会議（米国、ボルチモア）に参加（大阪-ボルチモアの交通費、宿泊費、2名）1,109,120円 D02班
2. IMSC2014 国際会議（スイス、ジュネーブ）に参加（大阪-ジュネーブの交通費、宿泊費、3名）1,099,572円 D02班
3. ISSCC 2015 国際会議（米国、サンフランシスコ）に参加（浜松-サンフランシスコの交通費、宿泊費）779,850円 A02班
4. IEEE ICECS 国際会議（フランス、マルセイユ）に参加（札幌-マルセイユの交通費、宿泊費）611,975円 A02班
5. TIPP2014 国際会議（オランダ、アムステルダム）参加及びベルギー・ルーバン大学訪問（つくば-ブリュセル-アムステルダムの交通費、宿泊費）510,350円 A01班

・人件費・謝金

1. 博士研究員の雇用 5,984,400円 D01班
2. 博士研究員の雇用 4,587,080円 A01班
3. 特任研究員の雇用（1名×5カ月+1名×12カ月+1名×6カ月） 4,454,839円 D02班
4. 博士研究員の雇用 4,097,785円 B01班

・その他

1. X線ピクセル検出器開発用計数型 TEG (CPIXPTG1) 評価 3,942,000円 D01班
2. 「新学術領域研究」パンフレット作成料 529,200円 X00班

【平成27年度】

・旅費

1. ASMS2015 国際会議（米国、セントルイス）に参加（大阪-セントルイスの交通費、宿泊費、3名）1,267,260円 D02班
2. SRI2015 国際会議（米国、ニューヨーク）に参加（つくば-ニューヨークの交通費、宿泊費）427,719円 D01班
3. HSTD10 国際会議（中国、西安）に3名参加（京都-西安の交通費、宿泊費）671,670円
4. SPIE 2015 Optics and Photonics 国際会議（米国、サンディエゴ）に参加（浜松-サンディエゴの交通費、宿泊費）363,113円 A02班

・人件費・謝金

1. 博士研究員の雇用 6,020,400円 D01班
2. 博士研究員の雇用 5,265,000円 A01班

3. 博士研究員の雇用 4,529,089円 B01班
 4. 実験支援業務員の雇用 3,621,778円 X00班
- ・その他
 1. SOIピクセル相乗りプロセス及び特性測定委託料 6,480,000円 A01班
 2. X線ピクセル検出器開発用計数型TEG(CPIXPTG1 DSOI)評価 4,201,200円 D01班
 3. X線自由電子レーザー検出器セラミックパッケージ組立 3,844,800円 C02班
 4. SOI放射線検出器対応MOSFET SPICEパラメータ抽出委託料 2,916,000円 A01班

【平成28年度】

- ・旅費
 1. CLEO2016国際会議(米国、サンノゼ)に参加(大阪-サンノゼの交通費、宿泊費)783,490円 D02班
 2. SPIE BiOS 2017国際会議(米国、サンフランシスコ)に参加(大阪-サンフランシスコの交通費、宿泊費)697,314円 D02班
 3. Pisa Meeting国際会議(イタリア、エルバ)に参加(つくば-エルバ交通費、宿泊費)575,258円 A01班
 4. PIXEL2016国際会議(イタリア、セストリレヴァンテ)に参加(つくば-セストリレヴァンテの交通費、宿泊費)474,690円 D01班
- ・人件費・謝金
 1. 博士研究員の雇用 6,123,000円 D01班
 2. 博士研究員の雇用 5,568,720円 A01班
 3. 特任研究員の雇用(2名×12カ月) 3,592,437円 D02班
 4. 博士研究員の雇用 3,511,999円 B01班
- ・その他
 1. X線センサー動作条件最適化のための解析業務 2,160,000円 C02班

【平成29年度】

- ・旅費
 1. ASLMS2017国際会議(米国、サンディエゴ)に参加(大阪-サンディエゴの交通費、宿泊費)774,710円 D02班
 2. NDIP17国際会議(フランス、トゥール)に参加(京都-トゥールの交通費、宿泊費)509,940円 B01班
 3. iWoRiD国際会議(ポーランド、クラクフ)に参加(つくば-クラクフ交通費、宿泊費)401,917円 A01班
 4. TYL-FJPPL国際会議(フランス、ストラスブルグ)参加及びフランスLAL研究所訪問(つくば-ストラスブルグ-オルセーの交通費、宿泊費)395,365円 X00班
 5. IEEE IEDM(米国、サンフランシスコ)に参加(つくば-サンフランシスコの交通費、宿泊費)384,198円 X00班
- ・人件費・謝金
 1. 博士研究員の雇用 6,218,400円 D01班
 2. 博士研究員の雇用 5,568,720円 A01班
 3. 博士研究員の雇用 4,138,585円 B01班
 4. 博士研究員の雇用 5,366,310円 B02班
- ・その他
 1. SOPHIAS小型カメラ動作試験システム構築 1,814,400円 C02班
 2. 報告書印刷費 588,600円 X00班

(3) 最終年度(平成29年度)の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

- * A01班 1,840,000円。
SOI検出器の製造が3ヶ月遅れたため、当初予定していた検出器試験・評価を終了させるため、研究員を3ヶ月雇用するための人件費と付随する物品費及び企業・他の研究者との研究打ち合わせのための旅費、研究とりまとめの為のその他経費を繰越した。
- * B01班 9,850,000円
撮像領域300平方ミリの大型SOIPIXS素子の概念設計の結果、目的とする高い分光性能を得るためには当初予定していたSingle SOI構造ではなく、Double SOI構造を使用する必要があることが判明した。そのため、改めてDouble SOI構造の大型素子の概念設計を行う必要が生じたため。
- * B02班 1,000,000円
平成29年度に行う予定であった、32x32画像センサー評価試験が検出器の製造が遅れたため、平成30年度に行う必要が生じた。繰越金額は、画像センサー評価に必要な電子部品購入費(35万円)、部品実装費(35万円)、寒剤(液体ヘリウム購入費 30万円)(いずれも過去の実績に基づく)から算出した。

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

1. 当該学問分野と関連学問分野への波及効果

近年、半導体技術の進歩は目覚ましいが、半導体技術を用いた放射線検出器の開発を自ら行うことは、技術的困難さと多くの費用・時間がかかるものとして、多くの学問分野で敬遠されてきた。このため最新の技術を最先端の科学実験で活かすきれない、あるいは海外からの検出器購入に頼らざるを得ないという問題がでていた。また同様の問題は工学の分野でも生じており、最先端の半導体技術を用いた開発はアカデミック内ではますます難しくなっている。

そのような状況の中で本新学術領域研究では、従来にない機能を持った高性能な半導体イメージセンサーにチャレンジし結果を出したことで、工学・理学両分野の研究者の間で注目され、開発への参加希望が増えていった。多くの若手研究者が自分の考えた検出器を自ら設計する経験を持ったこと、また半導体プロセスの改良に参加出来たことで、今後さらに新奇検出器が生まれることが期待でき、将来世界的な実験成果が生まれることも期待できる。一例としては、公募研究への応募が間に合わなかったが、極低温中性子を用いた重力の等価原理の検証実験に興味を持つ研究者の要請による、中性子検出用 SOI 検出器の開発が始まった事が挙げられる。

公募研究 A01-II 班によるプラズモンフィルタ実装 SOI イメージセンサの可視近赤外波長フィルタリングの実証実験では、従来は信号処理等により間接的に可視近赤外イメージングを行っていたのに対し、金属ナノ構造薄膜の実装により光学フィルタとして直接的に可視近赤外同時イメージングが可能であることを示唆し、国際会議 IISW2017 での発表が映像情報メディア学会誌に取り上げられるなどイメージセンサ分野に多大なるインパクトを与えた。金属薄膜の凹凸構造化により任意波長を透過する光学フィルタリングを実現できるため、可視近赤外に限らず新規赤外イメージセンサの開発にも波及しており、本研究成果により出願した特許をもとに現在企業との共同開発へと展開している。

2. 実務・社会への波及効果

X 線イメージング・センサは工業的にも様々な応用があるが、ほとんどはシンチレータと光検出器組み合わせたもので、最近ようやくハイブリッド型検出器が使われだした。シリコンによる X 線・赤外線直接検出と半導体回路を一体化したモノリシック・センサーは、性能が高いことは知られながらも高価な開発費のため、直接開発を手がける企業はあまりない。

本新学術領域研究で我々が開発した各種検出器は、多くの企業から注目されており、国内企業が開発に乗り出す際の基礎技術として助けになることは間違いない。実際、某企業と本研究の研究者との間で、大規模な応用に向け協力も始まっている。

例えば A02-I, III 班で開発した X 線残留応力測定装置は、従来不可能であった高速性を必要とする製造現場での製品の測定や検査を、小型高速化により製造ラインへの組み込みや現行検査機への搭載などが可能とした。このことにより、非破壊検査業界へ大きなインパクトを与えようとしている。

また国内固有技術である 3 次元半導体検出器を用いた固体反跳電子飛跡型コンプトンカメラの実証により、ガンマ線イメージングの高感度化が可能であることを確認した。これは、多核種イメージングが必要とされる核医学医療分野において重要である。

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

若手研究者に対しては、毎夏に KEK において SOI 検出器設計講習会を行った。ここでは設計のための CAD ツールの使い方から、基本的な構造、設計上の注意等を講習し、また実際に課題を与え実習も行った。講習で使用した教材は Web でも公開し、参加できなかった学生・若手研究者にとっても有用な資料となっている。

さらに、毎回の MPW ランではマスク上の余った領域を用いて、若手研究者・学生に実際に設計を行わせ、チップを製作することで興味を持たせ、設計->実装->試験の経験を持たせ、問題点があった場合は何が悪かったのか考えさせる事を行った。

またこれまでに、以下に示すように8回の国内研究会を行い、毎回60名前後の参加があった。

2013. 12 月@京都大学、2014. 5 月@大阪大学、2014. 11 月@金沢工大、2015. 12 月@静岡大学、2016 年 6 月@北海道大学、2016 年 11 月@SPRING-8、2017 年 6 月@宮崎大学、2017 年 10 月@東京大学

研究会では、若手の参加を促すために口頭発表に加えポスター発表も行い、学生発表の中からは審査の上優秀な発表に対し表彰を行った。

さらに、以下のような国際会議も行った。

2015. 6/3-5 International Workshop on SOI Detector (SOIPIX2015) 及び一般向け公演会@東北大学

2016. 7/14-15 China-Japan Mini Workshop on SOIPIX@北京高能研

2017 年 12/11-15 International Workshop on SOI Detector (HSTD11 & SOIPIX2017) @沖縄科学技術大学

特に、集大成として行った沖縄での会議(図 29)では、海外からの 120 名の参加に加え総勢 200 名近い参加があり非常に盛り上がった。こうした研究会で知り合った若手研究者同士は、個人的にもメール等で情報交換を行っており、交流が図られている。



図 29. 沖縄科学技術大学での SOIPIX2017 国際会議。

11. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

田島 宏康(名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授)

【本研究領域全般の評価】

本研究領域では、Silicon On Insulator (SOI)技術の基礎研究をベースに、宇宙・素粒子・物質構造のイメージング検出器技術にブレークスルーをもたらすことを目的とした。その実現のため、計画研究A01班でSOIプロセス技術の開発や相乗り試作のとりまとめを行い、A02班でSOI技術を有効活用する基礎回路技術を開発した。A01・A02で開発されたSOI関連要素技術をB01・B02などの宇宙・衛星観測、C01・C02などの先端加速器測定技術、D01・D02などの生体・物質構造測定技術に展開することにより、SOI技術を活用した検出器に飛躍的発展をもたらすことを目的とした。

上述のような本研究領域の目的を達成するためには、計画研究間の情報共有が鍵となるが、本研究領域では、総括班会議を年4回定期的に開催し、各計画研究における進捗状況や成果を共有し、研究計画を検討している。その結果、A01班が開発したSEABASと呼ばれるセンサー試験用ボードや、C02班が構築した自動X線照射装置は、領域内で活用され開発の進展に貢献するなど、有意義な効果を発揮している。各総括班会議の資料や報告書は、評価者にも送られており、評価者が進捗状況を把握できるよう配慮されている。

本研究領域では、研究成果を広く共有しさらなる展開を図るため、年2回程度の頻度で研究会を開催している。最終年度は、シリコン検出器の国際会議と同時開催とすることで、海外からも120名の参加があり、日本発の検出器技術を世界に大きく広める役割も果たした。さらに、広報活動の一環として、Webサイト<<http://soipix.jp/index.html>>のほか12ページのパンフレットを作成して、一般への周知を図っている。

本研究領域では、若手研究者の教育にも力を入れており、若手対象のSOIを利用した検出器の設計講習会を毎年実施した。

【本研究領域における研究の進捗状況評価】

【A01】

本計画研究では、SOIウェハやプロセス技術の基礎開発により、SOIを利用した素子の性能向上と、相乗りプロセスのとりまとめによる全体の開発計画を推進することを主な目的とした。Double SOIを用いることによりセンサー層と回路層の干渉を低減し、クロストークを1/20に低減し、放射線耐性も100倍向上するなどの成果を挙げた。その他、3次元集積回路、SOIの特性を活用したSuper Steep Transistorなどの開発など基礎技術の発展に貢献した。また、2013年度から2016年度は年1回、2017年度は年2回の相乗りプロセスによる試作を実施し、毎回20件程度の領域全体の施策支援を予定通り進めた。

【A02】

本計画研究では、B～D班の用途に合わせたSOI回路技術の開発を主な目的とした。イベント駆動エネルギー弁別回路や電荷集積構造を有する光子検出器、Pinned Depleted Diodeと称する新しい構造のSOIピクセルなどを新規考案するなど、当初の研究計画にはなかった成果も生んだことは高く評価する。特に、Pinned Depleted Diodeによって電荷を検出ダイオードに低リーク電流で誘導できるようになったため、電荷検出ダイオードを小さくでき、その結果低容量化によって電圧変換ゲインを6倍向上することに成功した。これは、B01班の雑音性能向上に大きく寄与している。

【B01】

本計画研究では、トリガー可能でかつ低ノイズで精密分光ができるX線撮像分光素子の開発を目的とした。そのために、非常に高いエネルギー分解能を有するイベント駆動SOIピクセルを開発した。鍵となる低雑音の実現は、A02班の貢献もあって8電子程度の雑音を実現し、試作用の小さな素子であるがトリガー機能とトリガーした画素の周辺の信号を読み出す機能を持つ回路において、6.4 keVのX線で

0.3 keV (FWHM) のエネルギー分解能を達成している。同様の回路を採用した 1.5 cm × 2.5 cm の大型の素子も製造し、当初の目的をほぼ達成した。

【B02】

本計画研究では、SOI 回路が極低温でも動作することを利用したゲルマニウム検出器の信号処理用 SOI 回路とその周辺技術の開発を目的とした。信号処理用 SOI 回路については、32×32 画素の開発が進められた。しかし、ゲルマニウム検出器と SOI 回路を接合した試験とその結果が示されていない。一方で、SOI の応用といった観点から若干はずれているゲルマニウム検出器の改良に主な進展があった。本計画研究の鍵は、ゲルマニウム検出器と信号処理用 SOI 回路を接合するバンプ接合技術であり、今後 SOI 素子を様々な検出器と接合して活用する基礎を固めることであることを考えると、目的を達成したとは言いがたい。

【C01】

本計画研究では、Super KEKB と International Linear Collider (ILC) に必要となるピクセル毎に高度なデータ処理機能を持つ検出器の開発を目的とした。画素内に多数のメモリーを有し、ILC にビーム構造に特化した SOFIST を設計、製作し、基本的な動作を確認した。また、8 μm という最小のピクセルを実現した FPIX を開発し、0.7 μm の空間分解能を達成した。設計を担当する研究者の雇用の遅れはあったが、位置分解能、S/N 比、薄型化、時間測定、20 μm 角ピクセル等 ILC で要求されている性能が実現可能であることを実証した。

【C02】

本計画研究では、X 線自由電子レーザー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いダイナミックレンジをもつ 380 万画素の X 線ピクセル検出器 SOPHIAS を開発し、実用化することを目的とした。SOPHIAS 要求される大面積 (6.6 cm × 3 cm) の素子を製造するためには、ステッチングという技術を使用するが、製造業者の協力だけでなく、回路側もそれに合わせた設計が必要であった。それらの課題を克服して素子を完成させ、X 線自由電子レーザーや SPring-8 の多数の実験で実用化されたのは、高く評価する。また、A01 班や A02 班と協力して放射線材損傷の理解を進め、本計画研究で開発した検出器を D01 班に供給するなど新学術領域を有効に活用した。

【D01】

本計画研究では、CCD の 10 倍の速度で時間分解撮像・分光ができる高精細な X 線撮像素子の開発を目的とした。NMOS と PMOS トランジスタを合体させる Active Merge 技術を開発し、このクラスでは最小の画素となる 2,340 μm² を達成する素子を開発した。また、C02 班で開発された積分読み出し型 SOI センサーを放射光施設に導入し、結晶回折実験に利用するなど、領域内の交流を有効に活用した。

【D02】

本計画研究では、イオン位置と飛行時間を精密に測定するため、1 ns の時間分解能と 1 μm の空間分解能を有する素子の開発し、投影型イメージング質量分析装置に搭載することを目的とした。最終的に 1.4 cm × 1.5 cm の大きさの素子の動作確認まで達成できた。

【総合評価】

A01、A2、B01、C02 の計画研究は、当初の目的かそれ以上の成果を挙げているが、B02、C01、D01、D02 は、試作素子の性能を十分に測定するまで至っておらず、目的を完全に達成しているとは言いがたい。一方で、様々な分野の研究者が集いながらも、各計画研究班がそれぞれ得意な分野において他の計画研究班を助けることで、新学術領域の効果を高めながら順調に研究を進めたことは、新学術領域の目的に沿っており高く評価できる。今後も交流を継続することで、SOI 技術のさらなる発展に寄与することを期待する。