

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月12日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2012

課題番号：21244040

研究課題名（和文） SOI技術による高レート実験用薄型ピクセル検出器の研究

研究課題名（英文） Research on Thin Pixel Detector with SOI Technology for High-rate Experiments

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

研究成果の概要（和文）：本研究では、Silicon-On-Insulator (SOI)技術を用い、50 ミクロン程度まで薄くでき、100 万以上の画素数を持つピクセル放射線検出器(SOPIX)を開発した。またこの検出器を用いて、実際に加速器ビームを照射し、数ミクロンオーダの位置精度が得られる事を実証した。さらに、荷電粒子やガンマ線を用いた放射線耐性試験を行い詳細なデータを得ると共に、シミュレーションによりそのメカニズムを解明し、放射線耐性の向上の為にプロセスの改良を行った。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we developed Silicon-On-Insulator (SOI) pixel radiation detectors (called SOPIX) which can be thinned to 50 um and have more than 1 Mega pixels. We have demonstrated the resolution of a few micron by doing accelerator beam test. In addition, we performed radiation tolerance test of the detector and made simulations to study its mechanism, and improved the tolerance by changing the process.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2011年度	13,800,000	4,140,000	17,940,000
2012年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
総計	30,900,000	9,270,000	40,170,000

研究分野：高エネルギー加速器実験

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：Silicon On Insulator, Pixel 検出器、素粒子実験、半導体超微細化、放射線

1. 研究開始当初の背景

SuperKEKB や ILC, SuperLHC 等、次世代の大型加速器実験では、ボトム粒子やチャーム粒子の崩壊の様子を精密に測定する事が重要である。この為には位置分解能が良い

事はもちろんの事、高強度ビームでもデータを失う事なく測定出来る高速性・機能性と、多重散乱を抑える為出来るだけ物質量を減らした薄型の検出器が必要である。

現在のピクセル検出器の多くは、センサーとエレクトロニクスを別々に製造し、その後

バンプボンディングにより結合したハイブリッド型検出器であるが、接合に用いられるインジウム等のバンプのため、位置分解能が制限され、物質量も多い。最近では、CMOSプロセスを用いた Monolithic Active Pixel Sensor (MAPS) といった検出器も開発されているが、速度が遅く回路の制限も大きいと言う欠点を持つ。

感能領域の厚い Si センサーとエレクトロニクスを一体化させることは、放射線検出器開発者の長い夢であるが、放射線検出には高純度・高抵抗の半導体が必要で、低電圧で不純物濃度の高い LSI プロセス技術と一体化させることは難しかった。

2. 研究の目的

本研究では Silicon-On-Insulator (SOI) 技術を用い、粒子検出器と読出しエレクトロニクスを一体化した Pixel 検出器の開発を目指す。これにより従来よりも、高レート、高バックグラウンド化でも動作する、高分解能、薄型の荷電粒子検出器を実現し、素粒子実験の飛躍的な発展を計る。

3. 研究の方法

SOI とは二つの Si 層を薄い SiO₂ の絶縁層を挟んで貼り合わせたもので、浮遊容量を大幅に減らせ、素子間の完全分離が出来る事から、高速・低電力の素子を実現する次世代 LSI 技術として期待されているものである。すでに 90 年代後半より、高性能プロセッサや超低消費電力向け LSI に実用化されている。

SOI LSI では、埋め込み酸化膜 (BOX: Buried Oxide) の上の数十~数百 nm 厚さの Si 層しか回路として使用しておらず、BOX 下の厚い Si (数百 μm) は単なる物理構造物となっている。下部 Si に高純度ウエハーを使用し、BOX 層に穴を開け、p-n 接合を形成し放射線センサーとしての機能を持たせ、上部 LSI 回路と接続することにより、従来にない小型・高性能なインテリジェント・センサーを実現することが出来る。図 1 に SOIPIX の概要を示す。

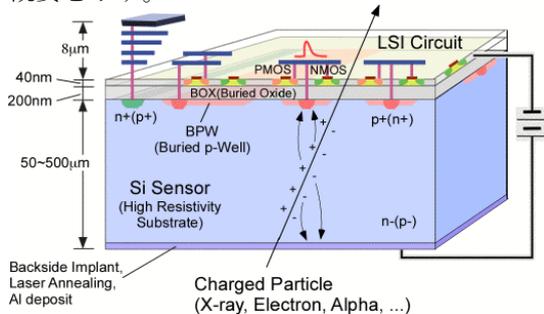


図 1. SOI ピクセル検出器の概要図。

4. 研究成果

図 2 に開発した検出器と読み出しボードの写真のひとつを示す。写真の上部にあるのが INTPIX4 という名で呼んでいる検出器で、ピクセルサイズは 17μm x 17 μm、画素数 512 x 832 (43 万)、検出器サイズ 10mm x 15mm のものである。



図 2. SOI 検出器 (INTPIX4) と読み出しボード (SEABAS) の写真。

読み出しボード (SEABAS: SOI Evaluation Board with SiTCP) は 2 つの FPGA を備え、データは Ethernet 経由で PC に送る事が出来る。

図 3 は図 2 の検出器を使用し、CERN の SPS 加速器からの 120 GeV/c (pi+, p, K+) ビームを用いて測定した結果の一例で、位置分解能 sigma=3.2μm を達成している。

また図 3 は、高エネルギーの X 線を入射し Si 検出器内でコンプトン散乱を行って出て来た電子の軌跡である。SOIPIX の高分解能のお陰で、写真乾板のような高分解能が実現出

来ている事がわかる。

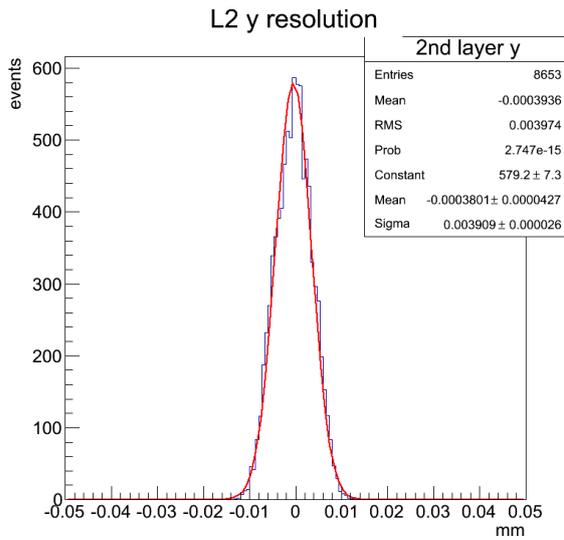


図 3. CERN SPS 120 GeV/c (π^+ , p, K^+)ビームを用いて行った実験結果。位置分解能 $\sigma = 3.2 \mu\text{m}$ を達成。

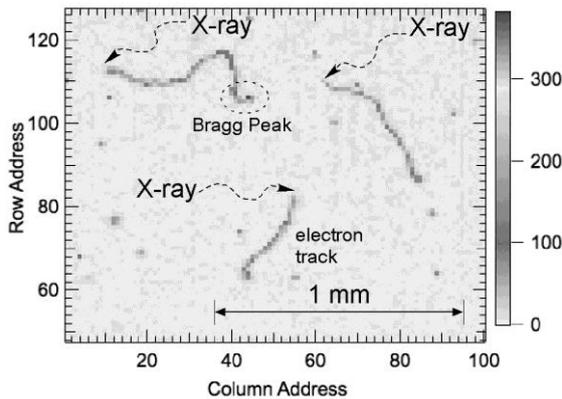


図 4. 高エネルギー X 線を入射した際に得られた、コンプトン電子の軌跡。

SOIPIX の特徴であるセンサーと回路が近接しているという点は、一方では SOIPIX の弱点ともなっている。センサーと回路がすぐ近くに有る事で、クロストークが起こりやすくなり、センサーにかけた高電圧が回路側のトランジスタの動作に影響したりする。また、間にある絶縁体 (SiO_2) 中に放射線によりホールがトラップされ、やはりトランジスタの動作に影響を与えてしまう。

これらの問題を解決するため、我々はさらに Si 層を増やし 3 層構造にした Double SOI ウエハーを開発した。この断面図を図 5 に示す。センサーと回路の間にさらに 1 層増やす事により、上記の様な問題が解決され、放射

線に対しても 10Mrad (Si) 程度まで動作する見込みが得られた。

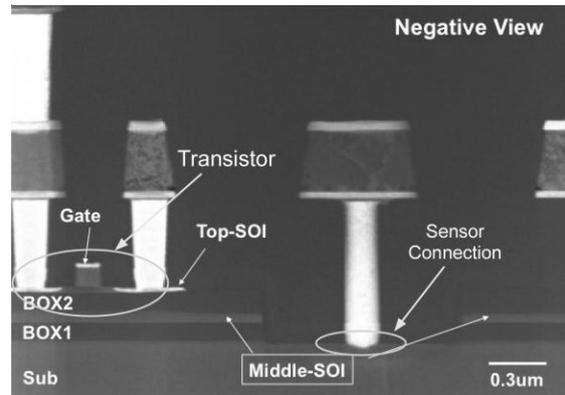


図 4. Double SOI 構造の断面図。Top-Si と Substrate の間に Middle-SOI 層が設けられ、この層の電位を制御する事が出来る。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① Ayaki Takeda, Yasuo Arai, et al., "Design and Evaluation of a SOI Pixel Sensor for X-ray Trigger-driven Readout", IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. PP, Issue 99, 2013. doi: 10.1109/TNS.2012.2225072. 査読有。
- ② K. Shinsho, K. Hara, Y. Arai, T. Miyoshi, et al., "Development of FD-SOI Monolithic Pixel Devices for High-Energy Charged Particle Detection", IEEE Nuclear Science Symposium CR N21-1, 査読なし, Valencia, Spain Oct. 25, 2011.
- ③ Yutaro Sato, Yasuo Arai, et al., "SOI Readout ASIC of Pair-monitor for International Linear Collider", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 10.1016/j.nima.2011.02.063, Vol. 637, Issue 1, May 2011, pp. 53-59. 査読有。
- ④ Y. Arai, T. Miyoshi, Y. Unno, T. Tsuboyama, K. Hara, et al., "Development of SOI Pixel Process Technology", Nucl. Instr. and Meth. doi:10.1016/j.nima.2010.04.081. Vol. 636, Issue 1, Suppl. 21 April 2011, Pages S31-S36. 査読有。
- ⑤ T. Miyoshi, Y. Arai, T. Tsuboyama, Y. Unno, et al., "Performance study of SOI monolithic pixel detectors for X-ray application", Nucl. Instr. and Meth. A, Vol. 636 (2011)pp. S237-S241, doi:10.1016/j.nima.2010.04.117. 査読有。
- ⑥ M. Kochiyama, K. Hara, Y. Arai, T.

- Miyoshi *et al.*, "Radiation effects in silicon-on-insulator transistors with back-gate control method fabricated with OKI Semiconductor 0.20 μm FD-SOI technology", Nucl. Instr. and Meth. A, Vol. 636, Issue 1, Suppl. 21 April 2011, pp. S62-S67, doi:10.1016/j.nima.2010.04.086. 査読有。
- ⑦ Y. Arai, T. Miyoshi, K. Hara *et al.*, "Development of SOI pixel process technology", Nucl. Instr. and Meth. A, Vol. 636, Issue 1, Suppl. 21 April 2011, Pages S31-S36. doi:10.1016/j.nima. 査読有。
- ⑧ Y. Arai, T. Miyoshi, Y. Unno, T. Tsuboyama, K. Hara, *et al.*, "Developments of SOI Monolithic Pixel Detectors", Nucl. Instr. and Meth. A 623(2010)186-188, doi:10.1016/j.nima.2010.02.190", 2010, 査読有。
- ⑨ K. Shinsho, K. Hara, Y. Arai, T. Miyoshi, *et al.*, "Evaluation of Monolithic Silicon-On-Insulator Pixel Devices Thinned to 100 μm ", IEEE Nuclear Science Symposium CR N23-2, Knoxville, Tennessee, Oct. 30-Nov.6, 2010. 査読無。
- ⑩ K. Hara, Y. Arai, T. Miyoshi *et al.*, "Development of INTPIX and CNTPIX Silicon-On-Insulator Monolithic Pixel Devices", Proceeding of Science (VERTEX2010) 033, Loch Lomond, UK, June 6-11, 2010. 査読有。
- ⑪ Y. Arai, T. Miyoshi, K. Hara *et al.*, "Development of SOI monolithic pixel detectors", Nucl. Instr. and Meth. A Vol. 623, pp. 186-188, doi:10.1016/j.nima.2010.02.190", 2010, 査読有。
- ⑫ Yasuo Arai, Toshinobu Miyoshi, Ryo Ichimiya, Kazuhiko Hara, Yoshiyuki Onuki, "Integrated Radiation Image Sensors with SOI technology", SOI Conference, 2010 IEEE International doi: 10.1109/SOI.2010.5641403, Page(s): 1 - 5, 2010, 査読無。
- ⑬ Y. Arai, "Vertical Integration of Radiation Sensors and Readout Electronics", 15th Mediterranean Electromechanical Conference, Melecon 2010, Valletta, Malta, 25-28 April, 2010, pp. 1062-1067, 2010, 査読無。
- ⑭ Yasuo Arai and Toshinobu Miyoshi "Silicon-on-insulator technology enables next-generation radiation image sensors", 5 August 2009, SPIE Newsroom. <http://spie.org/x36212.xml?highlight=x2414&ArticleID=x36212>, DOI: 10.1117/2.1200907.1725., 2009, 査読有。
- ⑮ K. Hara, Y. Arai, T. Miyoshi, *et al.*, "Radiation Resistance of SOI Pixel Devices Fabricated with OKI 0.15 μm FD-SOI Technology", IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol.56-5, 2896-2904 (2009). 査読有。
- ⑯ Y. Arai, "New Techniques in SOI Pixel Detector", 2009 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Conference Record, N22-2, pp. 1161-1164. doi: 10.1109/NSSMIC.2009.5402397, 2009, 査読無。
- ⑰ R. Ichimiya, Y. Arai, *et al.*, "Reduction techniques of the back gate effect in the SOI Pixel Detector", Proceedings of Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP-09), 21-25 Sep. 2009, CERN-2009-006, pp. 68-71, 査読無。
- [学会発表] (計 28 件)
- ① T. Miyoshi, "Monolithic pixel detectors with 0.2 μm FD-SOI pixel process technology", 13th Vienna Conference on Instrumentation (VICI2013), Vienna, Austria. 2013年2月 11-15日。
- ② 本多俊介: 2層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器のTID放射線耐性の評価, 日本物理学第68回年次大会 (2013年3月26日-29日), 広島大学。
- ③ 三好敏喜: 2013年3月27日、広島大学、日本物理学会年次大会、27pHD-14、FZおよび2重SOIウエハを用いた放射線ピクセル検出器の特性評価、実験核物理領域。
- ④ 新井康夫: 2013年3月22日、名古屋大学、電気学会、3-S25-2「SOI技術による1チップ放射線イメージセンサーの開発」、放射線計測とそのネットワーク化の取り組み' シンポジウム、招待講演。
- ⑤ Yasuo Arai, "Advanced Radiation Image Sensors with SOI Technology", Sep. 25, 2012, IEEE Solid State Device and Materials, Kyoto, Invited Talk.
- ⑥ Y. Arai, "Progress of SOI Pixel Process", International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging, Sep. 2012, Inawashiro, Japan, Invited Talk.
- ⑦ T. MIYOSHI, "High-Resolution Monolithic Pixel Detectors in SOI Technology", International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging (PIXEL2012), Inawashiro, Japan. 2012年9月3-7日。
- ⑧ Y. Ono, "Development of the Pixel OR SOI Detector for High Energy Physics Experiments", International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging (PIXEL2012), Inawashiro,

- Japan. 2012年9月3-7日。
- ⑨ T. Miyoshi, "X-Ray Detection Using SOI Monolithic Sensors at a Compact High-Brightness X-Ray Source Based on Inverse Compton Scattering", 2012 IEEE Nuclear Science Symposium, Anaheim, CA, USA. Nov. 2012.
- ⑩ 三好敏喜: 2012年3月27日、関西大学、日本物理学会年次大会、27aFB-5、「SOI技術を用いた積分型ピクセルセンサーの基本特性評価」、素粒子実験領域。
- ⑪ 小野善将: 2012年3月27日、関西大学、日本物理学会年次大会、27aFB-6、「高エネルギー加速器実験に向けてのSOI検出器PIXOR1の試験評価」、素粒子実験領域。
- ⑫ K. Hara, K. Shinsho, "Development of FD-SOI Monolithic Pixel Devices for High-Energy Charged Particle Detection", IEEE Nuclear Science Symposium, Valencia, Spain Oct. 25, 2011.
- ⑬ Y. Arai, "SOI Pixel Technology", The 8th international "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD-8), Dec. 5-8, 2011, Taipei, 2011, 招待講演。
- ⑭ 新庄康平: CZ及びFZ型SOIウェハを用いた一体型ピクセル検出器の放射線耐性の評価 日本物理学会2011年秋季大会(2011年9月16日-19日), 弘前大学。
- ⑮ 新庄康平: 高エネルギー荷電粒子検出用SOIピクセル検出器の開発 日本物理学会第67回年次大会(2012年3月24日-27日), 関西学院大学。
- ⑯ K. Shinsho and K. Hara, "Evaluation of Monolithic Silicon-On-Insulator Pixel Devices Thinned to 100 μm ", IEEE Nuclear Science Symposium, Knoxville, Tennessee, Oct. 30-Nov. 6, 2010.
- ⑰ K. Hara, "Plans of the SOIPIX Collaboration", Invited Talk at VERTEX 2010, Loch Lomond, Scotland, UK, June 6-11, 2010.
- ⑱ 新庄康平: センサー部薄型化SOIピクセル検出器の陽電子ビーム照射試験 日本物理学会第66回年次大会(2011年3月25日-28日), 新潟大学。
- ⑲ 葛山浩教: 2011年3月27日、日本物理学会、27pGN-11、SOI pixel 検出器を用いた電子線飛跡再構成実験、素粒子実験領域。
- ⑳ 新庄康平: SOI技術を用いた読み出し一体型ピクセル検出器の開発(検出部ウェハの薄型化)日本物理学会2010年秋季大会(2010年9月11日-14日), 九州工業大。
- 21 新井康夫: 2010年7月23日、映像情報メディア学会研究会、'素粒子実験用TDCとSOI放射線イメージ検出器'、常翔学園大阪センター。招待講演。
- 22 新井康夫: 2010年3月22日、22pBA-6、'マイクロエレクトロニクスでつながるサイエンス'、素粒子実験領域、実験核物理領域、ビーム物理領域、領域10、宇宙線・宇宙物理領域合同シンポジウム、「測定器技術の革新でつながるサイエンスの横糸」招待講演。
- 23 瀬賀智子: SOI pixel 検出器におけるバックゲート効果の埋め込みPウェルによる抑制, 日本物理学会2009年秋季大会(2009年10月10日-13日), 甲南大学。
- 24 河内山真美: SOI技術を用いた読みだし一体型ピクセル検出器の開発(TCADによる放射線損傷の研究), 日本物理学会2009年秋季大会(2009年10月10日-13日), 甲南大学。
- 25 瀬賀智子: 埋め込みPウェル構造をもつSOI pixel 検出器の放射線耐性試験, 日本物理学会第65回年次大会(2010年3月20日-23日), 岡山大学。
- 26 河内山真美: SOIピクセル検出器における回路部トランジスタの放射線損傷評価(TCADによるシミュレーション), 日本物理学会第65回年次大会(2010年3月20日-23日), 岡山大学。
- 27 Mami Kochiyama and Tomoko Segal, "Radiation Effects in OKI SOI Pixel Devices", 7th International Symposium on Development and Applications of Semiconductor Tracking Devices, Hiroshima, Japan, Aug.29-Sep.1, 2009.
- 28 三好敏喜: 2009年9月28日、日本物理学会秋季大会(熊本大学)、'大面積化を目指した計数型X線SOIイメージセンサー(CNTPIX3)'、領域10。

[産業財産権]

○出願状況(計 4件)

名称:「半導体装置及び半導体装置の製造方法」

発明者:新井康夫、沖原将生、葛西大樹
権利者:高エネルギー加速器研究機構、Lapisセミコンダクタ(株)

種類:特許

番号:PCT/JP2011/055546、US13/583,409

出願年月日:2011年3月9日

国内外の別:国内及び国外

名称：「半導体装置」
発明者：新井康夫、葛西大樹、初井宇記
権利者：高エネルギー加速器研究機構、Lapis
セミコンダクタ（株）、理化学研究所
種類：特許
番号：特開 2012-80045
出願年月日：2010 年 10 月 6 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、沖原将生、葛西大樹
権利者：高エネルギー加速器研究機構、Lapis
セミコンダクタ（株）
種類：特許
番号：特願 2013-4017
出願年月日：2013 年 1 月 11 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：高エネルギー加速器研究機構、Lapis
セミコンダクタ（株）
種類：特許
番号：特願 2013-79859
出願年月日：2013 年 4 月 5 日
国内外の別：国内

〔その他〕
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)
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

(2) 研究分担者

坪山 透 (TSUBOYAMA TORU)
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・講師
研究者番号：80188622
原 和彦 (HARA KAZUHIKO)
筑波大学・数理物質科学研究科・准教授
研究者番号：20218613
三好 敏喜 (MIYOSHI TOSHINOBU)
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・助教
研究者番号：20470015

(3) 連携研究者

海野 義信 (UNNO YOSHINOBU)
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：40151956
一宮 亮 (ICHIMIYA RYO)
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・研究員
研究者番号：80435627
(H23)