

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24年 5月 31日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740136

研究課題名（和文） 素粒子物理学実験 Belle2 実験のための SOI 検出器を用いた放射線試験

研究課題名（英文） Radiation test of SOI detector for the particle physics experiment Belle2

研究代表者

小貫 良行 (ONUKI YOSHIYUKI)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：40415120

研究成果の概要（和文）：

Silicon On Insulator (SOI) 技術を用いた半導体放射線位置検出器の様々な放射線試験を遂行した。2010年にX線を様々なSOI MOSFETへの照射実験を行い、埋め込み酸化膜直下に配したBPW (Buried P-Well)が放射線耐性を向上させることを発見した。同年に東北大学電子光学研究センターの陽電子ビームを用い、SOI検出器3層による飛跡再構成試験を実施しSOI検出器初の飛跡再構成に成功した。2011年には欧州原子核研究機構(CERN)において120GeVハドロンビームを用い、SOI検出器4層による飛跡再構成試験を実施し、固有位置分解能、検出効率などの素子としての評価を実施することができた。

研究成果の概要（英文）：

We had achieved various radiation tests with the semi-conductor radiation detector with Silicon On Insulator (SOI) technology. In 2010, we performed X-ray irradiation test on the various kinds of SOI MOSFETs. In this test, we found the BPW (Buried P-Well) underneath the SiO₂ insulator helps to increase radiation tolerance. In the same year, we succeeded first tracking of positron beam at the Research Center for Electron and Photon Science of Tohoku University with SOI detector which consists of 3 layers. In 2011, we also succeeded tracking of 120 GeV hadron beam at CERN with updated SOI detector which consists of 4 layers. Using the data, we evaluated the SOI detector, intrinsic resolution and detection efficiency and so on.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

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：素粒子物理・SOI・半導体検出器・シリコン・放射線検出器

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー加速器研究機構(KEK)の素粒子実験 Belle 実験は小林・益川理論を検証し、

ノーベル賞に大きく貢献した。次に同理論を超えた新物理現象発見を目指し、Belle2 実験が計画されている。素粒子実験から医療分野

まで広く応用されている現在のシリコン放射線検出器の製造技術では高抵抗の検出器用シリコンウェハの中に高性能な信号読み出し回路を実装することは不可能であった。そのためバンプボンディング技術を用いて別々に作った読み出し回路集積チップとピクセル検出器チップを機械接合する方式(ハイブリッド型)が用いられている。この方式ではピクセル数と同数のバンプソルダーが必要になり、工程数の増加、接合の不良率などのコストや技術的問題が検出器大型化の障害となっている。将来のピクセル高精細化の要求に対し、ソルダーの大きさが妨げになることも考えられる。そのため読み出し集積回路と検出器が単一チップで一体化された(モノリシック型)検出器の実現が全ての分野で切望されてきた。

2005年に高エネルギー加速器研究機構の測定器開発プロジェクトでSOI技術を用いた検出器開発が同機構の新井康夫教授を中心に始まった。

SOIは上部の非常に薄いシリコン層のみが利用されているが、絶縁層下の下部シリコン層を半導体センサーとして利用することで、信号読み出し集積回路とセンサー部が一体化した待望のモノリシック型検出器が実現可能である。また回路層のトランジスタ間の寄生容量が絶縁層で分離できるため高速動作までも見込まれる。更に、垂直方向に複数の回路層を積層できることから従来バックエンドに実装されるような高度な機能をオンチップで実装できる。これにより従来のCCDやハイブリッド型検出器とは比較にならないほど薄く、高速動作し、システム全体として非常にコンパクトな半導体放射線検出器の実現の可能性が出てきた。

2. 研究の目的

SOI検出器放射線耐性の評価試験の確立とSOI検出器を用いた高エネルギー荷電粒子ビームの飛跡検出試験の実施

3. 研究の方法

SOI検出器に放射線を照射するとノイズレベルが増えることが確認されている。これは検出器の構成回路素子であるSOI CMOSFETのゲート酸化膜及び埋め込み酸化膜中とその界面に放射線によって電荷が蓄積した影響だと考えられている。この電荷蓄積量の定量的測定法を確立することができれば、耐性向上の対策を講ずる上でその有効性の客観的指標となり、また、シミュレーションと照らし合わせることで放射線損傷の理解をより深めるが可能となる。

高エネルギー加速器研究機構物質構造研究所のX線照射装置を用いた放射線損傷測定システムの構築を行い、様々な種類のSOI

MOSFETに照射することで素子レベルでの放射線による影響の評価を行う。X線スリットを用いて十分に絞り、照射面にエネルギー校正されたPINフォトダイオードを設置してピコアンメータによって電流値を測定することで照射量を見積もる。照射前後でSOI MOSFETのIV特性を測定し照射量に対するトランジスタ動作閾値電圧変化量 ΔV_{th} を測定し、素子レベルで放射線耐性を評価する。

もう一つの目的である高エネルギー荷電粒子ビームの飛跡検出試験においては東北大の電子光理学研究センターの陽電子ビームを用いた飛跡再構成試験を初年度に実施する。その経験を生かし次年度にCERNの120GeVハドロンビームを用いてSOI検出器初の飛跡再構成と精密解析を行う。どちらもSOI検出器として積分型検出器のINTPIX3検出器を用いる。東北大陽電子ビームではINTPIX3検出器をビーム方向に3層に配置することで一つのビーム粒子が全層を通過して飛跡を残した事象の再構成を試みてSOI検出器初の高エネルギー粒子飛跡再構成を目標とする。CERNの120GeVハドロンビームテストではビームフラックスが大きいので高統計事象を得られやすく、またエネルギーも高いので多重散乱がINTPIX3の固有位置分解能に比べ無視できほど小さい。そこで検出器の基本的な特性量である、固有位置分解能の測定、及び高エネルギー粒子ビームの検出効率の定量的測定を目標とする。そのために検出器を1層増やした4層の検出器群を開発する。飛跡再構成は3層のみで行い、その飛跡の延長線上のもうひとつの1層でビームが検出しているかの効率(検出効率)を測定を行う。

4. 研究成果

2010年に高エネルギー加速器研究機構物質構造研究所のX線発生装置を使用し、様々な13種類のSOI MOSFETへの照射実験を行った。その試験の中で埋め込み酸化膜直下にBPW(Buried P-Well)を配した素子群とBPWが無い素子群とでX線未照射、60krad、200krad等量照射した素子のドレイン電流-ゲート電圧特性を測定したところ、BPWが無い素子群は60kradでトランジスタ動作閾値電圧変化量 ΔV_{th} が非常に大きくなり、ゲート電圧に関係なくドレイン電流が常に流れ続ける導通状態になった。その一方でBPWを配した素子群では ΔV_{th} が小さく200kradでも十分にトランジスタのスイッチ機能を果たしていることが判明した。これはBPWを有するSOI MOSFETでは放射線耐性が向上していることを意味する。この現象の素子レベルでの解釈として下記が考えられている。BPWによって埋め込み酸化膜にかかる電場が弱められ放射線によって埋め込み酸化膜中に

派生した電子-ホール対の再結合率が高まり、酸化膜界面の格子欠陥などで発生した準位にトラップされるホールが減少したと考えられる。つまり下部シリコン層にかけるバイアス電圧によって発生した電場が上部の回路層に影響しないようにすることで放射線耐性を向上できる可能性が出てきた。この結果を踏まえ、素子レベルで放射線耐性を向上される様々なアイデアが提案されて試作が続けられている。

同年 10 月に東北大電子光理学研究センターの 672MeV 陽電子ビームを用い、SOI 検出器 3 層による飛跡再構成実験を実施した。この実験には東北大を中心に、大阪大、筑波大、総研大、高エネ研から学生、研究者が参加し、SOI 検出器を用いた 3 層の飛跡再構成検出器を構築した。加速器のビーム供給時間 36 時間を使用し、約 53 万イベントの事象数を取得した。ビーム粒子の飛跡を直線と仮定して飛跡再構成を行った。得られた直線と各層とのヒット点位置のとの距離の分布である残差分布を求めたところ平均値約 $0\mu\text{m}$ を中心に偏差約 $20\mu\text{m}$ で分布するガウス分布に近い分布を得た。この偏差 $20\mu\text{m}$ はビームの多重散乱による効果と固有位置分解能による効果を含んだ測定誤差で、当初の予想値に矛盾の無い結果であった。また、飛跡再構成に使用した各層のビーム粒子ヒットエネルギーを確認したところ MIP 粒子に相当するエネルギーを最頻値とするランダウ分布が確認できた。この結果を踏まえ SOI 検出器初の高エネルギー粒子の飛跡再構成に成功したと結論した。

2011 年 10 月には欧州原子核研究機構 (CERN) において 120GeV ハドロンビームを用いた飛跡再構成実験を実施した。この実験では東北大を中心に筑波大、高エネ研からの学生及び、研究者が参加した。SOI 検出器は前年の 3 層から 4 層に増やし、データ読み出し系や各検出器間の時間同期を改善した。事象数は約 83 万を取得した。このデータを用いて飛跡再構成解析を行った。この実験で用いた INPIX 検出器はピクセルサイズ $17\mu\text{m}$ である。ビームエネルギーが高いため多重散乱による影響は固有位置分解能に比べ小さく無視できる。残差分布から前後の検出器層の分解能からの寄与を除く解析を行い、各層で固有位置分解能 $4\mu\text{m}$ 以下を得た。また 4 層のうち 3 層の検出器のデータだけを用いて飛跡再構成し、残りの 1 層にヒット点がある確率を解析して INTPIX 検出器の高エネルギー粒子検出効率 $95.12 \pm 0.27\%$ を得た。飛跡再構成に用いたヒット点の信号値とノイズ値の比である S/N は全ての検出器層で 20 を超えることが分かった。これらの定量的な結果から SOI 検出器が高エネルギー実験で十分に使用できる性能を有していることが判明した。

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 0 件)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 小野善将, “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”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学
- ② 小貫良行, “CERN120GeV ハドロンビームを用いた SOI ピクセル検出器のビーム試験”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日, 関西学院大学
- ③ 新庄康平, “高エネルギー荷電粒子検出器 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, 関西学院大学
- ④ 小野善将、小貫良行, “SOI 検出器におけるセンサー層の電荷収集”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 27 日, 新潟大学
- ⑤ 葛山浩教、小貫良行, “SOI pixel 検出器を用いた電子線飛跡再構成実験”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 27 日, 新潟大学
- ⑥ 小野善将、小貫良行, “SOI 検出器における X 線損傷 TID 効果の軽減に関する研究”, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 14 日, 九州工業大学

[図書] (計 1 件)

- ① 新井康夫、三好達也、一宮亮、小貫良行, 社団法人日本物理学会, 『日本物理学会誌第 65 巻第 9 号 実験技術「SOI 技術を用いた放射線イメージセンサーの開発」, 2010 年, 696-697

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小貫 良行 (ONUKE YOSHIYUKI)
東京大学・素粒子物理国際研究センター・
助教
研究者番号：40415120

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし