

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740137

研究課題名(和文)SOI技術を用いたピクセル崩壊点検出器の世界初の実用化に向けた研究

研究課題名(英文)Study of pixel vertex detector with SOI technology towards the first realization

研究代表者

石川 明正(Ishikawa, Akimasa)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40452833

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：PIXORと呼ばれる新たな読み出し機構を搭載したSOIピクセル検出器を世界で初めて製作しその性能を評価した。PIXORとは位置分解能を向上させつつ読み出しチャンネルを減らす画期的な読み出し機構である。最初に製作したPIXOR1チップを用いてX方向とY方向に同程度の電荷が収集されていることを発見し、PIXOR読み出しの核を実証した。また、PIXOR2のデジタル読み出し回路の性能評価を行い、Belle II 実験に使用する際に十分な機能と読み出し速度を持っていることを確認した。  
Belle II 実験での実用化が可能な否かを実証するためにPIXOR1とPIXOR2を元にしたPIXOR3を開発した。

研究成果の概要(英文)：Silicon-on-Insulator pixel detector which equips new readout scheme called PIXOR was developed for the first time, and was characterized. The PIXOR is a readout scheme to improve the position resolution and reduce the number of readout channel. We observed using the first chip PIXOR1 that almost same charges are readout by X and Y channels and prove the core of PIXOR readout scheme. We also checked digital readout circuit in PIXOR2 chip and confirmed that PIXOR2 has enough functionalities and readout speed to be used for Belle II experiment. PIXOR3 were developed based on PIXOR1 and PIXOR2 to check the chip is useful for Belle II experiment.

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：SOI 素粒子実験 半導体検出器 ピクセル検出器 崩壊点検出器 放射線測定器 Belle II 実験 フレーバー物理

### 1. 研究開始当初の背景

素粒子実験物理学(高エネルギー実験物理学)において、崩壊点検出器はヒッグス粒子崩壊などから生成される b,c クォークの同定の為、さらに b,c クォークでの CP 対称性の破れや稀崩壊による新物理探索研究の為に必須であり、その性能は物理結果に直結する。最新の高輝度加速器では高頻度の背景事象の影響を避けるために半導体ピクセル検出器を崩壊点検出器に用い占有率を低く保っている。

現在 LHC で使用されているピクセル検出器は、センサー部と読み出し回路を別に作り、機械的な金属バンプを用いて一体化したハイブリッド型である。ハイブリッド型は 1 寄生容量が大きいためノイズが大きい、2 多重散乱の原因となる物質が多い、3 バンプ金属によりピクセルを小さくできない、4 消費電力が大きく大規模なクーリングシステムが必要などのデメリットを持ち、精密測定を行う電子・陽電子衝突実験には適さない。

SOI ピクセル検出器はセンサー部と読み出し回路を SiO<sub>2</sub> 絶縁体層(Buried OXide 層:BOX 層)を挟んで張り合わせた構造を持つモノリシック型検出器である。センサー部、BOX 層、読み出し回路はそれぞれ 50 μm、数 100 μm、200nm、40nm と非常に薄く、そのシンプルな構造から寄生容量・物質質量・ピクセルサイズ・消費電力が小さいため、高エネルギー実験の崩壊点検出器として最適である。産業界において SOI 技術は高性能 CPU や LSI で実用化されているが、高エネルギー実験用の検出器としてはまだ開発段階であり、海外のグループの試みはまだ成功していなかった。

日本では大学と KEK による SOI コラボレーションを立ち上げ、ラピスセミコンダクタ社の協力を得て SOI ピクセル検出器の開発を行っていた。2011 年に東北大学では PIXOR と呼ばれる新読み出し機構を搭載した SOI ピクセル検出器を開発した。PIXOR とは Pixel OR の略で、n×n のピクセルマトリックスを行(Y 方向)と列(X 方向)のストリップとして読み出す方式を言う。これによりチャンネル数を n<sup>2</sup> から 2n に減らし、位置分解能を向上させながらも読み出しチャンネルを減らすことが可能になる。

理想的な SOI ピクセル検出器であったが、SOI 技術は放射線により BOX 層にホールが蓄積し、上部の回路層に影響を及ぼす back gate effect が問題となっていた。しかし、新たにシリコン層を BOX 層の間に挟み(この構造を Double SOI と呼ぶ)シリコン層に補償電圧をかけることにより BOX 層のホールが作る電圧を打ち消し、back gate effect を抑えることが可能である事がシミュレーションで明らかになった。しかし、実機での試験はまだであった。

### 2. 研究の目的

高エネルギー加速器実験で SOI 技術を用いたピクセル半導体検出器を実用化するための研究を行う事を目的とする。特に、新読み出し方式 PIXOR を採用した SOI ピクセル検出器の

- (1) 読み出し概念及び設計の試験
- (2) センサーと読み出し回路の統合試験
- (3) 読み出し速度の測定
- (4) 検出効率と位置分解能の測定

を行い、Belle II 実験での崩壊点検出器として十分な性能を持っているかを検証する。

### 3. 研究の方法

第一試作品 PIXOR1 チップは PIXOR 読み出し機構をテストするために、機能を分割した回路(TEG: Test Element Group)からなる。センサーから読み出すアナログ回路のみの TEG、デジタル回路のみの TEG などである。センサーの読み出しにはダイオードが使われるが、複数の読み出し方式のダイオードを用い、最適な回路を選ぶことができる。

PIXOR 読み出し方式では X 方向の読み出しと Y 方向の読み出しに同量の電荷が収集される事が重要である。<sup>109</sup>Cd からの X 線を複数の読み出し方式のダイオードが乗ったアナログ TEG に向けて照射し、信号を確認することで電荷収集が予測通りに行われているか、十分ノイズが小さいかを判断する。

また、デジタル TEG ではテストパルス信号を入力し、クロックと同期させ、遅延したトリガー信号と同期した場合にデータを取得する事を

上記の試験を Double SOI 構造の PIXOR1 についても同様に行い、特に回路がセンサー上に乗った Circuit-on-Sensor TEG で back gate effect が抑制されるかを確認する。

第二試作品 PIXOR2 チップはデジタル回路の機能を大幅に増強し、すべてに回路を Circuit-on-Sensor にし、それに伴いピクセルサイズを 25 μm×40 μm から 35 μm×70 μm と大きくし、さらに PIXOR1 では OR 数が 4 であったが 16 に増やすなど実際に使われる検出器を念頭に置いた設計である。特にデジタル回路では n×n のスーパーピクセル上にヒットのあったチャンネルのアドレスを FIFO に格納し、高速転送する機能を実装した。

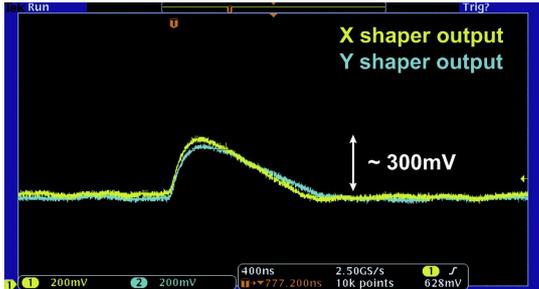
PIXOR2 を用いて現実的なデジタル回路の機能及びデータ転送時間の試験を行う。また、OR 数が増えたこととピクセルサイズが大きくなったことにより寄生容量が増え、ゲイン等のアナログ回路に影響があるかを調べる。

最後に PIXOR1 もしくは PIXOR2 を用いてビームテストを行い、検出効率と位置分解能の測定を検証する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 読み出し概念及び設計の試験

PIXOR1 のアナログ TEG を用いて  $^{109}\text{Cd}$  の X 線を照射、シェイパーからの出力をモニターし電荷が X 方向と Y 方向に同量分割されていることを確認し(以下の図) これにより読み出し概念が正しいことを実証した。また、シグナル波形から最適な読み出しダイオードを選択した。



PIXOR1 のディスクリミネータでクロストークが起きている事を確認しいくつかの対症療法により状況は改善したが、依然クロストークが起っていた。この状況を踏まえて、PIXOR3 ではクロストークを減らす設計を行った。

さらに PIXOR2 でのゲイン測定では PIXOR1 の 1/6 になっていることを確認した。これは SPICE シミュレーションで再現出来たので予定通りである。PIXOR3 ではゲインを増加させる設計を行った。

##### (2) センサーと読み出し回路の統合試験

Double SOI 構造の PIXOR1 を用いて 補償電圧をかけると back gate effect が抑制されシグナルが読めることを確認した。しかも X 方向と Y 方向で同量の電荷が読み出せた。これは Circuit-on-Sensor 構造で世界で初めてシグナルを検出したことになる。

##### (3) 読み出し速度の測定

PIXOR2 のデジタル回路にテストパルスを入力することにより、1 チャンネルのデジタル回路、 $n \times n$  のスーパーピクセル上の FIFO によるアドレス読み出し機能を検証し、正常に動作し、しかも Belle II 実験で実用可能な時間で読み出せることを確認した。

##### (4) 検出効率と位置分解能の測定

残念ながら CERN SpS はシャットダウン中であり、J-PARC も事故によりビームを出せない状況であった。位置分解能の測定に関しては電磁シャワーの起こらない高エネルギーのハドロンビームが理想的であるため、Fermilab でのビームテストを検討した。その結果、現地に SOI グループの人がいないため、仮に実験器具が壊れたり、航空便に問題があったりした場合に、現地で物品を借りられなく、ビームテスト自身が頓挫する可能性が指摘されたため、残念ながらビームテストは行わないことにした。

検出効率と位置分解能に関しては今後の

PIXOR3 を用いて復旧後の CERN SpS もしくは J-PARC で行う予定である。

#### 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 1 件)

Y.Ono, A.Ishikawa, H.Yamamoto, Y.Arai, T.Tsuboyama, Y.Onuki, A.Iwata, T.Imamura, T.Ohmoto, "Development of e Pixel OR SOI detector for high energy physics experiments", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 731 巻, 2013 年, 266-269. DOI:10.1016/j.nima.2013.06.044, 査読有

##### [学会発表](計 7 件)

坪山透, 「高輝度加速器実験のための素粒子イメージング」, 第 1 回「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」研究会, 2013 年 12 月 13 日, 京都大学

A. Ishikawa, 「SOI for the ILC. What is required.」, SOIPIX Collaboration Meeting, Krakow, Poland, 2013 年 5 月 7 日

Y. Ono, 「Development of PIXOR Tracking Detector.」, SOIPIX Collaboration Meeting, Krakow, Poland, 2013 年 5 月 7 日

篠田直之、小野善将、石川明正、山本均、新井康夫、坪山透、小貫良行、今村俊文、岩田穆、大本貴文、「Belle II 実験にむけた SOI 検出器: PIXOR の全体動作確認試験」, 日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、2013 年 3 月 26 日

小野善将、「高エネルギー実験のための SOI 技術を用いた PIXOR (Pixel OR) 半導体検出器の研究開発」, 日本物理学会 212 年秋季大会、2012 年 9 月 13 日

篠田直之、小野善将、石川明正、山本均、新井康夫、坪山透、今村俊文、岩田穆、大本貴文、小貫良行、「高エネルギー加速器実験に向けた SOI 検出器: PIXOR の全体動作確認試験」, 日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、2012 年 9 月 11 日

Y.Ono, A. Ishikawa, Y.Arai, T.Tsuboyama, Y.Onuki, T.Imamura, T.Ohmoto, A.Iwata, "Development of the Pixel OR SOI Detector for High Energy Physics Experiment", PIXEL2012, Inawashiro, 2012 年 9 月 4 日

##### [図書](計 0 件)

##### [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

[http://epx.phys.tohoku.ac.jp/~akimasa/P  
IXOR/](http://epx.phys.tohoku.ac.jp/~akimasa/P<br/>IXOR/)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石川 明正 (ISHIKAWA, AKIMASA)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：40452833

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：