

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04727

研究課題名(和文) 2重SOIを用いた連続測定用X線検出器の開発

研究課題名(英文) Development of X-ray detector for continuous measurement using double SOI

研究代表者

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・研究機関講師

研究者番号：20470015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：CMOS回路の性能を向上させる技術であるSOI(Silicon-on-insulator)技術を用いて、センサと回路が一体になったピクセル検出器を開発した。ピクセル回路には前段増幅回路が含まれている。開発上の問題となっている、センサと回路間のクロストーク低減のために、2重SOIウエハを使用した。2重SOIの上層を回路層とし、下層をシールド層とした。シールド層があることによって、前段増幅回路のゲイン低下を抑制することができた。このセンサではピクセル内2つの電荷保持領域を交互に切り替えて使うことができ、不感時間が短く、連続測定を必要とする応用研究に適用することができる。

研究成果の概要(英文)：We have developed pixel detectors including both sensor and circuit, using SOI (Silicon-on-insulator) technology which improves performance of CMOS circuit. The pixel circuit includes a preamplifier. To solve problems such as crosstalk between sensor and circuit, double SOI wafer has utilized. Top SOI layer was used as SOI-CMOS circuit and the bottom as a shield layer. The crosstalk at the preamplifier in the pixel circuit was suppressed by the middle SOI layer. The sensor has two storage capacitors in a pixel, and these can be alternately used. It helps to reduce readout dead time, and therefore the sensor can be used in various application research which requires continuous measurement.

研究分野：エレクトロニクス

キーワード：半導体 SOI X線 電子デバイス CMOS

1. 研究開始当初の背景

X線や高エネルギー荷電粒子の2次元位置情報を得るのにピクセルセンサが使われる。センサは半導体シリコンがよく使われるが、低い電圧で全体積を検出器として使用するためには高抵抗のウエハを使う必要がある。一方、LSI回路にもシリコンが使われるが、こちらは低抵抗のウエハが望まれる。現在流通しているシリコンセンサは回路とセンサを別々に作り、センサと回路を金属バンパで接合させる方法を用いている。我々の研究グループでは、絶縁膜上シリコン (silicon-on-insulator, SOI) ウエハを使って、回路とセンサを同じ製造ラインで一括製作するSOIセンサ開発プロジェクトを進めている。厚いシリコン層にセンサを形成し、薄いシリコン層に回路を形成し、必要な箇所を互いをサブミクロンの金属ビアで接合させる。数十ミクロンの金属バンパを必要としないのでトランジスタを配置できない接続部の占有率が低く、小さいピクセル内にも複雑な回路を形成させることができる。これらワンチップ型のピクセルセンサを実用化させようとしているが、開発上いくつかの課題がある。一つには、回路とセンサが近いことによるクロストークの問題がある。そこで、通常の(シングル)SOIウエハではなく2重に薄いシリコン層を持つ2重SOIウエハを用いたピクセルセンサの開発に着手した。実際に2重SOIウエハを用いたピクセルセンサ開発を開始し、デジタル回路においてクロストーク抑制効果を確認できた。研究開始当初は、デジタル信号特性については調査を進めていたが、センサ内で発生した信号の大きさを直接計測するアナログセンサ(積分型センサ)において重要なアナログ特性についてはまだ十分な検証がなされていなかった。また、積分型センサの実用化についてはいくつかの課題があるが、一つには、一定積分時間に蓄積された信号を読み出す、同期読み出し方法において、不感時間を極力無くすることが必須であった。たとえば、1万画素以上の積分型センサでも読み出しに数ミリ秒以上を要し、それが不感時間となっていた。

2. 研究の目的

1 ピクセル内に複数の電荷保持領域を持たせて、不感時間を無視できる程度までなくし、連続測定が可能で、ワンチップ型のピクセル検出器を開発する。具体的には、(1) CMOS回路の性能を向上させる技術であるSOI (Silicon-on-insulator) 技術を用いて、ピクセル内に高速処理回路を形成する。(2) SOI支持基板にセンサを形成させて、センサと回路が一体になったワンチップ型の検出器を作る。(3) 不感時間をなくすために、ピクセル内に複数の電荷保持領域を形成する。(4) 種々の問題を解決するために2重SOIウエハ

を用いる。

具体的には、ピクセルサイズを30ミクロン以下とし、市販の一般的なピクセル検出器よりも高解像度とする。画素数は1万画素以上、絶縁破壊電圧100V以上とする。電荷保持領域を2段以上搭載した積分型ピクセル検出器を、2重SOIウエハを用いて製作する。2重SOIを使うことで、SOIピクセル検出器開発の懸案であるバックゲート効果とクロストークを低減し、放射線耐性を強化できる。この検出器により、不感時間のない連続X線測定ができるようにする。完成後は、物性研究、高エネルギー物理研究に実用化しうるかどうかを検証する。

3. 研究の方法

2重SOIウエハを用いて積分型ピクセル検出器を製作する。研究目的で示した目標仕様を達成するために、最初の1年でシミュレーションだけでは把握できない諸問題をすべて洗い出す。2年目に本研究の目標仕様を満たす検出器を製作し、2年目後半から3年目にかけて、このピクセル検出器が高エネルギー物理実験や、物性実験に役立つ性能を持つことを実証する。

検出器のセンサおよび回路チップはLSIプロセスで製作し、センサチップはパッケージ上にワイヤーボンディングで実装される。パッケージを搭載するための専用基板を製作し、データ呼び出し基板(DAQ基板)に接続され、SOIピクセル検出器となる。データはイーサネットを介してPCに送られデータ取得できる。

チップ試作は、国内外、複数の研究者から複数のデザインを持ち寄る相乗りプロセス(マルチプロジェクトウエハラン)により行っている。

初年度は、最小のチップ大きさである2.9mm角に積分型ピクセル検出器を設計し製作する。製作の流れは(1)設計、(2)製作および試験準備、(3)試験となる。

(1) 設計(4月 6月)

これまでに試作したことがある回路を元に、ピクセル回路シミュレーションを行う。トランジスタのパラメータ最適化と、2重SOI面積サイズの最適化を行う。電荷保持領域が単一の時のピクセルサイズは20ミクロン以下であったが、電荷保持領域を増やすために、ピクセルサイズ26-30ミクロンまでサイズを大きくする。アナログ信号を読み出す"積分型"検出器のピクセル数は32x32ピクセル以上とする。通常の駆動回路、入出力回路に加え、いくつか回路パラメータの異なるピクセル回路を周辺に置き、比較試験を行えるようにする。これにより、2年目に採用する最適な回路を見つけ出すことができる。3か月で設計を完了させる。

(2) 製作および試験準備(7月 9月)

製作には3か月を要する。その間に、試験専

用基板をデザインし 1.5 か月で製作を行う。残り 1.5 か月で、過去に作成したプログラムを改造して試験用プログラムの開発を行う。

(3) 試験(10月 3月)

回路の正しい動作を確認する。2 電荷保持領域を交互に読み出すことで連続データ収集ができることを確かめる。2 重 SOI のシールド層の電位の固定有り無しにおける、クロストークの有無、高圧時の正常動作について調査する。

2 年目は、前年度の試験で決定したピクセル回路を用いて、最終仕様の積分型ピクセル検出器を製作する。画素数を 128 x 128 とする。開発の流れは前年度と同様、(1) 設計、(2) 製作と試験準備、(3) 試験となる。

(1) 設計

前年度の試験結果を反映させて、128 x 128 画素のピクセル検出器の設計を行う。もしも前年度の試験結果が思わしくない場合、ピクセル周辺に追加でいくつかの試験用ピクセル回路を設置する。

(2) 製作と試験準備

もしも前年度作成した試験基板に改良が必要となる場合、改良試験基板を製作する。画素数が増えるので、前年度に作成した試験用プログラムをさらに改造する。

(3) 試験

回路動作試験を行う。クロストーク効果と高電圧印可時の挙動を、2 重 SOI 層の電位固定のあり無しで比較する。放射光 X 線や X 線をを用いて、放射線感度調査を行う。さらなる応用研究を見据えて、アルファ線やガンマ線、高エネルギー荷電粒子検出試験等を行う。研究に大きな進展がありさらに大きい面積の試作検出器が必要な場合、運営交付金等所内の予算を用いて、ピクセル回路は同じだがさらに大きい面積の積分型ピクセル検出器を製作し応用試験を行う。

4. 研究成果

本研究期間における成果は主に以下の 3 つとなる。

(1) 2 重 SOI ウエハ仕様の確立

本研究申請時は 2 重 SOI ウエハのタイプは n 型であったが、本研究開発開始後にウエハ支給元が変わり、p 型を使用するようになった。そのため、レイアウトデザインを p 型仕様に変更した。また、当初は絶縁破壊電圧が 100V 以下であったので原因究明を行った。ピクセル部外周は高圧用リングおよびバイアス(0V 固定)リングでおおわれており、二つのリング間で電位変化が大きい。その間にはトランジスタがないため 2 重 SOI の中間層は不要だが、当初はそのまま設置されており、中間層の存在が電位分布に悪影響を及ぼし、絶縁破壊電圧が低下することが分かった。外周部におけるプロセスの改良を行った結果、

絶縁破壊電圧が、従来の SOI ウエハを用いたセンサと同程度にまで回復した。実際に絶縁破壊電圧を測定し、450V 前後まで向上していることを確認した。しかしながら、使用したウエハの抵抗率が 1kΩ と比較的 low、今回使用したチップの厚さは 300um であり、この場合の全空乏化電圧は計算上 500V 以上であり、全空乏化電圧下での使用、すなわち全体積をセンサとして使用することができないことがわかった。議論と交渉の結果、最終年度に使用ウエハについて、抵抗率 5kΩ 前後のものを使うことができるようになった。最終年度に製作したセンサについて電流電圧測定を行った結果、絶縁破壊電圧が 200V 以上であった。硬 X 線検出のためには 300um 程度の厚さは必要であり、その厚さのセンサを全空乏化下で動作させるには 200V かけられればよい。今回全空乏化動作の見込みが得られ、将来の実用化に向けて大きく前進した。結果として、本研究期間内に、2 重 SOI ウエハの製造およびプロセスの仕様を確立することができたと考えている。

(2) 積分型センサピクセル回路の性能向上

積分型センサでは前段増幅回路(電荷有感型)の正しい動作がキーポイントとなる。積分型センサを従来の(1 重)SOI ウエハ、2 重 SOI ウエハを用いて製作し、X 線源および X 線発生装置を用いて評価試験を行った。その結果、2 重 SOI ウエハを用いたセンサでは、従来の SOI ウエハを用いたセンサに比べて初段ゲインが 3 倍大きいことがわかった。これは、増幅回路における寄生容量が従来の SOI ウエハを用いた場合に大きく、増幅度を低下させているものと考えられる。また、それまでの積分型センサにおいては、リーク電流が -50 度の低温に下げても十分に低くならない問題が生じていた。この積分型センサの増幅回路では保護ダイオードが不要であり、リーク電流を測定した結果、保護ダイオードを用いた回路に比べてリーク電流が低くなる結果が得られた。この結果、リーク電流が低下しない原因の一つが、初段についている保護ダイオードからのリークであることがわかってきた。この二つの新しい知見により、積分型センサの低ノイズ化、高ゲイン化が進み、したがって SOI センサ開発研究が前進した。

(3) 連続測定用積分型ピクセル検出器の開発

研究期間内に、連続測定用積分型ピクセルセンサの製作を 3 回行った。マルチプロジェクトウエハランに参加しデザインを提出した。

1 回目の試作ではチップサイズ 4.45mm 角、ピクセルサイズ 30um 角、ピクセル数 88x88 の、積分型センサのデザインを行った。完成チップを汎用基板に実装し評価試験を行った。絶縁破壊電圧は 200V 以上で目標を達成

している。電荷保持領域をピクセル内に2段設置し、電荷蓄積と読み出しを交互に行う読み出しプログラムを製作した。2段蓄積回路動作に成功したが、基準電圧に差異があることを確認した。これは回路の寄生容量や抵抗が異なることから予期されたことであり、オフセット補正で解決できるものである。ゲインについては容量が大きく従来のセンサよりも低いことがわかったので、2次試作で修正を試みた。また、トランジスタのピクセル内配置によっては電荷収集効率や電荷分割の割合が変化し性能に影響を与えることがわかってきた。そのための修正も2次試作に反映させた。

2回目の試作もチップサイズ4.45mm角、ピクセルサイズ30um角、ピクセル数88x88とした。ゲイン低下、リーク電流増加対策を施し、不要な保護ダイオードを取り除き、ゲインを2段階に変更できるようにスイッチを追加した。ピクセル読み出し時間480nsとして、88x88ピクセルを読み出す時間は4ms弱になる。スイッチ制御による不感時間は1us以下でありほとんど無視できる。この場合、4ms周期の連続測定ができる仕様となっている。マルチプロジェクトウエハランに参加する場合は使用できる面積は予算と他の参加者数、専有面積との調整が入るので、1、2回目の製作時使用面積は4.45mm角にせざるを得なかった。性能評価を行うためにはこの程度のピクセル数減少について研究進捗に影響はない。本来ならば試作は年1回であったが、最終年度は3回目の試作の機会があり、その時には6mm角の面積を使用できたので、ピクセル数を128x128に増やした。この製作ができたことにより、当初の目標であった1万画素以上を達成することができた。

研究目標到達の度合いに関して、最終年度のプロセス中にウエハ状態変化があり規定値をオーバーし製作が止まり、復旧に時間を要したので完成が遅れてしまった。これは今回はじめて発生した予期せぬトラブルであり、結果として本計画の最終段階である応用試験まで未達であった。しかしながら、応用実験を行うためには特に追加の費用を必要としないので、本課題終了後も引き続き本研究を続けて、応用研究を進め、実用化に向けて本検出器を用いた測定システムの確立を目指す予定である。

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 3 件)

1. “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, T. Tsuboyama, M. Yamada

Journal of Instrumentation, Volume 13, February 2018, 査読有, DOI:10.1088/1748-0221/13/02/C02005

2. “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, R. Hamasaki

Journal of Instrumentation, Volume 12, February 2017, 査読有, doi:10.1088/1748-0221/12/02/C02004

3. “Advanced monolithic pixel sensors using SOI technology

Toshinobu Miyoshi, Yasuo Arai, Mari Asano, Yowichi Fujita, Ryutaro Hamasaki, Kazuhiko Hara, Shunsuke Honda, Yoichi Ikegami, Ikuo Kurachi, Shingo Mitsui, Ryutaro Nishimura, Kazuya Tauchi, Naoshi Tobita, Toru Tsuboyama, Miho Yamada
Nucl. Instr. And Meth. A, Vol. 824, 11, July 2016, Pages 439-442, 査読有, doi:10.1016/j.nima.2015.11.109

[学会発表](計 3 件)

1. 「積分型 SOI 放射線ピクセルセンサの開発」
三好 敏喜, 新井 康夫, 小野 峻, 倉知 郁生, 田内 一弥, 西村 龍太郎, 浜崎 竜太郎, 藤田 陽一, 山田 美帆
日本物理学会, 2018年3月22日-2018年3月25日, 東京理科大学

2. 「SOI 技術を用いた放射線イメージセンサの最近の進展 II」

三好 敏喜, 新井 康夫, 西村 龍太郎
応用物理学会, 2018年3月17日-3月20日, 早稲田大学

3. 「2層 SOI ウエハを用いた放射線イメージセンサ」

三好 敏喜, 新井 康夫, 西村 龍太郎, 他
SOIPIX グループ
日本物理学会, 2016年3月19日-2016年3月22日, 東北学院大学

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等 無し

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

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・
研究機関講師
研究者番号：20470015

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

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