

氏 名 武田 彩希

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1671 号

学位授与の日付 平成26年3月20日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Development of Advanced Pixel Detectors for X-ray
Astronomy with SOI Technology

論文審査委員 主 査 教授 幅 淳二
教授 新井 康夫
教授 羽澄 昌史
教授 海野 義信
教授 三好 敏喜
教授 鶴 剛 京都大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

X-ray astronomy is the one of the important research fields to understand the universe. The first X-ray detection in the universes other than the Sun was observed with the rocket by B.Rossi and R.Giacconi in 1962. X-ray astronomy has grown quickly since then.

As of 2013, three X-ray astronomical satellites, *Suzaku*, *X-ray Multi-Mirror Mission (XMM-Newton)*, and *Chandra*, are operated in the space. The standard imaging spectrometers of these modern X-ray astronomical satellites are X-ray Charge Coupled Device's (CCD). The X-ray CCD offers Fano limited X-ray spectroscopic performance with the readout noise of about 3 electrons. It allows us to do wide and fine imaging with the sensor size of 20 - 30 mm square and a pixel size of $\sim 30 \mu\text{m}$. However, it has some weakness. The most serious issue is a non-X-ray background (NXB) generated by high energy particles on orbit. Especially it has serious influence above 10 keV. The rate of the NXB is too high to study faint sources. Therefore, a low background detector is desired in the next generation. Moreover, time resolution is too poor to make fast timing study of time variable sources (e.g., millisecond pulsar).

Future X-ray astronomical satellite missions will require a new type of detectors that can distinguish X-rays and charged particle tracks, so as to reduce the background level. The new detector must have good coincidence time resolution ($\sim 50 \text{ ns}$), superior hit-position readout time ($\sim 10 \mu\text{s}$) in order to reduce the NXB by cosmic rays. By introducing an anti-coincidence method between the hit signal and the external active shield detector, the background produced by the cosmic ray tracks can be greatly reduced. This is particularly important for the observation of hard X-rays with energies above 10 keV. In addition, it must have wide bandpass (from soft to hard X-rays, 0.3 - 40 keV), and comparable performance in terms of imaging spectroscopy.

In order to realize the detector described above, we have been developing a new type of active pixel sensor (APS) called XRPIX based on the semiconductor pixel detector with the silicon-on-insulator (SOI) complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) technology. This new technology, i.e., SOI

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

pixel detector (SOIPIX), has been developed by High Energy Accelerator Research Organization (KEK) in recent years. Thereby, we designed "Event-Driven SOIPIX" with a trigger information output function as "XRPIX series". And we realize the spectroscopy system which reduce background rate of the NXB by two orders of magnitude compared with the CCD. Finally, we aim to employ the XRPIX in the next generation X-ray astronomical satellite.

The SOIPIX utilize a thick handle wafer of SOI structure as a radiation sensor to detect charged particles and X-rays. The SOI wafer is a bonding of two silicon wafers and a thin oxide film in between. Thus optimum resistivity can be selected for sensing part and circuit part respectively. By making contacts between top and bottom silicon through an oxide film, it becomes the detector which unify a sensor and readout circuitry. This is the reason that the SOIPIX is called "ideal" monolithic pixel sensor.

In this thesis, a new detector called XRPIX based on SOIPIX technology developed for future X-ray astronomical satellite mission is described. This detector has a voltage comparator circuit in each pixel. Therefore, it has a capability to output timing and a hit-position information simultaneously when X-rays and charged particles signal crosses the threshold voltage of the pixel. This function offers us new operation regime of "Event-Driven readout" which judges whether it is a "real X-ray signal" for every detection events.

XRPIX series has designed six devices of XRPIX1/1b/2/2b/3/3b until now. In each chip, Event-Driven readout and spectroscopic performance are tested and improved. The XRPIX2b has a middle size of sensing area (effective area is 4.6 mm sq., pixel size is 30 μm sq., number of pixels is 20 k) and succeeded in acquisition of the spectrum by Event-Driven readout mode. We think this is a world first detector realized this function. The event rate tolerance is over 1 kHz.

In view point of the spectroscopic performance, XRPIX3 achieved best performance in the SOIPIX detectors. It includes a charge sensitive amplifier in each pixel for the first time in the XRPIX series. The gain of X-ray responsivity is 17.9 $\mu\text{V}/e^-$. The readout noise is 33 electrons rms from the pedestal peak and the energy resolution is about 300 eV FWHM at 5.9 keV from

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

^{55}Fe radio isotope. Furthermore, XRPIX3 resolved Mn-K_α (5.9 keV) and Mn-K_β (6.4 keV) successfully for the first time in our series. Thereby, XRPIX reached the spectroscopic performance accepted as an X-ray detector.

In this study, I have done many basic studies for the XRPIX by using device and circuit simulators. Then I have designed many prototype chips and measured performance of the chips with X-rays. In addition, I have done cooling test of the detector and analyzed the source of the leakage current etc. Through these work, I think I can demonstrate the possibility of the XRPIX for future X-ray astronomy satellite missions.

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本論文は、**Silicon On Insulator (SOI)**と呼ばれる新しい半導体デバイス技術を利用した、**X線天文観測用の革新的なX線検出システム**の開発をテーマとしている。電磁波は様々な波長域で、天体からの多様な情報を提供しており、**X線**もそうしたプローブとして宇宙観測の重要な手段である。しかしながら、これまでの**X線観測装置**では、**10 keV**を超えるエネルギー領域では、荷電粒子のアクシデンタルな重畳などによる影響でバックグラウンドレベルが急速に上昇して、有意な観測が困難な状況であった。

こうした困難は、**X線測定装置**を従来の**CCD**などによる信号積分型から、全く新しい時間分解が可能なシステムへと発展させれば、解決することができる。こうしたシステムでは、外周を囲む荷電粒子の**VEITO**カウンタなどの情報を使って、重畳した現象を効果的に抑制することが可能となるからだ。そうした新型装置を可能とするデバイスとして、出願者は**CCD**にかわり**SOI**技術に基づく革新的なデバイスを開発することを本研究でおこなった。**SOI**技術による**X線センサー**の開発は**KEK**などにおいて、2006年ころより開始され展開が進められている。この技術では、集積回路 (**LSI**) をなすシリコン層は絶縁層 (**BOX**) の上に薄膜として形成され、**BOX**は独立したシリコン基板上に張り合わせられている。このシリコン基板を**X線センサー**として活用し上層**LSI**を高機能の信号処理回路として活用することで、多彩な機能を持つピクセル型の**X線センサー**が実現する。本研究ではそうした機能としてあらたに独創的な「イベント駆動」の方式を開発し、時分解**X線観測**が可能となるデバイスを完成した。

イベント駆動は、従来の**CCD**を利用した**X線検出システム**はもとより、これまでの**SOI**ピクセルデバイスでは実現することはできなかった。出願者は、それを独立コンパレータ回路によるセルフトリガー機能を新たに組み入れて、様々な回路構成を6世代にまたがるチップ (**XRPIX**シリーズ) の試作により最適化することで可能とした。こうした回路の設計、**LSI**への組み込み、試作デバイスの評価は出願者自らが行き、最終的には世界で初めてのイベント駆動型チップを完成、**30e**のノイズレベルと**5.9 keV**の**X線**に対して**FWHM**で**300 eV**のエネルギー分解能で、繰り返し**1kHz**の読み出し速度を達成した。

こうした開発成果は、すでに**IEEE**をはじめとする検出器技術関係の主要な国際会議でポスター及び口頭発表がなされており、高い評価がされている。本審査委員会では、本研究で出願者が開発したイベント駆動機能をもつ**X線ピクセルセンサー**の高い意義を認め、またその開発研究の成果をまとめた提出論文が、総合研究大学院の学位論文にふさわしい内容を持つものと、全会一致で認定した。

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本論文は、**Silicon On Insulator (SOI)**と呼ばれる新しい半導体デバイス技術を利用した、**X線天文観測用の革新的なX線検出システム**の開発をテーマとしている。電磁波は様々な波長域で、天体からの多様な情報を提供しており、**X線**もそうしたプローブとして宇宙観測の重要な手段である。しかしながら、これまでの**X線観測装置**では、**10 keV**を超えるエネルギー領域では、荷電粒子のアクシデンタルな重畳などによる影響でバックグラウンドレベルが急速に上昇して、有意な観測が困難な状況であった。

こうした困難は、**X線測定装置**を従来の**CCD**などによる信号積分型から、全く新しい時間分解が可能なシステムへと発展させれば、解決することができる。こうしたシステムでは、外周を囲む荷電粒子の**VEITO**カウンタなどの情報を使って、重畳した現象を効果的に抑制することが可能となるからだ。そうした新型装置を可能とするデバイスとして、出願者は**CCD**にかわり**SOI**技術に基づく革新的なデバイスを開発することを本研究でおこなった。**SOI**技術による**X線センサー**の開発は**KEK**などにおいて、2006年ころより開始され展開が進められている。この技術では、集積回路 (**LSI**) をなすシリコン層は絶縁層 (**BOX**) の上に薄膜として形成され、**BOX**は独立したシリコン基板上に張り合わせられている。このシリコン基板を**X線センサー**として活用し上層**LSI**を高機能の信号処理回路として活用することで、多彩な機能を持つピクセル型の**X線センサー**が実現する。本研究ではそうした機能としてあらたに独創的な「イベント駆動」の方式を開発し、時分解**X線観測**が可能となるデバイスを完成した。

イベント駆動は、従来の**CCD**を利用した**X線検出システム**はもとより、これまでの**SOI**ピクセルデバイスでは実現することはできなかった。出願者は、それを独立コンパレータ回路によるセルフトリガー機能を新たに組み入れて、様々な回路構成を6世代にまたがるチップ (**XRPIX**シリーズ) の試作により最適化することで可能とした。こうした回路の設計、**LSI**への組み込み、試作デバイスの評価は出願者自らが行き、最終的には世界で初めてのイベント駆動型チップを完成、**30e**のノイズレベルと**5.9 keV**の**X線**に対して**FWHM**で**300 eV**のエネルギー分解能で、繰り返し**1kHz**の読み出し速度を達成した。

こうした開発成果は、すでに**IEEE**をはじめとする検出器技術関係の主要な国際会議でポスター及び口頭発表がなされており、高い評価がされている。本審査委員会では、本研究で出願者が開発したイベント駆動機能をもつ**X線ピクセルセンサー**の高い意義を認め、またその開発研究の成果をまとめた提出論文が、総合研究大学院の学位論文にふさわしい内容を持つものと、全会一致で認定した。