

鎌田敬吾 (6217623@ed.tus.ac.jp)

幸村孝由, 萩野浩一, 大野顕司, 根岸康介, 鶴田翔哉, 古知武, 田中圭太, 林田光輝 (東京理科大学),

鶴剛, 田中孝明, 内田裕之, 原田颯大, 奥野智行, 佳山一帆, 天野雄輝 (京都大学),

武田彩希, 森浩二, 西岡祐介, 福田昂平, 日田貴照, 行元雅貴(宮崎大学), 松村英晃(IPMU),

新井康夫, 三好敬喜, 岸本俊二, 倉知郁生 (KEK), 北村尚, 濱野毅 (放医研), 他SOIPIGグループ

Abstract

我々は次世代のX線天文衛星搭載を目的とし、SOI技術を用いたX線半導体検出器XRPIXの開発を行なっている。

XRPIXを軌道上で運用した際、宇宙線による放射線損傷により性能が経時的に悪化するため、地上において、損傷による性能の変化を定量的に評価しておく必要がある。

これまでに我々はXRPIX2bという素子で放射線耐性評価実験を行ってきた。その後、センサー層と回路層の干渉を抑えエネルギー分解能などの性能向上を目的として、絶縁層にさらなるSi層を持つDouble SOI構造のXRPIX6Cを新たに開発した。XRPIX2bの際に、絶縁層にホールが溜まるTID効果によって損傷が引き起こされるという結果を得ているため、絶縁層の構造が異なるXRPIX6Cについて再度放射線耐性の評価を行う必要があった。

そこで今回我々は放医研HIMACにて、Double SOI構造を持つXRPIX6Cの陽子線損傷実験を行なった。その結果、軌道上約5年に相当する0.5kradに対しては、ゲイン、エネルギー分解能ともに変化は見られなかった。さらに損傷が進んだ9kradでは、ゲインの変化は最大でも3.5%の減少、エネルギー分解能は最大でも14.4%の増加という結果を得た。また、XRPIX2bの結果と比較したところ、XRPIX6CはDouble SOI構造の採用により、エネルギー分解能の面でSingle SOI型のXRPIX2bよりも放射線耐性に優れているという結果を得た。

XRPIX

XRPIXはSOI技術を用いたX線天文衛星用に開発された、CMOSイメージセンサーである。XRPIXはCCDと同様のエネルギー分解能を保持しつつ、トリガー情報出力により、~10 μ sの高い時間分解能の実現を目指している。今回、回路層とセンサー層の干渉を抑え、絶縁層にmiddle Siの新たな層を導入する、**Double SOI**技術を用いた新たな素子**XRPIX6C**が開発された。

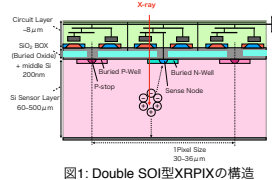


図1: Double SOI型XRPIXの構造

半導体検出器の放射線損傷

従来のX線天文衛星より半導体検出器を軌道上にて運用すると、宇宙線の影響で性能が時間に伴い悪化していくことが判明している。この原因としては、格子欠陥やTotal Ionizing Dose (TID) が考えられている。XRPIXも同様の損傷が考えられるため、地上において、損傷の影響の定量的評価が不可欠である。

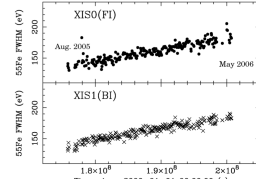


図2: XISの軌道上でのFWHM経時間変化

放射線耐性評価実験

Double SOI型の素子であるXRPIX6Cに対して陽子線照射を行い、放射線損傷の影響を評価した。以下に評価した素子や実験条件をまとめる。

表1: 評価用素子

素子	XRPIX 6C
空乏層厚	300 μ m
ピクセルサイズ	36 μ m \times 36 μ m
ピクセル数	48 \times 48 個
比抵抗	4 k Ω ·cm

陽子線照射中は、イベント駆動にてXRPIXを駆動。損傷量ごとに測定を行い、性能に変化が見られるか調べた。また、middle Siに印加する電圧を再調整することで、性能が損傷前と同程度に戻るかを調べた。

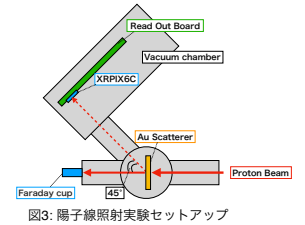


図3: 陽子線照射実験セットアップ

表2: Proton照射条件

場所	放医研 HIMAC
Proton エネルギー	6 MeV
照射中バックバイアス	250 V
照射時middle Si印加電圧	2.5 V
回路層側から照射	

実験結果

本実験前にあらかじめ、軌道上での損傷量をシミュレーションしている。シミュレーション条件は表の通り

表3: 軌道上環境のシミュレーション条件

高度	550 km
軌道傾斜角	31 deg
軌道換算吸収線量	83.3 rad/year

エネルギースペクトル

性能評価は⁵⁵FeのX線を素子の回路側から照射して行った。Single Pixel Event のエネルギースペクトル 200Ch の付近のピークが⁵⁵FeのMnKaの特性X線である。損傷により、ゲインが下がっていくことが確認できる。

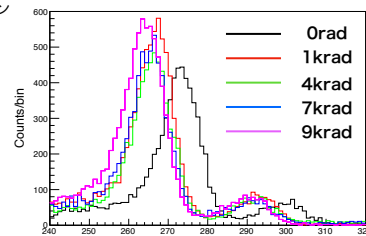


図4: Vbb 250V での⁵⁵Feのエネルギースペクトル

リーク電流

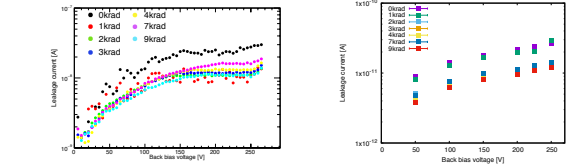


図5: 照射量ごとのI-V特性 左:ソースメーター、右:計算値

0rad, 1krad, 9kradとその他がそれぞれ異なる日のデータであり、単純な増加傾向は見られない。3°Cほど温度に揺らぎがあったと考えられる。2krad~7kradでは単調に増加しており、Vbb 250Vでは2kradから7kradで9.5%増加、4000radでようやく有意な差が見えるが0.7%の増加でしかない。

ゲイン

⁵⁵FeのMnKa (5.895keV)のピークを中心値から評価

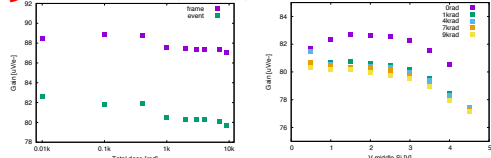


図6: ゲインの損傷量変

ゲインは損傷に伴い減少していく傾向が見られる。軌道上約5年相当の0.5krad損傷後のゲインは損傷前に対し1%の範囲で変化していない。より損傷が進むとゲインは減少しているが、その変化量は9kradのフレーム読み出しで最大でも1.5%、イベント駆動で最大でも3.5%であった。middle Siの電圧値に対しては2.5Vで極大という分布に変化はなかった。

エネルギー分解能

⁵⁵FeのMnKa (5.895keV)のピークのFWHMで評価

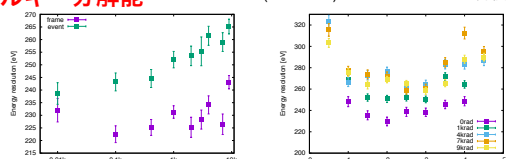


図7: エネルギー分解能の損傷量変

軌道上約5年相当の0.5krad損傷後はエネルギー分解能もほとんど変化していない。9krad損傷後のエネルギー分解能が増加しているが、その変化量はフレーム読み出しで最大で8.1%、イベント駆動では最大で14.4%であった。middle Siの電圧値に対しては2.5V付近で極小という分布に変化はなかった。

Single SOIとDouble SOIの放射線耐久性能の比較

かつてSingle SOI型であるXRPIX2bにおいても同様の実験を行なっている。XRPIX2bでは絶縁層内にmiddle Si構造を持たない構造となっている。また、XRPIX2bはセンサー層にn型Si, XRPIX6Cはp型Siを用いている。ここではXRPIX2bの際の結果と、本結果を比較する。

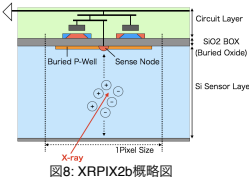


図8: XRPIX2b概略図

ゲインの変化量比較

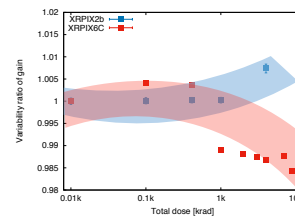
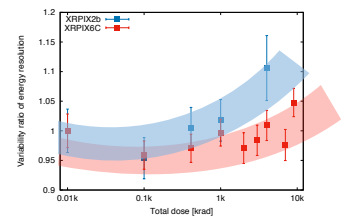


図9: XRPIX2bとXRPIX6Cの性能比較。0radでの性能を1と規格化している。

エネルギー分解能の変化量比較



- ゲインの変化量は4krad損傷後で比較すると、Single SOIのXRPIX2bは+0.7%に対し、Single SOIのXRPIX6Cは-1.3%であった。
- エネルギー分解能は、4krad損傷後で比較すると、XRPIX2bは最大で16.1%に対し、XRPIX6Cでは最大でも3.4%程度であった。
- 波高値が飽和したピクセルは、XRPIX2bはほぼ全てのピクセルが飽和したが、XRPIX6Cは9krad照射後も10%程度に抑えられていた。
- 以上のことからXRPIX2bに比べ、新規に開発した**XRPIX6Cの方が放射線に対する耐久性が高い**と考えられる。

まとめ

- 放医研HIMACにおいてDouble SOI型のXRPIX6Cの陽子線損傷実験を行なった。
- 軌道上約5年相当の0.5kradでは、ゲインやエネルギー分解能に変化は見られなかった。
- 9kradまで損傷すると性能に変化が見られたが、変化量は0radに対してゲインは最大でも-3.5%、エネルギー分解能は最大で14.4%程度であった。
- Single SOI型のXRPIX2bとDouble SOI型のXRPIX6Cの放射線損傷実験の結果を比較すると、4krad照射後のエネルギー分解能について、XRPIX2bは16.1%の増加に対し、XRPIX6Cでは最大でも3.4%程度の増加と、Double SOI構造による放射線耐性の向上が確認された。

関連講演

P-026, P-028, P-061, P-063
もご覧ください。