

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18635

研究課題名（和文）新素材半導体を用いた高放射線耐性量子検出器の開発

研究課題名（英文）Development of a high radiation tolerant detector with new semiconductor materials.

研究代表者

外川 学（Togawa, Manabu）

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・准教授

研究者番号：50455359

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：放射線耐性を飛躍的に上げた半導体検出器の候補として、CIGSとGaNを用いた半導体検出器を開発した。両検出器とも400 MeV/nのXe粒子を照射し、単一のXe粒子を検出することに成功した。CIGS検出器はXeビームによる放射線損傷で出力が低下したが、熱アニールによる回復を確認し、放射線損傷に対する回復機能を持つ粒子検出器として製造可能であることを示した。2年目には、厚さ2 μ mのCIGS検出器にXeイオンを最大0.8MGyまで照射し、130 $^{\circ}$ Cの熱処理で出力がほぼ初期まで回復することを確認した。GaNについては、GaNストリップ検出器でXeイオンを検出することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は、新素材半導体を用いて、量子イメージング（可視化）に欠かせない半導体検出器（カメラ）の耐放射線能力を飛躍的に上げ、高放射線環境下での量子イメージングに革新を起こすことである。これにより、素粒子標準理論を超える新物理探索のための次世代高強度加速器実験や、福島原発の格納容器周辺で10年以上動作するカメラの開発が可能となる。また、放射線損傷が大きい重粒子測定において、今まで識別できなかった特に重い粒子識別を可能にし、原子核実験の新たな地平を切り拓く。放射線医療における三次元スキャニング照射機器においては、照射精度の飛躍的向上と、早い応答により治療期間を劇的に短縮させる。

研究成果の概要（英文）：For the particle detector in high radiation environment, we have developed new semiconductor detectors by the CIGS and GaN. Both detectors were tested with the 400 MeV/n Xe beam and can detect single Xe particle. The outputs from the CIGS detector reduced by radiation damage with Xe beam, while it was recovered by heat annealing. It is a great step to confirm the CIGS semiconductor can be made as a particle detector with the recovery feature for the radiation damage. At 2nd year, the 2- μ m thick CIGS detector were irradiated by Xe ions, up to 0.8 MGy. The repetition about recovery is confirmed. The heat annealing has temperature dependence and it seems there is sharp changes between 90 and 130 deg. C. For GaN, the GaN strip detector successfully detected the Xe ion. This will be optimized based on this result.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：半導体検出器 放射線耐性 ワイドギャップ半導体 重イオンビーム

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、世界最高エネルギーの陽子衝突実験である LHC-ATLAS 実験を行っており、高輝度 LHC 実験で用いるシリコンピクセル検出器のアップグレードを行なっている。この検出器で最も重要な開発要素は放射線耐性で、現行実験の 10 倍の放射線量への耐性が必要となる。現行検出器では劣化に耐えきれず、実験遂行に必要な性能を維持できない。シリコン検出器の劣化は、シリコン原子核を叩き出すことによる格子欠陥で主に引き起こされ、その確率は結晶の結合状態で決まることから避けることができない。高輝度 LHC 用シリコン検出器は放射線損傷を前提に、電極を立体的にすることで、検出器内で生成される電子の移動距離を短くするなど、半導体の新構造で耐性をあげることに成功したが、不感領域があること、歩留まりが悪いことなど課題が残る。将来提案されている、更に高エネルギー、高輝度の陽子衝突実験では、現行の 100 倍以上の放射線量が見込まれ、その非常に厳しい放射線量下を想定し、新素材半導体検出器を視野に入れ始めていた。

その時、領域代表者が参加した、若手で構成するオープンイノベーションを目指した TIA-EXA の集まりで、高放射線耐性に着目した新素材半導体の研究を行なっている、産総研、NIMS、筑波大の研究者らと出会い、議論したことで、原子炉内作業ドローン開発に向けた放射線耐性カメラ、駆動素子開発を着想し、陽子照射実験などの共同研究を実施した。

また、理研の研究者から、世界最高強度の重粒子加速器実験 RIBF のビームライン検出器として半導体検出器が利用可能か議論を始めていた。生成される原子核は様々であるが、例えば錫粒子の場合、放射線損傷は単荷電粒子（陽子、電子など）に比べて約 2,500 倍と大きいため、今までガス検出器などを使ってきた。より高精度で位置測定が可能な半導体検出器にすることで、原子番号 60 を超える重粒子の識別精度を格段にあげることが可能だが、問題となるのは放射線損傷による検出器の劣化である。更に将来的には 10-100 倍のビーム強度を検討しており、そこでは高放射線耐性、高精度、早い応答の半導体検出器は必須となる。議論は、近年の放射線耐性シリコン検出器で始まったが、新素材半導体検出器を主軸に検証することにした。

2. 研究の目的

本研究領域の目的は、新素材半導体を用いて、量子イメージング（可視化）に欠かせない半導体検出器（カメラ）の耐放射線能力を飛躍的に上げ、高放射線環境下での量子イメージングに革新を起こすことである。これにより、素粒子標準理論を超える新物理探索のための次世代高強度加速器実験や、福島原発の格納容器周辺で 10 年以上動作するカメラの開発が可能となる。また、放射線損傷が大きい重粒子測定において、今まで識別できなかった特に重い粒子識別を可能にし、原子核実験の新たな地平を切り拓く。放射線医療における三次元スキヤニング照射機器においては、照射精度の飛躍的向上と、早い応答により治療期間を劇的に短縮させる。

現在、量子イメージングで主に使われている半導体検出器はシリコン検出器である。シリコン結晶は半導体産業の需要から、結晶製作が高精度で、非常によく研究が進んでおり、検出器としてもその性能を極めている。しかしながら、近年問題となってきたのは放射線環境下での動作で、高強度ビーム実験下での粒子飛跡検出器や、原子炉内の状況を撮像するカメラなどが急速に性能劣化を起こし、一般的なカメラでは最悪壊れてしまう。更なる高放射線環境下を想定した検出器の開発が急務である。本研究では、放射線に強いと期待される半導体を用いて検出器を製作し、その放射線耐性を調べる。新素材として国内での素子開発が活発で、世界で初めての検出器開発となる CIGS、ワイドギャップ半導体として GaN の二種を候補とし、評価を進める。

候補 1) CIGS : Cu(In, Ga)Se₂ (回復型)

太陽電池として現在主流のシリコンと同効率以上であり、それに変わる素材として注目され、日本では産総研で精力的に開発が行われている。特筆すべきは、製造工程で添加するアルカリ金属が、熱処理によって放射線損傷で発生する欠陥を埋めることで、損傷による劣化が回復するユニークな機構を持っており、軽量化も含め宇宙での太陽電池利用として最適である。放射線環境下での太陽電池動作の劣化が少ないことは、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) らによって既に実証されている。産総研とロームがイメージセンサの製作に成功しており、検出器としての動作が確約される素材である。改めて放射線耐性の観点から評価、開発を行う。

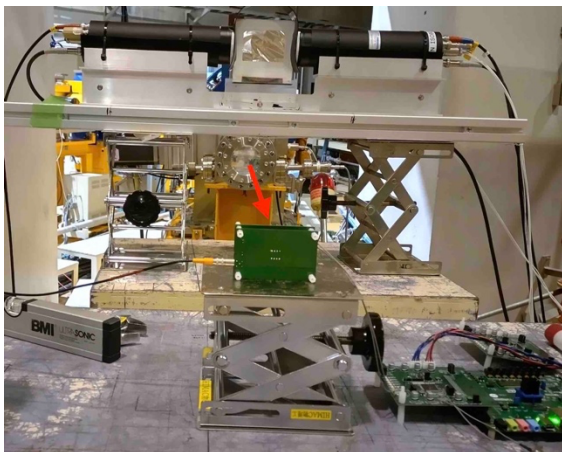
候補 2) GaN (Gallium Nitride) (原子強結合、ワイドギャップ型)

ワイドギャップでほぼ絶縁に近く、ダイヤモンド検出器のように高放射線耐性、高温耐性、高電圧耐性に優れる。大型基板を作ることができ、ダイヤモンド検出器で困難である大面積化が期待できる。産業用には 210 nm の遠紫外発光ダイオードや、高効率パワーデバイスとして国内で精力的に開発が行われており、良質な半導体ウェハの流通する可能性が十分にある。申請時には

窒化アルミ (AlN) の調査としてが、検出器製作が難しく、同じ窒化物半導体である GaN からの調査研究を行った。

3. 研究の方法

本研究期間内では主に p-n 接合の CIGS、GaN 検出器を作り、粒子検出に挑戦した。試作機での有感領域 (空乏層) は $2\text{--}10\ \mu\text{m}$ と薄いため、重イオンビームによる検出を行った。例えば理研 RIBF の錫粒子であると、エネルギー損失が単荷電粒子貫通の 2,500 倍相当で、薄い空乏層でも容易に検出できる。また、CIGS 太陽電池が元々薄型で作ることを想定しているので、そのままでも重イオン用検出器として開発が進む可能性もある。



実験は重粒子線がん医療装置 (HIMAC) にて 400MeV/n Xe イオンを照射することで行った。セットアップを図 1 に示す。Xe ビーム上には検出器のみを配置し、増幅回路と読み出し回路は検出器の隣に設置し、Xe ビームが直接当たらない様にした。ビームの大きさは検出器設置位置に蛍光板を置き、リモートカメラによる目視で $\phi 3\text{--}5\ \text{mm}$ 程度に調整した。イオンビームは、3.3 秒周期のパルス構造で、1 パルスあたり 10^4 から 10^7 個の粒子を照射するように調整した。Xe イオンの個数は、ビーム位置から外れた場所に設置したシンチレーターカウンタでモニタした。

図 1. HIMAC 実験でのセットアップ

4. 研究成果

2021 年度に p-n 接合の CIGS、GaN 検出器を作り、HIMAC での初の照射実験を行った。どちらも単 Xe 粒子の測定に成功した。出力電荷量は概ね GEANT4 によるシミュレーションで理解でき、粒子検出器として開発可能であることを示した。2022 年度には Xe 粒子の照射量をあげ、CIGS 検出器の回復機構の検証、GaN 検出器についてはストリップ検出器の検証を行った。以下、主に 2022 年度の成果を記載する。

製作した CIGS と GaN 検出器を図 2 に示す。CIGS は $5 \times 4\ \text{mm}^2$ の大きさで、有感層の厚さは $2\ \mu\text{m}$ と $5\ \mu\text{m}$ である。GaN 検出器はストリップ型の電極構造で、有感層は $10\ \mu\text{m}$ である。 400MeV/n の Xe ビームが透過した際に発生する電荷は、GEANT4 シミュレーションにより見積もられ、 $2\ \mu\text{m}$ の CIGS 検出器で 280fC 、GaN 検出器で 680fC となる。HV 条件は、CIGS 検出器が -2V 、GaN 検出器が $+4\text{V}$ であった。GaN 検出器については、電源の制限により完全空乏化には至っていない。

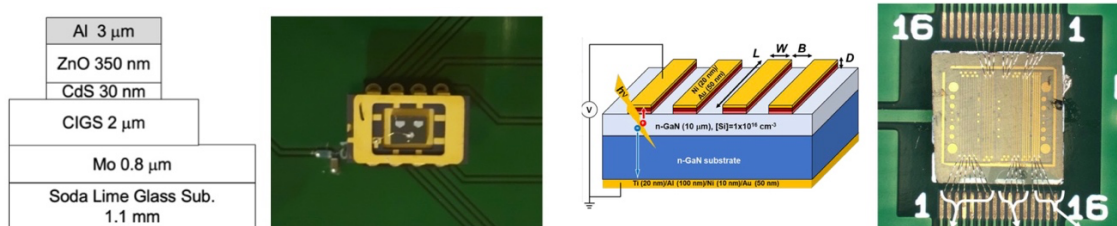


図 2. 左) CIGS 検出器の構造と写真 右) GaN ストリップ検出器の構造と写真

CIGS について、厚さ $2\ \mu\text{m}$ の試料に Xe 粒子を放射線量 0.8MGy まで照射した。照射途中の 0.6MGy と、 0.8MGy 当たった段階で、熱処理を施し、出力の回復を確認している。図 3 はその出力履歴をまとめたものである。

始めに、 0.6MGy まで照射したところ、放射線ダメージにより出力は約 50% まで低下した。次に 130°C 、2 時間の熱処理を行ったところ、出力は 97% まで回復した。さらに 0.2MGy を追照射したところ、一度目の照射と同じ傾向で 80% まで低下した。この時、 90°C で 2 時間の熱処理を試みたが、出力の優位な変化は見られなかった。再度 130°C の熱処理を 1 時間行ったところ、出力は 95% まで回復した。結果として、

- CIGS 検出器は熱処理により放射線ダメージによる出力低下が回復する
- 回復について繰り返しが可能である (0.8MGy まで照射しても限界は見えていない)
- 回復には温度依存性があり、 90°C と 130°C の間で急激な変化があると考えられる

今後、回復の温度依存、時間依存を定量的に調査することを予定している。
 また、5 μm 厚の CIGS 検出器に関しては、予想通り 2 μm 厚の約 2.5 倍の出力が得られた。

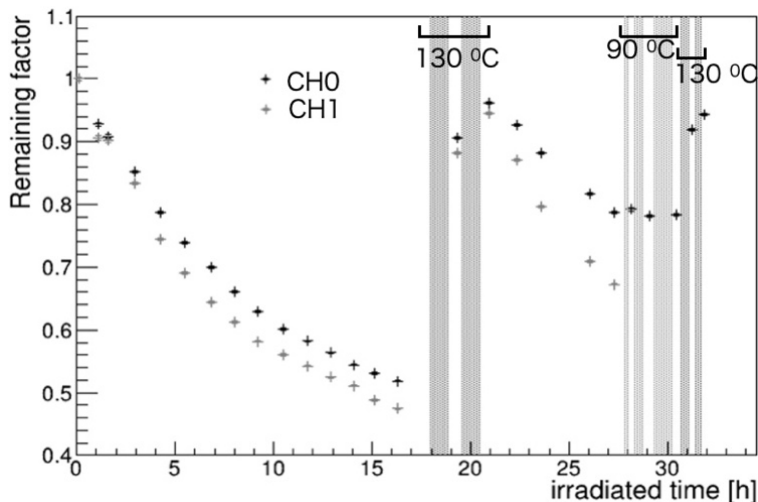


図 3. HIMAC 実験での Xe 照射と、熱処理による CIGS 検出器の出力変化。最初の 130°C の熱処理までが 0.6 MGy、次の 90°C の熱処理までが追加の 0.2 MGy に対応 (合計 0.8 MGy)。

GaN ストリップ検出器の結果について図 4 に示す。1 本のストリップがイベントごとにヒットし、ノイズとよく分離した信号ピークが確認できた。残念ながら今回のデバイスが、高いリーク電流のため 4V 以上の逆バイアス電圧が供給できず、検出領域はストリップ電極直下の限られた部分に限定された。今回の結果を踏まえて、次回のデバイスは高電圧が供給できるよう改良を行う。

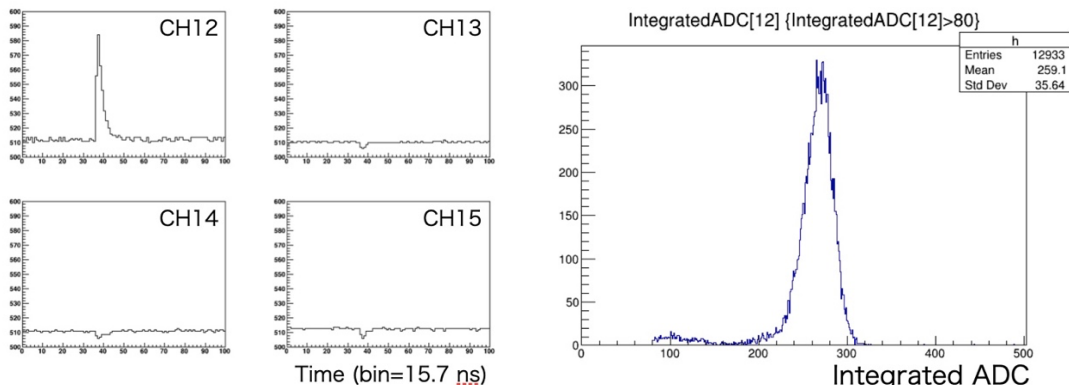


図 4. 左) イベントディスプレイ。CH12 に来た Xe 粒子を検出した様子。右)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 外川学
2. 発表標題 加速器実験における半導体検出器と高放射線耐性の要求
3. 学会等名 応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第 19 回研究会 ワイドバンドギャップ半導体を用いた極限環境エレクトロニクス（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 外川学
2. 発表標題 高放射線耐性をもつCIGS 半導体位置検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2022 秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 板橋浩介
2. 発表標題 粒子検出器開発に向けたCIGS 半導体の放射線量耐性評価
3. 学会等名 日本物理学会 2023 春季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	西永 慈郎 (Nishinaga Jiro)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	宮原 正也 (Miayahara Masaya)		
研究協力者	奥村 宏典 (Okumura Hironori)		
研究協力者	井村 将隆 (Imura Masataka)		
研究協力者	板橋 浩介 (Itabashi Kosuke)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関