

2024年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」

調査研究報告書(公開版)

【研究題目】高放射線耐性半導体を用いたイメージセンサー実証に向けた調査研究

【整理番号】24-19

【代表機関】産業技術総合研究所

【調査研究代表者（氏名）】西永慈郎

【TIA 内連携機関：連携機関代表者】

高エネルギー加速器研究機構 外川学

物質・材料研究機構 井村将隆

筑波大学 廣瀬茂輝

東北大学 三輪浩司

【TIA 外連携機関】

理化学研究所 磯部忠昭

【報告書作成者】西永慈郎

【報告書作成年月日】2025/03/28

【連携推進（具体的な連携推進活動内容とその活動の効果等）】

本調査研究機関の連携強化のため、共同実験（重粒子線照射実験、HIMAC、2024 年 11 月 27-28 日）を行い、その準備および解析報告のため、会合を行った。研究テーマごとに会合を行い（CIGS 検出器担当は週 1 回）、連携推進を図った。TIA 外の組織との連携強化として、2024 年 10 月に日本の企業と放射線耐性試験について会合を行った。CIGS 検出器および高放射線耐性 GaN 無線通信デバイスの需要調査として、福島国際研究教育機構、福島相双復興推進機構、東京電力、福島廃炉安全工学研究所との打ち合わせを行った。

【調査研究内容（実験等中心に背景・課題と実行された課題解決の内容と結果）】

半導体検出器は信号検出素子と読み出し回路にて構成される。半導体検出器に使用される Si は、放射線耐性が低く、放射線環境下における劣化は著しい。そのため、放射線耐性の高い新素材半導体検出素子が急務といえる。我々はいままでに、何度でも放射線劣化が回復できる Cu(In, Ga)Se₂ (CIGS) 素子と、ワイドギャップ半導体 (GaN, AlN, ダイヤモンド) を用いて、放射線耐性の検証および、放射線検出実験を行ってきた。今年度は重粒子線を用いて、厚膜 CIGS 検出器と GaN ピクセル粒子位置検出器の動作確認、及び Ga₂O₃ ショットキバリアダイオード (SBD:n 型) 検出器の重粒子検出特性と重粒子損傷特性の評価を行った。特に GaN ピクセル粒子位置検出器については、アバランシェ増幅可能な GaN LGAD 検出器を試作、試験した。また、陽子線照射によって発生する CIGS 層内の欠陥について、DLTS 法によって検証し、高放射線耐性 ASIC 上に CIGS を直接製膜するための予備実験を行った。

重粒子線 (Xe 線、290MeV/u) 照射実験を 2024 年 11 月に HIMAC (千葉県) にて行い、CIGS 検出器・Ga₂N LGAD ピクセル検出器ともに、重粒子線の単粒子検出に成功した。CIGS 検出部の厚みを 5 μ m、25 μ m とし、重粒子線照射によって発生する電荷量を計算したところ、空乏層外の中性領域からも信号が取り出せることがわかった。これは CIGS 検出器が Si 検出器と比較して、低印加電圧および高温での動作が可能であることを示している。また、Ga₂O₃ SBD 検出器においても重粒子線の検出に成功した。重粒子線照射後の電流-電圧特性を評価した結果、逆方向のリーク電流の増加が確認された。静電容量-電圧特性の測定結果から、Ga₂O₃ 内部の実効ドナー濃度は $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ と変化が見られなかった。この結果から、Ga₂O₃ バルク内の損傷は無視できる程度であり、リーク電流増加の主な要因は Ga₂O₃ とショットキー電極界面での欠陥生成によるものと考えられる。

陽子線を照射した CIGS 検出器は、インジウム空孔、および Cu サイトインジウムが発生することがわかった。この深い準位は 130°C、1 時間の熱処理で不活化されることが確認された。この回復機構は CIGS 層内に存在する Cu 空孔および格子間 Cu が、インジウム空孔、および Cu サイトインジウムの周囲に移動し、電気的に不活化されるというモデルで説明できる。これらの成果は、国際学会にて発表を行った。ASIC 上に CIGS を直接成膜する予備実験として、低温 CIGS 成膜法の開発を行った。低温では、構成元素の熱拡散が遅いため、3 段階法による成膜は不向きである。そこで、同時蒸着法により、Mo/Glass 基板上に CIGS 層を 100°C で成膜し、化合物組成の確認を行った。

論文発表 (査読付き)

1. K. Itabashi, S. Fujii, M. Imura, T. Isobe, M. Miyahara, J. Nishinaga, H. Okumura, M. Togawa, "Study of radiation tolerance of Cu(In,Ga)Se₂ detector", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 1067, 169637 (2024).
2. M. Togawa, S. Fujii, M. Imura, K. Itabashi, T. Isobe, M. Miyahara, J. Nishinaga, H. Okumura, "The CIGS semiconductor detector for particle physics", Journal of Instrumentation, 19, C05042 (2024).

学会発表

1. 奥村宏典、飯田哲、廣瀬茂輝、板橋浩介、外川学、宮原正也、磯部忠昭、井村将隆、西永慈郎、浦崎圭吾、LGAD 構造を用いた GaN ピクセル粒子位置検出器の作製、第 72 回応用物理学会春季学術講演会、東京理科大学、2025 年 3 月
2. 西永慈郎、上川由紀子、外川学、板橋浩介、宮原正也、浦崎圭吾、井村将隆、石塚尚吾、CIGS 放射線検出器に向けた高並列抵抗化および厚膜化技術、第 72 回応用物理学会春季学術講演会、東京理科大学、2025 年 3 月
3. 飯田哲、廣瀬茂輝、奥村宏典、板橋浩介、外川学、宮原正也、井村将隆、浦崎圭吾、窒化ガリウム半導体を用いたピクセル検出器の特性評価、日本物理学会 2025 年春季大会、オンライン、2025 年 3 月
4. 板橋浩介、外川学、西永慈郎、宮原正也、奥村宏典、検出器開発に向けた CIGS 半導体の放射線損傷の回復特性評価、日本物理学会秋季大会 2024、北海道大学、2024 年 9 月
5. 板橋浩介、外川学、西永慈郎、宮原正也、奥村宏典、磯部忠昭、Development of high radiation tolerance detector with CIGS, Pixel2024, Strasbourg, France, 2024 年 11 月

【今後の活動予定】

今後、CIGS イメージセンサーの動作確認を行う。低温成膜によって得られた CIGS 光検出部が、高い放射線耐性を有するか、陽子線照射、重粒子線照射によって、検証する。更なる CIGS イメージセンサーの開発のため、JAEA 廃炉環境国際共同研究センターが公募している「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」に応募する。ASIC のチャンネル数を増やし、高精細な CIGS 光検出部の開発を行うことで、イメージセンサーのプロトタイプが完成する。その後、東京電力および福島廃炉安全工学研究所と連携を図り、原子力内で使用可能かどうかの検証を行う。

引き続き、デバイスの放射線劣化要因とその対策を考察し、高放射線耐性デバイスの提案を行う。高放射線環境で利用できるイメージセンサー・無線デバイスは、国内外に需要があり、協力企業と共に、開発・生産を行う。