

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14313

研究課題名（和文）宇宙線反粒子探索実験へ向けた高性能な大型シリコン検出器の研究

研究課題名（英文）Study of a high-performance silicon detector with large sensitive area to search for cosmic-ray antiparticles

研究代表者

小財 正義 (Kozai, Masayoshi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：60781739

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙から飛来する素粒子（宇宙線）のうち、殆どの成分は通常の物質を構成するものと同種の粒子である。一方、通常の粒子とは逆の電荷をもつ反粒子も僅かに存在する。希少なゆえに検出困難な反粒子を高精度で観測するため、新型シリコン検出器を開発した。これまでにない大口径と厚みを兼ね備えた検出器の製造法を確立した。さらに、反粒子観測をターゲットとした気球実験など飛翔体実験では、検出器の冷却システムなどへ割けるリソースに限られる。省電力冷却システムで達成できる比較高温な環境でもシリコン検出器を使用できるよう、高温でのノイズ抑制法を開発し、実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙線の反粒子は観測が難しいものの、生成過程が限られるため、暗黒物質など現代物理の重要課題を解決する手がかりになると注目されている。本研究で開発した新型シリコン検出器を用いて、新たな観測法を採用し、これまでにない精度で宇宙線反粒子を観測する気球実験が計画されている。新たな観測法はこれまでの磁場による反粒子識別と大きく異なり、原子核物理の応用により反粒子を検出する。本研究の成果は高性能な新型検出器を開発しただけでなく、新たな反粒子観測法の実用化とそれによる宇宙物理の解明の足掛かりとなるものである。

研究成果の概要（英文）：Cosmic-ray antiparticles are attractive as a key to unravel the modern physics questions. Antiparticle is a very slight component in the cosmic-ray flux, making it difficult to observe antiparticles with high accuracy. In this study, a new type silicon detector was developed aiming to search for cosmic-ray antiparticles with a high sensitivity. This new detector has both of a large active area and a thick sensitive layer. High operating temperature is also required to use in a flight environment. Noise-suppression method in high temperature is studied and demonstrated.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：シリコン検出器 リチウムドリフト型シリコン 大口径センサ 反粒子 宇宙線 暗黒物質

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙線中に僅かに含まれる反原子核成分、特に低エネルギー反重陽子は暗黒物質のバックグラウンドフリーな探索プローブとして注目されている。南極周回気球による宇宙線反粒子探索計画 GAPS (General Anti-Particle Spectrometer) では、エキゾチック原子を利用した先進的センシング技術により、低エネルギー反原子核の超高感度観測を実現する。

GAPS はシリコン検出器アレイとそれを取り囲むトリガーシステム (プラスチックシンチレータ) で構成される。宇宙線反粒子はシリコン検出器アレイで減速・捕捉され、シリコン原子核等と結合してエキゾチック原子を形成する。その崩壊により放出される特性 X 線やパイオンを検出することで、膨大な宇宙線原子核成分から反原子核イベントを選別し、反原子核種を識別することができる。

GAPS の核心とも言えるシリコン検出器には、厚い有感層と大口径、高良品率での大量製造が要求される。冷却システムの消費電力を抑えるため、比較的高温な環境での高いエネルギー分解能も要求される。これらの特長を兼ね備えた検出器はこれまで存在しなかった。新たな検出器の開発が必要とされる。

### 2. 研究の目的

エキゾチック原子を利用した先進的センシング技術を実用化し、GAPS による宇宙線反粒子の超高感度観測を実現するため、高性能な大型シリコン検出器を開発する。厚み 2.5 mm、直径 10 cm、-35°C での 60 keV X 線へのエネルギー分解能 4 keV をゴールドデザインとする。GAPS シリコン検出器アレイに必要な 1000 個以上の量産を実現するため、高い製造歩留まりも必要とされる。

### 3. 研究の方法

厚い有感層を得るため、リチウムドリフト型シリコン (Si(Li)) 検出器を採用する。Si(Li) 検出器には、p 型シリコンにリチウムを浸透させアクセプタを補償することで、数 mm の厚い有感層が得られるという特長がある。液体窒素温度で動作する直径 1 cm 以下の Si(Li) 検出器は既に量産化が実現し、市販されている。

一方、直径数 cm 以上、かつ動作温度が高く (マイナス数十度以上)、荷電粒子と比べて信号が微弱な X 線も測定できる Si(Li) 検出器は得られていない。その主な原因として、以下が挙げられる。

- ✓ 数 cm 以上のスケールで均一なリチウムドリフト層を得ることが困難であった。
- ✓ 大口径化と高温化はいずれもリーク電流を増大させる。リーク電流がノイズの主要因となり、十分なエネルギー分解能が得られなかった。

そこで、本研究では均質な大口径シリコン結晶の製造と均一なリチウムドリフト、リーク電流抑制法の開発を行い、新型 Si(Li) 検出器の製造法確立を目指した。

### 4. 研究成果

#### ① シリコン検出器開発

大口径 Si(Li) 検出器開発の先行研究では、シリコン結晶中の不純物が均一なリチウムドリフトを阻む主要因であると報告されている。さらに、高品質な補償領域を得るために、アクセプタ濃度をできるだけ抑え、高抵抗な p 型シリコンとすることが求められる。そこで、不純物抑制に有利な Floating Zone 法を用いることで、高品質・高抵抗な大口径シリコン結晶の開発を目指した。ドーパントは p 型シリコンに一般的なホウ素を用いた。酸素及び炭素不純物は測定限界以下 ( $\sim 10^{16}$  atoms/cm<sup>2</sup> 以下)、抵抗率は約 1000  $\Omega \cdot \text{cm}$ 、直径 10 cm 以上という所期のシリコンウェハを得ることに成功した。

シリコンウェハの片面へリチウムを蒸着・拡散し、n 面とする (検出器の正電極となる)。その後、ウェハを加熱しつつ n 面へ高電圧を印加し、リチウムを裏側の p 面 (検出器の負電極) へドリフトさせる。それにより p 型シリコン結晶のアクセプタが補償され、n 面と p 面の間に真性半導体層 (検出器の有感層となる) が形成される。

リチウムドリフト工程で Avalanche breakdown を引き起こさないため、ドリフト前に超音波加工を用いてウェハ辺縁を切削し、Top-hat 形状とする。Top-hat 形状の代わりに深い溝を刻む Deep-groove 形状も多く採用される。しかし後で述べるように、リーク電流抑制には表面処理が重要であることが本研究により示されたので、表面のクオリティコントロールが容易な Top-hat 形状を採用した。

先行研究では、リチウムドリフトを十分長く行うか、又は p 面に残った未ドリフト層を除去することで、p 面へリチウムドリフト層を露出させる手法が多く取られていた。しかし、本研究でも同様の手法を取ったところ、-35°C の高温環境下ではリーク電流が増大して X 線検出器として機能しなかった。先行研究では液体窒素温度で使用するか、信号の大きい荷電粒子をターゲットとしていたため、リーク電流の影響を受けにくかったと考えられる。そこで本研究では、ドリフト時間などのパラメータを最適化し、p 面に薄い未ドリフト層を残した。従来法と比較するこ

とで、未ドリフト層がリーク電流抑制に有効であることを実証した。さらに検出器断面の破壊検査により、均一なリチウムドリフトを達成できていることを示した。

半導体検出器の電極の外周部を電氣的に絶縁するように溝 (Isolation groove) を切り、リーク電流を抑制する手法を Guard ring と呼ぶ。シリコン検出器のリーク電流抑制法として Guard ring が有効であることは知られているが、Si(Li)検出器への採用例は少ない。本研究では超音波加工により n 面に Guard ring を形成し、Si(Li)検出器の高温環境下でのリーク電流抑制に有効であることを示した。

検出器の位置分解能を向上させるため、n 面検出領域を 8 セグメント化する Isolation groove も Guard ring と同時に形成するよう加工治具を工夫した。

Isolation groove や検出器側面に露出するリチウムドリフト層表面は、検出器完成後未処理の状態では不純物や格子欠陥を多く含み、リーク電流の生成源及び流路となる。これらはエッチングにより除去できるが、エッチングを行い過ぎると検出器の不感領域が大きくなる。本研究ではエッチング時間及び回数による検出器特性の変化を測定し、最適なエッチングパラメータを採用することでリーク電流が大きく抑制されることを示した。

## ② シリコン検出器の性能評価と GAPS 実験へ向けた準備状況

大口径かつ高温動作のシリコン検出器では、静電容量とリーク電流がノイズの主要因となる。ノイズ理論からの計算により、所期のエネルギー分解能を得るにはセグメント当たりの静電容量約 40 pF 以下、リーク電流約 5 nA 以下が必要とされる。試作検出器の静電容量とリーク電流を測定し、それらの基準を十分クリアしていることを示した。

また、静電容量の測定結果から、検出器厚み 2.5 mm のうち約 90% が有感層として得られていることが示された。さらに各セグメントの容量はほぼ等しかった。これは均一な有感層厚みが得られていることを示しており、断面破壊検査の結果ともコンシステントである。

米国の研究協力者の支援のもと、X 線に対するエネルギー分解能を測定した。静電容量・リーク電流測定結果からの予測と一致する結果が得られ、目標としていたエネルギー分解能 (-35°C で 60 keV X 線に対して FWHM 4 keV 以下) を達成した。

さらに量産試験として 20 個の検出器を製造し、90% の高良品率で製造できることを示した。以上により検出器の製造方法を確立し、GAPS 実現への最大の課題の一つを解決することに成功した。

最終年度には GAPS 実験へ向けて、搭載品シリコン検出器が国内メーカーにより 1000 個あまり量産された。量産品シリコン検出器の共同評価体制の一環として、本研究では量産品製造と同時並行でクイック評価できる自動測定システムを開発した。国内メーカーとの緊密な連携により順調な量産に貢献し、90% 以上の高良品率での製造に成功した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 M. Kozai for the GAPS collaboration	4. 巻 1468
2. 論文標題 The GAPS experiment - a search for cosmic-ray antinuclei from dark matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1468/1/012049	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Rogers F., Xiao M., Perez K.M., Boggs S., Erjavec T., Fabris L., Fuke H., Hailey C.J., Kozai M., Lowell A., Madden N., Manghisoni M., McBride S., Re V., Riceputi E., Saffold N., Shimizu Y.	4. 巻 14
2. 論文標題 Large-area Si(Li) detectors for X-ray spectrometry and particle tracking in the GAPS experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-0221/14/10/P10009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kozai M., Fuke H., Yamada M., Perez K., Erjavec T., Hailey C.J., Madden N., Rogers F., Saffold N., Seyler D., Shimizu Y., Tokuda K., Xiao M.	4. 巻 947
2. 論文標題 Developing a mass-production model of large-area Si(Li) detectors with high operating temperatures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2019.162695	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kozai M., Fuke H., Yamada M., Erjavec T., Hailey C. J., Kato C., Madden N., Munakata K., Perez K., Rogers F., Saffold N., Shimizu Y., Tokuda K., Xiao M.	4. 巻 なし
2. 論文標題 Development of Large-area Lithium-drifted Silicon Detectors for the GAPS Experiment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of NSS/MIC 2018	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2018.8824342">https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2018.8824342</a>	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 小財正義 他
2. 発表標題 宇宙線反粒子探索GAPS実験の現状報告 - 日本チームの進捗を中心として -
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Kozai for the GAPS collaboration
2. 発表標題 The GAPS experiment - a search for cosmic-ray antinuclei from dark matter
3. 学会等名 The 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小財正義, 岡崎峻, 福家英之, 吉田哲也, 西城大, 河内明子, 近藤愛美, 竹内崇人, E. Martinez, N. Saffold, F. Gahbauer, C. Hailey, W. Craig, J. Olson
2. 発表標題 宇宙線反粒子探索GAPS計画に向けたラジエータ飛翔試験(2019年度-1)
3. 学会等名 2019年度大気球シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小財正義, 福家英之, 清水雄輝, 宗像一起, 加藤千尋, Charles J. Hailey, Kerstin Perez
2. 発表標題 宇宙線反粒子探索GAPS実験用リチウムドリフト型シリコン検出器の開発(2)
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Kozai, H. Fuke, M. Yamada, T. Erjavec, C. J. Hailey, C. Kato, N. Madden, K. Munakata, K. Perez, F. Rogers, N. Saffold, Y. Shimizu, K. Tokuda and M. Xiao
2. 発表標題 Development of Large-area Lithium-drifted Silicon Detectors for the GAPS Experiment
3. 学会等名 2018 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小財 正義, 福家 英之, T. Erjavec, C.J. Hailey, 加藤 千尋, N. Madden, 宗像 一起, K. Perez, F. Rogers, N. Saffold, 清水 雄輝, M. Xiao
2. 発表標題 宇宙線反粒子探索GAPS実験用リチウムドリフト型シリコン検出器の開発(3)
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小財正義, 福家英之, 清水雄輝, 宗像一起, 加藤千尋, C. J. Hailey, K. Perez
2. 発表標題 宇宙線反粒子探索GAPS実験用リチウムドリフト型シリコン検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小財正義, 福家英之, 清水雄輝, 宗像一起, 加藤千尋, C. J. Hailey, K. Perez
2. 発表標題 宇宙線反粒子探索GAPS実験用リチウムドリフト型シリコン検出器の開発
3. 学会等名 第18回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----