

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13485

研究課題名(和文)低質量暗黒物質直接探索のための有機半導体検出器開発

研究課題名(英文)Development of particle detectors made of organic semiconductor for low-mass dark matter direct search

研究代表者

身内 賢太郎 (Miuchi, Kentaro)

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80362440

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：世界的に注目されている低質量暗黒物質の直接探索実験は、比較的原子量の小さい物質で低閾値の検出器を製作することで、小型の検出器でも感度の高い探索実験を行うことができる。本研究は有機半導体を放射線検出器として動作させ、暗黒物質探索実験に必要なとされる要素技術を開発することを目的とした。

有機半導体を用いて検出器構造を製作、 $\alpha$ 線、重粒子線を照射する試験を行い、放射線検出器としての動作を確認した。低質量暗黒物質探索実験に用いるためには10倍以上のシグナル/ノイズ(S/N)比の改善及び大型化が必要であることが判明した。

研究成果の概要(英文)：Direct detection of low mass dark matter can be realized with low-threshold detector made of low-Z materials. This research program aimed to utilize organic semiconductors for particle detectors and study fundamental properties as a dark matter detector. We developed transistors with organic semiconductors and studied their performances as particle detectors. We succeeded in the detection of heavy nuclei and alpha particles, while more than one order of S/N improvement is still needed to use as a dark matter detector.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：暗黒物質 有機半導体

1. 研究開始当初の背景

暗黒物質直接探索実験は、イタリアの DAMA グループ等の「検出の主張」と米国の XENON100 グループ等の「排除の主張」が対立しているが、10GeV 以下の質量では許容される領域がある。こうした低質量暗黒物質は、比較的原子量の小さい物質で低閾値の検出器を製作することで感度の高い探索実験を行うことができる。米国の DAMIC 実験は 40eV の CCD を用いて、わずか 1g の小型検出器で 100kg 以上の質量の検出器に匹敵する感度を得た [PLB711(2012)264]。こうした状況の下、低質量の暗黒物質の DAMA 領域の探索が重要である。

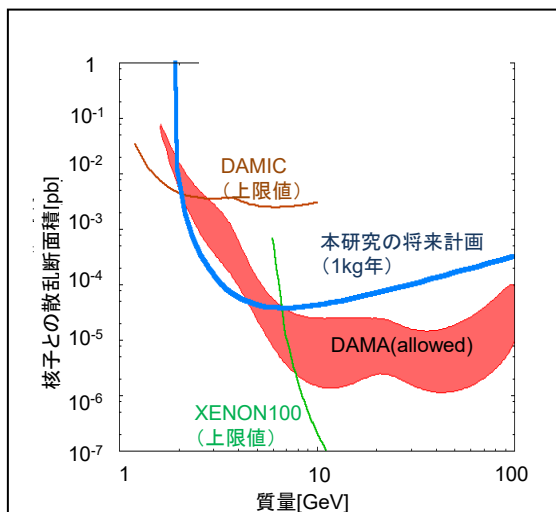


図1 DAMIC 実験(太黒線)及び他の実験結果。横軸は暗黒物質の質量、縦軸は暗黒物質と通常の物質(陽子)との散乱断面積。赤色で DAMA 実験結果の示唆する領域、茶色及び緑色で DAMIC 実験及び XENON100 実験の上限値を示す。本研究の将来計画を青色で示す。

2. 研究の目的

低質量暗黒物質探索実験は、低元素量の物質を使って低閾値の検出器を用いることで探索が可能となる。暗黒物質と通常の物質との弾性散乱で期待されるエネルギースペクトルは指数関数的な形で低エネルギーに向かって立ち上がるため、低閾値の検出器を製作することで、小型の検出器でも有効に探索が可能であるという特徴をもつ。本研究は、暗黒物質に対する標的原子核として炭素を想定、有機半導体を用いたトランジスタを製作、基礎特性の測定を行う。その後放射線検出器として動作させ、暗黒物質探索実験に必要とされる長期安定性や大質量化への要素技術を開発する。将来的に kg オーダーの検出器を作成して、図1に示す感度での探索を

可能とするような基礎技術の開発を目的とする。

3. 研究の方法

有機半導体を用いた放射線検出器を製作、ビーム試験や放射線源からの放射線照射試験を行い、評価を行う。材料製作を専門とする熊本を中心として、新しい構造を持った有機半導体検出器を製作する。基礎特性の測定の後、 $\alpha$ 線や重粒子線を用いて、放射線検出器としての動作試験を行う。放射性検出器として動作が確認されたのち、性能を評価、閾値や安定性などを考慮して材料・構造パラメータの順位づけを行う。最終的に暗黒物質探索実験への応用の妥当性を評価する。

4. 研究成果

平成 27 年度の研究では、有機半導体 FET として、実績のある材料(DNTT)を用いて素子

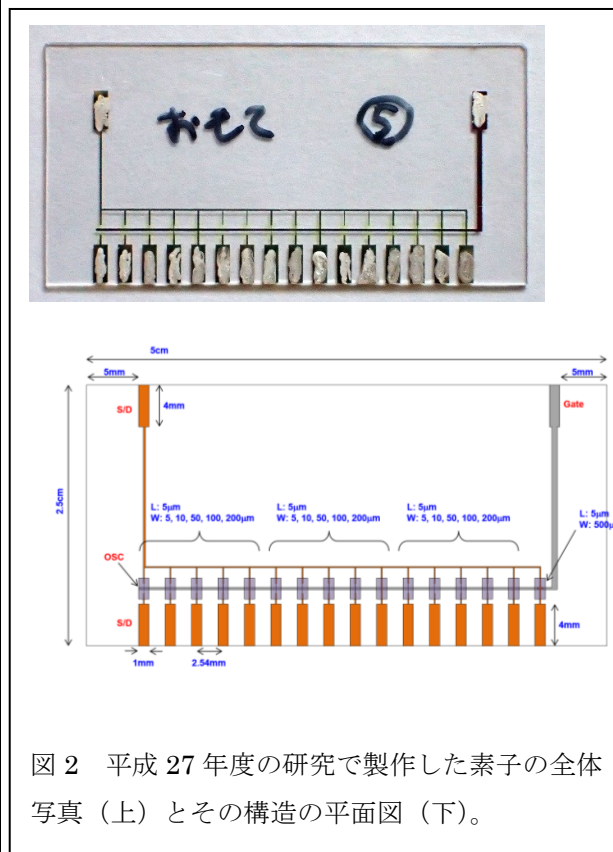


図2 平成 27 年度の研究で製作した素子の全体写真(上)とその構造の平面図(下)。

を製作、性能を評価した。検出領域となる DNTT は厚さ 100nm と 500nm の 2 種類を製作した。素子中での荷電粒子のエネルギー損失を考えると DNTT は厚い方が信号が大きくなると考えられるため、成膜的に上限に近い 500nm のデバイスを製作した。信号の大木やの比較や検出効率の評価を見積もるべく、厚さ 100nm の素子を製作した。また、L=5um, W=5, 10, 50, 100, 200) の 5 種類の形状の検出素子を製作した。製作した素子の全体写真及び構造図を図2及び図3に示す。

これらについて、電圧電流特性を調べたのちで、リーク電流の小さい素子(厚さ 500nm、L=10um, width=)について、原子力研究機構

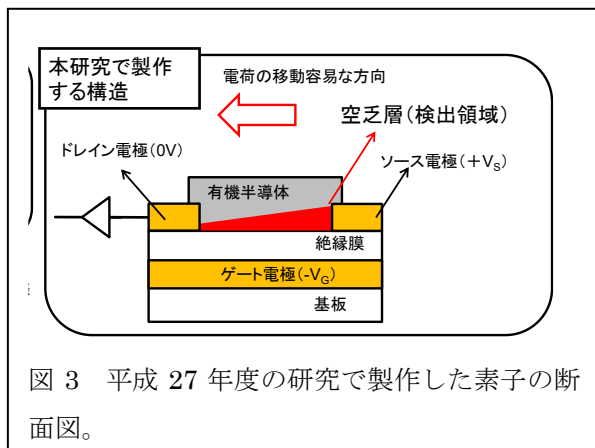


図 3 平成 27 年度の研究で製作した素子の断面図。

高崎量子応用研究所の TIARA 加速器施設にて 450MeV に加速された Xe イオンを照射したところ、バックグラウンドと比較して、優位に信号が観測された。

平成 28 年度の研究では、放射線検出器としての動作確認実験を行った。特に平成 27 年度までの試験で信号が確認できなかった  $\alpha$  線の検出を目的として、S/N の改善を重点的に行い素子の構造の改良などもあわせて行った。これまで単体の半導体を用いた構造としてきたが、図 4 に示す通り P 型半導体と N 型半導体の接続を持つ構造として検出領域を確保するという方針とした。それぞれの厚みは約 75nm で合計で最大 150nm の検出領域が形成されることになる。N 型半導体としては TPB、P 型半導体としては TPT1 を用いた。

一つ素子のサイズは垂直に交わる上下の電極の幅で決定される。図 4 の下に示す通り、 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  のもの、 $500 \times 500 \mu\text{m}^2$  のものの 2 種類を製作した。

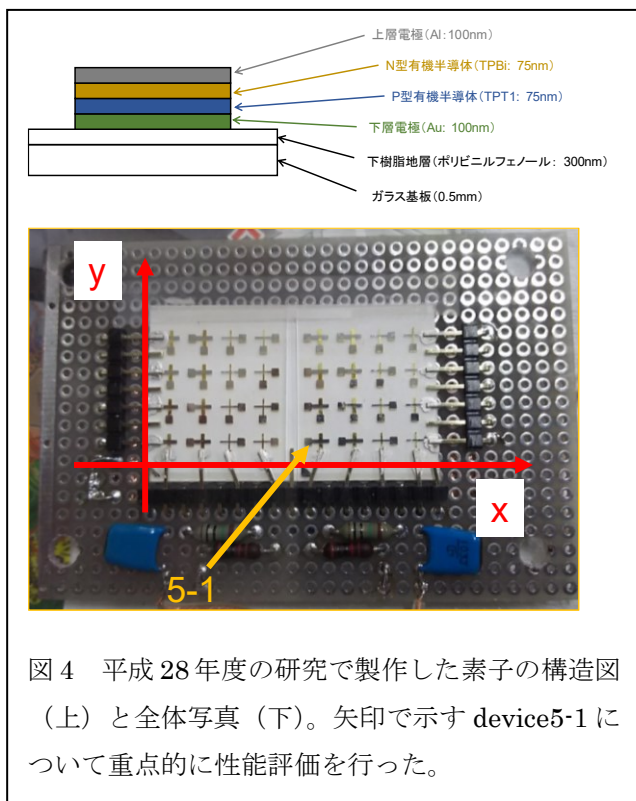


図 4 平成 28 年度の研究で製作した素子の構造図(上)と全体写真(下)。矢印で示す device5-1 について重点的に性能評価を行った。

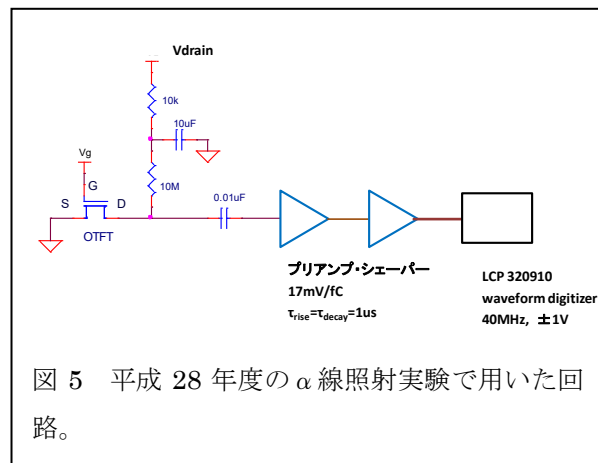


図 5 平成 28 年度の  $\alpha$  線照射実験で用いた回路。

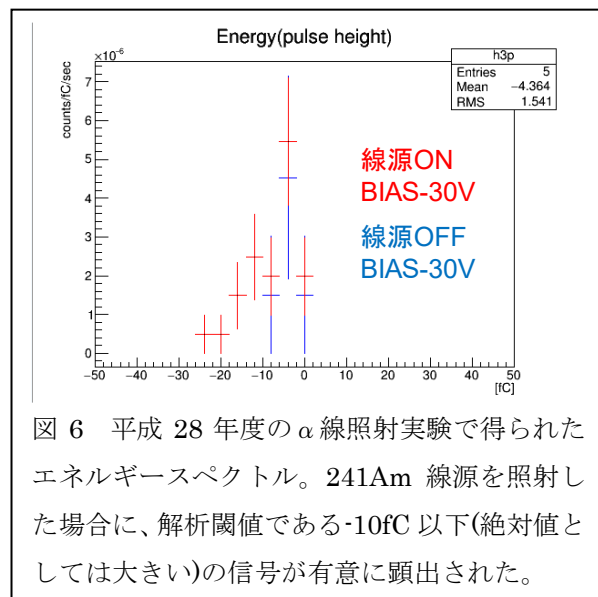


図 6 平成 28 年度の  $\alpha$  線照射実験で得られたエネルギースペクトル。241Am 線源を照射した場合に、解析閾値である -10fC 以下(絶対値としては大きい)の信号が有意に顕出された。

製作した素子に 241Am からの  $\alpha$  線を照射して、信号を測定した。素子は検出頻度の観点から  $500 \times 500 \mu\text{m}$  のものを使用した。回路、データ収集システムは図 5 に示す通りである。Drain に負電圧をかけることで逆バイアスを印加することが出来る。出力を増幅率 1.7mV/fC 程度、時定数 1us 程度のプリアンプ・シェーパを通し、40MHz の waveform digitizer でデータ取得した。データ取得の閾値は -7fC 程度であった。

V<sub>d</sub> = -30V、V<sub>g</sub> = V<sub>s</sub> = 0V として測定を行った際に得られたエネルギースペクトルを図 6 に示す。241Am 照射時を赤色、非照射時のスペクトルを青色で示す。それぞれ live time は 5.8 日と 1.9 日であった。線源非照射時のエネルギースペクトルは -10fC を解析閾値とすると 0 事象で、90%の有意度で 241Am からの  $\alpha$  線を検出できたといえる。この  $\alpha$  線からは最大で 30keV 程度のエネルギー損失が期待されるため、この仮定に基づけば閾値 10keV 程度と見積もられるが、詳細についてはさらなる研究が必要であると考えられる。

平成 27 年度の重イオンの検出、平成 28 年度の  $\alpha$  線の検出によって、放射線検出器としての原理実証は行えた。暗黒物質用の検出器

としては、10 倍以上の S/N の改善が必要があること、効率の良い定量評価や暗黒物質検出器としての実用化のためには、一素子の大型化が重要であるという課題が残った。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

“Radiation Detectors for Direct Dark Matter Search”

Kentaro Miuchi

JPS Conf. Proc. 11, (2016) 040001, doi 10.7566/JSPSCP.11.040001

[学会発表] (計 1 件)

“Radiation Detector Development for Direct Dark Matter Search”

“International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses (ISR2016)”

18-21 January 2016 KEK, Tsukuba, Japan

「暗黒物質」

身内賢太郎

JGFoS フォローアップ研究会 (埼玉大学東京ステーションカレッジ) 2016 年 2 月 21 日 2015

宇宙の未知粒子 「暗黒物質」を探る  
徳島大学 日本物理学会 四国支部 チュー  
トリアル講演会  
2015 年 8 月 2 日

宇宙の未知粒子 「暗黒物質」を探る  
2015 年 8 月 1 日 島根大学 ヒッグス・初期  
宇宙プロジェクトセンター 一般講演会

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

身内 賢太郎 (MIUCHI, Kentatro)

神戸大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号 : 80362440

##### (2) 研究分担者

熊木 大介 (KUMAKI, Daisuke)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号 : 80597146

##### (3) 連携研究者

田中 真伸 (TANAKA, Manobu)

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・教授

研究者番号 : 00222117

##### (4) 研究協力者

( )