様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科研費
KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２７ 年 　６ 月 １５ 日現在

機関番号：１４５０１
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2013～2014
課題番号：２５６１００５７

研究課題名（和文）低質量暗黒物質直接探索のための低閾値有機半導体検出器の基礎開発

研究課題名（英文）Development of organic semiconductor detector for low-mass dark matter direct searches

研究代表者
身内　賢太朗（Miuchi, Kentaro）
神戸大学・理学（系）研究科（研究院）・准教授
研究者番号：８０３６２４４０

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,100,000円

研究成果の概要（和文）：現在世界的に注目を集め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、半導体トランジスタとしての性能を評価、漏れ電流が一般的な検出器よりも大きいもののトランジスタとしての基礎測定を示すことを確認した。その後、α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するためには数倍のシグナル/ノイズ（S/N）比の改善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 detector and develop fundamental properties as a dark matter detector.
We developed a FET transistor with organic semiconductor and measured its properties. The transistor showed typical properties as a transistor, though the leak current was larger than other semiconductors. We irradiated the transistor with alpha-rays and heavy ions and found that we need to improve the signal-to-noise ratio with a factor of several to use as a particle detector.

研究分野：宇宙線実験

キーワード：暗黒物質　有機半導体　粒子検出器

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。
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 の検出器で 100kg 以上の質量の検出器に匹敵する感度を得た（図１）。

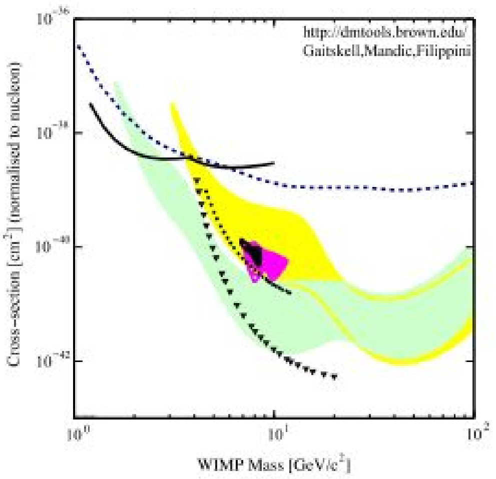

図１　DAMIC 実験(太黒線)及び他の実験結果[PLB711(2012)264]。横軸は暗黒物質の質量、縦軸は暗黒物質と通常の物質との散乱断面積。黄色及び薄いグリーンで DAMA 実験結果の示唆する領域を示す。

２．研究の目的

図１で示すような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、質量の小さな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ことを目的とする。

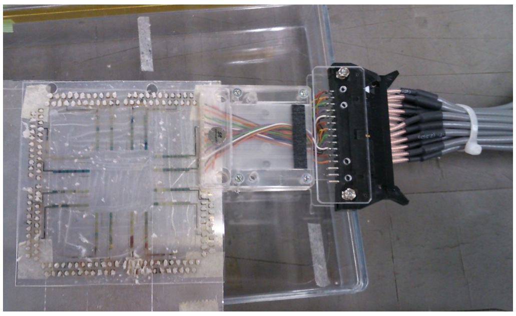

図２　有機半導体を用いた FET トランジスタの特性を専用のクリップを用いて測定している様子。

３．研究の方法

材料製作を専門とする熊木を中心として、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、α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

(1)新しい構造を持った有機半導体トランジスタの製作

本研究では、実績のある材料による新しい構造をもったトランジスタを行い、基礎特性を測定した。FET トランジスタのサイズを表すパラメータとしては、width(以降 W と記述)及び length(以降 L と記述)があり、更に検出器として機能する厚み depth(以降 d と記述)がある。これら 3 つのパラメータに対して、L(=5,20,50,100μm)×W(=100,200,500,1000μm) ×d(=100,500nm,)の計 32 種類のトランジスタを製作した。d が一定の 16 種類のトランジスタを一枚のガラス板上に製作、専用に製作したクリップを用いて特性を評価している様子を図２に示す。測定結果の一例を図 2 に示す。図３の横軸はゲート電圧(単位は V)、縦軸はドレイン電流(単位は nA)であり、

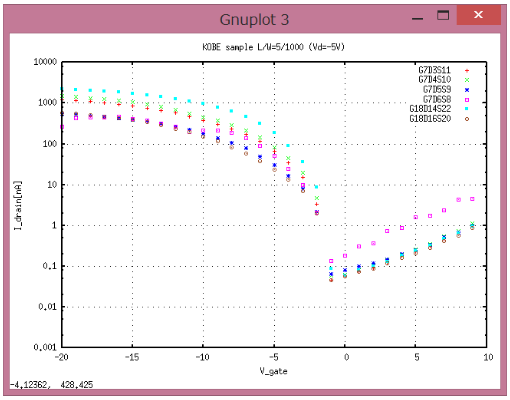

図３　トランジスタ特性測定の一例。横軸はゲート電圧(単位は V)、縦軸はドレイン電流(単位は nA)。ゲート電圧が負の領域では、電圧の絶対値が小さくなるとドレイン電流も小さくなるという期待通りの性質を示した。

6 つのマーカーは素子の違いを表している。ゲート電圧を負にかけるとドレイン電流が大きくなるという一般的なトランジスタの特性を示している。一方で、ゲート電圧がある点を超えると電流が上昇に転じるという通常のトランジスタと異なる現象が確認された。また、ドレイン電流の最小値が 0.1nA 程度と通常のトランジスタよりも大きい値となったこともさらなる理解が必要な点である。これらの傾向ははっきりとした W,L,d 依存性が確認されず、素子製作の再現性のコントロールなどを高めたうえで系統的な理解をする必要がある。トランジスタとしての動作にかんして、完全な理解までは至らなかったが、動作はしているということで放射線検出器としての動作確認を行った。

(2)放射線検出器としての動作確認実験として、α線照射および重粒子線起源の高放射線環境試験を行った。α線は実験室、重粒子線としては日本原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所の TIARA 施設で 450MeV に加速された 25 価のキセノン 129 イオンを用いた。α線起源のパルス信号、高放射線環境下での DC 成分ともに検出されなかった。α線からは理想的な状態（d=500nm すべてが検出器としての有感厚であり、生成された電子-正孔対がすべて収集される）を考えると信号対雑音比(S/N)で 1 程度の信号が期待されていた。試験の結果信号は確認されなかったため、検出器の厚みに対する有感厚の比と電子-正孔対収集効率の積が 1 よりも小さいということが結論づけられた。S/N の改善のためには、素子の厚膜化、実装の工夫にノイズの低減(現在はアンプまでケーブルによる接続)、正孔の長寿命化が有効である。それぞれで数倍の改善を行うことで、粒子線検出器としての動作を確認することが有機半導体を暗黒物質探索実験へと応用するための重要な開発要素であることが判明した。

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）

〔学会発表〕（7 件）

①"Dark Matter" Kentato Miuchi
Poster presentarion at 11th Japanese-German Frontiers of Science Symposium(JGFoS) October 31 - November 2, 2014 ,Hotel INNSIDE by Melia BREMEN (Bremen, Germany)

②"DM direct searches in JAPAN" Kentaro Miuchi and Keishi Hosokawa
KUBEC International Workshop on Dark Matter Searches 27-29 August 2014 Brussels, Beigium

③"Dark Matter" Kentaro Miuchi
Poster presentarion at 10th Japanese-German Frontiers of Science Symposium(JGFoS) November 1~November 3, 2013 ; KYOTO BRIGHTON HOTEL(Kyoto, Japan)

④「暗黒物質直接探索」 身内賢太朗
2014 年 7 月 29 日 京都大学 基礎物理学研究所 基研研究会 素粒子物理学の進展 2014

⑤「低質量暗黒物質直接探索実験」 身内賢太朗 日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 29 日

⑥「直接探索の将来計画」 身内賢太朗
日本物理学会 2013 年秋季大会 高知大学（シンポジウム「暗黒物質探索の現状と将来」）2013 年 9 月 21 日

⑦「半導体検出器による低質量暗黒物質探索」 身内賢太朗 極低バックグラウンド素粒子原子核研究懇談会 富山商工会議所 2013 年 4 月 24 日

〔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：
出願年月日：
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
身内賢太朗（MIUCHI, Kentaro）
神戸大学・大学院理学研究科物理学専攻・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・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）
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

中竜大（NAKA, Tatsuhiro）
名古屋大学・高等研究院・特任助教
研究者番号： 00608888