

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400308

研究課題名(和文)低質量暗黒物質探査用低物質量半導体ピクセル検出器の開発

研究課題名(英文)Development of wide gap semiconductor pixel detector for light dark matter search

研究代表者

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

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)：炭素を含むダイヤモンド及び炭化硅素を利用して軽い暗黒物質の検出感度を上げるため、ワイドギャップ半導体ピクセル検出器の研究開発を行った。本研究ではダイヤモンド、炭化硅素を用いた100 μ m \times 100 μ m程度のピクセル検出器を製作しその静特性と電荷収集効率を評価し、十分な信号対雑音比を得る事を確認した。更にワイドギャップ半導体検出器評価用低雑音集積回路を製作し100electronを下回る低雑音性能を達成した。

研究成果の概要(英文)：We developed pixel detectors based on wide gap semiconductor materials(i.e. diamond and silicon carbide) for light dark matter search. The wide gap semiconductor containing carbon improves the sensitivity for light dark matter search.

The electrode size of the detectors is about 100 μ m \times 100 μ m. The detector shows two or three orders of magnitudes leakage reduction compared to a silicon pixel detector, and the detector capacitance of the diamond pixel is one half the silicon pixel detector. We confirmed developed pixel detectors have enough S/N for our purpose.

In order to evaluate the detectors low noise front-end integrated circuit is developed. The equivalent noise charge(ENC) is less than 100 electron which satisfies S/N for our evaluation of the detectors.

研究分野：素粒子原子核実験

キーワード：暗黒物質 半導体検出器

1. 研究開始当初の背景

現在暗黒物質直接探索実験は、DAMA グループ等が検出を発表している一方、XENON100 グループ等では検出されておらず結論が異なる。しかしながらよくみると 10GeV 以下の質量では双方の主張とコンシステントなダークマターが許容される領域がある (図 1 参照)。この質量領域においては、原子量の小さい物質を使用しても、低閾値の検出装置を開発すれば、感度の高い探索実験を行うことが可能となる。例えば図 1 に示す J.Estrada 等 [1] はエネルギー閾値 40e(S/N=20) の低雑音 CCD 検出器を用いて暗黒物質許容領域の上限を下げた。この結果、DAMA 実験で示されたダークマター許容領域は 2~10GeV の質量を残す状況となっている。

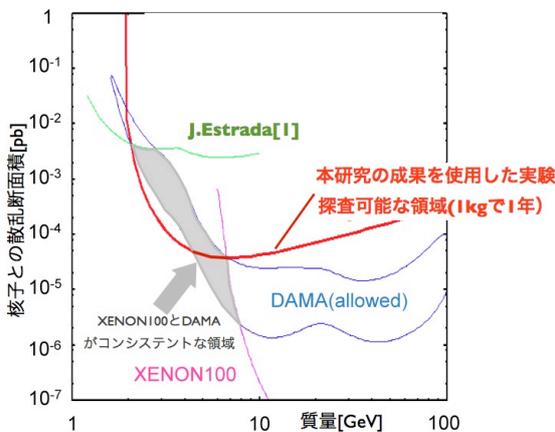


図 1 : 暗黒物質直接探索実験現状及び本研究との関係

しかしながら、CCD は時間分解能がないため宇宙線、岩盤等からの中性子バックグラウンドを除くための中性子検出器とのコインシデンスが取れず、上限を下げる事ができない。一方 CMOS 検出器でも同様のノイズ性能を達成できれば、時間分解能を上げることが可能なためバックグラウンドを落とし、更に低い暗黒物質許容領域の探査も可能である。しかし J.Estrada 達は 2 電子相当のノイズを達成しており、この条件に到達するには要素技術だけでなく装置システム全体を検討することになるため容易ではない。

2. 研究の目的

軽い暗黒物質が存在するとした場合、シリコンの代わりに暗黒物質に対するターゲットとして炭素を使うことができれば、弾性散乱で原子核の反跳エネルギーは大きくなるため、シリコンを使う場合に比べてエネルギー閾値は 4~10 倍高くても同等もしくはそれ以上の感度を得ることができる。つまり読み出しシステムの電子ノイズ条件が 4~10 倍程

度緩和できることを意味する。更にピクセル検出器にし、各ピクセルに時間情報をつけることでバックグラウンド除去用検出器とのコインシデンスも可能になる。

一方原子番号が小さくなった分は約 2 倍質量を増やすことで、暗黒物質との全断面積はシリコンと同じにできるため問題とならない。閾値を 500eV に設定し 1kg の炭素をターゲットに使用しかつバックグラウンドが完全に抑えられたときの検出限界を図 1 の赤線で示す。ここからわかるように信号対ノイズ比(以下 S/N 比と記す)が同じ状態を維持出来れば 1 kg の炭素を使用することで、探査すべき領域のほとんどを含む探査を 1 年程度でカバーすることができる。

	シリコン	SiC	ダイヤモンド
密度 (g/cm ³)	2.3	3.2	3.5
比誘電率	11.8	9.6	5.6
平均イオン化エネルギー (eV)	3.65	7.8	11.3
100V印可時のリーク電流による電子雑音 (電子数/msec)	3x10 ⁻⁶	<<10	1.2
静電容量(aF)	41	33	19

リーク電流と検出器容量に関しては、検出器サイズは 10umx10um 厚さ 250um で規格化している。シリコンの場合は文献[1]で使用している検出器の特性を基に算出している。

表 1 : 半導体検出器の性能比較

炭素を含んだ半導体はダイヤモンド、炭化硅素(以下 SiC と記す)が考えられる。また GaN や ZnO も炭素ではないが原子番号がシリコンより軽く暗黒物質のターゲットとして候補に挙げられる。低エネルギーでのエネルギー分解能は検出器と読み出し電子回路の電子雑音によってきまる。このうち GaN と ZnO は、SiC 及びダイヤモンドと比較し検出器用に不純物の少ない基板が作られておらず、検出器のリーク電流が大きい候補から外れる。表 1 にシリコン、ダイヤモンド、SiC の特性を示す。S/N をシリコンと同程度もしくはそれ以上にするためにはリーク電流は 10 電子数/msec/100 μ m² 以下、静電容量は読み出し回路で決まるため 100fF 未満という条件が決まる。よって SiC とダイヤモンド両方が候補として残る。このデータを基に検出器をどちらかに絞ることは不可能でありまた両方の材料の潜在的能力は高いため本研究にて 2 つの材料で検出器を試作し評価を行う。

3. 研究の方法

低質量暗黒物質探索用検出装置を製作する場合、低エネルギーではリーク電流と検出器容量によるイントリンジックノイズがエネルギー分解能を決定する。このノイズを目

標の 25 電子数以下に押さえるためには、リーク電流を 10 電子/msec/100 μm^2 以下にしておくことが望ましい。

ダイヤモンドに関してはエレメント6の子会社であるダイヤモンドディテクター社からサンプルを購入し測定した結果この要件を満たしていることがわかっているが、現在ダイヤモンドディテクター社は存在せず、結晶自体はエレメント6社より入手できるが検出器用の電極をつけたサンプルは入手できない。一方 SiC に関しては数年でクリー社から良質の基板が手に入れられるようになりリーク電流が 10 電子/msec/100 μm^2 のものが製作できるようになってきている。いずれにせよ、半導体材料の表面に電極を製作する場合は、結晶面の終端と電極材料の選択がリーク電流を増加させる要因となるため、多くのノウハウが必要になる。この部分は、ダイヤモンドに関しては、北海道大学の金子純一氏、SiC に関しては日本原子力研究開発機構の大島武氏と連携を取りつつノウハウを提供していただいた。

検出器容量とノイズの関係は比例関係にあるため、出来るだけ小さい方が良い。よってピクセル検出器及びその読み出し集積回路の製作は必須である。ピクセルサイズが 100 μm 程度であれば、読み出しエレクトロ

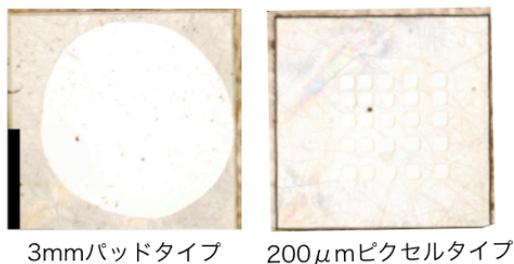


図 2 : 北海道大学において電極を製作したダイヤモンド検出器

ニクス側のトランジスタ容量が主にノイズを決定することになる。よって検出器読み出し用集積回路の製作によって検出器容量に関係するノイズを出来るだけ減らす事が必要となる。またバックグラウンドを減らすために時間分解能を持たせる事も必要である。この検出装置に関する仕様決定は神戸大の身内賢太郎氏と連携を取り検討した。残念ながら開発費用の制限により本研究内では低雑音フロントエンド集積回路を製作評価することのみを行った。

4. 研究成果

下記では低物質質量半導体ピクセル検出器の製作と静特性評価、電荷収集効率の評価の

3つの研究内容に関して詳細を記す。

(1) 低物質質量半導体ピクセル検出器の製作と静特性評価

シリコン検出器、ダイヤモンド検出器、SiC 検出器に関して、バルク特性のみでリーク電流が決まるとした場合、それぞれ数 nA/cm²、

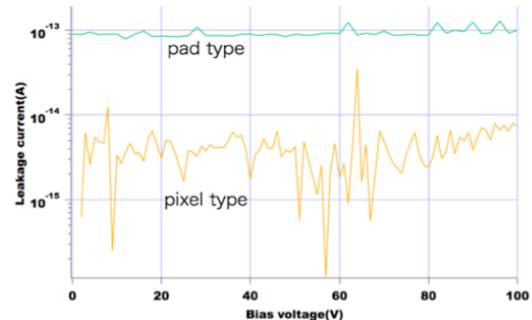


図 3 : ダイヤモンド検出器のリーク電流バイアス電圧依存性

数 pA/cm²、数十 pA/cm² となり、ダイヤモンド、SiC 共に Si より 2 桁~3 桁小さいリーク電流特性を示すことから材料特性のみ見た場合低雑音性能を達成可能な事は間違い無いが、実用化に向けて、購入可能なダイヤモンドの結晶純度、電極構造等による性能劣化、特性ばらつきは、製作と評価が必須である。

エレメント6社のダイヤモンド基板の格

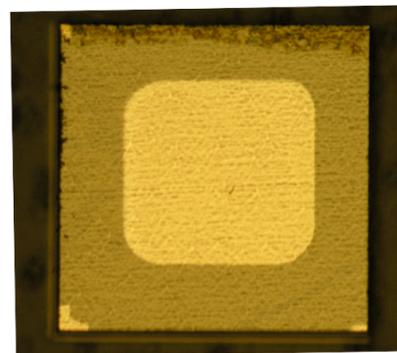


図 4 : 高崎量子ビーム研究所で製作した窒化ケイ素検出器。ピクセルサイズは 100 μm 角

子欠陥、N などの不純物混入によりリーク電流、電荷収集効率が悪化する可能性があるため、複数の結晶を購入し評価した。またピクセル検出器用電極の大きさ、素子アイソレーションと電極間間隔を調査するためピクセル間の間隔を変化させた電極構造も製作しリーク電流の評価を行った。図 2 に製作したダイヤモンドパッド検出器とダイヤモンドピクセル検出器の写真を示す。パッド検出器のパッド直径は 3mm、ピクセル検出器のピクセル電極サイズは 200 μm 角でピクセル間

の間隔を $50\mu\text{m}$ から $200\mu\text{m}$ 間隔まで変化させて製作した。図3がリーク電流の評価結果である。パッド検出器は 100fA 、ピクセル検出器は平均 5fA となった。二つの検出器のリーク電流の差が面積比と異なるのは二つのピクセル間隔が狭いピクセルに関して隣のピクセルからの表面リークがあるためと考えられる。これは $50\mu\text{m}$ 間隔で顕著に見られるが、この影響はガードリングをつける事で軽減できる事がわかっている。

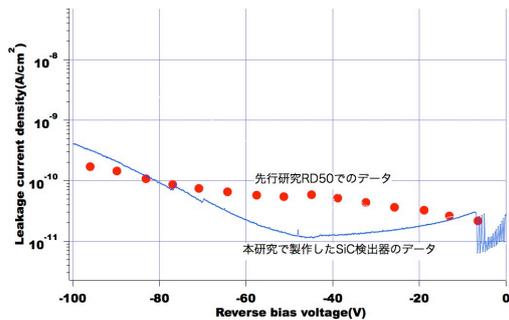


図5: SiC(炭化ケイ素)検出器のリーク電流バイアス電圧依存性

SiC結晶に関して以前はマイクロパイプという結晶欠陥が多く問題となっていたが現在ではマイクロパイプ密度は $1\text{個}/\text{cm}^2$ 以下の結晶基板を購入する事が可能となってきた。万が一マイクロパイプがあっても電極をつけたあとにリーク電流を評価しマイクロパイプがあるピクセルは使用しないことでノイズ低減を図る事が可能である。本研究では、低マイクロパイプ密度のSiC基板上に $25\mu\text{m}\sim 170\mu\text{m}$ のepi層を成長させ、そこに図4に示すようなSiCのショットキー型ダイオード検出器を製作しその静特性を調べた。本研究で評価した素子の開発は量子ビーム応用研究部門の技術と協力を得て行った。その結果を図5に示す。図5において赤丸は先行研究であるCERN-RD50の実験データで、青線は本研究で製作したSiC(epi- $25\mu\text{m}$)検出器のリーク電流特性を示した物である。この結果から先行研究と同程度もしくは一桁性能が良い検出器が製作できた事がわかる。

(2)電荷収集効率の評価

ここまでの結果をまとめると、検出器の静特性は、研究立案段階において想定した定量的結果と同程度もしくはそれ以上の性能を示しており、目標達成に十分な性能が得られている。そこで次に電荷収集効率に関して測定を行った。

図6は今回製作したエレメント6社の基板を使ったダイヤモンド検出器のアルファ線のエネルギースペクトルで、アルファ線を

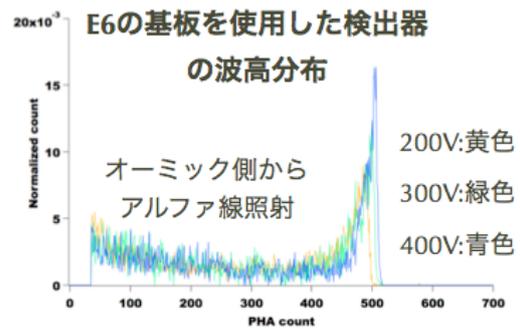


図6: 製作したダイヤモンド検出器の典型的なアルファ線応答

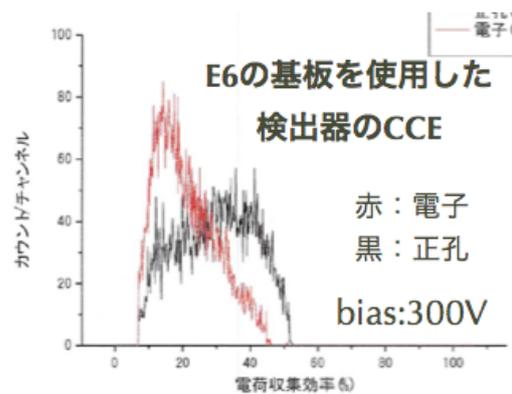


図7: 電荷収集効率の悪いダイヤモンド検出器の電子・正孔の電荷収集効率

正しくとらえられているが、エネルギーの低いところにも分布が見え、製作した検出器毎で異なるスペクトルが得られたため北海道大学の協力を得て正孔と電子の電荷収集効率を個別に測定した。そのなかで一番性能が悪い例を図7に示す。購入したダイヤモンド基板は全て同じグレードで会社も同じであるが、電荷収集効率が電子・正孔共に 90% を越えるものもあれば、図7に示すように 50% 程度のものであり性能がばらついている。現時点ではサンプル数が少ないためイールドの定量化ができないが、本申請の実験を提案する場合以下の問題を解決する必要がある事がわかった。

①ダイヤモンド基板の事前選別による問題解決

②ダイヤモンド基板の会社に頼らない独自成長と品質均一化による問題解決

①に関しては実行に移す前の段階でエレメント6社から結晶を購入しイールドを定量的に評価し、実験遂行時のコストエスティメートが出来るため、それによってこの解決方法を選択するかどうかを決める。②に関しては現在北海道大学で成長プロセスを持つCVDダイヤモンド膜を基板として検出器を製造する。この基板を使用して製作した検出

器は電荷収集効率ほぼ 100%を示しているため、これにより①に問題があっても解決策

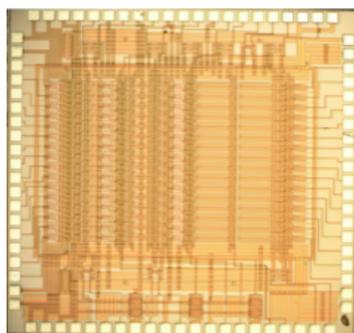


図 8 : 検出器評価用超低雑音集積回路

②を取る事が可能となる。今後②の遂行を可能にするため、更に北海道大学と連携を強め開発研究を進めて行く。SiC に関しては、本研究でドーピング密度と epi 膜性能の関係、及び検出器としての性能は理解できた。また SiC は産業用途でトランジスタ等を製作する半導体プロセスがいくつかの会社で立ち上がっており epi 膜の均一性はそこで担保される。よって今後は実際にそれぞれの会社のプロセスを評価する段階に入る。

(3)低雑音読み出し集積回路の設計製作評価
ピクセル検出器を実用化するには、CMOS プロセスを使用したピクセル検出器信号処理用高集積回路開発は必須である。

$T_{peak}(\mu s)$	5
$G_{cv}(mV/fC)$	20,50
$V_{dynmc}(V)$	-0.4~0.4
$\Delta V_{off}(mV)$	50~100
$ENC_{@0pF}(e)$	65
$ENC_{slope}(e/pF)$	3~18
#ch	16
size(mm ²)	2.5x2.5

本研究ではその前段階として、ピクセル信号処理用低雑音多チャンネル集積回路を開発した。図 8 に開発した低雑音信号処理集積回路の写真を示す。チップサイズは 2.5mm 角

表 2 : 検出器評価用超低雑音集積回路の仕様

に 16ch 実装されている。仕様を表 2 にまとめた。評価用であるため、コンバージョンゲインは 20mV/fC と 50mV/fC が選択でき、ピーキングタイムも可変になっている。(最適

値は 5 μ sec である) ノイズ特性は入力換算雑音電子数(ENC)で $65+3 \cdot C_{det}$ (電子数)であり非常に良好な低雑音特性を示した。ここで C_{det} は検出器容量(pF)であり、計算上ではワイドギャップピクセル検出器の検出器容量は 1pF 未満であるため、暗黒物質のリコイルによる信号をとらえるには充分の S/N 比をもつ評価用集積回路の開発に成功した。今後は本デザインを基にピクセル用信号処理集積回路を開発して行く。

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 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

①”低質量暗黒物質直接探索実験”、身内賢太朗、田中真伸、村上武、熊木大介、鶴剛日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 29 日東海大学 湘南キャンパス(神奈川県平塚市北金目 4-1-1)

②”ワイドギャップ半導体を使用した半導体検出器の特性評価”、田中真伸、金子純一、牧野高紘、大島武、嶋岡毅紘、新名章宏、小野田忍、土田秀一、星乃紀博、身内賢太朗、市川温子、山本和弘、村上武、斉藤正俊、島崎昇一、日本物理学会第 70 回年次大会 2015 年 3 月 24 日早稲田大学 早稲田キャンパス(東京都新宿区西早稲田 1-6-1)

③ 国際会議発表(invited) "Radiation Detector Development for Direct Dark Matter Search", Kentaro Miuchi, "International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses (ISR2016)" 18-21 January 2016 KEK, Tsukuba, Japan

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者

金子 純一 (KANEKO, Junichi)

北海道大学・大学院工学研究院量子理工学部

門・准教授
研究者番号：90333624

嶋岡 毅紘 (SHIMAOKA. Takehiro)
北海道大学・大学院工学研究院量子理工学部
門・博士研究員
研究者番号：80650241

大島 武 (OHSHIMA. Takeshi)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子
ビーム応用研究部門・研究主幹
研究者番号：50354949

牧野 高紘 (MAKINO. Takakahiro)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子
ビーム応用研究部門・研究員
研究者番号：80549668

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