様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２６ 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：2012～2013
課題番号：２４６５４０６７

研究課題名（和文）微細加工技術と高抵抗物質による、単一電子イメージングデバイスの開発

研究課題名（英文）Development of single electron imaging device using MPGD with resistive electrodes

研究代表者
越智　敦彦（OCHI, Atsuhiko）

神戸大学・理学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：４０３３５４１９

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　2,900,000円、（間接経費）　870,000円

研究成果の概要（和文）：MPGDで単一電子を検出するためには、10万倍以上のガス電子増幅率が必要と考えられるが、これを実現するために、陰極に高抵抗素材を用いたμ-PICを開発した。特に本課題研究では高抵抗陰極と読出電極を分離したデザインを考案して試作、試験を行い、7万倍近い増幅率を実現し、かつ従来型μ-PICと比べて放電確率を1/1000～1/10000程度に抑制することに成功した。さらに高抵抗物質として新たに炭素スパッタを用いる手法を開発することで製造プロセスを改良し、10cm角の２次元イメージング型μ-PICの試作を行った。

研究成果の概要（英文）：The gas electron multiplicity of more than 100 thousands is necessary to detect the single electron by MPGDs. We have developed new Micro-Pixel Chamber with resistive cathode for that purpose. The cathode electrodes are made from high resistive material, and the signal can be read by separated readout by induced charges. The prototypes have been made and tested. The maximum gain was close to 70 thousands, and the spark proberbility is surplessed to 0.1% - 0.01% compared with that of conventional Micro-Pixel Chambers. Additionally, we have improved the production process of the detector by using carbon sputtering for resistive cathodes. We have made new prototype which have 10cm x 10cm detection area and two dimensional imaging property.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：粒子測定技術　イメージング　微細加工技術　ガス放射線検出器　MPGD

1．研究開始当初の背景

高エネルギーμ粒子などの MIP（Minimum Ionized Particle）測定や、γ線入射方向検出器に用いられるコンプトン散乱による反跳電子飛跡検出、可視光や紫外線を光子単位で測定するガスフォトマルなどの読出しデバイスとして MPGD（マイクロパターンガス放射線検出器）は非常に有望な検出器であり、これまで多くの研究機関等で開発が進められてきた。一般にこれらの検出のためには１個～数十個の電子群（クラスタ）の検出が必要であるため、電気的な読出しのためには、物理的に 10^4～10^6 の電子増幅を行うことが必要である。MPGD では基本的にこの増幅率は実現可能ではあったが、α粒子や中性子による反跳陽子など、初期電子数が数万個以上のクラスタが生じた場合、ガス増幅により過剰な電子が電極付近に生じる問題があった。この電子数がある臨界値を超える(Raether limit ～10^8)と放電が生じることが昔から知られており[H.Raether, Electron avalanches and breakdown in gases, London Butterworth, 1964]、MPGD の製造品質が格段に進歩した現在においても、高ガス増幅率での動作不安定の原因となっている。そこで電極に抵抗性の物質を用いることで、大きな電荷移動に対し検出器内電場を抑制し、放電を防ぐ手法が有効であると考えられ、抵抗性物質を使った各種検出器デザインが 2010 年頃より国内外で研究されている。研究初期の頃は、この素材として用いる抵抗性物質は、カーボンを混ぜたカプトンシートやインクなどが用いられていたが、加工性やカーボンの顆粒性の問題から、安定した検出器の作成は難しかった。

代表者は、MPGD の一種であるマイクロピクセル検出器（μ-PIC）を考案し、開発を行ってきた。さらにカーボンを混入したポリイミドシートを電極に使ったデザインを考案[特願 2010-117877, 越智]し試作試験も行ってきた。現状では素材の加工性の問題点から十分な性能を出すことが難しいが、電極素材を開発することで、単一（少数）電子イメージングへの実現の着想を得た。

2．研究の目的

本研究課題では、単一電子イメージングが可能な MPGD の基礎的な開発を目標とする。単一電子のイメージングが可能となれば、光検出器や粒子線検出器の性能を大幅に向上させることができ、高エネルギー物理の粒子線検出器だけでなく、低線量の放射線診断装置や単一光子が見られる高感度カメラへの応用など、様々な分野へ応用範囲が拡がることが期待できる。しかし、例えば半導体を用いた方法では常温では動作しないなど、これまでは実現に強い制限のかかる手法しか存在しなかった。本研究課題では MPGD と高抵抗率の物質を組み合わせ、ガイガーモードで動作する微小な電極アレイを構成するという新しいアイディアに基づく検出器を開発する。このために、従来のカーボンブラックを主体とする高抵抗素材だけでなく、MPGD の生産技術に適した新たな高抵抗素材を開発することで、実現に結びつける。最終的には、これらの技術開発の結果として単一電子のイメージングを可能とする革新的な測定器の実現を目指す。

3．研究の方法

本課題研究の第一段階としては、目的とする性能を実現するための検出器の電極構造の開発、及び検出器の高抵抗導電性素材の探索を行った。具体的にはマイクロピクセル検出器（μ-PIC）をベースとして、最適となる電極構造を考案・設計し、試作した。また、高抵抗導電素材の探索については、当初はポリイミドベースの導電性ペースト（東レの協力により提供されたもの）が、プリント基板作製技術と比較的相性が良いために、これを用いた検出器試作を行ったが、研究の過程で、炭素スパッタリングで高抵抗電極を形成するという全く新しい素材（物質的には、ダイヤモンドライクカーボン素材）を用いる製法の考案に至り、本研究課題の２年目からはスパッタリングによる電極形成により試作を行っている。

本課題研究の第二段階としては、検出器の試作とその動作試験が挙げられる。このために初期段階では粒子線による信号を確認するための、簡易型の 10cm 角の大きさの高抵抗陰極を持つμ-PIC を試作・テストし、最終的にはイメージングへ向けた各チャンネル独立読出し（全 512ch 出力）のタイプのμ-PIC の試作を行った。

4．研究成果

(1) 本研究課題以前には、代表者は図１に示す通り、陰極電極に直接高抵抗物質を接触させた形のμ-PIC を開発し、粒子線の信号を見ることには成功していた。

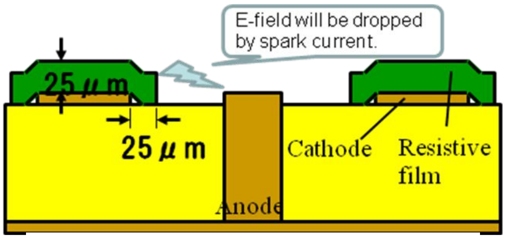

図１：陰極電極に直接高抵抗物質を接触させる形のμ-PIC のデザイン。

しかし、図１による手法では十分な増幅率が得られず、期待されていた放電抑制の効果も見られていなかった。そこで、本研究の初年度では、本研究課題である単一電子まで見

られる検出器を開発するという観点から、安定に放電抑制を行う検出器デザインとして、図２に示す通り、高抵抗素材のみで陰極を構成し、信号読出しのために絶縁層の下に別の導電体による信号線を組み入れるものを考案した。

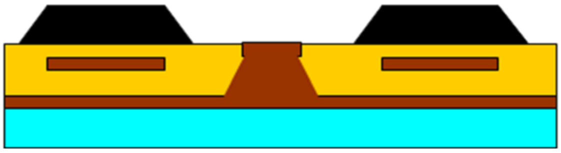

図２：高抵抗電極のみで陰極を形成し、絶縁体の内層電極により誘起電荷を読み出す形のμ-PIC のデザイン

高抵抗素材としては、東レ、及びレイテック社の協力により提供されたポリイミドベースの高抵抗ペースト（カーボンブラックを混入したもの）が、工作性に優れていることが判明したため、初年度は、図２のデザインにこの高抵抗ペーストを組み合わせる形で試作を行い、動作試験を行った。試作した検出器の電極構造図を図３、検出器表面の顕微鏡写真を図４、一ピクセルを拡大して、焦点距離情報を用いた３次元像を撮ったものを図５に示す。

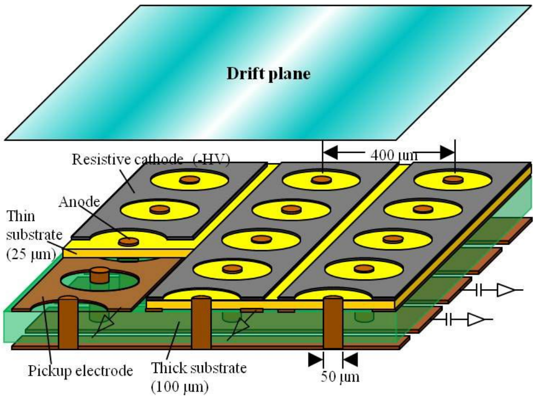

図３：本課題により試作したμ-PIC の電極構造図

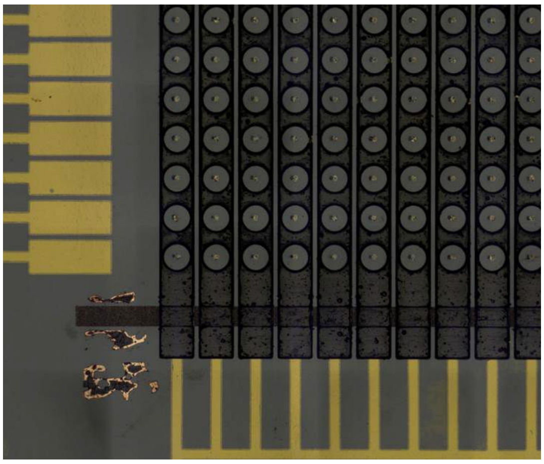

図４：高抵抗陰極にカーボンポリイミドを用いたμ-PIC 試作機表面の顕微鏡写真。

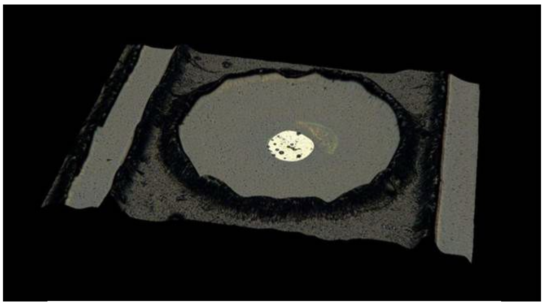

図５：高抵抗陰極型μ-PIC の一つのピクセルを拡大し、焦点距離情報を用いて３次元的に表示したもの

(2) この手法により開発したμ-PIC は、5.9keV の X 線によるガス増幅率の測定では、最大で 70000 近くまで達し、従来型のμ-PIC を凌ぐ高増幅率を実現した。さらに、放電抑制についてはさらに顕著な結果が得られ、高速中性子を High Ionizing Particle として用いた放電率の測定では、従来型μ-PIC と比較して、10^3～10^4倍の放電が抑制できていることがわかった(図 6)。

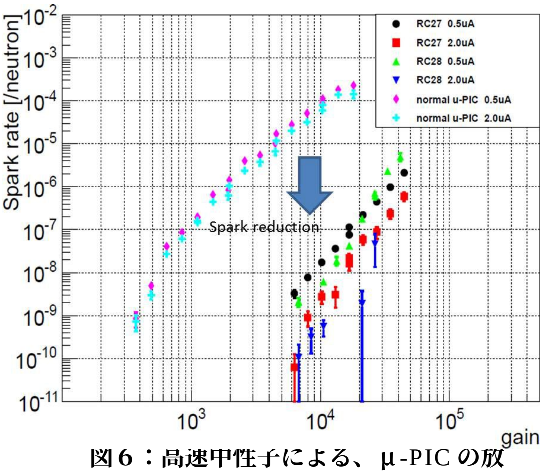

図６：高速中性子による、μ-PIC の放電確率の測定結果。横軸は増幅率、縦軸は照射中性子当たりの放電確率。RC27, RC28 の点が高抵抗陰極型μ-PIC による放電率で、normal は従来型μ-PIC によるものである。

一方で、図３の構造で試作したμ-PIC は、製造プロセス上の問題から、検出器内部での放電破壊が問題になるケースが多発し、単一電子検出に必要とされる 100000 以上のガス増幅率には達しなかった。そのため、電極素材形成手法を含む、検出器の製造プロセスを見直す必要が出てきた。

(3) 一方、同時期に本課題の研究代表者が代表を務める他の科研費研究課題（No.23340072）の中で、マイクロメガス検出器用の高抵抗電極としてスパッタ技術による薄膜技術を考案した。これは本研究課題のμ-PIC にも有用であり、製造プロセスを大幅に改善できるとの着想を得るに至り、本課題の２年目はスパッタ技術をμ-PIC へ用いる研究を中心に行った。

(4) 初年度で試作していたμ-PICは、取り扱いを容易にするために読出数を制限し、イメージング能力を持たないものであったが、2年目では、10cm角の検出領域中、縦横それぞれ400μmピッチの全て(合計512ch)の読出しを可能とし、イメージング能力を持たせるものを設計した。全信号読出のためには多チャンネルのデータ収集システムが必要であるが、ちょうどこのタイミングで、RD51（MPGDの国際共同研究組織で、神戸大学グループも参加している）で新たに安価で高性能なデータ収集システムが開発されたため、これを導入することを前提とした設計仕様とした。

また、一般的にガス検出器では陽極電極の各チャンネルにそれぞれプルアップ抵抗とカップリングコンデンサが必要であり、これらの部品点数や実装面積もイメージングのための信号を読み出すためのハードルとなるが、本課題研究ではこれらを実質的に不要（検出器構造に含む）とする新たな構造も考案した。プルアップ抵抗については、スパッタにより作られる抵抗を利用したパターンを作成し（図７）カップリングコンデンサは、アノードと平行に高誘電シートを挟んで読出しストリップを設けることにより実現している（図８）。

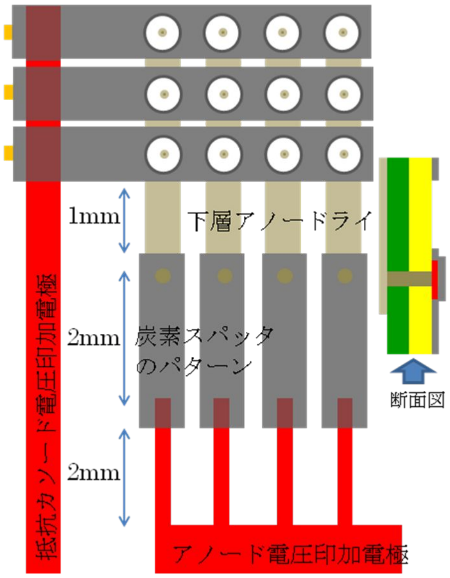

図７：炭素スパッタにより作られる高抵抗膜を利用したプルアップ抵抗形成

図８：高誘電フィルムを用いた陽極電極の容量性読み出し機構

これらの新しいアイディアを導入することにより、MPGDによるイメージング検出器開発で最大の問題となる、多チャンネルの読出し機構を、シンプルかつ安価に実現することができた。炭素スパッタリングによる高抵抗薄膜を使い、かつこれらのアイディアを元に試作機の写真を図９に示す。現段階では、高誘電シートなどの素材に若干の問題点が残っており、かつ製作までに多くの時間を要したことから、十分な測定結果は得られていないが、この形でのμ-PICが動作可能になれば、単一電子のイメージングデバイスとしても機能することが十分期待できる。

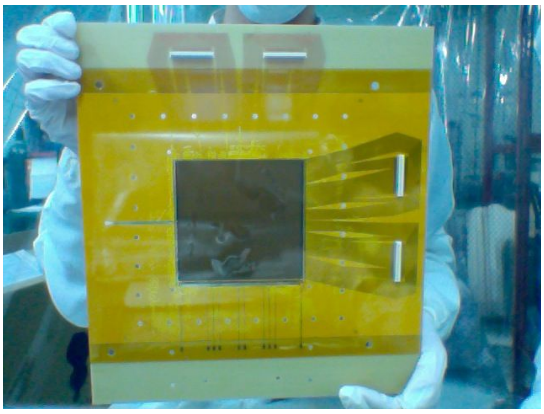

図９：イメージング用に試作した全チャンネル読出し型μ-PICの試作機

(5) 本研究では、当初目的としていた単一電子のイメージングを行う所までは達することができなかったが、高抵抗電極を用いることで非常に高い放電抑止能力を持たせることに成功したという点で、大きな意義があったものと考えられる。国内外においては、現在の MPGD 開発の流れは、放電抑制のために高抵抗率の電極素材をいかに用いるかに焦点が当たっているが、本課題では、究極とも言える炭素スパッタ法（ダイヤモンドライクカーボン）を用いる方法の新たな開発に成功しており、国内外からも注目を集めている。実際にこれまでに、国内・国外それぞれから複数件、炭素スパッタを電極とする測定器の開発の協力を依頼されている。

今後の展望としては、炭素スパッタを用いた検出器の製造手法の改良により、さらに安定動作が望めるため、本研究の延長で単一電子イメージングデバイスは十分実現できるものと考えられる。また、HIP 粒子に対する非常に強力な放電抑制効果が得られたことから、今後本検出器を高ハドロンバックグラウンドが見込まれる領域の粒子線飛跡検出器として開発することも視野に入れられる。

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計３件）

① A. Ochi, Y. Edo, Y. Homma, H. Komai and T. Yamaguchi, "Micro Pixel Chamber with resistive electrodes for spark reduction", JINST 9 C01039 (2014), 査読有
DOI:10.1088/1748-0221/9/01/C01039

② Atsuhiko Ochi, "MPGD R&D Activities in JAPAN", Journal of Physics:

Conference Series 469 (2013) 012005, 査読無
DOI:10.1088/1742-6596/469/1/012005
③ Atsuhiko Ochi, Yasuhiro Homma, Hidetoshi Komai, Yuki Edo, Takahiro Yamaguchi and Rui de Oliveira, "New Development of μ-PIC with Resistive Cathode and Capacitive Readout", IEEE Conference Record N14 (2012) 131, 査読無

〔学会発表〕（計１２件）
① 越智敦彦, "MPGD R&D Studies in JAPAN", 日本物理学会第 69 回年次大会日韓シンポジウム, 招待講演（2014 年 3 月 27 日-30 日、東海大学）
② 竹本強志, "炭素スパッタリングを用いた抵抗電極をもつ MicroMEGAS の開発", 第 10 回マイクロパターンガス検出器研究会（2013 年 12 月 13 日-14 日、京都大学）
③ 越智敦彦, "MPGD 開発の世界の動向", 第 10 回マイクロパターンガス検出器研究会, 招待講演（2013 年 12 月 13 日-14 日、京都大学）
④ 越智敦彦, "スパッタリングによる高抵抗薄膜電極を用いた MPGD の開発", 日本物理学会 2013 年秋期大会（2013 年 9 月 20 日-23 日、高知大学）
⑤ A. Ochi, "Micro Pixel Chamber with resistive electrodes for spark reduction", 3rd International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors" (2013 年 7 月 1 日-4 日、Zaragoza, Spain)
⑥ A. Ochi, "R&D Activities of MPGD in JAPAN", 4th Workshop on Directional Detection of Dark Matter (CYGNUS2013), 招待講演（2013 年 6 月 10 日-12 日、富山市）
⑦ 越智敦彦, "高抵抗陰極型μ-PIC の電場及び構造の最適化", 日本物理学会第 68 回年次大会（2013 年 3 月 27 日, 広島大学）
⑧ 駒井英俊, "高抵抗陰極を用いた内層読出型μ-PIC の開発", 第 9 回マイクロパターンガス検出器研究会（2012 年 12 月 7 日-8 日, 長崎総合科学大学）
⑨ A. Ochi, " New Development of μ-PIC with Resistive Cathode and Capacitive Readout", 2012 IEEE NSS/MIC (2012 年 10 月 27 日-11 月 3 日、Anheim, CA, USA)
⑩ A. Ochi, "Developments and tests of Micro Pixel Chamber with Resistive Cathode", 10th RD51 MPGD Workshop (2012年9月30日-10月5日、Stony Brook Univ, NY, USA)
⑪ 越智敦彦, "高抵抗電極を用いた放電抑制型μ-PICの開発", 日本物理学会2012年秋季大会（2012 年 9 月 13 日、京都産業大学）
⑫ 山口貴弘, "高抵抗陰極及び容量性読み出しを用いたμ-PIC の開発", 日本物理学会 2012 年秋季大会（2012 年 9 月 13 日、京都産業大学）

〔その他〕
ホームページ等
http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~upic/

６．研究組織
(1)研究代表者
越智　敦彦　（OCHI, Atsuhiko）
神戸大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：４０３３５４１９