

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：2014～2016

課題番号：26610069

研究課題名(和文)スパッタリング技術を用いた超微細電極型ガス放射線検出器の開発

研究課題名(英文)Development of fine MPGDs using carbon sputtering

研究代表者

越智 敦彦(Ochi, Atsuhiko)

神戸大学・理学研究科・准教授

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

研究成果の概要(和文)：本研究では炭素スパッタによる薄膜技術で高精細かつ高抵抗の電極を構成するアイディアにより、MPGD特有の放電問題を狭い電極間隔においても回避できるデザインの放射線検出器開発を行う。本研究では炭素スパッタを用いたMPGDの微細加工サイズの限界をMSGC型のMPGD開発により評価し、 μ -PIC型のMPGDを試作した。またスパッタを用いた積層技術を用いることで、これまで電極の各チャンネルに必要な電圧バイアス抵抗を表面抵抗パターンに入れ、積層電極でACカップリングのキャパシタを形成する新しい技術の導入にも成功し、非常にコンパクトな読出しが可能かつ高位置分解能の検出器開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：The new MPGD with resistive electrodes using sputtered carbon (DLC) has been developed. Spark reduction in short gaps between anode and cathode was realized by resistive electrodes. The prototype of MSGC-type MPGD has been developed for estimating the limitation of fine structure of DLC electrodes on PCB technology. After that, prototype of Micro-Pixel chamber with resistive cathode with DLC has been developed and tested. Besides, using multi-layer PCB technology, HV bias resistors and readout AC coupling capacitors are included inside readout PCB compactly. Then very compact readout from μ -PIC type detector has been realized. The operation test shows good performances with fine position resolution.

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子実験 粒子測定技術 MPGD ガス放射線検出器 リソグラフィー スパッタリング DLC

1. 研究開始当初の背景

マイクロパターンガス検出器(MPGD)は、優れた高入射粒子許容量と中程度の位置分解能(検出器の画素ピッチは 200 ~ 500 μm 程度)を持ち、プリント基板作製技術などをベースに比較的低コストで大面積の粒子線イメージングやトラッキングを行うことができる。このため、高エネルギー実験の粒子飛跡検出やガンマ線コンプトンカメラのトラッカー、中性子のイメージングデバイスなどに利用されている。しかし、セルサイズが 400 μm を切るような高精度のイメージング、例えば加速器実験の衝突点付近検出器や X 線回折像の測定、医療診断などでは、半導体検出器が多く用いられている。一方半導体検出器の検出面のサイズは 10cm 角程度が限界であり、これ以上の大面積化は難しい。そこで本研究では、半導体検出器に匹敵する 100 μm オーダーのセルサイズを持つ超微細電極型の MPG D を開発し、大面積かつ高精細な検出器実現のための原理検証を行う。

一般にガス検出器の陽極と陰極の電極間が狭くなると、ガス増幅より先に放電が起こりやすくなり、これまで MPG D の電極の微細化の限界となっていた。一方応募者の研究 [arXiv:1310.5550] によって、電極を高抵抗素材で作ることにより放電を大幅に抑えられることができるようになった。さらに応募者らが現在開発している炭素スパッタリングとリフトオフプロセスにより、高抵抗電極を非常に高精度(1 μm 程度)かつ一様に作れるようになった。これらの最新の成果から、放電に強い高抵抗電極を高精細に作製するという着想を得ている。

2. 研究の目的

本研究では、従来の MPG D の常識を超えた超微細電極を持つガス放射線検出器の試作、及び原理検証としての動作試験を行う。電極形成に用いるスパッタリング技術そのものは、1m 角以上の大面積でも使えるものであるが、本課題の研究期間内では 10cm x 10cm 程度の小型検出器を様々な条件で試作試験することで、超微細電極型 MPG D の特性、及び問題点などを洗い出し、将来の大型装置を用いた応用研究を想定した基礎的な研究を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

研究の初年度では、炭素スパッタリングとリフトオフプロセス(図 1)により、微細電極間隔を持つパターンを作成した。想定するパターンとして、最初は最も簡単な MPG D である MSGC タイプ(図 2 の通り、陽極と陰極が交互に直線状に並んでいる構造)を作成し、炭素スパッタ電極を用いた場合の動作確認、及びより微細なパターンの電極作成技

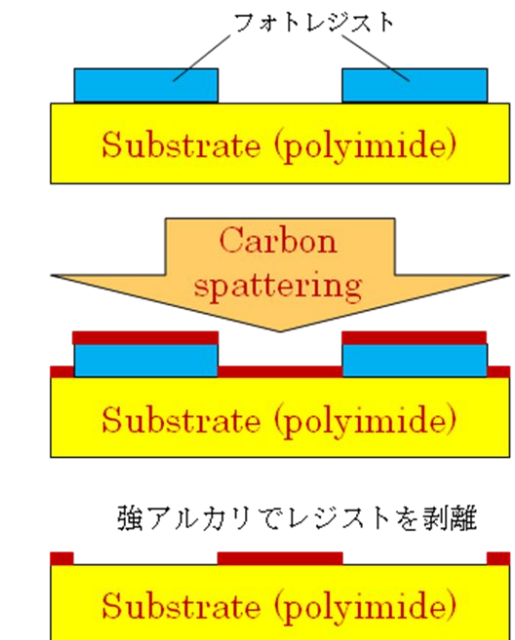


図1: スパッタリングとリフトオフによる高抵抗電極パターンの作製

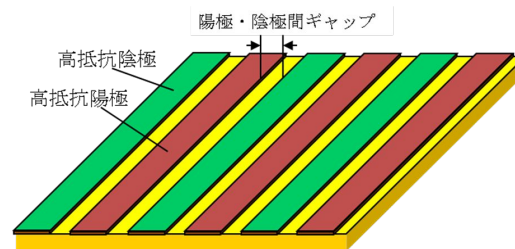


図2: MSGC型電極構造

術の評価を行った。MSGC は過去の研究結果などから比較的放電破壊の起こりやすい検出器とされているため、研究 2 年目以降は、ここで得られた実現可能な微細電極の大きさパラメータ等を、 μ -PIC 型検出器に応用して、より汎用性の高い二次元検出器を試作し、動作試験を行った。当初は本課題研究は 2 年で終了の予定であったが、炭素スパッタを用いた抵抗電極により、 μ -PIC 型の電極構造を安定に構成する技術的な問題解決に時間がかかり、研究期間を一年延長した。

4. 研究成果

(1) 研究初年度は、ピッチ等の異なる MSGC の試作を行い、電極構造や素材構成の異なる 8 種類のパターンを試作した。これらの陰極は全て炭素スパッタとリフトオフ技術により作成した抵抗電極である。電極パターンとして、陽極については同様の抵抗電極の場合と金属電極の 2 通り、読み出しピッチは通常ピッチ (400 μm) と微細ピッチ (200 μm) の 2 通り、陽極と陰極の距離として、30 μm 、50 μm 、100 μm の 3 通りのパラメータを用い、表 1 に示す通りの組み合わせの試作を行った。試作は、PCB や FPC を専門に製作している企業に依頼したが、同じ基板面に金属電極とリ

フトオフによる炭素スパッタ電極が混在する電極面を作成することはかなりの技術的な困難が生じ、図3に示す通り、金属の陽極を用いた場合に陰極ストリップの中央に形成できないなどの問題が生じた。

	陽極材質	Pitch	Gap
(a)	Sputter	400	100
(b)	Sputter	200	30
(c)	銅	400	100
(d)	銅	200	30
(e)	銅	200	50
(f)	銅	400	50
(g)	Sputter	200	50
(h)	Sputter	400	50

表1: MSGC型電極構造のパラメーター一覧

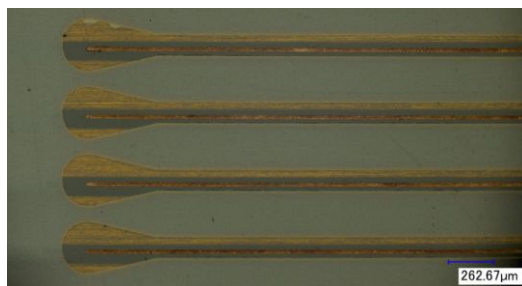


図3: 試作 MSGC の顕微鏡写真。灰色の部分炭素スパッタによる陰極、間の細い線が金属電極である。本来陽極は陰極の中央に位置するべきだが、ずれている。

動作テストの結果は、微細ピッチのパターンのもを含め、陽極と陰極の間隔が狭いものについては、放射線入射に対する信号を得ることができなかった。これに対し、従来ピッチ(400 μm)のものからは信号を得ることができた。

(2) 炭素スパッタ技術そのものについて、抵抗値をコントロールするためには従来はスパッタ厚をコントロールするしか方法が無く、比較的低い表面抵抗値(1M / 以下)実現のためには長時間のスパッタを必要としていたのだが、新たにスパッタに窒素を添加する手法を考案し、これにより低抵抗値側へのコントロールを容易にすることが可能となった。図4に、スパッタする炭素の厚さと表面抵抗率の測定結果について、純粋な炭素スパッタによるもの、及び窒素ドーピングを行ったもののグラフを示す。検出器への要求(最大粒子線量など)や電極デザインなどによって異なる要求抵抗値を、任意の値で比較的短い製造時間で作ることができるよう

になった。特に超微細構造型の電極構造では、単位面積当たりの抵抗値はこれまでの MPGD に比べても低くする必要があり、この技術革新の効果は大きい。

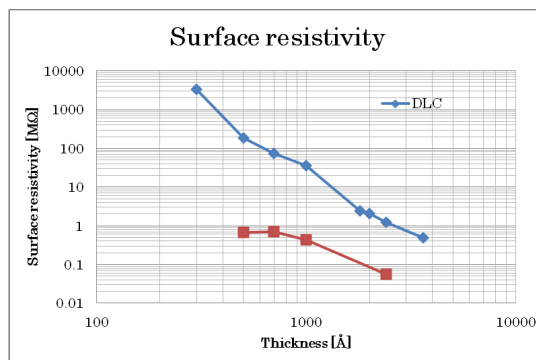


図4: 炭素スパッタ(DLC)の厚さによる表面抵抗率。青線が純粋な DLC によるもので赤線が窒素ドーピングしたもの。

(3) 前記(1)の結果より、現在の技術では 200 μm ピッチレベルに対応する高密度の電極配置を、炭素スパッタと金属電極の混在下で実現することは困難であると判断されたことから、次のステップである μ-PIC 型の二次元検出器を形成するにあたって、400 μm ピッチの試作を行った。先行研究(平成 24-25 年度挑戦的萌芽研究: 課題番号 24654067)により、抵抗電極を導電性ポリイミドにより形成する手法で高抵抗陰極型 μ-PIC が開発され、動作検証は行われていたため、同じ電極構造(図5参照)を用いて、抵抗電極に炭素スパッタを用いた。

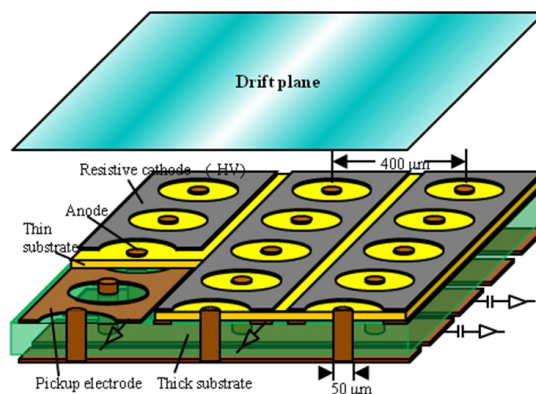


図5: 抵抗陰極を持った二次元読出し型 μ-PIC の構造図

しかし、試作開始当初、複数の電極レイヤーの位置合わせに関する問題から、陽極ピックアップセルと内層電極の導通、もしくは位置ずれによる低耐圧問題が生じることとなり、これらの問題解決がどうしても必要であった。試作のための技術は、工業的に一般的な技術であるリソグラフィ技術をベースとした、微細加工技術を用いたものであるが、本研究課題実現のためには、一般的な工業的プロセスの限界を超えた微細な加工について、手探りの状

態で最適な手法を求める必要があり、多くの時間をその検討に費やしすこととなった。この結果、当初2年としていた研究期間を一年延長し、基板メーカーとともに試作実現へ向けて試行錯誤を繰り返した。

これらの研究の過程で、位置合わせを容易に行うために絶縁素材にドライレジストを用いる手法（これまででは全てポリイミドベース）や、基板を貫通する陽極電極について異なる基板層間を確実に繋ぐための金属スパッタの導入、金属パターンを用いた炭素電極のリフトオフなど、新たな技術を投入することにより、最終的には目的とする高抵抗陰極型 μ -PICを実現することができた。この断面の構造図を図6、表面の写真を図7、1ピクセルについての顕微鏡写真を図8に示す。

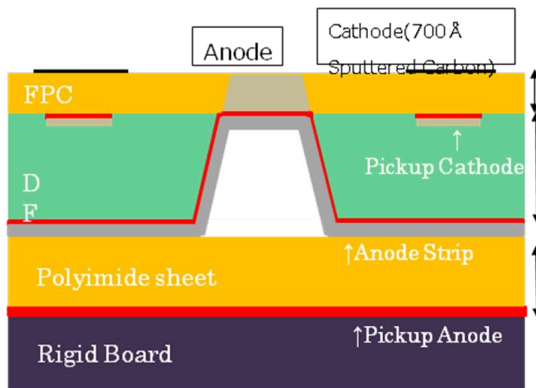


図6: 炭素スパッタによる抵抗電極 μ -PICの、断面構造図



図7: 試作した炭素スパッタによる μ -PICの表面の写真。各ピクセルは縦横とも400 μ mピッチに並んでいる。

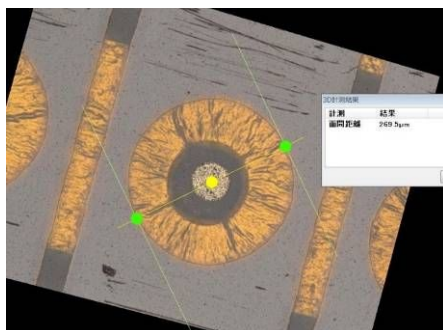


図8: 試作機の1ピクセル顕微鏡写真

(4) 試作検出器の実装と動作テストは、アルゴン(90%)+エタン(10%)混合ガス中で、鉄55線源(5.9keV X線)を用いることにより行った。まず、試作機への電圧印加部、信号読み出し部にかかる構造について、図9に示す通り、高圧バイアス抵抗を表面の炭素スパッタと同時に形成し、カップリングコンデンサを多層基板間の寄生容量を利用する手法で構成した。この構造のアイデアは、先行研究(科研費:課題番号 24654067)で考案したものであったが、今回初めて動作可能な試作に成功している。

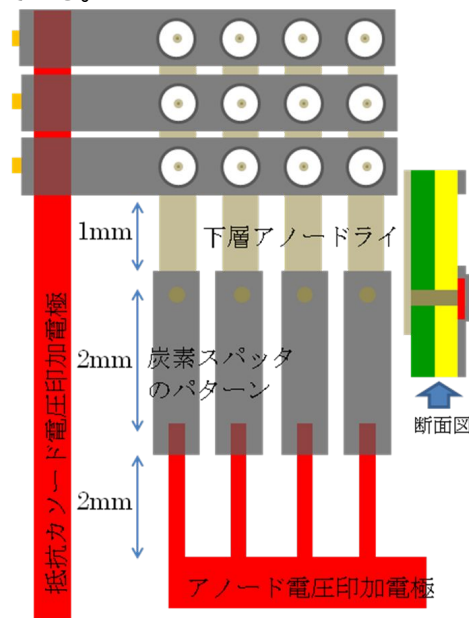


図9: 高圧バイアス抵抗・読出接続コンデンサ内蔵型 μ -PIC読出基板構造図

この試作検出器により、5.9keV X線の信号は、比較的きれいなエネルギースペクトラムを持って得ることができ、ガス増幅率は10000以上を達成することができた(図10、図11)。また、アノード側の信号がカソードより2割ほど小さいものの、二次元読出し同時の信号も確認されており、多チャンネルの読出回路へ接続さえできれば、イメージング能力を持つことも示された。

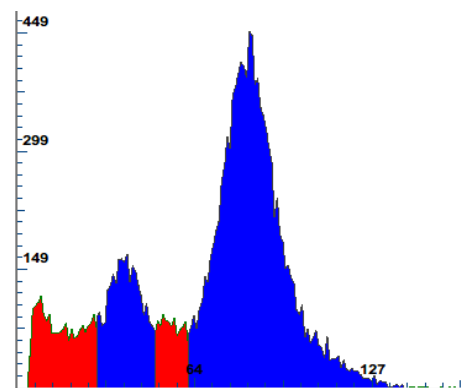


図10: 試作機による、5.9keV X線入射によるパルス信号分布

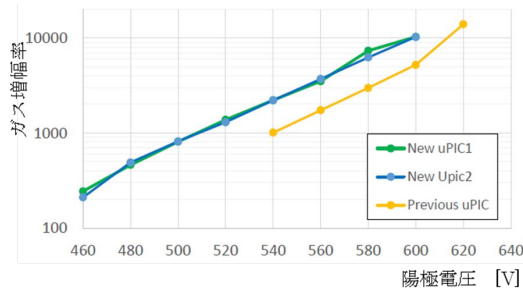


図11： 試作機のゲインカーブ

また、試作機3台を用いて、宇宙線 μ 粒子を用いることで位置分解能を求める測定も行い(図12)得られる信号を residual 方により処理することにより、信号の位置分解能として $133\mu\text{m}$ が得られた。これは、 $400\mu\text{m}$ ピッチの検出器としてはかなり理想に近い値である。

本研究課題では、当初はMPGDの電極をより微細にすることで位置分解能の向上を図ったものの、技術的な制約により当初想定していた程十分な微細化はできなかったが、炭素スパッタを用いた高抵抗電極 μ -PICの実現には成功し、動作実証まで行うことができた。



図12： 試作機3台を並べた、 μ 粒子測定セットアップの写真。

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 2件)

Atsuhiko Ochi, Yasuhiro Homma, Yuji Yamazaki, Fumiya Yamane, Tsuyoshi Takemoto, Tatsuo Kawamoto, Yosuke Kataoka, Tatsuya Masubuchi, Yuki Kawanishi, Shingo Terao, "Carbon

Sputtering Technology for MPGD detectors", Proceedings of Science TIP2014 351, 査読有

Fumiya Yamane, Atsuhiko Ochi, Yasuhiro Homma, Satoru Yamauchi, Noriko Nagasaka, Tatsuo Kawamoto, Yousuke Kataoka, Tatsuya Masubuchi "Development of μ -PIC with resistive electrodes using sputtered carbon", EPJ (accepted for publishing), 査読有

[学会発表](計 18件)

Atsuhiko Ochi, "Carbon Sputtering Technology for MPGD detectors", The Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014 (TIPP2014) conference (2014年6月2日-6日, アムステルダム, オランダ)

Atsuhiko Ochi, "New resistivity control method for carbon sputtering for fast production", RD51 mini week, (2014年6月16日-19日, CERN, スイス)

Atsuhiko Ochi, "Micro Pattern Gas Detector group at Kobe", KUBEC International Workshop on Dark Matter Searches, 招待講演, (2014年8月27日-29日, ブリュッセル, ベルギー)

Atsuhiko Ochi, "Micro-PIC", Lecture series on Micro-Pattern Gaseous Detectors, 招待講演, (2014年10月20日-22日, コルカタ, インド)

Atsuhiko Ochi, "Lecture on Application of MPGDs", Lecture series on Micro-Pattern Gaseous Detectors, 招待講演, (2014年10月20日-22日, コルカタ, インド)

長谷川大晃, "炭素スパッタを用いた Resistive MSGC の開発", 日本物理学会 2015年秋季大会, (2015年9月25日-28日, 大阪市立大学, 大阪府)

Fumiya Yamane, "Development of μ -PIC with resistive electrodes using sputtered carbon", 4th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors (MPGD2015), (2015年10月12日-15日, トリエステ, イタリア)

Atsuhiko Ochi, "Resistive materials and their patterning methods for MPGDs", RD51 mini week, (2015年12月7日-9日, CERN, スイス)

長谷川大晃, "高密度 μ -PICの開発に向けた Garfield++を用いた simulation", 日本物理学会第71回年次大会, (2016年3月19日-22日, 東北学院大学, 宮城県)

Atsuhiko Ochi, "MPGD development in Kobe University", Kick Off Symposium for Honolulu Office of Kobe University", 招待講演, (2016年6月30日, ホノルル, アメリカ合衆国)

山根史弥, "高抵抗陰極 μ -PIC の位置分解能の測定", 日本物理学会 2016 年秋季大会, (2016 年 9 月 21 日- 24 日, 宮崎大学, 宮崎県)

山根史弥, "全チャンネル読み出しが可能な高抵抗陰極 μ -PIC の動作試験", 第 13 回マイクロパターンガス検出器研究会, (2016 年 12 月 9 日-10 日, 神戸大学, 兵庫県)

越智敦彦, "MPGD 開発に関する国内外の状況", 研究会「放射線検出器とその応用」(第 31 回), 招待講演, (2017 年 1 月 23 日- 25 日, 高エネルギー加速器研究機構, 茨城県)

山根史弥, "高抵抗電極を用いた μ -PIC の開発", 23rd ICEPP Symposium, (2017 年 2 月 19 日- 22 日, 長野県白馬村)

山根史弥, "誘起電荷による二次元読み出しが可能な μ -PIC の動作試験", 日本物理学会第 72 回年次大会, (2017 年 3 月 17 日- 20 日, 大阪大学, 大阪府)

Atsuhiko Ochi, "Resistive DLC foils for Micromegas", 3rd Workshop on Neutrino Near Detectors based on gas TPCs, 招待講演, (2017 年 5 月 20 日- 21 日, 東海村, 茨城県)

Fumiya Yamane, "A new design of Micro Pixel Chamber using DLC electrodes", 5th International Conference on Micro-Pattern Gas Detectors (MPGD2017), (2017 年 5 月 22 日-26 日, フィラデルフィア, アメリカ合衆国)

Atsuhiko Ochi, "JAPAN MPGD community", 5th International Conference on Micro-Pattern Gas Detectors (MPGD2017), 招待講演, (2017 年 5 月 22 日-26 日, フィラデルフィア, アメリカ合衆国)

〔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・准教授

研究者番号: 4 0 3 3 5 4 1 9

(3) 連携研究者

身内 賢太郎 (MIUCHI, Kentaro)

神戸大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 8 0 3 6 2 4 4 0

(4) 研究協力者

山根 史弥 (YAMANE, Fumiya)

神戸大学・大学院理学研究科・博士後期課程 3 年