

平成 30 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：2016～2017

課題番号：16K13807

研究課題名(和文)炭素スパッタ技術を用いたピコ秒時間分解能を持つガス放射線検出器の開発

研究課題名(英文)Development of Gaseous Detector using Carbon Sputtering Technology for Pico second timing resolution

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) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：高い時間分解能を持つ放射線検出器の開発を目的として、平行平板型ガス検出器の電極に炭素スパッタによる高抵抗電極を用いたものを開発した。最大の特徴は、ガスギャップが100 μm と非常に狭いことが挙げられ、この実現のためにMPGD製作で用いられるフォトリソグラフィ技術を応用した。試作機の動作テストを行ったところ、現状では十分な信号の大きさと時間分解能を得ることが難しいことが判明した。一方でこの検出器デザインは、低物質量を要求する検出器へ応用が期待されている。

研究成果の概要(英文)：Resistive Plate Chamber with carbon sputtered electrodes has been developed for high timing resolution radiation detector. Most significant property of this detector is that there is only 100 micro meter gap between anode and cathode electrodes plane. This fine structure is realized by using same technology as used for MPGD development. As for the results of performance test of prototype, it is not succeeded to attain the pico-second level timing properties. It is due to low level of output signal and more improvement should be needed. In other hands, the detector design for this development can realize very low mass detector. In these days, new project for low mass detector based on the results of this research is ongoing.

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 ガス検出器 RPC MPGD DLC 炭素スパッタ

1. 研究開始当初の背景

荷電粒子の通過時間を測定する一般的な手法としては、粒子が液体/固体物質中を通過する際の発光現象を利用するシンチレータや、ガスや半導体中の電離を検出する手法が一般的である。一般にシンチレータでは内部の光の散乱により光路差から、時間分解能は50ピコ秒程度が限界である。電離検出の手法では、信号読出時間そのもののバラつきは少ないが、電離した電子・イオンの動作速度と移動距離により、従来のRPCでは20ピコ秒程度の時間分解能が限界である。

一方で、本研究課題で開発する装置は、100 μm以下の非常に薄いギャップを持つ平行平板ガス検出器により構成されるもので、10ピコ以下の時間分解能を目指すものである。申請者はこれまで微細加工技術を用いたガス放射線検出器(MPGD)の開発を専門としており、近年電極に炭素スパッタによる抵抗物質を用いる新技术を開発した。この応用により本課題である超高速の粒子線検出器開発の着想に至った。

2. 研究の目的

原子核・高エネルギー実験では、トリガ信号生成や粒子の同定のために、荷電粒子などの到来時間や飛行時間を正確に測定する装置が必要である。従来はシンチレータやレジスティブ平板チェンバー(RPC)など、ナノ秒～サブナノ秒スケールの時間測定装置が一般に使われてきた。これに対して、申請者は炭素スパッタによるダイヤモンドライクカーボン(DLC)薄膜を用いて、ガス中でマイクロギャップの抵抗電極膜を積層させることにより、ピコ秒レベルの時間分解能を持つ測定器開発を目指す。この研究成果によって、素粒子実験分野だけでなく、例えばX線自由電子レーザーに対応する新しい高速イメージング検出器への応用も期待できる。本研究課題では、この新たな測定器の試作、及び原理検証を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

研究手法としては、以下の二つの手法による試作機の開発及び試験を行った。

図1に示すようなポリイミド上にDLC薄膜を形成したフォイルを非常に薄い(100 μm)ギャップで積層させた薄間隔RPCを独自に開発

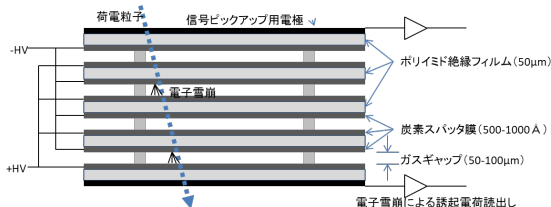


図1： 積層型薄間隔RPCの概念図

イタリア Frascati 研究所との国際共同研究として、Resistive Well 検出器(図2)を開発

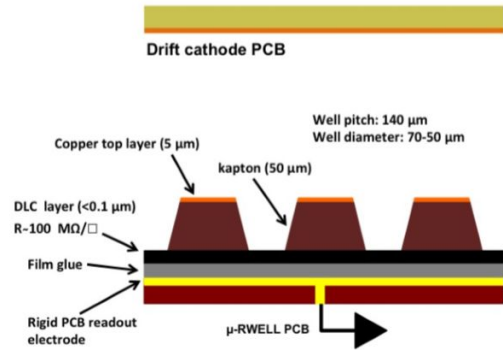


図2 Resistive WELL 検出器

上記の薄間隔RPCは、DLC薄膜のような非常に薄い高抵抗物質を用いて実現可能な、独自の検出器デザインである。図1で示す通り、ガスで満たされたギャップの両側に高抵抗物質による電極板を設け、高電場を与える。荷電粒子がギャップ内部を通過する際に電離した電子をなだれ増幅させ、外側の金属電極より誘起電荷を読み出す。電極は積層化により、荷電粒子通過時の検出効率を上げる。この基本的な構造は、従来の積層型RPCと似ているが、最大の差異はこのギャップの狭さ(<100 μm)にある。また抵抗体としてRPCの様なバルク抵抗体を用いず、ポリイミドフィルムの両面に炭素スパッタで形成したDLC薄膜を使う。これにより積層時の各層に独立に電場を供給でき、1kV前後での定電圧動作が可能となる(通常積層RPCは10kV以上の電圧が必要)。

このデザインの検出器試作手法として、第一段階では単層のRPCを試作する。約100 μmという非常に薄い電極間隔を維持するために、MPGD(Micro Pattern Gaseous Detector)で用いられる技術を駆使し、図3に示すようなピラーを検出器内部に形成したものを試作する。

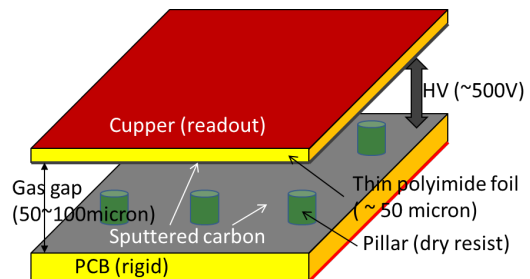


図3 単層の薄間隔RPCの概念図

単層の薄間隔RPCの粒子線に対する基本動作については、宇宙線、ベータ線などの荷電粒子線や中性子線などを用いて行い、単層での信号の大きさ、検出効率、時間分解能などについて測定を行う。その後、図1に示すような複数層の薄間隔RPCを試作し、検出効率

に対する改善を計測する。

時間分解能については、ピコ秒レベルのものを計測するための測定装置が必要であるが、一般にこの装置は非常に高価であるため、本研究では、CERN(欧州素粒子研究機構)の協力のもとで現地の設備を用いて計測を行った。

の国際共同研究による Resistive WELL 検出器開発では、この検出器の実現のために必要となる 100M / の非常に高い抵抗値を持つ DLC 薄膜開発において、研究協力を行った。

4. 研究成果

本研究初年度において、単層の薄膜 RPC を試作した。電極端部からの放電を抑制し、かつ外部から導電ペーストなどを用いた電圧供給ができるように、図4に示すデザインを考案し、図5・図6に示す形で実装した。信号読出基板、及びガスパッケージについては、先行研究(科研費 15H05092, 26610069)で使用したマイクロメガス、 μ -PIC 開発時に用いた設計をそのまま流用した。

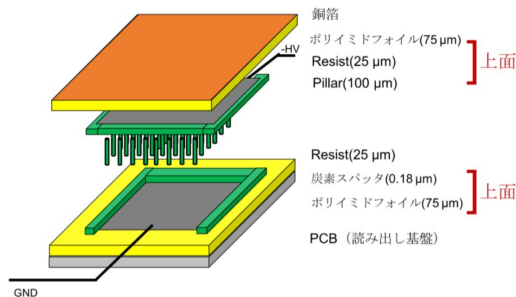


図4 単層型薄電極 RPC のデザイン

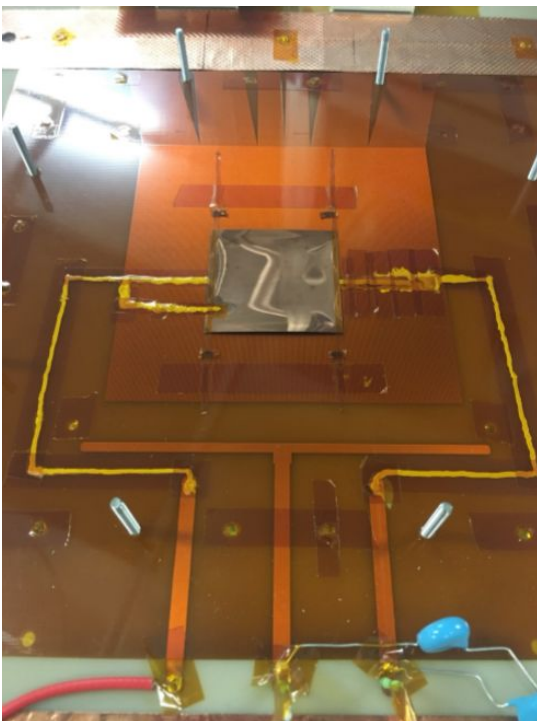


図5 薄電極 RPC を基板上に実装したものの

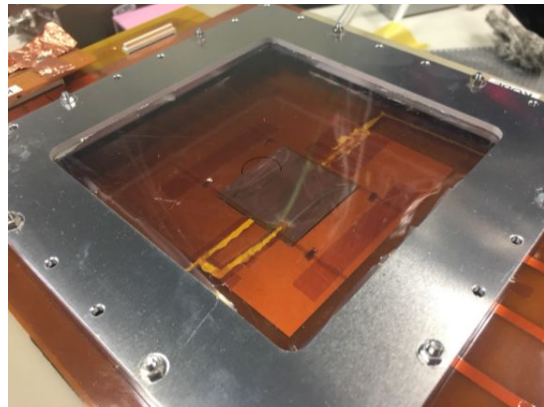


図6 薄間隔 RPC にガスパッケージを被せたものの。

荷電粒子線として ^{90}Sr による線源を用いて、まずは本検出器に適する動作ガスに関する研究を行った。ガスの種類としては、ワイヤーチェンバーやMPGDによく使われているアルゴンベースのガスと、RPCによく使われるフロンベースのガスの双方を試してみた。この結果、図7に示す通り、フロンベースのガスの方が動作電圧は高いものの、放電限界までに高い検出効率を得られることが見込まれた。

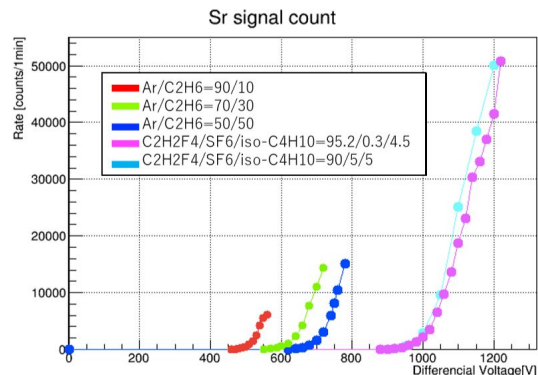


図7 ^{90}Sr 線を用いたガス種類による信号計数値の差異。

次に、このフロンベースのガスを用いて、単層の場合の荷電粒子に対する検出効率を求める測定を行った。本来は荷電粒子線として加速器を用いた荷電粒子ビーム、もしくは宇宙線ミュオンを使うべきである。しかし前者に関しては実験準備の都合上ビームテストが行えなかったこと、後者については検出器が小さいため、十分な統計量を得るために非常に長い時間がかかることなどから、図8に示す若干特殊な方法で、線を用いて計測した。 ^{90}Sr による線では、そのうち一部の高いエネルギー分布のもの(数 MeV 以上)しか検出器を透過することができない。また、一般に複数のシンチレータを透過させることも難しい。そこで、図8のように本検出器を2台並べ、その上部より線を照射するセットアップをとった。本検出器はガス検出器であるため、粒子線入射の無い状態での信号はほとんどゼロである。そこで、2台のうち

図の下側の検出器でヒットのあったものに対して、上側の検出器を透過してきたものと判断し、下側のヒットの計数に対して、同じタイミングで上側の検出器にヒットのあったものの比率を上側の検出器の検出効率とした。

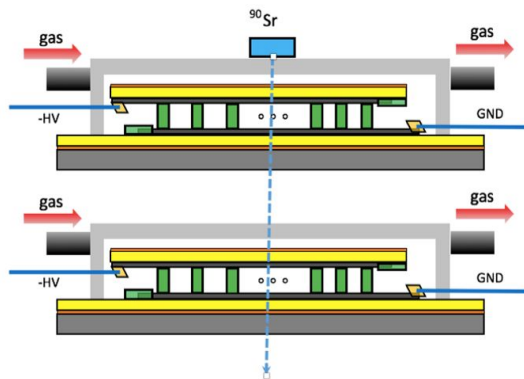


図 8 2 台の薄間隔 RPC を用いた検出効率測定のためのセットアップ。時間分解能測定も同様のセットアップを用いる。

上記の方法で上下の RPC を入れ替えてそれぞれの検出効率を求めたところ、図 9 に示す通り、最大の検出効率で 10% 程度となる結果が得られた。100 μm の検出器内部において荷電粒子 (MIP) が一つ以上の電離電子を生じる確率は、フロン系のガスでは 40% 以上と計算されるが、RPC がプロポーションアルモードで動作する場合、電離電子が陰極付近で生じた場合しか検出可能な十分な信号を生じることができないことから、この程度の検出効率となったことが考えられる。

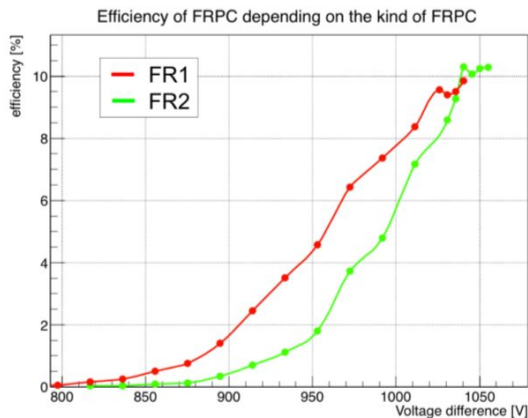


図 9 薄薄膜 RPC の線の検出効率

次に、RPC を積層させた場合の検出効率についても同様の手法で求めてみた。この結果、図 10 に示す通り、ほぼ層数に比例する形での効率を得られた。本課題研究では、3 層までの結果しか得られなかったが、一般に RPC としての十分な検出効率 (90% 以上) を得るためには、100 μm ギャップの場合、10 層以上は必要になるものと考えられる。

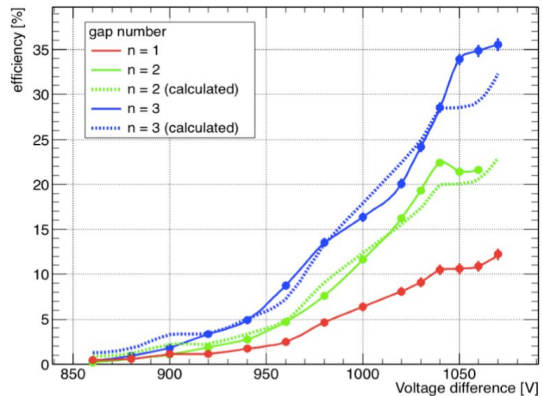


図 10 複数層 (n 層) の場合の検出効率

時間分解能については、CERN 研究所において、高速のプリアンプと広帯域のオシロスコブを用いた計測を行った。計測のセットアップは、基本的には図 8 に示したものと同一であり、2 台の FRPC がほぼ同時の信号を出したのものについて、広帯域オシロスコブの時間差測定機能により計測した。

しかし、本研究による計測で得られた時間差は、10nsec 程度であり、目指していたピコ秒レベルのものからはほど遠いものとなった。この原因として、RPC より得られる信号の大きさがノイズに対して十分な大きさを持たせられなかったことが第一に挙げられる。また、図 8 で示した形のセットアップでは、ベータ線の速度に関して、十分に光速に近いものばかりとは言えず、実際の粒子到達時間のばらつきもあったものと推測される。また、読み出しボードについても改良の余地はある。

イタリア Frascati グループと共同研究で開発した Resistive WELL については、我々は高抵抗薄膜の開発を担当し、12M Ω/\square 、80M Ω/\square 、880M Ω/\square の複数の抵抗値の DLC 薄膜を作製した。これらを用いた検出器の増幅率を図 11 に示す。また、高係数率下での検出効率の測定を X 線により行い、この結果、880M Ω/\square では、高係数率の LHC 実験などで想定される 10^5 cps/cm² 以上の環境下で大きく検出効率が下がることがわかった (図 12)。この結果から、本検出器で最適な抵抗薄膜の表面抵抗値は、100M Ω/\square 程度が得られた。

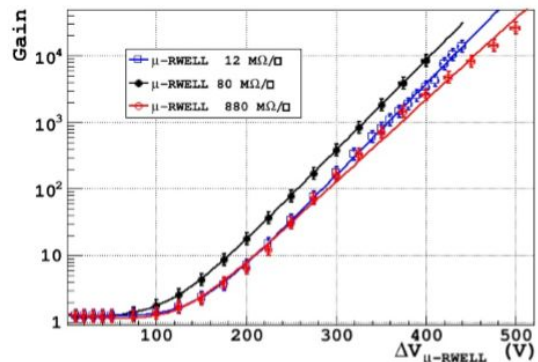


図 11 R-WELL 検出器の増幅率

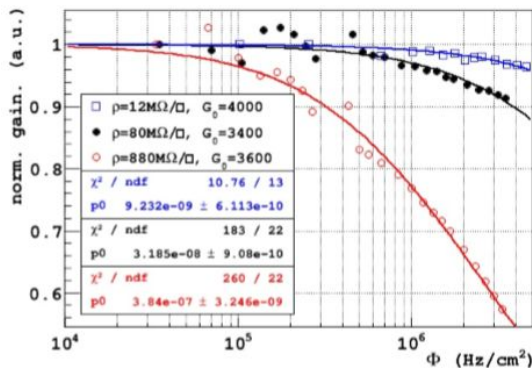


図 1.2 X線照射レートによる検出効率の変化

なお、本研究では目的とする超高速の時間分解能は得られなかったものの、ポリイミド薄膜と DLC 電極による本検出器の構造により、原理的に超低物質質量粒子線カウンタが実現可能である。現在では本開発成果を用いて、 $\mu \rightarrow e$ 稀崩壊実験の Radiative decay counter の開発が新たに検討されるなど、別方面の応用への発展が期待されている。

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)

G. Bencivenni, L. Benussi, L. Borgonovi, R. de Oliveira, P. De Simone, G. Felici, M. Gatta, P. Giacomelli, G. Morello, A. Ochi, M. Poli Lener, A. Ranieri, M. Ressegotti, E. Tskhadadze, I. Vai and V. Valentino, "The μ -RWELL detector", Journal of Instrumentation 12 (2017) C06027

[学会発表](計 12 件)

又吉康平, "炭素スパッタを用いた RPWELL 用フィルムの表面抵抗測定", 第 6 回高エネルギー物理春の学校, 2016 年 5 月, 滋賀県

越智敦彦, "MPGD development in Kobe University", Kick Off Symposium for Honolulu Office of Kobe University 2016 年 6 月 30 日, Honolulu, 米国 (Invited)

小川圭将, "炭素スパッタを用いた高速粒子検出器 RPC の開発", 日本物理学会秋季大会, 2016 年 9 月, 宮崎大学

小川圭将, "炭素スパッタを用いた積層型 RPC の開発", 第 13 回 MPGD 研究会, 2016 年 12 月, 神戸大統合研究拠点

小川圭将, "RPC at Kobe", Mini-Work Shop and Seminar on Resistive Plate Chamber at the University of Tsukuba, 2017 年 1 月, 筑波大学

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), 2017 年 1 月 (高エネルギー加速器研究機構) (招待講演)

小川圭将, "炭素スパッタを用いた積層型 RPC の開発", 第 23 回 ICEPP シンポジウム, 2017 年 2 月 22 日, 長野県白馬

越智敦彦, "Resistive DLC foils", 3rd Workshop on Neutrino Near Detectors based on gas TPCs, 2017 年 5 月, 東海村, (Invited)

越智敦彦, "Japan MPGD Community", 5th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors (MPGD2017), 2017 年 5 月, Philadelphia, USA (招待講演)

小川圭将, "DLC を用いた積層型 RPC の開発", 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月, 宇都宮大学

越智敦彦, "MPGD Overview", International Workshop on High Energy Circular Electron Positron Collider, 2017 年 11 月, 北京, 中国, (招待講演)

小川圭将, "Freon を base gas とした高速 RPC の開発", 第 14 回 MPGD 研究会, 2017 年 12 月, 岩手大学

[その他]

ホームページ等

<http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~upic/>

関連する修士論文

小川圭将「炭素スパッタを用いた積層型 Fast Timing RPC の開発」

http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/2013/seminar/pdf/Ogawa_thesis.pdf

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: 40335419

(4) 研究協力者

小川 圭将 (OGAWA, Keisuke)

神戸大学・大学院理学研究科・博士前期課程 2 年

Gioanni Bencivenni,

INFN Frascati・Professor