

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年4月20日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340064

研究課題名（和文）ガス増幅型光電子増倍管の実用化に向けた開発研究

研究課題名（英文）Research and development of gaseous photomultiplier tubes for practical use

研究代表者

住吉 孝行（SUMIYOSHI TAKAYUKI）

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：30154628

研究成果の概要（和文）：

GEM や Micromegas などの Micro Pattern Gas Detector (MPGD) と呼ばれる装置を組み合わせ、光電効果で得られた電子をガス増幅させて光信号を電気信号に変換する、ガス増幅型の光電子増倍管の開発を行った。本開発研究で大きな問題となったのが、ion-feedback と呼ばれるもので、ガス増幅過程で発生したイオンが電場に導かれて光電面に当たり、新たな電子を作ったり光電面そのものを劣化させる現象である。この ion-feedback を効率よく抑制し、高い増幅率と安定した operation を目指して研究を進めた。最終的に Micromegas を多段組み合わせることで、 10^5 近いゲインと 10^{-3} の ion-feedback 抑制が実現できた。実用化にはあと 1 桁の ion-feedback 抑制が望まれるが、ほぼ実用化に近いガス増幅型の光電子増倍管が完成した。

研究成果の概要（英文）：

By assembling Micro Pattern Gas Detectors (MPGD) such as GEM and Micromegas, we developed a gaseous photomultipliers which can transform photon signals to electric signals. In the course of this R&D program, one of critical issues was ion-feedback phenomena. During the gas amplification process a lot of ions are created and they are moved to the photocathode guided by the electric field. Then new electrons may be created or photocathode itself may be damaged by this ion bombardment. We proceeded to this R&D program aiming to get high gain while effectively suppressing ion-feedbacks. Finally we have developed a gaseous photomultipliers having a 10^5 gain and a 10^{-3} ion-feedback rate, which is close to a practical use.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2010 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：理工

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：素粒子実験、光検出器、ガス増幅、MPGD

1. 研究開始当初の背景

衝突型加速器実験などにおいては、通

常の真空管タイプの光電子増倍管では不感領域が多くなることや物質が多くなってしまう、等の欠点がある。もし、ガスを用いた比例計数管などで光検出器が実現できれば、容易に大面積の光検出器の建設が可能となり、大型検出器や、分野は違いますが天体観測にも応用できるなど、その波及効果は計り知れない。普通の光電子増倍管は1 Tesla 以上の高磁場中では感度を持たない。しかし、光検出をガスカウンターで実現できれば、光が光電面に当たりさえすれば、高磁場中で光電面に当たりさえすればいかなる方向からの光でも検出することが出来る。

しかし、ガス増幅光電子増倍管 (Gas-PMT) の場合どうしても避けられない問題として、ガス中で安定した光電面の製作と光子やイオンのフィードバックの問題がある。前者は、これまでの研究で、ガラスやセラミック容器によるガス封じ込め型にすることで解決できることが判っていた。後者のは、光電面から出た光電子はガス中におかれた細いワイヤー近傍での高電場による電子雪崩でガス増幅されるが、増幅過程で生成された紫外光やイオンが光電面を叩き、再び光電子を作り出すというもので、次から次へと周期的に余分な信号が現れるため光検出が困難になる問題である。Gas-PMT の開発にはこれらの光子/イオンのフィードバックの問題が解決されなければならなかった。

2. 研究の目的

我々は課題となっていた光子/イオンのフィードバックを有効に防ぐものとして、キャピラリープレート (MCP) や GEM と呼ばれる細孔型ガス増幅器と

Micromegas と呼ばれるメッシュ型ガス増幅器を組み合わせて使用する方法を考案した。 GEM はカプトンのような薄い絶縁体の両面に電極を施し、多数の細孔 ($\sim 100 \mu\text{m}$) を空けたデバイスで、細孔内で強い電場が生じ、それによってガス増幅が可能になるとともに、細孔により次段の Micromegas の細いワイヤー近傍での電子雪崩で生成された紫外光やイオンが有効にさえぎられるので、フィードバックの問題が解決されると予想される。フィードバックの問題が解決できれば、安定した Gas-PMT を実現する事可能となり、実用化に向けた大きな前進となる。

3. 研究の方法

本研究は、バイアルカリ金属を用いた光電面を、MCP や GEM による前置増幅器と Micromegas と呼ばれるメッシュによるガス増幅器を組み合わせた装置に適用して光検出器を製作するものであり、検出器の概略は図1に示した通りである。

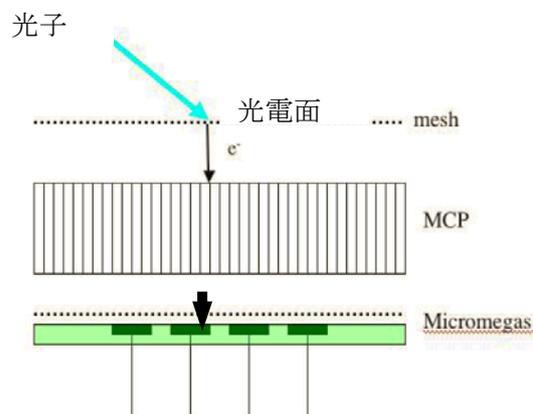


図1. Gas-PMT の動作原理

光電面で入射光が電子に変換され、電子は MCP 内で数十倍にガス増幅された後、Micromegas 部分で再度 10000 倍にガス増幅される。したがって陽極部では 10^5 の増幅が得られる。Micromegas 部で生成されたイ

オンや紫外光は MCP 部で遮蔽され、光電面には到達しないと考えられ、フィードバックの効果が抑制されると見込まれる。

このような構造をもったこの光検出器の性能は、使用する材料の種類、ガスの種類、印加電圧、その他温度などのパラメータを変えることで大きく変化する。これまでの研究で使用する材料により、量子効率が大きく異なることが判ってきた。カプトンなどのポリマーでは光電陰極を形成するアルカリ金属が吸着され、長期間の使用には耐えられないと判断される。また、MCP や GEM の電極の構造や印加する電圧を最適化することで、増幅率に大きな違いが有ることも判ってきた。Gas-PMT を実用化するためには、これらの課題を解決していかなければならない

4. 研究成果

4.1 量子効率の測定

Micromegas を2段構造にした2“径の試験 Gas-PMT を作成し、ガス中でのバイアルカリ光電面の安定性に関して約600日にわたり試験を行った。その結果は図1に示すように、量子効率はほぼ安定して居ると言える。また、本研究の初期に製作した Gas-PMT を2年半後に試験したが、その量子効率はほとんど変化していなかった。

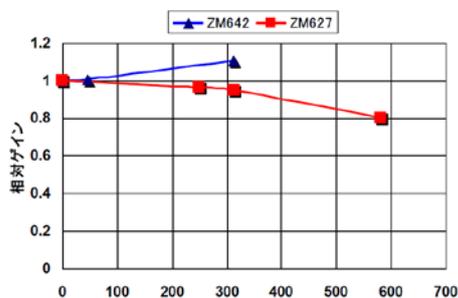


図 2. 光電面（量子効率）の安定性
平均的な量子効率は真空中で 20%、ガス中で 12~14%であった。

4.2 磁場中での動作

同様の Gas-PMT を用いて、高磁場中で動作するかどうかを調べた。その結果を図 2 に示すが、磁場中でも動作するとされている finemesh 型 PMT (R5924) でも 1.5 Tesla の磁場中ではゲインが 10⁻³ に落ちてしまうのと比較し、Gas-PMT では管軸を磁場とほぼ直角に置いても、光電面に光が届けば増幅することが判った。このことは他の真空管タイプの PMT では得られない大きな特徴である。

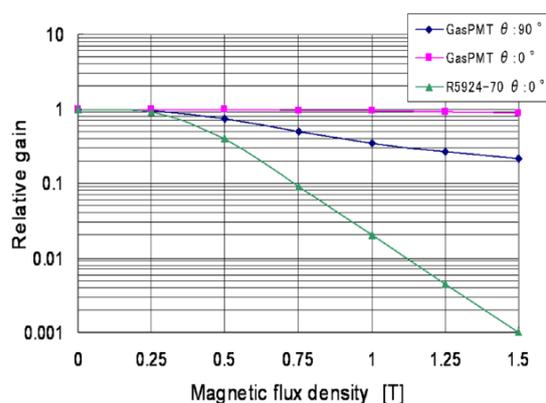


図 2. Gas-PMT と finemesh 型 PMT の磁場によるゲインの変動。

4.3 バイアルカリ光電面を持つ Gas-PMT

バイアルカリ光電面を持ち、1 段目にマイクロプラスト法で作成された硼ケイ酸ガラス素材の GEM (MB-GP)、2 段目に #330 の金属メッシュを配した、Gas-PMT を作成した。その構造図を図 3 に示す。この Gas-PMT の MB-GP に印加する電圧を変化させて陽極でえられるゲインを測定したところ、図 4. に示すように、約 10 倍のゲインのところから、電圧との相関が指数関数から逸脱することが判った。

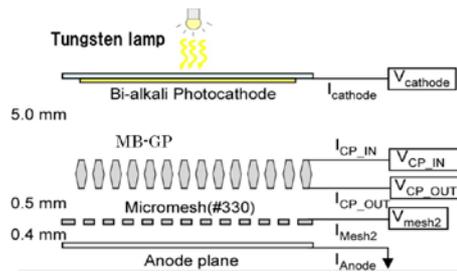


図3. バイアルカリ光電面を持つGas-PMTの構造

これは、イオンフィードバックの影響と考えられ、この構造ではフィードバックの抑制が十分ではない事が判った。

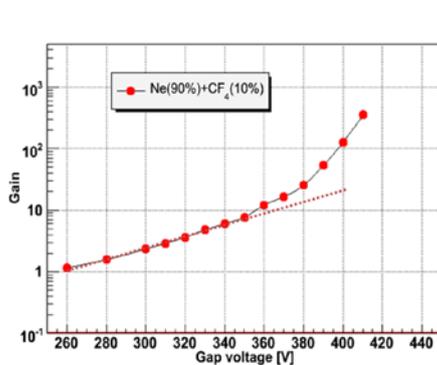


図4. Gas-PMT (MB-GP と Micromegas) でえられるゲインの印加電圧依存性

4.4 CsI 光電面を持つ Gas-PMT

フィードバックに比較的強いと考えられる CsI 光電面を用いて、イオンフィードバックと光電陰極の寿命に関する研究を行った。

使用した Gas-PMT の構造は図5に示すように、MB-GP を2段用いている。図6に MB-GP に印加する電圧を変えてゲインの電圧依存性を測定した結果を示す。図からわかるように、ゲインは電圧に対して指数関数的に増加しており、フィードバックの効果が大きくないことが判る。実際に陰極に流れ込むイオンの量を測定して、フィードバックが8%程度であることが判った。

光電陰極に蓄積した電荷量と CsI 光電面

の量子効率の関係を調べたところ、 9.9 mC/mm^2 の電荷の蓄積で量子効率が80%近く悪化する事が判った。

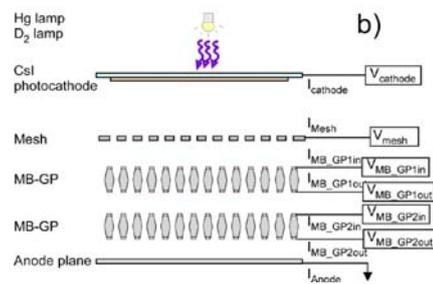


図5. CsI 光電面を持つ Gas-PMT の構造

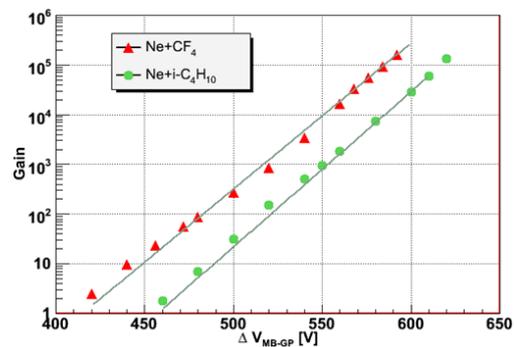


図6. CsI 光電面を持つ Gas-PMT の印加電圧とゲインの関係

4.4 シミュレーションによる研究

イオンフィードバックの抑制を目指して、様々な電極構造をもった Gas-PMT に関して、Maxwell-3D と Garfield を用いて、ガス中での電子やイオンの運動をシミュレートした。その結果、GEM のような細孔型 MPGD と Micromegas のようなメッシュ型 MPGD を比較した場合、イオンフィードバック率は前者では約 30%、後者で約 2%とな

ることが判った。このことから、メッシュ型の Micromegas を多段構造にすればより効果的な抑制が期待されることからそのような構造の Gas-PMT を製作することにした。

Micromegas のメッシュ部として図 7 のように薄い金属板にエッチング加工で細孔を開けたものを使用することにした。

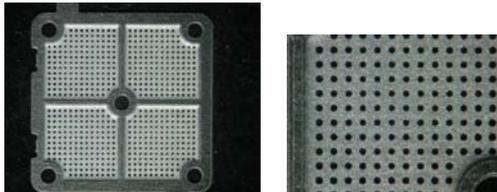


図 7. 14 x 14mm² のメッシュ (左) とその拡大図 (右) . メッシュ間隔は 250 μm で孔径は 130 μm φ

シミュレーションでこのような構造をもったメッシュを 2 段重ねた時のイオンフィードバック率を計算した。2 段重ねる場合に、図 8. a) に示すように孔の位置が上下で一致する場合と、b) に示すように孔が中間位置に来る場合の 2 ケースが考えられる。

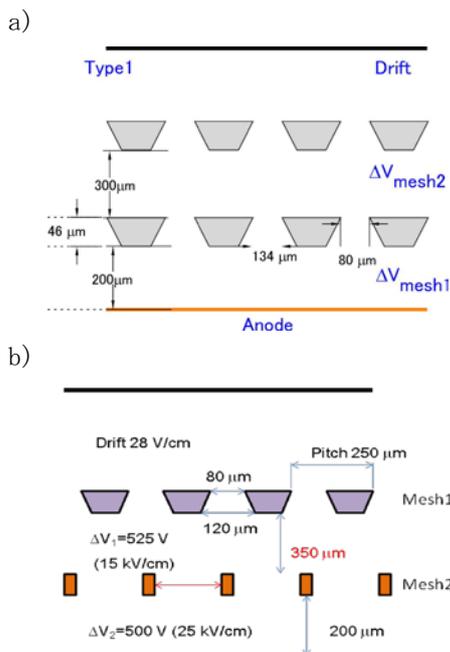


図 8. 2 段メッシュの配置

シミュレーションの結果、a) のケースではイオンフィードバック率は 10^{-2} 程度であったが、b) のケースでは 10^{-3} 以下に抑制できることが判った。

4.4 2 段メッシュ構造の Gas-PMT の結果

実際にこのような 4.3 で示した配置をもつ 2 段メッシュ構造で CsI を光電面に持つ Gas-PMT を作成したところ、ゲインで 10^4 を達成し、かつイオンフィードバック率は 10^{-3} に抑制できることが判った。

4.5 50x50mm² の実用化型 Gas-PMT の製作

図 7 で示した電極構造を持つメッシュを大型化して 43 x 43 mm² のものを製作した (図 8 参照) 。メッシュ間には間隔を保持するための絶縁材が挟まれている。

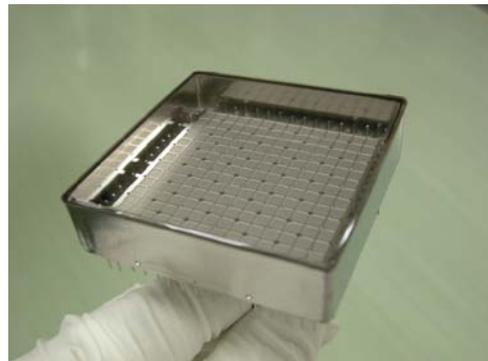


図 8. 外形 50 x 50 mm² の実用化型の Gas-PMT

本機にバイアルカリ光電面を作成したのち、300V 以上の電圧を印加すると放電する箇所が見つかった。今後、放電対策が必要であるが、それが成功すれば、安定した動作が期待できる実用化型 Gas-PMT の完成も近い。

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)

- 1) T. Sumiyoshi, F. Tokanai “Development of a gaseous PMT with micro-pattern gas detectors. “, Nuclear Instruments and Methods, A639 (2011) 121-125
- 2) F. Tokanai, T. sumiyoshi ” Imaging characteristics of glass capillary plate gas detector”, Nuclear Instruments and Methods, A623 (2010) 138-140

[学会発表] (計 8 件)

- 1) 松本 浩平, “ガス増幅型光電子増倍管の開発状況及びシミュレーションを用いたイオンフィードバックの考察”, 第 8 回 Micro Pattern Gas Detector 研究会, 2011 年 12 月 9 日, 近畿大学
- 2) 門叶 冬樹, “MPGD によるガス PMT の開発”, 第 8 回 Micro Pattern Gas Detector 研究会, 2011 年 12 月 9 日, 近畿大学
- 3) T. Sumiyoshi, “Development of gaseous PMT with micro-pattern gas detectors”, 2nd International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors, Aug.-31, 2011, Kobe (Japan)
- 4) F. Tokanai, “New Micro Mesh Gas Detector for Gaseous Photomultiplier”, 6th International Conference on New Developments in Photo-detection, Jul.-6, 2011, Lyon (France)
- 5) K. Matsumoto, “Development of Gaseous Photomultiplier with Micro Pattern Gas Detectors”, Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP)2011, Jun.-10, 2011, Chicago (USA)
- 6) 住吉 孝行, “MPGD による PMT の開発”, 第 7 回 Micro Pattern Gas Detector 研究会, 2010 年 11 月 27 日, 山形大学
- 7) T. Sumiyoshi, “Development of gaseous PMT with micro-pattern gas detectors”, 7th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors, May-5, 2010, Cassis (France)
- 8) F.Tokanai, “Sealed gaseous photo-multiplier with CsI photocathode”,
- 9) The 12th Vienna conference on instrumentation, Feb.-18, 2010. Vienna University of Technology

6. 研究組織

(1) 研究代表者

住吉 孝行 (SUMIYOSHI TAKAYUKI)
首都大学東京大学院・理工学研究科・教授
研究者番号：30154628

(2) 研究分担者

門叶 冬樹 (TOKANAI FUYUKI)
山形大学・理学部・准教授
研究者番号：80323161