

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：11501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610048

研究課題名(和文)新しいガラス素材を用いた光センサーの開発

研究課題名(英文)Development of gaseous PMT with new glass material

研究代表者

門叶 冬樹(Tokanai, Fuyuki)

山形大学・理学部・教授

研究者番号：80323161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、感光性結晶化ガラス(PEG3C: HOYA社製)を用いて細孔型MPGDを作成し、ガス光電子増倍管の開発を行った。開発したPEG3CをNe+CF<sub>4</sub>混合ガス1気圧を充填したチェンバー内に設置し、X線ビームを用いて特性試験を行った。その結果、PEG3C単体の動作で5000以上、2枚をタンデム動作で60000以上の電子増幅度を得ることができた。続いて細孔型MPGDとバイアルカリ光電面からなるガス光電子増倍管を製作し可視光を照射して光センサーとしての基礎特性試験を行った。時間特性試験の結果得られた波形の立ち上がり時間は約9ns、入射光波長400nmに対する量子効率11%であった。

研究成果の概要(英文)：We have been developing gaseous photomultiplier tubes (PMTs) with alkali photocathode combined with micropattern gas detectors (MPGDs). In this study, we have developed a new hole-type MPGD with a crystallized photosensitive etching glass (PEG3C) developed by Hoya Corporation. At first, we fabricated a GP using PEG3C performance test was carried out using an X-ray beam. We successfully obtained an effective gain of 5000 and an energy resolution of 17% for 6 keV X-rays using a single GP, whereas we achieved an effective gain of up to 60000 in a tandem operation using a double GP. Next, we tried to develop a gaseous PMT with a bialkali photocathode using a GP made of PEG3C. The basic characteristic was investigated by irradiating visible light. As a result, the rise time of 9 ns was obtained for charge signal from the anode of gaseous PMT filled with Ne(90%)+CF<sub>4</sub>(10%) at a gas pressure of 0.9 atm. The quantum efficiency of 11% at wavelength 400 nm was achieved for the gaseous PMT.

研究分野：原子核実験、宇宙線実験

キーワード：マイクロパターンガス検出器 光検出器

## 1. 研究開始当初の背景

(1) マイクロパターンガス検出器 (MPGD) は、微細加工技術や半導体製造技術を用いて製作した微小な電極から構成されるガス放射線検出器の一つで、優れた位置分解能と高い時間分解能、そして高計数率での動作が特徴である。

我々はこの MPGD を用いて『ガス光電子増倍管 (ガス PMT)』の開発を行ってきた。図 1 にガス PMT の概念図を示す。

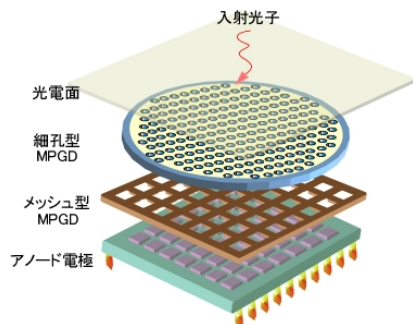


図 1. ガス光電子増倍管の概念図

本検出器は、1) 光を電子に変換する電子変換領域部 (一次電子生成)、2) 光電子を 10 倍程度に電子増殖し、光・イオンフィードバックを  $10^{-4}$  以下に抑制するための前置増殖部 (細孔型 MPGD)、3) 細孔型 MPGD から出力される電子を  $10^4$  程度で増殖する主信号増殖部 (メッシュ型 MPGD または細孔型 MPGD タンデム)、4) および電子・光信号を検出するための読み出し装置部から構成される。光電面へ入射した 1 光子は最終的に  $10^5$  を超える電子群に増殖されることになる。この増殖電子を最終段に設けた電子センサー (陽極 PAD) で取得する。この  $10^5$  個の電子は信号検出として十分な量であり、たった 1 個の光電子でさえも検出を可能とする。

これまで行った『ガス PMT』の基礎開発研究から、1) アルカリ光電変換膜製作に適した素材を持つ MPGD の開発と 2) 電子増殖過程で生じるイオンおよび紫外光のフィードバック抑制、が『光検出』をマイクロパターンガス検出器 (MPGD) で実現する場合に克服すべき課題であることがわかった。例えば、以前より提案・実績のあるガス増殖ホイル (GEM、細孔型 MPGD の一つ) や MicroMegas (メッシュ型の MPGD) に使われる部材のポリイミドは、光電面を形成する材質であるアルカリ金属と強い化学反応を起こし、光電面製作が困難で長期間安定に存在できない。また、ポリイミドフィルム部材は耐熱性、平滑性、剛性等が低く、またアウトガスが生じ得るといった問題がある。この事からガス PMT の電子増殖機構には GEM などのフィルム部材ではなく、ガラス基板やセラミック素材を用いる必要がある。しかしながら、ソーダ石灰ガラスや耐熱ガラス等のガラス基板では、その板厚について薄くても

300 $\mu\text{m}$  程度の厚さが限界であり、GEM や Micromegas で実証されている、電子増幅効率に最も適した電子増殖領域の 50-200 $\mu\text{m}$  厚を実現することが非常に困難である。そこで本研究では、結晶化により機械強度が増した感光性結晶化ガラス (PEG3C:HOYA 社製) を用いて極薄型の細孔型 MPGD を作成し、それをガス PMT に応用することに挑戦した。感光性ガラスは、紫外線を露光することにより感光部分のみにフッ化水素 (HF) による選択的なエッチングを行えるように構成されたもので、ガラスの特性を生かしつつ微細加工が可能な材料である。感光性結晶化ガラスは、この感光性ガラスに加熱処理を行ってガラス中に均等に微細な結晶を析出させたものであり、完全に結晶化が進行した多結晶状態となっており非晶質のものと比較して機械的特性に優れており、ガス PMT の素材として魅力的である。

## 2. 研究の目的

新しい素材を用いたガス放射線検出器と可視光に感度の高いアルカリ光電面を複合化させた『ガス光電子増倍管 (ガス PMT)』の開発に挑戦した。具体的には、アルカリ金属との反応性が極端に低い『感光性結晶化ガラス』を光電子増殖機構の素材に使用する。そして、ガス中での電子増殖時に生じる光と陽イオンを制限するために適した細孔型マイクロパターンガス検出器 (MPGD) を『感光性結晶化ガラス』で製作し、ガス放射線検出としての基礎特性を調べる。さらに、アルカリ光電面との複合化を行って『ガス PMT』を作成し、Ne などの希ガスに数%のクエンチングガスを封入して、量子効率特性、時間応答特性試験を行い、『ガス PMT』の実用化に向けた開発を行った。

## 3. 研究の方法

アルカリ光電面と放射線ガス検出器を複合化させた『ガス光電子増倍管 (ガス PMT)』の実用化に向けて、以下の開発を行った。

1. 有限要素法電場解析ソフト Maxwell-3D とガス中での電子増幅シミュレーションソフト Garfield を用いて、『感光性結晶化ガラス』を細孔型 MPGD として用いる場合のガラス厚、細孔の形状とそのピッチについてパラメータの最適化を行った。
2. 得られたパラメータをもとに感光性結晶化ガラスを用いた細孔型 MPGD を作成した。
3. 作成した細孔型 MPGD を専用のステンレスチャンバーに設置し、ネオン混合ガスまたはアルゴン混合ガス 1 気圧を封入して X 線ビームを照射し特性試験を行った。
4. 最適化を行った細孔型 MPGD と紫外光から可視光領域に感度を持つアルカ

リ光電面を複合化させ性能評価試験を行った。

#### 4. 研究成果

図2に感光性結晶化ガラスを細孔型MPGDに用いた時に、シミュレーションにより得られた電子増殖の様子を示す。以上の結果から、厚み150 $\mu\text{m}$ 、細孔径100 $\mu\text{m}$ 、ピッチ360 $\mu\text{m}$ と厚み130 $\mu\text{m}$ 、細孔径50 $\mu\text{m}$ 、ピッチ70 $\mu\text{m}$ を持つ細孔型MPGDをそれぞれ作成した。それぞれのパラメータを持つ細孔型MPGDのシミュレーションによる解析から、電子増幅度 $10^4$ 以上、細孔内で増殖された電子群が次段のMPGD(または陽極電極)へ転送される割合で定義される電子転送効率30%以上を達成できることがわかった。また、光電面と細孔型MPGD上部間のドリフト電場に対する一次電子の細孔内への透過依存性を調べたところ、ドリフト電場の小さい方が高い透過率を示した。これは、強いドリフト電場の結果、一次電子が細孔型MPGDの入力側の電極に吸収されるためであることがわかった。

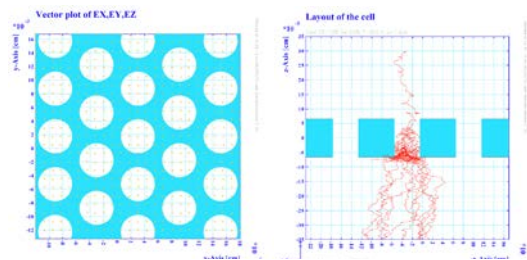


図2. 感光性結晶化ガラスを細孔型MPGDとして用いる場合に、細孔の直径、ガラス厚をパラメータに行ったシミュレーションの結果。

図3に細孔型MPGDとして開発した感光性結晶化ガラスを示す。開発したガラスプレートを専用ステンレスチャンバーに設置し、X線ビームを照射して細孔型MPGDの基礎特性試験を行った。チャンバーには、ArおよびNeベースの混合ガスを充填し、山形大学総合研究所に設置したX線発生装置からのX線ビームおよび高エネルギー加速器研究機構の放射光施設BL-14のコリメートされたX線ビームを試験に用いた。

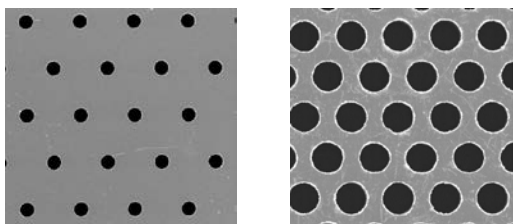


図3. 開発した感光性結晶化ガラス。左: 厚み150 $\mu\text{m}$ 、細孔径100 $\mu\text{m}$ 、ピッチ360 $\mu\text{m}$ 、右: 厚み130 $\mu\text{m}$ 、細孔径50 $\mu\text{m}$ 、ピッチ70 $\mu\text{m}$

図4は感光性結晶化ガラスで作成した細

孔型MPGDにNe(90%) +  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ (10%)およびNe(90%) +  $\text{CF}_4$ (10%)ガスをそれぞれ1気圧、充填した時に得られたガラスプレート(GP)間への印加電圧に対する電子増幅度を示す。電子増幅度は、いずれのガスに対してもGP間への印加電圧とともに指数関数的に増加し、1枚の細孔型MPGDにおいて $5 \times 10^3$ という高い電子増幅度まで放電することなく安定に達成することができた。

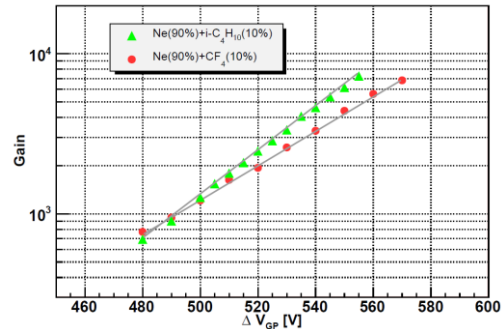


図4. 感光性結晶化ガラスを用いた細孔型MPGDにNe(90%) +  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ (10%)およびNe(90%) +  $\text{CF}_4$ (10%)ガスをそれぞれ1気圧充填した時のガラスプレート(GP)間への印加電圧に対する電子増幅度の関係

図5にNe(90%) +  $\text{CF}_4$ (10%)混合ガス1気圧(右)を充填した細孔型MPGDに対して、電子増幅度が約3000の時に陽極から得られた6keVのX線に対する波高分布を示す。エネルギー分解能は約17%(半値幅)であり、目標値である20%を達成することができた。

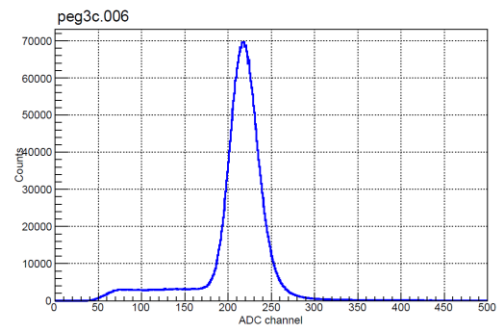


図5. Ne(90%) +  $\text{CF}_4$ (10%)ガス1気圧を充填した感光性結晶化ガラスの細孔型MPGDに6keVのX線を照射した時に得られた波高分布

図6(上)はNe(90%) +  $\text{CF}_4$ (10%)混合ガス1気圧を充填したチャンバーにX線ビームを照射し、感光性結晶化ガラス2枚をタンデム型の細孔型MPGDとして動作させた時の電子増幅度(上図)と波高分布特性を示す。この時、電子増幅度は $6 \times 10^4$ を達成した。また、図6(下)は電子増殖度 $1 \times 10^4$ の時の6 keVのX線に対する波高分で、そのエネルギー分解能は約20%(半値幅)であり、2段階の電子増幅における操作でも、感光性結晶化ガラスの細孔型MPGDは安定に動作することが示された。



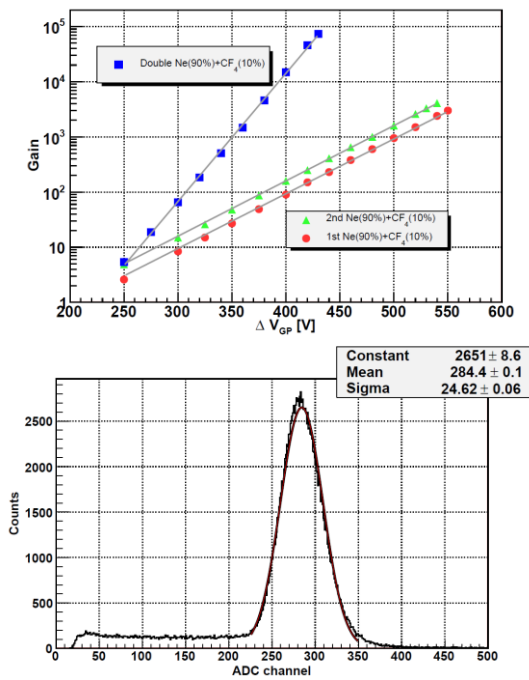


図6. 上: 感光性結晶化ガラス2枚を用いてタンデム操作した時のX線ビームに対する電子増幅度(上)。充填したガスはNe(90%)+CF<sub>4</sub>(10%)混合ガス1気圧。下: タンデム動作の時電子増幅度10000で得られた6keVのX線に対する波高分布

X線ビームを用いた特性試験で性能を評価した感光性結晶化ガラス製の細孔型MPGDを専用ガラス容器内に設置し、アルカリ光電面をガラス容器上部に形成し、ガス光電子増倍管(ガスPMT)の試作機を浜松ホトニクスと共同で製作した。図7に製作したガスPMTと特性試験のセットアップを示す。ガスPMTの部材には、アルカリ金属との反応性が低い絶縁体材料が用いられている。製作したガスPMTに対してNe(90%)+CF<sub>4</sub>(10%)混合ガス0.9気圧を充填し、光電面の陰極ルーメン感度と分光感度特性を調べた。評価には、光電子増倍管試験で用いられている評価試験シ

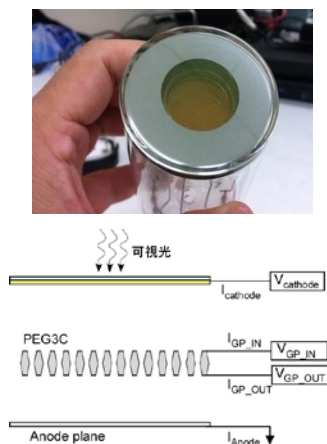


図7. 上: 開発した感光性結晶化ガラスとアルカリ光電面からなるガス光電子増倍管(ガスPMT)。下: ガスPMT特性試験のセットアップ

ステムを用いた。

図8に感光性結晶化ガラスを用いた細孔型MPGDとバイアルカリ光電面からなるガスPMTの分光感度特性を示す。光子1個の入射に対する電子放出確率で定義される量子効率率は、320-500nmの波長に対して7%以上を得ることができた。短波長特性側のカットオフは、試験光入力側のホウケイ酸ガラス面によるものである。入射光波長400nmに対するルーメン感度は35μA/lm、量子効率率11%であったガス封入前の真空中の量子効率率は400-500nm付近の波長に対して約20%であり、ガス封入後の量子効率率の低下は、光電面から射出された光電子がガス分子との衝突によって後方散乱されるためである。

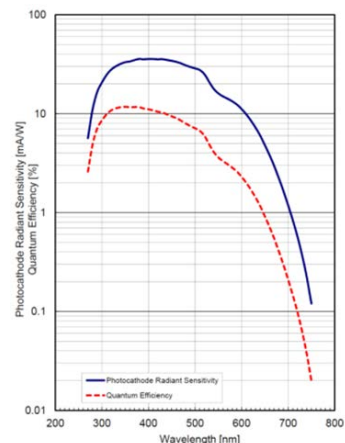


図7. 感光性結晶化ガラスとアルカリ光電面からなるガス光電子増倍管(ガスPMT)の分光感度特性

ガスPMTの時間特性試験を、ピコ秒ライトパルサ(PLP-10)からパルス幅60psec、波長405nmの光を入射させ、アノード出力からの信号を広帯域アンプを通してオシロスコープで取得し、その時間特性を調べた。図8に、細孔型MPGDのガラスプレート間に印加した電圧が300Vの時に得られた出力波形を示す。



図8. 感光性結晶化ガラスを用いた細孔型MPGDとバイアルカリ光電面からなるガス光電子増倍管の時間特性。

パルス入射から信号の立ち上がりまでの時間は90nsecであった。これは光電面から放出された電子が細孔型MPGDに到達するまでの時間に相当し、光電面とガラスプレート間の距離5mmから得られる電子のドリフト速

度は  $6 \text{ cm} / \mu \text{ sec}$  であり、Ne 混合ガス中での典型的なドリフト速度と一致した。また、得られた波形の立ち上がり時間（ピークの 10% から 90%）は 9 nsec であり目標値である時間分解能 10 nsec を十分に達成できる性能を有することがわかった。以上の開発により、感光性結晶化ガラスからなる細孔型 MPGD を用いた「新型光センサー」の基礎性能を得ることができた。

## 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 3 件）

[1] 門叶 冬樹他 3 名, “ガス電子増殖を用いた光検出器の開発”, 放射線, 39, 127-133, 2014. (査読無)

[2] Toru Moriya, Fuyuki Tokanai and 10 co-authors, “A concise quantum efficiency measurement system for gaseous photomultipliers”, Nucl. Instr. and Meth., A, 732, 269-272, 2013. (査読有)

[3] Fuyuki Tokanai and 12 co-authors, “Novel glass ceramic-type micropattern gas detector with PEG3C”, Nucl. Instr. and Meth., A, 732, 273-276, 2013. (査読有)

〔学会発表〕（計 2 件）

[1] T. Sumiyoshi, F. Tokanai 他 8 人, “Recent progress in gaseous PMT”, 7th International Conference on New Developments In Photodetection. 30 Jun-4 Jul 2014 Tours (France).

[2] F. Tokanai 他 7 人, “Recent development of gaseous photomultipliers”, 8th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH 2013), Dec. 2-6, 2013 Kanagawa (Japan).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

門叶 冬樹 (TOKANAI Fuyuki)

山形大学理学部・教授

研究者番号 : 80323161