

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04462

研究課題名(和文) 新たな超高感度マイクロチャンネルプレートで拓く粒子・光子検出の新世界

研究課題名(英文) New World of Particle and Photon Detection Pioneered by New Ultra-Sensitive Microchannel Plates

研究代表者

的場 史朗(Matoba, Shiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・技師

研究者番号：80535782

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：高速・高空間分解能イメージング素子であるマイクロチャンネルプレートの高検出効率化に成功した。特に、真空紫外光検出において、粒子の入射部にテーパ加工を施したテーパ型マイクロチャンネルプレートを用いることで、コーティングよりも大きな検出効率向上効果が得られ、人工衛星ミッション等で適応されていくことが期待される。また、テーパ加工とコーティングを組み合わせることで、従来のマイクロチャンネルプレートでは検出効率が低かった数キロエレクトロンボルト程度以下の低エネルギーイオンやミュオン等の荷電粒子について、検出効率を大幅に向上させることが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発された様々な粒子・幅広いエネルギーにおいて高感度で検出できるマイクロチャンネルプレートは、多重同時計測の効率を劇的に向上させるものであり、科学計測技術の発展に大きな寄与を与える。また、産業用分析機器の検出効率も大幅に向上させることが可能であるため、クーロン爆発法を用いた高分子の空間的原子配置の直接測定等の全く新しい分析手法が開発されていくと期待される。

研究成果の概要(英文)：We have succeeded in improving the detection efficiency of microchannel plates, which are high-speed, high-spatial-resolution imaging elements. In particular, the use of a tapered microchannel plate with a tapered particle incidence area for vacuum ultraviolet light detection has resulted in a larger improvement in detection efficiency than that of a coating. It is expected to be applied to satellite missions. The combination of the tapered processing and the coating has made it possible to significantly improve the detection efficiency of charged particles such as low-energy ions and muons with energies of several kiloelectron volts or less, which have been detected with conventional microchannel plates with low detection efficiency.

研究分野：放射線検出器，二次粒子生成標的

キーワード：マイクロチャンネルプレート 検出器 放射光 極端紫外光 中性子 ミュオン イメージング

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マイクロチャンネルプレート(MCP)は鉛ガラスに電子増倍作用を持つ直径 $10\ \mu\text{m}$ 程度の細孔を 2 次元的に配列した板状の検出器であり、荷電粒子、短波長の光子、高速中性粒子等に対して感度を持つ。高空間分解能での位置検出・画像読出しや高速検出が可能であるという特徴を有するため、基礎研究から産業まで非常に広い分野で使われている。粒子検出器として用いる際に MCP には問題が存在する。それは MCP を用いた同時計測における検出効率の低下である。MCP の最大検出効率はその開口率によって制限される。市販されている一般的な MCP の開口率は 50-60% である。このことは同時計測実験で顕著に影響し、例えば三重同時計測では 20% 程度に低下する。これまでに申請者は開口率を上げれば検出効率を増加させる事が出来ると考え、入射部にテーパー加工を施して実効的な開口率を向上させたテーパー型 MCP の製作に携わってきた。その単原子イオンに対する最大検出効率は 50 keV 以上で開口率 (~89%) に匹敵する 90% に向上し、単原子イオン検出においてテーパー加工が有効であることを初めて示した[1]。しかしながら、荷電粒子の入射運動エネルギーの低い領域では検出効率が開口率に満たず、また、紫外光などの他の粒子に対してテーパー加工が有効であるか不明であった。

加速器を用いた二次粒子生成技術の進展によって多種多様な量子ビームが大強度で得られるようになり、特にミュオンと中性子に関しては応用分野が急激に広がっている。MCP はガス検出器や半導体検出器には無い諸特性(サブナノ秒以下の高速検出・ $10\ \mu\text{m}$ 程度の高空間分解能等々)を有しており、ミュオンや中性子にも適応が期待されているが課題も多い。ミュオンは水素原子イオンの同位体と見なすことが可能であり、MCP 検出においても水素原子イオンと同様の検出効率になると考えられる。水素原子イオンは二次電子放出率が低いため、その検出効率も低い事が報告されている。特に 100 eV 程度の超低速ミュオンでは顕著な検出効率低下により一次ビームのプロファイル測定でさえ困難をきたしている。近年、 $10\text{B}(n, \gamma)7\text{Li}$ 反応を利用して 10B を添加した中性子コンバーターと電子増倍を兼ねている MCP が開発されており、CERN を中心に使用されてきている。熱エネルギー領域の中性子で最高 60% 前後の検出効率と報告されているが、共鳴イメージング等に用いられる数 eV 以上のエネルギー領域では検出効率が低下しており、この改善が課題である。

2. 研究の目的

本研究は以下の項目を目的として推進された。

2-1 テーパー型 MCP の汎用性を高めるために、紫外光検出においてもテーパー加工が有効かを検証する。

2-2 低エネルギー荷電粒子に対する検出効率を向上させる。このために二次電子放出率を高めるコーティング材料を見出し、検出効率向上を目指す。コーティングは、通常のイオン検出のみならずミュオンに対しても検出効率を向上させる効果が期待できる。

2-3 中性子と反応する 10B を用いた MCP の構造(厚さ、細孔径、ピッチ、バイアス角度、テーパー形状等)と中性子計数率との関係を導き出し、より高検出効率の MCP を開発する。特に熱外領域において高感度となるようなコーティングや形状を導き出す。MCP を用いて空間分解能で $10\ \mu\text{m}$ を下回る事が出来れば、ナノスケールレベルへの中性子イメージングが可能となり、生命科学への応用が爆発的に広がると期待される。

上記の実験を通じて、多種多様な量子ビームに適応した超高感度 MCP を開発することが本研究の最終目標である。

3. 研究の方法

3-1 EUV 検出器としての有用性を検証するために、自然科学研究機構分子科学研究所 UVSOR の BL5B にて開口率約 100% のテーパー型 MCP を用いて 32~190 nm の波長域における EUV 検出効率を測定した。分光された EUV は、直径 1 mm のピンホールを通過し、MCP に入射される。MCP は高輝度では計数率が飽和するため、モリブデンメッシュとカプトン薄膜で光を減衰させた。高次光を減衰させるために厚さ 300 nm のアルミホイルまたは厚さ 1.5mm の LiF 窓を挿入した。測定に用いた MCP は、通常型、テーパー型、CsI コート通常型、CsI コートテーパー型の 4 つの領域に分かれた特注品である。

3-2 テーパー型及び通常型 MCP に対して二次電子放出効率を高める目的として MgO を表面にコーティングし、0.5-4 keV における水素原子イオンに対する検出効率を測定した。コーティングを施していない T-MCP 及び通常型 MCP に対しても同様の測定を行い、コーティングの効果を検証した。測定原理は[1]に詳細が記されている。

3-3 中性子への感度が高い MCP を製作する。この MCP を用いて高速・高空間分解能中性子イメージングを実現する二次元検出システムを開発する。

4. 研究成果

4-1 図1に、テーパー型 MCP (T-MCP), CsI コート型 MCP (CsI-MCP), テーパー型 CsI コート型 MCP (TCsI-MCP) を用いた紫外光検出の測定カウント数におけるノーマル型 MCP (N-MCP) に対する強度比を示す. テーパー型 MCP の検出効率は, すべての測定波長域でノーマル型 MCP より高い. 特に短波長域では, テーパー型 MCP は CsI コート型 MCP よりも高い検出効率を示した. さらに, テーパー付き MCP と CsI コーティングの相乗効果により, MCP の検出効率が向上することが確認された. これらの結果は, テーパー付き MCP が紫外線検出のための強力なツールであることを示している.

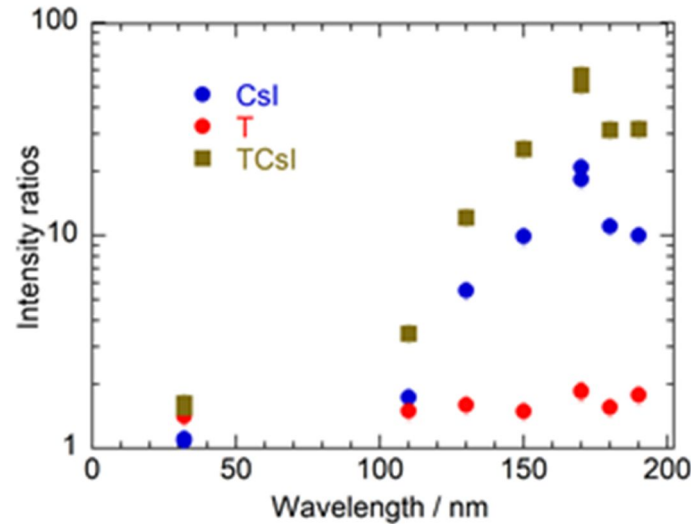


図1. 通常型 MCP の単位時間当たり紫外光収率で規格化したテーパー型 MCP (T), CsI コーティング MCP (CsI), テーパー型 CsI コーティング MCP (TCsI) の紫外光収率.

4-2 図2に、T-MCP, MgO コーティング T-MCP, N-MCP における水素原子イオンの検出効率を示す. 測定された領域では MgO コーティングは検出効率向上に有用であることが確認された. 一方で, 測定された領域では最大検出効率(90%)は開口率(約 100%)に達してはいない. また 1 keV 以下の領域において過去の報告値(Peko *et al.* NIMB 171 p597 (2000))では大きな入射運動エネルギー依存性が見られているが本研究期間における検出効率測定では観測できておらず, 今後はさらに幅広い運動エネルギー領域での検出効率測定が期待される. ミュオンにおいてもコー

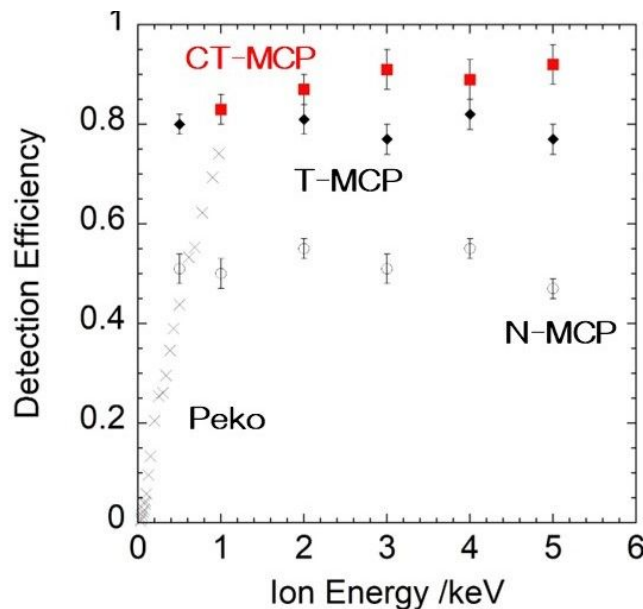


図2. テーパー型 MCP (T-MCP), MgO コーティング T-MCP(CT-MCP)及び通常型 MCP(N-MCP)における水素原子イオン検出効率の入射運動エネルギー依存性. 過去の報告値(Peko)も併記.

ティングの効果は同等であると期待され、高感度の超低速ミュオン検出器として適応可能と考えられる。

4-3 中性子吸収反応を促進させる 10B を多く含むホウケイ酸ガラスを基板材料とした新しい MCP の製作を行った。また、中性子・ミュオン・イオンビーム等の量子ビーム検出用に汎用で使用できる抵抗アノード及び高速計測回路の開発を行った。本システムを用いて中性子ビームラインにて実験予定であったが、確保していたビームタイムは COVID-19 まん延のため延期されている。今後は 2023 年度以降に再実験を行い、中性子イメージングにおける空間分解能等を測定していく予定である。

上記の研究から、本研究の目的である、様々な粒子に対して、幅広いエネルギーにおいて、高検出効率を実現する検出器開発は達成された。今後は科学・産業界へ本研究成果を展開し、その波及として新しい分析技術の開発へと繋がっていく事が期待される。

[1] S. Matoba *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 50 (2011) 112201

[2] Peko *et al.* NIM. B. 171 (2000) 597-604

[3] A. Tremsin *et al.*, NIM 628 (2011) 415

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 的場史朗	4. 巻 17
2. 論文標題 テーパ型マイクロチャンネルプレートでのイオン検出効率	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 原子衝突学会誌しょうとつ	6. 最初と最後の頁 58-66
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 的場史朗, 岩山 洋士, 金安 達夫
2. 発表標題 テーパ型マイクロチャンネルプレートを用いた高感度紫外光検出
3. 学会等名 第36回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 的場史朗, 岩山 洋士, 金安 達夫
2. 発表標題 テーパ型マイクロチャンネルプレートを用いた紫外光の高感度検出
3. 学会等名 原子衝突学会第47 回年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大下 英敏 (OHSHITA Hidetoshi) (00625163)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・技師 (82118)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	吉川 一郎 (Yoshikawa Ichiro) (10311169)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授 (12601)	
研究分担者	瀬谷 智洋 (Seya Tomohiro) (30563978)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准技師 (82118)	
研究分担者	吉岡 和夫 (Yoshioka Kazuo) (70637131)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師 (12601)	
研究分担者	平田 浩一 (Hirata Kouichi) (80357855)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・上級主任研究員 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関