

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05470

研究課題名(和文)次世代型ミュオン・電子転換過程探索実験に向けたファイバー飛跡検出器の開発

研究課題名(英文)Development of a fiber tracker for next-generation muon-to-electron conversion search experiments

研究代表者

清矢 良浩 (Seiya, Yoshihiro)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：80251031

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：浜松ホトニクス社の半導体光センサーMPPC(Multi-Pixel-Photon-Counter)とプラスチックシンチレーションファイバーを用いた大強度荷電粒子耐性が高い飛跡検出器の開発検討を行った。大強度荷電粒子に対する飽和からの応答回復時間が10μ秒程度と遅く、その原因は大強度光に対するMPPCの応答特性であることが明らかになった。MPPCに印加する電圧をパルス駆動してみたが応答速度に改善は見られず、半導体物性の過度現象も含めた詳細な理解が必要であることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大強度ビームによる素粒子の稀少反応探索や精密測定実験は素粒子標準模型を越えた根本法則の解明に重要である。その典型的な例であるミュオン・電子転換過程探索実験では、標的への大強度ビーム照射後に生成される単一遅延電子を検出する必要があるが、一般論として、大強度荷電粒子に耐えながらその後すばやく単一電子を検出することは、検出器設計の観点からは難しい問題である。検出器に負担をかけることで低コストで高感度な検出器の開発を目指して半導体検出器を用い、その大強度ビームに対する応答を初めて測定した。半導体物性の過度現象も含めた詳細な理解が必要であることが明らかになり、今後の研究開発の方向性を示した。

研究成果の概要(英文)：Using the SiPM of Hamamatsu Photonics, MPPC (Multi-Pixel-Photon-Counter), and plastic scintillating fibers, we conducted R&D of a tracking detector which has high tolerance against high intensity beams (burst). We found that the detector had very slow response recovery from saturation due to the burst, an order of 10 micro seconds, and the cause seemed to be in the MPPC's specific response nature to high intensity light rather than the plastic scintillating fibers. We tried to drive MPPC by applying pulsed HV in order to switch off at the burst timing, but the slow response did not get improved. It has been realized that more detailed understanding of behavior of semiconductor detectors including transient phenomena is necessary.

研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：プラスチックシンチレーションファイバー飛跡検出器 大強度ビーム 応答時間

1. 研究開始当初の背景

(1) 素粒子標準模型を超える、より基本的な新しい物理法則の手がかりを発見することは、現代素粒子物理の最重要課題である。その解決に向けて、最高エネルギーでの素粒子反応の追及と共に大強度加速器ビームを用いた稀少反応の探索や超精密実験は重要である。その中でもミュー粒子・電子転換過程探索実験は期待されているものの一つである。世界的にもアメリカの Mu2e 実験、日本においては COMET 実験や以下に述べる DeeMe 実験等が計画されている。大強度加速器ビームを用いたミュー粒子・電子転換過程探索実験は今後もさらに発展することが予想される。

(2) ミュー粒子・電子転換過程探索実験は通常、ミュー粒子を粒子生成エリアからビームラインによって引き出して実験エリアに導き、静止標的に止めて実験を行うため、大規模な輸送ビームラインの建設が必要である。一方、我々が推進しているミュー粒子・電子転換過程探索実験 DeeMe は、ミュー粒子生成標的がミュー粒子静止標的も兼ねる世界に例の無い独創的な方式をとっているため輸送するビームライン建設が不要になり、大きなコスト削減に成功している。しかし、一方で生成標的から直接的に粒子検出器に入射する 2 次生成粒子数が莫大である (バースト) [1]。我々が探索する信号は、バーストから数 μ 秒後に出てくる遅延電子であるため、バーストに耐えながら 1 個の遅延荷電粒子を効率よく捉える検出器の開発が必要になってくる。DeeMe においては、飛跡検出器として多線式比例係数箱 (MWPC) を採用している。そこでは、バーストのタイミングで検出器に印加している高電圧をスイッチし、検出感度をコントロールすることによってバーストの影響を抑えるという革新的な技術を開発していた [2]。将来に向けては、加速器ビーム強度のさらなる向上に対応するために実験の高度化が必要である。一般論として、大強度荷電粒子に耐えながらその後すばやく単一荷電粒子を検出することは、検出器設計の観点からは難しい問題であり、研究・開発の重要なテーマである。

(3) 飛跡検出器としては物質量が少ない方が望ましいが、研究の出発点として取扱いが比較的容易なプラスチックシンチレーティングファイバーと、バースト照射で生じる大光量による焼き付き損傷が無い半導体光センサー MPPC (Multi-Pixel-Photon-Counter) で構成される粒子検出器を考えた。一般的にこの検出器は応答速度も十分速いことが知られていた。2014 年に京都大学原子炉実験所 (KURRI) の電子線形加速器を用い、200 ns 幅のパルスあたり約 10^7 個の電子を $\phi 0.5$ mm で長さが 30 cm 程度のシンチレーティングファイバー (クラレ SCSF-38) + MPPC (浜松ホトニクス S10362-11-050C) に照射したところ、検出器自身は破損することなく動作したが、図 1 に示すような飽和が確認され、また復帰に数 μ 秒かかることが判明した。1 個の荷電粒子の信号の大きさは、この場合数 mV であったので、飽和後の長い時間にわたって単一粒子検出感度を失っていることがわかった。大強度ビーム照射に対するプラスチックシンチレーティングファイバー+MPPC の応答測定は初めてであったと考えられる。この結果により、飽和からの回復が早い検出器開発の必要性が認識された。

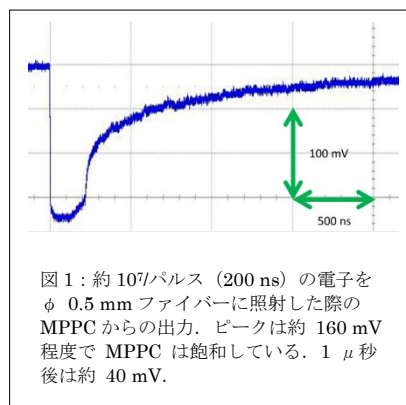


図 1: 約 10^7 パルス (200 ns) の電子を $\phi 0.5$ mm ファイバーに照射した際の MPPC からの出力。ピークは約 160 mV 程度で MPPC は飽和している。1 μ 秒後は約 40 mV。

2. 研究の目的

大強度加速器パルスビームを用いた次世代型ミュー粒子・電子転換過程探索実験のための MPPC 読み出しシンチレーティングファイバー飛跡検出器の研究開発を行う。開発の最終目標は、大量の 2 次生成粒子 (バースト) に耐えつつバースト後数 μ 秒で発生する微弱な遅延単一荷電粒子信号を高効率で検出することであるが、まず飽和からの回復が遅い原因を明らかにし、応答が速い検出器の開発できるかが最初の鍵である。

3. 研究の方法

(1) ミュー粒子・電子転換過程探索実験である DeeMe 実験の研究活動の一環として位置づけ、その高度化に向けた研究開発を行う。これにより DeeMe 実験で用いられる様々な研究リソースを使用することにする。

(2) 応答回復速度の改善に向けた一つの重要な知見として、極細 ($\phi 0.1$ mm) ファイバーを用

いれば飽和からの復帰が早いことが分かっていた（図 2）。極細ファイバー1本では単一荷電粒子に対して十分な光量が得られないため、複数本を集約し、バンドル化して一つのMPPCで読み出す検出器を製作し、ビーム試験を行う。

(3) バンドル化した結果、応答速度が遅くなる場合には可能な限りその原因を明らかにしていく。

4. 研究成果

(1) $\phi 0.1 \text{ mm}$ の極細プラスチックシンチレーションファイバーを10本束ねてバンドル化した検出器を製作し、京都大学原子炉研究所線形電子加速器の電子ビームを用いてビームテストを行った。パルスあたり 10^7 程度の大量の荷電粒子（バースト）を照射したところ、 $\phi 0.1 \text{ mm}$ の極細プラスチックシンチレーションファイバー単体に照射した場合には応答回復が速い一方、ファイバーバンドルにした場合には応答回復が遅くなることが判明した。これはこれまでにない新しい測定結果である。

(2) ファイバーバンドルにした場合に応答回復が遅くなる原因を明らかにするため、まずファイバー間の光学的な干渉が無いように1本ごとにアルミ蒸着したものをバンドル化した検出器を製作し、京都大学原子炉研究所線形電子加速器の電子ビームを用いてビームテストを行った。パルスあたり 10^7 個の電子相当を照射したところ、飽和からの復帰が依然として遅く、光学的干渉が原因では無いことを明らかにした。

(3) アルミ蒸着したファイバー内で光が反射して留まる影響を低減するため、1本ごとに光吸収率が高い黒塗料を塗布したものをバンドル化した検出器を製作し、京都大学原子炉研究所線形電子加速器の電子ビームを用いてビームテストを行った。パルスあたり 10^7 個の電子相当を照射したところ、飽和からの復帰が依然として遅く、ファイバー内反射の影響が原因では無いことが明らかになった。

(4) ファイバーのバンドル化の影響を直接的に確認するため、ファイバーバンドルから1本のみを読み出しMPPCに結合したものと、1本のみファイバーをMPPCに結合した検出器をそれぞれ製作し、京都大学原子炉研究所線形電子加速器の電子ビームを用いてビームテストを行った。パルスあたり 10^7 個の電子相当を照射したところ、両者の応答に大きな違いは無く、応答速度も速いことが確認された。これによりプラスチックシンチレーションファイバーのバンドル化に原因があるのではなく、MPPC固有の性質が原因である可能性が高いことが示された。

(5) 応答速度が遅い原因がMPPC固有の性質であることをさらに確かめるため、異なる光センサーとの比較として光電子増倍管（PMT）を接続した検出器を製作した。さらにバースト照射のタイミングにおいてMPPCへの印加電圧をOFFにしておき、照射直後にONにするカスタムスイッチング回路を製作した。これらを用い京都大学原子炉研究所線形電子加速器の電子ビームを用いてビームテストを行った。その結果、PMTの応答は速く、MPPCの応答特性に原因があることが改めて確認された。また、印加電圧のスイッチングを行ったにも拘わらず、応答に変化が無いという新たな知見が得られた（図3）。MPPCのパルス駆動に対する応答測定は初の試みと思われる。

(6) MPPC印加電圧のスイッチングを行っても応答に変化が無い原因として、印加電圧にかかわらず大量の電子・ホールペアが空乏層で生成され、それらが滞留することによってバイアス電圧印加後にそのまま信号として出力される可能性を考えた。そこで順方向電圧印加により空乏層を抑制し、その状態から逆バイアス電圧にスイッチする新たなスイッチング回路を製作し、京都大学原子炉研究所線形電子加速器の電子ビームを用いてビームテストを行った。

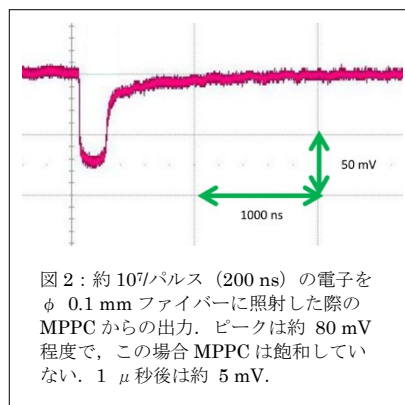


図 2：約 10^7 パルス（200 ns）の電子を $\phi 0.1 \text{ mm}$ ファイバーに照射した際のMPPCからの出力。ピークは約 80 mV程度で、この場合MPPCは飽和していない。1 μ 秒後は約 5 mV。

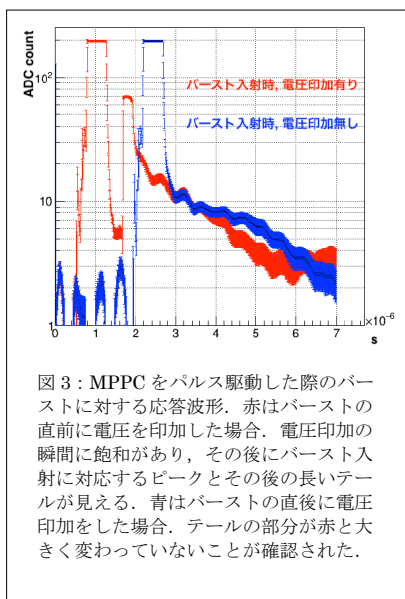


図 3：MPPCをパルス駆動した際のバーストに対する応答波形。赤はバーストの直前に電圧を印加した場合。電圧印加の瞬間に飽和があり、その後にバースト入射に対応するピークとその後の長いテールが見える。青はバーストの直後に電圧印加をした場合。テールの部分が赤と大きく変わっていないことが確認された。

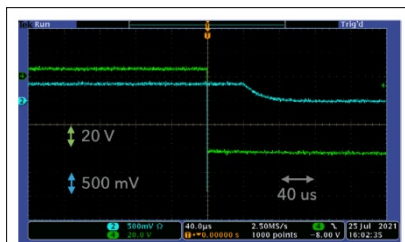


図 4：MPPCのパルス駆動の方式を順方向から逆方向にスイッチした際のMPPC出力電圧。緑が印加電圧、青がMPPCの出力。順方向印加時には正の電圧が生じているが、逆バイアスにスイッチしてから約 40 μ 秒後に電圧が0になることが判明した。

その結果、順方向から逆バイアスに印加電圧をスイッチした際、MPPC の状態変化の時間スケールが 40 マイクロ秒程度と非常に大きいという新たな知見が得られた。印加電圧スイッチングという時間的揺動に対して半導体検出器の物性的性質がどのような時間的发展を示すのかに関するより詳細な理解が必要であることが明らかになった。

[1] DeeMe の場合、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の物質・生命科学実験施設 (MLF) に建設予定の H ラインを想定すると 200 ns 幅のパルスあたり 10^8 個にも達する。

[2] 名取寛顕・清矢良浩他, 日本物理学会 2013 年 9 月高知大学, 2014 年 3 月東海大学, 2014 年 9 月佐賀大学, 2015 年 3 月早稲田大学, 2015 年 9 月大阪市立大学, 2016 年 3 月東北学院大学, 2016 年 9 月宮崎大学

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Natori H., Teshima N., Aoki M., Nishiguchi H., Nguyen T. D., Takezaki Y., Furuya Y., Ito S., Mihara S., Nagao D., Nakatsugawa Y., Nguyen T. M., Seiya Y., Shimizu K., Yamamoto K.	4. 巻 2017
2. 論文標題 A fast high-voltage switching multiwire proportional chamber	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptw193	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 該当する

1. 著者名 Teshima N., Aoki M., Higashino Y., Ikeuchi H., Komukai K., Nagao D., Nakatsugawa Y., Natori H., Seiya Y., Truong N.M., Yamamoto K.	4. 巻 999
2. 論文標題 Development of a multiwire proportional chamber with good tolerance to burst hits	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 165228 - 165228
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2021.165228	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 植松 泰智, 青木 正治, 清矢 良浩他
2. 発表標題 MPPC 読み出しプラスチックシンチレーティングファイバー系の 大強度ビームに対する応答の測定
3. 学会等名 日本物理学会第 76 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植松 泰智, 青木 正治, 清矢 良浩他
2. 発表標題 MPPC 読み出しプラスチックシンチレーティングファイバー系の 大強度ビームに対する応答の測定
3. 学会等名 大阪市立大学理学部物理学科・南部陽一郎物理学研究所主催アインシュタイン・南部セミナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植松 泰智, 青木 正治, 清矢 良浩他
2. 発表標題 大強度光に対する MPPC の応答の測定
3. 学会等名 日本物理学会 2021 秋季大会
4. 発表年 2021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
連携研究者	青木 正治 (Aoki Masaharu) (80290849)	大阪大学・大学院理学研究科・教授 (14401)	

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
---------	---------