

BARTŁOMIEJ RACHWAŁ*

SYSTEM DETEKCJI ŚWIATŁA Z UŻYCIEM FOTOPOWIELACZY KRZEMOWYCH

SYSTEM OF LIGHT DETECTION USING SILICON FOTOMULTIPLIERS

Streszczenie

Współczesne systemy detekcji światła wymagają nieustannego prowadzenia prac badawczo-rozwojowych w celu uzyskiwania coraz lepszej efektywności zbieranego sygnału. Na bazie wyników uzyskanych podczas prac badawczo-rozwojowych detektora IFR spektrometru SuperB, prowadzonych w Ferrarze, w artykule przedstawiono wyniki optymalizacji układu zawierającego fotopowielacze krzemowe w systemie detekcji światła.

Słowa kluczowe: fotopowielacze krzemowe, detekcja światła

Abstract

Modern systems of light detection require continuous research and development studies in order to achieve the best possible efficiency of the collected signal. Optimization of the light detection system, composed of silicon photomultipliers in the light is discussed, based on R&D works related to the construction of the IFR detector (SuperB collaboration).

Keywords: Silicon Photomultipliers (SiPM), light detection

* Mgr inż. Bartłomiej Rachwał, Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego, Polska Akademia Nauk.

1. Wstęp

Światło – promieniowanie elektromagnetyczne – to jedyna rzecz którą widzimy! Tylko dzięki różnorodnym przejawom oddziaływań elektromagnetycznych możemy przeprowadzać eksperymenty, w których podejmujemy się pomiaru interesujących nas wielkości fizycznych. Przykładem może być tutaj odkrywanie świata cząstek elementarnych, których nie sposób przecież w sposób bezpośredni „zobaczyć”. Uwzględniając tę zasadę, budowane są dziś wielokomponentowe detektory oferujące niezwykle atrakcyjne możliwości badania struktury materii, stanowiąc jednocześnie ogromne wyzwanie techniczne.

Na drodze do zwiększania efektywności oraz dokładności pomiaru, ważne jest aby rozwijać techniki badawcze, w których wykrycie światła na poziomie pojedynczego fotonu jest bardzo istotne. W fizyce wysokich energii rolę uniwersalnego detektora światła pełnią liczniki scyntylacyjne, których działanie opiera się na zjawisku luminescencji (scyntytacji) atomów pewnych ośrodków (organicznych oraz nieorganicznych), wzbudzanych przez cząstki jonizujące. Luminescencję rejestruje się za pomocą fotopowielaczy. Szeroko stosowane do tego celu tuby fotopowielające (photomultipliers, PMT) mają wiele wad, do których głównie należy czułość na pole magnetyczne, wysokie napięcia pracy czy brak możliwości miniaturyzacji aparatury. Dlatego uwaga inżynierów oraz fizyków projektujących wielokomponentowe i bardzo złożone detektory skierowana jest obecnie na dobrze już rozwiniętą strukturę fotodetektorów zwanych fotopowielaczami krzemowymi (SiPM), których zastosowanie przy badaniu struktury świata cząstek elementarnych przedstawiono w niniejszym artykule.

2. Eksperymentowanie z cząstkami elementarnymi a fotodetektory światła

Kiedy w 1932 roku James Chadwick odkrył w jądrze atomu neutron, wydawało się, że to koniec odkryć na tym polu. Tymczasem od tamtej chwili naukowcy przeprowadzający doświadczenia w akceleratorach stwierdzili występowanie setek innych cząsteczek wchodzących w skład atomu. Odkryciu każdej z nich towarzyszyło pojawienie się kolejnych pytań, wymagających dalszych odpowiedzi. Badania nad strukturą otaczającego nas świata trwają i stanowią jedną z najważniejszych stref aktywności naukowej człowieka.

Cząstki elementarne jesteśmy w stanie wykryć jedynie poprzez ich różnorodne, elektromagnetyczne oddziaływania z materią. Cząstki te, przechodząc przez ośrodek, przekazują mu energię w procesach jonizacji lub wzbudzenia atomów ośrodka. To właśnie te zjawiska, które można obserwować za pomocą rejestracji jonów, światła scyntylacji, promieniowania Czerenkowa czy sygnałów pochodzących od par elektron–dziura w licznikach półprzewodnikowych umożliwiają pomiar położenia, czasu pojawienia się oraz rodzaj cząstek naładowanych.

Na polu doświadczeń fizyki cząstek elementarnych w licznikach scyntylacyjnych w zakresie śledzenia torów cząstek oraz w kalorymetrach cząstek naładowanych zostały zrealizowane pierwsze zastosowania fotodetektorów krzemowych (SiPM).

Planowane obecnie następne generacje eksperymentów będą potrzebować olbrzymiej liczby fotodetektorów, np. detektor Instrumented Flux Return (IFR) międzynarodowego zespołu naukowego, który podjął się zadania konstrukcji akceleratora i detektora cząstek o nazwie SuperB, będzie zawierał blisko 20 000 000 fotodetektorów [5]. W projektowaniu tego typu przedsięwzięcia niewątpliwie konieczne jest prowadzenie badań nad optymalizacją danego układu pomiarowego z użyciem SiPM, w celu osiągnięcia najlepszej konfiguracji całego systemu.

3. Fotopowielacze krzemowe (SiPM) – zasady pracy

W detekcji oddziaływania elektromagnetycznego główną rolę odgrywają dwa zjawiska, które opierają się na absorpcji pojedynczego fotonu przez pojedynczy elektron. Pierwszy, to proces fotoemisji elektronu z powierzchni półprzewodnika, drugi – wzbudzenie elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodzenia półprzewodnika. Obydwa procesy generują wolne ładunki, które pod wpływem przyłożonego z zewnątrz napięcia implikują prąd płynący pod wpływem ciągłego oświetlenia. Ten „fotoprąd” jest w zasadzie liniowo zależny od natężenia oświetlenia. Liniowość ta jest utrzymana w szerokim zakresie intensywności [7].

Uwzględniając powyższe, zasada działania fotopowielaczy krzemowych jest stosunkowo prosta, oparta na zasadzie działania fotodiody lawinowej (ang. *Avalanche Photodiodes* – APD). Jeśli do APD zostanie przyłożone wysokie napięcie „bias” w kierunku zaporowym, to wygenerowane przez fotony elektrony doznają wystarczającego przyśpieszenia, aby produkować kolejne pary elektron–dziura w procesie jonizacji zderzeniowej na atomach Si. Każdy proces jonizacji wytwarza kolejną parę elektron–dziura. W procesie tym uderzający elektron traci energię równą przerwie energetycznej. Jeśli przyłożone pole elektryczne jest wystarczające, aby wywołać proces lawinowy, to wzrastają zarówno fotoprąd, jak i reakcja na światło (ale wydajność kwantowa zostaje taka sama).

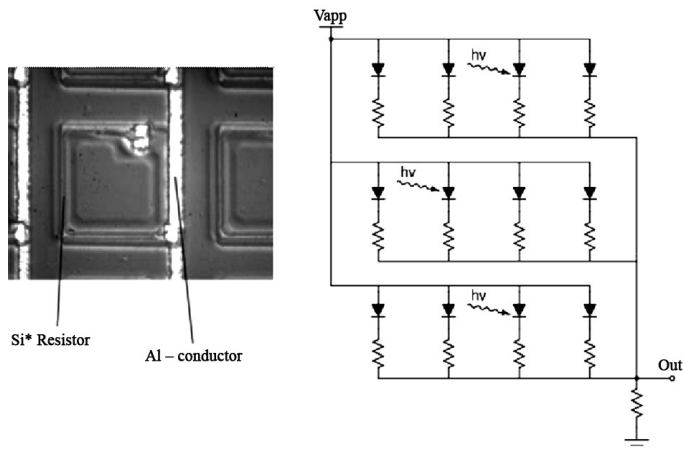
Należy pamiętać, że dla pojedynczego fotonu wartość wzbudzonego sygnału jest bardzo mała wewnątrz złącza ($\sim 10^{-19}\text{C}$). Rejestracja takiego sygnału, wśród szumów wynikających z architektury układu pomiarowego, jest ekstremalnie trudna. Aby ominąć ten problem, trzeba zapewnić wzmocnienie sygnału jeszcze wewnątrz struktury detekcyjnej (złącza n-p) przed transportem sygnału do zewnętrznego obwodu. Wartość tego wzmocnienia powinna zawierać się w przedziale $10^4\text{--}10^6$.

Wewnętrzne wzmocnienie w strukturze półprzewodnikowej może być uzyskane przez proces lawinowej jonizacji zderzeniowej, jak to zostało opisane powyżej. Aby proces lawinowy szybko wygasić, warstwa zubożona powinna być bardzo cienka, jak to jest tylko możliwe. Z kolei, wysoka wydajność kwantowa wymaga grubszej warstwy zubożonej. Problem ten został rozwiązany w APD przez oddzielenie regionu, w którym następuje absorpcja, od regionu wzmacniania [7].

Krzemowy fotopowielacz (SiPM) stanowi matryca zawierająca do kilku tysięcy niezależnych diod APD połączonych równolegle (rys. 1), spolaryzowanych zaporowo, pracujących nieco powyżej napięcia przebicia [2]. Ze względu na to sygnał wyjściowy jest sumą odpowiedzi od wszystkich uaktywnionych *pikseli*. W rezultacie cały obszar matrycy, w którym każdy element działa cyfrowo jako binarne urządzenie, działa jak detektor analogowy, co prowadzi do prostego a zarazem solidnego zastosowania w detektorze pojedynczych fotonów.

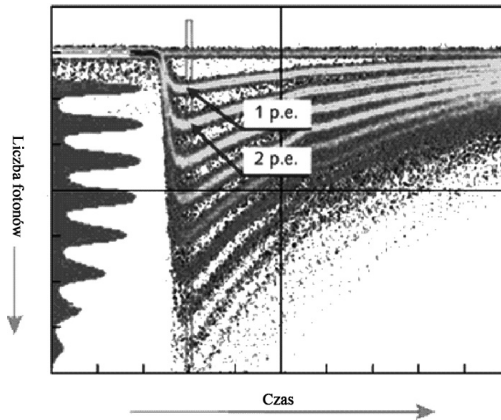
Użyteczność opisanych powyżej fotodetektorów determinuje ich kilka własności fizycznych:

- czułość odpowiedzi na światło mierzona we wzmocnieniu na jednostkę (wat) mocy światła padającego oraz jak ta czułość zmienia się wraz ze zmianą częstotliwości światła,
- prąd ciemny, który płynie nawet wówczas, gdy nie ma padającego promieniowania, co stanowi tło każdego pomiaru,
- szybkość odpowiedzi fotodetektora na zmiany oświetlenia, co determinuje szybkość przesyłu danych jaka może być osiągnięta,
- szumy pochodzące od przypadkowych fotonów oraz termicznie wzbudzonych elektronów.



Rys. 1. Powiększenie pojedynczej komórki SiPM podłączonej do polikrzemowej elektrody wygaszającej proces lawinowy [3] (z lewej); schemat zastępczy fotopowielacza krzemowego [4] (z prawej)

Fig. 1. Close-up of one cell of a SiPM that uses individual polysilicon quenching resistors [3] (left); equivalent electronic schematics of silicon photomultiplier [4] (right)



Rys. 2. Analogowy obraz sygnału uzyskanego z SiPM na oscyloskopie ukazujący rozdzielczość pojedynczych fotonów [6]

Fig. 2. Analog SiPM signal output on oscilloscope showing photon number resolution [6]

Zarówno prąd ciemny, jak i szumy nakładają ograniczenia na użyteczność fotodetektorów, gdy poziom promieniowania jest bardzo niski. Przykładane do detektora napięcie jest dostatecznie wysokie, aby generowane ładunki osiągały energie wystarczające do wytworzenia w zderzeniach z atomami kaskady elektromagnetycznej. Wynikiem tego może być pomiar impulsu elektrycznego wynikającego z absorpcji nawet jednego fotonu.

4. Liczniki scyntylacyjne – wykorzystanie SiPM w badaniach podstawowych

Dla cząstki naładowanej przechodzącej przez ośrodek materialny znaczna część jej energii jest tracona w procesach powodujących wzbudzenie obojętnych atomów lub powstałych jonów dodatnich. Część tej energii (10–40%) zostaje wypromieniowana we wszystkich kierunkach w postaci fotonów. Fotony te mogą zostać zamienione na energię termiczną lub zaabsorbowane. Okazuje się, że niektóre dielektryki mają tę własność, że są przezroczyste dla pewnych długości fal fotonów emitowanych przez jony lub atomy tegoż dielektryka. Daje to możliwość wykrycia tych fotonów po wyjściu ze środka. Proces ten nazywa się zjawiskiem scyntylacji, a ośrodek mający opisaną własność – scyntylatorem. Zbierając w scyntylatorze jak najwięcej fotonów do światłowodu doprowadzonego do fotopowielacza, mamy możliwość detekcji cząstek ze względu na fakt, iż liczba tych fotonów jest proporcjonalna do energii traconej przez przelatującą cząstkę.

Światłowody wykorzystywane w układzie nowego typu detektorów scyntylacyjnych ze SiPM stanowią ważne składniki. Czułość SiPM jest największa w zakresie światła zielonego, wykorzystuje się więc włókna WLS zmieniające długość zaabsorbowanego światła (ang. *wavelength shifters*). Dodatkowo, włókna muszą mieć dobrą wydajność światła, aby zapewnić maksymalną skuteczność wykrywania.

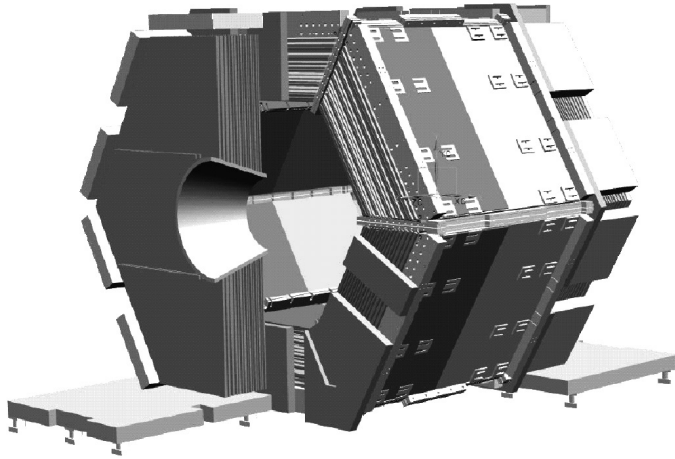
Detektory SiPM umożliwiają konwersję błysków światła zebranych przez włókna światłowodowe na sygnał elektryczny, zastępując na tym polu fotopowielacze. Daje to możliwość instalacji tego typu detektora w trudnych warunkach eksperymentu – ciasnej przestrzeni czy w wysokim polu magnetycznym. Co więcej, powinny one być w stanie pracować bezawaryjnie w czasie trwania eksperymentu ze względu na brak możliwości konserwacji. Krzemowe fotopowielacze spełniają powyższe wymagania, stanowią więc obiecujące sensory w następnych generacjach eksperymentów fizyki cząstek.

5. System odczytu detektora IFR spektrometru SuperB

Projekt SuperB jest międzynarodowym przedsięwzięciem dotyczącym konstrukcji akceleratora cząstek, jak również dedykowanemu mu systemowi detekcji, prowadzonym przez Narodowy Instytut Fizyki Jądrowej we Włoszech (INFN). Detektor IFR (*Instrumented Flux Return*) stanowi jeden ze subdetektorów całego spektrometru SuperB.

Głównym celem systemu IFR ma być identyfikacja mionów oraz detekcja neutralnych hadronów. Cylindryczna budowa detektora zamknięta ze stron przez tzw. korki (Endcaps), to w głównej mierze żelazo będące absorbentem wysokoenergetycznych cząstek. Struktura ta zawiera jednak przerwy pomiędzy poszczególnymi segmentami żelaza, w których znajdują się warstwy aktywne mierzące głębokość penetracji. Warstwy aktywne, to konstrukcja zawierająca segmenty ze scyntylatorów, w których sygnały świetlne zbierane są przez światłowody (WLS fibers), na zakończeniu których znajdują się krzemowe fotopowielacze.

W celu osiągnięcia najlepszej efektywności systemu detekcji światła, jak i prostoty samego detektora obecnie trwają prace badawczo-rozwojowe grupy naukowców w Ferrarze.



Rys. 3. Struktura detektora IFR [5]

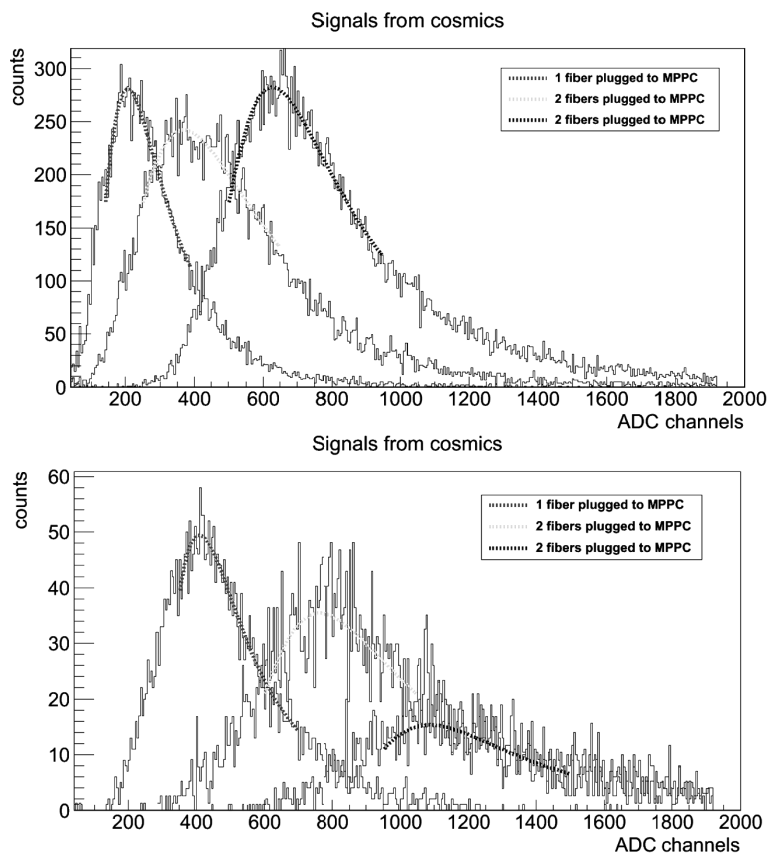
Fig. 3. The IFR flux return structure [5]

6. Prace badawczo-rozwojowe nad system odczytu detektora

Obecnie SiPM produkuje kilka różnych firm komercyjnych. Grupa konstruująca detektor IFR rozpoczęła prace R&D, wykorzystując urządzenia SensL, IRST-FBK oraz MPPC produkowanym przez Hamamatsu. Przy wykorzystywanej elektronice, okazuje się że urządzenia Hamamatsu gwarantują najlepszą wydajność, stanowią więc *baseline* w projektowanej konstrukcji. Ze względu jednak na ciągły rozwój tej technologii, ostateczna decyzja zależy od stanu techniki w danym czasie.

Wykorzystując pomiar promieniowania kosmicznego przy umiejscowieniu 1, 2, 3 włókien światłowodowych w scyntylatorze, sprawdzono najbardziej efektywną liczbę włókien w układzie detekcyjnym. Jak to zostało przedstawione na rys. 4, patrząc na wyniki dla 1 włókna oraz 2 włókien, przyrost wydajności wyniósł około 46%. Przy 2 oraz 3 włóknach ten przyrost wydajności pomiaru światła to 13% przy całkowitym wzmocnieniu rzędu 65% w odniesieniu do 1 włókna. Wynika stąd, iż racjonalne jest zastosowanie nie więcej niż trzech włókien w paskach scyntylatorów. Aby lepiej zrozumieć powyższe zachowanie, badania są w toku.

Wszystkie wyniki zestawiono w tabeli 1. Jak można zauważyć, różna geometria scyntylatorów ma znaczny wpływ na pomiar światła.



Rys. 4. Porównanie wydajności pomiaru światła zz 1, 2 oraz 3 włókien w systemie odczytu dla scyntylatorów o szerokości 5 cm (u góry) oraz 10 cm (u dołu). Powyższe wyniki zostały uzyskane na podstawie pomiarów promieni kosmicznych

Fig. 4. Comparison of the light yield with 1, 2 and 3 fibers readout for a 5 cm (top) scintillator strip and for a 10 cm strip (bottom). All the above plots refers to data collected with cosmic rays

Tabela 1

Wydajność pomiaru światła w liczbie fotoelektronów dla różnych konfiguracji systemu odczytu

	Wym. scyntylatora: 1 x 5 cm ²	Wym. scyntylatora: 1 x 10 cm ²
1 włókno	37 ± 3	19 ± 3
2 włókna	75 ± 4	37 ± 3
3 włókna	105 ± 5	63 ± 4

7. Podsumowanie

Fotopowielacze krzemowe charakteryzuje wiele zalet. Należą do nich: wysoki współczynnik wzmocnienia ($\sim 10^5$), niskie napięcie pracy (< 100 V), dobra wydajność detekcji ($\sim 30\%$), krótki czas odpowiedzi (*risetime* < 1 ns) oraz małe wymiary (kilka mm^2) i niewrażliwość na pole magnetyczne. Urządzenia te nie są jednak pozbawione wad, takich jak stosunkowo wysoki współczynnik prądu ciemnego (*dark count rate* ~ 100 kHz/ mm^2 przy 1.5 p.e.) oraz czułość na promieniowanie. Bez wątpienia jednak detektory SiPM otwierają nowe perspektywy dla dalszego rozwoju prezentowanej metody wykrywania światła w eksperymentach fizyki wysokich energii, jak również w wielu innych dziedzinach nauki. Z powyższych powodów prowadzone są, opisane w tym artykule, badania badawczo-optymalizacyjne systemu pomiarowego z SiPM, mające na celu uzyskanie jak najlepszej wydajności wykrywania światła i prostoty danego układu pomiarowego.

Literatura

- [1] Buzhan P., Dolgoshein B., Filatov L., Ilyin A., Kaplin V., Karakash A., Klemin S., Mirzoyan R., Otte A.N., Popova E., Sosnovtsev V., Teshima M., *Large area silicon photomultipliers: Performance and applications*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 567, 2006, 78-82.
- [2] Grigoriev E., Akindinov A., Breitenmoser M., Buono S., Charbon E., Niclass C., Desforges I., Rocca R., *Silicon photomultipliers and their bio-medical applications*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 571, 2007, 130-133.
- [3] Otte N., *The Silicon Photomultiplier – A new device for High Energy Physics, Astroparticle Physics, Industrial and Medical Applications*, Max-Planck-Institut für Physik, Fohringer Ring 6, 80805 Munich, Germany.
- [4] Saveliev V., *Silicon Photomultiplier – New Era of Photon Detection*, Advances in Optical and Photonic Devices, Book edited by: Ki Young Kim, 352, January 2010.
- [5] Super B Progress reports, Detector, preprint arXiv: 1007.4241, 2010.
- [6] <http://sales.hamamatsu.com>, 11th June 2012.
- [7] Kenyon I.R., *The Light Fantastic – A Modern Introduction to Classical and Quantum Optics*.