

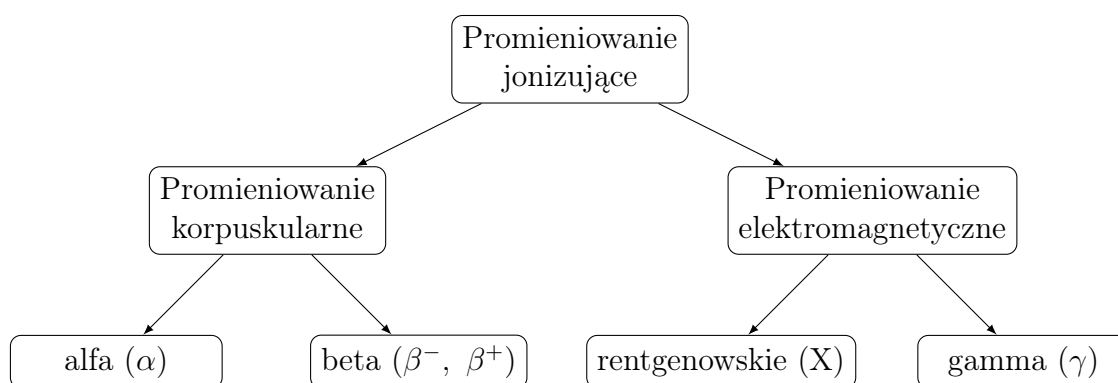
MiniPIX EDU w nowiu – badanie wpływu osłon na detekcję promieniowania jonizującego

Skrypt do zadania laboratoryjnego
Autorzy: Grzegorz Adamiuk, Małgorzata Marszałek,
Aleksandra Witkiewicz-Kucharczyk

1 Promieniowanie jonizujące

Promieniowanie jonizujące jest promieniowaniem zdolnym do wywołania jonizacji atomów lub cząsteczek ośrodka, z którym oddziałuje. Jonizacja polega na usunięciu elektronu z atomu lub cząsteczki w wyniku przekazania energii większej od energii wiązania elektronu. W wyniku tego procesu powstaje para jonowa składająca się z dodatnio naładowanego jonu oraz swobodnego elektronu.

Promieniowanie jonizujące dzieli się na promieniowanie korpuskularne oraz promieniowanie elektromagnetyczne. Do pierwszej grupy zalicza się między innymi cząstki alfa, elektrony, protony oraz neutrony, natomiast drugą grupę stanowi promieniowanie rentgenowskie i promieniowanie gamma. Poszczególne rodzaje promieniowania różnią się mechanizmami oddziaływania z materią, zdolnością jonizacji oraz przenikliwością.



Rysunek 1: Podział promieniowania jonizującego.

Oddziaływanie promieniowania z materią prowadzi do przekazania energii atomom ośrodka. W zależności od rodzaju promieniowania oraz jego energii mogą zachodzić procesy jonizacji, wzbudzenia lub rozpraszania. Cząstki naładowane oddziałują bezpośrednio z elektronami atomowymi, powodując liczne akty jonizacji wzdłuż swojego toru. Promieniowanie gamma oddziałuje pośrednio, przekazując energię elektronom w procesach fotoelektrycznych, rozpraszania Comptona lub kreacji par. To właśnie elektrony wtórne odpowiadają za dalszą jonizację materiału.

Stopień przekazywania energii przez promieniowanie opisuje liniowy przekaz energii (LET, Linear Energy Transfer). Wielkość ta określa ilość energii przekazywanej ośrodkowi na jednostkę długości toru cząstki. Promieniowanie o wysokim LET powoduje dużą liczbę jonizacji na krótkim odcinku toru, natomiast promieniowanie o niskim LET przekazuje energię bardziej równomiernie na większej odległości.

Tabela 1: Porównanie wybranych rodzajów promieniowania jonizującego.

Rodzaj promieniowania	LET	Przenikliwość
Cząstki α	bardzo wysoki	bardzo mała
Elektrony i pozytrony (β)	niski–średni	średnia
Promieniowanie rentgenowskie (X)	niski	duża
Promieniowanie γ	niski	bardzo duża

Znajomość mechanizmów oddziaływania promieniowania z materią jest podstawą zrozumienia zasady działania detektorów promieniowania.

2 Fluencja

Fluencja (Φ) jest wielkością określającą liczbę cząstek przechodzących przez jednostkę powierzchni. Wyraża się ją zależnością:

$$\Phi = \frac{N}{A} \quad (1)$$

gdzie:

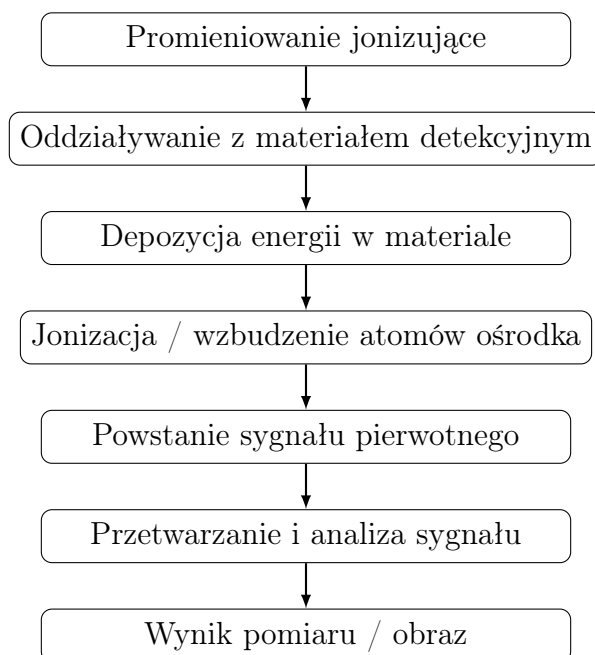
- Φ – fluencja cząstek [cząstki/mm²],
- N – liczba zarejestrowanych cząstek,
- A – powierzchnia czynna detektora [mm²].

W niniejszym ćwiczeniu do obliczeń należy wykorzystać powierzchnię czynną detektora MiniPIX EDU.

3 Detekcja promieniowania jonizującego

Detekcja promieniowania jonizującego polega na wykryciu i zarejestrowaniu skutków oddziaływania promieniowania z materiałem detekcyjnym. Promieniowanie samo w sobie jest niewidoczne, dlatego jego obecność może zostać stwierdzona jedynie pośrednio – poprzez obserwację zmian wywołanych w materiale detektora.

W wyniku oddziaływania promieniowania z materiałem detekcyjnym dochodzi do przekazania energii, której skutkiem jest jonizacja lub wzbudzenie atomów. Powstałe w ten sposób zjawiska fizyczne stanowią podstawę generacji sygnału pierwotnego, który następnie jest przetwarzany przez układy elektroniczne detektora na sygnał umożliwiający wykonanie pomiaru.



Rysunek 2: Ogólny schemat procesu detekcji promieniowania jonizującego.

W zależności od materiału detekcyjnego oraz wykorzystywanego mechanizmu powstawania sygnału wyróżnia się trzy podstawowe grupy detektorów promieniowania jonizującego:

- detektory gazowe,
- detektory scyntylacyjne,
- detektory półprzewodnikowe.

Detektory gazowe wykorzystują jonizację gazu prowadzącą do powstawania par jonowych. W detektorach scyntylacyjnych sygnał powstaje w wyniku emisji światła podczas deekscytacji wzbudzonych atomów lub cząsteczek materiału scyntylacyjnego. Natomiast w detektorach półprzewodnikowych sygnał jest efektem tworzenia par elektron–dziura w materiale półprzewodnikowym.

Detektory promieniowania umożliwiają określenie wielu parametrów promieniowania, takich jak liczba zarejestrowanych cząstek lub fotonów, energia promieniowania, czas rejestracji czy rozkład przestrzenny miejsc oddziaływania. Zakres dostępnych informacji zależy od konstrukcji detektora oraz zastosowanej metody pomiarowej.

W niniejszym ćwiczeniu wykorzystano pikselowy detektor półprzewodnikowy Timepix, umożliwiający rejestrację promieniowania jonizującego z wysoką rozdzielczością przestrzenną. Zastosowanie matrycy niezależnych pikseli pozwala na jednoczesny pomiar liczby zdarzeń, ich rozmieszczenia oraz, w zależności od wybranego trybu pracy, informacji związanych z energią lub czasem rejestracji

4 Krzemowe detektory półprzewodnikowe

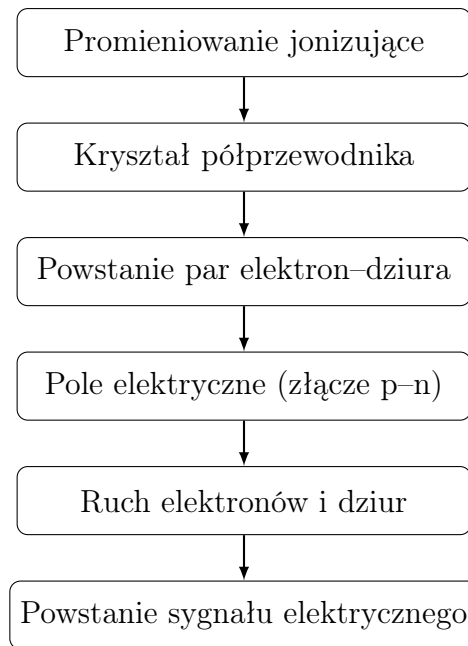
Detektory półprzewodnikowe należą do najczęściej stosowanych detektorów promieniowania jonizującego. W fizyce medycznej oraz dozymetrii szerokie zastosowanie znalazły przede wszystkim detektory wykonane z krzemu, który charakteryzuje się dobrymi właściwościami elektrycznymi, wysoką czystością oraz możliwością wytwarzania precyzyjnych struktur mikroelektronicznych.

Krzemowy detektor promieniowania jest w istocie specjalnie zaprojektowaną diodą półprzewodnikową wykorzystującą złącze p–n i pracującą przy polaryzacji zaporowej. Taka konfiguracja umożliwia skuteczną rejestrację sygnałów powstających podczas oddziaływania promieniowania jonizującego z materiałem detekcyjnym.

W półprzewodniku elektrony związane z atomami mogą, po otrzymaniu odpowiedniej energii, przejść z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa, pozostawiając po sobie tzw. dziurę. Powstała para elektron–dziura stanowi podstawowy efekt oddziaływania promieniowania jonizującego z materiałem półprzewodnikowym i jest nośnikiem informacji o energii zdeponowanej w detektorze.

Liczba wytworzonych par elektron–dziura jest w przybliżeniu proporcjonalna do energii przekazanej materiałowi detekcyjnemu przez promieniowanie. Dzięki temu sygnał generowany w detektorze może dostarczać informacji nie tylko o obecności promieniowania, ale również o energii zdeponowanej w materiale.

Aby możliwe było zarejestrowanie powstałych nośników ładunku, w detektorze wytwarzane jest pole elektryczne. Powoduje ono ruch elektronów i dziur w przeciwnych



Rysunek 3: Powstawanie sygnału w detektorze półprzewodnikowym.

kierunkach, co prowadzi do powstania sygnału elektrycznego przekazywanego do układów odczytowych.

W praktyce detektory krzemowe wykorzystują złącze p–n spolaryzowane w kierunku zaporowym. Powstający wówczas obszar zubożony (warstwa zaporowa) jest niemal pozbawiony swobodnych nośników ładunku. Pary elektron–dziura wytworzone przez promieniowanie są w nim skutecznie rozdzielane przez pole elektryczne i zbierane przez elektrody, co prowadzi do powstania sygnału elektrycznego. Rozwiązanie to zapewnia wysoką czułość detektora oraz dobrą rozdzielczość energetyczną.

5 Detektory krzemowe typu Timepix

Detektory Timepix są pikselowymi detektorami promieniowania jonizującego opracowanymi w ramach projektu Medipix prowadzonego przez CERN. Stanowią rozwinięcie klasycznych krzemowych detektorów półprzewodnikowych i umożliwiają jednoczesną rejestrację promieniowania w dużej liczbie niezależnych pikseli detekcyjnych.

Klasyczny krzemowy detektor półprzewodnikowy rejestruje sygnał powstający w objętości detektora, jednak nie pozwala określić dokładnego miejsca oddziaływania promieniowania. Rozwiązaniem tego problemu było podzielenie powierzchni detektora na dużą liczbę niewielkich, niezależnych elementów detekcyjnych – pikseli. W detektorach Timepix tę samą zasadę działania zastosowano w matrycy składającej się z 256×256 pikseli, co odpowiada 65 536 niezależnym elementom detekcyjnym. Każdy piksel ma wymiary $55 \times 55 \mu\text{m}$ i działa niezależnie od pozostałych.

Detektor tego typu składa się z dwóch podstawowych elementów: krzemowego sensora, w którym zachodzi oddziaływanie promieniowania z materią i powstają pary elektron–dziura, oraz układu odczytowego ASIC (Application-Specific Integrated Circuit), odpowiedzialnego za przetwarzanie sygnałów z poszczególnych pikseli. Każdy piksel sensora jest połączony z odpowiadającym mu kanałem układu ASIC za pomocą połączeń typu bump bonding, co umożliwia niezależny odczyt sygnału z każdego piksela.

Dzięki niezależnej pracy wszystkich pikseli detektor Timepix umożliwia jednoczesną rejestrację wielu oddziaływań promieniowania oraz wyznaczenie miejsca ich wystąpienia. W zależności od wybranego trybu pracy możliwe jest również uzyskanie informacji związanych z energią lub czasem rejestracji zdarzenia.

W ćwiczeniu laboratoryjnym wykorzystano urządzenie MiniPIX EDU, będące kompaktowym systemem pomiarowym wyposażonym w detektor pikselowy typu Timepix. Niewielkie wymiary urządzenia oraz możliwość współpracy z komputerem przez interfejs USB sprawiają, że może ono być wykorzystywane zarówno w dydaktyce, jak i w prostych zastosowaniach badawczych. Urządzenie współpracuje z oprogramowaniem PIXet Pro, które umożliwia konfigurację parametrów pomiaru, rejestrację danych oraz ich wizualizację.



Rysunek 4: Detektor pikselowy typu Timepix, zintegrowany z urządzeniem MiniPIX EDU.

Tabela 2: Parametry detektora MiniPix Edu.

Parametr	Wartość
Typ detektora	Timepix
Materiał sensora	Krzem (Si)
Matryca pikseli	256×256
Rozmiar piksela	$55 \times 55 \mu\text{m}$
Powierzchnia czynna	$14,08 \times 14,08 \text{ mm}^2$
INterface	USB

5.1 Tryby pracy detektora Timepix

Elektronika odczytowa detektora Timepix umożliwia pracę w kilku trybach pomiarowych. Różnią się one rodzajem informacji rejestrowanej przez każdy piksel, dzięki czemu detektor może dostarczać informacji o liczbie zarejestrowanych zdarzeń, energii zdeponowanej w materiale detekcyjnym lub czasie ich wystąpienia.

Najczęściej wykorzystywane tryby pracy obejmują:

- **Counting** – rejestrację liczby zdarzeń zarejestrowanych przez każdy piksel w czasie ekspozycji,

- **Time over Threshold (ToT)** – pomiar czasu, przez jaki sygnał pozostaje powyżej ustalonego progu dyskryminacji. Wartość ta jest proporcjonalna do energii zdeponowanej w detektorze,
- **Time of Arrival (ToA)** – pomiar czasu od momentu zarejestrowania sygnału do zakończenia ekspozycji, wykorzystywany w analizie czasowej zdarzeń.

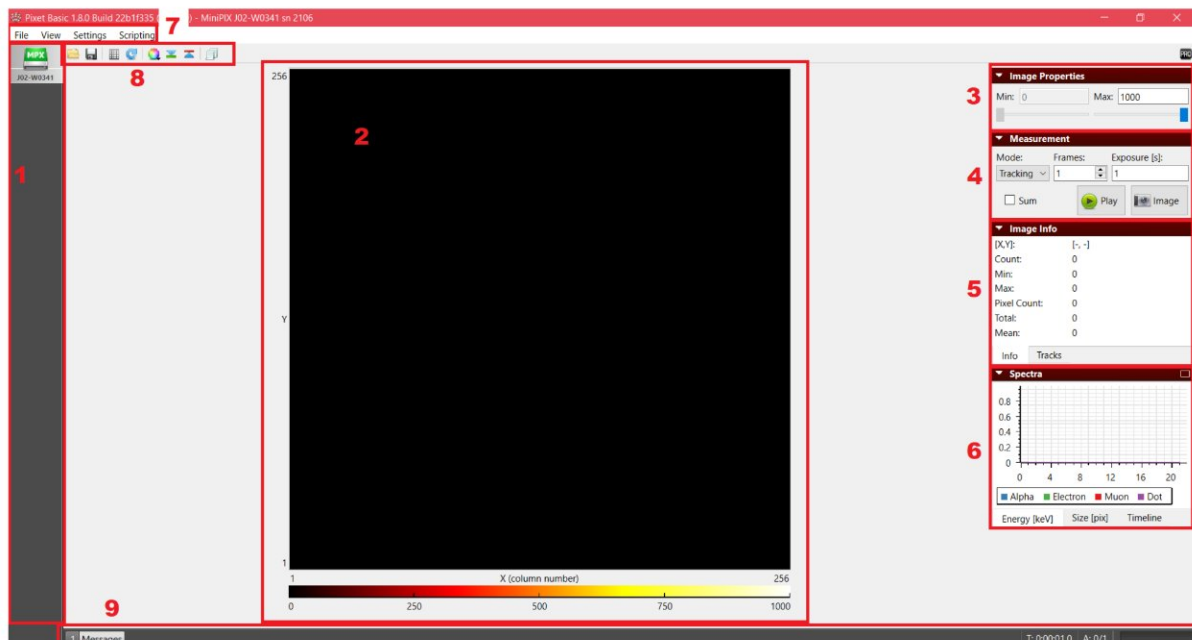
W niniejszym ćwiczeniu wykorzystywany jest tryb **Tracking**, umożliwiający rejestrację obrazów przedstawiających ślady pozostawione przez cząstki promieniowania w macierzy detektora. Uzyskane obrazy stanowią podstawę dalszej analizy z wykorzystaniem programu ImageJ.

6 Oprogramowanie PIXet Pro

Detektor Timepix współpracuje z oprogramowaniem PIXet Pro, które służy do konfiguracji parametrów pomiaru, sterowania pracą detektora oraz rejestracji i wizualizacji danych pomiarowych. Program umożliwia wybór trybu pracy detektora, ustawienie czasu ekspozycji oraz prezentację zarejestrowanych danych w postaci obrazów lub map wartości przypisanych poszczególnym pikselom.

W niniejszym ćwiczeniu program PIXet Pro wykorzystywany jest do rejestracji obrazów promieniowania w trybie Tracking. Uzyskane obrazy zapisywane są w postaci plików graficznych, które następnie poddawane są analizie z wykorzystaniem programu ImageJ.

Szczegółowy sposób konfiguracji programu oraz wykonywania pomiarów przedstawiono w instrukcji do ćwiczenia.



Rysunek 5: Interface PIXet Pro.

Literatura

- [1] Knoll G. F., *Radiation Detection and Measurement*, 4th ed., John Wiley & Sons, 2010.
- [2] Leo W. R., *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer, 1994.
- [3] Ballabriga R., Campbell M., Llopart X., Thustos L., Wong W., *The Medipix3RX: a high resolution, zero dead-time pixel detector readout chip allowing spectroscopic imaging*, Journal of Instrumentation, 2013.
- [4] CERN Medipix Collaboration.
<https://medipix.web.cern.ch>
- [5] ADVACAM, *MiniPIX EDU User Guide*.
<https://www.advacam.com>
- [6] PIXet Pro Software User Manual.