

Praca Zaliczeniowa

z przedmiotu

Metody i technologie jądrowe

Na temat:

Detektory promieniowania jonizującego
Ich typy i zasada działania

Student:
Jacek Sputowski

1. KOMORY JONIZACYJNE.....	3
2. LICZNIKI PROPORCJONALNE.....	7
3. LICZNIKI GEIGERA-MÜLLERA.....	13
4. LICZNIKI SCYNTYLACYJNE I LUMINESCENCYJNE	19
5. DETEKTORY PÓŁPRZEWODNIKOWE	22
6. Bibliografia:	27

1. KOMORY JONIZACYJNE

Promieniowanie jonizujące przechodząc przez ośrodek materialny traci swą energię na jonizację lub wzbudzenie atomów tego ośrodka. Zjawisko jonizacji jest tym procesem, który pozwala na wykrywanie promieniowania jonizującego. Wielkością określającą energetyczną stronę procesu jonizacji jest praca jonizacji, czyli średnia praca, jaka jest potrzebna do wytworzenia jednej pary jonów. Praca jonizacji zależy od rodzaju ośrodka, natomiast dla danego ośrodka — od rodzaju i energii promieniowania jonizującego. Dla promieniowania β o energii od 10 do 100 keV praca jonizacji w powietrzu w przybliżeniu jest stała i wynosi około 33 eV. Inną wielkością charakteryzującą zjawisko jonizacji jest jonizacja właściwa. Jonizacją właściwą nazywa się liczbę par jonów utworzoną na jednostce drogi. Jonizacja właściwa, podobnie jak praca jonizacji, zależy od rodzaju ośrodka, a dla danego ośrodka — od rodzaju i energii promieniowania jonizującego. Poniżej podano przykładowo liczbę par jonów wytwarzanych na drodze 1 cm (jonizację właściwą) przez różne rodzaje promieniowania o tej samej energii 2 MeV:

cząstka α	60 000
cząstka β	600
kwant γ	6

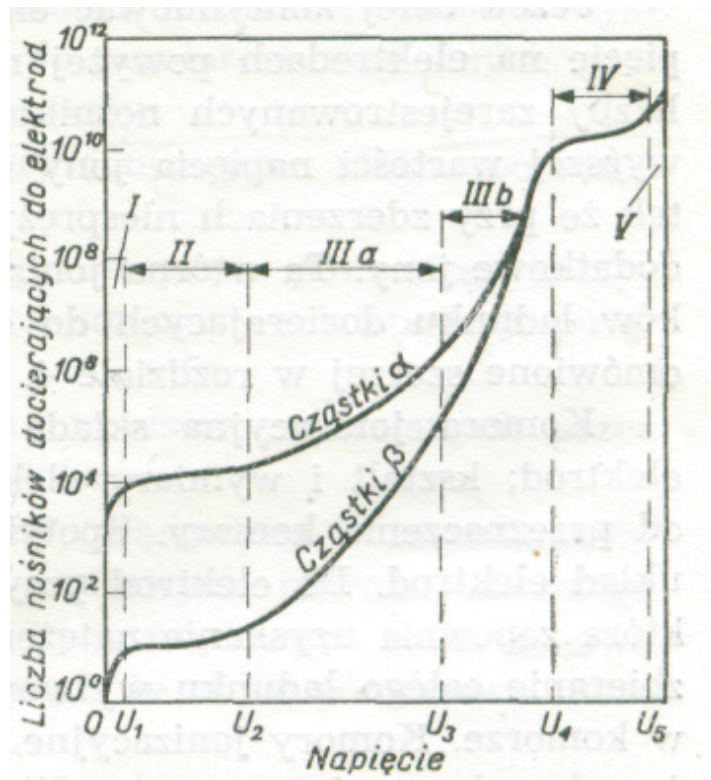
Cząstki α , lekkie jądra albo fragmenty rozszczepienia mają dużą wartość jonizacji właściwej ze względu na dużą masę i ładunek.

Pomiaru jonizacji gazu przez promieniowanie jonizujące dokonuje się za pomocą specjalnych układów pomiarowych, których główną częścią składową jest komora jonizacyjna.

Zadaniem komory jonizacyjnej jest zebranie jonów wytworzonych w ośrodku gazowym przy przejściu przez niego promieniowania jonizującego. Komora jonizacyjna składa się z dwóch elektrod metalowych umieszczonych w zamkniętej przestrzeni na bardzo dobrych izolatorach. Do elektrod przyłącza się źródło napięcia, które ma za zadanie wytworzenie pola elektrycznego między elektrodami. Pod wpływem tego pola jony wytworzone w gazie przez promieniowanie jonizujące w przestrzeni między elektrodami (jest to tzw. Objętość czynna) poruszają się w odpowiednim kierunku. Oprócz układu komora-źródło napięcia potrzebny jest jeszcze układ, który mierzy liczbę nośników ładunku docierających do

elektrod. Liczba ta mówi o intensywności promieniowania jonizującego padającego na komorę jonizacyjną.

Niech natężenie promieniowania jonizującego będzie stałe w czasie. Jeżeli zmieniać napięcie przyłożone do elektrod komory od zera wzwyż, a jednocześnie mierzyć liczbę nośników ładunku docierających do elektrod, to mimo stałej wartości natężenia promieniowania jonizującego liczba zebranych nośników będzie wzrastać. Jest tak dlatego, że w zakresie małych wartości napięcia, powstałe na skutek działania promieniowania jonizującego elektrony i jony dodatnie będą poruszać się powoli do odpowiednich elektrod ulegając po drodze rekombinacji (czyli zubożeniu przy spotykaniu nośników ładunku o przeciwnym znaku). W wyniku tego zjawiska do elektrod będzie docierał ładunek mniejszy niż ten, który został wytworzony przez promieniowanie pierwotne. Liczba jonów docierających do elektrod będzie wzrastała w miarę zwiększania napięcia, ponieważ większe natężenie pola nada jonom większą prędkość, wskutek czego zmaleje prawdopodobieństwo ich rekombinacji.



Rysunek 1-1 Liczba jonów lub elektronów docierających do odpowiedniej elektrody licznika w zależności od wartości przyłożonego napięcia:

I — zakres rekombinacji lub zakres prawa Ohma; II — zakres nasycenia lub zakres komory jonizacyjnej; IIIa — zakres proporcjonalności lub zakres licznika proporcjonalnego; IIIb — zakres ograniczonej proporcjonalności; IV — zakres Geigera lub zakres licznika Geigera-Müllera; V — zakres przebicia

Przy pewnej wartości napięcia U_1 wszystkie pierwotnie powstałe jony zdążą dotrzeć do elektrod, zanim ulegną rekombinacji. Zakres napięć od 0 do U_1 nosi nazwę zakresu rekombinacji (zakres I na rys. 1.1). Zakres ten nosi również nazwę zakresu prawa Ohma, gdyż, jak widać, natężenie prądu komory jonizacyjnej mierzone w tym zakresie jest proporcjonalne do napięcia na elektrodach. Jeżeli dalej zwiększać napięcie (aż do pewnej wartości U_2), to liczba elektronów i jonów docierających do elektrod nie będzie ulegała zmianie. Ten zakres napięć (zakres II na rys. 1.1) nosi nazwę zakresu nasycenia albo też zakresu komory jonizacyjnej. Jak wykazuje analiza matematyczna, natężenie prądu I_{nas} w tym zakresie napięć określone jest wzorem

$$I_{nas} = eVN$$

gdzie: e - ładunek elementarny;

V - objętość czynna;

N - liczba par jonów wytworzonych przez promieniowanie jonizujące w 1 cm^3 w ciągu 1 s.

Komory jonizacyjne pracują zwykle w zakresie napięć odpowiadających zakresowi nasycenia, gdyż dla danej objętości czynnej V natężenie prądu nasycenia I_{nas} zależy tylko od liczby par jonów N wytworzonych przez czynnik

Komora jonizacyjna składa się na ogół z obudowy oraz dwóch elektrod; kształt i wymiary elektrod mogą być rozmaite w zależności od przeznaczenia komory. Spotyka się płaski, cylindryczny lub kulisty układ elektrod. Do elektrod przyłożone jest napięcie o takiej wartości, która zapewnia uzyskanie natężenia pola elektrycznego umożliwiającego zbieranie całego ładunku wytworzonego na skutek pierwotnej jonizacji w komorze. Komory jonizacyjne pracują w zakresie napięć, odpowiadających zakresowi nasycenia. Nierzadko jedna z elektrod jest uziemiona, a druga jest elektrodą zbiorczą i w związku z tym umocowana jest w izolatorze wykonanym z materiału charakteryzującego się dużą opornością właściwą (bursztynu, teflonu itp.). W niektórych rozwiązaniach komora wyposażona jest w pierścień osłonny dla eliminacji przepływu prądów skośnych, które mogłyby fałszować wynik pomiaru.

Pod względem konstrukcji komory jonizacyjne można podzielić na następujące grupy:

- Komory, w których rejestrowane są cząstki powstające w objętości czynnej komory, czyli w objętości gazu, która objęta jest bezpośrednim działaniem pola elektrycznego wytworzonego między elektrodami. Komory tej grupy są wykorzystywane głównie do pomiaru jonizacji wywołanej przez cząstki α , jak również w niektórych przypadkach - przez neutrony.
- Komory, w których rejestrowane są nie tylko cząstki powstające w objętości czynnej, lecz także cząstki docierające do tej objętości z warstwy gazu ją otaczającego, przy czym grubość tej warstwy jest równa co najmniej zasięgowi cząstek. Komory te są zwane komorami o swobodnym gazie i są stosowane do bezwzględnych pomiarów dawki w rentgenach (komory normalne).
- Komory, w których rejestrowane są nie tylko cząstki powstające w objętości czynnej, lecz także cząstki docierające do tej objętości z otaczających ją ścianek, wskutek czego znaczna część całkowitego prądu jonizacyjnego jest wytworzona przez cząstki wybite ze ścianek komory przez padające promieniowanie. Komory te są zwane komorami kondensatorowymi lub komorami naporstkowymi (niezależnie od tego, czy są one podobne do naporstka, czy nie); stosuje się je (po odpowiednim przeskalowaniu zgodnie z wynikami pomiaru uzyskanymi za pomocą komór normalnych) do pomiarów względnych promieniowania β , X, γ oraz strumieni neutronów.

W zależności od zastosowania komory jonizacyjne można podzielić na następujące dwie grupy:

- komory do pomiaru całego ładunku lub prądu powstałego w wyniku procesów zachodzących w objętości komory - **komory prądowe**
- komory do pomiaru oddzielnych impulsów, wywołanych przez poszczególne cząstki - **komory impulsowe**

Pomiar natężenia prądu stosuje się w przypadku pomiaru aktywności lub mocy dawki.

Komory impulsowe można podzielić na:

- komory szybkie, w których występuje zbieranie ładunku niesionego przez elektrony i
- komory powolne, w których występuje zbieranie ładunku niesionego zarówno przez dodatnie, jak i ujemne jony.

Przydatność poszczególnych typów komór jonizacyjnych do pomiaru danego rodzaju promieniowania*

Rodzaj promieniowania	Komory prądowe		Komory impulsowe	
	pomiar natężenia prądu	pomiar ładunku	pomiar częstości impulsów	spektrometria
α (p, d)	+	+	+	+
β	+	+		
γ	+	+		
n termiczne	+	+	+	
n prędkie	+	+	+	+
n termiczne w silnym polu prom. γ	+			
n prędkie w silnym polu prom. γ	+			

* Przydatność danego typu komory do określonego pomiaru oznaczono znakiem + w odpowiedniej rubryce

Rysunek 1-2 – Przydatność poszczególnych typów komór jonizacyjnych do pomiaru danego rodzaju promieniowania

Komory jonizacyjne poszczególnych rodzajów nie są na ogół detektorami uniwersalnymi, tj. nie nadają się do pomiarów wszystkich rodzajów promieniowania jonizującego.

Przydatność poszczególnych typów komór do pomiarów danego rodzaju promieniowania jest widoczna na rys 1.2.

2. LICZNIKI PROPORCJONALNE

Licznik proporcjonalny, podobnie jak komora jonizacyjna, składa się z dwu elektrod, które najczęściej tworzą układ cylindryczny. Wzdłuż osi cylindra, który stanowi katodę licznika, biegnie cieniutki drut, będący anodą. W celu omówienia zasady działania licznika proporcjonalnego trzeba odwołać się do rys. 1.1.

Jak wspomniano w rozdziale 1, przy wzroście napięcia na elektrodach powyżej wartości U_2 występuje wzrost liczby nośników ładunku docierających do elektrod. Jest tak dlatego, że powstałe w wyniku działania promieniowania jonizującego jony i elektrony w polu elektrycznym o większej wartości nabierają większej energii tak, że przy niesprężystych zderzeniach z cząsteczkami gazu wytwarzają dodatkowe jony dodatnie i

elektrony. Należy tu od razu zaznaczyć, że w zakresie napięć bliskich wartości U_2 natężenie pola ma taką wartość, że można pominąć jonizację wtórną wywołaną przez jony dodatnie i uwzględniać tylko jonizację przez elektrony, gdyż jony ze względu na swą masę będą miały znacznie mniejszą prędkość. Ta jonizacja wtórna prowadzi do wzrostu liczby ładunków docierających do elektrod w porównaniu z liczbą pierwotnie wytworzonych ładunków. Miarą jonizacji wtórnej jest współczynnik wzmocnienia gazowego A , określany jako stosunek zebranego na elektrodach ładunku do ładunku powstałego w wyniku działania promieniowania jonizującego. Zakres napięć od U_2 do U_3 , w którym występuje zjawisko jonizacji wtórnej, nosi nazwę zakresu proporcjonalności lub zakresu licznika proporcjonalnego (zakres III - rys. 1.1), ponieważ powstające na elektrodzie impulsy mają amplitudę proporcjonalną do energii promieniowania pierwotnego.

Dla napięć większych od U_3 występują pewne zjawiska uboczne, które zakłócają proporcjonalność między amplitudą impulsu a energią promieniowania pierwotnego. Powyżej napięcia U_3 zaczyna się więc tzw. zakres ograniczonej proporcjonalności (zakres IIIb - rys. 1.1). Zakres ten kończy się dla wartości napięcia U_4 , przy której zjawisko jonizacji wtórnej przybiera takie rozmiary, że niezależnie od tego, w którym miejscu licznika powstała jonizacja pierwotna, w całej objętości licznika następuje wyładowanie.

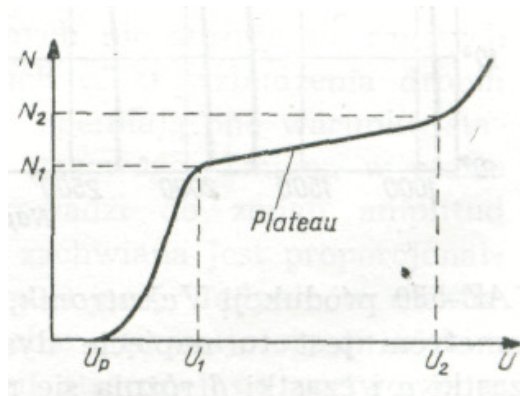
Ten zakres napięć od U_4 do U_5 , w którym ładunek wytworzony w wyniku jonizacji wtórnej, w wyniku wyładowania, nie zależy od wielkości jonizacji początkowej, nosi nazwę zakresu $G e i g e r a$ albo zakresu licznika Geigera-Müllera (zakres IV - rys. 1.1).

W zakresie proporcjonalności dużą rolę odgrywa zjawisko jonizacji wtórnej ze względu na większe natężenie pola elektrycznego panujące w objętości czynnej licznika. Prawdopodobieństwo wystąpienia zjawiska jonizacji wtórnej jest tym większe, im większa jest energia uderzającego elektronu, a więc im większe natężenie pola, większe napięcie przyłożone do elektrod. W cylindrycznym układzie elektrod największe natężenie pola jest przy powierzchni drucika (anody licznika), stąd też tu najszybciej będzie występowała jonizacja wtórna. Obszar, w jakim może ona zachodzić, będzie powiększał się w stronę katody w miarę dalszego podwyższania napięcia na elektrodach. Wskutek wzrostu obszaru, w którym może występować zjawisko jonizacji wtórnej, nastąpi dalsza jonizacja przez wtórne elektrony, co doprowadzi do dalszego wzrostu ładunku. Opisane powyżej zjawisko nosi nazwę jonizacji lawinowej. Jonizacja lawinowa zachodzi w kierunku linii sił pola, czyli w kierunku prostopadłym do anody, i wobec tego ma ona miejsce w tym

obszarze licznika, w którym wystąpiła jonizacja pierwotna. Powstałe wyładowanie jest miejscowe i ograniczone tylko do części anody.

Należy zaznaczyć, że tworzeniu elektronów wtórnych towarzyszy emisja fotonów światła, gdyż w wyniku zderzenia elektronów z cząsteczkami gazu mogą występować stany wzbudzenia, prowadzące do wysyłania promieniowania świetlnego. Często jest to promieniowanie ultrafioletowe, a więc wysokoenergetyczne, które w wyniku fotoefektu może wyzwalać nowe elektrony.

Charakterystyka częstości impulsów w funkcji napięcia przyłożonego do elektrod licznika przedstawiona jest na rys. 2.1.



Rysunek 2-1 - Zależność częstości zliczeń od napięcia przyłożonego do licznika proporcjonalnego

Część płaska tej charakterystyki, zawierająca się w zakresie napięć, dla którego częstość impulsów jest prawie stała, nosi nazwę **plateau**.

W oparciu o rys. 2.1 można zdefiniować trzy wielkości, charakteryzujące dany licznik:

- napięcie progowe
- długość plateau
- nachylenie plateau

Napięcie progowe określa się teoretycznie jako napięcie, przy którym współczynnik wzmocnienia gazowego jest większy od 1. W praktyce napięcie progowe określa się częściej jako minimalne napięcie na liczniku, przy którym układ liczący współpracujący z licznikiem zaczyna już liczyć impulsy. Tak określone napięcie progowe jest oczywiście zależne od czułości układu liczącego (progu dyskryminacji).

Długość plateau określa zakres napięć, w którym charakterystyka zliczeń w funkcji napięcia jest mniej więcej równoległa do osi napięć. Punkt pracy licznika ustala się zwykle w części środkowej plateau, a więc im jest ono dłuższe, tym dany licznik jest wygodniejszy w zastosowaniach praktycznych.

Pracę licznika proporcjonalnego charakteryzuje, jak to wyżej omówiono, wartość współczynnika wzmocnienia gazowego. Jak wykazały pomiary, współczynnik wzmocnienia gazowego dla danego gazu jest funkcją napięcia przyłożonego do elektrod licznika oraz ciśnienia gazu; od ciśnienia zależy bowiem droga swobodna elektronu

W zasadzie w licznikach proporcjonalnych nie stosuje się czystych gazów szlachetnych, gdyż występuje w nich efekt wzbudzenia drobin do stanu metastabilnego, wskutek czego nie spełniają one warunku stałości w czasie współczynnika wzmocnienia gazowego. Zmiana w czasie współczynnika wzmocnienia gazowego prowadzi do zmian amplitud impulsów wyjściowych z licznika, przez co zachwiana jest proporcjonalność między impulsem a energią cząstki jonizującej. Jedynie w niektórych przypadkach stosuje się argon, gdyż charakteryzuje się on niskim napięciem pracy oraz niezależnością energii straconej na wytworzenie jednej pary jonów od energii cząstki jonizującej, dzięki czemu jonizacja w argonie jest proporcjonalna do energii straconej przez cząstkę jonizującą.

Jednym z typowych gazów stosowanych w licznikach proporcjonalnych jest metan. Warto zwrócić uwagę na fakt, że liczniki proporcjonalne mają bardzo krótki czas rozdzielczy, rzędu 0,1 do 1,0 μ s, gdyż w takich właśnie granicach waha się czas zbierania elektronów zależnie od rozkładu jonizacji pierwotnej, rodzaju gazu i ciśnienia.

Z tego też względu analiza kształtu impulsu jest utrudniona i może być przeprowadzona jedynie w sposób szacunkowy.

Jeśli chodzi o konstrukcję liczników proporcjonalnych, to mają one kształt najczęściej cylindryczny z koncentrycznym układem elektrod. Anoda jest zazwyczaj wykonana z cienkiego drutu o średnicy 15 do 200 μ co umożliwia uzyskanie dużego natężenia pola, a co za tym idzie - dużej wartości współczynnika wzmocnienia gazowego przy możliwie małych wartościach napięcia na anodzie licznika. Długość liczników proporcjonalnych cylindrycznych waha się od 1 do 100 cm, a średnica od 1 do 100 mm. W niektórych rozwiązaniach katoda występuje w postaci półkuli, kuli lub cylindra, natomiast anodę stanowi pętla z cienkiego drutu o średnicy od 15 do 30 μ , przy czym pętla jest zawieszona albo na jednym, albo na dwóch izolatorach. Jak wykazało doświadczenie, najbardziej stabilną pracę licznika uzyskuje się przy obwodzie pętli 20 do 28 mm.

Ciśnienie gazu wypełniającego licznik proporcjonalny zawiera się w zakresie od ok. 10 mm Hg do ok. 2 at. Wartość współczynnika wzmocnienia gazowego wynosi najczęściej 10^2 - 10^5 .

Ze względu na proporcjonalność amplitudy impulsu do energii cząstki wywołującej jonizację pierwotną liczniki proporcjonalne stosowane są zarówno do zliczenia liczby cząstek lub kwantów promieniowania jonizującego, jak i do określenia ich energii. Znajdują więc one zastosowanie do pomiarów promieniowania α , β , γ , X oraz do pomiarów neutronów termicznych i neutronów prędkich. Pod względem konstrukcyjnym liczniki proporcjonalne można podzielić na **liczniki przepływowe**, **liczniki zamknięte** oraz **liczniki, w których mierzony preparat występuje w formie gazowej i stanowi napełnienie licznika**.

Klasyfikacja liczników proporcjonalnych według spełnianego przez nie zadania		
Przeznaczenie lub właściwość	Rodzaj rozwiązania konstrukcyjnego	Charakterystyczne parametry
Pomiar promieniowania alfa lub beta	wewnętrzne napełnienie	całkowita objętość gazowa średnica anody średnica katody stosunek objętości czynnej licznika do całkowitej objętości gazowej
Pomiar promieniowania alfa lub beta	powietrzne płaskie przepływowe przepływowe o geometrii 2π lub 4π okienkowe	grubość okienka powierzchnia okienka równa powierzchni czynnej bieg własny czas martwy
Pomiar promieniowania X lub gamma	cylindryczne: z okienkiem czołowym z okienkiem bocznym z dwoma okienkami bocznymi bezokienkowe (otwarte): przepływowe	dolna granica zakresu energetycznego mierzonego promieniowania górną granicą zakresu energetycznego mierzonego promieniowania energetyczna zdolność rozdzielcza dla określonej wartości energii promieniowania powierzchnia okienka równa powierzchni czynnej grubość okienka
Pomiar prędkich neutronów	z rejestracją protonów odrzutu z radiatorem gazowym z rejestracją protonów odrzutu z radiatorem stałym z rejestracją protonów odrzutu z radiatorem stałym i gazowym z reakcją (n, p) rozszczeniowe	wydajność dla neutronów prędkich wyrażona w imp/s na neutron/ $/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ maksymalne dopuszczalne tło promieniowania gamma maksymalna temperatura pracy średnica katody długość czynna
Pomiar neutronów termicznych	z reakcją (n, α) z reakcją (n, p) z reakcją (n, γ) rozszczeniowe	wydajność dla neutronów termicznych wyrażona w imp/s na neutron/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ maksymalne dopuszczalne tło promieniowania gamma dolna granica zakresu mierzonego promieniowania wyrażona w neutron/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ górną granicą zakresu mierzonego promieniowania wyrażona w neutron/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ maksymalna temperatura pracy

Rysunek 2-2 – Klasyfikacja liczników proporcjonalnych według spełnianego przez nie zadania

Na rysunku 2.2 podano zastosowanie poszczególnych konstrukcji liczników proporcjonalnych do pomiarów różnych rodzajów promieniowania.

3. LICZNIKI GEIGERA-MÜLLERA

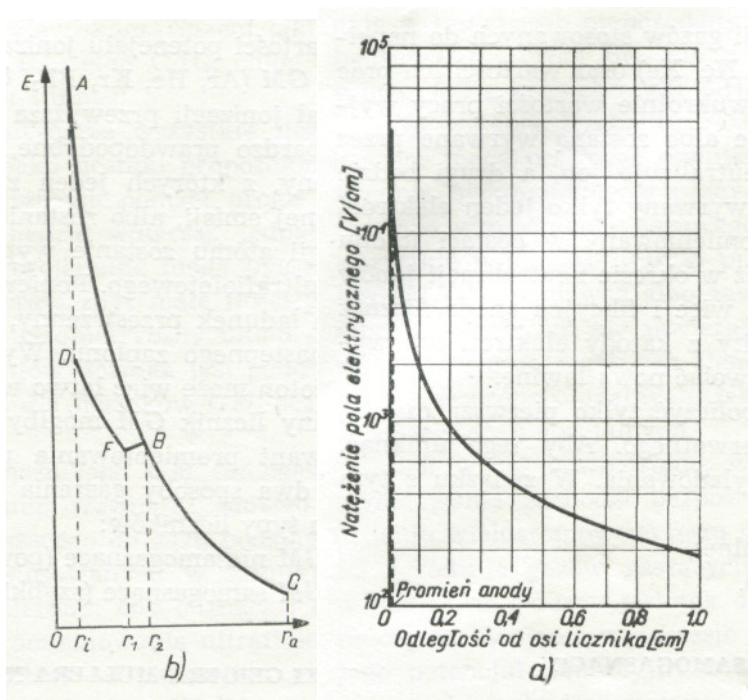
W licznikach Geigera-Müllera (licznikach GM) do detekcji promieniowania jonizującego, podobnie jak w licznikach proporcjonalnych, wykorzystuje się zjawisko jonizacji wtórnej. Jak widać z rys. 1.1, po przekroczeniu napięcia U_4 liczba zebranych ładunków wraz ze wzrostem napięcia nieco wzrasta, ale już nie tak szybko, jak w zakresie proporcjonalności, a poza tym nie zależy ona od rodzaju promieniowania padającego na licznik.

Po przyłożeniu napięcia do elektrod w układzie cylindrycznym w przestrzeni między nimi powstaje pole elektryczne o rozkładzie pokazanym na rys. 1.1. Promieniowanie przechodząc przez objętość czynną gazu powoduje jego jonizację. Elektron uwolniony wskutek jonizacji atomu lub cząsteczki gazu porusza się pod wpływem pola elektrostatycznego ruchem przyspieszonym w kierunku anody. Prędkość elektronu rośnie, osiągając wartości pozwalające na wzbudzenie lub zjonizowanie innych atomów lub cząsteczek gazu. W wyniku tej jonizacji wtórnej powstają dalsze elektrony przyspieszane w analogiczny sposób. Przy dostatecznie dużych wartościach natężenia pola elektrostatycznego elektrony wtórne przed dotarciem do anody osiągają prędkości, pozwalające na dalszą jonizację; w ten sposób jeden elektron powoduje powstanie całej lawiny elektronów i jonów, która rozchodzi się wzdłuż drutu anody. Właśnie takie lawiny powodują powstawanie impulsów w zakresie napięć, odpowiadającym zakresowi Geigera-Müllera.



Rysunek 3-1 - Współczesny licznik Geigera-Müllera.

Podczas powrotu atomów lub cząsteczek ze stanu wzbudzonego do stanu podstawowego powstają fotony o różnych energiach. Fotony mogą powstać także podczas neutralizacji jonów. Ponieważ długości fal tych fotonów znajdują się w dalekim ultrafiolecie i są krótsze od długości granicznych dla zjawiska fotoelektrycznego gazu napełniającego licznik, wywołują one dalszą jonizację w odległości 0,3 do 1 mm od anody. Fotony te mają podstawowe znaczenie dla rozchodzenia się lawiny wewnątrz objętości czynnej licznika.



Rysunek 3-2 Rozkład natężenia pola elektrycznego w cylindrycznym liczniku Geigera-Miillera;
 a - bez uwzględnienia ładunku przestrzennego jonów b — z uwzględnieniem ładunku przestrzennego

Ponieważ przedział czasu pomiędzy powstaniem fotonu o krótkiej fali a jonizacją wywołaną przez ten foton jest rzędu 10^{-9} s, lawina rozchodzi się z dużą prędkością sięgającą $1,2 \cdot 10^8$ cm/s. Wyładowanie, jakie powstaje w liczniku GM, polega więc na wielokrotnym powtarzaniu się procesu wtórnej jonizacji, procesu tworzenia lawin, tak że w jednym wyładowaniu na 1 cm długości anody przypada nawet kilka tysięcy lawin. Poza tym każda lawina na skutek dyfuzji ulega rozszerzeniu do ok. 0,1 mm, tak że lawiny zachodzą na siebie. Wyładowanie rozprzestrzenia się na całą długość anody. Elektrony przepływają następnie szybko z lawiny w kierunku anody. Pozostała lawina dodatnich jonów tworzy ładunek przestrzenny, który rozszerza się powoli w kierunku katody

przesuwając się wolno w jej stronę. Ładunek ten deformuje kształt pola, tworząc fikcyjną anodę o wzrastającym promieniu. Powyżej pewnej wartości krytycznej tego promienia natężenie pola elektrycznego na powierzchni fikcyjnej anody maleje poniżej wartości odpowiadającej napięciu U_4 (rys. 1.1), poniżej progu Geigera. Od tego momentu licznik przestaje reagować na dalsze cząstki lub kwanty promieniowania pierwotnego, które trafiają do jego objętości czynnej. Wyładowanie trwające wewnątrz licznika nie ulega jednak przerwaniu. Energia jonizacji jonów dodatnich jest bowiem znacznie większa od pracy wyjścia elektronów z materiału katody. Po neutralizacji tuż przy powierzchni katody atom gazu znajduje się nadal w stanie wzbudzenia.

Tak wykonany licznik GM mógłby policzyć tylko pierwszą cząstkę lub pierwszy kwant promieniowania pierwotnego. Aby tego uniknąć, można stosować dwa sposoby gaszenia wyładowania. W związku z tym rozróżnia się dwa typy liczników:

- liczniki GM niesamogasnące (powolne),
- liczniki GM samogasnące (szybkie).

LICZNIKI GEIGERA-MÜLLERA NIESAMOGASNĄCE

Do działania tego typu liczników konieczne jest zastosowanie odpowiedniego obwodu elektrycznego lub układu elektronicznego, który miałby za zadanie obniżenie przyłożonego do elektrod licznika poniżej pewnej wartości progowej. Czas trwania tego obniżenia napięcia musi być dostatecznie długi, tak aby wszystkie jony w liczniku uległy neutralizacji oraz aby zakończona została emisja fotonów wysyłanych przez wzbudzone atomy i cząsteczki. Wadą tego rodzaju liczników jest wynikający z zasady działania długi czas martwy, tj. czas, w ciągu którego licznik nie reaguje na dalsze cząstki pierwotne. Zaletą liczników niesamogasnących jest natomiast ich nieograniczona trwałość. W praktyce znajdują one bardzo rzadkie zastosowanie, ograniczone głównie do pomiarów bardzo małych aktywności. Napełnia się je najczęściej gazami szlachetnymi, aby zapobiec powstawaniu jonów ujemnych, które mogłyby zniszczyć anodę. Stosuje się tu argon pod ciśnieniem ok. 100 mm Hg. Przy pomiarach aktywności węgla ^{14}C licznik napełniany jest dwutlenkiem węgla, zawierającym badany izotop.

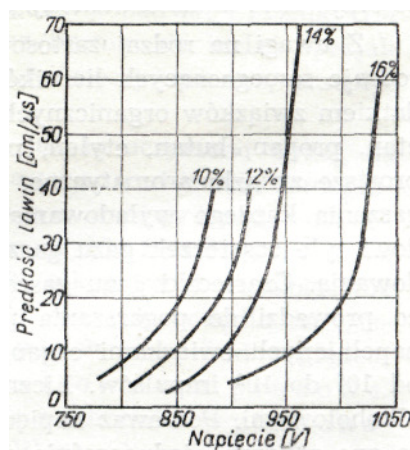
LICZNIKI GEIGERA-MÜLLERA SAMOGASNĄCE

Drugim sposobem gaszenia wyładowania w liczniku GM jest dodanie do gazu podstawowego drugiego gazu, tzw. gazu gaszącego, najczęściej wieloatomowego,

którego atomy odbierając nadmiar energii zapobiegają w ten sposób niepożądanym zjawiskom. Gazem takim może być np. benzen C_6H_6 , brom Br_2 , butan C_4H_{10} , etan C_2H_6 , chlor Cl_2 , metan CH_4 , propan C_3H_8 , bromek etylu C_2H_5Br i inne.

Na wstępie trzeba tu zaznaczyć, że wszystkie liczniki GM samogasnące mogą pracować również jako liczniki proporcjonalne przy odpowiednio niskim napięciu pracy, leżącym poniżej progu Geigera. Współczynnik wzmocnienia gazowego będzie wówczas jednak niewielki. Nie wszystkie natomiast liczniki proporcjonalne mogą być zastosowane jako liczniki GM, ponieważ albo zawierają zbyt małe ilości gazów gaszących, albo też wcale ich nie zawierają. Geometryczny układ elektrod i sposób wykonania poszczególnych elementów licznika jest podobny, zarówno dla liczników proporcjonalnych, jak i dla liczników GM, oczywiście z wyjątkiem wykonania specjalnych.

Jak wyżej powiedziano, w licznikach GM samogasnących gaszenie wyładowania zachodzi bezpośrednio wewnątrz samego licznika, dzięki dodaniu wieloatomowego gazu gaszącego do gazu podstawowego. Gaz gaszący jest tak dobierany, aby odznaczał się wysoką zdolnością pochłaniania w zakresie promieniowania ultrafioletowego oraz aby jego potencjał jonizacyjny był niższy od potencjału jonizacyjnego albo potencjału wzbudzenia gazu podstawowego. W takim przypadku wszystkie jony gazu podstawowego w czasie zderzeń mogą odebrać elektrony drobinom gazu gaszącego jonizując te ostatnie (dzieje się to w pobliżu katody i utworzone jony gazu gaszącego ulegają prawie natychmiast neutralizacji). Różnica energii między potencjałami jonizacyjnymi gazu podstawowego i gazu gaszącego, która pozostaje w atomie gazu podstawowego jako energia wzbudzenia, zostaje wypromieniowana, ale już w postaci fotonu, o dużej długości fali, i zaabsorbowana przez cząsteczki gazu gaszącego.



Rysunek 3-3 - Prędkość rozchodzenia się lawin wzdłuż anody o średnicy 0,075 mm w funkcji napięcia w liczniku wypełnionym argonem przy różnych procentowych zawartościach alkoholu

W lawinie będą oczywiście powstawały poza jonami gazu podstawowego jony gazu gaszącego. Będzie ich jednak o wiele mniej.

Gazem gaszącym w licznikach samogasnących może więc być gaz, którego cząsteczki spełniają następujące warunki:

- neutralizują jony dodatnie w lawinie,
- „gaszą” stany wzbudzenia i metastabilne gazu podstawowego,
- pochłaniają fotony promieniowania ultrafioletowego oraz
- uniemożliwiają emisję tych fotonów.

Najczęściej stosowanym gazem podstawowym jest argon o możliwie najwyższym stopniu czystości (zwłaszcza jeśli chodzi o zawartość gazów elektroujemnych), wynoszącym 99,99%. Optymalne ciśnienie tego gazu, stosowane najczęściej w samogasnących licznikach GM, wynosi ok. 100 mm Hg. Optymalne ciśnienie cząstkowe dodawanego gazu gaszącego wynosi ok. 10 mm Hg. Jako gazy gaszące nadają się przede wszystkim takie związki, których ciężar cząsteczkowy leży w zakresie od 30 do 120. Ciśnienie par nasyconych gazu gaszącego ma być przy najniższej dopuszczalnej temperaturze pracy licznika wyższe od stosowanego ciśnienia cząstkowego, gdyż w innym przypadku gaz gaszący uległby skropleniu, co oczywiście uniemożliwiłoby pracę licznika.

Z uwagi na rodzaj zastosowanego gazu gaszącego odróżnia się dwa rodzaje samogasnących liczników GM.

Pierwszy z nich to licznik z dodatkiem związków organicznych, przy czym jako gaz gaszący stosuje się etan, propan, butan, etylen, propylen oraz butylen. Stosowane są też prostsze związki aromatyczne, jak benzen, ksylen lub pyridin. Podczas gaszenia każdego wyładowania, powstającego w liczniku, ulega rozpadowi tyle cząsteczek gazu gaszącego, ile powstało jonów podczas wyładowania. Cząsteczki gazu gaszącego ulegają więc stopniowemu zużyciu, co prowadzi do pogarszania parametrów licznika. Trwałość liczników napełnianych związkami organicznymi jest z tego powodu ograniczona od 10^7 do 10^8 impulsów. Liczniki te są nazywane potocznie **licznikami alkoholowymi**. Ponieważ napięcie ich pracy przewyższa na ogół 1000 V, są one zaliczane jednocześnie do liczników wysokonapięciowych.

Drugi rodzaj samogasnących liczników GM stanowią liczniki, w których jako gaz gaszący użyto związki chlorowcowe (stąd nazwa - **liczniki chlorowcowe**). Zaletą ich jest osiągnięcie dobrego działania gaszącego już przy niskich ciśnieniach cząstkowych gazu gaszącego oraz ponowna rekombinacja rozerwanych cząsteczek tego gazu. W wyniku osiąga się bardzo wysoką i praktycznie nieograniczoną trwałość licznika. Jako gaz gaszący stosuje się obecnie w licznikach chlorowcowych przede wszystkim brom, który jest mniej aktywny chemicznie od chloru oraz w odróżnieniu od jodu ma dostatecznie wysokie ciśnienie par nasyconych, umożliwiające pracę licznika w niskich temperaturach do ok. -55°C . Napięcie pracy liczników chlorowcowych wynosi na ogół poniżej 1000 V i dlatego też liczniki te są typowymi licznikami niskonapięciowymi. Napięcie progu Geigera-Müllera jest określone geometrią układu elektrod oraz rodzajem napełnienia gazowego. W zwykłych licznikach zawiera się ono w zakresie od 300 do 450 V

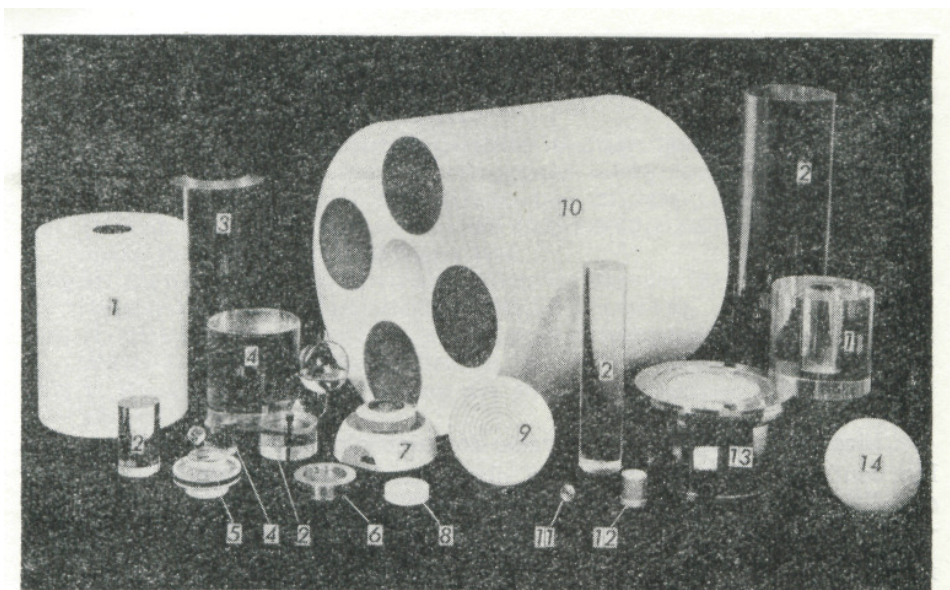
4. LICZNIKI SCYNTYLACYJNE I LUMINESCENCYJNE

Scyntylator – materiał, który emituje światło (widzialne lub w zakresie bliskim widzialnemu) pod wpływem promieniowania jonizującego (X , γ , α , β , n , p , ...).

To świecenie jest luminescencją

Liczniki scyntylicyjne, zwane również głowicami scyntylicyjnymi, lub sondami scyntylicyjnymi są obok komór jonizacyjnych i liczników GM najczęściej stosowanymi detektorami promieniowania jonizującego. W skład licznika scyntylicyjnego wchodzi scyntylator oraz powielacz fotoelektronowy, umieszczone we wspólnej obudowie, na ogół światło-szczelnej. Ponadto w obudowie znajduje się podstawka powielacza, dzielnik wysokonapięciowy oraz ewentualnie wtórnik katodowy lub wzmacniacz wejściowy i ekran magnetyczny. Scyntylator przetwarza energię promieniowania jonizującego na energię błysków świetlnych zwanych scyntylicjami, które z kolei są przetwarzane przez powielacz fotoelektronowy na sygnał elektryczny w postaci impulsowej lub ciągłej.

Dobry scyntylator powinien odznaczać się możliwie dużą absorpcją mierzonego promieniowania. Absorbowana energia powinna być z kolei zamieniana w możliwie dużym procencie w energię błysków świetlnych, przenoszonych następnie z małymi stratami na katodę powielacza foto-elektronowego. Zakres widmowy kwantów świetlnych, powstających w scyntylicytorze, powinien być dopasowany do zakresu czułości widmowej fotokatody. Przy pomiarach promieniowania o dużym natężeniu wymagany jest ponadto krótki czas zaniku błysków świetlnych. Często stawiane jest również wymaganie, ażeby liczba fotonów powstających w scyntylicytorze była proporcjonalna do energii cząstek promieniowania mierzonego.



Rysunek 4-1 - Widok niektórych scyntyliatorów produkcji firmy Nuclear Enterprises

Ponadto wymagana jest często równomierność charakterystyki energetycznej i duża trwałość oraz odporność na wpływy zewnętrzne. Ze względu na różnorodność tych wymagań brak jest scyntyliatorów uniwersalnych, spełniających wszystkie wymienione wymagania.

W praktyce do każdego rodzaju mierzonego promieniowania konieczny jest dobór odpowiedniego rodzaju scyntyliatora. Przy doborze tym należy uwzględnić nie tylko rodzaj promieniowania, lecz także specyfikę danego pomiaru. Stosuje się scyntyliatory zarówno w fazie stałej, jak i ciekłej, a także, choć rzadko, scyntyliatory gazowe.

Wydajnością scyntyliatora nazywamy stosunek liczby kwantów wyjściowych do ogólnej liczby cząstek padających na scyntyliator. Niekiedy operuje się również pojęciem wydajności (sprawności) energetycznej scyntyliatora: jest to stosunek energii wszystkich wyzwolonych fotonów do energii absorbowanego promieniowania pierwotnego. Przy pomiarach spektrometrycznych podstawowym parametrem scyntyliatora jest jego energetyczna zdolność rozdzielcza.

Parametry podstawowe scyntylatorów różnych rodzajów

Scyntylator	Gęstość g/cm ³	Maksimum widma A° (= 10 ⁻⁸ cm)	Czas zaniku ¹⁾ , ns (= 10 ⁻⁹ s)	Amplituda względna ²⁾ , %	Podstawowe zastosowania Uwagi
Kryształy nieorganiczne:					
Jodek sodu NaI(Tl)	3,67	4130	230	230	γ, X
Jodek cezu CsI(Tl)	4,51	4200—5900	700	95	γ, ciężkie cząstki
Siarcecz cynku ZnS(Ag)	4,09	4500	2000	300	α
Jodek litu LiI(Eu)	4,06	4750	1200	75	n cieplne
Kryształy organiczne:					
Antracen C ₁₄ H ₁₀	1,25	4470	30	100	β(γ,α,n _{SZ})
Transstilben C ₁₄ H ₁₂	1,16	(3850)4100	4,5	50	β(γ,α,n _{SZ})
Ciekłe organiczne:					
Aktywator	Rozpuszczalnik				
pT(4g/l)	w toluenie	4320	≤ 3	61	} POPOP (0,1 g/l)
PPO(4g/l)	w toluenie	3820	≤ 3	54	
pT(5g/l)	w ksylenie	3250—4000	≤ 3	57	BBO
NE211 (NE213)		4250	2,3(3,6)	78	γ, n _{SZ} , (α,β)
NE 221	żel	4250	—	55	α,β
Plastykowe organiczne:					
pT(25g/l)	w polistyrenie	3550	≤ 3	28	—
PPO(10g/l)	w polistyrenie	3800	≤ 3	24	—
pT(36/l)	w poliwinylotoluenie	4300	≤ 3	51	POPOP
NE 102		4250	2,2	65	α,β,γ,n _{SZ}
NE 103		4800	12	45	α,β,γ,n _{SZ}

pT — p-arterfenyl
 PPO — 2,5-dwu-fenylookszol
 POPOP — 1,4-dwu-2(5-fenylookszolilo)-benzen
 BBO — 2,5-dibifenylookszol

1) spadek natężenia pierwotnego do wartości 1/e
 2) dla cząstek beta o energii powyżej 1 MeV w odniesieniu do poziomu antracenu, przyjętego za 100%

Rysunek 4-2 – Parametry podstawowe scyntylatorów różnych rodzajów

5. DETEKTORY PÓŁPRZEWODNIKOWE

Do detekcji promieniowania jonizującego wykorzystuje się także różnego rodzaju kryształy oraz, elementy półprzewodnikowe. Ze względu na zasadę działania detektory te można podzielić na dwie grupy:

- detektory, w których promieniowanie jonizujące wywołuje emisję promieniowania świetlnego
- detektory, w których promieniowanie jonizujące powoduje wytworzenie ładunku elektrycznego lub zmianę oporności detektora.

W detektorach pierwszej grupy energia zaabsorbowanego promieniowania zostaje całkowicie lub częściowo zużyta na uwolnienie elektronów. Uwolnione elektrony po upływie odpowiedniego czasu zostają wychwycone np. przez ośrodki zakłóceń sieci krystalicznej, jak również przez te miejsca, z których został uwolniony elektron. Temu procesowi towarzyszy emisja światła; taką właściwością charakteryzują się raczej kryształy półprzewodnikowe. Zasada detekcji jest tu więc podobna, jak w licznikach scyntylicyjnych; z takim kryształem sprzęga się powielacz elektronowy.

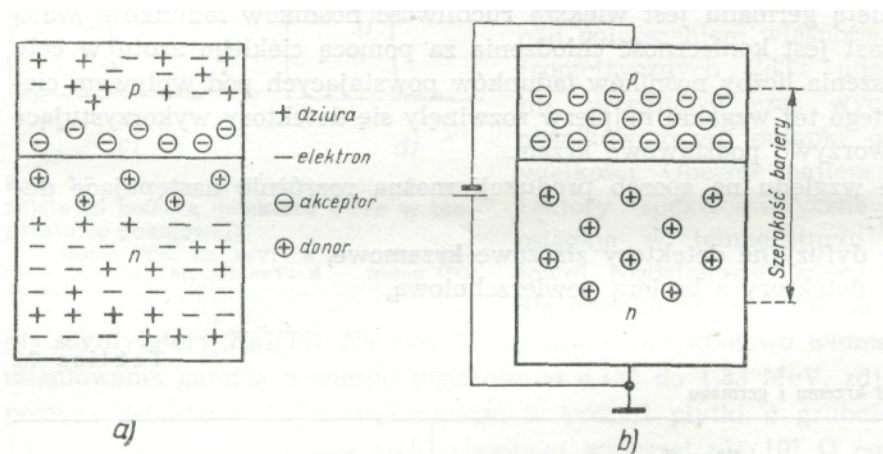
Detektory drugiej grupy przypominają natomiast komory jonizacyjne. W tym przypadku bowiem do elementu półprzewodnikowego przykładana się pole elektryczne i zbiera na elektrodach ładunek elektryczny, powstały w czasie przejścia promieniowania przez ten element. Powstały ładunek jest proporcjonalny do energii straconej przez promieniowanie przechodzące przez element detekcyjny. Do grupy tej należą zarówno detektory krystaliczne o właściwościach izolacyjnych, w których nie występuje wzmocnienie ładunku, jak i kryształy półprzewodnikowe, w których występuje zjawisko wewnętrznego wzmocnienia prądowego. Niektóre kryształy, jak np. siarczek kadmu, mogą wykazywać zarówno własności izolacyjne, jak i własności półprzewodnikowe. Do omawianej grupy należą też elementy zawierające złącze **typu p-n**. Są to diody półprzewodnikowe, które pracują w zakresie zaporowym.

Półprzewodnikowy detektor złączowy jest diodą spolaryzowaną w kierunku zaporowym. Jako podstawowe materiały do wytwarzania tych detektorów stosuje się krzem i german.

Zaletą germanu jest większa ruchliwość nośników ładunków, wadą natomiast jest konieczność chłodzenia za pomocą ciekłego azotu w celu zmniejszenia liczby nośników ładunków powstających pod wpływem ciepła. Z tego też względu najpierw rozwinęły się detektory wykorzystujące jako tworzywo podstawowe krzem. Ze względu na sposób produkcji można rozróżnić następujące detektory:

- dyfuzyjne detektory złączowe krzemowe,
- detektory z barierą powierzchniową,
- dryftowe detektory krzemowe - w skrócie p-i-n lub Si(Li),
- dryftowe detektory germanowe - w skrócie Ge(Li).

Dyfuzyjne detektory złączowe krzemowe są wykonywane poprzez wprowadzenie na drodze dyfuzji cienkiej warstwy materiału donorowego (lub akceptorowego) do krzemu typu p (lub typu n) o wysokiej oporności właściwej. Czynnikiem wprowadzanym jest najczęściej fosfor, a materiałem podstawowym jest krzem typu p. Krzem typu n rzadko stosuje się do budowy takich detektorów, chociaż warstwa zaporowa w nim powstająca przy tym samym napięciu polaryzującym jest większa niż w krzemie typu p; krzem typu n zawiera jednak bardzo dużo zanieczyszczeń i proces dyfuzji należałoby prowadzić w bardzo wysokich temperaturach rzędu 1000°C.



Rysunek 5-1 - Model złącza typu p-n:

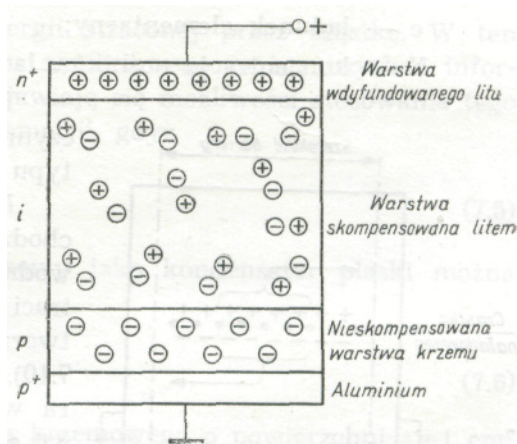
a — bez zewnętrznego pola; b — z zewnętrznym polem

Ze względu na małą grubość warstwy zaporowej detektory te nadają się tylko do badania cząstek, które mają krótki zasięg, a więc cząstek α , protonów, deuteronów i produktów rozszczepienia.

Detektory złączowe z barierą powierzchniową działają tak samo, jak wyżej omówione detektory dyfuzyjne, z tym że warstwa zaporowa znajduje się tutaj między naparowaną cienką warstwą złota i krzemem typu n o wysokiej oporności. Należy się tu jednak liczyć z tzw. efektem okienkowym, polegającym na tym, że cząstka jonizująca traci pewną część swej energii w cieniwej warstwie złota.

Dryftowe detektory krzemowe są wytwarzane w dwóch etapach. Najpierw w temperaturze 400 °C następuje dyfuzja litu z powierzchni w głąb krzemu typu p, wskutek czego powstaje złącze n-p. Następnie tak wytworzoną diodę przetrzymuje się w temperaturze +125 °C, wskutek czego wzrasta ruchliwość litu, a następnie przykłada się napięcie zwrotne. Dodatnio naładowane jony litu „dryfują” do warstwy zaporowej pod wpływem pola i kompensują ujemne jony czynnika akceptorowego - boru, tworząc nową wewnętrzną warstwę. W ten sposób powstają cztery warstwy:

- warstwa wprowadzonego drogą dyfuzji litu, przez którą cząstka jonizująca wchodzi;
- warstwa skompensowana litem, która stanowi obszar czynny detektora;
- nieskompensowana warstwa krzemu
- warstwa wtopionego aluminium zapewniająca kontakt elektryczny z tyłu detektora

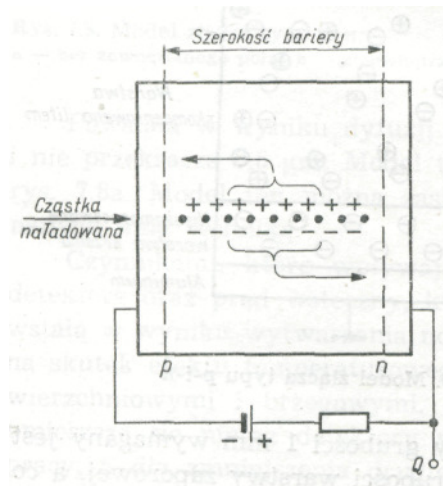


Rysunek 5-2 - Model złącza typu p-i-n

Na cienką warstwę wprowadzonego drogą dyfuzji litu (rzędu 10 do 100 μm) jest naparowana cienka warstwa metalu, która zapewnia kontakt elektryczny od przodu detektora. Poprzez regulację czasu dryftu jonów litu reguluje się grubość drugiej warstwy, a więc grubość obszaru czynnego detektora. Dzięki większej grubości warstwy zaporowej, a co za tym idzie - większej grubości obszaru czynnego detektora, złącza p-i-n znajdują

zastosowanie w pomiarach promieniowania β . Można je również, po oziębieniu do temperatury 77 K, stosować do pomiarów promieniowania γ .

W ten sam sposób są wytwarzane dryftowe detektory germanowe (Li), które są stosowane przede wszystkim do pomiarów promieniowania γ , ale muszą być umieszczone w próżni i w temperaturze 77°K. Jak z powyższego widać, niezależnie od technologii produkcji wszystkie te detektory jako półprzewodniki charakteryzują się występowaniem warstwy zaporowej, która stanowi objętość czynną detektora.



Rysunek 5-3 - Zasada działania półprzewodnikowego detektora złączeniowego

Ta możliwość zmiany obszaru czynnego jest bardzo ważną cechą tego typu detektorów.

Promieniowanie jonizujące przechodząc przez obszar czynny półprzewodnikowego detektora złączeniowego traci swą energię w kolejnych aktach tworzenia par elektron-dziura. Do powstania pary elektron-dziura w krzemie potrzebna jest energia 3,6 eV niezależnie od rodzaju i energii cząstki jonizującej. Zjawisko to można porównać ze zjawiskiem jonizacji gazu w komorze jonizacyjnej. Z tego też względu detektory te nazywa się nieraz komorami jonizacyjnymi z ciała stałego.

Na podstawie powyższych rozważań można stwierdzić, że półprzewodnikowe detektory złączeniowe mają cały szereg zalet, jak:

- małe wymiary, ze względu na silną absorpcję promieniowania;
- liniowa zależność generowanego ładunku od energii cząstki w szerokim zakresie energii tych cząstek, a więc możliwa analiza

spektrometryczna promieniowania, o ile oczywiście grubość bariery jest większa od zasięgu badanego promieniowania;

- duża szybkość zbierania ładunku, a stąd duża czasowa zdolność rozdzielcza;
- polepszenie energetycznej zdolności rozdzielczej przy badaniach spektrometrycznych wskutek wytworzenia większej liczby nośników ładunku, a co za tym idzie - zmniejszenie fluktuacji statystycznych
- wyraźne zmniejszenie biegu własnego detektora ze względu na jego małe wymiary
- możliwość stosowania niskich napięć zasilających.

Te zalety przyczyniły się do szybkiego rozwoju produkcji półprzewodnikowych detektorów złączowych oraz do szerokiego ich stosowania. Podstawowe dziedziny zastosowań to:

- spektrometria ciężkich cząstek naładowanych, takich jak protony, deuterony, jądra trytu, a przede wszystkim cząstki α ;
- spektrometria promieniowania β ;
- spektrometria promieniowania γ (zwłaszcza miękkiego);
- pomiary gęstości strumienia neutronów termicznych i prędkich oraz ich spektrometria;
- zastosowanie w medycynie do pomiaru mocy dawki;
- badania reakcji jądrowych

6. Bibliografia:

- „Elektroniczne mierniki promieniowania jonizującego” – Adam Piątkowski, Waldemar Scharf, 1979
- „Detekcja promieniowania jądrowego” – Price William, 1960
- www.wikipedia.org