

TECHNIKA JĄDROWA	N O R M A B R A N Ż O W A	BN-80
	Urządzenia elektroniczne dla techniki jądrowej	3411-21
	Zasady wykonywania badań półprzewodnikowych detektorów promieniowania jonizującego	Grupa katalogowa 1829

PRZEDMOWA

Norma jest wiernym tłumaczeniem Publikacji IEC 333 zachowującym jej układ, numerację i sposoby formułowania postanowień. Tylko w nielicznych przypadkach, ze względu na adaptację do warunków polskich, odbiega nieznacznie od oryginału, nie naruszając jednak nigdzie zasady pełnej merytorycznej zgodności między tekstami obu dokumentów.

Norma dotyczy półprzewodnikowych detektorów promieniowania jonizującego, które w ostatnich latach znalazły szerokie zastosowanie w detekcji i spektroskopii promieniowania jonizującego o wysokiej zdolności rozdzielczej. Detekcja i analiza ciężkich cząstek naładowanych jest wykonywana np. przy użyciu detektorów germanowych o dużej objętości.

Szybki rozwój tej dziedziny, np. wprowadzenie zblokowanych głowic pomiarowych złożonych z detektorów i przedwzmacniaczy, może w niektórych przypadkach spowodować konieczność dokonania zmian w zasadach przeprowadzania badań.

Zasady przeprowadzania badań wzmacniaczy i przedwzmacniaczy współpracujących z detektorami podano w BN-78/3411-15, która jest odpowiednikiem Publikacji IEC 340.

Określenia podane w niniejszej normie, z wyjątkiem p. 4.1.3 i 4.3.18, są merytorycznie wiernym tłumaczeniem Publikacji IEC 596.

1. PRZEDMIOT NORMY

Przedmiotem normy są zasady wykonywania badań półprzewodnikowych detektorów promieniowania jonizującego.

2. ZAKRES STOSOWANIA NORMY

Norma ma na celu ustalenie zasad wykonywania badań półprzewodnikowych detektorów promieniowania jonizującego.

Wprowadzenie niniejszej normy nie oznacza, że wszystkie opisane w niej badania są obowiązkowe. Oznacza ono jedynie, że badania gotowych urządzeń powinny być wykonywane zgodnie z opisanymi zasadami.

3. WYMAGANIA OGÓLNE

3.1. Maksymalne napięcie diody, wartość prądu, dopuszczalne wartości strumienia promieniowania i inne wartości graniczne nie powinny być przekraczane, gdyż może to doprowadzić do trwałych zmian charakterystyk urządzenia.

3.2. Badane urządzenie we wszystkich pomiarach powinno być umieszczone w całkowitej ciemności.

3.3. Temperatura, parametry otoczenia i wszystkie inne istotne warunki powinny być określone.

3.4. Wartości zmierzonych parametrów powinny być powtarzalne w granicach dokładności pomiarów zarówno po zakończeniu danego pomiaru, jak i po przeprowadzeniu pełnego cyklu badań.

3.5. Zasilacz napięcia polaryzacji detektora nie powinien w istotny sposób zakłócać pomiaru parametrów detektora przez tętnienia i inne zakłócenia sieciowe.

4. NAZWY I OKREŚLENIA

4.1. Nazwy i określenia dotyczące detektorów

4.1.1. Detektor półprzewodnikowy — wg PN-74/J-01003.08 p. 3.12.

4.1.2. Wydajność detektora — wg PN-74/J-01003.08 p. 4.1.

4.1.3. Wydajność detekcji (przy ustalonych warunkach detekcji) — stosunek liczby zarejestrowanych cząstek do liczby tych samych cząstek emitowanych przez źródło promieniowania w tym samym czasie.

4.1.4. Wydajność detekcji w pikie całkowitej absorpcji — dla danego układu detekcyjnego i energii fotonów, stosunek liczby fotonów zarejestrowanych w pikie całkowitej absorpcji do całkowitej liczby fotonów emitowanych przez źródło promieniowania w tym samym czasie; jest on równy iloczynowi wydajności fotoelektrycznej i wydajności detekcji.

Zgłoszona przez Instytut Badań Jądrowych
Ustanowiona przez Ministra Energetyki i Energii Atomowej dnia 22 marca 1980 r.
jako norma obowiązująca od dnia 1 października 1980 r.
(Dz. Norm. i Miar nr 9/1980 poz. 46)

4.1.5. Rozdzielczość energetyczna (*FWHM*) detektora promieniowania — wielkość, która charakteryzuje zdolność detektora do rozróżniania energii rejestrowanych cząstek (kwantów) i jest zdefiniowana jako wkład detektora do szerokości połówkowej rozkładu amplitudy impulsów odpowiadającego widmu energii.

4.1.6. Rozdzielczość czasowa detektora w połowie (jednej dziesiątej) wartości maksimum pików — wielkość, która charakteryzuje zdolność detektora do rozróżnienia dwu kolejnych zdarzeń i jest zdefiniowana jako pełna szerokość w połowie (jednej dziesiątej) wartości maksimum pików rozkładu opóźnień czasowych detektora.

4.2. Nazwy i określenia dotyczące detektorów półprzewodnikowych

4.2.1. Powierzchnia czynna (detektora cząstek naładowanych) — obszar ograniczony linią, poza którą szerokość połówkowa pików widmowego pochodzącego od słabej, skolimowanej wiązki monoenergetycznych ciężkich cząstek naładowanych wzrasta dwukrotnie ponad swoją zasadniczo stałą wartość wewnątrz obszaru.

Dla detektorów z przezroczystym okienkiem przednim powierzchnia czynna może być określona z dostateczną dokładnością jako powierzchnia ograniczona linią, poza którą prąd wyjściowy detektora pochodzący od małej próbnej plamki świetlnej spada o 10% w stosunku do swojej zasadniczo stałej wartości.

4.2.2. Prąd upływu — całkowity prąd detektora płynący przy polaryzacji roboczej w nieobecności promieniowania.

Prąd upływu detektora półprzewodnikowego obejmuje prąd powierzchniowy i prąd objętościowy.

4.2.3. Czas narastania sygnału z detektora półprzewodnikowego — czas narastania impulsu na wyjściu przedwzmacniacza, z poprawką na wpływ samego przedwzmacniacza, po przyłożeniu skokowego napięcia w szereg z detektorem.

Wartość skoku napięcia nie może przekraczać większej z dwu wielkości: jednej dziesiątej napięcia odpowiadającego przerwie energetycznej lub jednej dziesiątej napięcia polaryzacji.

4.2.4. Czas zbierania ładunku detektora półprzewodnikowego — czas, w którym scałkowany prąd wywołany ładunkiem zebrany w detektorze półprzewodnikowym po przejściu cząstki jonizującej wzrasta od 10 do 90% swojej końcowej wartości.

4.2.5. Względna (względem jodku sodowego) wydajność detekcji całkowitej absorpcji detektora półprzewodnikowego — stosunek wydajności detekcji całkowitej absorpcji detektora do wydajności detekcji całkowitej absorpcji wzorcowego kryształu scyntylacyjnego NaI (Tl) o wymiarach 76,2 × 76,2 mm dla określonej odległości źródło-detektor.

Wydajność detekcji całkowitej absorpcji wzorcowego kryształu dla źródła ⁶⁰Co przyjęta jest umownie jako $1,20 \cdot 10^{-3}$ przy odległości źródło-detektor wynoszącej 25 cm. Odległość mierzona jest pomiędzy środkiem źródła a środkiem przedniej powierzchni kryształu.

4.2.6. Przekrój czynny detektora — dla danej energii fotonu, stosunek powierzchni pików (wg 7.6) do fluencji

padającego promieniowania gamma (cm^{-2}) w określonych warunkach eksperymentalnych.

4.2.7. Wskaźniki grubości okienka — wzajemne stosunki powierzchni pików widm otrzymanych przy użyciu detektora półprzewodnikowego dla określonych energii fotonów.

Powierzchnie pików odnoszą się zwykle do trzech energii emitowanych przez ¹³³Ba: 53,2 keV, (79,6 i 81,0) keV i 161 keV.

4.2.8. Całkowita warstwa martwa detektora (półprzewodnikowego) wszystkie nieczynne materiały układu detektora, przez które musi przenikać promieniowanie, aby osiągnąć objętość czynną.

4.3. Nazwy i określenia dotyczące widm i impulsów

4.3.1. Impuls wtórny — pasożytniczy impuls wywołany w detektorze promieniowania przez impuls poprzedni.

4.3.2. Impuls pasożytniczy — impuls w detektorze promieniowania, inny niż wytworzony w sposób zamierzony lub wywołany bezpośrednio promieniowaniem jonizującym.

4.3.3. Szerokość połówkowa (*FWHM*) — odległość na krzywej rozkładu zawierającej pojedynczy pik między odciętymi dwu punktów krzywej, których rzędne wynoszą pół rzędnej maksimum pików.

Jeżeli rozważana krzywa zawiera kilka pików, to szerokość połówkowa istnieje dla każdego pików.

Dla rozkładu normalnego szerokość połówkowa wynosi $2(2\ln 2)^{1/2} \cdot \sigma = 2,355\sigma$, gdzie σ jest odchyleniem standardowym.

4.3.4. Szerokość w jednej dziesiątej maksimum (*FWTM*) — odległość na krzywej rozkładu zawierającej pojedynczy pik między odciętymi dwu punktów krzywej, których rzędne wynoszą jedną dziesiątą rzędnej maksimum pików.

4.3.5. Szerokość połówkowa pików (ΔN_p) — szerokość połówkowa pików odpowiadającego absorpcji monoenergetycznego promieniowania jonizującego w detektorze.

4.3.6. Powierzchnia pików — całkowita liczba impulsów odpowiadających pikowi w widmie amplitudy impulsów.

Udział tła należy odjąć od widma.

4.3.7. Asymetria pików — stosunek części szerokości w jednej dziesiątej maksimum powyżej wierzchołka pików do części poniżej położenia wierzchołka pików.

Wielkość ta wyraża się ilościowo jako

$$\frac{X_H - \hat{X}}{\hat{X} - X_L}$$

gdzie:

\hat{X} — odcięta wierzchołka pików,

X_H — odcięta punktu po wysokoenergetycznej stronie \hat{X} na poziomie jednej dziesiątej wysokości,

X_L — odcięta punktu po niskoenergetycznej stronie \hat{X} , także na poziomie jednej dziesiątej wysokości.

Udział tła, jeżeli jest znaczący, powinien być uprzednio odjęty.

4.3.8. Położenie pików — energia lub równoważna wielkość odpowiadająca środkowi ciężkości pola powierzchni pików w widmie amplitudy impulsów.

Udział tła należy odjąć od widma.

4.3.9. Średnie odchylenie amplitudy impulsu — w ustalonych warunkach pomiaru średnia (w danym okresie czasu) bezwzględnych odchyżeń położenia pików całkowitej absorpcji.

4.3.10. Przesunięcie amplitudy impulsu — zmiana położenia pików wywołana zmianą wielkości wpływającej, takiej jak: temperatura, pole magnetyczne, szybkość zliczania itd.

4.3.11. Szybkość przesunięcia amplitudy impulsu (szybkość dryftu) — pochodna krzywej amplitudy impulsu w funkcji czasu, mierzona w określonych warunkach.

4.3.12. Stosunek pik-Compton — stosunek amplitudy widma w położeniu pików do amplitudy względnie płaskiej części widma ciągłego Comptona.

Udział tła detektora należy odjąć od widma.

Jeżeli widmo zawiera więcej niż jeden pik, użyta względnie płaska część powinna odpowiadać pikowi określanemu.

4.3.13. Rozdzielczość amplitudy impulsu — dla określonego pików, stosunek szerokości połowkowej do amplitudy impulsu odpowiadającej maksimum pików; rozdzielczość zwykle wyraża się w procentach.

4.3.14. Rozdzielczość amplitudy impulsu dla pojedynczych elektronów — rozdzielczość amplitudy impulsu dla widma jednoelektronowego (zdarzenia jednoelektronowe).

4.3.15. Wkład szumu nieelektrycznego do szerokości połowkowej pików (ΔN_O) — dla danej energii wkład wszystkich czynników innych niż elektryczne do szerokości połowkowej pików, ilościowo określony wzorem

$$\Delta N_O = \sqrt{\Delta N_S^2 - \Delta N_T^2}$$

w którym:

ΔN_S — szerokość połowkowa pików,

ΔN_T — całkowity wkład szumów do szerokości połowkowej.

4.3.16. Wkład szumów układu wzmacniającego do szerokości połowkowej (ΔN_E) — szerokość w połowie maksimum pików pochodzącego z generatora impulsów, otrzymana w spektrometrze promieniowania, w którym detektor został zastąpiony kondensatorem o identycznej pojemności.

4.3.17. Całkowity wkład szumów układu do szerokości połowkowej (ΔN_T) — pełna szerokość w połowie maksimum pików pochodzącego z generatora impulsów otrzymana w spektrometrze promieniowania w obecności detektora pracującego w warunkach polaryzacji roboczej.

4.3.18. Szerokość połowkowa (FWHM) — odległość na krzywej rozkładu zawierającej pojedynczy pik między odcięzonymi dwoma punktami krzywej, których rzędne wynoszą pół rzędnej maksimum pików.

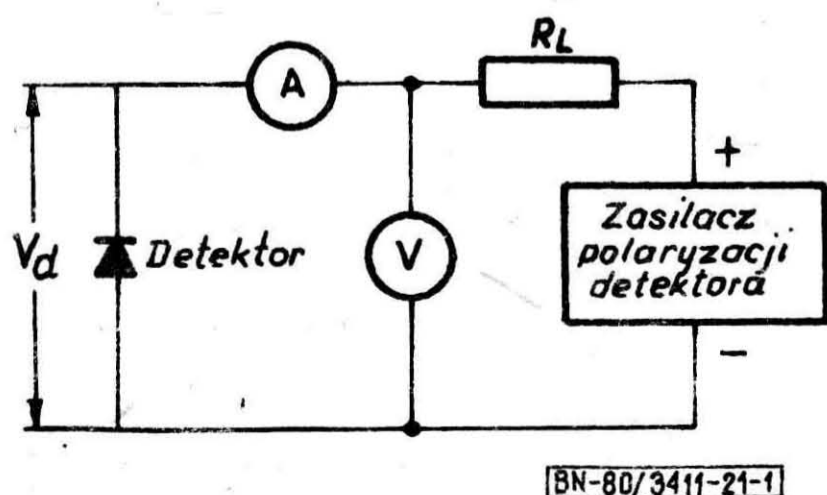
4.3.19. Fluencja cząstek — wg PN-74/J-01003.02 p. 2.10.

4.3.20. Gęstość strumienia cząstek — wg PN-74/J-01003.02 p. 2.11.

ROZDZIAŁ PIERWSZY — CHARAKTERYSTYKI ELEKTRYCZNE

5. CHARAKTERYSTYKI PRĄDOWO-NAPIĘCIOWE

Charakterystykę wykreśla się wykonując wykres prądu upływności detektora przy polaryzacji zaporowej w funkcji napięcia na detektorze V_d , w stałej temperaturze z detektorem umieszczonym w całkowitej ciemności (rys. 1). Pomiar powinien być wykonywany w takich od-



Rys. 1. Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej detektora

stępach czasu, aby detektor mógł osiągnąć stan równowagi przy każdej wartości napięcia polaryzacji. Zarejestrować należy zarówno punkty odpowiadające stopniowo rosnącemu, jak i stopniowo malejącemu napięciu polaryzacji. Zmiany napięcia powinny być dokonywane dostatecznie wolno, aby ujawnić ewentualne efekty histerezy.

6. CHARAKTERYSTYKI POJEMNOŚCIOWO-NAPIĘCIOWE

Pojemność detektora w funkcji jego napięcia polaryzacji może być zmierzona za pomocą mostka w. cz. Mostek powinien pracować w zakresie częstotliwości 10^5 Hz do 10^6 Hz. Przy wszystkich wartościach przyłożonego napięcia polaryzacji wartość międzyszczytowa sygnału zmiennego przyłożonego do detektora nie może przekraczać większej z dwu wartości: 10% stałego

napięcia polaryzacji lub 10% napięcia odpowiadającego przerwie energetycznej. Należy przy tym zarejestrować temperaturę detektora, napięcie polaryzacji i parametry otoczenia. Charakterystyki pojemnościowo-napięciowe należy wykreślać w układzie współrzędnych logarytmicznych.

7. POMIARY SZUMÓW

7.1. Pomiar szumów metodą rozkładu amplitudy impulsów (metoda preferowana)

7.1.1. Detektor jest połączony z przedwzmacniaczem ładunkowym, wzmacniaczem podstawowym i wielokanałowym analizatorem amplitudy, zgodnie z rys. 2. Stałe czasowe formowania impulsu we wzmacniaczu powinny być ustalone na $1 \mu s$ w przypadku formowania na układzie RC-CR. Dopuszczalne jest stosowanie innych rodzajów formowania dogodnych dla detektora, ale wówczas należy dokładnie sprecyzować charakterystykę formowania.

Do wejścia przedwzmacniacza jest dołączony kalibrowany kondensator C_c połączony szeregowo z precyzyjnym generatorem impulsów. Zaleca się, aby kondensator C_c miał trzy wyprowadzenia, przy czym pojemność jest mierzona między dwoma odizolowanymi wyprowadzeniami, a trzecie wyprowadzenie służy do uziemienia. Pojemność między dwoma odizolowanymi wyprowadzeniami może być zmierzona z dużą dokładnością za pomocą mostka pojemnościowego. Jest ona niezależna od połączeń z układami zewnętrznymi. Generator impulsów powinien wytwarzać sygnał o kształcie podanym na rys. 3, gdzie czas narastania t_r nie przekracza 20% stałej czasowej różniczkowania wzmacniacza podstawowego, a stała czasowa zaniku τ_d jest taka, że impuls V_g nie opada o więcej niż 2% w czasie równym stałej czasowej różniczkowania obwodu for-

mowania impulsu. Dodatkowo, zastępcza pojemność wejściowa przedwzmacniacza ładunkowego powinna być nie mniejsza niż $100 C_c$.

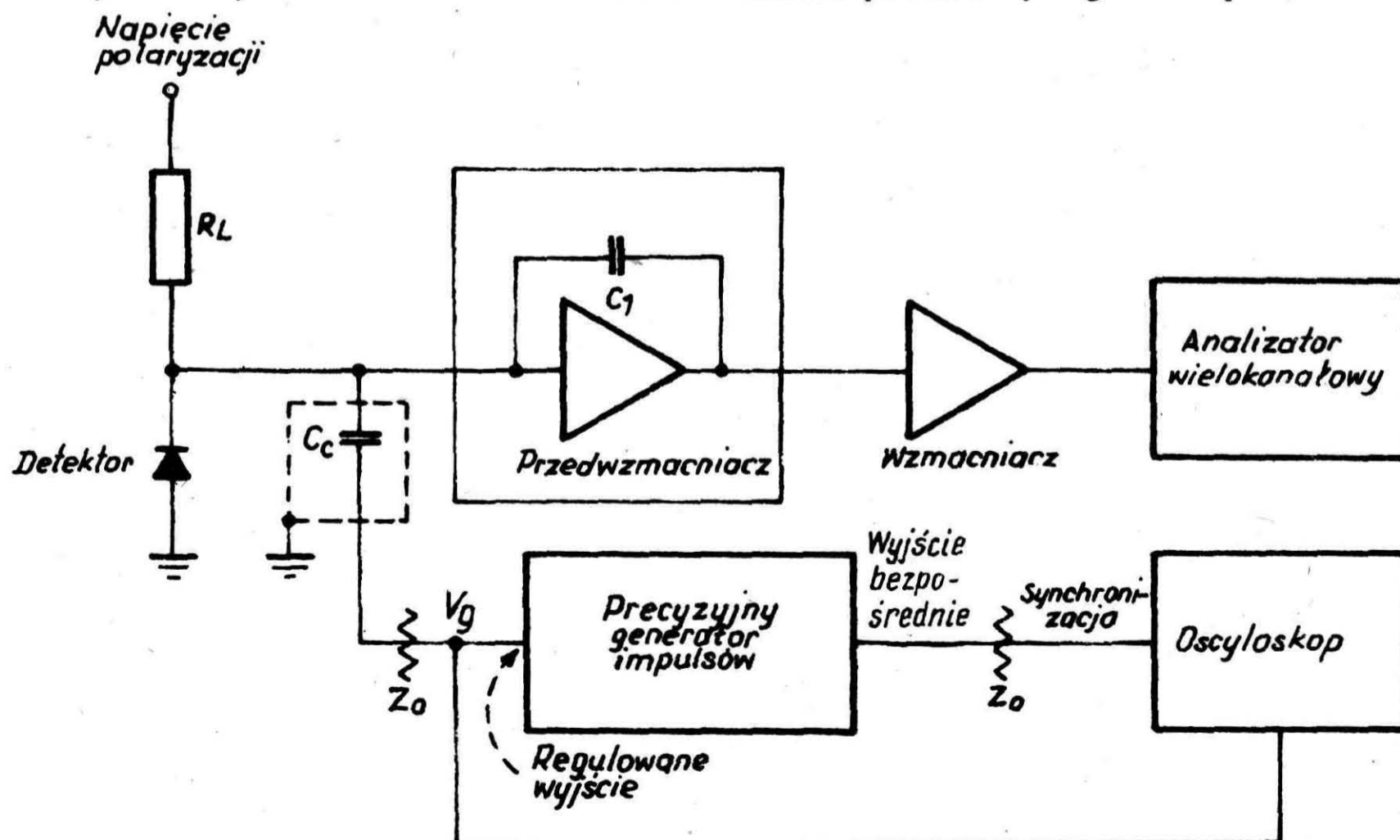
W tych warunkach ładunek wprowadzony przez impuls generatora wynosi $V_g C_c$ kulombów z dokładnością około 1%. (Jeżeli podane powyżej warunki nie są spełnione, można wykonać obliczenie w celu określenia ilości ładunku wprowadzonego przez impuls). Gdy wszystkie elementy układu pracują w swoich zakresach liniowych, dwa ustawienia generatora impulsów odpowiadające napięciu V_{g1} i V_{g2} powinny spowodować pojawienie się widma składającego się z dwu rozdzielonych pików w położeniach odpowiadających kanałom N_1 i N_2 , tak jak pokazano na rys. 4. Wzmocnienie układu i amplitudy impulsów powinny być takie, aby szerokość połowkowa każdego pików (*FWHM*) wynosiła przynajmniej pięć kanałów.

Całkowity wkład szumów układu do szerokości połowkowej (*FWHM*) ΔQ_T wyrażony w kulombach określa się wzorem

$$\Delta Q_T = \frac{V_{g1} - V_{g2}}{N_1 - N_2} C_c \cdot \Delta N_T$$

gdzie ΔN_T określone jest na podstawie szerszego z dwu maximów.

Wkład szumów układu wzmacniającego do szerokości połowkowej (*FWHM*) ΔQ_E może być znaleziony na podstawie podobnych pomiarów po odłączeniu detektora od układu pokazanego na rys. 2 i zastąpieniu go kondensatorem o niskiej upływności z miki, ceramicznym o zerowym współczynniku temperaturowym lub powietrznym, którego pojemność jest w zasadzie równa pojemności detektora w uprzednio opisanych warunkach pomiarowych (procedura pomiaru pojemności detektora powinna być zgodna z p. 6).



BN-80/3411-21-2

Rys. 2. Pomiar szumów metodą rozkładu wysokości impulsów

Wkład detektora do szerokości połówkowej (*FWHM*) ΔQ_D w kulombach określa się wzorem

$$\Delta Q_D = \sqrt{\Delta Q_T^2 - \Delta Q_E^2}$$

7.1.2. Ładunek wprowadzany przez impuls generatora może być również określony przez zastosowanie źródła promieniowania o znanych energiach E_1 i E_2 zamiast określania wielkości V_g , C_c . W celu otrzymania rozkładu amplitud impulsów podobnego do pokazanego na rys. 4 stosuje się następnie procedurę opisaną powyżej.

Jeżeli kanał N_1 został uprzednio przyporządkowany zdarzeniom o energii E_1 , a kanał N_2 — zdarzeniom o energii E_2 (obie wyrażone w keV), to całkowity wkład szumów układu do szerokości połówkowej (*FWHM*) w keV może być określony z obserwowanej szerokości połówkowej szerszego maksimum ΔN_T jako

$$\Delta E_T = \frac{E_1 - E_2}{N_1 - N_2} \cdot \Delta N_T$$

Podobnie określić można wkład szumów układu wzmacniającego do szerokości połówkowej (*FWHM*) w keV, ΔE_E z całkowitego wkładu szumów układu do szerokości połówkowej zmierzonego w nieobecności detektora.

Wkład detektora do szerokości połówkowej (*FWHM*) ΔE_D w keV jest wówczas dany przez

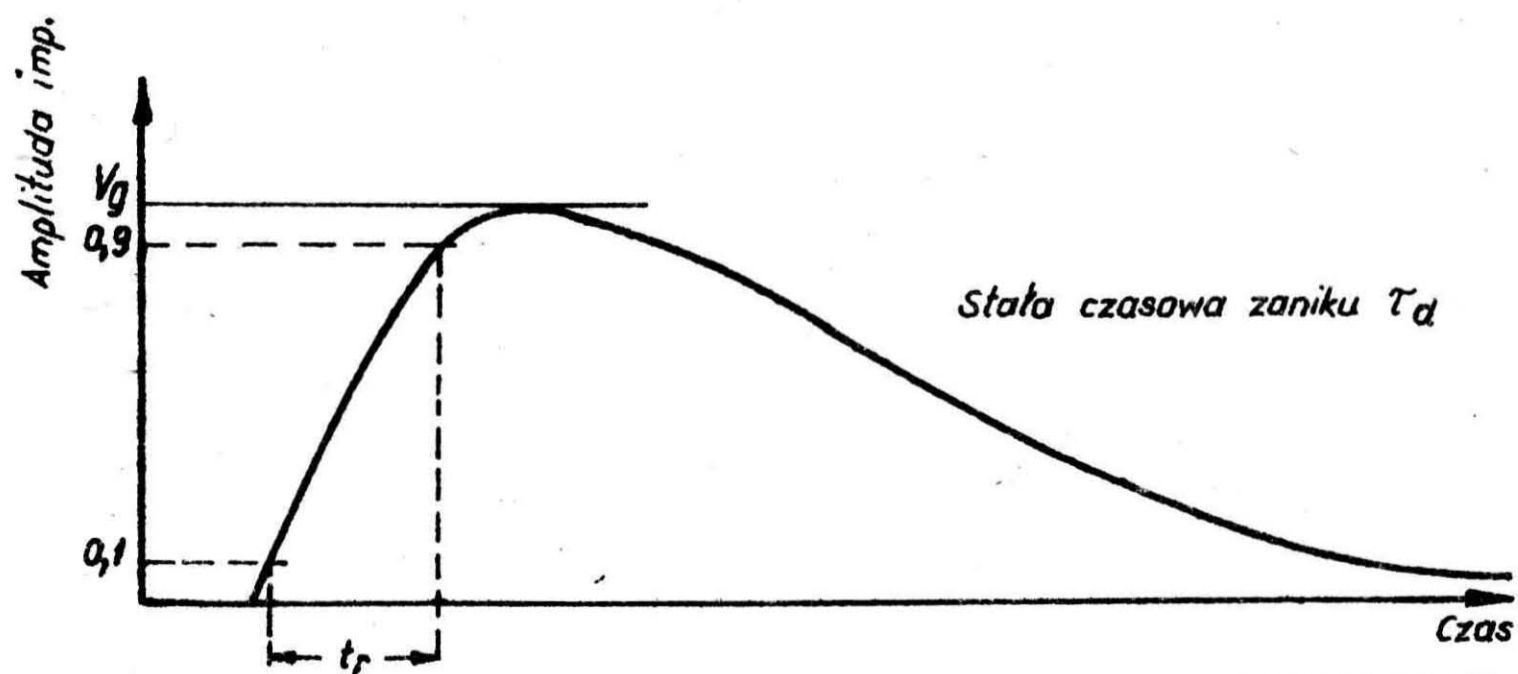
$$\Delta E_D = \sqrt{\Delta E_T^2 - \Delta E_E^2}$$

Aby określenie ΔQ_D (lub ΔE_D) było znaczące, ΔQ_T (lub ΔE_T) i ΔQ_E (lub ΔE_E) muszą różnić się co najmniej o 20%. Następnie należy sporządzić wykres ΔQ_D (lub ΔE_D) w funkcji napięcia polaryzacji i podać warunki zewnętrzne oraz temperaturę detektora.

7.2. Pomiar szumów za pomocą oscyloskopu i woltomierza wartości skutecznej. Pomiar szumów może być również wykonany za pomocą układu pokazanego na rys. 5. Układ ten jest podobny do układu pokazanego na rys. 2, z tym że analizator wielokanałowy jest zastąpiony przez woltomierz wartości skutecznej. Warunki pomiarowe podlegają tym samym ograniczeniom co poprzednio.

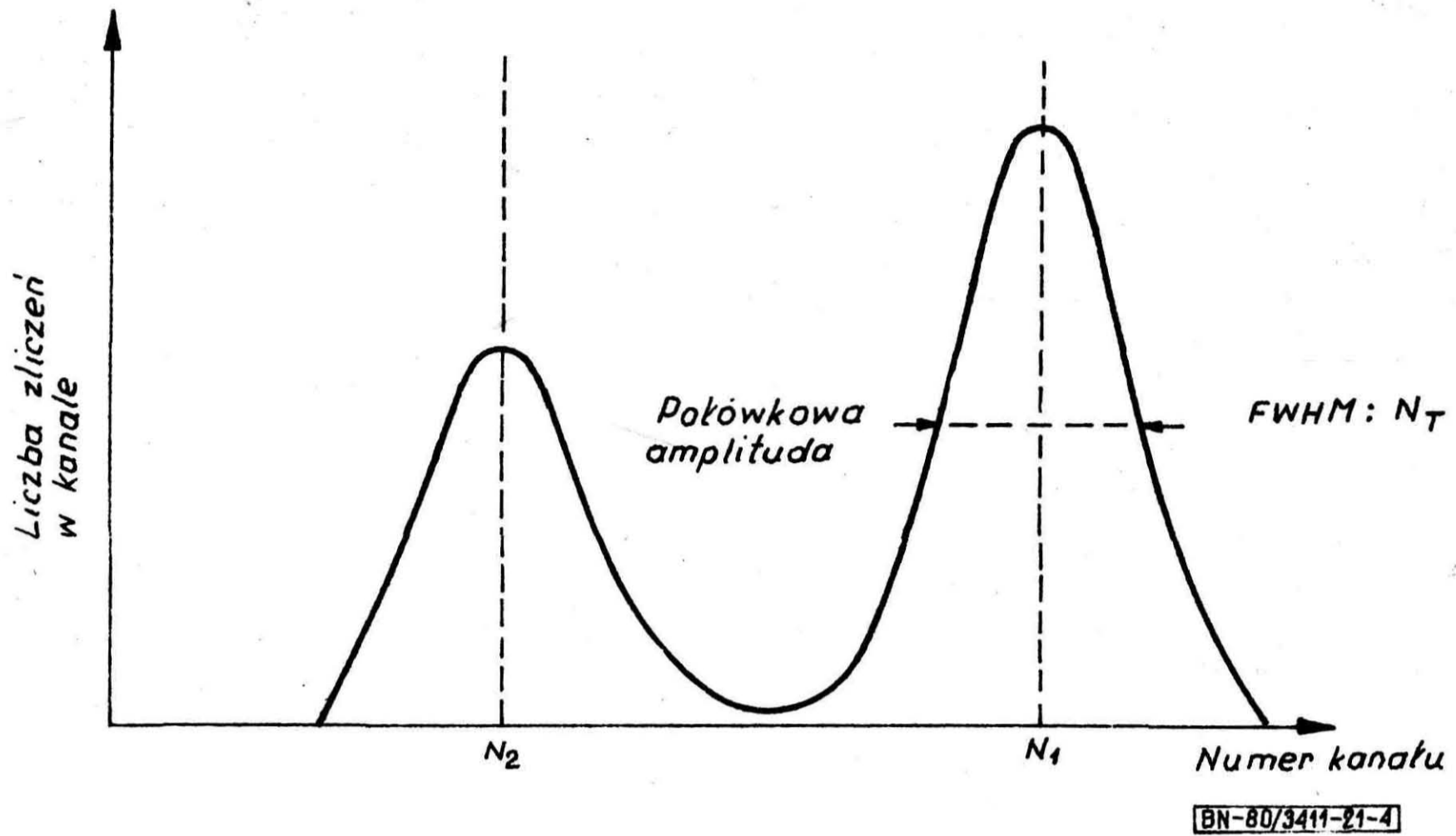
Na wejście układu przedwzmacniacza podaje się impuls ładunkowy, a amplituda wywołanego w ten sposób impulsu wyjściowego V_a jest mierzona za pomocą oscyloskopu. Następnie włącza się generator impulsów i mierzy napięcie skuteczne szumów e_{no} za pomocą woltomierza. Całkowity wkład szumów układu do szerokości połówkowej (kulomby *FWHM*) określony jest wzorem

$$\Delta Q_T = 2,355 V_g C_c \frac{e_{no}}{V_a}$$

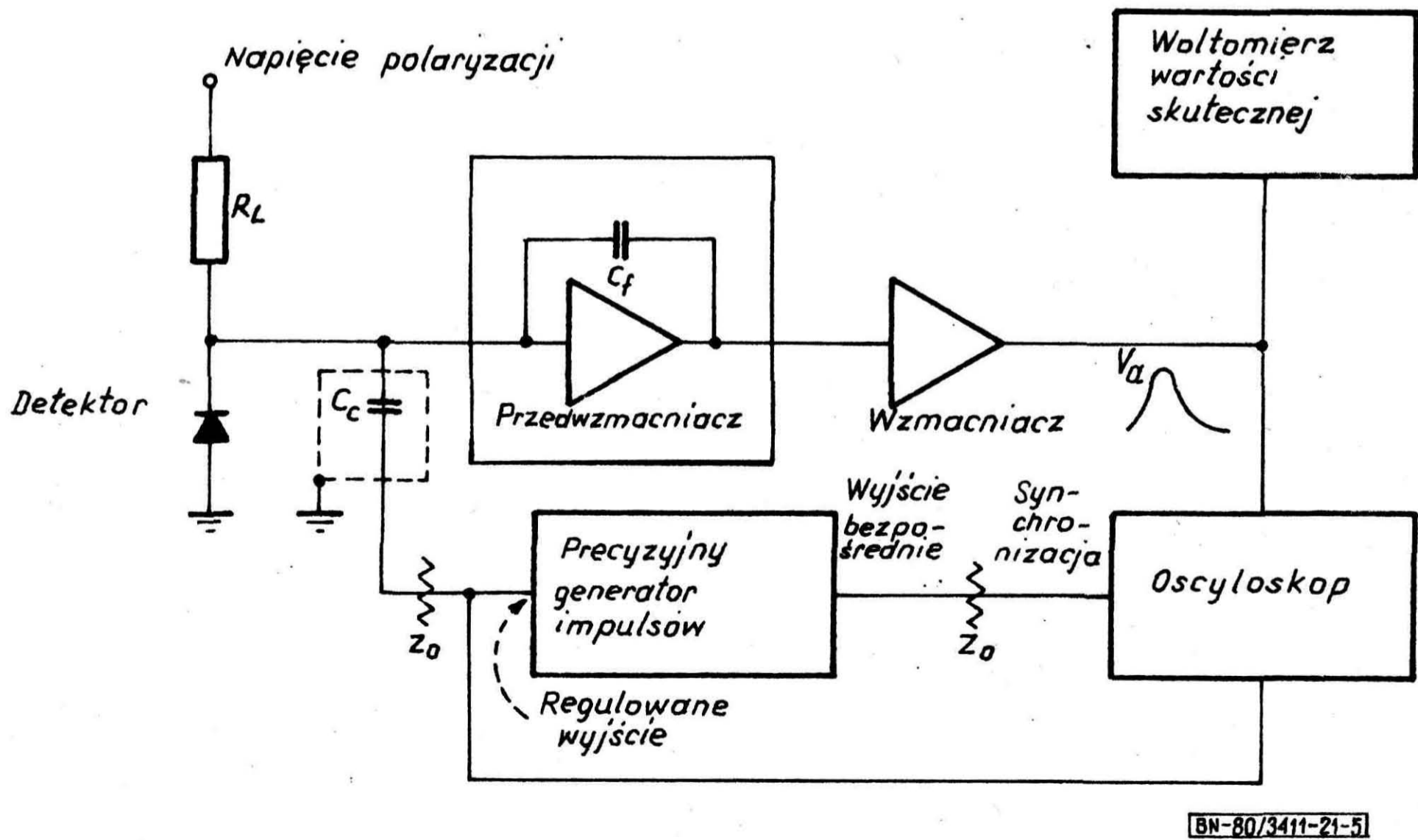


BN-80/3411-21-3

Rys. 3. Kształt impulsu z precyzyjnego generatora impulsów



Rys. 4. Typowe widmo wysokości impulsów w pomiarze szumów



Rys. 5. Pomiar szumów za pomocą oscyloskopu i woltmierza wartości skutecznej

Następnie detektor może być zastąpiony przez równoważny kondensator w sposób identyczny do opisanego w p. 7.1, co umożliwi określenie ΔQ_E i stąd ΔQ_D .

Metoda ta jest znacznie dogodniejsza w stosowaniu od metody opisanej w p. 7.1 i jest równie dokładna pod warunkiem spełnienia dwu wymagań:

— Woltomierz musi mieć płaską charakterystykę częstotściową w zakresie pełnej szerokości pasma przeniesienia wzmacniacza i umożliwiać odczyt rzeczywistej wartości skutecznej (zalecana minimalna szerokość pasma przeniesienia wynosi 10 MHz przy 3 dB).

— Różniczkowe wzmocnienie wzmacniacza musi być stałe w zakresie wartości znacznie poniżej poziomu szumów, co wyklucza możliwość zastosowania wzmacniacza spolaryzowanego.

Zarówno w przypadku metody opisanej w p. 7.1, jak i w p. 7.2 istotne jest, aby detektor znajdował się w całkowitej ciemności. W przeciwnym przypadku otrzymać można błędnie zawyżoną wartość szumów.

Udział detektora może być wyrażony również w keV (równoważnik dla krzemu lub germanu). Wzory przeliczeniowe mają postać

a) dla krzemu w keV

$$FWHM = 2,25 \cdot 10^{16} \Delta Q$$

b) dla germanu w keV

$$FWHM = 1,86 \cdot 10^{16} \Delta Q$$

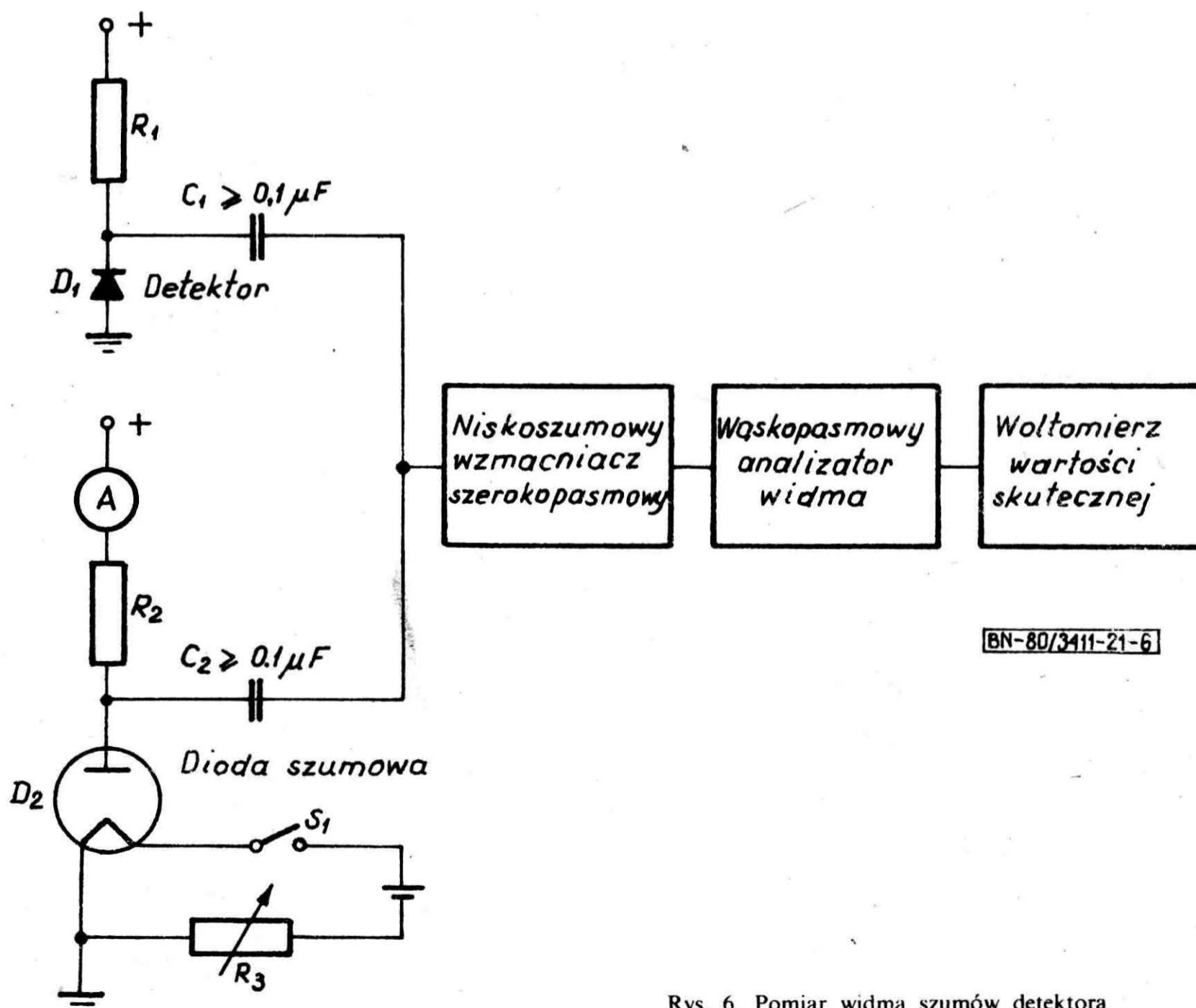
gdzie ΔQ odpowiada $FWHM$ w kulombach. Liczby te odpowiadają średniej wartości energii potrzebnej do wytworzenia pary elektron-dziura i wynoszącej 3,60 eV w krzemie (w temperaturze pokojowej) i 2,97 eV w ger-

manie (w temperaturę ciekłego azotu). Ponieważ te średnie wartości zmieniają się nieco w zależności od temperatury i rodzaju promieniowania, przy podawaniu $FWHM$ w keV należy określić przyjmowaną wartość elektronowoltów na parę elektron-dziura.

7.3. Całkowity wkład szumów układu do szerokości połówkowej ($FWHM$) jako funkcja stałych czasowych wzmacniacza. Dane dotyczące widma szumowego prądu upływu detektora można otrzymać przez wykreślenie całkowitego wkładu szumów układu do szerokości połówkowej ($FWHM$) jako funkcji stałych czasowych wzmacniacza. W celu przeprowadzenia takiego pomiaru stosuje się metodę wg 7.1 z układem formowania impulsu składającym się z jednego układu różniczkującego CR o stałej czasowej T_1 i jednego układu całkującego RC o stałej czasowej T_2 , przy czym obie stałe mogą być regulowane.

Pomiar polega na ustawieniu $T_1 = T_2 = T$ i wykreśleniu całkowitego wkładu szumów układu do szerokości połówkowej ($FWHM$) w funkcji T dla szeregu wartości napięcia polaryzacji detektora. Przy cytowaniu rezultatów należy podawać wartość szeregowej oporności równoważnej szumów wejścia przedwzmacniacza wg BN-78/3411-15.

7.4. Widmo szumów detektora. Widmo szumów prądu upływu detektora może być badane przy użyciu układu pokazanego na rys. 6. W układzie tym szum detektora D_1 jest porównywany z szumem diody D_2 stanowiącej wzorcowy generator szumów.



BN-80/3411-21-6

Rys. 6. Pomiar widma szumów detektora

Porównanie to wykonywane jest dla szeregu pasm częstotliwości wybieranych przez wąskopasmowy analizator widma. W tym celu jest niezbędne poprzedzenie analizatora widma niskoszumowym wzmacniaczem szerokopasmowym, aby upewnić się, że badana dioda jest dominującym źródłem szumów w układzie.

W każdym paśmie częstotliwości rejestruje się wartość skuteczną napięcia wyjściowego V_1 dla danej wartości napięcia polaryzacji detektora. Następnie zamyka się obwód przełącznikiem S_1 i reguluje wartość R_3 tak, aby wskazania woltomierza napięcia skutecznego wzrosły o 41%, po czym rejestruje się wynikający z tej regulacji prąd diody szumowej I_0 jako reprezentujący równoważny prąd upływu białego szumu w badanym paśmie częstotliwości.

Przy zestawianiu układu pomiarowego pokazanego na rys. 6 istotne jest, aby oporniki R_1 i R_2 zostały odpowiednio dobrane na podstawie następujących rozważań.

Przy założeniu, że prąd upływu diody I_d ma białe widmo szumów, odpowiadający mu średni kwadratowy prąd szumowy \bar{i} dany jest przez

$$\bar{i}^2 = 2qI_d\Delta f$$

gdzie:

q — ładunek elektronu,

Δf — szerokość pasma układu.

Z drugiej strony opornik o wartości R omów generuje w temperaturze T średnie kwadratowe napięcie szumów Johnsona dane przez

$$\bar{V}^2 = 4hTR\Delta f$$

gdzie:

h — stała Boltzmanna,

T — temperatura bezwzględna.

Ponieważ $\bar{i}^2 = \frac{\bar{V}^2}{R^2}$, to:

$$RI_d = \frac{2hT}{q}, \text{ co oznacza,}$$

że jeżeli spadek napięcia na oporniku obciążenia, wy-

wołany przepływem prądu diody wynosi $\frac{2hT}{q}$ (około

50 mV w temperaturze pokojowej), to przyczynki pochodzące od szumu śrutowego i szumu Johnsona są równe. Po to, aby udział szumu Johnsona był zaniedbywalny w porównaniu do szumu prądu upływu I_d , należy wybrać wartość R_1 w taki sposób, aby spadek napięcia stałego na tym oporniku był znacznie większy niż 50 mV (np. około 1 V) przy wszystkich wartościach prądu pracy. Dogodnie jest wybrać $R_2 = R_1$.

Dodatkowo istotne jest, aby oporniki R_1 i R_2 nie generowały istotnego szumu nadmiarowego przy przepływie przez nie prądu. Jest to łatwe do osiągnięcia, gdy bada się detektory o dużej upływności, np. gdy I_d wynosi około 1 μ A, wartości R_1 i R_2 mogą być nie większe niż 2 M Ω i mogą to być oporniki metalizowane, co do których wiadomo, że wykazują pomijalny szum nadmiarowy.

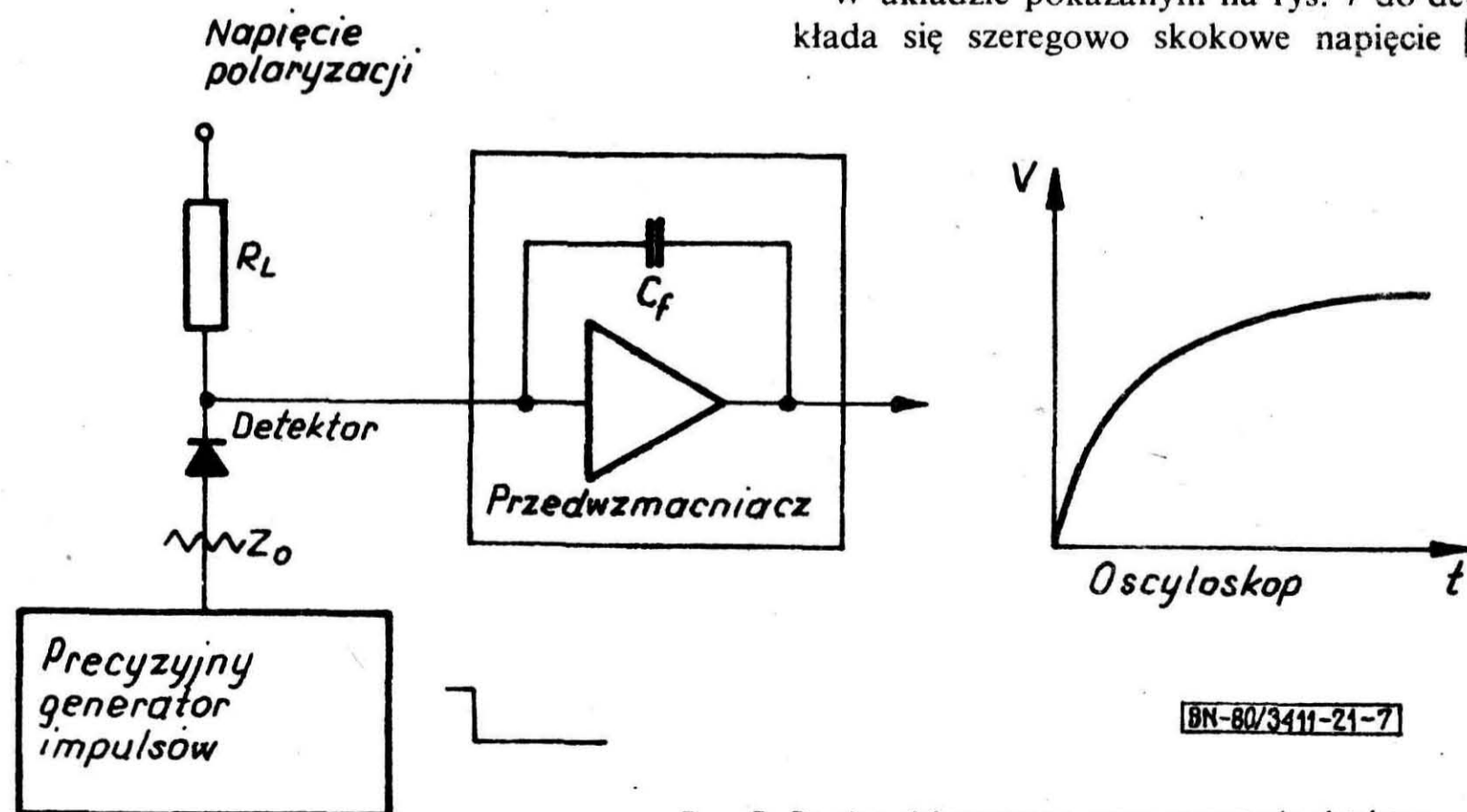
Jednakże w przypadku detektora o małej upływności mogą być wymagane bardzo wysokie wartości oporników (setki megaomów). Należy wówczas dokonywać selekcji oporników dla uzyskania małego szumu i sprawdzać je przez zastępowanie D_1 przez R_2 i rejestrowanie pojawienia się szumu nadmiarowego przy przyłożeniu napięcia polaryzacji. (Podobne uwagi dotyczą oczywiście wyboru opornika obciążenia dla jakiegokolwiek niskoszumowego układu detektor-przedwzmacniacz).

Dane o widmie szumowym detektora powinny być wykreślone w układzie współrzędnych logarytmicznych jako rodzina krzywych I_0 w funkcji f_n , gdzie f_n jest środkową częstotliwością w każdym przedziale. Każda krzywa odpowiada jednej wartości napięcia polaryzacji detektora. Aby rezultaty miały największą przydatność konieczne jest, aby całkowita pojemność rozproszona C_T bocznikująca diodę detektora była jak najmniejsza.

Przy podawaniu rezultatów należy podawać wartości C_1 , C_2 , R_1 , R_2 i C_T , jak również wszystkie inne istotne informacje, takie jak: rezultaty uzyskane wg 5 i 6.

8. CZAS NARASTANIA SYGNAŁU Z DETEKTORA

W układzie pokazanym na rys. 7 do detektora przykłada się szeregowo skokowe napięcie $|V_{gr}|$ woltów.



Rys. 7. Pomiar elektrycznego czasu narastania detektora

Wartość V_g nie może przekraczać większej z dwu wartości: jednej dziesiątej napięcia odpowiadającego przerwie energetycznej lub jednej dziesiątej napięcia polaryzacji. Czas narastania sygnału wyjściowego z przedwzmacniacza, z poprawką na czas narastania sygnału w przedwzmacniaczu t_p jest definiowany jako czas narastania sygnału z detektora.

9. CZUŁOŚĆ NA WARUNKI ZEWNĘTRZNE

Detektor powinien być umieszczony w odpowiednim pojemniku i poddany działaniu środowiska przewidzianego w odpowiednich wymaganiach: próżnia, suchy tlen (warunki normalne), azot nasycony parą wodną (warunki normalne) itp. W każdym przypadku należy przeprowadzać próby po czasie dostatecznie długim, aby charakterystyki detektora osiągnęły stan ustalony.

Czas, w którym detektor przebywał w każdym środowisku, powinien być zarejestrowany.

Pomiary określające czułość na światło powinny być wykonane w układach pokazanych na rys. 2 lub rys. 5.

10. BADANIA MECHANICZNE I KLIMATYCZNE

Badania te należy wykonywać zgodnie z PN-71/T-06500.06 i 07. Po poddaniu detektorów określonym próbom mechanicznym, cieplnym i klimatycznym, powinny one zostać poddane ponownie badaniom wg p. 5, 6 i 9 oraz 7.1 i 7.2.

W pewnych przypadkach, np. długotrwałego przebywania detektora w warunkach próżniowych, może okazać się konieczne przeprowadzenie badań elektrycznych zarówno podczas przebywania w próżni, jak i przed, i po nim.

ROZDZIAŁ II — CHARAKTERYSTYKA DETEKcji PROMIENIOWANIA

11. OKREŚLENIE WARSTWY MARTWEJ

Wykorzystując układ pokazany na rys. 2 i źródło monoenergetycznych ciężkich cząstek naładowanych o zasięgu równym co najmniej podwójnej grubości okienka, otrzymuje się widmo energetyczne cząstek. Strumień cząstek powinien być skolimowany w półkącie nie przekraczającym 5° i skierowany prostopadle do powierzchni detektora. Następnie obraca się detektor o kąt θ i otrzymuje ponownie widmo. Wykorzystując wzorcowy generator impulsów, określić można kanał odpowiadający zeru energii wielokanałowego analizatora, a stąd różnicę energii ΔE między obydwoma widmami. Grubość warstwy martwej określić można albo w mg/cm^2 , jeżeli korzysta się ze znanych zależności energia-zasięg dla danych cząstek, albo jako określoną stratę energii dla cząstek stosowanych w badaniach.

Jeżeli strata energii na jednostkę drogi w warstwie martwej jest w zasadzie stała, grubość warstwy martwej można określić wg wzoru

$$\text{grubość warstwy martwej} = \Delta E \frac{\cos\theta}{1-\cos\theta} \frac{1}{dE/dx}$$

w którym:

ΔE — różnica energii,

θ — kąt odchylenia detektora od prostopadłego kierunku padania cząstek (zalecana wartość $\theta = 45^\circ$),

dE/dx — strata energii na jednostkę długości.

Grubość warstwy martwej w mg/cm^2 otrzymuje się, mnożąc tę wartość przez gęstość ρ . Ponieważ grubość warstwy martwej może zależeć od napięcia polaryzacji detektora, napięcie to powinno być każdorazowo określone.

W detektorach typu transmisyjnego pomiar powinien być przeprowadzony zarówno dla powierzchni wejściowej, jak i wyjściowej. Metodę stosuje się tylko do detektorów cząstek naładowanych, w których grubość warstwy zubożonej przewyższa zasięg cząstek padających, a energetyczna zdolność rozdzielcza jest wystarczająco wysoka.

W przypadku detektorów promieniowania gamma i rentgenowskiego, efektywna warstwa martwa może być scharakteryzowana przy użyciu metody wg p. 14 określającej całkowitą wydajność absorpcji w funkcji energii dla niskoenergetycznego promieniowania gamma i rentgenowskiego. W takim przypadku należy także podać absolutną wydajność całkowitej absorpcji promieniowania gamma o wyższej energii.

12. POWIERZCHNIA CZYNNA DETEKTORÓW CZĄSTEK NAŁADOWANYCH

Metoda pomiaru polega na śledzeniu upływności detektora podczas oświetlania jego powierzchni małą plamką świetlną. Brzeg obszaru czynnego może być zdefiniowany jako granica, poza którą fotoprąd maleje o około 10%. Średnica plamki świetlnej powinna być mała w porównaniu z wymiarami powierzchni czynnej, a natężenie światła takie, aby fotoprąd był duży w porównaniu z prądem upływności. W przypadku detektorów z nieprzezroczystym oknem wejściowym brzeg obszaru czynnego może być znaleziony za pomocą skolimowanej wiązki monoenergetycznych ciężkich cząstek naładowanych przy zdefiniowaniu powierzchni czynnej, jako obszaru, poza którym szerokość połówkowa pików widmowych podwaja swoją wartość.

Oprócz metody wykreślnej, powierzchnia czynna detektora może być wyznaczona przez umieszczenie go w znanym strumieniu promieniowania jonizującego

i pomiarze wydajności zliczeń wynikającej z geometrii układu. Ponieważ rozpraszanie może powodować błędne wyniki w przypadku promieniowania gamma i elektronów wysokoenergetycznych, to typ, energia i kierunek promieniowania powinny być sprecyzowane, a zewnętrzne rozpraszanie sprowadzone do minimum.

13. POMIAR GRUBOŚCI CZYNNEJ DETEKTORÓW CZĄSTEK NAŁADOWANYCH

Dokładny pomiar grubości czynnej może być wykonany przy użyciu skolimowanej wiązki monoenergetycznych ciężkich cząstek naładowanych. Grubość czynna detektora jest określona przez wyznaczenie zasięgu cząstek padających, poza którym pochodna krzywej amplitudy impulsu wyjściowego detektora w funkcji energii cząstek padających maleje o 10% w stosunku do zasadniczo stałej wartości przy niższych energiach.

Zalecana metoda polega na zarejestrowaniu całkowitego widma amplitudy impulsów (tj. nie tylko szerokości połówkowej) związanego z przejściem skolimowanej wiązki ciężkich cząstek naładowanych o zasięgu znacznie przekraczającym grubość detektora. Wiązka powinna być dobrze skolimowana, a określeniu podlegają zarówno zakres kątów padania, dla których otrzymuje się identyczne widma, jak i kątowa rozbieżność wiązki padającej.

W niniejszej normie opisano tylko takie pomiary grubości czynnej, które mogą być wykonane w sposób nie niszczący na gotowych urządzeniach. W trakcie procesu produkcyjnego możliwe mogą być prostsze procedury pomiarowe.

14. WYDAJNOŚĆ DETEKTORA PROMIENIOWANIA GAMMA

Oddziaływanie promieniowania gamma z materiałem jest skomplikowanym procesem obejmującym co najmniej trzy rodzaje oddziaływań, a mianowicie: efekt fotoelektryczny, efekt Comptona i wytwarzanie par. Oddziaływania te w wyraźnie różny sposób zależą od energii i liczby atomowej. Biorąc dodatkowo pod uwagę, że pełny mechanizm oddziaływania obejmuje również istotny udział licznych procesów kaskadowych, staje się jasne, że badanie wydajności detekcji promieniowania gamma może być trudnym problemem.

Wydajność detekcji pików całkowitej absorpcji powinna być określona dla jednej lub kilku energii promieniowania gamma. Zastosowane źródła powinny mieć znaną aktywność i wykazywać dobrze zaznaczone przejścia gamma. Dogodne z tego punktu widzenia izotopy to: ^{57}Co (122 keV i 136keV), ^{137}Cs (661 keV) ^{60}Co (1,17 MeV i 1,33 MeV) i ^{208}Tl (2,61 MeV) (w nawiasie energia promieniowania gamma).

Odległość detektora od źródła powinna być nie mniejsza niż dziesięciokrotny maksymalny wymiar liniowy jego powierzchni czynnej i powinna być zarejestrowana. Po określonym okresie zliczeń przy użyciu układu pokazanego na rys. 2 wyznaczyć można

liczbę zliczeń w pikach całkowitej absorpcji. Wydajność detekcji w pikach całkowitej absorpcji, dla danej energii, powinna być podana jako procent strumienia gamma (fotony na sekundę) padającego na detektor.

W przypadku detektorów germanowych zostały przeprowadzone liczne obliczenia wydajności w pikach całkowitej absorpcji dla różnych geometrii i uzyskano doskonałą zgodność z obserwacjami eksperymentalnymi.

Pewne detektory wykazywać mogą znacznie niższą wydajność w pikach całkowitej absorpcji, niż to by wynikało z rozpatrzenia tylko geometrii ich obszarów zubożonych. Wynika to z faktu, że na skutek małych różnic w wydajności zbierania ładunku między poszczególnymi obszarami detektora część zliczeń nie wchodzi do pików całkowitej absorpcji i nakłada się na niskoenergetyczny obszar tego pików.

Obudowa, uchwyt i szczegółowa geometria detektora grają także ważną rolę.

W związku z tym należy rozważyć dwa czynniki: po pierwsze, istnienie oddziaływań gamma w ściankach, okienkach i wszystkich nieczynnych obszarach detektora, a po drugie — prawdopodobieństwo ucieczki wysokoenergetycznych elektronów wtórnych z obszaru zubożonego. Oba rodzaje procesów powodują degradację widma, ponieważ powodują wzrost tła ciągłego bez jakiegokolwiek wzrostu pików całkowitej absorpcji.

Ten aspekt działania detektora może być oszacowany na podstawie stosunku liczby zliczeń pod pikami całkowitej absorpcji do całkowitej liczby zliczeń w widmie wytworzonym przez monoenergetyczną linię gamma o znanej energii. Przy podawaniu tego parametru istotne jest, aby podać również przy jakiej wartości energii dokonano obcięcia niskoenergetycznej części widma potrzebnego do obliczenia.

Jak wynika z powyższego, przy rejestrowaniu rezultatów wydajności zliczania fotonów gamma jest istotne podanie nie tylko energii promieniowania gamma, ale również wszystkich szczegółów pomiaru, nominalnych wymiarów obszaru zubożonego, orientacji, odległości od źródła, szczegółów zamontowania kryształu, grubości i materiału okna itp. Informacje te są szczególnie istotne przy podawaniu wartości stosunku absorpcji w pikach do całkowitej absorpcji.

15. CZAS ZBIERANIA ŁADUNKU W DETEKTORACH CZĄSTEK NAŁADOWANYCH

Bezpośredni pomiar czasu zbierania ładunku t_c dla nośników ładunku jednego znaku w stosunkowo wolnych detektorach może być wykonany przy użyciu monoenergetycznego źródła cząstek o małym zasięgu poprzez obserwację impulsu sygnałowego bezpośrednio na wyjściu przedwzmacniacza całkowitego.

Jeżeli czas narastania impulsu wyjściowego od 10 do 90% wynosi t_0 , a czas narastania obserwowany przy wprowadzaniu na wejście przedwzmacniacza impulsów bezpośrednio z precyzyjnego generatora impulsów wynosi t_p , to czas zbierania ładunku w detektorze wynosi

$$t_c = \sqrt{t_o^2 - t_p^2}$$

Aby pomiar taki był wiarygodny, t_o i t_p muszą różnić się co najmniej o 20%.

Odpowiedź szybkiego detektora może być zmierzona najłatwiej przy użyciu impulsowego akceleratora lub impulsowego źródła światła wytwarzającego w detektorze dużą liczbę par elektron-dziura i pomiaru wytworzonego impulsu prądowego bezpośrednio przy użyciu oscyloskopu próbkującego.

W każdym przypadku niezbędne jest określenie czasu narastania sygnału detektora (p. 8) przez niezależny pomiar i rozróżnienie jego wpływu od wpływu nośników w warstwie zubożonej.

Dane odnoszące się do zbierania ładunku powinny zawierać szczegółową informację o naturze padającego promieniowania, orientacji i położeniu toru oraz czasie narastania wzmacniacza.

16. ROZDZIELCZOŚĆ WIDMOWA

Pomiary rozdzielczości widmowej są wykonywane przy użyciu układu pokazanego na rys. 2 i z zastosowaniem źródła promieniowania jonizującego emitującego jedną lub więcej wyraźnie zaznaczonych linii monoenergetycznych. Rzeczywisty punkt zerowej energii widma energetycznego znajdujący się jest za pomocą precyzyjnego generatora impulsów, a stąd określa się energetyczną szerokość połówkową w keV odpowiadającą obserwowanej szerokości połówkowej $FWHM$. Szerokość połówkowa powinna wynosić co najmniej pięć kanałów. Wykonując pomiary rozdzielczości widmowej należy określić:

- 1) rodzaj i energię padających cząstek,
- 2) geometrię układu źródło-detektor, w tym powierzchnię, na którą pada promieniowanie,
- 3) szczegółowy opis detektora,
- 4) warunki pracy detektora (polaryzacja, temperatura, środowisko zewnętrzne),
- 5) całkowity wkład szumów układu do szerokości połówkowej dla układu zawierającego detektor w normalnych warunkach pracy,
- 6) parametry formowania impulsu we wzmacniaczu.

Jeżeli ΔN_S oznacza szerokość połówkową (w kanałach) obserwowaną dla danego piku widmowego, a ΔN_E jest udziałem układu wzmacniającego w szerokości połówkowej zarejestrowanym za pomocą generatora impulsów z detektorem zastąpionym przez równoważny kondensator wg 7.1, to udział detektora w szerokości połówkowej dla danego piku wynosi

$$\Delta N_D = \sqrt{\Delta N_S^2 - \Delta N_E^2}$$

Aby pomiar ten był wiarygodny, ΔN_S i ΔN_E muszą różnić się o co najmniej 20%.

Jak wspomniano poprzednio, rezultat ten może być również wyrażony w równoważnej energii. W przypadku detektorów transmisyjnych może być niezbędne wykonanie powyższych pomiarów dla obu powierzchni.

Innym interesującym parametrem jest ΔN_O , który określa udział wnoszony do szumu detektora przez wszystkie czynniki, inne niż szum elektryczny. Wielkość tę można znaleźć na podstawie pomiaru całkowitego wkładu szumów układu do szerokości połówkowej ($FWHM$) ΔN_T z przyłączonym detektorem (jak w 7.1) i wyrazić wzorem

$$\Delta N_O = \sqrt{\Delta N_S^2 - \Delta N_T^2}$$

Szerokość połówkowa wyrażona w kanałach powinna być podana w eV lub keV.

Należy zauważyć, że graniczna rozdzielczość otrzymana na podstawie rozważań statystycznych dana jest w keV przez

$$FWHM = 2,355 \sqrt{FE\epsilon}$$

gdzie:

- E — energia cząstek, [MeV],
- ϵ — średnia energia w eV wytworzenia pary elektron-dziura (3,60 dla krzemu w temperaturze pokojowej, 2,97 dla germanu w temperaturze ciekłego azotu),
- F — współczynnik Fano, $0 < F < 0,15$.

17. POMIARY USZKODZEŃ RADIACYJNYCH

Po silnym napromienieniu wszystkie wymienione własności mogą zmienić się i może okazać się niezbędne powtórzenie pomiarów. Aby otrzymać znaczące dane, należy zarejestrować:

- rezultaty pomiarów otrzymane przed napromienieniem,
- rodzaj promieniowania jonizującego, gęstość strumienia cząstek w funkcji czasu i całkowitą dawkę,
- temperaturę detektora, napięcie polaryzacji i warunki zewnętrzne podczas napromienienia,
- czas między zakończeniem napromienienia i rozpoczęciem pomiarów oraz warunki, w jakich znajdował się detektor w tym czasie.

K O N I E C

INFORMACJE DODATKOWE

1. Instytucja opracowująca normę — Instytut Badań Jądrowych
BON Aparatury Jądrowej.

2. Normy związane

PN-74/J-01003.02 Technika jądrowa. Nazwy i określenia. Wielkości i jednostki

PN-74/J-01003.08 Technika jądrowa. Nazwy i określenia. Detektory promieniowania jonizującego

PN-75/T-06500.06 Elektroniczne przyrządy pomiarowe. Wymagania i badania klimatyczne

PN-75/T-06500.07 Elektroniczne przyrządy pomiarowe. Wymagania i badania mechaniczne

BN-78/3411-15 Urządzenia elektroniczne dla techniki jądrowej. Przedwzmacniacze ładunkowe dla spektrometrycznych detektorów półprzewodnikowych. Metody badań parametrów podstawowych

3. Zalecenia międzynarodowe

Publikacja IEC 333 Test procedures for semiconductor detectors for ionizing radiation

IEC 596 Definitions of test method terms for semiconductor radiation detectors and scintillation counting

4. Autor projektu normy — dr hab. Zbigniew Werner, Instytut Badań Jądrowych.