

Wykład 8

1. Klasyfikacja detektorów promieniowania elektromagnetycznego

Poniżej w tabeli I przedstawiono klasyfikację detektorów promieniowania elektromagnetycznego. Ten podział detektorów opiera się na różnych sposobach oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią. Przede wszystkim więc rozróżnia się detektory działające w oparciu o zjawiska: 1) fotonowe, 2) termiczne i 3) falowe.

1. Zjawiska fotonowe

1.1. Zjawiska fotonowe wewnętrzne

1.1.1. Wzbudzenie nadmiarowych nośników

1.1.1.1. Fotoprzewodnictwo samoistne, domieszkowe

Zasilanie mikrofalowe

1.1.1.2. Zjawisko fotowoltaiczne Złącze *p-n*

Fotodiody lawinowa

Złącze *p-i-n*

Złącze Schottky'ego

Heterozłącze

Objętościowe zjawisko fotowoltaiczne

1.1.1.3. Zjawisko fotomagnetoelektryczne

1.1.1.4. Zjawisko Dembera

1.1.1.5. Fototranzystor

1.1.2. Oddziaływanie z nośnikami swobodnymi

1.1.2.1. Photon – drag

1.1.2.2. Bolometr na gorących nośnikach

1.1.2.3. Detektor Putley'a

1.1.3. Oddziaływanie zlokalizowane

1.1.3.1. Kwantowy licznik podczerwieni

1.1.3.2. Fosfory

1.1.3.3. Film fotograficzny

1.2. Zjawiska fotonowe zewnętrzne (fotoemisyjne)

1.2.1. Fotokatody

1.2.1.1. Fotokatody konwencjonalne

1.2.1.2. Fotokatody z ujemnym powinowactwem elektronowym

1.2.2. Mechanizmy wzmacniające

1.2.2.1. Powielanie gazowe

1.2.2.2. Fotopowielacze

1.2.2.3. Powielanie kanałowe elektronów

2. Zjawiska termiczne

2.1. Bolometry

2.1.1. Termistorowe

2.1.2. Metalowe

2.1.3. Nadprzewodzące

2.1.4. Nadindukcyjne

2.1.5. Półprzewodnikowe (niskie temperatury)

2.2. Piroelektryczne

2.3. Termoelektryczne

2.4. Komórka Golaya

2.5. Detektor pneumatyczny z mikrofonem pojemnościowym

2.6. Piromagnetyczne

2.7. Nernsta

2.8. Ciekłokrystaliczne

2.9. Ewaporograf

3. Oddziaływania falowe

3.1. Optyczna detekcja heterodynowa

3.2. Optyczne przetwarzanie parametryczne

3.2.1. Przetwarzanie z podwyższeniem częstotliwości

3.2.2. Przetwarzanie z obniżeniem częstotliwości

3.3. Fotoefekt w złączu Josephsona

3.4. Fotodiody metal – tlenek metalu – metal

W detektorach fotoemisyjnych dominuje szum śrutowy związany z prądem ciemnym I_d fotokatody:

$$I_n = \sqrt{2qI_d \Delta f} \quad (12)$$

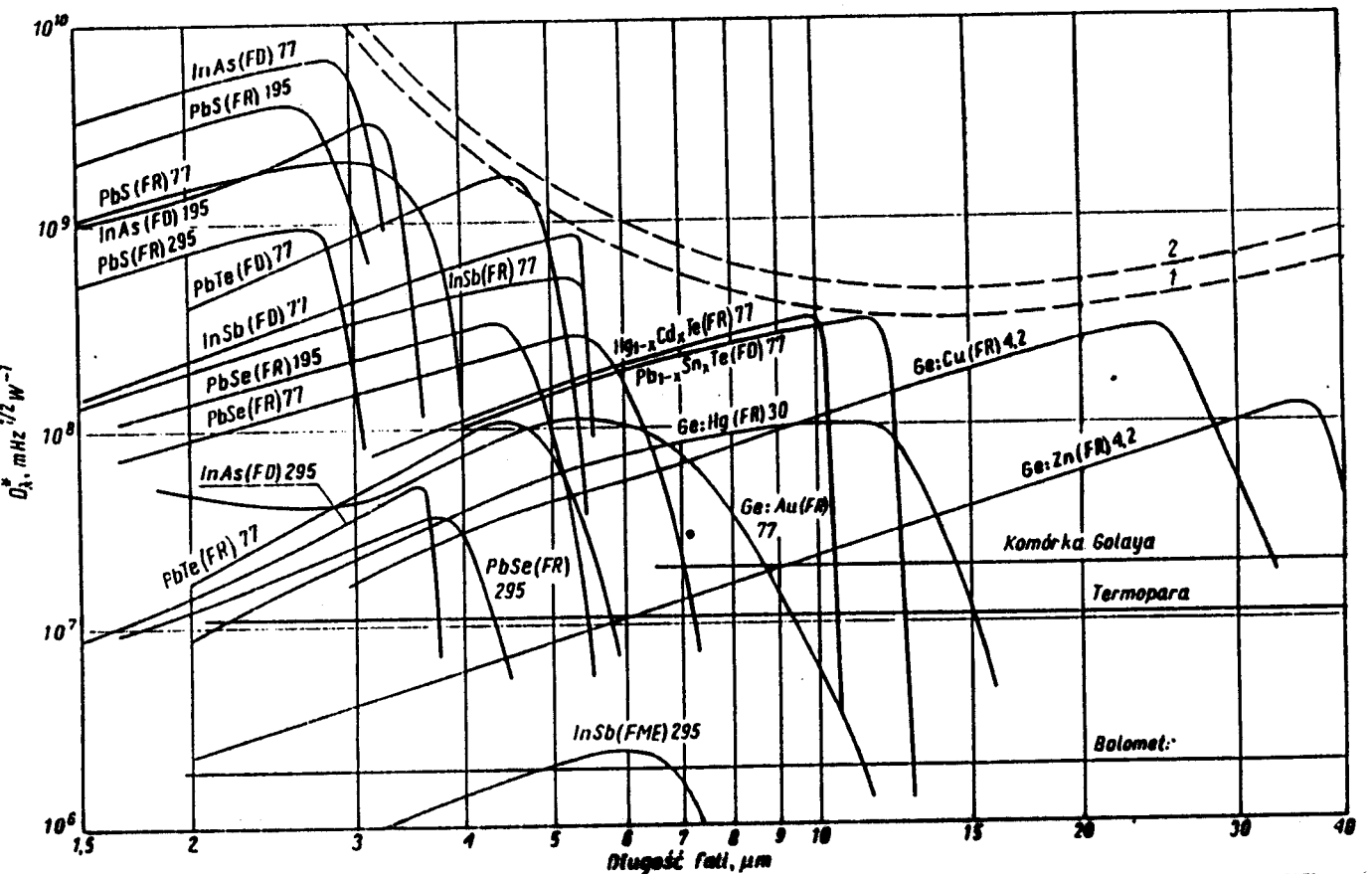
gdzie I_d jest prądem ciemnym fotokatody.

h) szumy w detektorach termicznych

Jeśli detektor termiczny w obwodzie zastępczym można potraktować jako rezystor, wówczas istotne będą szumy Johnsona – Nyquista.

Oprócz wymienionych powyżej szumów istnieje szereg innych źródeł szumów. Wymienione zostały tylko najistotniejsze.

Na rys. 3 i rys.4 przedstawiono przykładowe charakterystyki spektralne dla detektorów pracujących w zakresie widzialnym i w zakresie podczerwieni.



Ad1)

W detektorach które działają w oparciu o zjawiska fotonowe, wykorzystuje się bezpośrednie oddziaływanie fotonów z elektronami. W wyniku tego oddziaływania elektron zostaje wzbudzony. Jeśli potem pozostaje nadal w materiale – mówimy, że mamy do czynienia ze zjawiskiem fotonowym wewnętrznym. Jeśli opuszcza materiał - mamy do czynienia ze zjawiskiem fotonowym zewnętrznym. Jeśli chodzi o tę pierwszą grupę zjawisk, to ponieważ elektrony mogą być związane z siecią krystaliczną, domieszkami lub być swobodne, stąd dodatkowy podział na trzy grupy: wzbudzanie nadmiarowych nośników, oddziaływanie ze swobodnymi nośnikami oraz oddziaływanie zlokalizowane. W tym pierwszym przypadku, jeśli foton oddziałuje z atomami sieci lub domieszki w ten sposób, że powstaje swobodna para elektron –dziura, to mówimy o zjawisku fotonowym samoistnym. Jeśli natomiast powstaje swobodny elektron i związana dziura (lub odwrotnie) to mówimy o zjawisku fotonowym domieszkowym. Jeśli chodzi o oddziaływania zlokalizowane, to foton wzbudza elektron na wyższy poziom energetyczny w atomie, ale elektron nie opuszcza atomu.

Zjawisko fotonowe zewnętrzne znane jest również jako tzw. efekt fotoemisyjności. Padający foton powoduje emisję elektronu z powierzchni materiału absorbującego, zwanego fotokatodą.

Ad 2)

W detektorach termicznych pewne własności materiału zmieniają się na skutek zmiany jego temperatury wywołanej absorpcją promieniowania.

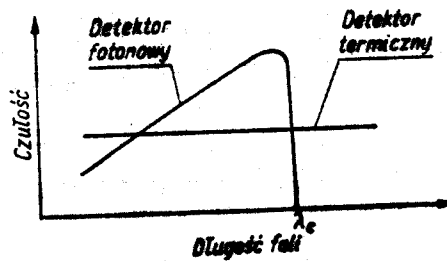
Ad 3)

Pole elektromagnetyczne oddziałując z materią powoduje zmianę jej własności.

W zależności od tego czy sygnał wejściowy jest uśredniony po całej światłoczułej powierzchni czy tylko zbierany jest z pewnego obszaru, mówimy o detektorach elementarnych lub obrazowych. Podstawą działania w obydwu przypadkach są te same zjawiska fizyczne. W widikonach (lampach obrazowych) do detekcji wykorzystuje się zjawisko fotoprzewodnictwa: przestrzenna zmiana przewodnictwa wywołana światłem jest odczytywana przez wiązkę elektronów. W kamerach CCD (charge coupled devices – urządzenia na ładunku związanym) swobodne nośniki wygenerowane światłem są wstrzykiwane w strukturę CCD, gdzie sygnał podlega dalszej obróbce elektronicznej. W systemach FLIR (forward looking infrared – wyszukiwanie podczerwieni) ruchome lustra skanują powierzchnię ułożoną z detektorów fotonowych.

Najczęściej w detektorach promieniowania elektromagnetycznego wykorzystywane jest zjawisko fotoprzewodnictwa i efekt fotowoltaiczny (PV - photovoltaic effect). W tym pierwszym wypadku, promieniowanie zmienia przewodnictwo elektryczne materiału na które pada. Zmiana przewodnictwa może być mierzona dzięki elektrodom dołączonym do próbki lub poprzez umieszczenie próbki we wnęce mikrofalowej. Zjawisko fotoprzewodnictwa wywołują nośniki większościowe. W przypadku efektu PV, który już był omawiany wcześniej w wykładzie o działaniu baterii słonecznej, nośniki mniejszościowe odgrywają główną rolę. Dlatego sygnał PV kończy się, gdy nośniki mniejszościowe zrekombinują. Zwykle czasy życia nośników mniejszościowych są o wiele mniejsze od czasów życia nośników większościowych. W związku z tym detektory PV są zwykle dużo szybsze o detektorów PC.

Na zakończenie wstępnego opisu detektorów, należy podkreślić, że charakterystyki widmowe, czyli zależność czułości od długości fali promieniowania dla detektorów fotonowych i termicznych znacznie się różnią. Dla detektorów termicznych czułość nie zależy od długości fali. Idealne charakterystyki dla obydwu rodzajów detektorów przedstawia rys. 1.



Rys.1. Idealne charakterystyki widmowe detektora termicznego i fotonowego

2) Parametry detektorów.

Sygnal na wyjściu detektora zależy od długości fali (λ), powierzchni światłoczułej (A) i częstości modulacji (f). Ponadto sygnał na wyjściu detektora zależy od warunków pracy detektora: polaryzacji (niech opisuje to parametr b - bias) oraz mocy padającego promieniowania (J):

$$V = V(b, f, \lambda, J, A) \quad (1)$$

Często można rozdzielić powyższą funkcję następująco:

$$V = v(b, J, A) u(\lambda) w(f) \quad (2)$$

Jeśli chodzi o moc promieniowania, to zwykle do testowania detektorów stosuje się CDC o temperaturze 500K.

Wielkością ograniczającą stosowalność detektora jest szum. Jest to sygnał na wyjściu detektora gdy jest on całkowicie osłonięty. Szum zawsze występuje w każdym materiale z którego wykonany jest detektor. Ponieważ w większości detektorów sygnał w fotodetektorze manifestuje się jako zmiana własności elektrycznych materiału, to szum elektryczny jest głównym źródłem szumów. Szum jest normalizowany do szerokości pasma szumowego 1 Hz.

Parametry opisujące własności detektora powinny dać odpowiedź na cztery podstawowe pytania:

- jak zależy sygnał z detektora od długości fali promieniowania, czyli jak wygląda jego charakterystyka widmowa;
- jaka najmniejsza moc promieniowania padającego na detektor spowoduje pojawienie się na jego wyjściu sygnału równego szumom własnym detektora;
- jaką uzyska się wielkość sygnału, jeśli na detektor pada jednostkowa moc promieniowania;
- jak zachowuje się detektor przy modulacji promieniowania.

Ada)

Czułość napięciowa.

Jest to stosunek wartości skutecznej napięcia sygnału wyjściowego o częstotliwości podstawowej do wartości skutecznej mocy promieniowania padającego o częstotliwości podstawowej:

$$R_v(b, f, \lambda) = \frac{V_s(b, f, \lambda)}{(P_\lambda \Delta\lambda)_\lambda} \quad [\text{V/W}] \quad (3)$$

gdzie $P_\lambda \Delta\lambda$ jest quasi monochromatyczną mocą promieniowania o długości fali λ , padającą na detektor.

Ad b)

Ekwiwalentna moc szumów (NEP – noise equivalent power) jest to taka wartość skuteczna mocy promieniowania padającego na detektor, która daje na wyjściu sygnał o wartości skutecznej równej poziomowi szumu, znormalizowanego do jednostkowej szerokości pasma:

$$\text{NEP}(b,f,\lambda) = \frac{V_n(b,f)}{\sqrt{\Delta f R_v(b,f,\lambda)}} \left[\frac{W}{\text{Hz}^{1/2}} \right] = \frac{V_n(b,f) P_i \Delta \lambda}{\sqrt{\Delta f V_s(b,f,\lambda)}} \left[\frac{W}{\text{Hz}^{1/2}} \right] \quad (4)$$

Ad c)

Parametrem który stosuje się do porównania detektorów o różnej powierzchni, jest tzw. detekcyjność znormalizowana, D^*_λ . Jest to stosunek sygnału do szumu odniesiona do jednostkowego strumienia promieniowania (padającego na jednostkę powierzchni detektora) i jednostkowej szerokości pasma przenoszenia:

$$D^*_\lambda(b,f,\lambda) = \frac{\sqrt{A}}{\text{NEP}(b,f,\lambda)} = \frac{R_v(b,f,\lambda) \sqrt{A \Delta f}}{V_n(b,f)} = \frac{V_s(b,f,\lambda) \sqrt{A \Delta f}}{V_n(b,f) P_i \Delta \lambda} \left[\frac{\text{cm} \sqrt{\text{Hz}}}{W} \right] \quad (5)$$

Ad d)

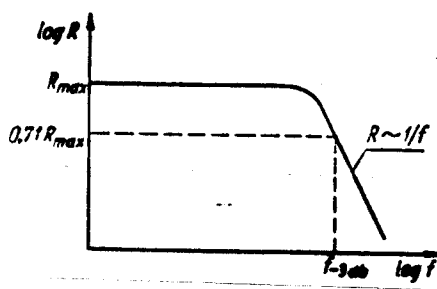
Charakterystykę częstotliwościową detektorów fotonowych można określić następującym wzorem:

$$w(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2}} \quad (6)$$

gdzie τ jest stałą czasową odpowiedzi detektora. Zwykle τ definiuje się następująco:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_{-3\text{dB}}} \quad (7)$$

gdzie $f_{-3\text{dB}}$ jest częstotnością przy której moc sygnału spada o 3dB poniżej wartości niskoczęstotliwościowej. Na rys.2. przedstawiono zależność czułości detektora od częstotliwości.



Rys.2. Czułość detektora od częstotliwości.

3) Szumy w detektorach

a) Szum Johnsona –Nyquista

Jest to szum związany z termiczną fluktuacją prędkości nośników w rezystorach. Materiał półprzewodnikowy detektora posiada skończoną oporność i ona jest źródłem szumów Johnsona –Nyquista. Wartości skuteczne napięcia i prądu szumów Johnsona – Nyquista wyrażają się wzorem:

$$v_n = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (8a)$$

$$i_n = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R}} \quad (8b)$$

gdzie R jest opornością detektora.

b) szum generacji – rekombinacji

Szum ten związany jest z fluktuacją średniej koncentracji nośników związanej z fluktuacją średniej szybkości generacji i rekombinacji. Powoduje fluktuacje napięcia na detektorze, gdy przez detektor płynie prąd. Nie będziemy analizować zależności analitycznych dla tego szumu.

c) szum śrutowy

Występuje w fotodiodach spolaryzowanych napięciem:

$$i_n = \sqrt{(2qI + 4qI_0)\Delta f} \quad (9)$$

gdzie I jest prądem płynącym przez spolaryzowaną fotodiode zaś I_0 prądem nasycenia diody (patrz wzór (7) wykład 7). Jeśli fotodiode nie jest spolaryzowana, to równanie (9) przechodzi w równanie (8b).

e) szum niskoczęstotliwościowy – typu 1/f.

Jest to szum wywołany fluktuacją prądów upływności. Występuje przy niskich częstotliwościach.

f) szum fotonowy

Z praktycznego punktu widzenia dąży się do zapewnienia takich warunków, aby szum był obniżony do poziomu szumów spowodowanych fluktuacjami liczby fotonów padających na detektor z otoczenia. Wówczas mówimy, że detektor pracuje w warunkach BLIP (background limited performance). Strumień promieniowania tła zależy od kąta widzenia detektora FOV (field of view) oraz od temperatury otoczenia.

Dla detektorów PC (fotorezystorów) o przewodnictwie domieszkowym detekcyjność teoretyczna w warunkach pracy BLIP wyraża się wzorem:

$$D^*_{\lambda} = \frac{\lambda}{2hc} \sqrt{\frac{\eta}{\Phi_b}} \quad (10)$$

gdzie Φ_b jest gęstością strumienia fotonów padających na jednostkę powierzchni detektora w jednostce czasu a η - wydajnością kwantową.

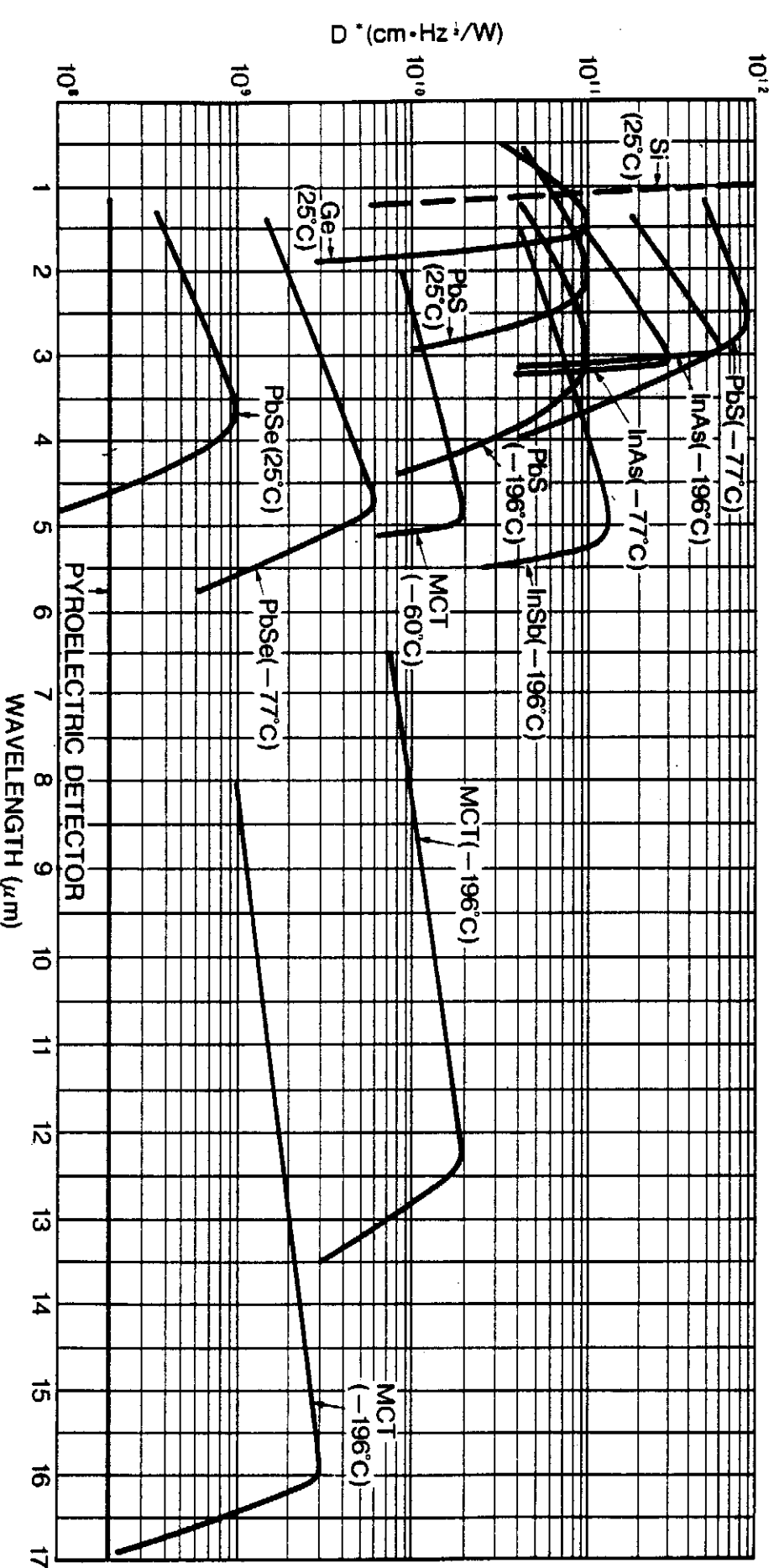
Dla fotodiod i detektorów PC samoistnych (w których $n_0 \cong p_0$) detekcyjność znormalizowana wyraża się wzorem:

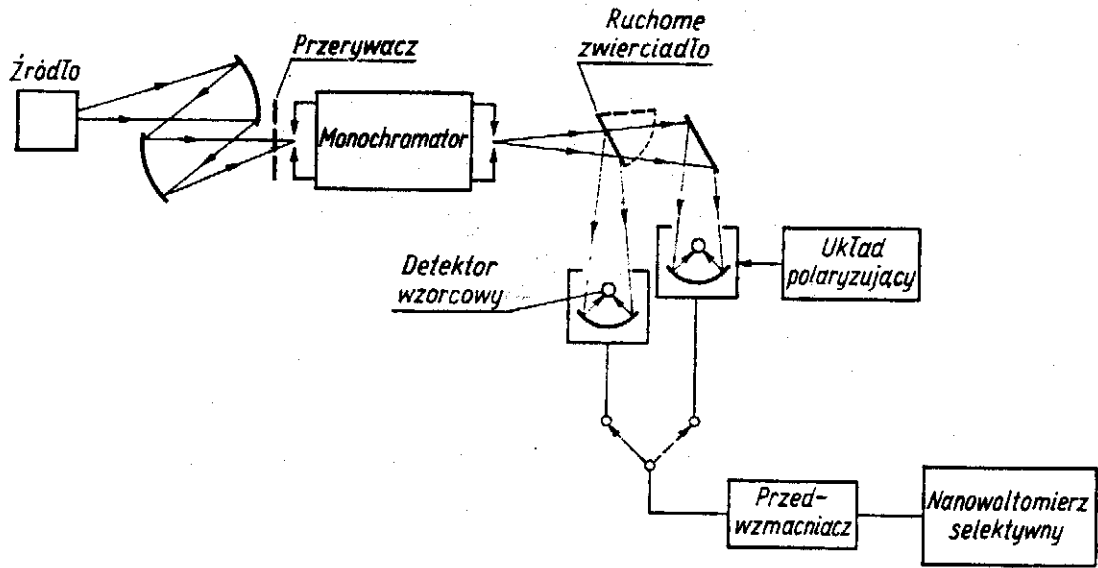
$$D^*_{\lambda} = \frac{\lambda}{\sqrt{2}hc} \sqrt{\frac{\eta}{\Phi_b}} \quad (11)$$

g) szum w detektorach fotoemisyjnych

Selection Guide

● Typical Spectral Response of Hamamatsu IR Detectors

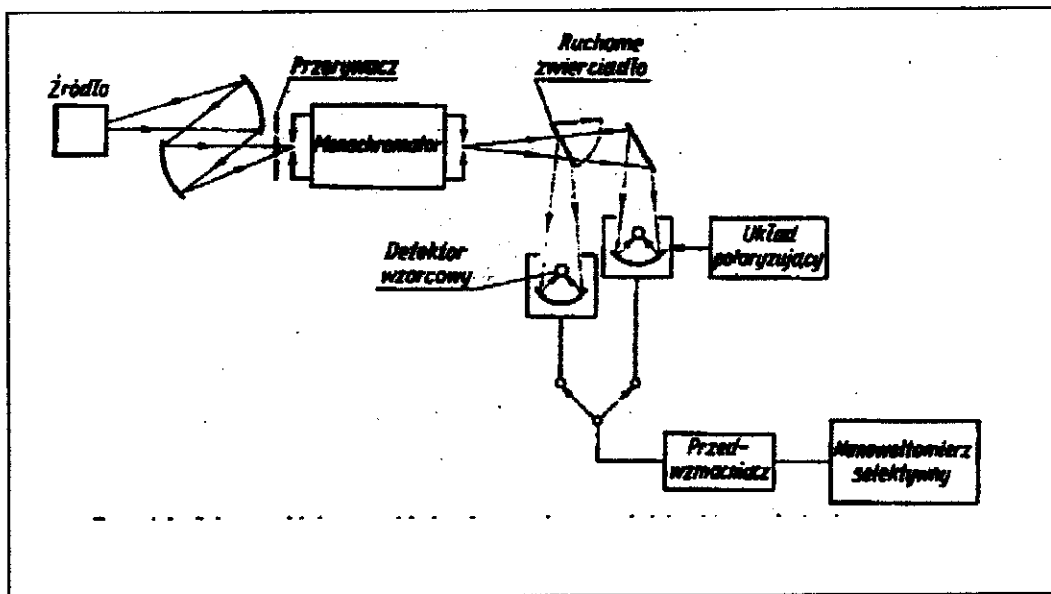




Rys. 1.8. Schemat blokowy układu do pomiaru czułości widmowej detektora

4. Pomiar charakterystyki spektralnej czułości detektora.

Schemat blokowy układu do pomiaru czułości spektralnej detektora fotonowego przedstawia rys.5.



Rys.5. Schemat układu do badania czułości spektralnej detektorów.

Wiązka światła ze źródła pada na lustro Z1, które skupia ją na szczelinie wejściowej monochromatora. Monochromatyczna wiązka światła wychodząca ze szczeliny wyjściowej monochromatora, pada na lustro Z2. To lustro, skupia światło na badanym detektorze. Sygnał na wyjściu detektora, mierzony jest przy pomocy miernika selektywnego V. Ponieważ sygnał napięciowy generowany przez światło padające na detektor jest stosunkowo słaby, stosuje się modulację światła w celu uzyskania napięcia przemiennego. To napięcie jest następnie wzmacniane w mierniku – wzmacniaczu V. Modulacja jest realizowana przy pomocy mechanicznego modulatora M, ustawionego przed szczeliną wejściową monochromatora. Pomiar czułości spektralnej detektora fotonowego polega na pomiarze napięcia na wyjściu detektora, mierzonego przy pomocy miernika V w funkcji długości fali padającego promieniowania em. Odpowiednia długość fali jest wybierana za pomocą monochromatora. Gdyby dysponować kalibrowanym źródłem światła o stałej mocy, niezależnej od długości fali, to opisany powyżej pomiar wystarczyłby aby określić czułość spektralną detektora. W tym celu należałoby podzielić otrzymany sygnał V_s przez moc padającego promieniowania P.

W rzeczywistości, każde źródło światła posiada swoją charakterystykę spektralną. Oznacza to, że moc promieniowania jest inna dla każdej długości fali. Oznacza to również, że dla każdej długości fali inna jest moc promieniowania wychodzącego z monochromatora, padającego na detektor. Sygnał na wyjściu detektora jest w tej sytuacji odzwierciedleniem obydwu charakterystyk spektralnych: źródła i samego detektora. Aby pozbyć się tej niedogodności, dokonuje się pomiaru charakterystyki spektralnej źródła przy pomocy kalibrowanego detektora o stałej czułości, R_T , niezależnej od długości fali. Takim detektorem może być każdy detektor termiczny, np. tzw. termopara lub detektor piroelektryczny (charakterystykę spektralną dla detektora termicznego przedstawiają na rys. 3 i rys.4 linie równoległe do osi długości fali). Pomiaru charakterystyki spektralnej źródła dokonuje się analogicznie jak dla detektora fotonowego, wstawiając detektor termiczny w miejsce badanego detektora. Sygnał na wyjściu detektora termicznego, V_T , odwzorowuje moc promieniowania źródła. Tak więc moc źródła $P(\lambda)$ można wyliczyć ze wzoru:

$$P(\lambda) = \frac{V_T(\lambda)}{R_T} \quad (13)$$

Wreszcie czułość spektralną detektora fotonowego:

$$R_v(\lambda) = \frac{V_s(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (14)$$

Aby policzyć bezwzględną wartość czułości spektralnej detektora, należy w równaniu (14) uwzględnić jeszcze powierzchnie detektora badanego A_D i detektora termicznego A_T .

Wówczas końcowy wzór na czułość spektralną wygląda następująco:

$$R_v(\lambda) = \frac{V_s(\lambda)}{V_T(\lambda)} \frac{A_T}{A_D} R_T \quad (15)$$

Jeśli teraz uwzględnić, że detektor jest oświetlany światłem modulowanym o częstotliwości ω , wówczas czułość $R_v(\omega)$ wyraża się wzorem:

$$R_v(\omega) = \frac{R_v}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}} \quad (16)$$

czyli maleje ze wzrostem częstotliwości modulacji. Dla detektorów fotonowych stałe czasowe są bardzo małe, tak że czułość spektralna jest stała do częstotliwości modulacji rzędu setek kHz.