



#### IV. ZJAWISKO FOTOELEKTRYCZNE WEWNĘTRZNE W PÓLPRZEWODNIKACH.

Cel ćwiczenia: Wyznaczenie podstawowych parametrów spektralnych fotoprzewodzącego detektora podczerwieni.

##### Opis stanowiska:

Monochromator-SPM-2 z pryzmatami: NaCl lub LiF albo Si.

Oświetlacz halogenowy - dla  $\lambda < 4 \mu\text{m}$ ;  $U_{\text{zas}} < 16\text{V}$

Zasilacz halogenu Z3020

Modulator mechaniczny z regulowaną częstotliwością modulacji

Zwierciadła

Detektor fotoprzewodzący PbS o powierzchni światłoczułej  $10 \text{ mm}^2$

Termopara o powierzchni światłoczułej równej  $7 \text{ mm}^2$

Zasilacz detektora fotoprzewodzącego

Karta pomiarowa – lock-in Anfatec bądź nanowoltomierz selektywny 233 lub homodynowy;  
alternatywnie wzmacniacz pomiarowy.

Zasilacz lampy halogenowej

Woltomierz, Amperomierz

Przystawka pomiarowa

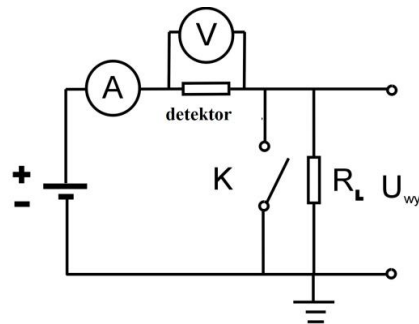
Rezystor nastawny




### Przebieg ćwiczenia

#### 1. Pomiar rezystancji różniczkowej detektora

- Zmierzyć charakterystykę prądowo-napięciową nieoświetlonego detektora fotoprzewodzącego w zakresie od  $-10 \mu\text{A}$  do  $+10 \mu\text{A}$  z krokiem co  $1 \mu\text{A}$  dla obydwu kierunków polaryzacji. W tym celu podłączyć do przystawki pomiarowej woltomierz, amperomierz i zasilacz wg schematu przedstawionego na rys.1. Wyłącznik K w przystawce ma być **wyciśnięty**. Wtedy klucz K jest zwarty i dokonujemy pomiaru prądu stałego i napięcia stałego na detektorze.



włącznik wyciśnięty  - klucz K zwarty  
włącznik wciśnięty  - klucz K rozwarty

Rys.1. Schemat połączeń elektrycznych w przystawce pomiarowej.

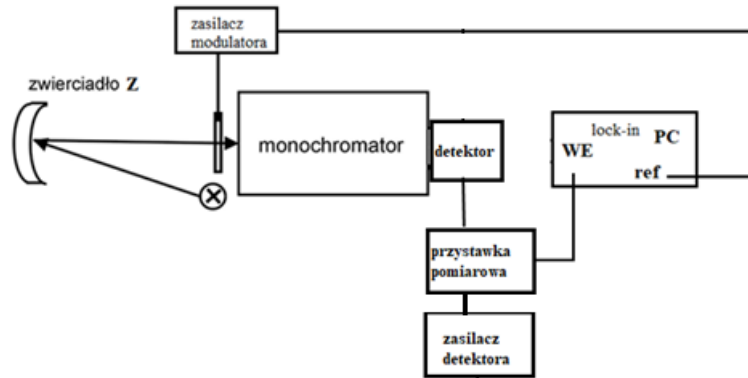
- Na podstawie pomiarów  $I - V$ , z prostoliniowej części wykresu wyznaczyć rezystancję różniczkową  $R_D$  badanego detektora.
- #### 2. Pomiar charakterystyki spektralnej czułości detektora w zakresie długości fal od $0.7 \mu\text{m}$ do ok. $3 \mu\text{m}$ .

- Do przystawki pomiarowej należy podłączyć rezystor nastawny o rezystancji równej obliczonej wyżej rezystancji ciemnej detektora:  $R_L = R_D$ . Rezystor nastawny należy podłączyć do gniazd z wtykami bananowymi, po uprzednim ustawieniu żądanej rezystancji, a następnie wcisnąć włącznik K. Wtedy klucz K jest rozwarty i na nanowoltomierz podawany jest sygnał z rezystancji  $R_L$ . Wyjście WY w przystawce pomiarowej jest połączone bezpośrednio z wyjściem z gniazd bananowych co umożliwia podanie sygnału wyjściowego z rezystancji  $R_L$  na nanowoltomierz przy pomocy kabla koncentrycznego.
- Ustawić badany detektor fotoprzewodzący naprzeciw szczeliny wyjściowej monochromatora. Oświetlić detektor. W tym celu zestawić układ optyczny wg



## Źródła i detektory

schematu przedstawionego na rys.2. Na zasilaczu halogenu ustawić napięcie  $U \leq 10V$ , szczelinę monochromatora nastawić na  $0.7\text{mm}$ , wybrać długość fali z zakresu widzialnego, wyjustować układ optyczny (wykład (8)).



Rys.2.Schemat układu do pomiaru czułości spektralnej detektora fotoprzewodzącego

- Ustawić wartość prądu stałego płynącego przez fotodetektor nie większą niż  $10\mu\text{A}$ ;
- Odłączyć woltmierz od przystawki pomiarowej
- Jeśli pomiar sygnału odbywa się przy pomocy karty pomiarowej lock-in Anfatec, połączyć wejście REF karty pomiarowej z wyjściem modulatora a wejście SIGNAL karty z wyjściem WY przystawki pomiarowej.
- W przypadku pomiaru sygnału przy pomocy nanowoltomierza selektywnego/wzmacniacza pomiarowego wyjście WY z przystawki pomiarowej połączyć z wejściem nanowoltomierza selektywnego (INPUT)/ bezpośrednio z wejściem wzmacniacza pomiarowego. Wzmacniacz pomiarowy pracuje, gdy "czerwony" wtyk przewodu z przystawki pomiarowej podłączony jest do wyjścia "+" zasilacza.
- W przypadku pomiaru sygnału przy pomocy nanowoltomierza homodynamicznego należy połączyć wejście REF nanowoltomierza z wyjściem modulatora a wejście INPUT nanowoltomierza z wyjściem WY przystawki pomiarowej.
- Zmieniając długość fali światła oświetlającego detektor zmierzyć napięcie wyjściowe  $U_{wy}$  na oporności  $R_L$  w zakresie długości fal od  $0.7\ \mu\text{m}$  do ok.  $3\ \mu\text{m}$ . Pomiarów wykonać z krokiem odpowiadającym kolejnym działkom skali monochromatora.
- **Uwaga:** Wraz ze zmianą długości fali może ulec zmianie prąd płynący przez detektor fotoprzewodzący, dlatego należy kontrolować i korygować jego wartość.



## Źródła i detektory

3. Wyznaczenie zależności  $U_{wy}$  od prądu stałego płynącego przez detektor fotoprzewodzący
  - Policzyc stosunek napięcia  $U_{wy}$  do napięcia na wyjściu termopary  $U_{termop}$ . Zależność  $U_{termop} = f(\lambda)$  jest podana w Tabeli I. Znaleźć długość fali  $\lambda_{max}$  dla której ten stosunek jest maksymalny.
  - Dla długości fali  $\lambda_{max}$  wyznaczyć zależność napięcia na wyjściu rezystora  $R_L$  od prądu stałego płynącego przez detektor fotoprzewodzący  $U_{wy} = f(I_{fotodet})$  nie przekraczając maksymalnego prądu detektora równego  $10\mu A$ . Wykonać pomiary z krokiem co  $1\mu A$ .
4. Wyznaczenie zależności  $U_{wy}$  od rezystancji  $R_L$  (opcjonalnie).
  - Dla długości fali  $\lambda_{max}$  wyznaczyć zależność napięcia na wyjściu rezystora  $R_L$  w funkcji jego rezystancji  $U_{wy} = f(R_L)$ , przy stałej wartości prądu stałego płynącego przez detektor fotoprzewodzący. Zmieniać rezystancję od kilkudziesięciu  $\Omega$  do kilku  $M\Omega$  korzystając z rezystora nastawnego lub rezystancji wbudowanej w przystawkę pomiarową. Przed każdym pomiarem należy odłączyć rezystor od przystawki, ustawić żadaną wartość rezystancji korzystając z omomierza i ponownie podłączyć rezystor do przystawki. Włącznik K ma być **wciśnięty**. Natomiast aby wybrać rezystor wbudowany w przystawkę pomiarową, należy wcisnąć włącznik oznaczony odpowiednią wartością rezystancji.

### Opracowanie wyników:

#### 1. Charakterystyka widmowa na wyjściu detektora termicznego

- Narysować charakterystykę spektralną napięcia na wyjściu detektora termicznego. Zaznaczyć niepewności na wykresie. Przyjąć dla wskazań nanowoltomierza niedokładność wskazań:  $\pm 3\%$  dla  $f=15\text{ Hz} - 15\text{ kHz}$  oraz  $\pm 5\%$  dla  $f=1,5\text{ Hz} - 15\text{ Hz}$  i dla  $f=15\text{ kHz} - 150\text{ kHz}$ . Natomiast dla monochromatora przyjąć niepewność pomiaru długości fali  $u(\lambda) = \frac{\text{dokładność skali monochromatora}}{\sqrt{3}}$ . Należy zwrócić uwagę, że skala monochromatora, gdzie elementem dyspersyjnym jest pryzmat, nie jest liniowa.
- Przykładowy odczyt wyniku ze skali monochromatora  
Górna skala – długość fali w  $\mu m$ .



## Źródła i detektory

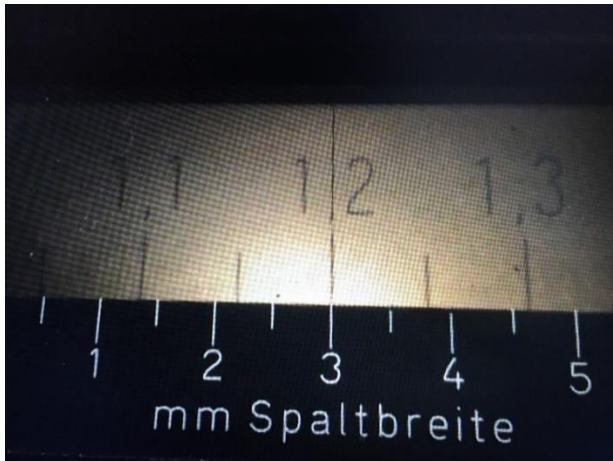
Dolna skala – szerokość szczeliny w mm

Przy szczelinie 1mm:  $(1200 \pm 30)nm$

Przy szczelinie 0.5mm:  $(1200 \pm 15)nm$

Przy szczelinie 0.1mm:  $(1200 \pm 3)nm$

Przy szczelinie o szerokości x mm:  $(1200 \pm x \cdot 30)nm$



### 2. Wyznaczenie rezystancji różniczkowej nieoświetlonego detektora

- Narysować ciemną charakterystykę I-V detektora fotoprzewodzącego. Zaznaczyć niepewności pomiaru prądu i napięcia korzystając ze wzorów:  $u(I) = \frac{\text{dokładność pomiaru prądu}}{\sqrt{3}}$  oraz  $u(U) = \frac{\text{dokładność pomiaru napięcia}}{\sqrt{3}}$ . Dokładności pomiaru prądu i napięcia obliczyć korzystając z odpowiednich formuł dla mierników.
- Na podstawie prostoliniowej części wykresu korzystając z regresji liniowej wyznaczyć rezystancję różniczkową  $R_D$  badanego detektora:

$$R_D = \left( \frac{dI}{dU} \right)_{U=0}^{-1} \cong \left( \frac{\Delta I}{\Delta U} \right)_{U=0}^{-1} \quad (1)$$

- Rezystancja różniczkowa jest równa odwrotności współczynnika kierunkowego prostej regresji  $R_D = \frac{1}{a}$ .
- Wyznaczyć niepewność pomiaru rezystancji różniczkowej, korzystając ze wzoru:  $u(R_D) = \frac{\Delta a}{a^2}$ , gdzie  $\Delta a$  jest niepewnością współczynnika kierunkowego prostej regresji.

### 3. Charakterystyka widmowa czułości detektora fotoprzewodzącego

- Narysować charakterystykę spektralną napięcia na wyjściu rezystancji  $R_L$ . Zaznaczyć niepewności na wykresie.



## Źródła i detektory

- W przypadku pomiarów napięcia na wyjściu rezystancji  $R_L$  przy pomocy karty pomiarowej lock-in Anfatec dokładność pomiaru jest obliczana dla każdego pomiaru przez program i podana w ostatniej kolumnie tabeli z wynikami.
- Przyjąć dla wskazań nanowoltomierza homodynamicznego niedokładność wskazań:  $\pm 3\%$  dla  $f=15\text{ Hz} - 15\text{ kHz}$  oraz  $\pm 5\%$  dla  $f=1,5\text{ Hz} - 15\text{ Hz}$  i dla  $f=15\text{ kHz} - 150\text{ kHz}$ . W przypadku pomiaru za pomocą nanowoltomierza selektywnego niedokładność wskazań nanowoltomierza selektywnego:  $\Delta U = \pm (4U + 2U_c) / 100$  gdzie  $U_c$  – zakres,  $U$  – aktualne wskazanie miernika.
- Dla monochromatora przyjąć niepewność pomiaru długości fali  $u(\lambda) = \frac{\text{dokładność skali monochromatora}}{\sqrt{3}}$
- Narysować charakterystykę spektralną czułości względnej detektora fotoprzewodzącego:

$$R_v(\lambda) = R_T \frac{U_{R_L} A_T}{U_T A_D} \quad [\text{V/W}] \quad (2)$$

gdzie  $R_T(\lambda)$  – czułość spektralna detektora termicznego (termopary),  $A_T$  i  $A_D$  – oświetlone powierzchnie detektora termicznego i detektora fotonowego.

- Zaznaczyć niepewności na wykresie. Niepewność pomiaru czułości obliczyć ze wzoru:

$$u(R_v) = \sqrt{\left[ \frac{A_T U_{R_L}}{A_D (U_T)^2} u(U_T) \right]^2 + \left[ \frac{A_T u(U_{R_L})}{A_D U_T} \right]^2 + \left[ \frac{u(A_T) U_{R_L}}{A_D U_T} \right]^2 + \left[ \frac{u(A_D) U_{R_L}}{(A_D)^2 U_T} \right]^2} \quad (3)$$

- Z odcięcia długofalowego tej charakterystyki wyznaczyć przerwę energetyczną  $E_g$  materiału półprzewodnikowego, z którego wykonano detektor. W tym celu należy wybrać zakres prostoliniowy przebiegu czułości i korzystając z prostej regresji wyznaczyć przecięcie prostej z osią długości fali  $\lambda_{odc} = -\frac{b}{a}$ .
- Aby obliczyć niepewność pomiaru  $u(\lambda_{odc})$ , należy skorzystać z niepewności wynikającej z dokładności skali monochromatora:

$$u(\lambda_{odc}) = \frac{\text{dokładność skali monochromatora}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

Po obliczeniu tej niepewności należy obliczyć również niepewność wyznaczenia przerwy wzbronionej  $E_g$ :



## Źródła i detektory

$$u(E_g) = \frac{E_g}{\lambda_{odc}} u(\lambda_{odc}) . \quad (5)$$

### 4. Charakterystyka widmowa wydajności kwantowej

- Narysować charakterystykę spektralną wydajności kwantowej:

$$\eta = \frac{hc}{e\lambda} R_v(\lambda) \frac{1}{R_D} 100\% \quad (6)$$

gdzie  $h$  – stała Plancka,  $c$  – prędkość światła,  $e$  – ładunek elektronu,  $\lambda$  - długość fali,  $R_v(\lambda)$  - spektralna czułość napięciowa detektora,  $R_D$ - rezystancja detektora nieoświetlonego.

Zaznaczyć niepewności na wykresie. Niepewność pomiaru wydajności kwantowej obliczyć ze wzoru:

$$u(\eta) = 100\% \cdot \frac{hc}{e} \sqrt{\left[\frac{u(\lambda)R_v}{(\lambda)^2 R_D}\right]^2 + \left[\frac{u(R_v)}{\lambda R_D}\right]^2 + \left[\frac{u(R_D)R_v}{\lambda(R_D)^2}\right]^2} \quad (7)$$

- Narysować zależność czułości detektora  $R_v$  od prądu natężenia prądu stałego  $I_{\text{fotodet}}$  płynącego przez detektor fotoprzewodzący. Zaznaczyć niepewności na wykresie.
- Narysować zależność mocy  $\frac{U^2}{R_L} = f(\log R)$  od rezystancji obciążenia  $R_L$ . Zaznaczyć niepewności na wykresie.

### 5. Przeprowadzić dyskusję otrzymanych wyników.

Literatura:

Wykład 9 „Źródła i detektory”

### Pytania kontrolne.

- Absorpcja światła w półprzewodnikach.
- Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne.
- Czułość detektora fotonowego.
- Wydajność kwantowa



## Źródła i detektory

Tabela I. Zależność napięcia na wyjściu detektora termicznego (termopary) od długości fali (pryzmat LiF).

U <sub>out</sub> 12V			Pryzmat LiF			Szczelina 0.7 [mm]		
λ	Ut [μV]	Z		λ	Ut [μV]	Z		
500	0.60	1 μV		1100	22.00	30 μV		
520	0.70			1125	22.50			
540	0.81			1150	22.50			
560	0.93			1175	23.00			
580	1.10	3 μV		1200	23.00			
600	1.25			1225	23.00			
610	1.40			1250	23.00			
620	1.55			1275	23.00			
630	1.75			1300	22.80			
640	1.92			1325	22.00			
650	2.10			1350	20.00			
660	2.30			1375	20.10			
670	2.45			1400	20.50			
680	2.65			1425	20.20			
690	2.85			1450	19.80			
700	3.00			1475	19.50			
710	3.10			1500	19.00			
720	3.30	10 μV		1525	18.20			
730	3.40			1550	18.00			
740	3.50			1575	17.20			
750	3.60			1600	16.70			
760	3.70			1625	16.00			
770	3.90			1650	15.50			
780	4.10			1675	15.00			
790	4.30			1700	14.50			
800	4.70			1725	14.00			
825	5.90			1750	13.50			
850	7.80			1775	12.80			
875	9.50			1800	11.50			
900	11.80			1820	10.80			
925	13.80			1840	10.50			
950	15.50			1860	10.50			
975	17.00			1880	10.40			
1000	18.20	30 μV		1900	10.40			
1025	19.05			1920	10.50			
1050	20.50			1940	10.30			
1075	21.20			1960	10.00			
1100	22.00			1980	10.00			
1125	22.50			2000	9.8			
1150	22.50			2020	9.25			
1100	22.00			2040	9.00			

2060	8.8			2780	1.85		
2080	8.5			2800	2.35		
2100	8.2			2820	2.62		
2120	7.9			2840	2.7		
2140	7.7			2860	2.72		
2160	7.5			2880	2.7		
2180	7.25			2900	2.77		
2200	7			2920	2.62		
2220	6.8			2940	2.55		
2240	6.6			2960	2.5		
2260	6.4			2980	2.48		
2280	6.2			3000	2.42		
2300	6.0			3020	2.35		
2320	5.8			3040	2.3		
2340	5.65			3060	2.25		
2360	5.5			3080	2.2		
2380	5.35			3100	2.15		
2400	5.1						
2420	5.3						
2440	5.3						
2460	5.1						
2480	4.9						
2500	4.6						
2520	4.1						
2540	3.4						
2560	1.9						
2580	1.5						
2600	2.35						
2620	2.38						
2640	1.45						
2660	0.3						
2680	0.5						
2700	0.9						
2720	1.25						
2740	1.15						
2760	1.25						

### Dodatek

Jak uwzględnić wzmocnienie przedwzmacniacza?

Jeśli napięcie na wyjściu detektora jest wzmocnione przez wzmacniacz o wzmocnieniu  $k$  [dB] i jego wartość zmierzona wynosi  $U_m$ , wówczas napięcie rzeczywiste na detektorze  $U_D$  jest równe:

$$k = 10 \log \frac{U_m^2}{U_D^2} = 20 \log \frac{U_m}{U_D} \quad \Rightarrow \quad \log \frac{U_m}{U_D} = \frac{k}{20} \quad \Rightarrow \quad U_m = U_D 10^{k/20}$$





## Źródła i detektory

$$U_D = U_m 10^{-k/20}$$

( Np. jeśli  $k = 20 \Rightarrow U_D = U_m/10$  )