



## Ćwiczenie VI . ZJAWISKO FOTOWOLTAICZNE NA ZŁĄCZU P-N

Cel ćwiczenia: Wyznaczenie podstawowych parametrów spektralnych fotodiody

Opis stanowiska:

Oświetlacz - lampa halogenowa (nap. zas. do 16V).

Zasilacz halogenu Z3020.

Zwierciadło Z

Modulator o regulowanej częstotliwości modulowania

Monochromator - SPM2 o aperturze 1/8 z pryzmatem LiF - 0.12  $\mu\text{m}$  do 9  $\mu\text{m}$

Detektor odniesienia - termoelement VTh-1 z okienkiem  $\text{CaF}_2$ , o czułości stałoprądowej 2V/W, stałej czasowej 15 ms i powierzchni światłoczułej 7  $\text{mm}^2$ .

Nanowoltomierz selektywny, homodynowy (lock-in) lub karta pomiarowa lock-in do pomiaru fotonapięcia badanej fotodiody lub fotonapięcia z termopary.

Badane fotodiody. Każda fotodioda ma inną powierzchnię światłoczułą. Należy zmierzyć tę powierzchnię przy pomocy mikroskopu.

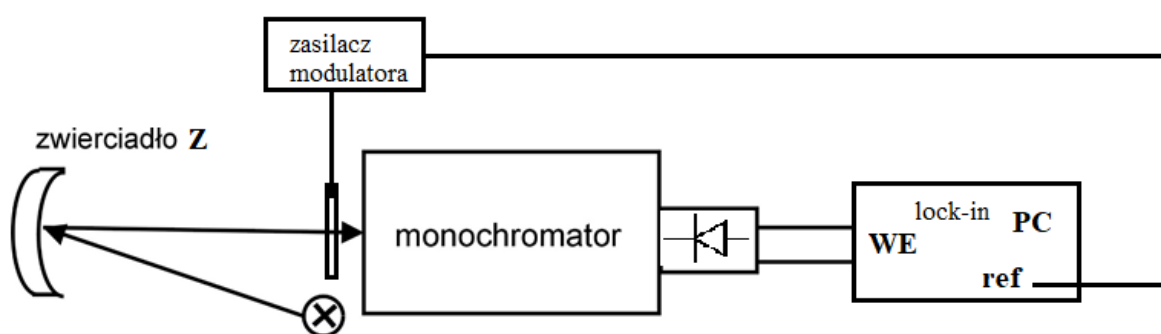
Kat bryłowy wejściowy monochromatora: 0.125 sr



### Przebieg ćwiczenia:

#### 1. Pomiar charakterystyki spektralnej czułości względnej fotodiody pracującej w modzie fotorzwozdzacym.

- Zestawić układ wg. schematu przedstawionego na rys.1, stosując jako źródło światła halogen.
- Zmierzyć wejściowy kąt bryłowy wiązki padającej na szczelinę wejściową monochromatora i porównać z kątem bryłowym monochromatora. W tym celu należy zmierzyć średnicę zwierciadła Z oraz jego odległość od szczeliny.



Rys.1.Schemat układu do pomiaru widma czułości spektralnej fotodiody

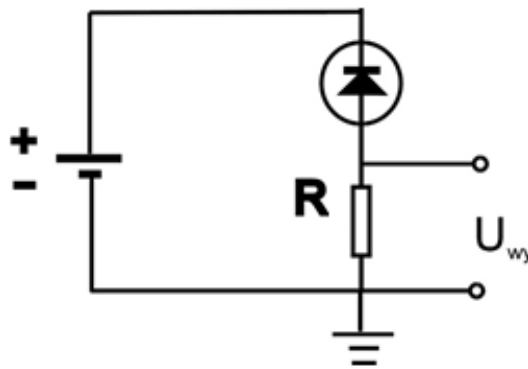
- ustawić na zasilaczu halogenu napięcie  $U = 10V$
- otworzyć szczeliny monochromatora. Ustawić szerokość szczelin monochromatora na 0.7 mm
- oświetlić fotodiodę światłem o długości fali z zakresu widzialnego. W tym celu wybrać odpowiednią długość fali monochromatora i ustawić badaną fotodiodę naprzeciw szczeliny wyjściowej monochromatora, tak aby optymalnie ją oświetlić.
- połączyć wyjście z modulatora z wejściem REF nanowoltomierza homodynamicznego. Jeśli pomiar odbywa się za pomocą nanowoltomierza selektywnego nie łączymy wyjścia modulatora z tym miernikiem
- ustawić maksymalny zakres pomiarowy na nanowoltomierzu. W panelu przycisków wybrać przycisk DC.ZERO.
- połączyć wyjście z układu, w którym jest zamontowana fotodioda a z wejściem nanowoltomierza. Fotodioda pracuje w tzw. modzie fotorzwozdzacym (PC), co oznacza, że sygnał użyteczny nie jest zbierany z fotodiody ale z rezystora, który jest



## Laboratorium Detekcji Promieniowania Elektromagnetycznego

połączony szeregowo z fotodiodą. Schemat elektryczny fotodiody pracującej w takim modzie przedstawia rys. 2.

Fotodiodeę polaryzuje się napięciem stałym w kierunku zaporowym („+” wyjścia zasilacza podłącza się do katody diody). Fotonapięcie mierzy się jako spadek napięcia na oporniku  $R_L$ . Tak mierzone fotonapięcie jest proporcjonalne do fotoprądu. Ponieważ fotoprąd dla fotodiody zależy wprost proporcjonalnie od natężenia światła padającego na diodę, to ten sposób pomiaru fotsygnалу jest dużo bardziej korzystny od pomiaru napięcia rozwarcia, które jest zależne od logarytmu natężenia oświetlenia.



Rys.2. Fotodioda pracująca w modzie PC. Rezystor  $R=2.66M\Omega$ .

- włączyć nanowoltomierz, włączając przycisk REC.
- ustawić pokrętko przesunięcia fazowego PHASE SHIFT lock-in'a w takim położeniu, przy którym sygnał na wyjściu fotodiody jest największy. Jeśli pomiar wykonuje się przy pomocy nanowoltomierza selektywnego, ustawić pokrętko FREQUENCY na częstotliwość modulatora (w tym położeniu sygnał na wyjściu fotodiody jest największy)
- jeśli na największym zakresie pomiarowym sygnał jest w pobliżu zera, należy zmniejszać skokowo zakres pomiarowy, tak aby wychylenie wskazówki osiągnęło wartość powyżej 1/3 zakresu pomiarowego.
- skorygować położenie fotodiody tak, aby uzyskać maksymalne napięcie na wyjściu.
- zmierzyć fotonapięcie  $U_R$  na rezystorze w funkcji długości fali w zakresie od  $0.52 \mu\text{m}$  aż do długości fali przy której sygnał spadnie do poziomu tła.

### Pomiar sygnału przy pomocy karty pomiarowej lock-in



## Laboratorium Detekcji Promieniowania Elektromagnetycznego

- Połączyć wejście REF karty pomiarowej z wyjściem modulatora a wejście SIGNAL karty z rezystorem R w obwodzie fotodiody (przewody łączące zostały odpowiednio oznakowane).
  - Po oświetleniu czujnika wykonać pomiar charakterystyki widmowej  $U_R(\lambda)$  w zakresie długości od 0.52  $\mu\text{m}$  aż do długości fali przy której sygnał spadnie do poziomu tła.
  - Obsługa programu obsługującego kartę jest dostępna na stanowisku pomiarowym.
- 2. Pomiar charakterystyki widmowej napięcia na wyjściu fotodiody pracującej w reżimie napięcia rozwarcia.**

Wykonać pomiary napięcia na wyjściu fotodiody krzemowej i/lub germanowej w funkcji długości fali. W tym celu należy postępować analogicznie jak to zostało opisane powyżej w punkcie 1.

### Opracowanie wyników:

#### 1. Wyznaczenie charakterystyki widmowej źródła i monochromatora przy pomocy termopary.

Na podstawie danych zawartych w tabeli znajdującej się na ostatniej stronie instrukcji wykreślić charakterystykę spektralną źródła światła + monochromator, tzn. narysować wykres napięcia na wyjściu detektora termicznego w funkcji długości fali. Zaznaczyć niepewności pomiarowe. Napięcie na wyjściu termopary zostało zmierzone przy pomocy nanowoltomierza selektywnego. Przyjąć dokładność pomiaru napięcia na nanowoltomierzu selektywnym  $\Delta U_t$ , korzystając ze wzoru:

$$\Delta U_t = 0.05 \cdot \text{zakres pomiaru } U_t \quad (1)$$

Wtedy niepewność pomiaru napięcia:

$$u(U_t) = \frac{\Delta U_t}{\sqrt{3}}. \quad (2)$$

Niepewność pomiaru długości fali obliczyć ze wzoru:

$$u(\lambda) = \frac{\text{dokładność skali monochromatora}}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Poniżej przedstawiono jak należy dokonać odczytu na skali monochromatora i jak wyznaczyć dokładność pomiaru długości fali.



Rys. 3. Przykładowy odczyt wyniku ze skali monochromatora

- Górna skala – długość fali w  $\mu\text{m}$ .
- Dolna skala – szerokość szczeliny w mm
- Przy szczelinie 1mm:  $(1200 \pm 30)\text{nm}$
- Przy szczelinie 0.5mm:  $(1200 \pm 15)\text{nm}$
- Przy szczelinie 0.1mm:  $(1200 \pm 3)\text{nm}$
- Przy szczelinie x mm:  $(1200 \pm x \cdot 30)\text{nm}$



## 2. Wyznaczenie charakterystyki widmowej napięcia na wyjściu rezystora oraz czułości fotodiody.

- Narysować charakterystykę spektralną napięcia  $U_R(\lambda)$ . Zaznaczyć niepewności na wykresie. Dokładność pomiaru napięcia  $\Delta U_R$  znajduje się w kolumnie danych zmierzonych przez kartę pomiarową. Niepewność pomiaru napięcia na rezystorze:

$$u(U_R) = \frac{\Delta U_R}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

- Niepewność pomiaru długości fali przyjąć zgodnie ze wzorem (3).
- Narysować charakterystykę spektralną czułości względnej fotodiody  $R_v(\lambda)$ :

$$R_v(\lambda) = R_{vT}(\lambda) \frac{U_R A_T}{U_T A_d} [\text{V/W}], \quad (6)$$

gdzie  $R_{vT}(\lambda)$  – czułość spektralna detektora termicznego (termopary),  $A_T$  i  $A_d$  – oświetlone powierzchnie detektora termicznego i fotodiody.

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

$$u(R_v) = \sqrt{\left[ \frac{A_T U_R}{A_d (U_T)^2} u(U_T) \right]^2 + \left[ \frac{A_T u(U_R)}{A_d U_T} \right]^2 + \left[ \frac{u(A_T) U_R}{A_d U_T} \right]^2 + \left[ \frac{u(A_d) U_R}{(A_d)^2 U_T} \right]^2} \quad (7)$$

- Z odcinka długofalowego tej charakterystyki wyznaczyć przerwę energetyczną  $E_g$  materiału półprzewodnikowego, z którego wykonano fotodiodę. W tym celu należy wybrać zakres prostoliniowy przebiegu czułości i korzystając z prostej regresji wyznaczyć przecięcie prostej z osią długości fali  $\lambda_{odc} = -\frac{b}{a}$ .



## Laboratorium Detekcji Promieniowania Elektromagnetycznego

- Aby obliczyć niepewność pomiaru  $u(\lambda_{odc})$ , należy skorzystać z niepewności wynikających z regresji liniowej  $\Delta a$  i  $\Delta b$  i dokładności skali monochromatora:

$$u(\lambda_{odc}) = \frac{\text{dokładność skali monochromatora}}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

### 3. Wyznaczenie charakterystyki widmowej wydajności kwantowej

Narysować charakterystykę spektralną wydajności kwantowej fotodiody:

$$\eta = \frac{hc}{e\lambda} R_v(\lambda) \frac{1}{R} \cdot 100\% \quad (9)$$

gdzie  $h$  – stała Plancka,  $c$  – prędkość światła,  $e$  – ładunek elektronu,  $\lambda$  - długość fali,  $R_v(\lambda)$  - spektralna czułość napięciowa detektora,  $R$  - rezystancja w układzie przedstawionym na rys. 2 ( $2.66\text{M}\Omega$ ).

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

$$u(\eta) = 100\% \cdot hc \sqrt{\left[\frac{u(\lambda)R_v}{(\lambda)^2 R}\right]^2 + \left[\frac{u(R_v)}{R\lambda}\right]^2 + \left[\frac{u(R)R_v}{\lambda(R)^2}\right]^2} \quad (10)$$

6. Przeprowadzić dyskusję otrzymanych wyników. Porównać parametry badanej fotodiody z odpowiednimi danymi literaturowymi dla innych fotoprzetworników na podobny zakres spektralny.

7. Obliczyć bryłowy kąt wejściowy układu lustro-szczelina wejściowa monochromatora.

Porównać z kątem bryłowym wejściowym monochromatora.

### UWAGA

Jeśli napięcie na wyjściu czujnika (fotodiody, termopary itd.) jest wzmocnione przez wzmacniacz o wzmocnieniu  $k$  [dB] i jego wartość zmierzona wynosi  $U_m$ , wówczas napięcie rzeczywiste na czujniku  $U_d$  jest równe:

$$k \text{ [dB]} = 10 \lg \left( \frac{U_m^2}{U_d^2} \right) = 20 \lg \left( \frac{U_m}{U_d} \right) \Rightarrow \lg \left( \frac{U_m}{U_d} \right) = \frac{k}{20} \Rightarrow U_d = U_m \cdot 10^{-k/20}, \quad (11)$$

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

### 4. Wyznaczenie charakterystyki widmowej napięcia na wyjściu fotodiody oraz czułości fotodiody pracującej w reżimie napięcia rozwarcia.

Opracować wyniki pomiarów tak jak zostało przedstawione w punkcie 2. paragrafu

**Opracowanie wyników.** Oznacza to, że na podstawie tych pomiarów należy się



## Laboratorium Detekcji Promieniowania Elektromagnetycznego

ograniczyć do wyznaczenia charakterystyki widmowej czułości oraz długości fali odcięcia (i przerwy wzbronionej). Nie należy wykonywać obliczeń wydajności kwantowej.

### Pytania kontrolne

1. Złącze p-n. Charakterystyka prądowo-napięciowa.
2. Efekt fotowoltaiczny

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

U <sub>wy</sub> 12V			Pryzmat LiF		Szczelina 0.7 [mm]	
λ	U <sub>t</sub> [μV]	Z	λ	U <sub>t</sub> [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					

W tabeli „z” oznacza zakres pomiarowy.