



Ćwiczenie III. 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 μm do 9 μm

Detektor odniesienia - termoelement VTh-1 z okienkiem CaF_2 , o czułości stałoprądowej 2V/W, stałej czasowej 15 ms i powierzchni światłoczułej 7 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.

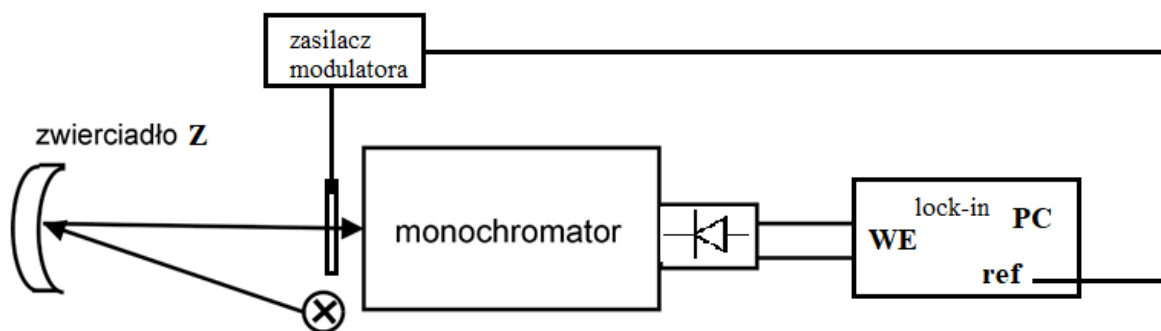
Kat bryłowy wejściowy monochromatora: 0.125 sr



Przebieg ćwiczenia:

1. Pomiar charakterystyki spektralnej czułości względnej fotodiody krzemowej.

- 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.

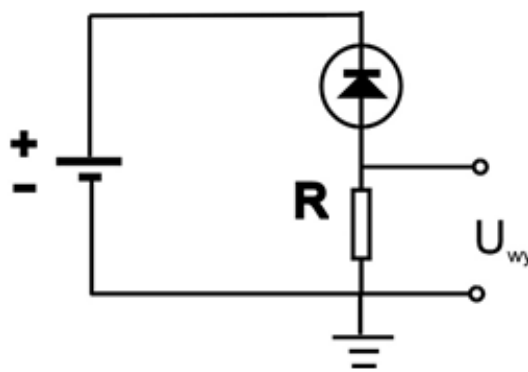


Rys.1.Schemat układu do pomiaru widma czułości spektralnej fotodiody

- ustawić na zasilaczu halogenu napięcie $U = 10V$
- otworzyć szczeliny monochromatora. Ustawić szerokość szczelin monochromatora na 0.7 mm
- oświetlić fotodiode światłem o długości fali z zakresu widzialnego. W tym celu wybrać odpowiednią długość fali monochromatora i ustawić badaną fotodiode 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 fotodiode z wejściem nanowoltomierza. Fotodiode pracuje w tzw. modzie fotoprzewodzącym (PC), co oznacza, że sygnał użyteczny nie jest zbierany z fotodiody ale z rezystora, który jest połączony szeregowo z fotodiode. Schemat elektryczny fotodiody pracującej w takim modzie przedstawia rys. 2.



Fotodiodę 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 fotosygnалу jest dużo bardziej korzystny od pomiaru napięcia rozwarcia, które jest zależne od logarytmu natężenia oświetlenia.



Rys.2. Fotodioda pracująca w modzie PC.

- włączyć nanowoltomierz, włączając przycisk REC.
- ustawić pokrętkę 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 pokrętkę 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.

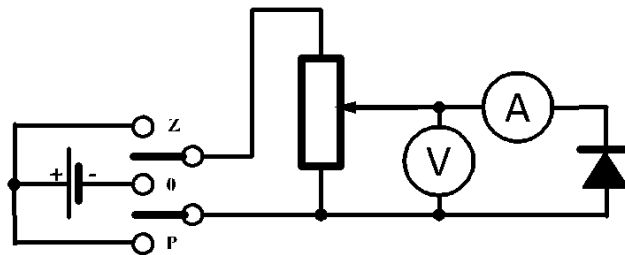
Pomiar sygnału przy pomocy karty pomiarowej lock-in



- 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 rezystancji różniczkowej badanej fotodiody.

Zmierzyć charakterystykę prądowo – napięciową ciemną fotodiody w zakresie od -10mV do $+10\text{mV}$. Na rys. 3 przedstawiono schemat układu do pomiaru charakterystyk I-V fotodiody w pobliżu zerowej polaryzacji. Pomiar wykonuje się metodą techniczną z dokładnym pomiarem prądu.



Rys.3. Schemat układu do pomiaru rezystancji różniczkowej fotodiody

3. Pomiary charakterystyki widmowej dla fotodiody germanowej

Wykonać pomiary takie same jak dla fotodiody krzemowej. Dla tej fotodiody napięcie wyjściowe jest napięciem rozwarcia.

4. Pomiar kąta bryłowego

Zmierzyć bryłowy kąt wejściowy układu lustro-szczelina wejściowa monochromatora.

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 ΔU_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 μm .

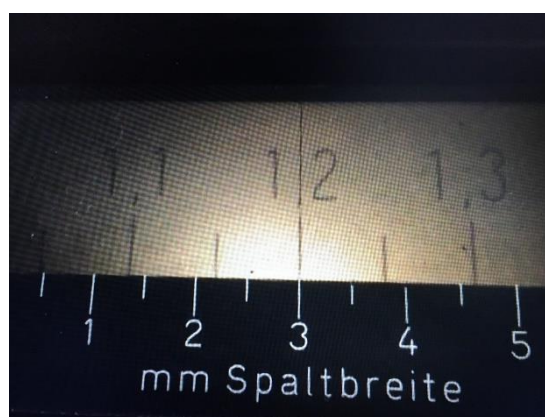
Dolna skala – szerokość szczeliny w mm

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: $(1200 \pm x \cdot 30)\text{nm}$



3. Wyznaczenie rezystancji różniczkowej nieoświetlonego detektora

- Narysować ciemną charakterystykę I-V fotodiody. Zaznaczyć na wykresie 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 badanej fotodiody:

$$R_D = \left(\frac{dI}{dU} \right)_{U=0}^{-1} \cong \left(\frac{\Delta I}{\Delta U} \right)_{U=0}^{-1}. \quad (4)$$

- 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 Δa jest niepewnością współczynnika kierunkowego prostej regresji.

4. Wyznaczenie charakterystyki widmowej napięcia na wyjściu rezystora oraz czułości fotodiody.

- Narysować charakterystykę spektralną napięcia $U_R(\lambda)$. Zaznaczyć niepewności na wykresie. Dokładność pomiaru napięcia ΔU_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 $R_v(\lambda)$:

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

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:

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

- Z odcięcia 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 $\lambda_{odc} = -\frac{b}{a}$.
- Aby obliczyć niepewność pomiaru $u(\lambda_{odc})$, należy skorzystać z niepewności wynikających z regresji liniowej Δa i Δb i dokładności skali monochromatora:

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

5. Charakterystyka widmowa wydajności kwantowej

Narysować charakterystykę spektralną wydajności kwantowej fotodiody:

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



Laboratorium Fotoogni

gdzie h – stała Plancka, c – prędkość światła, q – ładunek elektronu, λ - długość fali, $R_v(\lambda)$ - spektralna czułość napięciowa detektora, R - rezystancja w układzie przedstawionym na rys. 2

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

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

6. Charakterystyka widmowa detekcyjności znormalizowanej

Przy założeniu, że dominują szумы termiczne detekcyjność znormalizowana detektora fotowoltaicznego wyraża się wzorem:

$$D^*(\lambda) = \frac{\eta\lambda q}{2hc} \left(\frac{R_r A}{kT}\right)^{1/2} [cmHz^{1/2}/W] \quad (11)$$

gdzie R_r jest rezystancją różniczkową detektora nieoświetlonego, k – stałą Boltzmann, T – temperaturą pracy detektora. Do powyższego wzoru należy podstawić wydajność kwantową w postaci ułamka (nie w %).

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

$$u(D^*(\lambda)) = \frac{q}{2hc} \left(\frac{A}{kT}\right)^{1/2} \sqrt{\left[u(\lambda)\sqrt{R_r}\eta\right]^2 + \left[u(\eta)\sqrt{R_r}\lambda\right]^2 + \left[\frac{u(R_r)\lambda\eta}{2\sqrt{R_r}}\right]^2} \quad (12)$$

Do powyższego wzoru należy podstawić wydajność kwantową w postaci ułamka (nie w %).

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

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

Porównać z kątem bryłowym wejściowym monochromatora.

UWAGA



Laboratorium Fotoogni

Jeśli napięcie na wyjściu czujnika (fotodiody, termopary itd.) jest wzmacnione przez wzmacniacz o wzmacnieniu 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 $k = 20 \Rightarrow U_d = U_m/10$).

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 _{det} 12V		Pryzmat LiF		Szczelina 0.7 [mm]	
λ	U _t [μV]	Z	λ	U _t [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.