

Ćwiczenie: B10

Tytuł ćwiczenia: Fotoprzewodnictwo

I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z budową i zasadą działania fotoelementów półprzewodnikowych oraz zjawiskiem absorpcji światła w ciałach stałych. Student ma za zadanie zarejestrować krzywe fotoprzewodnictwa dla badanych fotoelementów, wyznaczyć ich przerwy energetyczne i określić z jakich materiałów zostały one wykonane.

II. Zakres ćwiczenia (zadania do wykonania)

1. Wykonanie pomiarów krzywych fotoprzewodnictwa czyli napięcia indukowanego na fotoelemencie w funkcji energii fali świetlnej padającej na fotoelement przy użyciu monochromatora.
2. Wykreślenie krzywych fotoprzewodnictwa badanych fotoelementów i wyznaczenie wartości przerw energetycznych.
3. Określenie rodzaju materiałów, z jakich zostały wykonane badane fotoelementy.

III. Zagadnienia do kolokwium

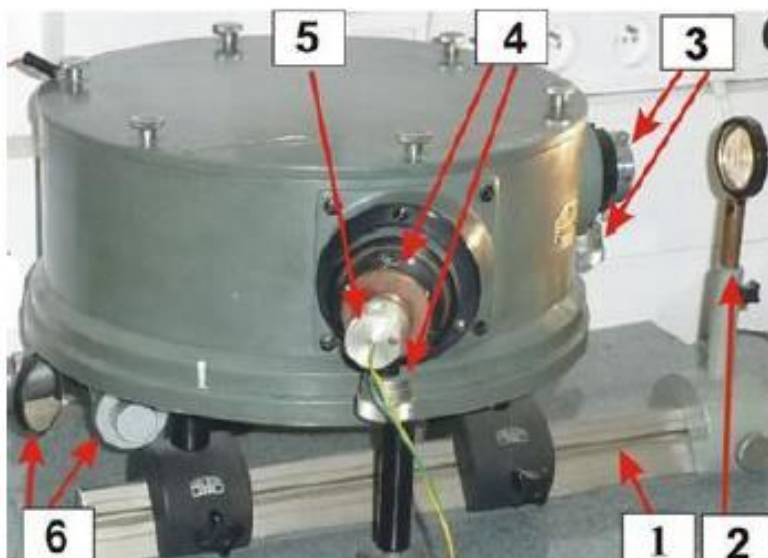
1. Model pasmowy ciała stałego, złącza prostujące i omowe.
2. Oddziaływanie fali elektromagnetycznej z ciałem stałym.
3. Absorpcja fali elektromagnetycznej przez półprzewodniki.
4. Monochromator, fotoelementy półprzewodnikowe, fotodiody, fotorezystory, fototranzystory.

IV. Opis urządzeń i przyrządów używanych w eksperymencie

1. Monochromator

W ćwiczeniu używany jest monochromator firmy CARL ZEISS – Jena (NRD, Niemcy), rys. 1.

Śruba mikrometryczna 6 na rys. 1 (powiększenie elementu na rys. 2) reguluje kąt nachylenia pryzmatu względem wiązki światła padającego. Ze względu na trudności odczytu skali na śrubie zamontowano dodatkowe lustroko ułatwiające odczyt skali.



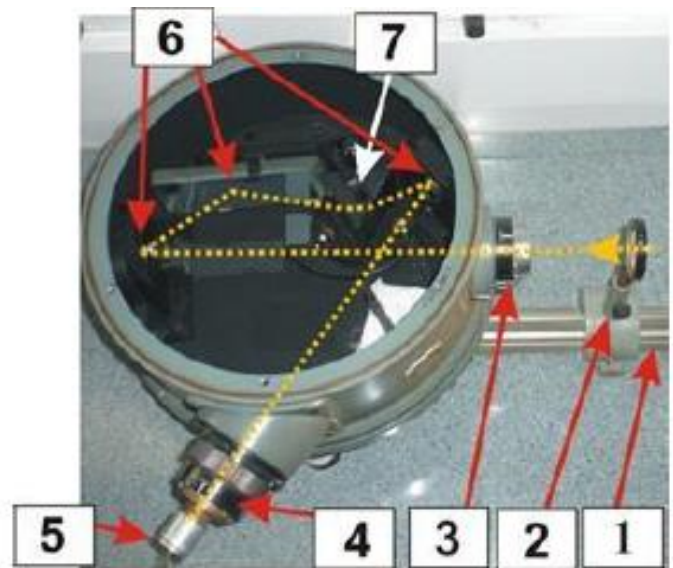
- 1- ława optyczna
- 2 - soczewka skupiająca
- 3- szczelina wejściowa monochromatora ze śrubą do regulacji szerokości szczeliny
- 4 - szczelina wyjściowa monochromatora ze śrubą do regulacji szerokości szczeliny
- 5 - fotoelement
- 6- śruba do regulacji położenia pryzmatu w monochromatorze (zmiana długości fali na szczelinie wyjściowej) oraz lustroko ułatwiające odczyt skali na śrubie

Rys. 1 Monochromator Carl Zeiss-Jena produkcji NRD.

Monochromator jest urządzeniem optycznym, w którym wykorzystywane jest zjawisko rozszczepienia światła białego w celu otrzymania na szczeliny wyjściowej niewielkiego fragmentu widma światła o określonej długości fali. Wnętrze monochromatora wraz z układem lusterek i pryzmatem przedstawione jest na rys. 3, gdzie przerywaną, żółtą linią zaznaczono bieg promieni świetlnych.



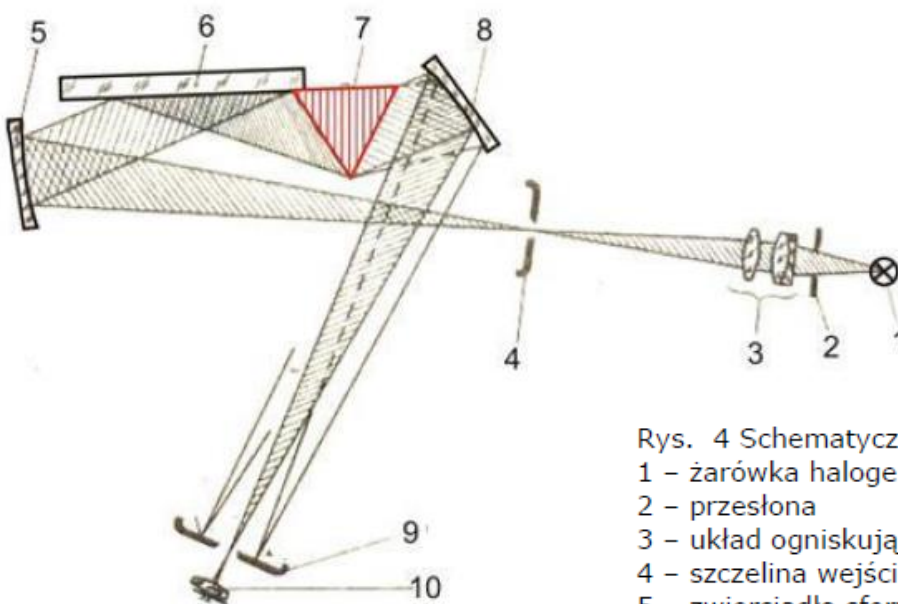
Rys. 2 Śruba mikrometryczna monochromatora do regulacji położenia pryzmatu względem padającej wiązki światła.



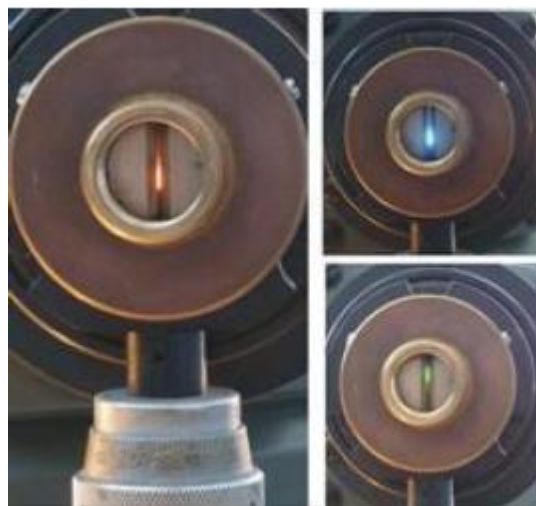
Rys. 3 Wnętrze monochromatora z zaznaczonym biegiem promieni świetlnych (linia żółta).

- 1 – ława optyczna
- 2 – soczewka skupiająca
- 3 – szczelina wejściowa
- 4 – szczelina wyjściowa
- 5 – fotoelement
- 6 – układ zwierciadeł (płaskich i sferycznych)
- 7 – pryzmat

Schemat szczegółowy biegu wiązki światła w monochromatorze ilustruje rys. 4.



Rys. 4 Schematyczny przebieg promieni świetlnych
 1 – żarówka halogenowa
 2 – przesłona
 3 – układ ogniskujący
 4 – szczelina wejściowa monochromatora
 5 – zwierciadło sferyczne
 6 – zwierciadło płaskie
 7 – pryzmat
 8 – zwierciadło sferyczne
 9 – szczelina wyjściowa monochromatora
 10 – fotoelement

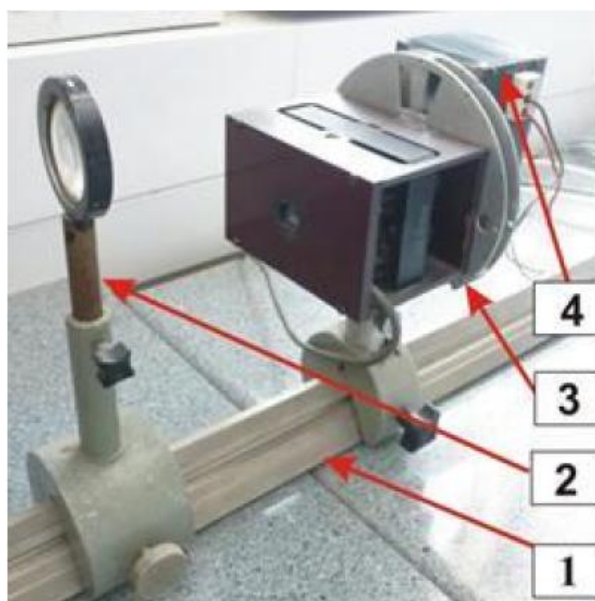


Rys. 5 Widok szczeliny wyjściowej monochromatora (element 4 na rys. 1 i rys. 3) dla różnych długości fal.

Przy różnych położeniach śruby mikrometrycznej regulującej kąt pryzmatu względem wiązki padającej do szczeliny wyjściowej monochromatora docierają fale o różnych długościach, rys. 5. Widoczne są linie czerwona (lewy panel na rys. 5) oraz niebieska i zielona (prawe panele). Fotografie wykonane zostały przy wykręconym fotoelemencie (element 5 na rys. 1 i 3).

2. Układ generujący przerywaną wiązkę światła

Wiązka światła docierająca do monochromatora generowana jest przez lampę halogenową (4 na rys. 6). Ciągła wiązka światła po wyjściu z lampy przechodzi przez wirującą tarczę z otworami zasilaną przez silniczek (3 na rys. 6). Otrzymuje się w ten sposób przerywaną wiązkę światła, która wygeneruje na fotoelemencie zmienny w czasie sygnał (na tle szumów układu). Sygnał taki łatwiej jest zarejestrować przez miernik np. nanowoltomierz selektywny ustawiony na zakres częstości odpowiadającej częstości przerywania wiązki światła. Po przejściu przez wirującą tarczę wiązka światła jest skupiana przez soczewkę (2 na rys. 6) i dociera do szczeliny wejściowej monochromatora (3 na rys. 1 i rys. 3).



Rys 6. Układ generujący wiązkę światła:

- 1 – ława optyczna
- 2 – soczewka skupiająca
- 3 – tarcza wirująca z silnikiem
- 4 – lampa halogenowa

3. Zasilacz lampy halogenowej

Lampa halogenowa (4 na rys. 6) zasilana jest przez osobny zasilacz konstrukcji IF UMCS, rys. 7, wytwarzający napięcie znamionowe 24 wolty.



Rys. 7 Zasilacz lampy halogenowej.
1 – włącznik/wyłącznik sieciowy
2 – gniazda wyjściowe (+- 24V)

4. Nanowoltomierz selektywny

Pomiar napięcia generowanego na fotoelemencie odbywa się za pomocą nanowoltomierza selektywnego typu 237. Przyrząd ten należy dostroić do zmiennego w czasie sygnału generowanego na fotoelemencie za pomocą pokręteł częstotliwości (2 na rys. 8).



Rys. 8 Nanowoltomierz selektywny typ 237
1 – pokrętło zmiany zakresu napięcia
2 – pokręta dostrajania częstotliwości odbioru sygnału
3 – pokrętło zmiany zakresu częstotliwości (Hz, kHz)
4 – wyświetlacz mierzonego napięcia
5 – gniazdo wejściowe sygnału
6 – włącznik/wyłącznik sieciowy nanowoltomierza

5. Zasilacz stabilizowany napięcia KP16102

Laboratoryjny zasilacz napięcia KP16102 wykorzystywany jest do polaryzacji fotoelementów (fotodiody, fototranzystory) napięciem stałym +5V.



Rys. 9 Laboratoryjny zasilacz napięcia KP16102.

1 – włącznik/wyłącznik sieciowy, 2 – gniazda napięcia +5V, +15V, +12V, -6V

6. Fotoelementy

W ćwiczeniu wykorzystywane są następujące fotoelementy:

- Nr 1 - fotorezystor typ WK650 61LK,
- Nr 2 - fotorezystor typ RPYP63,
- Nr 3 - fotodiody typ BPYP30,
- Nr 4 - fotodiody typ BPYP41,
- Nr 5 - fototranzystor typ BPYP21,
- Nr 6 - fototranzystor typ BPYP22,
- Nr 7 - fotorezystor typ RPP131.

Przykładowy wygląd fotoelementu przedstawia rys. 10 (fotoelement nr. 7).



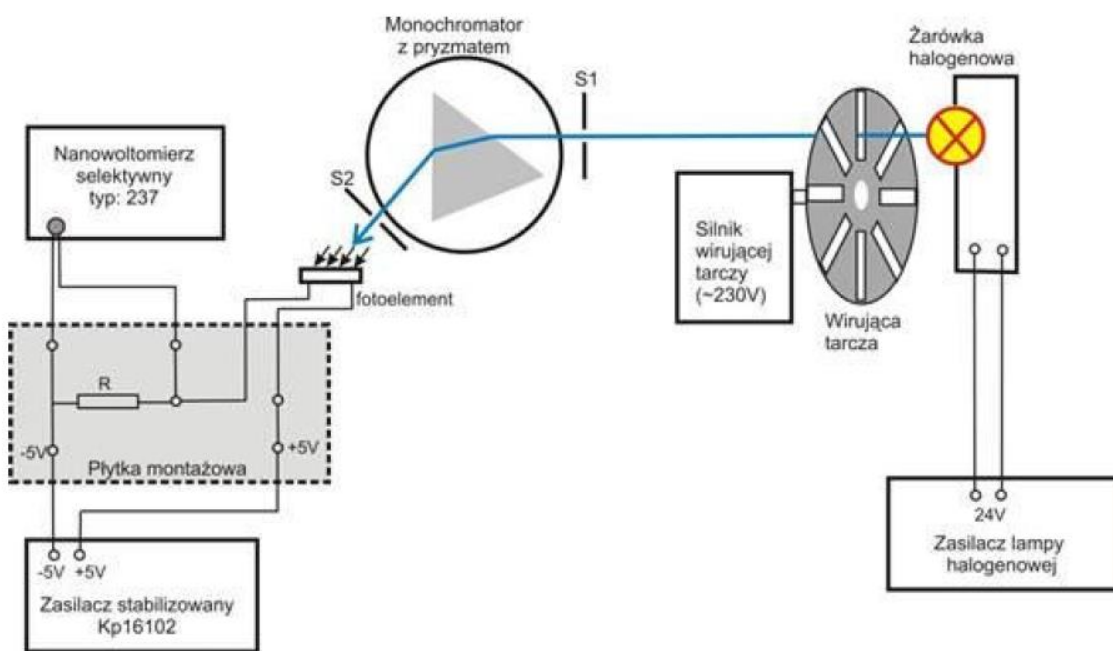
Rys. 10 Fotoelement nr. 7: fotorezystor typ RPP131, lewy panel – widok z góry, prawy panel – widok z boku: widoczne są kable zasilające fotoelement oraz gwint do przymocowania fotoelementu do szczeliny wyjściowej monochromatora.

V. Wykonanie ćwiczenia

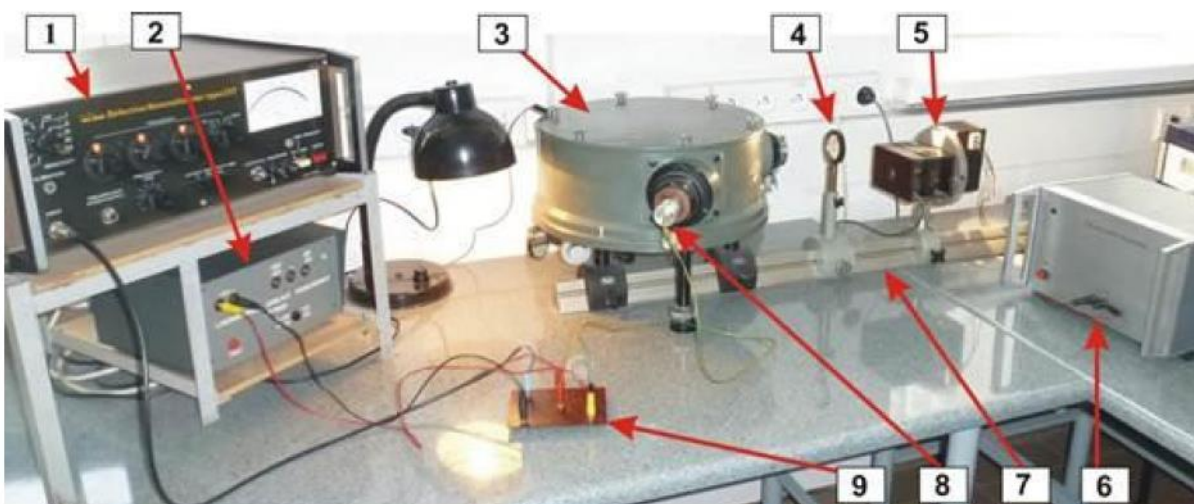
(sposób postępowania, schematy blokowe, uwagi dotyczące obsługi aparatury i BHP)

1. Przygotowanie układu do pomiarów

- 1.1. Do badania należy wybrać kilka fotoelementów: 2 fotorezystory, fotodiody i fototranzystor.
- 1.2. Zamocować (wkręcić) wybrany fotoelement w szczelinie wyjściowej monochromatora.
UWAGA1: przy wkręcaniu uchwyty z badaną próbką do gniazda ze szczeliną wyjściową należy zachować ostrożność aby nie zerwać gwintu oraz aby nie uszkodzić przewodów doprowadzonych do fotoelementu.
UWAGA2: fotodiody i fototranzystory należy spolaryzować w kierunku zaporowym (kolektor do potencjału ujemnego, emiter do dodatniego), polaryzacja fotorezystorów jest bez znaczenia.
- 1.3. Korzystając z płytki montażowej, na której jest zamontowany rezystor $12,1\text{ k}\Omega$ oraz gniazda do wtyków radiowych, zestawić układ do pomiaru fotorz przewodnictwa według schematu przedstawionego na rys. 11. Zdjęcie układu gotowego do przeprowadzenia pomiarów przedstawia rys. 12.



Rys. 11 Schemat układu do pomiaru fotorz przewodnictwa



Rys. 12 Układ do pomiaru fotorz przewodnictwa:

- | | |
|---|---|
| 1 – nanowoltomierz selektywny typ 237 | 2 – laboratoryjny zasilacz napięcia dla fotoelementów |
| 3 – monochromator | 4 – soczewka skupiająca |
| 5 – układ generujący wiązkę przerywaną światła z lampą halogenową | 6 – zasilacz lampy halogenowej |
| 7 – łożo optyczne | 8 – fotoelement |
| 9 – płytka montażowa z opornikiem $12,1\text{ k}\Omega$ | |

2. Włączenie aparatury

- 2.1. Włączyć nanowoltomierz selektywny wciskając czerwony przycisk 6 na rys. 8
Uwaga1: pokrętko SENSITIVITY (1 na rys. 8) przy włączaniu i wyłączeniu nanowoltomierza powinno być ustawione na 100 mV.
Uwaga2: Przycisk OCTAVE SELECTIVITY powinien być ustawiony na 25 lub 40 dB. Nie należy wciskać przycisku 0 dB.
- 2.2. Wtyczkę silnika do tarczy wirującej (3 na rys. 6) podłączyć do gniazda sieciowego prądu zmiennego.
- 2.3. Włączyć zasilacz lampy halogenowej (przycisk 1 na rys. 7).
- 2.4. Ustawić szerokości szczelin monochromatora: wejściowej i wyjściowej na 0,2 mm (20 działek na śrubie nr. 3 i 4 na rys. 1).
- 2.5. Na szczeliny wejściowej monochromatora ustawić ostry obraz włókna żarówki (zmieniając położenie soczewki skupiającej, nr. 2 na rys. 3).
- 2.6. Włączyć zasilacz stabilizowany napięcia KP16102 (przycisk 1 na rys. 9)
- 2.7. Za pomocą śruby mikrometrycznej monochromatora, 6 na rys. 1 i rys. 2, znaleźć maksymalną wartość sygnału napięcia
- 2.8. Dostroić nanowoltomierz selektywny do częstotliwości sygnału z próbki za pomocą zespołu czterech przełączników obrotowych FREQUENCY, 2 na rys. 8 (częstość przerywania wiązki światła wynosi ok. 770 Hz).

3. Wykonanie pomiarów charakterystyki spektralnej wybranych fotoelementów

Monochromator został fabrycznie wycechowany, tzn. konkretnej wartości położenia śruby mikrometrycznej T (6 na rys. 1) przypisane zostały długości fal, jakie docierają do szczeliny wyjściowej monochromatora. Dane te zostały umieszczone w tabeli 1. Ponadto, wykonana została charakterystyka widmowa źródła światła (lampa halogenowej). Charakterystyka ta pokazuje jak duże natężenie światła o danej długości fali emituje użyta w eksperymencie lampa. Wykonana została przy użyciu detektora (termopary): dla różnych położenia śruby monochromatora T rejestrowano napięcie generowane na detektorze, U_0 . Pomiaru charakterystyki widmowej wykorzystane są do normalizacji napięcia generowanego na badanym fotoelemencie przy zadanej długości fali światła padającego. Wszystkie dane zapisane zostały w tabeli 1.

W celu zmierzenia charakterystyki spektralnej fotoelementu należy:

- 3.1. Ustawić położenie śruby monochromatora, 6 na rys. 1, na wartość 845 działek.
 Położenie to odpowiada długości fali światła na szczeliny wyjściowej monochromatora $\lambda = 2750 \text{ nm}$
- 3.2. Ustawić zakres czułości nanowoltomierza (SENSITIVITY, nr. 1 na rys. 8) na $30 \mu\text{V}$.
- 3.3. Położenie śruby mikrometrycznej zmieniać w zakresie 845 - 1570 działek, co 5 działek i notować wartości napięcia mierzonego przez nanowoltomierz selektywny.
UWAGA: W obszarze szumów (sygnał poniżej $30 \mu\text{V}$) nie ma potrzeby szczegółowego notowania wyników (można notować rzadziej niż co 5 działek).
- 3.4. Jeżeli wskazówka nanowoltomierza selektywnego wychyliła się poza ustawiony zakres pomiarowy należy zwiększyć zakres, przełącznik 1 na rys. 8.
- 3.5. Wyniki notowane są w tabeli 1 (dla każdego fotoelementu osobno), w której wpisane zostały: położenie śruby monochromatora T, długości fal świetlnych odpowiadające zadany położeniom śruby 1, charakterystyka spektralna lampy halogenowej, U_0 . Student zapisuje wartość napięcia U a następnie oblicza sygnał znormalizowany U/U_0 .

3.6. Przed wymianą badanej próbki (fotoelementu), należy zakres nanowoltomierza SENSITIVITY (1 na rys. 8) ustawić na 100 mV, wyłączyć zasilacz KP16102 oraz śrubę mikrometryczną monochromatora ustawić w położeniu 845 działek. Następnie zamocować kolejną próbkę, włączyć zasilacz KP16102 i wykonać pomiar charakterystyki spektralnej.

Tabela 1.

Nr próbki:

Parametry pomiaru:

T	λ (nm)	U_0 (μ V)	U(μ V)	U/ U_0	T	λ (nm)	U_0 (μ V)	U(μ V)	U/ U_0	T	λ (nm)	U_0 (μ V)	U(μ V)	U/ U_0
845	2750	0,5			1090	1003	125			1335	520	10		
850	2715	2			1095	979	110			1340	516	10		
855	2681	4			1100	955	98			1345	513	9,5		
860	2650	6			1105	933	84			1350	509	9		
865	2614	8			1110	912	72			1355	506	8,5		
870	2580	9			1115	893	60			1360	502	8		
875	2547	11			1120	874	50			1365	499	7,5		
880	2513	13			1125	857	44			1370	496	7		
885	2478	15			1130	841	40			1375	492	6,5		
890	2445	18			1135	825	36			1380	489	6,2		
895	2410	20,5			1140	810	35			1385	486	6		
900	2373	23,5			1145	795	35			1390	483	5,6		
905	2342	26			1150	782	36			1395	480	5,2		
910	2307	28,5			1155	769	38			1400	477	5		
915	2274	30			1160	757	40			1405	475	4,7		
920	2239	32			1165	745	40			1410	472	4,3		
925	2197	37			1170	733	42			1415	469	4,2		
930	2166	44			1175	722	42			1420	467	4		
935	2131	51			1180	712	43			1425	464	3,6		
940	2093	58			1185	701	43			1430	461	3,5		
945	2054	65			1190	692	43			1435	459	3,3		
950	2015	73			1195	683	43			1440	457	3,1		
955	1975	80			1200	674	42			1445	455	3		

Pracownia fizyczna II

960	1938	88		
965	1897,5	94		
970	1844	105		
975	1816	110		
980	1766	120		
985	1736	135		
990	1696	150		
995	1654	160		
1000	1614	170		
1005	1575	180		
1010	1536	190		
1015	1515	195		
1020	1454	200		
1025	1414	200		
1030	1375	200		
1035	1336	205		
1040	1299	210		
1045	1263	210		
1050	1229	205		
1055	1195	200		
1060	1164	190		
1065	1133	180		
1070	1106	170		
1075	1079	160		
1080	1053	150		
1085	1028	135		

Instytut Fizyki UMCS

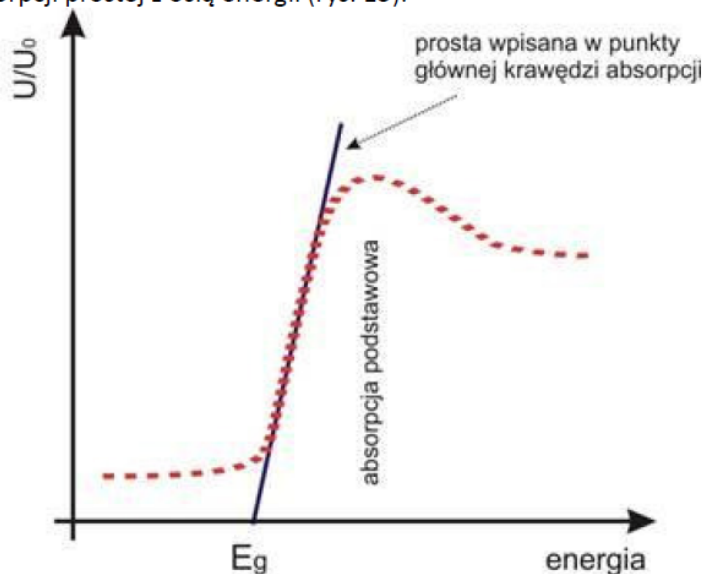
1205	665	40		
1210	657	38		
1215	649	37		
1220	642	36		
1225	634	34		
1230	627	33		
1235	620	31		
1240	614	30		
1245	607	28		
1250	601	27		
1255	595	26		
1260	589	24		
1265	589	23		
1270	578	22		
1275	573	21		
1280	563	19,5		
1285	564	18,5		
1290	558	17,5		
1295	553	16,5		
1300	549	15,5		
1305	544	14,5		
1310	540	14		
1315	535	13		
1320	532	12,5		
1325	527	12		
1330	524	11		

1450	452	2,8		
1455	450	2,6		
1460	447	2,4		
1465	445	2,3		
1470	443	2,2		
1475	441	2		
1480	439	1,8		
1485	437	1,7		
1490	435	1,6		
1495	433	1,5		
1500	431	1,4		
1505	429	1,3		
1510	427	1,2		
1515	425	1,1		
1520	424	1		
1525	422	0,9		
1530	421	0,8		
1535	419	0,8		
1540	417	0,7		
1545	415	0,6		
1550	414	0,6		
1555	412			
1560	411	0,5		
1565	409			
1570	407	0,4		
1575				

4. Wyłączanie aparatury:
 - 4.1. Przed wyłączeniem nanowoltomierza selektywnego pokrętko zmiany zakresu SENSITIVITY (1 na rys. 8) ustawić na 100 mV.
 - 4.2. Wyłączyć zasilacz lampy halogenowej.
 - 4.3. Wyłączyć zasilacz KP16102.
 - 4.4. Wyłączyć nanowoltomierz selektywny.
 - 4.5. Wyłączyć silnik tarczy wirującej.
 - 4.6. Rozmontować układ pomiarowy.

VI. Opracowanie wyników i raport końcowy

1. Na podstawie zebranych danych student sporządza wykresy zależności unormowanego napięcia U/U_0 w funkcji energii podających fotonów (energię fotonów należy obliczyć ze znajomości długości fali świetlnej). Wykres ten jest charakterystyką spektralną badanego fotoelementu i powinien zawierać główną krawędź absorpcji (stromy odcinek prostoliniowy), jak na rys. 13.
2. Następnie w punkty, które wyznaczają prostoliniowy odcinek głównej krawędzi absorpcji należy wpisać prostą używając metody najmniejszych kwadratów lub wykorzystać odpowiedni program komputerowy (Gnuplot, Origin, Matlab). Wpisana prosta powinna być dokładnie opisana z podaniem wartości współczynników z jednostkami oraz ich błędami dopasowania.
3. Przerwę energetyczną badanego fotoelementu znajdujemy z punktu przecięcia się wpisanej w główną krawędź absorpcji prostej z osią energii (rys. 13).



Rys. 13 Wyznaczenie wartości przerwy energetycznej fotoelementu na podstawie charakterystyki spektralnej.

4. Dla każdego fotoelementu należy wykonać osobny wykres zawierający charakterystykę spektralną, wpisaną prostą z podaniem jej parametrów oraz zaznaczyć i zapisać wartość wyznaczonej przerwy energetycznej.
5. Na podstawie informacji o uzyskanych wartościach przerw energetycznych i literaturowych wartości przerw energetycznych elementów światłoczułych student określa na bazie jakich materiałów wykonane zostały badane w doświadczeniu fotoelementy.

Na niepewność pomiaru przy wyznaczaniu przerwy energetycznej badanego fotoelementu wpływa dokładność wpisania prostej w punkty głównej krawędzi absorpcji. Punkt przecięcia się prostej z osią energii zależy od parametrów dopasowanej prostej, a te obciążone są niepewnościami wyznaczonymi z metody najmniejszych kwadratów.

Niepewność wyznaczenia wartości przerwy energetycznej jest w rzeczywistości nieco większa ze względu na niedokładność zogniskowania wiązki światła w szczelinie wejściowej monochromatora: występuje wtedy przesunięcie krzywej cechowania monochromatora $T(l)$. Ponadto główna krawędź absorpcji może być zniekształcona np. przez inne zjawiska absorpcyjne lub zanieczyszczenie fotoelementu, co prowadzi do braku stromego i prostoliniowego odcinka krzywej absorpcji.

Literatura

1. M. Subotowicz (red), Wstęp do fizyki ciała stałego (skrypt), Lublin, 1981.
2. M. Subotowicz (red), Metody doświadczalne w fizyce ciała stałego (skrypt), Lublin, 1976.
3. P. Kiriejew, Fizyka półprzewodników, PWN, Warszawa, 1969.
4. C. Kittel, Wstęp do fizyki ciała stałego, PWN, Warszawa, 2012.
5. J.I. Pankove, Zjawiska optyczne w półprzewodnikach, WNT, Warszawa, 1974