

Ćwiczenie: B1

Tytuł ćwiczenia: Wyznaczanie przerwy energetycznej w półprzewodniku metodą optyczną

I. Cel ćwiczenia i informacje wprowadzające

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie przerwy energetycznej w półprzewodnikach metodą optyczną, czyli w procesie absorpcji światła dla próbek monokryształów GaAs i GaP. Pomiar natężenia promieniowania wiązki odbitej od próbki oraz przechodzącej przez próbkę pozwala zbadać rozkład stanów energetycznych w pobliżu energii Fermiego i wyznaczyć przerwę energetyczną materiału.

II. Zakres ćwiczenia (zadania do wykonania)

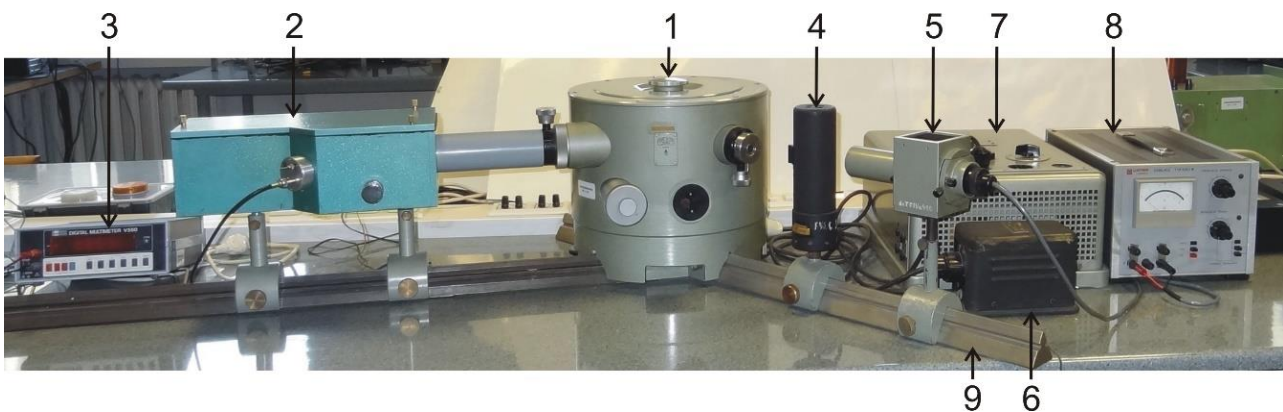
1. Wyznaczenie poprawki skalowania monochromatora.
2. Wyznaczenie współczynników odbicia i transmisji oraz obliczenie współczynników absorpcji.
3. Wyznaczenie wartości przerwy energetycznej na podstawie uzyskanych zależności współczynnika absorpcji światła od energii fotonów.

III. Zagadnienia do kolokwium

1. Model pasmowy ciała stałego, półprzewodniki, zależności dyspersyjne $E(k)$
2. Stałe optyczne: współczynnik załamania, współczynnik absorpcji, stała dielektryczna
3. Oddziaływanie fali elektromagnetycznej z półprzewodnikiem
4. Absorpcja światła w półprzewodnikach z przerwą prostą i przerwą skośną
5. Budowa i zasada działania fotokomórki i fotodiody.
6. Zasada pomiaru współczynników odbicia i transmisji oraz wyznaczenia przerwy energetycznej.

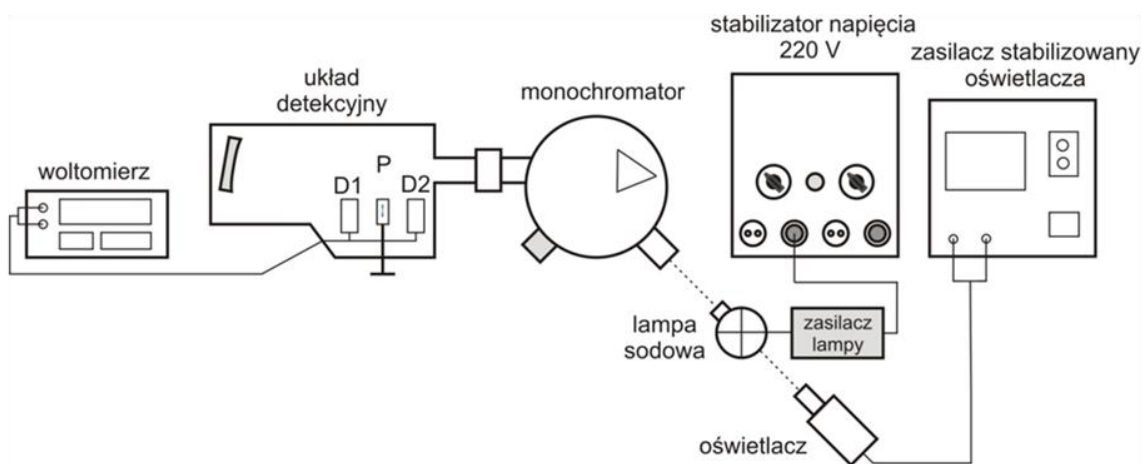
IV. Opis urządzeń i przyrządów używanych w eksperymencie

Zdjęcie zestawionej w eksperymencie aparatury oraz schemat układu przedstawione są na Rys. 1 i Rys. 2. W skład aparatury pomiarowej wchodzi: monochromator SPM1, układ optyczny do formowania wiązki światła, układ detekcyjny z przesuwem próbek, lampa sodowa z zasilaczem (dławikiem) i stabilizatorem napięcia 220 V, oświetlacz z zasilaczem stabilizowanym oraz woltomierz cyfrowy.



Rys. 1 Fotografia układu pomiarowego do wyznaczenia przerwy energetycznej metodą optyczną z zaznaczonymi elementami składowymi: 1- monochromator SPM1, 2- układ detekcyjny, 3- woltomierz cyfrowy, 4- lampa sodowa, 5- oświetlacz, 6- zasilacz lampy sodowej (dławik), 7- stabilizator napięcia 220 V do zasilacza lampy sodowej (dławika), 8- zasilacz stabilizowany oświetlacza, 9- ława optyczna. Schemat układu przedstawiony jest na Rys. 2.

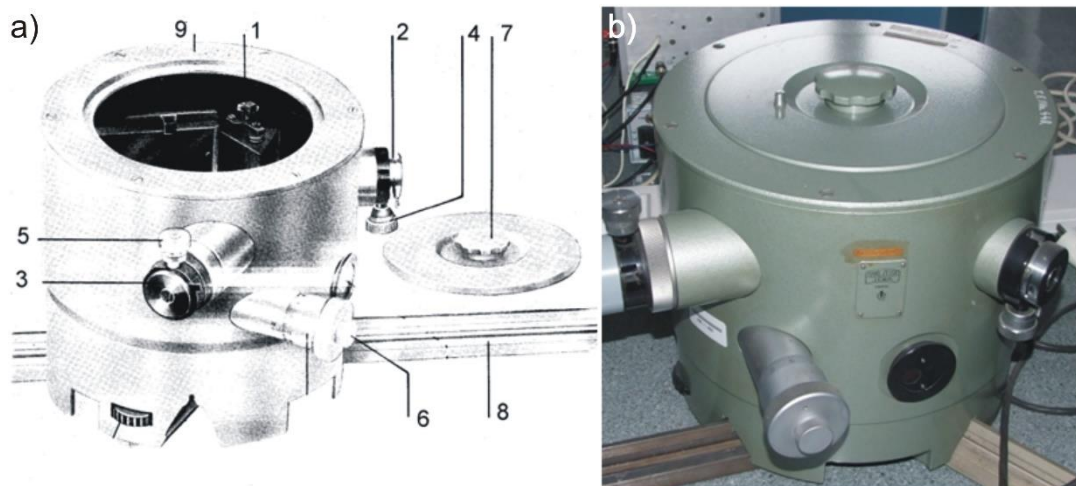
Schemat blokowy aparatury pomiarowej.



Rys. 2 Schemat blokowy układu pomiarowego do wyznaczenia wartości przerwy energetycznej półprzewodników metodą optyczną.

Monochromator SPM1.

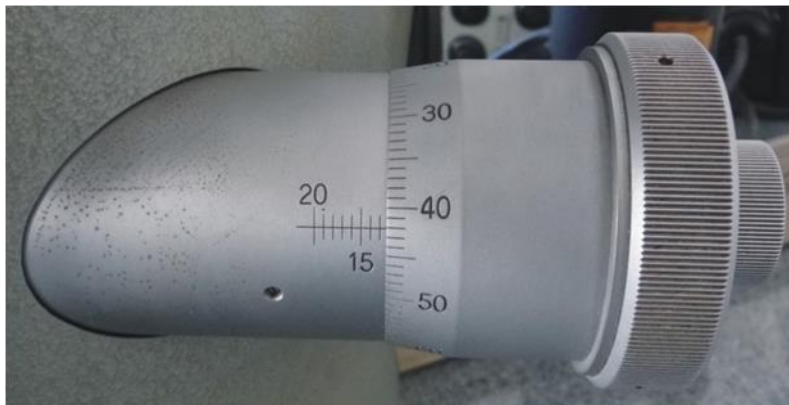
Monochromator służy do wybrania wąskiego pasma falowego z wiązki światła o widmie ciągłym. Spełnia rolę przestrzajalnego filtra pasmowego. Jako elementy dyspersyjne stosowane są pryzmaty lub siatki dyfrakcyjne. Zakres falowy monochromatora zależy od własności optycznych materiału, z którego wykonano element dyspersyjny.



Rys. 3

a) Schemat monochromatora SPM1 z zaznaczonymi najważniejszymi elementami: 1- pryzmat (element wymienny), 2, 3 - szczeliny monochromatora (wejściowa i wyjściowa), 4, 5 - śruby mikrometryczne do regulacji szerokości szczelin, 6 - pokrętko monochromatora ze skalą, 7 - zamek pokrywy monochromatora, 8 - ława optyczna do montażu zewnętrznych elementów optyki, 9 - obudowa monochromatora.

b) Fotografia monochromatora SPM1.



Rys. 4 Fotografia pokrętki monochromatora ze skalą, odczyt pomiaru $M = 1242$ dziątek.

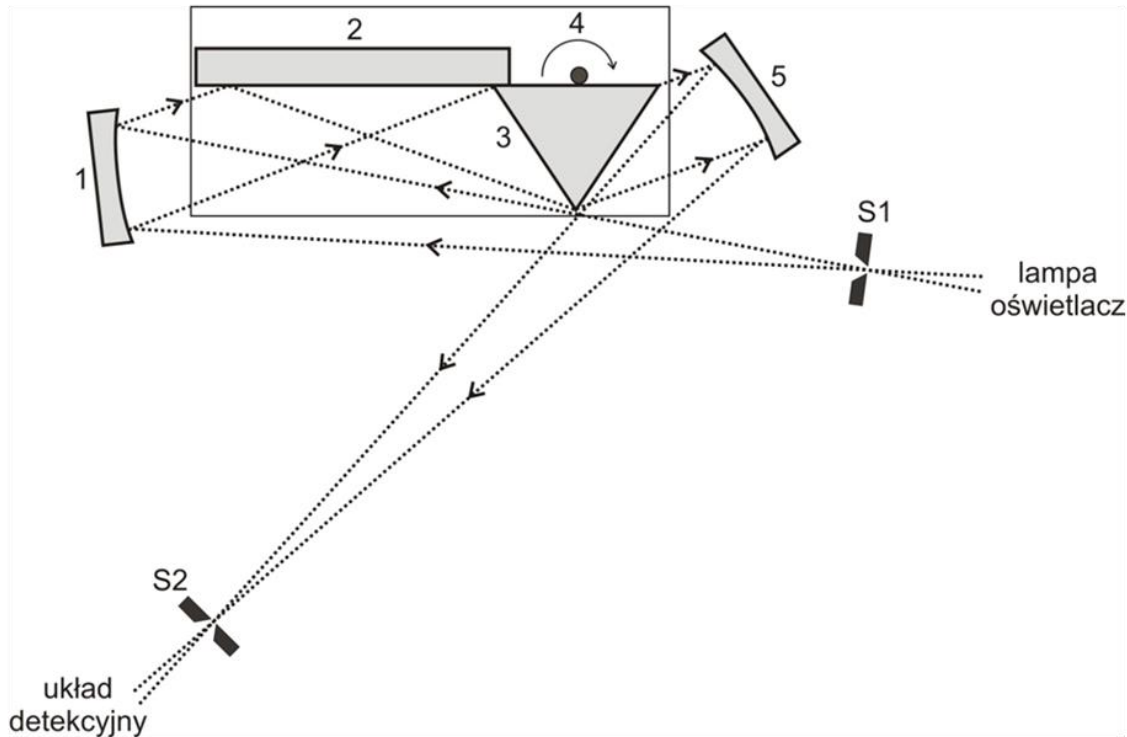


Rys. 5 Fotografia układu optycznego monochromatora SPM1 (po zdjęciu pokrywy). Na fotografii zaznaczono: 1- zwierciadło kolimacyjne, 2- zwierciadło płaskie, 3- pryzmat, 4- układ obrotu pryzmatu połączonego ze zwierciadłem płaskim, 5- zwierciadło wklęsłe, 6- szczelina wejściowa monochromatora, 7- szczelina wyjściowa monochromatora.

Tabela 1. Dane pryzmatów używanych z monochromatorem SPM1.

Materiał pryzmatu	Kąt łamiący pryzmatu	Zakres falowy pracy
Szkoło kwarcowe	56°	$0,21 \dots 1,6 \mu\text{m}$
Fluorek litu	82°	$0,3 \dots 5,3 \mu\text{m}$
Chlorek sodu	67°	$0,4 \dots 15 \mu\text{m}$

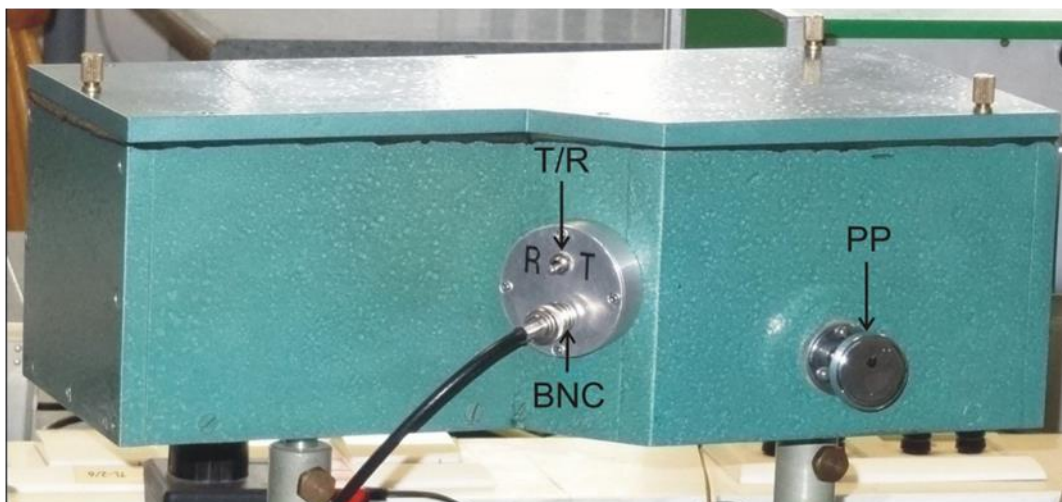
Szerokość szczelin monochromatora $S_1 = S_2 = 0,2 \text{ mm}$ należy ustawić śrubami mikrometrycznymi 4 i 5 pokazanymi na Rys. 3 .



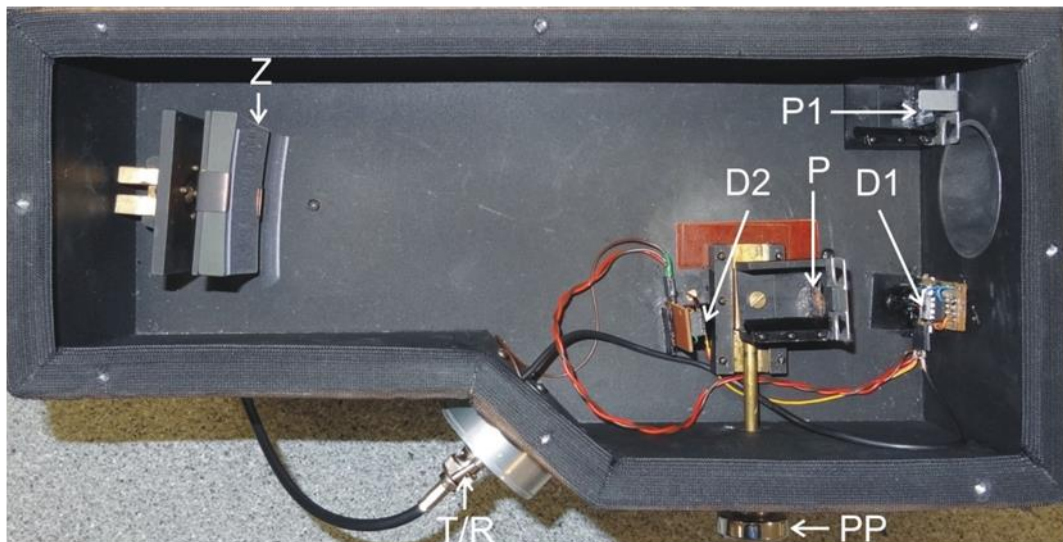
Rys. 6. Przebieg promieni świetlnych w monochromatorze SPM1. Oznaczenia elementów układu: 1- zwierciadło kolimacyjne, 2- zwierciadło płaskie, 3- pryzmat, 4- oś obrotu układu zwierciadła płaskiego i pryzmatu, 5- zwierciadło wklęsłe, S1- szczelina wejściowa, S2- szczelina wyjściowa.

Układ detekcyjny z próbką

Układ detekcyjny znajduje się w pojemniku w kolorze zielonym. Do mocowania pokrywy służą trzy mosiężne śruby wkręcane od góry. Na zewnętrznej ścianie obudowy zamocowany jest układ przesuwu próbki oraz gniazdo BNC i przełącznik wyboru detektorów.



Rys. 7 Fotografia obudowy układu detekcyjnego z widokiem na przełącznik detektorów i gniazdo BNC. T/R- przełącznik detektorów, PP- dźwignia przesuwu próbki, BNC- gniazdo kabla podłączonego do woltomierza cyfrowego, T- pozycja przełącznika do pomiaru napięcia odpowiadającego natężeniu wiązki światła padającego (odniesienia) lub światła przechodzącego - po przesunięciu próbki za pomocą dźwigni przesuwu próbki, R- pozycja przełącznika do pomiaru napięcia odpowiadającego natężeniu wiązki światła odbitego.



Rys. 8 Fotografia wnętrza układu detekcyjnego po zdjęciu pokrywy: P- próbka GaP, D1- detektor wiązki światła padającego (odniesienia) i wiązki światła przechodzącego, D2- detektor wiązki światła odbitego, Z- zwierciadło wklęsłe, T/R- przełącznik detektorów, PP- dźwignia przesuwu próbki, P1- próbka GaAs następną do pomiaru.

Układ zawiera detektory OPT 101 (D1 i D2) w postaci fotodiody zintegrowanej ze wzmacniaczem operacyjnym. Napięcie wyjściowe wzmacniacza jest wprost proporcjonalne do natężenia światła, które oświetla fotodiode. Pole aktywne fotodiody ma kształt kwadratu o wymiarach $3 \times 3 \text{ mm}^2$.

Oświetlacz

Oświetlacz wytwarza zbieżną wiązkę światła i oświetla szczelinę wejściową monochromatora. Źródłem światła jest żarówka zasilana z zasilacza stabilizowanego 5351 M.



Rys. 9 Fotografia oświetlacza.

Lampa sodowa.

Lampa sodowa jest lampą wyładowczą, w której wyładowanie elektryczne zachodzi w parach sodu. W zakresie widzialnym wytwarza ona dwie blisko leżące linie światła żółtego o średniej długości $\lambda = 589,3 \text{ nm}$.



Rys. 10 Fotografia lampy sodowej.

Woltomierz cyfrowy V560

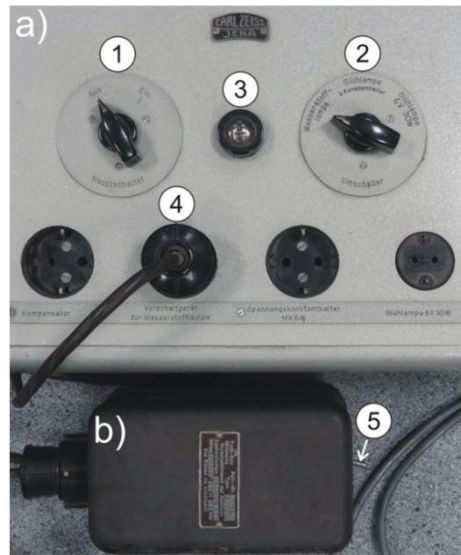
Woltomierz cyfrowy V560 służy do pomiaru napięcia wyjściowego detektorów D1 i D2. Połączony jest za pomocą kabla z gniazdem detektorów na obudowie układu detekcyjnego. Pomiar napięcia należy prowadzić z włączonym czerwonym przyciskiem funkcyjnym „V”, zmieniając zakresy napięć woltomierza od 100 mV do 10 V, w zależności od wielkości mierzonego napięcia.



Rys. 11 Fotografia woltomierza cyfrowego V560 służącego do pomiaru napięć na detektorach: 1- gniazda wejściowe woltomierza, 2- przełączniki trybu pracy woltomierza, 3- przełączniki zakresów (czułości) woltomierza do pomiaru napięć i prądów.

Stabilizator napięcia 220 V

Stabilizator napięcia 220 V służy do zasilania lampy sodowej. Na płycie czołowej stabilizatora znajdują się cztery gniazda. Jedno z nich służy do podłączenia wtyczki zasilacza lampy sodowej (dławika). Dodatkowo znajdują się dwa przełączniki i lampka kontrolna sygnalizująca pracę stabilizatora.



Rys. 12 Fotografia a) płyty czołowej stabilizatora napięcia 220 V do zasilacza lampy sodowej (dławika): 1- włącznik, 2- przełącznik wyboru urządzenia, 3- lampka kontrolna, 4- gniazdo podłączenia lampy sodowej oraz b) zasilacza lampy sodowej (dławika): 5- włącznik.

Zasilacz stabilizowany 5351 M

Urządzenie służy do zasilania oświetlacza (Rys. 9), który jest źródłem wiązki światła w eksperymencie.



Rys. 13. Fotografia zasilacza stabilizowanego 5351 M. Oznaczenia: 1- gniazda wejściowe do oświetlacza, 2- włącznik sieciowy, 3- przełączniki napięcia i prądu, 4- pokrętko regulacji napięcia, 5- pokrętko regulacji prądu, 6- przyciski zakresów regulacji (mnożniki), 7- miernik napięcia i prądu, 8- dioda zielona, wskaźnik stabilizacji napięcia, 9- dioda czerwona, wskaźnik stabilizacji prądu.

V. Wykonanie ćwiczenia

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

Układ pomiarowy spektrometru służy do pomiaru natężenia światła wiązek przechodzących i odbitych od powierzchni płytek półprzewodnikowych, skąd możliwe jest wyznaczenie współczynnika absorpcji, a następnie określenie wartości przerwy energetycznej. Światło z oświetlacza po przejściu przez monochromator wchodzi do układu detekcyjnego, w którym następuje pomiar natężenia światła padającego i odbitego. Pomiar natężeń światła prowadzony jest poprzez rejestrację napięć na odpowiednich detektorach.

Zestawienie i włączenie aparatury.

Przed uruchomieniem układu pomiarowego należy sprawdzić wszystkie jego elementy.

1. Włączanie lampy sodowej.

Aby włączyć lampę sodową należy włożyć wtyczkę zasilacza lampy (dławika) w gniazdo nr 4 oznaczone **Vorschaltgerät für Wasserstofflampe** w górnej płycie obudowy stabilizatora. Przełącznik **Umschalter** (nr. 2 na Rys. 12) ustawić w pozycji **Wasserstofflampe**, a następnie główny wyłącznik **Hauptschalter** (nr. 1 na Rys. 12) przestawić z pozycji **Aus** na **Ein**. Wówczas powinna zapalić się lampka kontrolna sygnalizująca działanie stabilizatora. W kolejnym kroku należy przełączyć wyłącznik na zasilaczu lampy sodowej (dławika) z pozycji prawej na lewą.

Uwaga: przed przystąpieniem do pomiarów z lampą sodową należy po włączeniu wygrzewać ją przez 10 min.

2. Włączanie oświetlacza.

Aby włączyć oświetlacz należy podłączyć kabel zasilający do wejścia zasilacza stabilizowanego 5351 M, Rys. 13. Następnie należy włączyć zasilacz czerwonym przyciskiem i ustawić stabilizację napięciową (powinna zapalić się zielona dioda) dla odpowiednich wartości napięcia (6 V) i prądu (około 5 A), regulując pokrętkami „REGULACJA NAPIĘCIA” i „REGULACJA PRĄDU”. Regulację należy przeprowadzić **stopniowo** aby nie przekroczyć zalecanych wartości prądu i napięcia. Wybór odczytu napięcia lub prądu na mierniku następuje po naciśnięciu przycisku „NAPIĘCIE” lub „PRĄD”. Po odczekaniu około 10 min. można przystąpić do pomiarów.

3. Włączanie woltomierza cyfrowego.

Aby uruchomić woltomierz cyfrowy należy wtyczkę zasilacza włączyć do gniazda prądu, po czym należy przełączyć wyłącznik na tylnej ścianie obudowy.

Wykonanie pomiarów.

Przed właściwym pomiarem współczynników transmisji i odbicia należy wyznaczyć poprawkę ustawienia monochromatora. Fabryczna tabela cechowania, tabela 2, sporządzona została tak, że żółtej linii sodu o długości fali $\lambda = 589,3$ nm odpowiada ustawienie pokrętki monochromatora $M = 1305,9$ (element nr 6 na Rys. 3, Rys. 4). Należy to sprawdzić wykorzystując światło lampy sodowej (4 na Rys. 1, Rys. 10) i wyznaczyć poprawkę.

Sposób wyznaczenia poprawki:

Maksimum natężenia światła padającego na detektor objawia się w postaci wartości maksymalnej napięcia mierzonego przez woltomierz dla określonej wartości położenia pokrętki monochromatora M_{max} . Aby znaleźć M_{max} należy uruchomić lampę sodową i otworzyć obie szczeliny monochromatora: wejściową i wyjściową (szerokość obu szczelin ustawić na 0,2mm). Uchwyt z próbką (PP) należy ustawić w takim położeniu, aby wiązka światła padała na detektor **D1**, a dźwignię pozycji przełącznika do pomiaru napięcia ustawić w położenie T. Włączyć woltomierz, a następnie za pomocą pokrętki monochromatora zmieniać długość fali światła w stronę większych i mniejszych wartości szukając maksimum sygnału, który pojawia się dla światła żółtego i odczytać wartość M_{max} . Poprawkę należy wyznaczyć ze wzoru $\Delta M = 1305,9 - M_{max}$.

UWAGA: w czasie wyznaczania poprawki monochromatora pokrywa układu musi być zamknięta.

Tabela 2. Tablica cechowania monochromatora.

$\lambda(\text{nm})$	M	$\lambda(\text{nm})$	M	$\lambda(\text{nm})$	M	$\lambda(\text{nm})$	M
360	1821.4	430	1549.8	600	1296.8	1500	1060.3
1	1815.6	2	1544.5	10	1288.7	50	1054.0
2	1809.9	4	1539.3	20	1281.1	1600	1047.7
3	1804.3	6	1534.2	30	1273.9	50	1041.5
4	1798.8	8	1529.1	40	1267.1	1700	1035.3
5	1793.4	440	1524.2	50	1260.5	50	1029.1
6	1788.1	2	1519.4	60	1254.2	1800	1022.9
7	1782.8	4	1514.7	70	1248.2	50	1016.7
8	1777.6	6	1510.0	80	1242.4	1900	1010.5
9	1772.5	8	1505.4	90	1236.9	50	1004.3
370	1767.5	450	1500.9	700	1231.6	2000	998.0
1	1762.5	2	1496.4	10	1226.6	50	991.6
2	1757.6	4	1492.0	20	1221.9	2100	985.0
3	1752.7	6	1487.8	30	1217.3	50	978.3
4	1747.9	8	1483.6	40	1212.9	2200	971.4
5	1743.2	460	1479.5	50	1208.7	50	964.3
6	1738.5	2	1475.4	60	1204.6	2300	957.1
7	1733.8	4	1471.4	70	1200.6	50	949.8
8	1729.2	6	1467.4	80	1196.7	2400	942.5
9	1724.7	8	1463.5	90	1192.8	50	935.2
380	1720.2	470	1459.7	800	1189.2	2500	927.9
1	1715.8	2	1456.0	20	1182.6	50	920.5
2	1711.4	4	1452.3	40	1176.3	2600	913.1
3	1707.1	6	1448.7	60	1170.2	50	905.7
4	1702.8	8	1445.1	80	1164.5	2700	898.2
5	1698.6	480	1441.6	900	1159.0	50	890.7
6	1694.5	2	1438.1	20	1154.0	2800	883.2
7	1690.4	4	1434.7	40	1149.3		
8	1686.3	6	1431.4	60	1145.0		
9	1682.3	8	1428.1	80	1140.8		
390	1678.4	490	1424.9	1000	1136.7		
1	1674.5	2	1421.7	20	1132.6		
2	1670.7	4	1418.6	40	1128.6		
3	1666.9	6	1415.5	60	1124.6		
4	1663.1	8	1412.4	80	1120.8		
5	1659.4	500	1409.3	1100	1117.1		
6	1655.7	5	1401.7	20	1113.4		
7	1652.1	510	1394.5	40	1109.9		
8	1648.5	5	1387.5	60	1106.6		
9	1644.9	520	1380.8	80	1103.4		
400	1641.4	5	1374.2	1200	1100.3		
2	1634.6	530	1367.9	20	1097.3		
4	1627.8	5	1361.7	40	1094.3		
6	1621.1	540	1355.7	60	1091.4		
8	1614.5	5	1349.9	80	1088.6		
410	1608.0	550	1344.4	1300	1085.9		
2	1601.7	5	1339.0	20	1083.2		
4	1595.5	560	1333.8	40	1080.5		
6	1589.4	5	1328.7	60	1077.9		
8	1583.5	570	1323.8	80	1075.3		
420	1577.6	5	1318.9	1400	1072.8		
2	1571.9	580	1314.2	20	1070.3		
4	1566.3	5	1309.7	40	1067.8		
6	1560.7	590	1305.3	60	1065.3		
8	1555.2	5	1301.0	80	1062.8		

Określenie wskazań zerowych detektorów D1 i D2.

Pomiar wskazań zerowych polega na pomiarze napięć na poszczególnych detektorach, przy zamkniętej szczelinie wejściowej monochromatora. Wartości zerowe detektora **D1** należy w dalszych pomiarach odjąć od wartości natężeń wiązek padającej i przechodzącej I_0 i I_T , a wartości zerowe detektora **D2** od wartości wiązki odbitej I_R .

Zakres pomiarów

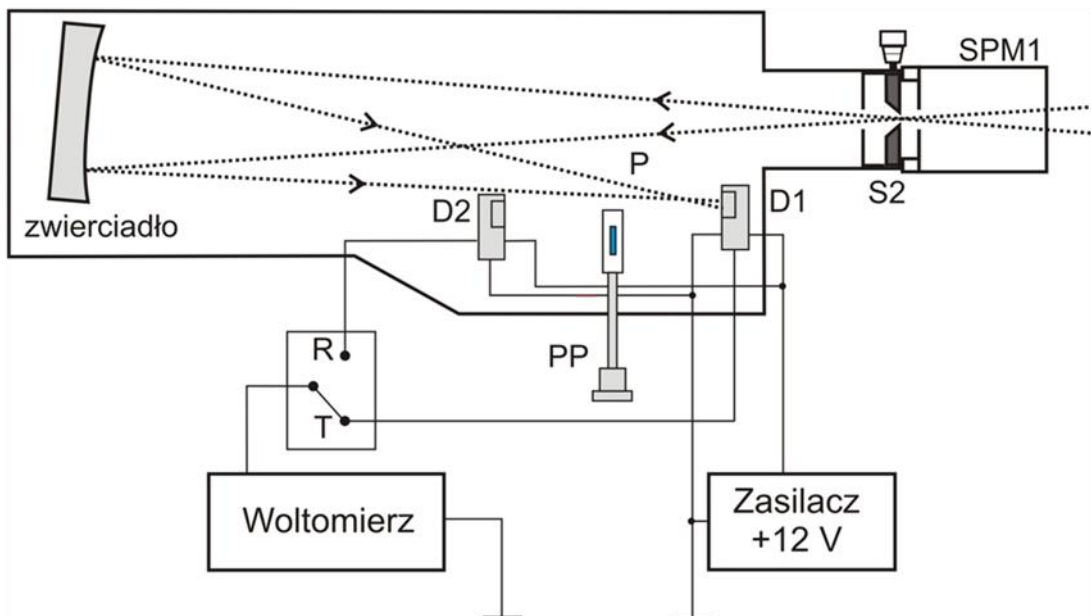
Pomiary wiązki padającej, przechodzącej i odbitej powinny być wykonane w przypadku przerwy prostej w GaAs w przedziale długości fali $803 \div 960$ nm (1,54 – 1,29 eV). W przypadku przerwy skośnej w GaP przedział długości fali powinien zawierać się w zakresie $516 \div 695$ nm (2,40 – 1,78 eV). Zakresy pomiarowe należy odczytać z Tabeli 2 po uwzględnieniu poprawki dla $M + \Delta M$. Punkty pomiarowe $M + \Delta M$ powinny być możliwie gęsto rozmieszczone (co jedną działkę na pokrętle monochromatora) w miejscu krawędzi absorpcji.

Pomiar natężenia wiązek światła

Dla ustalonego położenia pokręta monochromatora dokonujemy pomiarów natężenia światła wiązki padającej I_0 , przechodzącej I_T i odbitej I_R . Następnie należy zmienić położenie pokręta monochromatora i ponownie odczytać I_0 , I_T i I_R (zmiany tych wielkości w porównaniu z poprzednim odczytem nie powinny przekraczać 10%).

1. Pomiar natężenia światła wiązki padającej I_0 .

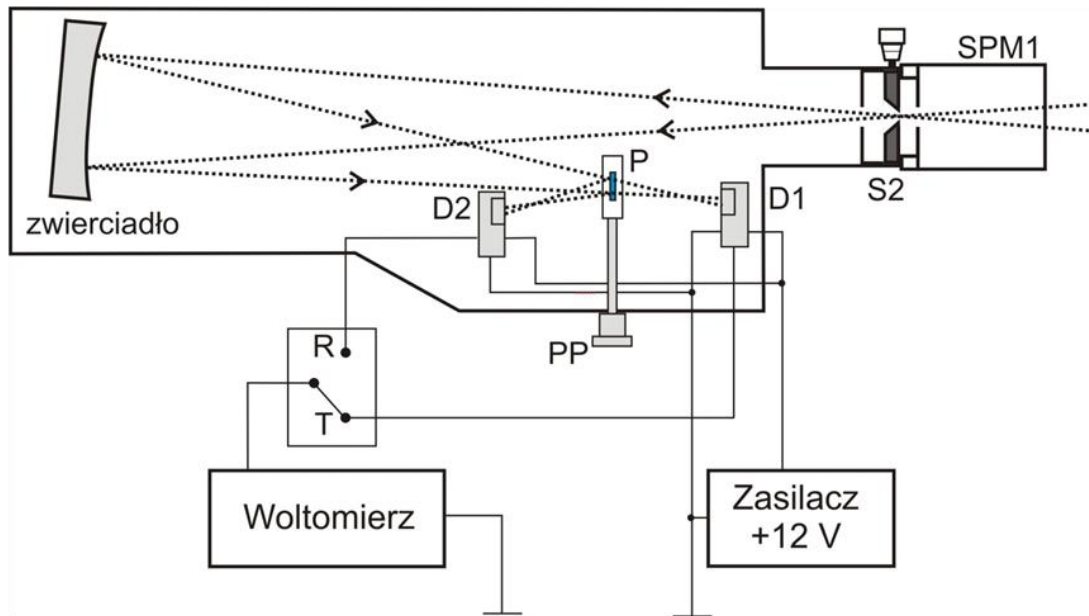
Przed pomiarami należy zdemontować lampę sodową z ławy optycznej. W celu pomiaru natężenia światła wiązki padającej należy najpierw otworzyć obie szczeliny monochromatora SPM1. Następnie na szczelinę wejściową należy skierować wiązkę światła z oświetlacza (5 na Rys. 1, Rys. 9). Za pomocą dźwigni w obudowie układu detekcyjnego (PP) należy uchwyt z próbką ustawić w takim położeniu, aby wiązka światła padała bezpośrednio na detektor **D1** (dźwignia odciągnięta na zewnątrz). Przełącznik na obudowie układu detekcyjnego należy ustawić w pozycji T. Schemat biegu promieni i ustawień aparatury przedstawia Rys. 14. Następnie, za pomocą pokręta monochromatora należy regulować długość fali, zapisując wskazanie woltomierza jako miarę I_0 .



Rys.14 Schemat blokowy spektrometru do pomiaru natężenia światła wiązki padającej I_0 .

2. Pomiar natężenia światła wiązki przechodzącej, I_T

Przy ustawieniach aparatury takich jak w punkcie 1, za pomocą dźwigni w obudowie układu detekcyjnego uchwyt z próbką ustawić w takim położeniu, aby wiązka padała na próbkę (dźwignia PP wciśnięta do środka). Następnie, za pomocą pokręta monochromatora należy regulować długość fali, zapisując dla każdego położenia wskazanie woltomierza, jako miarę I_T . W tym przypadku przełącznik na obudowie układu detekcyjnego należy ustawić w położeniu T. Schemat biegu promieni i ustawień aparatury w tym przypadku przedstawia Rys. 15.



Rys. 15 Schemat blokowy spektrometru do pomiaru natężenia światła I_T oraz I_R . D1- detektor wiązki przechodzącej, D2- detektor wiązki odbitej, P- próbka, PP- dźwignia zmiany położenia próbki, RT- przełącznik wyboru detektora (R- odbicie, T- transmisja).

3. Pomiar natężenia światła wiązki odbitej, I_R

Przy ustawieniach aparatury takich jak w punkcie 2, pomiar natężenia światła wiązki odbitej I_R odbywa się z woltomierza dla przełącznika układu detekcyjnego ustawionego w pozycji R.

Wymiana próbki.

Próbka GaP jest przezroczysta o pomarańczowym zabarwieniu, natomiast próbka GaAs jest nieprzezroczysta dla światła widzialnego. Wymiana próbki wymaga otwarcia pokrywy spektrometru i przeprowadza się ją wyłącznie w obecności asystenta technicznego. Po wymianie próbki należy sprawdzić czy obszary padania wiązek światła I_0 , I_T oraz I_R mieszczą się całkowicie w aktywnych polach detektorów **D1** i **D2**.

Po zakończeniu pomiarów należy wyłączyć wszystkie elementy aparatury pomiarowej.

VI. Opracowanie wyników i raport końcowy

Wyniki pomiarów natężenia wiązek światła należy zapisać w tabeli sporządzonej zgodnie z poniższym przykładem (patrz Tabela 3).

Przed obliczaniem współczynników T i R sygnał zerowy detektora **D1** należy odjąć od I_0 (mV) oraz I_T (mV), natomiast detektora **D2** od I_R (mV). W kolumnie pierwszej znajduje się położenie pokrętki monochromatora (z uwzględnieniem poprawki). W kolumnie drugiej znajduje się długość fali λ (nm), natomiast w kolumnach trzeciej, czwartej i piątej - zmierzone wartości napięcia detektorów, które odpowiadają natężeniu światła padającego na płytkę $I_0(\lambda)$, przechodzącego przez płytkę $I_T(\lambda)$ oraz światła odbitego od płytki $I_R(\lambda)$.

Tabela 3. Przykładowe wyniki pomiarów dla próbki GaAs.

$M + \Delta M$ (działki)	λ (nm)	I_0 (mV)	I_T (mV),	I_R (mV)	T	R	$E = h\nu$ (eV)	α^2 (cm ⁻²)
1180,0	828,3	3062	8,26	735,4	$2,65 \cdot 10^{-4}$	0,23837	1,497	65710
1179,0	831,4	3119	8,30	749,3	$2,73 \cdot 10^{-4}$	0,23847	1,491	65200
---	---	---	---	---	---	---	---	---
1158,0	904,0	4672	1130	1417	0,241	0,3022	1,372	586,1
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Współczynnik transmisji T definiuje się jako stosunek natężenia światła przechodzącego przez płytkę półprzewodnika $I_T(\lambda)$, do natężenia światła padającego na płytkę $I_0(\lambda)$:

$$T = T(\lambda) = \frac{I_T(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (1)$$

Współczynnik odbicia R jest określony stosunkiem natężenia światła odbitego od płytki półprzewodnika $I_R(\lambda)$ do natężenia światła padającego na płytkę $I_0(\lambda)$:

$$R = R(\lambda) = \frac{I_R(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (2)$$

Oba powyższe współczynniki są ze sobą powiązane i mogą być wyrażone poprzez parametry próbki (grubość) oraz współczynnik absorpcji promieniowania, α (wzór 22 Appendix). Wzór ten pozwala wyliczyć współczynnik absorpcji:

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{-(1-R)^2 + \sqrt{(1-R)^4 + 4T^2R^2}}{2TR^2} \right) \quad (3)$$

W ostatniej kolumnie w Tabeli 3 należy umieścić obliczony z równania 3 współczynnik absorpcji, wstawiony w odpowiedniej potęgde. Energię fotonów w kolumnie ósmej Tabeli 3 należy obliczyć ze wzoru:

$$E = h \frac{c}{\lambda} = \frac{1239,842}{\lambda(\text{nm})} \text{ eV} \quad (4)$$

Na podstawie danych z Tabeli 3 należy sporządzić dwa oddzielne wykresy. Na jednym należy umieścić $\frac{I}{I_0}$ współczynnika transmisji oraz współczynnika odbicia od energii fotonów. Na drugim rysunku należy nanieść wartości absorpcji w funkcji energii fotonów $\alpha^\eta(h\nu)$, gdzie η jest wykładnikiem potęgowym zależnym od typu przerwy energetycznej, patrz Tabela 4.

Tabela 4. Dane materiałowe do przeprowadzenia obliczeń i ich analizy.

Półprzewodnik	Grubość płytki $d(\text{cm})$	Typ przerwy energetycznej	Wykładnik η	Typ zależności funkcyjnej [Pankove (1974)] $\alpha^\eta \sim f(h\nu)$
GaP	0.030 cm	Skośna	$\frac{1}{2}$	$\alpha^{1/2} \sim C(h\nu - E_g \mp E_f)$
GaAs	0.030 cm	Prosta	2	$\alpha^2 \sim C(h\nu - E_g)$
InP	0.030 cm	Prosta	2	$\alpha^2 \sim C(h\nu - E_g)$

Następnie, w obszarze krawędzi absorpcji należy dopasować funkcję liniową $y = ax + b$ do punktów wykresu $\alpha^\eta(h\nu)$. Wartość przerwy energetycznej E_g wyznacza miejsce zerowe funkcji liniowej $x = -b/a$, czyli:

$$E_g = -\frac{b}{a} \quad (5)$$

Dla każdej krzywej wpisanej metodą najmniejszych kwadratów podać wartości współczynników prostej oraz ich niepewności (skorzystać z odpowiednich programów komputerowych). Niepewności te wpływają na niepewność wyznaczenia przerwy energetycznej badanego materiału.

Otrzymane wyniki powinny być omówione pod kątem ich poprawności i wiarygodności oraz porównane z dostępnymi danymi literaturowymi.

Literatura

1. C. Kittel, *Wstęp do Fizyki ciała stałego*, PWN Warszawa 2012.
2. H. Ibach, H. Lüth, *Fizyka ciała stałego*, PWN Warszawa 1996.
3. M. J. Pankove, *Zjawiska optyczne w półprzewodnikach*, Warszawa 1974.

Literatura uzupełniająca

4. R. Bacewicz, *Optyka ciała stałego, wybrane zagadnienia*, OWPW Warszawa 1995.
5. M. Subotowicz, *Metody doświadczalne w fizyce ciała stałego*, UMCS Lublin 1977.

Appendix: Materiały pomocnicze

Absorpcja optyczna w ciele stałym.

Absorpcja optyczna jest wynikiem wzbudzenia elektronów z niższych do wyższych stanów energetycznych. Miarą absorpcji jest współczynnik absorpcji $\alpha(h\nu)$, który jest zdefiniowany jako względna szybkość zmniejszania się natężenia światła wzdłuż kierunku rozchodzenia się:

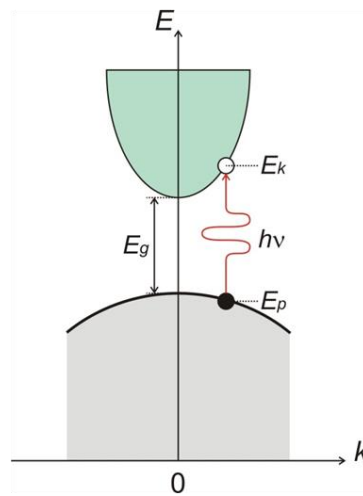
$$\alpha = - \frac{1}{I(h\nu)} \frac{d[I(h\nu)]}{dx} \quad 1$$

Ponieważ pęd fotonu h/λ (λ - jest długością fali światła) jest bardzo mały w porównaniu z pędem fononu, w procesie absorpcji fotonu pęd elektronu powinien być stały. Współczynnik absorpcji $\alpha(h\nu)$ dla danej energii fotonu jest proporcjonalny do prawdopodobieństwa przejścia P_{pk} ze stanu podstawowego p do stanu końcowego k oraz do iloczynu gęstości dostępnych stanów końcowych n_k i początkowych n_p . Sumując po wszystkich możliwych przejściach pomiędzy stanami odległymi od siebie o energię $h\nu$, otrzymamy współczynnik absorpcji

$$\alpha(h\nu) = A \sum P_{pk} n_p n_k \quad 2$$

W dalszej części, dla uproszczenia, należy założyć, że wszystkie stany w paśmie walencyjnym są wypełnione, a w paśmie przewodnictwa są puste. Warunek ten jest spełniony w $T=0$ K w półprzewodniku samoistnym [Pankove (1974)].

Przejścia proste (dozwolone)



Rys. 1 Schematyczne zobrazowanie absorpcji optycznej w półprzewodniku z przerwą prostą.

Każdy stan początkowy elektronu w paśmie walencyjnym E_p jest związany ze stanem końcowym, w paśmie przewodnictwa, o energii E_k następującą zależnością:

$$E_k = h\nu - |E_p| \quad 3$$

W pasmach parabolicznych:

$$E_k - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad 4$$

$$\text{oraz } E_p = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_d^*} \quad 5$$

Stąd po przekształceniach dostaniemy następujące wyrażenie:

$$h\nu - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_d^*} \right) \quad 6$$

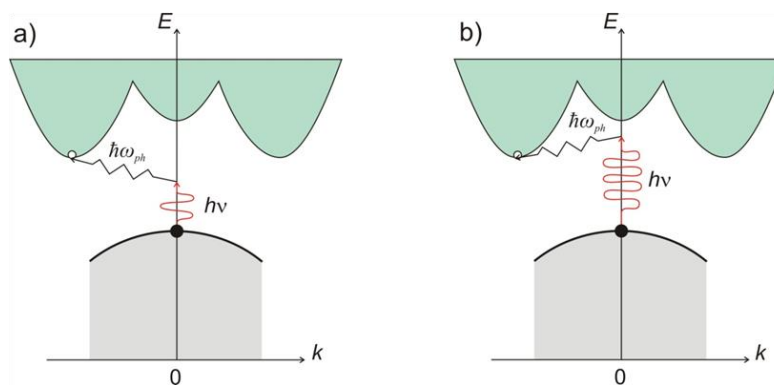
gdzie m_e^* i m_d^* to masy efektywne odpowiednio elektronów i dziur. Uwzględniając gęstość stanów biorących udział w przejściu, otrzymujemy:

$$\alpha(h\nu) = A^*(h\nu - E_g)^{1/2} \quad 7$$

Stały czynnik A^* dany jest wzorem (3-3) na stronie 52 [Pankove (1974)].

Przejścia optyczne w półprzewodnikach z przerwą skołą

Jeżeli w przejściu między stanami energetycznymi elektron zmienia także pęd, to przejście musi przebiegać dwustopniowo, gdyż foton nie może spowodować zmiany pędu elektronu. Zachowanie pędu zawdzięczamy oddziaływaniu z fononem, co ilustruje poniżej [Rys. 2](#).



Rys. 2 Schematyczne zobrazowanie przejścia skońskiego pod wpływem absorpcji kwantu światła: a) przejście z absorpcją fononu, b) przejście z emisją fononu.

W przejściach tych, spośród szerokiego dostępnego widma fononów, mogą brać udział jedynie fonony o odpowiednim pędzie. Są to zwykle podłużne lub poprzeczne fonony akustyczne. Każdy z nich ma charakterystyczną energię E_{ph} . Zatem w celu uzupełnienia przejścia z E_p do E_k fonon musi być wyemitowany lub zaabsorbowany. Te dwa procesy zapisujemy następująco:

$$\begin{cases} h\nu_e = E_k - E_p + E_{ph} \\ h\nu_a = E_k - E_p - E_{ph} \end{cases} \quad 8$$

Przejścia skońskie mogą następować ze wszystkich zajętych stanów z pasma walencyjnego do wszystkich pustych stanów w paśmie przewodnictwa. Współczynnik absorpcji jest proporcjonalny do iloczynu gęstości stanów początkowych i końcowych, całkowanego po wszystkich możliwych kombinacjach stanów odległych od siebie o $h\nu \pm E_{ph}$. Gęstość stanów początkowych o energii E_p :

$$N(E_p) = \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} (2m_d^*)^{3/2} |E_p|^{1/2} \quad 9$$

Gęstość stanów końcowych o energii E_k :

$$N(E_k) = \frac{1}{2\pi^2 \hbar^3} (2m_e^*)^{3/2} (h\nu - E_g \mp E_{ph} + E_p)^{1/2} \quad 10$$

Współczynnik α jest również proporcjonalny do prawdopodobieństwa oddziaływania elektronów z fononami, które jest funkcją liczby fononów N_{ph} , danej przez statystykę Bosego-Einsteina. Dla przejść z absorpcją fononu współczynnik absorpcji wynosi (dla $h\nu > E_g - E_{ph}$):

$$\alpha_a(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g + E_{ph})^2}{\exp\left(\frac{E_{ph}}{k_B T}\right) - 1} \quad 11$$

Dla $h\nu > E_g + E_{ph}$, prawdopodobieństwo emisji fononu jest proporcjonalne do $N_{ph} + 1$, z tego względu dla przejść z emisją fononu otrzymujemy współczynnik absorpcji:

$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_g - E_{ph})^2}{1 - \exp\left(-\frac{E_{ph}}{k_B T}\right)} \quad 12$$

Ponieważ w rzeczywistości przy $h\nu > E_g + E_{ph}$ jest możliwa zarówno absorpcja jak i emisja fononu i współczynnik absorpcji wynosi:

$$\alpha(h\nu) = \alpha_a(h\nu) + \alpha_e(h\nu) \quad 13$$

W bardzo niskich temperaturach, gdy gęstość fononów jest bardzo mała, współczynnik $\alpha_a(h\nu)$ jest mały. Wykres zależności temperaturowej $\alpha_a(h\nu)$ i $\alpha_e(h\nu)$ można zobaczyć na Rys. 3-3 [Pankove (1974)].

Oddziaływanie fali elektromagnetycznej z półprzewodnikiem.

Oddziaływanie fali elektromagnetycznej z półprzewodnikiem opisują równania Maxwella, w których własności półprzewodnika uwzględnione są przez zależności stałych materiałowych półprzewodników takich jak stała dielektryczna $\varepsilon(h\nu)$, współczynnik załamania $n(h\nu)$, czy przewodnictwo $\sigma(h\nu)$. Wielkości te silnie zależą od energii fotonów $h\nu$ w obszarze przejść międzypasmowych. Najczęściej przedstawia się je, jako liczby zespolone, między którymi zachodzą ważne zależności [Pankove (1974)]:

$$\tilde{n} = n - i\kappa \quad 14$$

$$n^2 - \kappa^2 = \varepsilon, 2n\kappa = \varepsilon_i \quad 15$$

$$n^2 = \varepsilon\mu \quad 16$$

prędkość $v = c/\tilde{n}$. W zakresie częstości światła widzialnego przenikalność magnetyczna $\mu \approx 1$, stąd z dobrym przybliżeniem można przyjąć, że $n \approx \sqrt{\varepsilon}$. Współczynnik ekstynkcji κ związany jest z absorpcją promieniowania w ośrodku związkim:

$$\alpha = \frac{4\pi\nu\kappa}{c} \quad 17$$

Jest to współczynnik opisujący osłabienie natężenia światła $I(x)$ w funkcji grubości ośrodka, które określone jest prawem Bouguera-Lamberta [Subotowicz (1976)]:

$$\frac{I(x)}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha x} \quad 18$$

Między częścią rzeczywistą stałej dielektrycznej ε , a urojoną ε_i zachodzą ważne związki, które powiązane są relacjami Kramersa-Kroniga [Pankove (1974)]:

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' \varepsilon_i(\omega') d\omega'}{\omega'^2 - \omega^2} \quad 19$$

$$\varepsilon_i(\omega) = 1 + \frac{2\omega}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon(\omega') d\omega'}{\omega'^2 - \omega^2} \quad 20$$

Współczynnik absorpcji zależy przede wszystkim od energii fotonów $E = h\nu$, jak również od parametrów fizycznych określających stan ośrodka, np. temperatury, ciśnienia, natężenia światła czy koncentracji nośników. Pomiedzy próżnią a powierzchnią płytki, z powodu nieciągłości współczynnika załamania n , część promieniowania o natężeniu I_R ulega odbiciu, tak że $I_R = R \cdot I_0$. Przy padaniu prostopadłym wiązki światła na granicę ośrodków, R wyraża się wzorem [Ibach (1996)]:

$$R = \frac{(n - 1)^2 + \kappa^2}{(n + 1)^2 + \kappa^2} \quad 21$$

Uwzględniając odbicie wiązki światła na obu granicach próbki (w kształcie płaskiej płytki o grubości d) oraz absorpcję w jej wnętrzu, współczynnik transmisji T można przedstawić w postaci:

$$T = \frac{(1 - R)^2 e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}} \quad 22$$

gdzie $T = I_T/I_0$ określa się jako stosunek natężenia światła I_T , które przeszło przez próbkę do natężenia światła padającego I_0 . Zarówno współczynnik odbicia, R jak i transmisji T , można zmierzyć eksperymentalnie i na ich podstawie obliczyć współczynniki absorpcji.