

F3

Fotoprzewodnictwo kryształów GaP, CdSe:Cr i struktury InAs/GaAs

Celem ćwiczenia jest pomiar widma oraz dynamiki fotoprzewodnictwa kryształów objętościowych: fosorku galu (GaP), selenku kadmu silnie domieszkowanego chromem (CdSe:Cr) i struktury InAs/GaAs zawierającej kropki kwantowe.

1. Co należy wiedzieć przed przystąpieniem do ćwiczenia?

1. Należy posiadać ogólne wiadomości z fizyki ciała stałego: [1, 2].
 - a) struktura pasmowa, pojęcie dziury, masa efektywna,
 - b) półprzewodniki samoistne i domieszkowe, obsadzenia poziomów, statystyka elektronów,
 - c) transport, ruchliwość,
 - d) mechanizmy rekombinacji, czas życia nośników.
2. Fotoprzewodnictwo [2, 4].
 - a) typy przejść optycznych z kreacją nośników, zależność fotoprzewodnictwa od długości fali światła.
 - b) zmiana koncentracji nośników pod wpływem oświetlenia, zależność fotoprzewodnictwa od natężenia światła pobudzającego,
3. Podstawowe parametry CdSe, GaAs i GaP [2, 5, 6]: struktura pasmowa, położenie minimów pasma przewodnictwa, masy efektywne, ruchliwość.
4. Podstawowe wiadomości o pomiarach optycznych [7, 8]
 - a) zasada działania i budowa monochromatora,
 - b) modulacyjna technika pomiarowa.

Należy przeczytać i zrozumieć poniższy tekst, ze szczególnym uwzględnieniem słów pogrubionych.

W ciałach krystalicznych elektrony przebywają w potencjale mającym charakter okresowy. Na skutek tego ich funkcje falowe mają postać **funkcji Blocha**.

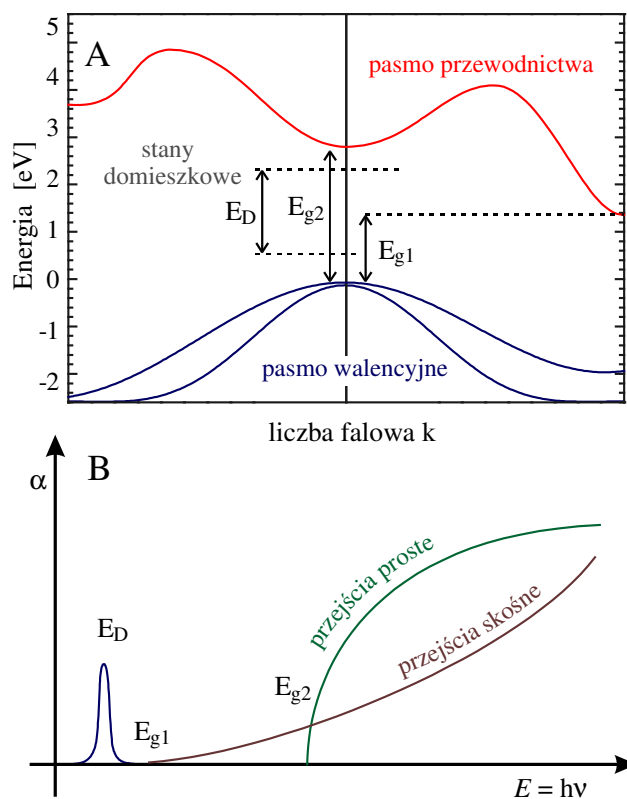
Postać ta dopuszcza możliwość ruchu elektronów, aczkolwiek cząsteczki przez nią opisywane mają nieoczekiwane własności – ich **masy** różnią się od masy elektronu w próżni, a ich ładunki mogą być dodatnie.

Zależność ich energii, E , od pseudopędu, $p = \hbar k$, także jest inna niż dla elektronu w próżni. Zależność $E(k)$ nazywamy **strukturą pasmową** (patrz rys. 1). Rozróżniamy **pasmo walencyjne**, zawierające cząsteczki o ładunku dodatnim – **dziury** i pasmo przewodnictwa, w którym znajdują się ujemnie naładowane elektrony (poprawnie kwazi-elektrony). Pasma te oddzielone są przerwą energetyczną. Szerokość **przerwy energetycznej** w półprzewodniku mieści się w granicach od 0 eV (CdHgTe) do ponad 5 eV (AlN, diament). Półprzewodniki różnią się od metali tym, że w zerowej temperaturze, mają całkowicie zapełnione pasmo walencyjne i całkowicie puste pasmo przewodnictwa.

Przerwa energetyczna w półprzewodnikach może być **prosta lub skośna** (patrz rys. 1A). O przerwie prostej mówimy wtedy, gdy minimum pasma przewodnictwa znajduje się nad wierzchołkiem pasma walencyjnego. Przerwę skośną mamy, gdy minimum pasma przewodnictwa odpowiada wartości k różnej od zera.

Współczynnik absorpcji dla przejść prostych zależy od gęstości stanów w pasmach i dany jest równaniem:

$$\alpha(h\nu) = A_p \cdot (h\nu - E_g)^{1/2}, \quad (1.1)$$



Rys. 1. A Przykład struktury pasmowej półprzewodnika
B Widmo absorpcji

gdzie A_p – to współczynnik zależny od materiału.

Aby wzbudzić nośniki w półprzewodnikach ze skośną przerwą, kryształ musi im przekazać pęd. Najczęściej w procesie bierze udział fonon. Licząc prawdopodobieństwo absorpcji musimy brać pod uwagę rozkład energii fononów. Współczynnik absorpcji będzie opisany równaniem:

$$\alpha(h\nu) = A_s(h\nu - E_g)^{3/2}, \quad (1.2)$$

Domieszki mogą wprowadzać w kryształach dodatkowe stany energetyczne w przerwie wzbronionej. W przypadku pobudzenia światłem kryształów domieszkowanych, możemy otrzymać silny sygnał nie tylko od **przejść pasmo-pasmo**, ale także od **przejść ze stanów domieszkowych do pasma**.

Liczbę nośników ładunku (elektronów lub dziur) w jednostkowej objętości nazywamy **koncentracją**. Zdolność cząstek do przewodzenia prądu określa ich **ruchliwość**, μ , czyli średnia prędkość, jaką osiągają one w jednostkowym polu elektrycznym. Ruchliwość nośników zależy od ich masy efektywnej, m^* , która jest różna w różnych związkach półprzewodnikowych. Jeżeli w próbce znajdują się dziury o koncentracji p i ruchliwości μ , to **przewodnictwo właściwe** materiału (σ) będzie wynosiło: $\sigma = ep\mu$, gdzie: e – ładunek elementarny ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C). Opór właściwy jest odwrotnością przewodnictwa: $\rho = 1/\sigma$.

Oświetlając próbkę światłem o natężeniu Φ , i energii $h\nu$, w ciągu sekundy generujemy średnio $\Phi \alpha/h\nu$ par elektron-dziura w jednostce objętości (gdzie α - **współczynnik absorpcji**). Jeżeli **czas życia** wzbudzonych nośników wynosi τ , to średnia koncentracja wygenerowanych światłem nośników będzie wynosiła:

$$\Delta n = \Delta p = \Phi \alpha \tau / h\nu, \quad (1.3)$$

Współczynnik absorpcji, α , ma znaczenie jeżeli rozważamy na tyle cienką warstwę półprzewodnika, że nie całe światło jest absorbowane. Jeżeli w pobudzonym obszarze wytworzymy pole elektryczne F , to przez próbkę popłynie fotoprąd:

$$I_F = \eta S \frac{\Phi \alpha \tau}{h\nu} (\mu_e + \mu_h) F, \quad (1.4)$$

gdzie μ_e , μ_h - ruchliwości elektronów i dziur, S - oświetlona powierzchnia próbki. Wprowadzony tu został współczynnik η oznaczający sprawność kwantową (na ogół mniejszą od 1). Założono też, że ruchliwość nośników nie zależy od oświetlenia. Należy pamiętać, że pole elektryczne F może się także zmieniać pod wpływem oświetlenia, na skutek ekranowania przez wzbudzone nośniki i zjonizowane domieszki.

Czas życia nośników w półprzewodniku samoistnym określony jest najczęściej przez **prędkość rekombinacji** elektron-dziura. Natomiast w półprzewodniku domieszkowanym istotny wpływ na czas życia ma pułapkowanie i emisja nośników z domieszek. Oświetlając półprzewodnik fotonami o energii powyżej przerwy kreujemy dużą liczbę par swobodny elektron – swobodna dziura. Jeżeli jednak energia fotonów będzie nieco mniejsza od szerokości przerwy, to głównym procesem absorpcyjnym, będą przejścia z domieszek do pasma. Na skutek tego procesu w kryształach pojawiają się fluktuacje potencjału, a procesy rekombinacji będą zachodziły z udziałem domieszek. W efekcie może wydłużyć się (lub skrócić) czas życia nośników. Wychwyty nośników na domieszkach może też spowodować, że po początkowym wzroście, fotoprąd zacznie zanikać.

Wzór (1.4) jest prawdziwy w warunkach równowagi dynamicznej, to znaczy dla czasów $t \gg \tau$. Jeżeli np. na skutek oddziaływania z domieszkami, czasy relaksacji próbki stają się porównywalne z czasem pomiaru, to po oświetleniu próbki będziemy obserwowali narastanie fotoprądu I_F , zgodnie z równaniem $I_F(t) = I_{F\infty}(1 - \exp(-t/\tau))$, gdzie $I_{F\infty}$ jest fotoprądem równowagowym osiąganym po nieskończonym ($t \gg \tau$) czasie. W trakcie naszych pomiarów próbkę pobudzamy światłem modulowanym z częstotliwością f . Tak więc próbka oświetlona jest tylko przez czas równy połowie okresu $T/2 = 1/2f$. Woltomierz fazo-czuły odczyta wartość równą średniej z różnicy sygnału mierzonego na jasno i na ciemno. Spodziewamy się zatem, że zmierzona wartość fotoprądu I_{FS} wyniesie:

$$I_{FS} = I_{F\infty} \left(\frac{1}{2} - \frac{2\tau}{T} \cdot \frac{1 - \exp(-T/2\tau)}{1 + \exp(-T/2\tau)} \right). \quad (1.5)$$

Widać, że dla małych częstotliwości, czyli dużych T , natężenie dąży do stałej: $I_{FS} = I_{F\infty}/2$. Natomiast ze wzrostem częstotliwości natężenie spada i jego zależność od okresu można przybliżyć wzorem $I_{FS} = I_{F\infty} \cdot T/8\tau$.

2. Przebieg ćwiczenia

A. Zapoznanie się z układem optycznym, elektronicznym i programami pomiarowymi.

- B. Skalowanie monochromatora przy pomocy filtrów interferencyjnych i lampy rtęciowej.
- C. Pomiar widma względnej mocy układu pobudzającego przy pomocy detektora. Widmo mocy będzie potrzebne do obliczenia widma wydajności fotoprądu.
- D. Pomiar widm fotoprzewodnictwa InAs/GaAs, w funkcji natężenia światła. Natężenie światła regulujemy zmieniając szerokość szczeliny wejściowej, zakresy 500 - 1200 nm,.
- E. Pomiar widm fotoprzewodnictwa CdSe i GaP dla różnych częstości modulacji (dla szczelin o szerokości 0,5 mm). Zakresy CdSe: 500 - 1200 nm, GaP: 350 - 700 nm
- F. Badanie czasu relaksacji fotoprzewodnictwa dla dwóch długości fali na każdej próbce. Rejestrujemy przebiegi sygnału w funkcji czasu. Do otrzymanych przebiegów dopasowujemy zaniki wykładnicze.

3. Przygotowanie opisu

Opis powinien składać się z następujących części:

1. Streszczenia,
2. Wstępu teoretycznego,
3. Opisu układu pomiarowego i próbek,
4. Wyników i ich analizy,
5. Podsumowania zawierającego wnioski.

Ad. 1. Streszczenie powinno być krótkie (kilka zdań), ale powinno zawierać opis doświadczeń oraz najważniejsze wyniki i wnioski.

Ad. 2. Należy zamieścić uzasadnienie stosowanych wzorów.

Ad. 3. Przy opisie układu należy zamieścić wyniki pomiarów monochromatora. Należy przedstawić widma filtrów interferencyjnych. Do jednego z widm dopasować krzywą Lorentza $U(E) = A/((E - E_0)^2 + \Gamma^2)$.

Ad. 4. Wynikami pomiarów są widma fotoprądu zmierzone dla różnych mocy pobudzania i częstości modulacji światła oraz zaniki fotoprądu w funkcji czasu. Zmierzone widma należy wykalibrować uwzględniając, że dla różnych długości fali moc światła była różna. Porównując z danymi literaturowymi, zidentyfikować, które struktury pochodzą od domieszek, które od kropek kwantowych, które od przejść prostych, a które od skośnych.

Analizując zaobserwowane zależności widm od mocy należy stwierdzić, czy fotoprąd jest proporcjonalny do mocy (należy narysować wykresy i dopasować proste) i zasugerować możliwe mechanizmy powodujące brak proporcjonalności.

Zależność zmierzonego fotoprądu od częstości modulacji należy wytłumaczyć w oparciu o równanie (1.6) (rysujemy wykres $I(f)$ dla kilku długości fali) i porównać otrzymane czasy zaniku τ z czasami otrzymanymi poprzez bezpośredni pomiar (patrz punkt 2.F). Należy porównać czasy zaników otrzymane dla różnych próbek.

Ad. 5. Przedstawić należy fizyczne (naukowe) znaczenie własnych wyników.

Przygotowując opis, należy pamiętać o numeracji wzorów (1) i rysunków (patrz rys. 1.). Przy korzystaniu z materiałów (teksty, rysunki, programy) pochodzących od innych autorów należy w tekście umieścić odnośnik [1], a na końcu podać spis cytowanych źródeł (autor, tytuł, adres strony itp.).

4. Polecane podręczniki

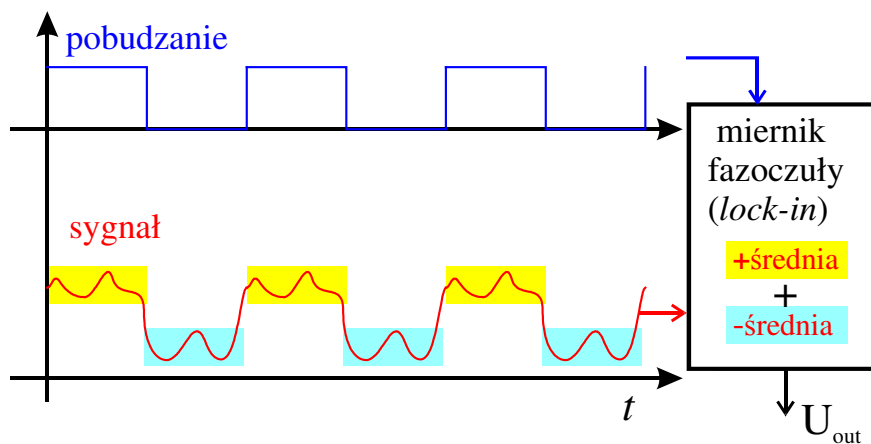
1. J. Ginter - „Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego.”
2. K.W. Szalimowa - „Fizyka półprzewodników”
3. F. J. Blatt – „Fizyka zjawisk elektronowych w metalach i półprzewodnikach”
4. R. Bube - „Photoconductivity in solids”
5. J. Pankove - ”Zjawiska optyczne w półprzewodnikach”
6. M. Aven, J. S. Prenner - ”Physics and chemistry of II-VI compounds”
7. T. Stacewicz, A. Kotlicki - „Elektronika w laboratorium naukowym”
8. Encyklopedia fizyki lub Wikipedia w wersji angielskiej - hasła: monochromator, kamera CCD.

K.K., R.S. 29 XII 2022

Dodatek A: Zasada działania woltomierza fazoczułego (lock-in'a)

W wielu układach pomiarowych spotykamy się z problemem szumów, które czasami są porównywalne z sygnałem mierzonym. Jedną z metod oddzielenia słabego sygnału od szumu jest jego modulacja. Na przykład, możemy modulować strumień światła pobudzającego, zasłaniając i odsłaniając go przy pomocy wiatraczka (ang. *choppera*). Spodziewamy się, że sygnał wzbudzany modulowanym światłem, również będzie modulowany. Jeżeli wykonamy pomiar w momencie czasu, gdy spodziewamy się sygnału, a następnie wykonamy pomiar w chwili, gdy jest sam szum, to różnica wyników tych pomiarów da nam liczbę znacznie mniej obciążoną błędem niż prosty pomiar. Aby dodatkowo poprawić jakość wyniku, należy powtórzyć pomiar wiele razy i uśrednić, a najlepiej wycałkować dany pomiar po czasie.

Urządzeniem, które potrafi wykonać całkowanie w zadanych okresach czasu, jest woltomierz fazoczuły (ang. *lock-in*).



Rys. A1. Przebiegi sygnałów w woltomierzu fazoczułym. Urządzenie pobudzające dostarcza sygnał odniesienia. Woltomierz fazoczuły uśrednia sygnał mierzony ze znakiem plus w chwili, gdy sygnał odniesienia jest wysoki, a ze znakiem minus, gdy sygnał odniesienia jest niski.

Do woltomierza dostarczany jest sygnał odniesienia (ang. *reference*) odpowiadający pobudzeniu (patrz rys. A1) i modulowany sygnał mierzony (ang. *signal*). Woltomierz fazoczuły uśrednia sygnał mierzony ze znakiem plus w czasie, gdy sygnał odniesienia jest wysoki (żółte na rys. A1), a ze znakiem minus, gdy sygnał odniesienia jest niski (błękitne na rys. A1).

Dodatkowo, woltomierz wyposażony jest we wzmacniacz pozwalający mierzyć sygnały na poziomie milionowych części wolta (μV) oraz filtry dolno-zaporowy i górno-zaporowy dodatkowo usuwające szum o częstościach znacznie różniących się od częstości modulacji.