

## F5

### Dwójłomność kryształów CdS i CdSe.

Celem ćwiczenia jest pomiar widm dwójłomności w CdS i CdSe metodą interferencyjną. W wyniku tych pomiarów otrzymać można m. in. zależność widmową różnicy współczynników załamania, którą można przeanalizować w oparciu o model ekscytonowy.

#### 1. Co należy wiedzieć przed przystąpieniem do ćwiczenia?

- 1 Należy posiadać ogólne wiadomości z fizyki półprzewodników [1, 2, 3, 5]:
  - a) Struktura pasmowa, elektrony dziury, ekscytyny.
  - b) Mechanizmy pochłaniania światła w obszarze krawędzi absorpcji podstawowej. Kształt krawędzi w zależności od typu przejść optycznych,
  - c) przejścia absorpcyjne i reguły wyboru.
2. Własności optyczne półprzewodników [3, 4, 5]:
  - a) Współczynnik załamania.
  - b) Dwójłomność kryształów [4].
  - c) Związki między stałymi optycznymi ( $n$ ,  $\alpha$ ) - relacje Kramersa - Kroniga [7]
3. Podstawowe parametry kryształów CdS i CdSe [6]:
  - a) struktura krystaliczna,
  - b) struktura pasmowa w otoczeniu  $k = 0$ , przerwa energetyczna,
4. Technika eksperymentalna pomiarów dwójłomności [6].
5. Podstawowe wiadomości o pomiarach optycznych [8]:
  - a) zasada działania i budowa monochromatora
  - b) modulacyjna technika pomiarowa

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

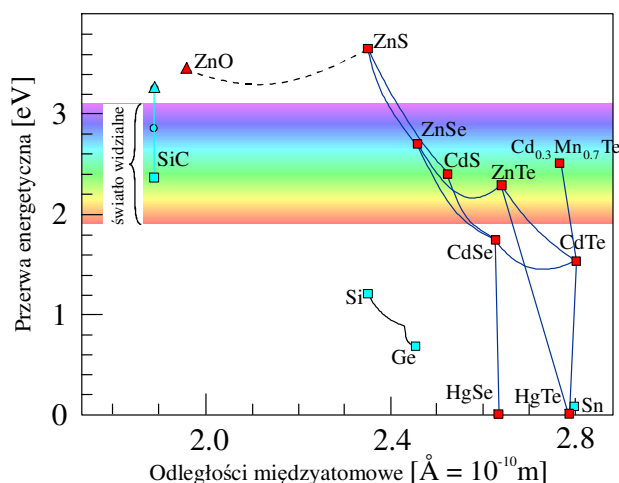
W ciałach krystalicznych elektrony przebywają w potencjale mającym charakter okresowy. Na skutek tego ich funkcje falowe mają postać **funkcji Blocha**. Częsteczki opisywane tą funkcją mają nieoczekiwane własności – ich masy różnią się od **masy** elektronu w próżni, a ich ładunki mogą być dodatnie. Częsteczki o ładunku dodatnim – **dziury** znajdują się w **paśmie walencyjnym**, natomiast elektrony w **paśmie przewodnictwa**. Pasma te oddzielone są **przerwą energetyczną**.

Oprócz dobrze znanych półprzewodników z grupy IV (Si, Ge), wiele zastosowań mają związki półprzewodnikowe z rodzin III-V i II-VI (patrz rys. 1.).

W skład rodziny II-VI wchodzi związek, w których kationami są metale z grupy II (Zn, Mg, Cd, Hg, Pb) a anionami pierwiastki z grupy VI (O, S, Se, Te). Szerokość przerwy energetycznej w tej rodzinie mieści się w granicach od 0 eV (CdHgTe) do ponad 3.5 eV (ZnS). Możliwość otrzymywania stopów tych związków (np.  $\text{Cd}_{0.3}\text{Mn}_{0.7}\text{Te}$  jest stopem 30% CdTe i 70% MnTe) pozwala uzyskać dowolną szerokość przerwy.

Związki krystalizują w dwóch zbliżonych strukturach: blendy cynkowej (kubiczna) i **wurcytu (heksagonalna)**. Ta ostatnia ma wyróżnioną jedną z osi, co umożliwia powstanie **dwójłomności**.

Światło jest falą elektromagnetyczną, którą w ośrodku izotropowym można opisać równaniem:



Rys. 1. Rodziny półprzewodników z grupy IV i związków II-VI.

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp(i\vec{k}\vec{r} - i\omega t), \quad (1.1)$$

Wektory pola elektrycznego,  $\vec{E}$ , i pola magnetycznego,  $\vec{B}$ , są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali,  $\vec{k}$ . Oznacza to, że światło jest **falą poprzeczną**, a zatem możemy określić jego **polaryzację**. Jako kierunek polaryzacji światła przyjmuje się kierunek wektora  $\vec{E}$ . W ośrodku materialnym prędkość fali zmniejsza się i długość wektora falowego  $k$  dana jest wzorem:

$$k = n \omega / c. \quad (1.2)$$

W ośrodku **nieizotropowym** współczynnik załamania,  $n$ , a więc i prędkość fali może zależeć od kierunku i polaryzacji fali. W szczególności w kryształach dwójłomnych światło o polaryzacji równoległej do **osi optycznej** ma inną prędkość niż światło o polaryzacji prostopadłej, **współczynniki załamania** dla każdej z polaryzacji będą różne,  $n_{||} \neq n_{\perp}$ .

Zależność widmowa  $n(\hbar\omega)$  w obszarze podkrawędziowym związana z oddziaływaniem z **ekscytonami** dana jest wzorem (krzywa rezonansowa):

$$n(\hbar\omega) = n_0 + \frac{Ne^2}{2\epsilon m} \frac{(E_X - \hbar\omega)}{((\hbar\omega)^2 - E_X^2)^2 + (\hbar\omega)^2 \Gamma^2}, \quad (1.3)$$

gdzie:  $N$ ,  $E_X$  i  $\Gamma$  – to gęstość stanów, energia i poszerzenie ekscytanu,  $n_0$  – współczynnik bez ekscytanu. Poszerzenie linii ekscytonowej  $\Gamma$  związane jest głównie z oddziaływaniem z drganiami sieci (**fononami**) i w temperaturze pokojowej jest rzędu kilkudziesięciu meV. Gdy temperatura zbliża się do zera bezwzględnego,  $\Gamma$  może spaść do bardzo małych wartości. Jak łatwo zauważyć dla  $\Gamma \rightarrow 0$ , funkcja (1.3) dąży do funkcji  $\delta(E_g - \hbar\omega)$ .

Zakładając, że dwójłomność związana jest z różnymi **regułami wyboru** dla **ekscytonów rozszczepionych polem krystalicznym**. Widmo dwójłomności, w przybliżeniu można opisać krzywą (rys. 2A):

$$\Delta n(\hbar\omega) = \Delta n_0 + \frac{\beta}{((\hbar\omega)^2 - E_g^2)^2 + (\hbar\omega)^2 \Gamma^2}, \quad (1.4)$$

gdzie:  $E_g$  – energia przerwy,  $\beta$  – czynnik.

Ponieważ współczynnik załamania  $n$  i współczynnik absorpcji,  $\alpha$ , zależą od zespolonej funkcji dielektrycznej  $\epsilon$ , zatem znając w szerokim zakresie  $n(\hbar\omega)$  można przy pomocy **równań Kramersa – Kroniga** wyznaczyć widmo absorpcji  $\alpha(\hbar\omega)$  i na odwrót: znając  $\alpha(\hbar\omega)$  można wyznaczyć  $n(\hbar\omega)$ .

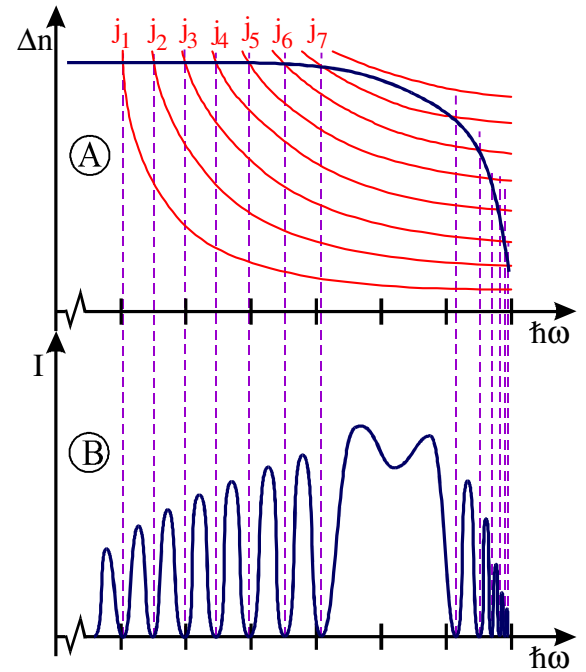
W naszym doświadczeniu światło wprowadzać będziemy do ośrodka dwójłomnego (kryształu o strukturze wurcytu) w kierunku prostopadłym do osi optycznej, spolaryzowane pod kątem  $45^\circ$  do osi. W kryształach będą się, zatem, rozchodzić dwie fale, o polaryzacjach prostopadłej i równoległej do osi optycznej. Obie fale będą miały taką samą amplitudę, ale poruszać się będą z różnymi prędkościami i po wyjściu z kryształu będą przesunięte w fazie, o kąt:

$$\phi = \Delta n \cdot d \cdot k_0, \quad (1.5)$$

(gdzie  $d$  – grubość kryształu,  $k_0$  – wektor falowy w powietrzu). Dalej przepuścimy obie fale przez polaryzator ustawiony prostopadłe do początkowej polaryzacji. Spolaryzuje on obie fale równoległe, tak, że będzie następowała ich interferencja. Przy czym, dla  $\phi = 2\pi j$ , nastąpi wygaszenie (patrz rys. 2B). Uwzględniając równanie (1.2), można podać warunek na minimum natężenia dla światła o energii fotonów  $E_f = \hbar\omega$ :

$$E_f = \frac{hc}{d \cdot \Delta n} j \quad \text{czyli} \quad \Delta n(E_f) = \frac{hc}{d \cdot E_f} j, \quad j = 1, 2, 3.. \quad (1.6)$$

Analiza interferencji umożliwia odtworzenie widma  $\Delta n(\hbar\omega)$ .



Rys. 2. A) Krzywa dyspersji i B) widmo interferencji spowodowane dwójłomnością.

## 2. Przebieg ćwiczenia

A. Przygotowanie układu optycznego do pomiaru:

- pomiar widm czułości układu z dwoma detektorami,
- pomiar widma dobroci polaryzatorów  $D(\hbar\omega)$ :

$$D(\hbar\omega) = \frac{I_{\parallel}(\hbar\omega) - I_{\perp}(\hbar\omega)}{I_{\parallel}(\hbar\omega) + I_{\perp}(\hbar\omega)}. \quad (2.1)$$

gdzie:  $I_{\parallel}$  i  $I_{\perp}$  są natężeniami światła, odpowiednio, dla polaryzatorów ustawionych równolegle i skrzyżowanych.

B. Pomiar widm transmisji próbek: CdS i CdSe.

C. Pomiar widm dwójłomności w CdS i CdSe metodą interferencyjną.

D. Analiza otrzymanych wyników w oparciu o proste modele oddziaływania światła z materią.

## 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 przedstawić schemat i zamieścić wyniki pomiarów polaryzatorów (wykresy  $D(\hbar\omega)$ ) i krzywe czułości układu „widma lampy”.

Ad. 4. Wynikami pomiarów są widma transmisji i interferencji. Na podstawie widm transmisji (i czułości układu) trzeba obliczyć widma współczynników absorpcji  $\alpha(\hbar\omega)$ . Natomiast widma interferencji należy przeanalizować określając numer kolejnego prążka  $j$  i korzystając z (1.6) obliczyć widma  $\Delta n(\hbar\omega)$ . Numer prążka  $j$  ustalamy wiedząc, że  $j(\hbar\omega=0) = 0$  i  $\Delta n = \text{const}$  dla małych  $j$ .

Otrzymane widma  $\Delta n(\hbar\omega)$  należy przedyskutować i dopasować do nich krzywą teoretyczną (1.4). Współczynnikami dopasowania są:  $\beta$ ,  $\Gamma$  i  $\Delta n_0$ . Energię  $E_g$  należy przyjąć jako znaną na podstawie danych literaturowych. Należy założyć, że  $\beta$  jest liczbą ujemną.

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

Przygotowując opis, należy pamiętać o numeracji rysunków (patrz rys. 1.) i wzorów (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

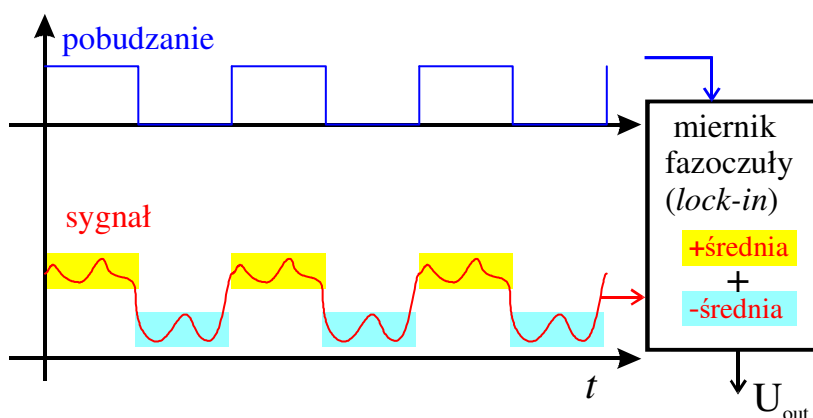
1. J. Ginter - „Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego”
2. K. W. Szalimowa - „Fizyka półprzewodników”
3. T. S. Moss - „Optical properties of semiconductors”
4. S. Pieńkowski - „Fizyka doświadczalna”, tom III - Optyka
5. J. Pankove - „Zjawiska optyczne w półprzewodnikach”
6. M Nawrocki, JA Gaj, J Żuk , 'Birefringence of CdSe and CdS in the vicinity of the fundamental absorption edge', physica status solidi (b) **68**, K181 (1975) <https://doi.org/10.1002/pssb.2220680264>  
W. Wardzyński 'Dichroism and birefringence of single crystals of cadmium selenide', Proc. Roy. Soc. A **260**, 370 (1961) <https://doi.org/10.1098/rspa.1961.0039>
7. [http://en.wikipedia.org/wiki/Kramers-Kronig\\_relations](http://en.wikipedia.org/wiki/Kramers-Kronig_relations)
8. Encyklopedia fizyki lub Wikipedia w wersji angielskiej - hasło: monochromator,

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 ( $\mu V$ ) oraz filtry dolno-zaporowy i górno-zaporowy dodatkowo usuwające szum o częstotliwościach znacznie różniących się od częstotliwości modulacji.