

DYFRAKCJA ELEKTRONÓW I ŚWIATŁA NA SIECI KRystalicznej

1. Podstawy fizyczne

Podane przez A. Einsteina w 1905 roku wyjaśnienie efektu fotoelektrycznego jak również zaobserwowane w 1923 roku zjawisko rozpraszania promieni X na swobodnych elektronach zmieniło radykalnie nasze poglądy na naturę fal elektromagnetycznych.

Fale elektromagnetyczne, chociaż wykazują własności charakterystyczne dla ruchu falowego (dyfrakcja, interferencja itp.), w oddziaływaniu z elektronem zachowują się jak strumień cząstek (**fotonów**), których energia jest równa $h\nu$ (h - stała Plancka, ν - częstotliwość fali świetlnej) a pęd p wynosi:

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad (1)$$

gdzie c - prędkość fali światła, λ - długość fali.

Nie można stwierdzić, że natura fotonów jest falowa lub, że jest korpuskularna a jedynie, że wykazują one cechy zarówno falowe jak i korpuskularne. Ten sposób ich zachowania określa się jako **dualizm korpuskularno - falowy**.

W 1924 roku Louis de Broglie przedstawił hipotezę, zgodnie z którą każdej cząstce można przypisać falę o długości:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (2)$$

gdzie p jest pędem cząstki.

Oznacza to, że w pewnych warunkach poruszającą się cząstkę można traktować jak falę. Falę taką nazywamy falą materii lub falą de Broglie'a.

Warto zwrócić uwagę, że równanie (2) otrzymać można przekształcając wzór (1). Nie jest to zbieżność przypadkowa. U podstaw hipotezy de Broglie'a tkwi bowiem założenie, że **dualizm korpuskularno - falowy jest podstawową własnością całej materii**, a więc zarówno fotonów (o masie spoczynkowej równej zeru!) jak i cząstek korpuskularnych (o masie spoczynkowej różnej od zera). Aby sprawdzić słuszność hipotezy de Broglie'a należy doświadczalnie wykazać, że cząstki podlegają zjawiskom charakterystycznym dla ruchu falowego np. zjawisku interferencji lub dyfrakcji, spełniając przy tym zależność (2).

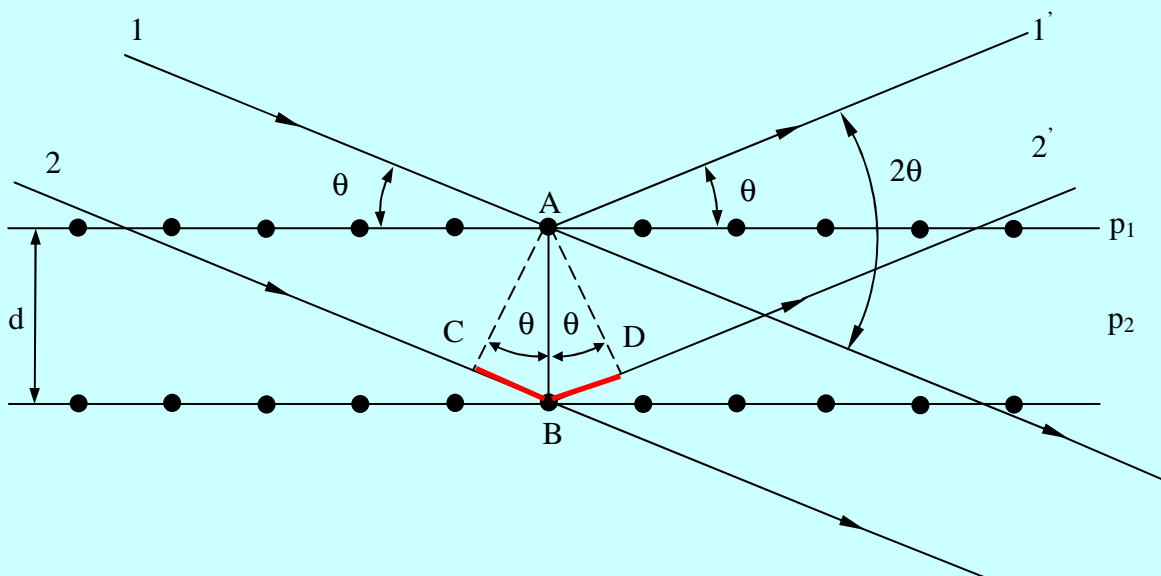
Aby zaobserwować zjawisko interferencji, należy użyć siatki dyfrakcyjnej, której stała (tzn. odległość pomiędzy szczelinami) nie różni się znacząco od długości padającego promieniowania (nie więcej niż dwa rzędy wielkości). Jednocześnie cząstki, aby mogły przenikać przez bardzo cienkie warstwy materii, powinny posiadać znaczną energię. Wtedy ich pęd będzie duży i zgodnie ze wzorem (2) długość fali de Broglie'a stanie się bardzo mała. To z kolei narzuca warunek na bardzo małą wartość stałej siatki dyfrakcyjnej, znacznie mniejszą od możliwych do wykonania.

Dla przykładu: elektrony, aby przeniknąć folię aluminiową o grubości około 50 nm, muszą posiadać energię około 10 keV, ale wtedy ich długość fali de Broglie'a wynosi około 0,01 nm. Jest to wartość mniejsza od średnicy atomu. Jak więc wykonać siatkę dyfrakcyjną o tak małych odległościach pomiędzy szczelinami? Okazuje się, że wcale takich siatek nie musimy wytwarzać, gdyż ich rolę spełniają kryształy. Atomy w kryształach są rozmieszczone w sposób periodyczny, a odległości międzyatomowe wynoszą kilka Å (czytaj: angstremów) ($1\text{Å} = 0,1\text{ nm} = 10^{-10}\text{m}$), co czyni je przydatnymi do obserwacji zjawiska interferencji fal de Broglie'a. Opis różnego typu ciał krystalicznych oraz definicje podstawowych pojęć związanych z budową krystaliczną podano w Dodatku A.

1.1. Dyfrakcja fali na sieci krystalicznej

Załóżmy, że na kryształ pada fala o długości λ . Każdy atom kryształu z nią oddziałujący sam staje się źródłem nowej (wtórnej) fali kulistej o tej samej długości (zasada Huyghensa). Fale wtórne, emitowane przez poszczególne atomy, będą interferować ze sobą. Aby znaleźć wynik interferencji w przypadku ogólnym, rozpatrzmy na początku przypadek, kiedy fala płaska oddziaływać będzie tylko z jedną płaszczyzną atomową.

Ponieważ kryształ możemy przedstawić jako zbiór równoległych płaszczyzn atomowych, to proces powstawania w nim nowej fali opisać można jako nakładanie się (interferencję) fal kulistych powstających w poszczególnych płaszczyznach atomowych. Fale te zostaną po nałożeniu, w zależności od różnicy ich dróg optycznych, wzmacnione lub osłabione, patrz rys.1. **Warunkiem wzmacnienia fal jest, aby różnica dróg optycznych była równa wielokrotności długości fali.**



Rys.1 Dyfrakcja światła na kryształach (1' oznacza kierunek, w którym następuje wzmacnienie fali w wyniku zjawiska interferencji)

Z rysunku 1 wynika, że różnica dróg optycznych dla punktów przestrzeni położonych na kierunkach 1' i 2' dla dwóch kolejnych płaszczyzn atomowych (p_1 i p_2) wynosi: $CB + BD = 2d \sin \theta$ (różnica dróg zaznaczona jest na rysunku kolorem czerwonym). Wzmacnienie interferencyjne wystąpi, gdy będzie ona równa całkowitej wielokrotności długości fali, tj.:

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

(3)

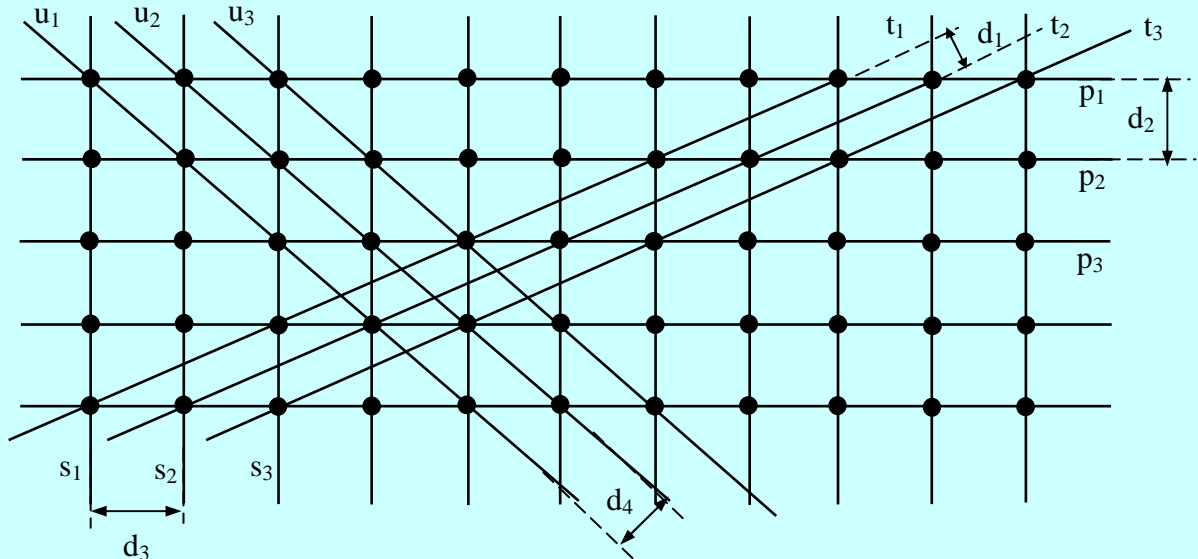
gdzie d - jest odległością między płaszczyznami atomowymi a θ - kątem między kierunkiem promienia padającego a płaszczyzną atomową (tzw. kąt poślizgu - nie mylić z kątem padania!!!), natomiast $n = 1, 2, 3, \dots$ (rzęd ugięcia). Równanie (3) nosi nazwę **wzoru Bragga**.

Chociaż przy wyprowadzaniu wzoru Bragga rozważane były fale powstające tylko w dwóch kolejnych płaszczyznach atomowych, to okazuje się, że jest on słuszny również w przypadku udziału dużej liczby tych płaszczyzn. Z rys.1 widać również, że kąt między kierunkiem na którym leżą maksima interferencyjne a przedłużeniem kierunku fali padającej wynosi 2θ .

Opisany wyżej mechanizm dyfrakcji fali na kryształach nosi nazwę **dyfrakcji braggowskiej** (w literaturze można spotkać często określenie „odbicie braggowskie”). Pamiętać jednak należy, że jest to szczególne „odbicie” tj. zachodzi tylko wtedy, gdy spełniony jest warunek: $2d \sin \theta = n\lambda$. Tak więc zjawisko Bragga można zaobserwować tylko dla fal o długościach porównywalnych z odległością między płaszczyznami międzyatomowymi (d rzędu 0,1 nm) i krótszych. Możliwe jest więc spełnienie równania (3) dla promieniowania rentgenowskiego, a niemożliwe dla światła widzialnego ($\lambda = 400-700$ nm).

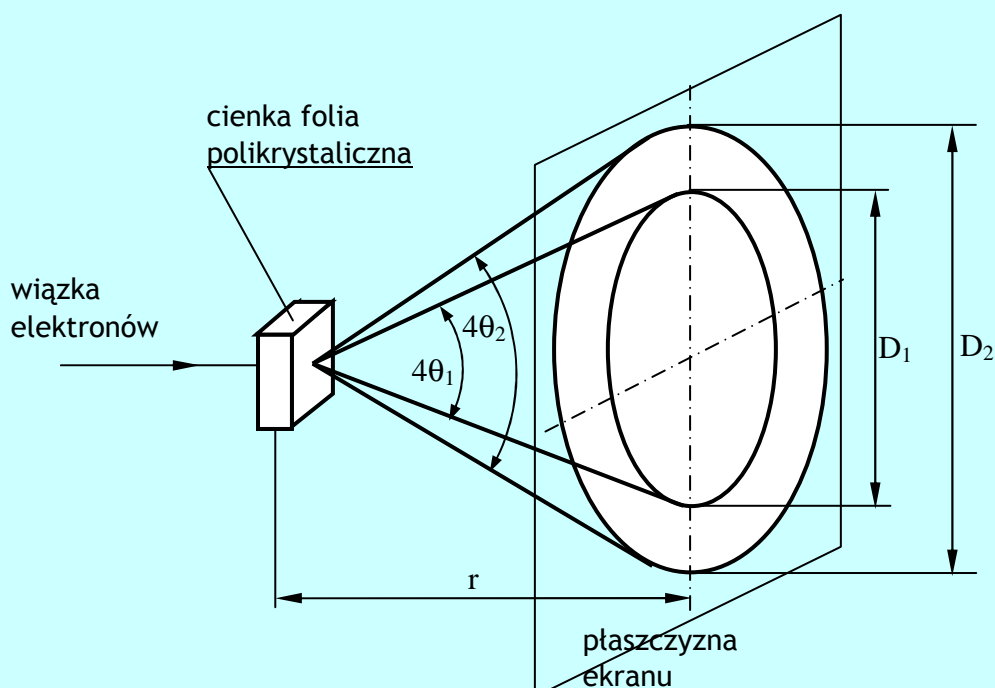
W kryształach można wyróżnić wiele rodzin płaszczyzn atomowych. Na przykład w przekroju kryształu przedstawionym na rys.2, oprócz płaszczyzn p_1, p_2, p_3, \dots można wyróżnić płaszczyzny $t_1,$

$t_2, t_3, \dots, s_1, s_2, s_3, \dots, u_1, u_2, u_3, \dots$. Każda rodzina wymienionych tu płaszczyzn, charakteryzująca się własną odległością między płaszczyznami d_i , może dać opisane powyżej zjawisko, jeżeli tylko spełniony będzie warunek Bragga. Z tego też powodu otrzymujemy wiele kierunków wzmocnień dla różnych kątów poślizgu θ_i .



Rys.2 Przykłady rodzin płaszczyzn atomowych w kryształach (na rysunku widzimy ich rzuty na płaszczyznę rysunku)

Jeżeli kryształ zaczniemy obracać względem osi pokrywającej się z kierunkiem wiązki padającej, to wiązki wzmocnione zaczną zataczać powierzchnie stożkowe o kącie rozwarcia 4θ . Gdy równoległa i monochromatyczna fala pada na polikryształ tzn. materiał zawierający dużą liczbę małych (o rozmiarach mikronowych) monokryształów (kryształitów), zorientowanych w sposób przypadkowy, to zaobserwujemy efekt taki jak przy obrocie kryształu. Zawsze bowiem znajdzie się pewna liczba kryształitów, dla których warunek Bragga będzie spełniony dla danego kąta θ i wówczas wiązki wzmocnione tworzyć będą powierzchnie stożków o kątach rozwarcia 4θ . Jeżeli na drodze wiązek wzmocnionych ustawimy ekran, to zaobserwujemy na nim okręgi (rys.3).



Rys.3 Zjawisko Bragga dla próbki polikrystalicznej.

1.2. Doświadczenie Thomsona

Rozważania przeprowadzone wcześniej, stanowią podstawę do zrozumienia doświadczenia przeprowadzonego przez G. P. Thomsona w 1927r. potwierdzającego hipotezę de Broglie'a. Thomson umieścił w lampie oscyloskopowej, za układem anod ogniskujących, cienką złotą folię (folia taka ma budowę polikrystaliczną). Elektrony padając na nią, podlegały zjawiskom, które zostały wyżej omówione (tzn. zjawisku interferencji), dając w rezultacie na ekranie okręgi o różnych średnicach D_i .

Powstały na ekranie układ pierścieni daje się wyjaśnić, jeżeli przyjmiemy, że z elektronem związana jest fala, której długość określona jest przez wzór: $\lambda = h/p$. Oddziałuje ona z folią polikrystaliczną w przedstawiony wcześniej sposób. Dodatkowym argumentem za słusznością tego założenia jest fakt, że ten sam układ okręgów otrzymano przy naświetleniu wspomnianej folii promieniami rentgena o podobnej długości fali, co długość fali elektronów przewidywana przez de Broglie'a. **Doświadczenie Thomsona potwierdza więc falową naturę strumienia elektronów.** Fala związana z elektronem jest falą materii, której naturę opisano szczegółowo w Dodatku B.

Do zbadania własności fali materii (a także sprawdzenia hipotezy de Broglie'a) użyto odpowiednio przygotowanej lampy oscyloskopowej, w której na drodze wiązki elektronowej umieszczono cienką folię (alumiową lub grafitową). Jej grubość wynosi około 50 nm. Tak cienka folia jest przezroczysta dla elektronów o energiach powyżej 8 keV. Otrzymuje się ją poprzez próżniowe naparowanie. Emitowane przez katodę lampy oscyloskopowej elektrony, nim padną na folię alumiową, są przyspieszane do energii kinetycznej $E_k = eU$ przez przyłożone napięcie U , które można regulować.

Ponieważ odległość folii od ekranu jest znacznie większa od średnicy otrzymanych na ekranie okręgów interferencyjnych D , to zgodnie z rys.3: $\sin 4\theta \approx 4\theta \approx D/r$ (r - odległość folia-ekran), a stąd: $\sin \theta \approx \theta \approx D/4r$.

Podstawiając tak obliczoną wartość $\sin \theta$ do wzoru Bragga (3), otrzymujemy:

$$\frac{dD}{2r} = n\lambda \quad (4)$$

Wartość λ znajdujemy ze wzoru (1) tzn. $\lambda = h/p$. Pęd elektronu p obliczymy znając napięcie U z klasycznego związku między pędem a jego energią eU , tj.: $eU = p^2/2m$ (e - ładunek elektronu, m - jego masa). Relatywistyczna zmiana masy elektronu przy energiach pola elektrycznego użytego w doświadczeniu wprowadza niepewność pomijalnie małą. Podstawiając do wzoru (4) wartość λ obliczoną dla napięcia przyspieszającego U : $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$ oraz $n = 1$ (gdyż tylko okręgi pierwszego rzędu są widoczne), otrzymujemy:

$$D = \frac{2rh}{d\sqrt{2meU}} \quad (5)$$

Średnica okręgu interferencyjnego D , pochodzącego od tego samego zespołu płaszczyzn atomowych powinna być odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego napięcia przyspieszającego elektrony U . Jeśli uzyskamy taki wynik, to będzie potwierdzeniem słuszności wzoru opisującego hipotezę de Broglie'a.

1.3. Dyfrakcja światła na sieci dwuwymiarowej

Celem drugiej części ćwiczenia jest zapoznanie się z dyfrakcją światła na regularnej sieci dwuwymiarowej w przypadku, gdy wiązka światła pada na sieć pod kątem prostym do płaszczyzny sieci. Zgodnie z tym co napisano w poprzedniej części instrukcji, każdy z atomów staje się źródłem nowej fali kulistej. Fale te interferują ze sobą, a efekt możemy zobaczyć na ekranie ustawionym prostopadle do kierunku padania fali, w pewnej odległości od sieci.

Rozpatrzmy sieć regularną prostokątną. Warunkiem wzmocnienia w takim przypadku jest spełnienie dwóch równań Lauego, które możemy zapisać w sposób następujący:

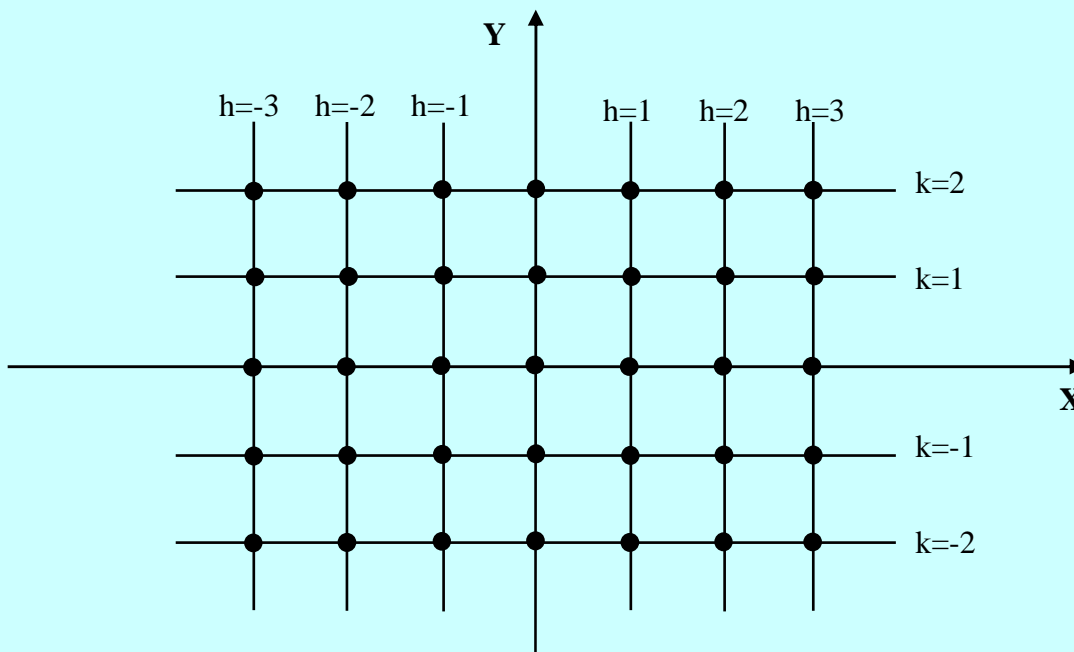
$$a \cos \Theta' = m\lambda$$

$$b \cos \Theta'' = n\lambda$$

(6)

gdzie a, b - stałe sieciowe, Θ' i Θ'' - kąty między kierunkiem padania wiązki świetlnej a kierunkiem wzmocnienia (wiązki wzmocnione tworzą stożki o kątach rozwarcia $2\Theta'$ i $2\Theta''$), m i n - dowolne liczby całkowite.

Rozwiązaniem każdego z równań Lauego są powierzchnie stożkowe, które na ekranie ustawionym w kierunku równoległym do powierzchni sieci (a prostopadłym do kierunku padania wiązki świetlnej) tworzą rodziny hiperbol. Wspólnym rozwiązaniem obu równań obserwowanym na ekranie w postaci świecących punktów są punkty przecięcia hiperbol. W przeprowadzonym doświadczeniu długość fali świetlnej ($0,6 \mu\text{m}$) jest prawie trzy rzędy mniejsza od odległości między atomami w badanej sieci krystalicznej ($0,1 \text{ mm}$). Z tego powodu na ekranie punkty układają się na hiperbolach o bardzo małej krzywiznie, widocznych właściwie jako linie proste (krzywizny hiperbol nie daje się zauważyć).



Rys.4 Wygląd ekranu przypadku dyfrakcji na sieci regularnej - czarne punkty na ilustracji to świecące punkty na ekranie, efekt przecięcia hiperbol (definicja indeksów h i k)

Świecącym punktom na ekranie przypisujemy dwa wskaźniki (patrz ilustracja 4), które nazywane są wskaźnikami Millera. Współrzędne punktów zapisujemy w postaci par liczb (h, k) na przykład $(1, 1)$ $(3, 1)$ $(-2, 5)$, itd. Odcinek, który łączy punkt (h, k) ze środkiem obrazu dyfrakcyjnego (czyli z punktem $(0, 0)$) oznaczamy H_{hk} . Znajomość długości światła λ użytego w doświadczeniu, odległości L ekranu od sieci krystalicznej oraz wartości H_{kl} pozwala na wyznaczenie stałych sieciowych badanej sieci.

Z własności geometrycznych otrzymujemy następujący wzór:

$$\text{tg} \Theta_{hk} = \frac{H_{hk}}{L}$$

(7)

co uwzględniając znaną zależność

$$d_{hk} \sin \Theta_{hk} = n\lambda$$

(8)

pozwała wyznaczyć stałe d_{hk} , a z nich stałe sieciowe badanej sieci. Sposób wyznaczenia stałych sieciowych zależy od rodzaju sieci. Związki między stałymi sieciowymi a wyznaczonymi stałymi d_{hk} są następujące:

$$d_{hk} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2}} \quad (\text{sieć regularna, stała sieciowa } a)$$

$$d_{hk} = \frac{a}{\sqrt{\frac{4}{3}(h^2 + kh + k^2)}} \quad (\text{sieć heksagonalna, stała sieciowa } a)$$

$$d_{hk} = \frac{1}{\sqrt{\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2}}} \quad (\text{sieć prostokątna, stałe sieciowe } a \text{ i } b)$$

(9)

Gdy wiązka pada na sieć polikrystaliczną, to na ekranie powinniśmy uzyskać współśrodkowe okręgi (tak jak w przypadku dyfrakcji elektronów). Jeśli okręgi nie są wyraźnie widoczne, to oznacza, że wiązka światła obejmuje zbyt małą liczbę różnie zorientowanych obszarów monokrystalicznych.

2. Wykonanie ćwiczenia i opracowanie wyników

2.1. Dyfrakcja elektronów - doświadczenie Thompsona

Wykonanie ćwiczenia

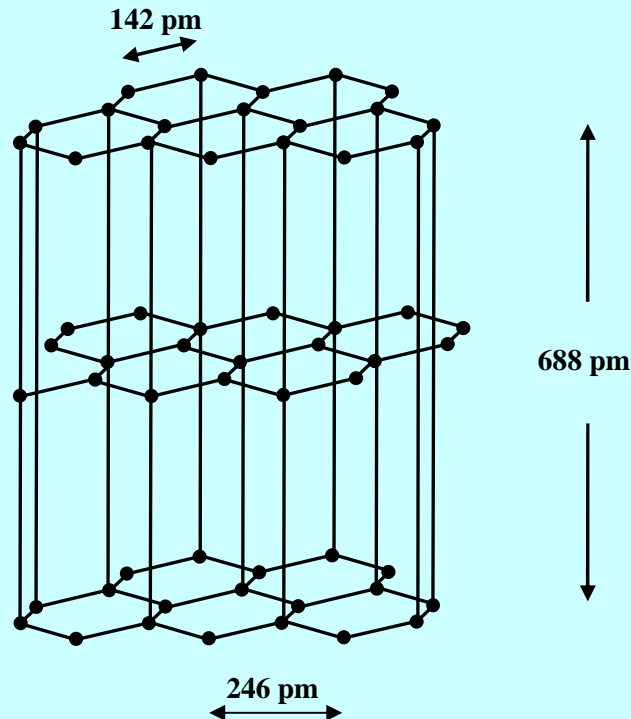
1. Zapoznać się z obsługą zasilacza lampy oscyloskopowej (w razie wątpliwości - pytać prowadzącego).
2. Upewnić się czy pokrętko regulacji napięcia przyspieszającego elektrony jest w położeniu zerowym (skręcone w „lewo”) - jeżeli nie, to przestawić w to położenie.
3. Włączyć zasilanie zasilacza i odczekać około 2 minuty do nagrzania katody lampy oscyloskopowej.
4. Obracając pokrętko regulacji napięcia przyspieszającego elektrony zaobserwować pojawienie się plamki na ekranie (w zależności od potrzeby regulujemy jej jasność).
5. Zwiększamy napięcie przyspieszające elektrony aż do pojawienia się pierścieni (kontrolując jasność i ostrość obrazu).
6. Przy ustalonym napięciu przyspieszającym U mierzymy średnice D_i wszystkich widocznych na ekranie pierścieni w funkcji napięcia przyspieszającego U dla co najmniej 6-ciu różnych napięć.
7. Skręcamy pokrętko regulacji napięcia przyspieszającego w położenie zerowe (skrajne w „lewo”) i wyłączamy zasilanie.
8. Notujemy odległość r (folia - ekran).

Opracowanie wyników

1. Sprawdzić, czy uzyskane wyniki są zgodne z wzorem (5), sporządzając wykres zależności średnicy pierścieni D_i od $\frac{2rh}{\sqrt{2meU}}$ (czyli od funkcji zależnej od odwrotności pierwiastka kwadratowego napięcia przyspieszającego) i korzystając z metody najmniejszych kwadratów (**obliczenia przy użyciu programu komputerowego!!**), znaleźć wartość współczynnika nachylenia otrzymanej prostej b i jego niepewność.
2. Na podstawie wyników aproksymacji liniowej obliczyć odległość pomiędzy płaszczyznami atomowymi d oraz jej niepewność obliczaną metodą typu A. Niepewność obliczaną metodą typu B wyznaczyć na podstawie jednego punktu pomiarowego (potrzebne stałe fizyczne wziąć z tablic). Przy obliczaniu niepewności złożonej wykorzystać prawo przenoszenia niepewności.

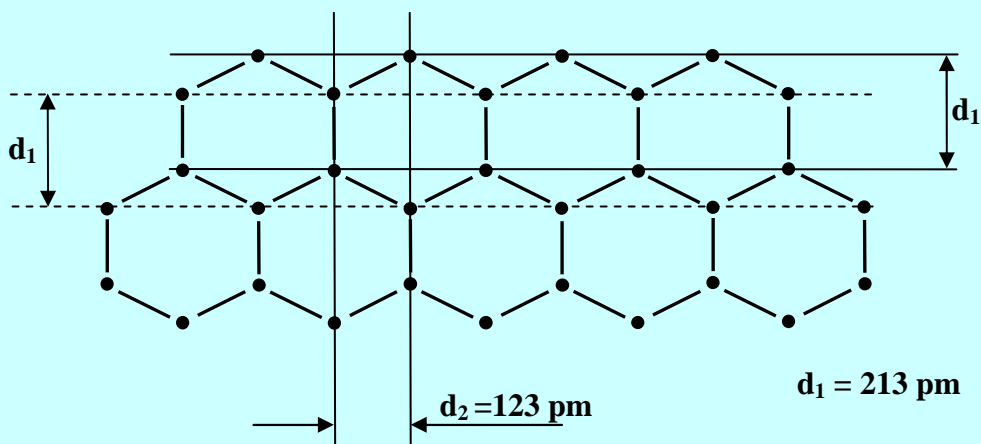
3. Korzystając z otrzymanego wykresu i z testu χ^2 odpowiedzieć na pytanie dotyczące prawdziwości hipotezy de Broglie'a. Porównać otrzymane wyniki z wartościami odległości międzyatomowych w kryształach grafitu.

Na poniższym rysunku przedstawiono schemat budowy krystalicznej grafitu.



Rys.5 Sieć krystaliczna grafitu

Warstwa grafitu, przez którą przechodzi wiązka elektronów jest warstwą polikrystaliczną. Rozerwaniu ulegają długie wiązania między poszczególnymi warstwami (rys.5), tak więc orientacja komórek jest przypadkowa. (Grafit jest bardzo „śliski” i łatwo się rozprowadza po powierzchni - jest to właśnie efekt przesuwania się względem siebie poszczególnych warstw atomów węgla. Z drugiej strony grafit jest bardzo odporny na ściskanie. Z tych powodów jest on wykorzystywany do produkcji różnych typów smarów, w szczególności do smarów suchych).



Rys.6 Odległości międzywarstwowe dla dwóch pierwszych pierścieni interferencyjnych

4. W sprawozdaniu należy odpowiedzieć na następujące pytania: Dlaczego intensywność obu pierścieni jest porównywalna? Dlaczego nie widać pierścieni wyższych rzędów interferencji lub pochodzących od innych płaszczyzn atomowych?

2.2. Dyfrakcja światła na sieci krystalicznej

Wykonanie ćwiczenia

Do obserwacji dyfrakcji światła na kryształach wykorzystywane są dwuwymiarowe modele różnych typów sieci krystalicznej i polikrystalicznej w postaci przezroczy na folii świetłoczułej. Jako źródło światła wykorzystywany jest laser półprzewodnikowy generujący światło o długości podanej na uchwycie lasera. Laser umocowany jest na podstawie, do której magnetycznie mocuje się przezrocza (ramki mają w dolnej części paski magnetyczne). Każde z przezroczy posiada oznaczenia (np. A1, C2, itp.). Statyw z laserem należy ustawić w zaznaczonej pozycji na stole laboratoryjnym w dokładnie określonej odległości od ekranu znajdującego się na pionowej obudowie stanowiska laboratoryjnego (odległość przezrocze - ekran musi pozostawać niezmienna). Ekran wyposażony jest w klips, w którym mocuje się protokół i przerysowuje powstające obrazy dyfrakcyjne.

Na stanowisku znajduje się również mikroskop optyczny, który służy do obserwacji modeli sieci i **bezpośrednich** pomiarów stałych sieciowych (przy użyciu przesuwu mikrometrycznego stolika mikroskopu lub sieci pajęczej w okularze).

W podanej poniżej instrukcji wykonania ćwiczenia polecenie „odrysować obraz” oznacza umieszczenie protokołu na ekranie i zaznaczenie długopisem najważniejszych elementów powstałego obrazu interferencyjnego.

1. Włączyć laser i ustawić go w zaznaczonym na stole laboratoryjnym miejscu tak, aby wiązka padała w pobliżu środka ekranu.
2. W bieg wiązki światła laserowego wstawić przezrocza oznaczone A1, B1 i C1. Odrysować na protokole powstałe obrazy.
3. W bieg wiązki światła laserowego wstawić przezrocze oznaczone D1. Odrysować na protokole powstały obraz.
4. W bieg wiązki światła laserowego wstawić przezrocze oznaczone B5. Odrysować na protokole powstały obraz.
5. Wszystkie wykorzystane w trakcie ćwiczenia przezrocza umieścić kolejno na stoliku mikroskopu optycznego i wykonać bezpośrednie pomiary stałych sieciowych.
6. W bieg wiązki światła laserowego wstawić przezrocza oznaczone B2 i B3.

Opracowanie wyników

1. Porównać obrazy interferencyjne dla przezroczy A1, B1 i C1. Co zostało zaobserwowane pod mikroskopem? Potwierdzeniem jakiej zasady fizycznej jest wynik tej części doświadczenia?
2. Na podstawie wzorów (7), (8) i (9) obliczyć stałe sieciowe dla tych sieci krystalicznych. Otrzymany wynik porównać z wynikiem pomiarów spod mikroskopu.
3. Obliczyć stałe sieciowe dla przezrocza D1. Otrzymany wynik porównać z wynikiem pomiarów spod mikroskopu.
4. Z jakim kryształem mamy do czynienia w przypadku przezrocza B5. Wyznaczyć stałą sieciową mierząc średnicę pierścienia interferencyjnego. Otrzymany wynik porównać z wynikiem pomiarów spod mikroskopu. Czy obraz interferencyjny uzyskany dla slajdu B5 można porównać z obrazem uzyskanym dla dyfrakcji elektronów w doświadczeniu Thompsona w poprzedniej części ćwiczenia? Odpowiedź należy uzasadnić.
5. Jakie sieci krystaliczne przedstawione na przezroczach B2 i B3?. Obliczyć stałe sieciowe.
6. Dla wszystkich rodzajów sieci oszacować niepewności wyznaczonych stałych sieciowych.

3. Pytania kontrolne

1. Jakie założenie tkwi u podstaw hipotezy de Broglie'a?
2. Jakie muszą być spełnione warunki, aby nastąpiło wzmocnienie interferujących fal?
3. Wyprowadź wzór Bragga.
4. Jakie zjawisko fizyczne opisują równania Lauego?
5. Narysować i wyjaśnić obraz interferencyjny przy dyfrakcji światła na polikryształach.
6. Wyjaśnić istotę doświadczenia Thomsona. Jaka jest zależność pomiędzy średnicą pierścienia a napięciem przyspieszającym?
7. Załóżmy, że neutron i elektron posiadają taką samą energię. Której cząstce odpowiada większa długość fali de Broglie'a?

4. Literatura

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Podstawy fizyki, tom IV, PWN 2003
2. R. Eisberg i R. Resnick, Fizyka kwantowa - str. 78 PWN 1983
3. Cz. Bobrowski, Fizyka - krótki kurs, WNT 1993

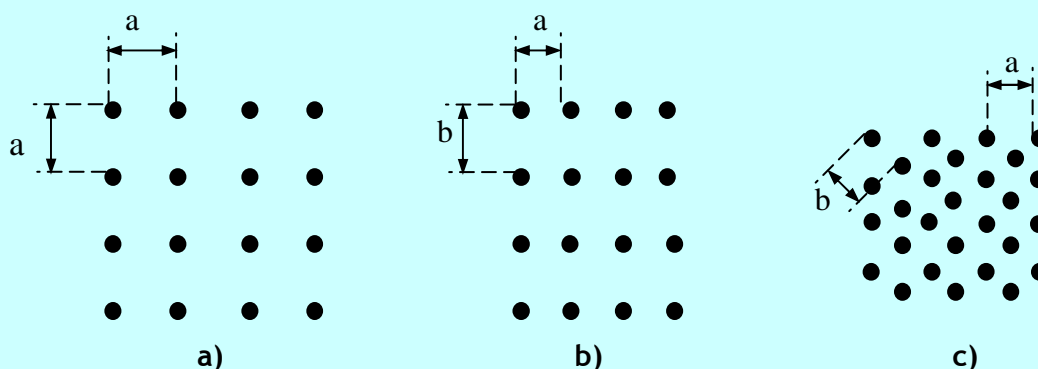
DODATEK A

Budowa krystaliczna ciał stałych

Ze względu na sposób ułożenia atomów (lub cząstek) ciała stałe możemy podzielić na ciała monokrystaliczne, polikrystaliczne oraz amorficzne (bezpostaciowe). **Monokryształy** są to takie ciała, w których atomy ułożone są w sposób regularny w całej objętości ciała - mówi się wówczas o uporządkowaniu dalekiego zasięgu. Odległość między sąsiednimi atomami wynosi zazwyczaj kilka Angstrémów (\AA). Najmniejszą komórkę, której powtórzenie we wszystkich trzech kierunkach daje monokryształ nazywamy komórką elementarną. Komórkę elementarną definiują długości jej boków (tak zwane **stałe sieciowe**) w trzech wybranych kierunkach oraz trzy kąty, które tworzą ze sobą te boki. W doświadczeniu tym rozważamy najprostsze **dwuwymiarowe** sieci krystaliczne, które przedstawiono na rys. 7.

Drugim badanym w doświadczeniu typem ciał krystalicznych są **polikryształy**. Są to ciała, w których można zaobserwować obszary o strukturze monokrystalicznej ułożone względem siebie w sposób przypadkowy. Obszary te (ziarna monokrystaliczne - kryształy) mogą mieć wielkość rzędu ułamków mikrometra, a także rozmiary makroskopowe. Naturalnym stanem dla większości ciał stałych jest stan krystaliczny, często monokrystaliczny, gdyż energia uporządkowania atomów jest najmniejsza. W przyrodzie często można zaobserwować piękne i o dużych wymiarach monokryształy: kryształy soli w Wieliczce, diamenty (kryształy węgla!) itd. Jeśli jednak w procesie tworzenia się kryształu zakłócony zostanie proces krystalizacji, to otrzymuje się polikryształ czy wręcz ciało amorficzne.

Monokryształy znajdują szerokie zastosowanie we współczesnej technice, stanowią podstawę całej mikroelektroniki, bez nich nie powstałyby mikroprocesory, pamięci, układy elektroniczne i komputery. Większość układów scalonych wytwarzana jest na cienkich płytkach monokrystalicznego krzemu. **Każdy szanujący się student Politechniki Warszawskiej powinien wiedzieć, że metodę otrzymywania monokryształów przez krystalizację z substancji stopionej opracował Jan Czochrański**, wybitny chemik i metaloznawca, profesor Politechniki Warszawskiej od 1930 roku do końca II Wojny Światowej. Metoda ta (znana na całym świecie pod nazwą **metody Czochrańskiego**) jest do dzisiaj podstawową metodą umożliwiającą otrzymywanie monokryształów o niebywalej wręcz średnicy kilkudziesięciu centymetrów i długości kilku metrów. Monokryształy tną się na plasterki o grubości części milimetra i na nich wykonywane są wszechobecne układy scalone.



Rys.7 Typy sieci krystalicznych dwuwymiarowych: sieć a) regularna, b) prostokątna, c) heksagonalna

DODATEK B

Natura fal de Broglie'a

Próbując odpowiedzieć na to pytanie, odwołamy się do eksperymentu. Jeżeli w eksperymencie Thomsona użyć wiązki elektronowej o niezwykle małym natężeniu tak, aby można było przyjąć, że na folię padają pojedyncze elektrony, to na ekranie obserwować będziemy pojedyncze błyski o jednakowym natężeniu. Najwięcej będzie ich w miejscu odpowiadającym przechodzeniu elektronów na wprost, ale pewna liczba błysków będzie obserwowana na okręgach interferencyjnych.

Pojawienie się pojedynczych błysków wyraźnie przeczy ewentualności, że fala de Broglie'a to po prostu falowanie materii elektronowej. Gdyby tak było, wówczas obserwowalibyśmy cały obraz interferencyjny (tj. układ okręgów), chociaż o bardzo małym natężeniu, już przy przejściu pojedynczego elektronu.

Wynik tak przeprowadzonego doświadczenia nie powinien jednak zachwiać naszego przekonania o falowych własnościach elektronu (własnościach, a nie naturze), gdyż błyski pojawiały się (oprócz miejsca odpowiadającemu przechodzeniu elektronów na wprost) tylko na okręgach interferencyjnych. Do tego, jak wykazano wyżej, potrzebne jest oddziaływanie fali (elektronu) z wieloma płaszczyznami atomowymi, a więc elektron zachowuje się jak fala. Jednakże nie potrafimy wyjaśnić dlaczego pojedynczy elektron oddziałuje z płaszczyznami atomowymi jako fala, a z atomami ekranu jak korpuskuła.

Analizując wyniki innych eksperymentów sformułować można wniosek: jeżeli cząstka oddziałuje z obiektem w taki sposób, że niemożliwe jest stwierdzenie z jaką częścią obiektu następuje to oddziaływanie, to ujawniają się własności falowe cząstki (oddziaływanie z płaszczyznami atomowymi kryształów cienkiej folii). Natomiast, kiedy mamy możliwość zlokalizowania oddziaływującej cząstki (np. oddziaływanie z konkretnymi atomami ekranu), to wtedy oddziałuje jak korpuskuła. W obszarze przyspieszającego elektron pola elektrycznego także możemy dokładnie (w zakresie energii pola rzędu 10 keV) prześledzić położenie i pęd cząstki. Oddziaływanie elektronu z polem elektrycznym w lampie oscyloskopowej też pozawala na traktowanie elektronu jako cząstki.

Dla dopełnienia obrazu dodajmy jeszcze, że gdy w omawianym eksperymencie umieścić za ekranem kliszę fotograficzną (zamiast obserwować pojedyncze błyski), to po dłuższym naświetlaniu otrzymany na niej obraz niczym nie będzie się różnił od obrazu obserwowanego na ekranie przy dużym natężeniu wiązki elektronowej. Ten ostatni wynik świadczy o statystycznym charakterze praw rządzących zachowaniem się cząsteczek. Pogląd ten reprezentuje mechanika kwantowa - teoria, do której powstania przyczyniła się hipoteza de Broglie'a. **Mechanika kwantowa nie wnika w naturę fal de Broglie'a**, a jedynie zajmuje się opisem zachowania się cząstek z uwzględnieniem ich falowych własności.

Stan cząstki w mechanice kwantowej opisuje funkcja falowa $\psi(x,y,z)$ o postaci matematycznej tożsamej z równaniem fali znanym z optyki. Matematyczną postać funkcji falowej znajdujemy rozwiązując równania Schrödingera (podstawowe równanie mechaniki kwantowej). Jej interpretacja jest probabilistyczna (statystyczna). Kwadrat modułu funkcji $\psi(x,y,z)$ jest gęstością prawdopodobieństwa znalezienia cząstki w danym punkcie przestrzeni o współrzędnych x,y,z . Natomiast prawdopodobieństwo P znalezienia cząstki w elemencie objętości dV w pobliżu danego punktu przestrzeni wynosi:

$$P = |\psi(x, y, z)|^2 dV$$

Fala materii (de Broglie'a) jest opisywana przez funkcję $\psi(x, y, z)$ mającą postać równania fali.