

1 Prąd elektryczny

Prąd elektryczny jest to uporządkowany ruch ładunków elektrycznych. Prąd przepływa tylko jeśli istnieje w przewodniku istniejące pole elektryczne - na końcach przedziału występuje różnica potencjałów, czyli istnieje wypadkowy przepływ ładunku przez powierzchnię. Z chwilą wyrównania się potencjałów ustaje przenoszenie ładunku

Nie jest prądem ruch elektronów przewodnictwa w izolowanym kawałku przewodnika - elektrony poruszają się w obu kierunkach, czyli wypadkowy przepływ ładunku = 0. Aby zachować w przewodniku ciągły przepływ prądu, do obu jego końców musi być przyłożone *źródło napięcia* (źródło energii elektrycznej utrzymujące w sposób ciągły różnicę potencjałów, np bateria, akumulator, prądnica elektryczna) i musi być zapewniona zamknięta droga przepływu prądu, czyli *obwód elektryczny*

Obwód elektryczny - układ, w którego skład wchodzi:

- źródło napięcia
- przewody przewodzące prąd
- inne elementy, np: oporniki, cewki, kondensatory

odbiornik - urządzenie, które zamienia energię elektryczną na inny rodzaj energii

Kierunek przepływu prądu:

umowny zgodny z kierunkiem ruchu ładunków dodatnich, przeciwny do ruchu ładunków ujemnych

rzeczywisty na odwrót

Natężenie prądu elektrycznego (I) - ilość ładunku (Q) przepływającego przez przekrój poprzeczny przewodnika w jednostce czasu (t). Jednostka - 1 amper, czyli kulomb przez sekundę

$$I = \frac{Q}{t} \left[A = \frac{C}{s} \right]$$

Natężenie chwilowe prądu (gdy natężenie prądu nie jest stałe w czasie

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Gęstość prądu elektrycznego (j) - natężenie prądu na jednostkę powierzchni przekroju poprzecznego przewodnika – dla stałego przepływu prądu, zachodzącego prostopadle do powierzchni S

Dla każdego elementu przekroju przewodnika wartość j jest równa natężeniu prądu przepływającego przez ten element, przypadającego na jednostkę pola jego powierzchni

$$j = \frac{I}{S} \left[\frac{A}{m^2} \right]$$

Gęstość prądu elektrycznego jest wektorem - kierunek i zwrot zgodne z kierunkiem i zwrotem wektora prędkości ładunków dodatnich

Prawo Ohma - Stosunek napięcia pomiędzy końcami przewodnika do natężenia płynącego w nim prądu jest wielkością stałą, niezależną od napięcia i natężenia prądu. Nosi on nazwę oporu.

Warunek: przewodnik znajduje się w stałej temperaturze

$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{U}{I} \left[1\Omega = 1 \frac{V}{A} \right]$$

Opornik - przewodnik o określonym oporze elektrycznym.

Element obwodu spełnia prawo Ohma, jeśli jego opór nie zależy od wartości i kierunku przyłożonej różnicy potencjałów

Opór elektryczny (rezystancja) - wynik oddziaływania elektronów przewodnictwa z jonami sieci krystalicznej - właściwość ciała.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

$$\rho = \frac{E}{j} [1\Omega \cdot m]$$

l - długość przewodnika, S - pole przekroju przewodnika, ρ - opór elektryczny właściwy (rezystywność) - właściwość materiału, E - natężenie pola elektrycznego w pewnym punkcie przewodnika, j - gęstość prądu elektrycznego w rozważanym punkcie

σ - przewodność właściwa (konduktywność), odwrotność rezystywności

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

G - przewodność (konduktancja), odwrotność rezystancji

$$G = \frac{1}{R}$$

Prościej:

rezystywność, konduktywność związane są z określonym materiałem, bez względu na jego wymiary geometryczne (wszystko jedno czy będzie mały kawałek jakiegoś materiału czy duży, jego rezystywność będzie taka sama)

rezystancja, konduktancja zależą od wymiarów (przekroju, długości).

Jeśli np. będziesz mieć 2 kawałki materiału (powiedzmy walce) o tym samym przekroju i jeden 2 razy dłuższy od drugiego, to ten dłuższy będzie miał 2 razy większą rezystancję ($R \cdot 1$) a jeżeli będą miały tę samą długość, ale jeden będzie miał 2 razy większy przekrój, to ten o większym przekroju będzie miał 2 razy mniejszą rezystancję ($R \cdot 1/2$)

Mikroskopowa wektorowa postać prawa Ohma:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$$

Wyprowadzenie:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{U}{RS} = \frac{El}{RS} = \frac{E}{\rho} = \sigma \cdot E$$

Materiał przewodzący spełnia prawo Ohma, jeśli jego opór właściwy nie zależy od wartości i kierunku przyłożonego pola elektrycznego

Praca prądu elektrycznego - praca wykonana przez siły elektrycznego przy przenoszeniu ładunku podczas przepływu prądu (zmiana energii potencjalnej ładunku przepływającego przez odbiornik, od pkt A do B). Jest ona równa iloczynowi napięcia, natężenia prądu i czasu jego przepływu

$$W = UIt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad [VAs = Ws = J]$$

Energia potencjalna ładunku przepływającego przez odbiornik maleje. Potencjał punktu podłączonego z dodatnim biegunem baterii jest wyższy niż punktu połączzonego z ujemnym biegunem baterii.

Tracona energia przekształcana jest w inny rodzaj energii w zależności od typu odbiornika

Moc prądu elektrycznego stałego - szybkość zmian energii elektrycznej

$$P = \frac{dW}{dt} = U \frac{dq}{dt} = U \cdot I = I^2 R = \frac{U^2}{R} \left[\frac{J}{S} = W \right]$$

Straty cieplne – ciepło Joule’a

Odbiornik energii zawierający tylko opornik (np grzejnik). Cała energia stracona przez ładunek dq poruszający się przy napięciu U wydzielą się w oporniku w postaci energii cieplnej. Przemiana energii elektrycznej na energię cieplną, zwana ciepłem Joule’a, opisana jest równaniem:

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

Elektrony przewodnictwa poruszając się w przewodniku zderzają się z atomami (jonami) przewodnika i tracą energię (którą uzyskały w polu elektrycznym) – wzrost temperatury opornika

Prąd przemienny (sinusoidalny) – prąd, którego wartość i kierunek natężenia zmieniają się jak funkcja sinus

Siła elektromagnetyczna

Aby spowodować stały przepływ prądu przez dowolny odbiornik prądu elektrycznego (rezystor, żarówkę itp), potrzebne jest urządzenie “pompujące” ładunek elektryczny (źródło siły elektromotorycznej (SEM) - baterie, generatory elektryczne) Wykonując pracę nad ładunkami źródło SEM utrzymuje stałą różnicę potencjałów

między parą swoich biegunów (zacisków)

Źródło SEM wykonuje prace nad ładunkami i wymusza ich ruch z bieguna o mniejszym potencjale do bieguna o większym potencjale (przeciwie do sił elektrycznych działających na ładunek).

W źródle SEM musi istnieć pewne źródło energii, którego kosztem jest wykonywana praca

Wykonywanie pracy przez źródło odbywa się kosztem innej energii (np chemicznej)

Siła elektromotoryczna ε źródła (SEM) - praca W przypadająca na jednostkowy ładunek q , jaką wykonuje źródło przenosząc ładunek pomiędzy swoimi biegunami w kierunku przeciwnym do sił pola elektrycznego działających na ten ładunek

$$\varepsilon = \frac{W}{q} \left[\frac{1J}{1C} = 1V \right]$$

Miarą SEM jest różnica potencjałów na biegunach źródła prądu w warunkach, kiedy przez ogniwo nie płynie prąd (ogniwo otwarte).

Kiedy ze źródła czerpany jest prąd - napięcie między jego elektrodami maleje wraz ze wzrostem pobieranego z niego prądu

Każde rzeczywiste źródło napięcia posiada opór wewnętrzny (R_w)

Całkowita energia źródła rzeczywistego przekazywana jest częściowo nośnikom ładunku, a częściowo zamieniana jest na wewnętrzną energię termiczną źródła.

$$U_z = \varepsilon - IR_w$$

IR_w - spadek potencjału na oporze wewnętrznym

Prawo Ohma dla obwodu zamkniętego:

$$\varepsilon = I(R_w + R)$$

I prawo Kirchhoffa - W każdym węźle (punkcie rozgałęzienia) obwodu elektrycznego suma algebraiczna wszystkich prądów jest równa 0. Umownie można przyjąć, że prądy wpływające do węzła zapisujemy ze znakiem "+", a wypływające z "-"

II prawo Kirchhoffa - W dowolnym oczku (zamkniętej części) obwodu elektrycznego suma algebraiczna wszystkich napięć (zarówno źródłowych, jak i spadków napięcia na odbiornikach) jest równa 0. Znamy umowny kierunek obiegu oczka przez co wszystkie napięcia zgodne z tym zwrotem piszemy ze znakiem "+", a przeciwne z "-"

Łączenie oporników

Szeregowo $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$

Równolegle $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$

2 Magnetyzm

Magnesy trwałe są dipolami magnetycznymi - zawsze posiadają dwa bieguny - północny (N) i południowy (S). Istnienie ładunków, czyli monopoli magnetycznych nie zostało dotychczas potwierdzone. Różnoimienne bieguny magnetyczne przyciągają się, a jednoimienne bieguny magnetyczne się odpychają.

Pole magnetyczne – przestrzeń, w której na poruszające się ładunki elektryczne działa siła odchylająca je “w bok”. Pole magnetyczne charakteryzuje wielkość wektorowa:

Indukcja magnetyczna (\vec{B}), definiowana poprzez siłę magnetycznego oddziaływania na naładowaną cząstkę, poruszającą się z prędkością v . Kierunek wektora wyznaczamy regułą prawej dłoni. Jednostka 1 Tesla.

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \left[1T = \frac{N}{Am} \right]$$

Pole magnetyczne można przedstawić graficznie za pomocą linii sił pola magnetycznego

Zjawisko Halla – skrzyżowanie pola E i B .

- Przewodnik w polu magnetycznym poprzecznym do płynącego prądu, elektrony przewodnictwa, które poruszają się ze średnią prędkością dryfu v_D , są odchylane w kierunku z
- pojawienie się na ściankach półprzewodnika różnicy potencjałów poprzecznej w stosunku do kierunku przepływu prądu (napięcie Halla - V_H)

Ruch po okręgu w polu B - cyklotron W ruchu jednostajnym po okręgu:

$$F = qvB = m \frac{v^2}{r}$$

Promień toru:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Częstotliwość:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$$

Częstość cyklotronowa:

$$\omega = \frac{qB}{m}$$

Okres obiegu:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

Przewodnik z prądem w polu magnetycznym - Na przewodnik znajdujący się w polu magnetycznym działa siła poprzeczna - siła Lorentza działająca na poruszające się elektrony przewodnictwa - siła elektrodynamiczna
Wszystkie elektrony przewodnictwa znajdujące się w przewodniku o długości L przejdą przez płaszczyznę xx' w czasie:

$$t = \frac{L}{v_d}$$

Przepływający w tym czasie ładunek jest równy

$$q = It = \frac{IL}{V_d}$$

Siła Lorentza:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$F_B = qv_d B \sin 90^\circ = \frac{IL}{v_d} v_d B \sin 90^\circ$$

$$F_B = ILB$$

$$\vec{F}_B = I\vec{L} \times \vec{B}$$

Silniki elektryczne Praca wykonywana przez silniki elektryczne pochodzi od siły elektrodynamicznej działającej na przewodnik w polu magnetycznym

Galwanomierz – miernik magnetoelektryczny

Pole magnetyczne wywołane przepływem prądu Pole magnetyczne wywiera siły na prądy (ładunki w ruchu).

Przepływ prądu (czyli ruch ładunku) powoduje powstanie pola magnetycznego

Przepływowi prądu elektrycznego towarzyszy powstanie pola magnetycznego, które zmienia kierunek ustawienia igły magnetycznej (Doświadczenie Oersteda)

Linie pola magnetycznego wytworzone przez przewodnik z prądem:

- leżą w płaszczyźnie prostopadłej do przewodnika
- mają kształt okręgów współśrodkowych z przewodnikiem
- zwrot zgodny z regułą prawej dłony

Prawo Biota-Savarta

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni ($4\pi \times 10^{-7} \left[\frac{Tm}{A} \right]$), r - odległość elementu przewodnika od punktu pola, $d\vec{l}$ – skierowany element przewodnika;

wektor o kierunku przewodnika, zwrocie odpowiadającym kierunkowi prądu i długości równej długość elementu przewodnika,

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

Prawo Ampera Cyrkulacja wektora indukcji pola magnetycznego wzdłuż zamkniętego płaskiego konturu L jest równa iloczynowi μ_0 i całkowitego prądu I przecinającego powierzchnię ograniczoną tym konturem

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l}$$

Indukcja magnetyczna wokół prostoliniowego przewodnika

$$\mu_0 I = \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \oint dl = B 2\pi R$$

$$2\pi R B = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

Oddziaływanie dwóch przewodników z prądem - definicja ampera absolutnego

Wartość siły przypadającej na jednostkę długości przewodnika

$$\frac{F}{\Delta l} = \mu_0 \frac{i_1 i_2}{2\pi r}$$

$$r = 1[m]$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \left[\frac{Tm}{A} \right]$$

$$\Delta l = 1[m]$$

$$F = 2 \times 10^{-7} [N]$$

Amper absolutny – Jeden amper absolutny jest to takie natężenie prądu, który płynąc w dwóch równoległych nieskończenie długich przewodnikach umieszczonych w odległości 1m od siebie powoduje oddziaływanie na siebie tych przewodników siłą 2 razy 10^{-7} N na każdy metr bieżący.

Pole magnetyczne solenoidu Solenoid – zwojnica, wiele zwojów przewodnika nawiniętych jeden obok drugiego i w takiej liczbie, że jego długość jest znacznie większa od średnic.

Pole indukcji jest jednorodne wewnątrz solenoidu, a na zewnątrz jego indukcja jest równa zero

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B a$$

a - długość fragmentu (konturu) solenoidu

$$I_p = Ina$$

I_p - całkowite natężenie prądu, obejmowanego prostokątnym konturem, n - liczba zwojów przypadających na jednostkę długości solenoidu, $n \cdot a$ - liczba zwojów objętych konturem Z prawa Ampera:

$$Ba = \mu_0 Ina$$

$$B = \mu_0 In$$

Wartość indukcji magnetycznej pola wewnątrz solenoidu nie zależy od jego średnicy ani długości, jest stałą w przekroju poprzecznym solenoidu. Solenoid umożliwia w praktyce wytworzenie w celach doświadczalnych, jednorodnego pola magnetycznego o zadanej wartości indukcji. Analogicznie płaski kondensator umożliwia w praktyce uzyskanie jednorodnego pola elektrycznego o zadanej wartości natężenia.

Pierwsze doświadczenie Faraday'a - zbliżanie magnesu do pętli połączonej z miernikiem prądu

1. Prąd pojawia się tylko wtedy, kiedy występuje ruch magnesu względem pętli
2. Szybszy ruch wytwarza większy prąd, tj. natężenie prądu rośnie
3. Przybliżanie bieguna północnego do pętli - prąd płynie zgodnie z ruchem wskazówek zegara; oddalanie tego bieguna - przepływ prądu w kierunku przeciwnym. Przybliżanie i oddalanie bieguna południowego - efekt analogiczny, w przeciwnych kierunkach

Drugie doświadczenie Faraday'a - układ złożony z dwóch przewodzących pętli, które znajdują się blisko siebie, ale się nie stykają. (patrz slajd)

Zamknięcie pętli ze źródłem prądu powoduje nagły, ale krótkotrwały przepływ prądu w pętli po lewej stronie

Otwarcie klucza - pojawia się nagły i krótkotrwały prąd indukowanego, płynącego w przeciwnym kierunku **WNIOSEK**: Powstanie prądu indukowanego (a więc i SEM indukowanej) tylko wtedy, gdy natężenie prądu się zmienia (podczas włączania lub wyłączania), nie gdy natężenie jest stałe (nawet gdy jest duże).

Wnioski Faraday'a :

- SEM i prąd mogą być indukowane w pętli (jak w powyższych doświadczeniach) kiedy zmienia się tzw ilość pola magnetycznego przechodzącego przez pętle

- ilość pola magnetycznego może być zilustrowana przy pomocy linii pola magnetycznego, przechodzącego przez pętle

Strumień magnetyczny (Φ_B) - suma wszystkich linii pola magnetycznego, przechodzących przez określony przekrój. Jednostka 1 Weber

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} [Wb = T \cdot m^2]$$

Prawo indukcji Faraday'a – Indukowana w obwodzie SEM (ε) jest równa szybkości z jaką zmienia się strumień pola B, przechodzący przez ten obwód

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Dla cewki złożonej z N zwojów:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Zmiana strumienia magnetycznego przechodzącego przez cewkę może nastąpić w wyniku:

- zmiany wartości indukcji magnetycznej pola w cewce
- zmiany powierzchni cewki lub tej części powierzchni, która znajduje się w polu magnetycznym
- zmiany kąta między kierunkiem wektora indukcji magnetycznej a powierzchnią cewki

Reguła Lenza – Prąd indukowany płynie w takim kierunku, że pole magnetyczne wytworzone przez ten prąd przeciwdziała zmianie strumienia pola magnetycznego, która ten prąd indukuje. Ponadto kierunek indukowanej SEM jest taki, jak kierunek prądu indukowanego

Obwód w kształcie prostokątnej pętli o szerokości a wyciągany z obszaru stałego pola magnetycznego ze stałą szybkością v . Przesuwa się o odcinek Δx , obszar ramki o powierzchni ΔS wysuwa się z pola B - strumień przenikający przez ramkę maleje o:

$$\Delta\Phi = B\Delta S = Ba\Delta x$$

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -Ba\frac{dx}{dt} = -Bav$$

ε - SEM wyindukowana w czasie Δt

Dla przewodnika o oporze R natężenie prądu płynące w przewodniku:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{Bav}{R}$$

- w przewodniku, z którego wykonana jest pętla wydziela się ciepło, czyli prąd indukowany w pętli w wyniku ruchu magnesu napotyka opór elektryczny materiału
- energia, przekazywana do zamkniętego układu pętla + magnes, poprzez działanie siły przekształca się w energię cieplną
- im szybciej przesuwamy magnes, tym szybciej siła wykonuje pracę, czyli tym większa jest szybkość, z jaką dostarczona energia jest przekształcana w energię termiczną w pętli => przekazywana moc jest większa

$$P = \frac{dW}{dt} = \vec{F} \circ \vec{v} = Fv$$

$$\vec{F}_a = -\vec{F}$$

$$F_a = F = I_a B = \frac{B^2 a^2 v}{R}$$

$$P = Fv = \frac{B^2 a^2 v^2}{R}$$

P - szybkość wykonywania pracy przy wyciąganiu ramki z obszaru pola magnetycznego, F - siła, którą należy przyłożyć do ramki, aby wyciągnąć ją z pola MG, F_a - siła przeciwdziałająca ruchowi ramki (zgodnie z regułą Lenza), wykonuje pracę (dodatnią)

Szybkość wydzielania się energii termicznej w ramce, podczas wyciągania jej ze stałą prędkością z obszaru pola magnetycznego

$$P = I^2 R = \left(\frac{Bav}{R} \right)^2 R = \frac{B^2 a^2 v^2}{R}$$

Praca wykonywana podczas przesuwania ramki w polu magnetycznym ulega w całości przekształceniu w energię termiczną w ramce

Transformator służy do uzyskiwania większych lub mniejszych sił elektromotorycznych niż dają źródła prądu

- dwie cewki są nawinięte na tym samym rdzeniu (przekazanie pola MG z jednej cewki na drugą)
- jedna z cewek zasilana jest prądem przemiennym wytwarzającym w niej zmienne pole magnetyczne
- powstanie SEM indukcji w drugiej cewce

Obie cewki obejmują te same linie pola B => zmiana strumienia magnetycznego jest u nich jednakowa

$$U_1 = -N_1 \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$U_2 = -N_2 \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

U - napięcie, N - ilość zwojów.

Regulując ilość zwojów w cewkach możemy zmieniać małe napięcia na duże i odwrotnie

Znaczenie transformatora przy przesyłaniu energii:

Generatory wytwarzają na ogół prąd o niskim napięciu. Aby zminimalizować straty mocy w liniach przesyłowych zmienia się niskie napięcie na wysokie, a przed odbiornikiem transformuje z powrotem na niskie

Indukowane pole elektryczne Pierścień miedziany umieszczony w polu magnetycznym. Gdy zmieniamy pole magnetyczne, w pierścieniu popłynie prąd indukowany. Jeżeli w pierścieniu płynie prąd to wzdłuż pierścienia musi istnieć pole elektryczne powodujące ruch elektronów przewodnictwa Pole elektryczne jest indukowane nawet wtedy, gdy nie ma pierścienia miedzianego. Całkowity rozkład pola elektrycznego można przedstawić za pomocą linii sił pola. Linie indukowanego pola elektrycznego mają kształt koncentrycznych okręgów (zamkniętych linii)

Wniosek: zmienne pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne (wirowe)

Prawo indukcji Faradaya (po raz drugi ?) Cyrkulacja wektora natężenia pola E po dowolnym zamkniętym konturze jest równa szybkości zmiany strumienia magnetycznego przechodzącego przez ten kontur

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = (\varepsilon) = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

całkowanie odbywa się po drodze, na której działa SEM, tj wzdłuż linii pola elektrycznego

Potencjał elektryczny Linie pola elektrycznego wytworzonego przez ładunki statyczne nigdy nie są zamknięte – zaczynają się na ładunkach dodatnich, a kończą się na ujemnych

Różnica potencjałów:

$$V_{konc} - V_{pocz} = - \int_{pocz}^{konc} \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Gdy punkt początkowy i końcowy się pokrywa dostajemy:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$$

ale

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} \neq 0$$

Dla pola wirowego cyrkulacji wektora pola wzdłuż obwodu zamkniętego nie jest równa zero.

Wniosek: Potencjał elektryczny można zdefiniować dla pól elektrycznych wytworzonych przez ładunki statyczne. Nie można go zdefiniować dla pól elektrycznych wytworzonych przez indukcję.

Indukowane pole elektryczne - prądu Foucalta Zmienne pole magnetyczne indukuje pole elektryczne nie tylko w przewodach, ale i w blokach przewodzących. Prądy indukowane powstające w masywnych przewodnikach znajdujących się w zmiennym polu magnetycznym nazywamy prądami Foucalta. W maszynach i transformatorach prądy indukowane wywołują silne nagrzewanie urządzeń i przyczyniają się do powstawiaia znacznych strat energii (np płyta indukcyjna)

Indukcyjność Zmienne pole magnetyczne prądu płynącego przez cewkę indukuje w niej w niej SEM, zgodnie z prawem Faradaya. SEM indukowana w cewce o N zwojach:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt} = -\frac{d(N\phi_B)}{dt}$$

Strumień pola magnetycznego cewki oddalonej od wszelkich materiałów magnetycznych jest proporcjonalny do natężenia prądu I płynącego przez cewkę. Jednostka 1 Henr

$$\phi_B = LI \left[1H = \frac{Vs}{A} \right]$$

L - indukcyjność, współczynnik proporcjonalności między natężeniem prądu, a strumieniem pola magnetycznego cewki - wyraża zdolność elementu do wzbudzania pola magnetycznego na skutek przepływającego przez niego prądu, cecha konstrukcyjna rozpatrywanego elementu elektrycznego

$$\varepsilon = -\frac{d(N\phi_B)}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

$$L = -\frac{\varepsilon}{\frac{dI}{dt}}$$

Ściśle nawinięta cewka w kształcie walca (bez rdzenia):

$$L = \frac{N\phi_B}{I} = \frac{NBS}{I} = \frac{N\mu_0 InS}{I} = nl\mu_0 nS = \mu_0 n^2 IS = \mu_0 n^2 V$$

N - liczba zwojów, n - gęstość nawinięcia cewki, S - powierzchnia przekroju cewki, l - długość cewki

Zmiana prądu w obwodzie powoduje powstanie na końcach cewki różnicy potencjałów $\Delta V(\varepsilon_L)$ przeciwnej do SEM przyłożonej

$$\Delta V = -L \frac{dI}{dt}$$

Do pokonania tej różnicy potencjałów przez ładunek dq potrzebna jest energia (wykonanie pracy) dW_B

$$dW_B = \Delta V dq = L \frac{dI}{dt} dq = L dI \frac{dq}{dt} = L I dI$$

Energię tę (pobraną ze źródła SEM) ładunek przekazuje cewce \Rightarrow energia cewki wzrasta o dW_B

Całkowita energia pola magnetycznego zawarta w cewce o indukcyjności L podczas narastania prądu od 0 do i :

$$W_B = \int_0^{W_B} dW_B = \int_0^i L i di = \frac{1}{2} L i^2$$

Indukcja wzajemna Dwie cewki umieszczone blisko siebie oddziałują na siebie wzajemnie. Stały prąd i_1 płynący w jednej cewce utworzy strumień pola magnetycznego Φ obejmującego drugą cewkę. Jeżeli zmienimy prąd i_1 w czasie to w drugiej cewce pojawi się siła elektromotoryczna ε_2

Indukcja wzajemna cewki 2 względem 1:

$$\begin{aligned} M_{21} &= \frac{N_2 \Phi_{21}}{i_1} \\ M_{21} i_1 &= n_2 \Phi_{21} \\ M_{21} \frac{di_1}{dt} &= N_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = -\varepsilon_2 \\ \varepsilon_2 &= -M_{21} \frac{di_1}{dt} \end{aligned}$$

Analogicznie dla cewki 1 względem 2:

$$\varepsilon_1 = -M_{12} \frac{di_2}{dt}$$

SEM w jednej z cewek jest proporcjonalna do szybkości zmian prądu w drugiej cewce. Zwykle też $M_{21} = M_{12} = M$ Gęstość energii pola magnetycznego (w_B) cewki o długości l i przekroju S :

$$w_B = \frac{W_B}{Sl} = \frac{1}{2} \frac{L i^2}{Sl}$$

Indukcyjność solenoidu: $L = \mu_0 n^2 I S$ Indukcja we wnętrzu solenoidu: $B = \mu_0 n i$

$$w_B = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$$

Jeżeli w jakimś punkcie przestrzeni istnieje pole magnetyczne o indukcji B , to możemy uważać, że w tym punkcie jest zmagazynowana energia w ilości $\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$ na jednostkę objętości

Moc w obwodzie prądu zmiennego

$$P(t) = U(t)I(t) = U_0 \sin \omega t \cdot I_0 \sin(\omega t - \varphi)$$

Średnia moc w obwodzie prądu zmiennego:

$$\bar{P} = \frac{U_0 I_0}{2} \cos \varphi$$

φ - przesunięcie fazowe pomiędzy napięciem i prądem

$$\bar{P} = \frac{U_0 I_0}{2} \cos \varphi = \frac{Z I_0 I_0}{2} \frac{R}{Z} = \frac{I_0^2 R}{2}$$

Z - impedancja, zależność między prądem a napięciem dla prądu zmiennego, $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$ z powodów jakiegoś trójkąta impedancji (?)

Moc średnia wydzielana przy przepływie prądu zmiennego o amplitudzie I_0 jest taka sama jak prądu stałego o natężeniu $I_{sk} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$ - wartość skuteczna natężenia prądu zmiennego

$U_{sk} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$ - wartość skuteczna napięcia prądu zmiennego

Wektory magnetyczne Oznaczenia:

- B - Indukcja magnetyczna
- H - Natężenie pola magnetycznego [$\frac{A}{m}$]
- M - Namagnesowanie (dipolowy moment magnetyczny na jednostkę objętości)

Zależność między indukcją a namagnesowaniem

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

Zależność między indukcją a natężeniem pola magnetycznego (błąd na slajdach)

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

μ - przenikalność magnetyczna ośrodka

Magnetyczne własności materii Elektron krążący w odległości r wokół jądra w atomie posiada magnetyczny moment dipolowy związany z orbitalnym momentem pędu L :

$$\mu_e = \frac{e}{2m} L$$

μ_e - magnetyczny moment dipolowy

Podobnie jak z orbitalnym momentem pędu elektronu, również z jego spinem związany jest moment magnetyczny tzw. spinowy moment magnetyczny

Podział atomów względem własności magnetycznych :

- *Atomy będące elementarnymi magnesami* – atomy, które wytwarzają pole magnetyczne wokół siebie, posiadają nieparzystą liczbę elektronów walencyjnych
- *Atomy nie będące elementarnymi magnesami* – atomy, które nie wytwarzają pola magnetycznego wokół siebie. Posiadają parzystą liczbę elektronów walencyjnych i ich pola się znoszą

Podstawowe materiały magnetyczne:

Paramagnetyki :

- W nieobecności zewnętrznego pola magnetycznego paramagnetyk nie jest namagnesowany
- W zewnętrznym polu magnetycznym paramagnetyki ustawiają się wzdłuż linii sił pola magnetycznego
- W zewnętrznym polu magnetycznym paramagnetyk magnesuje się zgodnie z tym polem
- Jeżeli pole jest niejednorodne to materiał paramagnetyczny jest przyciągany do obszaru silniejszego pola magnetycznego, z obszaru słabszego pola
- Do paramagnetyków należą m.in. teln, lit, sód, potas, magnez

Diamagnetyki :

- Diamagnetyki samorzutnie nie wykazują właściwości magnetycznych - nie są przyciągane przez magnes
- W zewnętrznym polu magnetycznym diamagnetyki ustawiają się prostopadle do linii sił pola magnetycznego
- Umieszczenie diamagnetyka w zewnętrznym polu magnetycznym spowoduje powstanie w tym materiale pola magnetycznego skierowanego przeciwnie do zewnętrznego pola
- Jeżeli pole jest niejednorodne, materiał diamagnetyczny jest wypychany z obszaru silniejszego pola magnetycznego do obszaru słabszego pola magnetycznego - lewitacja
- Należą do nich: rtęć, miedź, złoto, woda

Ferromagnetyki :

- Materiał ferromagnetyczny składa się z wielu domen magnetycznych, w których występuje całkowite uporządkowanie magnetycznych dipoli atomowych

- Domeny zorientowane są losowo i ich wzajemne momenty się znoszą
- Rozmiar pojedynczej domeny to ok 0,0001-0.01m
- Ferromagnetyk w niezerowym polu magnetycznym - zewnętrzne pola magnetyczne powoduje ustawienie się dipoli wzdłuż kierunku pola, w materiale powstaje silny wypadkowy moment magnetyczny
- Do ferromagnetyków należą: żelazo, kobalt, nikiel oraz niektóre stopy

Równania Maxwella :

- Prawo Gaussa dla elektryczności. Źródłem pola elektrycznego są ładunki.

Postać różniczkowa

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

$$\nabla \circ \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

Postać całkowa

$$\varepsilon_0 \oint \vec{E} \bullet d\vec{s} = q$$

- Prawo Gaussa dla magnetyzmu. Pole magnetyczne jest bezźródłowe, linie pola magnetycznego są zamknięte

Postać różniczkowa:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\nabla \circ \vec{B} = 0$$

Postać całkowa

$$\oint \vec{B} \bullet d\vec{s} = 0$$

- Prawo indukcji Faradaya. Zmienne w czasie pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne

Postać różniczkowa:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Postać całkowa:

$$\oint \vec{E} \bullet d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

- Prawo Ampera-Maxwella. Przepływający prąd oraz zmienne pole elektryczne wytwarzają wirowe pole magnetyczne

Postać różniczkowa

$$\text{rot } \vec{B} = \mu \vec{j} + \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{j} + \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Postać całkowa:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(\varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + i \right)$$

- Równania Maxwella są kompletnym opisem jednego z czterech fundamentalnych oddziaływań (elektromagnetycznego)
- Gdy powstawały równania Maxwella (1864) wiedzano jedynie o istnieniu światła podczerwonego, widzialnego i nadfioletowego
- Równania Maxwella pokazały czym jest światło - falą elektromagnetyczną
- Przewidziały i opisały wiele zjawisk, nieznanych w momencie ich tworzenia, np fale radiowe

Drgania elektromagnetyczne :

Wniosek z równań Maxwella

- Zmienne pole magnetyczne wytwarza wirowe pole elektryczne
- Zmienne pole elektryczne wytwarza wirowe pole magnetyczne

Każda zmiana w czasie pola elektrycznego wywoła powstanie zmiennego pola magnetycznego, które z kolei wytworzy zmienne pole elektryczne.

Ciąg wzajemnie sprzężonych pól elektrycznych i magnetycznych - fala elektromagnetyczna

Na podstawie wyprowadzonych równań, Maxwell wykazał:

- Wzajemnie sprzężone pola elektryczne i magnetyczne tworzą falę poprzeczną (wektory E i B są prostopadłe do siebie i do kierunku rozchodzenia się fali)
- Obliczył prędkość fali: $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \approx 3.0 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$

Zależność natężenia pola B i E od czasu i położenia (dla fali rozchodzącej się wzdłuż osi x):

$$B = B_0 \sin(kx - \omega t), E = E_0 \sin(kx - \omega t)$$

$\omega = 2\pi v$ - pulsacja, $v = \frac{1}{T}$ - częstotliwość, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - liczba falowa, λ - długość fali, T - okres drgań

$$c = \frac{E_0}{B_0}$$

Energia niesiona przez falę elektromagnetyczną Fale elektromagnetyczne posiadają zdolność do przenoszenia energii od punktu do punktu. Szybkość przepływu energii przez jednostkową powierzchnię płaskiej fali elektromagnetycznej opisywana jest wektorem \vec{S} , zwanym wektorem Poyntinga - pokazuje kierunek przenoszenia energii w czasie

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Wektory \vec{E} i \vec{B} - chwilowe wartości pola elektromagnetycznego w rozpatrywanym punkcie (wektor Poyntinga - funkcja czasu)

Wektor \vec{S} jest prostopadły do wektora \vec{E} i do wektora \vec{B}

Ciśnienie promieniowania EM - konsekwencje istnienia siły powstającej po absorpcji fotonu i przekazie pędu

$$p = \frac{S}{c}$$

Polaryzacja fali EM .

Fala elektromagnetyczna - fala poprzeczna \Leftrightarrow drgające wektory \vec{E} i \vec{B} są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali

Polaryzacja - wyróżnione ustawienie drgań fali w jednej płaszczyźnie

W fali spolaryzowanej liniowo, pole elektryczne drga w jednej płaszczyźnie

W fali niespolaryzowanej kierunek drgań pola elektrycznego zmienia się przypadkowo

Polaryzator - wszystkie kierunki drgań, z wyjątkiem jednego wyróżnionego zostaną wygaszone - światło będzie spolaryzowane liniowo

Rodzaje polaryzacji:

- Liniowa - oscylacje odbywają się w jednej płaszczyźnie, która zawiera kierunek rozchodzenia się fali.
- Kołowa - rozchodzące się zaburzenie określane wzdłuż kierunku ruchu fali ma zawsze taką samą wartość, ale jego kierunek się zmienia. Kierunek zmian jest taki, że w ustalonym punkcie przestrzeni koniec wektora opisującego zaburzenie zatacza okrąg w czasie jednego okresu fali.
- Eliptyczna - rozchodzące się zaburzenie określane wzdłuż kierunku ruchu fali ma zawsze wartość i kierunek taki, że w ustalonym punkcie przestrzeni koniec wektora opisującego zaburzenie zatacza elipsę.

Odbicie i załamanie światła W ramach optyki geometrycznej traktujemy światło tak, jak gdyby rozchodziło się po linii prostej. Gdy wiązka światła dociera do granicy ośrodków, następują zjawiska odbicia i załamania

Prawo odbicia światła Zjawisko odbicia fal polega na zmianie kierunku rozchodzenia się fal na granicy dwóch ośrodków, przy czym fala nie opuszcza danego ośrodka rozprzestrzeniania się.

Prawo odbicia światła: Promień padający, promień odbity i normalna do powierzchni odbijającej, wystawiona w punkcie padania, leżą w jednej płaszczyźnie. W zjawisku odbicia fal, kąt odbicia jest równy kątowi padania

Prawo załamania światła . Zjawisko załamania fal polega na zmianie kierunku rozchodzenia się fal na granicy dwóch ośrodków, przy przejściu z jednego ośrodka do drugiego, na skutek różnej prędkości fali w tych ośrodkach.

Prawo załamania światła (prawo Snelliusa): Promień padający, promień załamany i normalna do powierzchni załamania, wystawiona w punkcie padania, leżą w jednej płaszczyźnie. Stosunek sinusa kąta padania α do sinusa kąta załamania β dla dwóch ośrodków jest równy stosunkowi prędkości v_1 rozchodzenia się fali w pierwszym ośrodku do prędkości v_2 w drugim ośrodku

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

Bezwzględny współczynnik załamania Bezwzględnym współczynnikiem załamania nazywamy stosunek prędkości światła w próżni c do prędkości światła w danym ośrodku v_{osr} :

$$n_{osr} = \frac{c}{v_{osr}}$$

Przykłady współczynników załamania: próżnia $n = 1$, powietrze $n \approx 1$, woda $n = \frac{4}{3}$, szkło $n = \frac{3}{2}$

Względny współczynnik załamania Względnym współczynnikiem nazywamy stosunek odpowiednich współczynników załamania

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

Całkowite wewnętrzne odbicie Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia ma miejsce wtedy, gdy światło przechodzi z ośrodka gęstszego do ośrodka rzadszego, np. przejście z wody do powietrza.

Płytką równoległościenną to przezroczysta bryła ograniczona dwiema powierzchniami płaskimi i równoległymi. Promień przechodzący przez płytkę równoległościenną ulega przesunięciu

Pryzmat - przezroczysta bryła ograniczona dwiema powierzchniami płaskimi i nierównoległymi. Kąt zawarty między tymi płaszczyznami - kąt łamiący pryzmatu. Promień przechodzący przez pryzmat ulega załamaniu

Zwierciadła płaskie i kuliste Odbicie fal świetlnych zachodzi na wszystkich powierzchniach (w szczególności na powierzchniach płaskich i kulistych).

W zwierciadle płaskim powstaje obraz pozorny, prosty i jednakowej wielkości.

Zwierciadło kuliste powstaje jako wycinek sfery, charakteryzuje je promień krzywizny r .

Ogniskowa - odcinek łączący powierzchnię zwierciadła z ogniskiem, dla przysiosowych promieni ogniskowa jest równa połowie promienia. $f = \frac{r}{2}$

Równanie zwierciadła:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}$$

f - ogniskowa, x - odległość przedmiotu od zwierciadła, y - odległość obrazu od zwierciadła.

Powiększenie obliczane jest jako stosunek wysokości obrazu do wysokości przedmiotu:

$$p = \frac{h_y}{h_x}$$

lub

$$p = \frac{y}{x}$$

Soczewka to przezroczysta bryła ograniczona dwiema powierzchniami kulistymi lub jedną kulistą i jedną płaską. Rodzaje:

- Soczewki skupiające(wypukłe) - dwuwypukła, płaskowypukła, wklęsłowypukła.
- Soczewki rozpraszające(wklęsłe) - dwuwklęsła, płaskowklęsła, wypukłowlęsła

Równanie soczewkowe

$$\frac{1}{f} = (n_{wzg} - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Gdy jedną powierzchnię soczewki tworzy powierzchnia płaska (promień takiej kuli musiałby być nieskończony)

$$R \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{1}{R} = 0$$

Gdy powierzchnia soczewki jest wklęsła przyjmujemy ujemną wartość promienia

Zdolność zbierająca (skupiająca) soczewki jest odwrotnością ogniskowej. Jednostka 1 dioptria

$$Z = \frac{1}{f} \left[\frac{1}{m} = D \right]$$

3 Optyka falowa

Optyka klasyczna - zajmuje się zakresem fal elektromagnetycznych, które są odbierane przez oko człowieka.

Optyka geometryczna - światło rochoodzi się jako strumień promieni, promienie biegną prostoliniowo do źródła światła aż do momentu gdy napotkają przeszkodę lub zmianę ośrodka. Model przestaje działać gdy rozmiary obiektów $\sim 1\text{mm}$

Optyka falowa Gdy rozmiary obiektów $< 1\text{mm}$, obowiązuje model optyki falowej. Energia przenosi się nie poprzez ściśle określony tor, ale jednocześnie wieloma drogami (całą dostępną przestrzenią). Wielkość charakterystyczną dla modelu falowego - długość fali

Model geometryczny - uproszczenie rzeczywistego rozchodzenia się światła, może być stosowany w sytuacjach, w których obiekty stojące na drodze światła; może być stosowany w sytuacjach, w których obiekty stojące na drodze światła są stosunkowo duże (większe niż długość fali światła). Większość widzialnych obiektów spełnia ten warunek - w typowych sytuacjach natura falowa światła się nie ujawnia, a model geometryczny jest jak najbardziej uprawniony.

Zasada Fermata Promień świetlny biegnący z jednego punktu do drugiego przebywa drogę, na której przebycie trzeba zużyć w porównaniu z innymi, sąsiednimi drogami, minimum albo maksimum czasu

Światło - fala elektromagnetyczna o długości fali z zakresu 0.39-0.74 mikrometra, ma dwoistą, korpuskularno-falową naturę.

Falowa natura światła W optyce falowej światło może:

- omijać przeszkody
- rozdzielać się na wiązki
- rozszczepiać na kolory tylko z powodu różnic przebytej przez światło drogi

Dwa zjawiska przemawiające za falową naturą światła:

- dyfrakcja
- interferencja

Zasada Huygensa : Każdy punkt ośrodka, po dojściu do niego zaburzenia staje się źródłem cząstkowej fali kulistej. Styczna do wszystkich fal cząstkowych, wytworzonych przez sąsiadujące cząsteczki, jest powierzchnią falową fali. Prostopadła do powierzchni falowej to kierunek rozchodzenia się fali

Rozprzestrzenianie się fali w płaskiej w ośrodku jednorodnym : Po upływie czasu t , położenie czoła fali jest wyznaczone przez powierzchnię styczną do powierzchni fal wtórnych

Dyfrakcja (ugięcie) światła Zjawisko dyfrakcji polega na zmianie kierunku rozchodzenia się fali w wyniku natknięcia się na przeszkodę o rozmiarach porównywalnych z jej długością.

Interferencja światła Zjawisko interferencji fal polega na nakładaniu się fal o jednakowej częstotliwości, w wyniku czego w ośrodku powstaje fala będąca sumą fal interferujących. W każdej chwili wychylenie punktu przestrzeni jest sumą wychyleń docierających do niego zaburzeń falowych

Wzór na nty prążek interferencyjny w doświadczeniu Younga

$$n\lambda = d \cdot \sin\alpha_n$$

d - odległość między szczelinami.

Różnica dróg optycznych (ΔL) przebytych przez fale składowe powoduje różnicę ich faz w punkcie nakładania się fal (P)

Różnica fal składowych decyduje o natężeniu światła w punkcie P

$\Delta L = 0 \pm m\lambda$ - środek jasnego prążka - interferencja konstruktywna - max ($m=1,2,3,\dots$)

$\Delta L = \frac{\lambda}{2} \pm m\lambda$ - środek ciemnego prążka - interferencja destruktywna - min

Warunek powstania dobrze określonego obrazu interferencyjnego, interferujące fale świetlne muszą mieć dokładnie określoną różnicę faz φ stałą w czasie

Fale spójne: zgodność między fazami w różnych punktach wiązki światła lub w różnych wiązках światła. Różnica faz spotykających się fal w każdym punkcie jest niezależna od czasu.

Natężenie światła w doświadczeniu Younga Składowe pola elektrycznego dwóch fal w punkcie, w którym rozpatrujemy wynik interferencji

$$E_1 = E_0 \sin \omega t, E_2 = E_0 \sin (\omega t + \varphi)$$

$$E = E_0 \sin \omega t + E_0 \sin (\omega t + \varphi) = 2E_0 \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left(\omega t + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$E = E_\theta \sin (\omega t + \beta)$$

$$\beta = \frac{\varphi}{2}, E_\theta = 2E_0 \cos \beta$$

Energia drgań harmonicznym \sim do kwadratu amplitudy = natężenie fali wypadkowej

$$I_\theta \sim E_\theta^2$$

Stosunek natężeń fali wypadkowej do fali pojedynczej

$$\frac{I_{\theta}}{I_0} = \left(\frac{E_{\theta}}{E_0} \right)^2$$

$$I_{\theta} = 4I_0 \cos^2 \beta$$

Natężenie wypadkowe zmienia się od zera, dla punktów, w których różnica faz $\varphi = 2\beta = \pi$, do maksymalnego, dla punktów, w których różnica faz $\varphi = 2\beta = 0$

$$\frac{\text{różnica faz}}{2\pi} = \frac{\text{różnica dróg}}{\lambda}$$

Interferencja na cienkich warstwach Gdy fala świetlna pada na cienką warstwę fale świetlne odbite od przedniej i od tylnej powierzchni mogą wytworzyć obraz interferencyjny.

Różnica dróg optycznych promieni odbitych od górnej i dolnej warstwy

$$\Delta r = 2Ln - \frac{\lambda}{2}$$

wzmocnienie: $2Ln - \frac{\lambda}{2} = m\lambda$, wygaszenie $2Ln - \frac{\lambda}{2} = (m + \frac{1}{2})\lambda$

Siatka dyfrakcyjna to zbiór szczelin: prostoliniowych, równoległych i równo-odległych. Stała siatki (d) to ilość szczelin przypadających na 1 mm. Światło ze wszystkich szczelin rozkłada się na ekranie. Obserwowany jest obraz interferencyjny jak z dwóch szczeli, ale o lepszej rozdzielczości.

Warunek wzmocnienia: $d \sin \theta = m\lambda$, gdzie d - odległość między szczelinami, θ - kąt odchylenia

Widma emisyjne Każdy pierwiastek i cząsteczka ma swoje charakterystyczne widmo.

Spektroskopia jest używana do analizy składu pierwiastkowego nieznanych substancji

Dyfrakcja promieni Roentgena Promieniowanie rentgenowskich (promieniowanie X) ma długość χ przedziału: $< 0.01nm - 10nm >$

Dyfrakcja promieni Roentgena nie zachodzi na siatkach dyfrakcyjnych wykonanych dla światła widzialnego. Przyczyna: długość fali promieni χ jest krótsza niż światła ($390 - 740nm$).

Warunkiem zajścia interferencji jest by rozmiary szczeliny były porównywalne lub mniejsze niż długość światła.

Nie ma technicznych sposobów na zrobienie rys w odległości mniejszej niż 0.01nm

Siatkami dyfrakcyjnymi dla promieni Roentgena mogą być kryształy, w których ułożone regularnie atomy znajdują się w odległościach mniejszych niż 0.01nm. Są to skutki przestrzenne np kryształy soli kuchennej

W opisie falowym długość, częstotliwość i prędkość fali EM są związane zależnością

$$c = \lambda \cdot \nu$$

4 Fizyka kwantowa

Fizyka kwantowa dotyczy świata mikroskopowego.

Istnieje dużo wielkości, które istnieją tylko w minimalnych (jednostkowych) porcjach lub jako całkowita wielokrotność tych porcji. Elementarna porcja, która jest związana z taką wielkością nazywa się kwantem.

Np. ładunek jest skwantowany. Każdy ładunek q jest całkowitą wielokrotnością ładunku elementarnego e .

$$q = ne, e = 1.6 \cdot 10^{-19} [C], n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

Promieniowanie termiczne Widzenie przedmiotów w dzień - efekt odbicia (lub rozproszenia) światła, w ciemności - niewidoczne. Ciała są widoczne w ciemności gdy rozgrzane do wysokich temperatur

Promieniowanie termiczne - promieniowanie wysyłane przez ogrzane ciała. W każdej temperaturze powyżej zera bezwzględnego wszystkie ciała emitują PT do otoczenia oraz absorbują PT z otoczenia. R_λ - widmowa zdolność emisyjna ciała.

$R_\lambda d\lambda$ - moc promieniowania - szybkość z jaką jednostkowy obszar powierzchni wypromieniowuje energię odpowiadającą długościom fal zawartym w przedziale od λ do $\lambda + d\lambda$

Całkowita emisja energetyczna - całkowita energia wysyłanego promieniowania w całym zakresie długości fal

$$R = \int_0^\infty R_\lambda d\lambda$$

Ilościowe interpretacje ww widm promieniowania trudne \Rightarrow posługujemy się wyidealizowanym ciałem stałym, zwanym ciałem doskonale czarnym.

Ciało doskonale czarne - ciało, które całkowicie pochłania padające nań promieniowanie. Emisja energetyczna promieniowania doskonale czarnego zmienia się wraz z temperaturą wg prawa Stefana-Boltzmana:

$$R = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right] - \text{stała Stefana-Boltzmann}$$

Długość fali, dla której przypada maksimum emisji jest zgodnie z prawem Wiena odwrotnie proporcjonalna do temperatury ciała.

$$\lambda_{max} = \frac{C}{T}$$

$C = 2.8978 \cdot 10^{-3} m \cdot K$ - stała Wiena

Krzywe emisyjne ciała doskonale czarnego zależą tylko od temperatury, są całkiem niezależne od materiału oraz kształtu i wielkości ciała doskonale czarnego

Rozważania klasyczne (Rayleigh i Jeans):

- obliczenia energii promieniowania we wnęce (czyli promieniowania CDC)
- Klasyczna teoria pola elektromagnetycznego - promieniowanie elektromagnetyczne odbija się od ścian wnęki tam i z powrotem tworząc fale stojące z węzłami na ściankach wnęki
- Znaleziona widmowa zdolność emisyjna - rozbieżność z doświadczeniem!
- Dla fal długich (małych częstotliwości) wyniki teoretyczne są bliskie krzywej doświadczalnej, dla wyższych częstotliwości wyniki teoretyczne dążą do nieskończoności.

Teoria Plancka promieniowania ciała doskonale czarnego Wien przedstawił pierwszy wzór empiryczny dający wyniki widmowej zdolności emisyjnej w przybliżeniu zgodne z doświadczeniem. Wzór zmodyfikowany przez Plancka - wynik w pełni zgodny z doświadczeniem. Wzór Plancka:

$$R_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

c_1, c_2 - stałe doświadczalne

Postulat Plancka: każdy atom zachowuje się jak oscylator elektromagnetyczny, posiadający charakterystyczną częstotliwość drgań, nie może mieć dowolnej energii, ale tylko ściśle określone wartości dane wzorem:

$$E = nhv$$

E - energia, n - liczba całkowita (kwantowa), h - stała Plancka, v - częstotliwość promieniowania

Radykalna zmiana w stosunku do teorii fizyki klasycznej (energia każdej fali może mieć dowolną wartość, jest ona proporcjonalna do kwadratu amplitudy). Wg Plancka energia może przyjmować tylko ściśle określone wartości, czyli jest kwantowana.

Oscylatory nie wypromieniowują energii w sposób ciągły, lecz porcjami, czyli kwantami

Kwenty są emitowane, gdy oscylator przechodzi ze stanu (stanu kwantowego) o danej energii do drugiego o innej, mniejszej energii (zmiana liczby kwantowej n o jedność) \Rightarrow wypromieniowana zostaje energia w ilości:

$$\Delta E = h\nu$$

Dopóki oscylator pozostaje w jednym ze swoich stanów kwantowych dopóty ani nie emituje ani nie absorbuje energii - znajduje się w stanie stacjonarnym
Źródła emitują światło w sposób nieciągły, ale w przestrzeni rozchodzi się ono jako fala elektromagnetyczna

Planck zasugerował "nominał energetyczny" fali EM, w którym energia fali \sim do jej częstotliwości

$$E = h\nu$$

$h = 6.63 \cdot 10^{-34} Js$ - stała Plancka

Kwant światła Promieniowanie elektromagnetyczne (światło) jest skwantowane i istnieje w elementarnych porcjach, nazywanych teraz fotonami. Teoria wykorzystana do wyjaśnienia zjawiska fotoelektrycznego

Charakterystyka fotonu :

- Nie posiada masy spoczynkowej, czyli istnieje gdy się porusza
- W próżni ma stałą prędkość c , w ośrodku prędkość fotonu zależy od współczynnika załamania
- Gdy przechodzi przez ośrodek częstotliwość nie zmienia się, zmienia się długość fali z nim stowarzyszonej

Zjawisko fotoelektryczne polega na tym, że w wyniku oświetlania określonym promieniowaniem elektromagnetycznym z powierzchni metalu wybijane są elektrony (fotoelektrony). Zjawisko to występuje np w fotokomórkach

Pierwsze doświadczenie fotoelektryczne (wnioski) :

- Energia kinetyczna emitowanych elektronów zależy od częstotliwości (długości) fali, a nie zależy od jej natężenia (natężenia oświetlenia, promieniowania)

Nie sposób tego wyjaśnić w oparciu o falową teorię światła (dla fal energia zależy od natężenia fali)

Wyjaśnienie teorią fotonów: Zwiększając natężenie światła, zwiększamy jedynie liczbę fotonów (fotoprąd), ale energia przekazana elektronowi jest niezmienna.

- Natężenie prądu, który pojawia się w obwodzie jest proporcjonalne do natężenia promieniowania (światła) padającego na katodę.

Drugie doświadczenie fotoelektryczne :

- Ustalamy różnicę potencjałów V tak, aby kolektor K miał mniejszy potencjał niż tarcza T - spowalnianie wybitych elektronów
- Stopniowo zmniejszamy napięcie V do momentu gdy prąd fotoelektryczny przestanie płynąć - napięcie odpowiadające tej sytuacji nazywamy potencjałem hamującym V_h (napięcie hamowania)
- Przy napięciu hamowania elektrony o największej energii zostają zawrócone tuż przed kolektorem. Ich energia kinetyczna jest równa:

$$E_{kmax} = eV_h$$

e - ładunek elementarny

Potencjał hamujący (napięcie hamowania V_h) :

- energia kinetyczna $E_k = \frac{mv^2}{2}$
- praca pola elektrycznego $W = q \cdot \Delta V$, gdzie ΔV to potencjał (napięcie) między elektrodami
- zatrzymanie efektu fotoelektrycznego: praca pola elektrycznego musi być równa maksymalnej energii kinetycznej

$$W = E_{kmax}$$

$$eV_h = \frac{mv_{max}^2}{2}$$

Praca wyjścia :

- Elektrony utrzymywane są wewnątrz tarczy siłami elektrycznymi
- Do ich uwolnienia potrzebna jest pewna minimalna energia W , która zostaje zużyta na przejście elektronu przez powierzchnię metalu
- Energia ta jest charakterystyczna dla każdego materiału i jest nazywana pracą wyjścia dla tego materiału
- Jeżeli energia dostarczona elektronowi przez foton ($h \cdot \nu$) jest większa od pracy wyjścia to elektron zostanie uwolniony z tarczy
- Foton przekazuje elektronowi metali swą energię tylko w całości
- Einstein podsumował wyniki tych dwóch doświadczeń w równaniu

$$E = W + E_k$$

- Energia fotonu E jest spożytkowana na: wybite elektronu z sieci krystalicznej metalu, pracę wyjścia W i nadanie prędkości, dostarczanie energii kinetycznej E_k
- Einstein zinterpretował zjawisko fotoelektryczne jako zderzenie dwóch cząstek fotonu i elektronu. Kwanty światła rozchodzą się w przestrzeni jak cząstki materii i gdy foton zderzy się z elektronem w metalu to może zostać przez elektron pochłonięty. Wówczas energia fotonu zostanie przekazana elektronowi

Kwantowa teoria Einsteina zjawiska fotoelektrycznego :

- Zwiększając natężenie światła zwiększamy liczbę fotonów, a nie zmieniamy ich energii. Zwiększeniu ulega liczba wybitych elektronów (fotoprąd), a nie energia elektronów (E_{kmax} , ta nie zależy od natężenia oświetlenia)
- Jeżeli mamy taką częstotliwość ν_0 , że $h\nu_0 = W$, to wtedy $E_{kmax} = 0$. Nie ma nadmiaru energii. Przy $\nu < \nu_0$ fotony (niezależnie od ich liczby - natężenia światła) nie mają dość energii do wywołania fotoemisji.
- Dostarczana jest energia w postaci skupionej (kwant, porcja), a nie rozłożonej (fala); elektron pochłania cały kwant
- Wzór Millikana-Einsteina powstaje po podstawieniu energii kwantu i energii kinetycznej do wzoru:

$$E = W + E_k$$

$$h\nu = W + \frac{mv^2}{2}$$

- Inna postać wzoru Millikana-Einsteina:

$$W = h\nu_{gr}, E_k = eV_h$$

$$h\nu = h\nu_{gr} + eV_h$$

Efekt Comptona - rozpraszanie fal elektromagnetycznych na swobodnych elektronach – doświadczalne potwierdzenie cząstkowej natury światła. Polega na pomiarze natężenia wiązki rozproszonej pod różnymi kątami φ jako funkcja długości fali λ

Wyniki doświadczenia Comptona: Promieniowanie rozproszone ma dwie składowe o długościach fali: $\lambda = \lambda_0$ i $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$. Przesunięcie Comptona $\Delta\lambda$ zwiększa się wraz ze wzrostem kąta rozpraszania φ

Przyjmując padające promieniowanie jako falę - pojawienie się fali rozproszonej o zmienionej długości fali nie daje się wyjaśnić. Przyjęcie hipotezy, że wiązka promieni X jest strumieniem fotonów o energii $h\nu$ pozwoliło Comptonowi wyjaśnić uzyskane wyniki

Z zasady zachowania energii i zasady zachowania pędu – wzór na przesunięcie Comptonowskie :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\varphi)$$

m_0 - masa elektronu (spoczynkowa)

Energia i pęd fotonu :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = mc^2 \longrightarrow m = \frac{h}{c\lambda}$$

$$p = mc = \frac{h}{c\lambda} c = \frac{h}{\lambda}$$

5 Światło jako fala prawdopodobieństwa

Światło w podejściu klasycznym fala (rozciąga się na pewien obszar), w fizyce kwantowej - emitowane i pochłaniane w postaci fotonów (powstających i znikających w pewnych punktach)

Prążki interferencyjne - nieodparty dowód na falową naturę światła. Oddziaływanie fotonów z materią przy przechodzeniu przez układ optyczny \longrightarrow rozmieszczenia fotonów w przestrzeni – obraz interferencyjny

- Częstość trzasków zwiększa się i zmniejsza, przechodząc na przemian przez maksima i minima odpowiadające dokładnie maksimum i minimum jasności - prążków interferencyjnych
- Trzask detektora oznajmia przekazanie energii z fali świetlnej na ekran (wynik pochłonięcia fotonu); natężenie oświetlenia różnych punktów ekranu \sim do sumy energii fotonów padających na nie w jednostce czasu
- Nie potrafimy przewidzieć, kiedy w pewnym konkretnym punkcie na ekranie zostanie wykryty foton
- Fotony wykrywane są w pojedynczych punktach w przypadkowych momentach
- Względne prawdopodobieństwo wykrycia fotonów w pewnym konkretnym punkcie w określonym przedziale czasowym jest proporcjonalne do natężenia światła w tym punkcie
- Natężenie fali świetlnej w dowolnym punkcie jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy wektora oscylującego pola elektrycznego tej fali w danym punkcie (opis falowy)
- Kwadrat amplitudy wektora natężenia pola elektrycznego w dowolnym punkcie przestrzeni jest miarą prawdopodobieństwa padania fotonów w tym punkcie

Propabilistyczny opis fali świetlnej Światło - to nie tylko fala elektromagnetyczna, ale także fala prawdopodobieństwa

Z każdym punktem fali świetlnej możemy powiązać liczbowe prawdopodobieństwo (przypadające na przedział czasu), że w pewnej małej objętości dookoła tego punktu można wykryć foton \Rightarrow Własności falowe i korpuskularne światła nie wykluczają się, ale uzupełniają

Fale materii Dwoista korpuskularno-falowa natura jest właściwa nie tylko dla światła. Wraz ze wzrostem częstotliwości światła - własności falowe coraz trudniej wykrywalne - z cząstkami materii (elektrony, neutrony, atomy itd) związana jest fala krótsza od fali promieniowania γ

Promień świetlny - fala, ale energię i pęd przekazuje materii tylko punktowo (w postaci fotonów)

Czemu wiązka cząstek nie miałaby mieć takich samych własności? Czyli, dlaczego w takim przypadku nie myśleć o poruszającym się elektronie - lub każdej innej cząstce - jako o fali materii, która przekazuje punktowo innej materii energię i pęd?

Uogólnienie równania na pęd fotonu dla dowolnych cząstek

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Długość fali de Broglie'a - dla cząstki o pędzie p

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

h - stała Plancka

Falowa natura cząstek, atomów wykorzystywana w wielu dziedzinach nauki i techniki. Dyfrakcja elektronów i neutronów: badanie struktury atomowej ciał stałych i cieczy, dyfrakcja elektronów: badanie budowy atomowej powierzchni ciał stałych

Poruszające się cząstki, mające masę spoczynkową wykazują własności falowe - zjawisko uniwersalne, nie związane z jakąś specyficzną własnością cząstek.

Własności falowe ciał makroskopowych praktycznie nie występują

Statyczny charakter fali materii Fale materii - nie są falami elektromagnetycznymi, nie mają charakteru żadnych innych fal znanych w fizyce klasycznej. Mają specyficzny kwantowy charakter

Jaki jest charakter fizyczny fal związanych z cząstkami materii? \Leftrightarrow Jaki jest fizyczny charakter amplitudy fal materii?

Natężenie \sim kwadrat modułu amplitudy

Doświadczenie z dyfrakcją elektronów: więcej elektronów dla pewnych kierunków \Leftrightarrow największe natężenie fali de Broglie'a

Kwadrat modułu amplitudy fali de Broglie'a w danym punkcie jest miarą prawdopodobieństwa znalezienia się cząstki w tym punkcie.

Statyczny związek między pomiędzy falą i związaną z nią cząstką – nie określa się gdzie cząstka jest, ale gdzie prawdopodobnie się znajdzie.

Funkcja opisująca fale materii - funkcja falowa Ψ , określa prawdopodobieństwo znalezienia cząstki w danej chwili w danym punkcie przestrzeni. Prawdopodobieństwo $d\omega$, że cząstka znajduje się w elemencie objętości dV .
 $d\omega = |\Psi|^2 dV$, $|\Psi|^2 = \Psi\Psi'$ natężenie fali de Broglie'a

$$\int_{-\infty}^{+\infty} dV = 1$$

Konsekwencja falowo-cząsteczkowej natury materii: jedyne czego możemy dowiedzieć się o ruchu elektronów to prawdopodobieństwo znalezienia ich w przestrzeni

Zasada nieoznaczoności Heisenberga Granica stosowalności praw fizyki klasycznej:

- Fizyka klasyczna
 - Dokładność pomiaru jest zdeterminowana jedynie jakością aparatury pomiarowej
 - Nie ma teoretycznych ograniczeń na dokładność z jaką mogą być wykonane pomiary
- Mechanika kwantowa
 - Obowiązuje zasada nieoznaczoności: pewnych wielkości fizycznych nie można zmierzyć równocześnie z dowolną dokładnością
 - W fizyce kwantowej musimy posługiwać się pojęciem prawdopodobieństwa

Zasada nieoznaczoności dla równoczesnego pomiaru pędu i położenia:

$$\Delta x \Delta p_x \geq h$$

Im dokładniej mierzymy pęd, tym bardziej rośnie nieoznaczoność położenia Δx

h - stała Plancka

Zasada nieoznaczoności dla równoczesnego pomiaru energii i czasu:

$$\Delta E \Delta \tau \geq h$$

Im dłużej cząstka jest w stanie o energii E , tym dokładniej można tę energię wyznaczyć

UWAGA: Ograniczenie dokładności pomiarów nie ma nic wspólnego z wadami i niedokładnościami aparatury pomiarowej lecz jest wynikiem falowej natury cząstek

Model budowy atomu wodoru :

- Model ciastka z rodzynkami (atom jako przestrzennie ciągły ładunek dodatni, w którym tkwią elektrony)
- Model planetarny: atom składa się z dodatnio naładowanego jądra i krążących wokół niego elektronów (podobnie jak planety krążą wokół Słońca)

Doświadczenie Rutherforda Przewidywania teoretyczne (cząstki alfa przelatują przez folię): istnieją jedynie niewielkie odchylenia od pierwotnego ruchu cząstek.

Interpretacja doświadczenia (cząstki napotykając folię są odchylane pod różnymi kątami a nawet zawracane): ładunek dodatni jest skupiony w małym jądrze atomowym, elektrony krążą w dużej odległości od jądra

Niedoskonałości modelu Rutherforda: poruszający się ruchem przyspieszonym spiralnie wokół jądra elektron wypromieniowuje energię i spada na jądro, widma atomowe (np. świecącego gazu) nie są ciągłe

- Model atomu wodoru wg Bohra. Postulaty Bohra
 - Elektron w atomie wodoru porusza się po kołowej orbicie dookoła jądra pod wpływem siły coulombowskiej i zgodnie z prawami Newtona
 - Elektron może poruszać się po takiej orbicie dla której moment pędu jest równy wielokrotności stałej Plancka

$$mv_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

v_n - prędkość elektronu na ntej orbicie, r_n - promień ntej orbity, n - główna liczba kwantowa, h - stała Plancka

- Elektron poruszający się po orbicie stacjonarnej nie wypromieniowuje energii elektromagnetycznej
- Atom przechodząc ze stanu E_n do stanu E_k wypromieniowuje kwant energii

$$h\nu = E_n - E_k$$

Budowa atomu : każdy atom składa się z dwóch obszarów: dodatnio naładowanego jądra i znajdującej się poza nim, ujemnie naładowanej sfery elektronowej. Cząstki:

- Proton. Symbol: p^+ , występowanie: jądro atomowe, masa: około 1u, ładunek elektryczny: +1

- Neutron. Symbol: n^0 , występowanie: jądro atomowe, masa: około 1u, ładunek elektryczny: brak
- Elektron. Symbol: e^- , występowanie: powłoki elektronowe, masa: około $\frac{1}{1840}u$, ładunek elektryczny: -1

1 u (unit) odpowiada $\frac{1}{12}$ masy węgla C^{12} . $1.67 \cdot 10^{-27}$ kg

- Stan stacjonarny atomu, w którym elektron porusza się po orbicie o najniższej energii – stan podstawowy, dla atomu wodoru

$$E_1 = -13.6 eV$$

- Stan wzbudzony – stan, w którym energia elektronu jest wyższa, znajduje się on na wyższej orbicie
- Wartości energii dozwolonych stanów stacjonarnych (skwantowane):

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

Największa (?) wartość = 0 dla $n = \infty$

- Energia kwantów promieniowania emitowanych (lub absorbowanych) przy przejściu między orbitami (j,k):

$$h\nu = h\frac{c}{\lambda} = E_k - E_j = E_1 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{j^2} \right)$$

Wzór Balmera opisujący widmo wodoru (empiryczna formuła dla dyskretnych długości fali):

$$\frac{1}{\lambda_n} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

λ_n - długość fali widmowej, $R_H = 1.097 \cdot 10^7 \frac{1}{m}$ - stała Rydberga, n - liczba naturalna większa od 2

Model Bohra zastąpiony nowym udoskonalonym modelem budowy atomu:

- położenie elektronu w danej chwili czasu nie jest określone dokładnie, lecz z pewnym prawdopodobieństwem
- elektron traktowany jest nie jak cząstka, ale jako fala materii

Zakaz Pauliego :

- Ułożenie elektronów na kolejnych powłokach określone jest poprzez zakaz Pauliego
- Elektrony w atomie muszą różnić się przynajmniej jedną liczbą kwantową, tzn. nie ma dwóch takich elektronów, których stan opisywany byłby przez ten sam zestaw liczb kwantowych n, l, m_l, m_s

- Struktura elektronowa atomu złożonego może być rozpatrywana jako kolejne zapełnianie podpowłok elektronami. Kolejny elektron zajmuje kolejny stan o najniższej energii
- O własnościach chemicznych atomów decydują elektrony z ostatnich podpowłok (walencyjnych) odpowiedzialnych za wiązania chemiczne

Skład atomu A_ZX

- X - symbol pierwiastka
- A - liczba masowa, masa atomowa – określa liczbę nukleonów, czyli protonów i neutronów w jądrze atomowym
- Z - liczba atomowa, liczba porządkowa – określa liczbę protonów w jądrze atomowym
- Liczba protonów = liczba elektronów = Z
- Liczba neutronów = A-Z
- Liczba nukleonów = A

Równanie Schrodingera Znajomość ścisłej postaci funkcji falowej ($\Psi(x, y, z, t)$) jest niezbędna do określenia ruchu cząstek w konkretnych przypadkach (zjawiskach fizycznych) – rozwiązanie równania Schrodingera.

Równanie Schrodingera - równanie różniczkowe opisujące zachowanie się układu kwantowego w czasie i przestrzeni.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) + V\Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

\hbar - zredukowana stała Plancka, V - potencjał układu kwantowego, i -jednostka urojona

Funkcja Ψ stanowiąca rozwiązanie tego równania opisuje stan o określonej energii cząstki. Znalezienie tej funkcji pozwala przewidzieć:

- skwantowanie energii na przykład elektrony w atomie
- skwantowanie energii jąder atomowych

Równanie Schrodingera - równaniem operatorowym

Operator - pewien symbol wskazujący sposób postępowania i funkcja, która za nim występuje.

W równaniu Schrodingera występuje operator energii kinetycznej oraz operator energii potencjalnej. Operatory te działają na funkcję falową Ψ

$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ - Operator energii kinetycznej działający na funkcję falową

V - Operator energii potencjalnej działający na funkcję falową

Jeżeli energia potencjalna V nie zależy od czasu, rozwiązanie równania można zapisać w postaci:

$$\Psi(x, y, z, t) = \Psi(x, y, z)e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$$

Jeżeli cząstka może przemieszczać się wzdłuż tylko jednej osi na przykład x , niezależnie od czasu równanie można zapisać

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} (E - V(x)) \Psi \text{ do potwierdzenia - pusty slajd}$$

Najprostsza forma równania Schrodingera, równanie w jednym wymiarze i niezależne od czasu – równanie stacjonarne. E - energia całkowita cząstki, $V(x)$ - energia potencjalna cząstki zależna od jej położenia, niezależna od czasu

Własności funkcji falowej :

- Zależna od czasu i współrzędnych przestrzennych jest wraz ze swymi pierwszymi pochodnymi skończona, ciągła i jednowartościowa.
- Wielkość $|\Psi|^2$ jest gęstością prawdopodobieństwa, zatem w całym obszarze V :

$$\int \Psi \bullet \Psi^* dV = \int |\Psi|^2 dV = 1$$

Cząstka swobodna - na cząstkę nie działają żadne pola. Energia potencjalna cząstki $V(x) = 0$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} d^2 \Psi(x) dx^2 = E \Psi(x)$$

Szukamy rozwiązania w postaci $\Psi(x) = A \sin(kx)$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} A (-k^2 \sin(kx)) = E A \sin(kx)$$

Funkcja ta będzie rozwiązaniem gdy:

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$

Cząstka swobodna może przyjmować dowolną wartość energii w przedziale $(0, +\infty)$, jej energia nie jest skwantowana

Cząstka w studni potencjału o szerokości L i nieskończonej głębokości

1. Przypadek klasyczny: Znajdująca się w głębokiej studni piłka może posiadać dowolną energię kinetyczną. W szczególnym przypadku, gdy znajduje się w spoczynku na dnie studni, posiada energię całkowitą równą zeru

2. Przypadek kwantowy. Energia potencjalna:

$$U(x) = \begin{cases} \infty & \text{dla } x \in (-\infty, 0) \cup (L, \infty) \\ 0 & \text{dla } x \in (0, L) \end{cases}$$

Warunki brzegowe: $|\Psi(0)|^2 = |\Psi(L)|^2 = 0$, czyli cząstkę można znaleźć tylko w przedziale $x \in (0, L)$

Równanie Schrodingera dla przedziału $0 < x < L$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi}{dx^2} = E\Psi$$

Wprowadzając oznaczenie: $k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$, ogólne rozwiązanie tego równania przyjmuje postać $\Psi = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$ lub $\Psi = A\sin(kx + \varphi)$. Funkcja falowa jest równa 0 na zewnątrz przedziału:

$$\Psi(0) = A\sin(\varphi) = 0 \Rightarrow \varphi = 0$$

$$\Psi(L) = A\sin(kL) = 0 \Rightarrow kL = n\pi \text{ dla } n=1,2,\dots$$

z tego wynikają warunki skwantowania energii cząstki

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} n^2$$

gdzie $n = 1, 2, \dots$

W nieskończonej studni potencjału energia cząstki może przyjmować tylko ściśle określone, różne od zera wartości

Dozwolone wartości energii jamy potencjału - poziomy energetyczne, liczba naturalna n wyznaczająca poziomy energetyczne - liczba kwantowa.

Każdej wartości liczby kwantowej odpowiada określony stan kwantowy scharakteryzowany funkcją falową $\Psi(x)$. Dla $n = 1 \Rightarrow E = E_1$, $n = 2 \Rightarrow E = 4E_1$, ogólnie $E = n^2 E_1$

$$\Psi = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi}{L} x$$

$A = \sqrt{2/L}$ z warunku normalizacji.

Wewnątrz studni powstaje fala stojąca materii z węzłami na brzegach studni.

Wnioski z przedstawionego modelu:

- Energia w jamie potencjalnej jest skwantowana, a najmniejsza jej wartość jest większa od zera (wg mechaniki klasycznej energia przyjmuje dowolne wartości, w tym również zero)
- Gęstość prawdopodobieństwa oscyluje między wartością maksymalną a zerem (według mechaniki klasycznej gęstość prawdopodobieństwa powinna być stała w przedziale $[0, L]$)

Zjawisko tunelowe - zjawisko przejścia cząstki przez barierę potencjału o wysokości większej niż energia cząstki, opisane przez mechanikę kwantową.

Klasyczna cząstka nie mogła pokonać bariery potencjału w przypadku $E < V$. Mechanika kwantowa dopuszcza sytuację taką, że cząstka o energii mniejszej od wysokości bariery energetycznej wnika w głąb takiej bariery. Aby to pokazać rozwiązujemy równanie Schrodingera niezależnie od czasu, które ma postać dla obszarów I (przed barierą) i II (w obszarze bariery) odpowiednio:

$$\begin{aligned} I \quad x < 0 \\ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi}{dx^2} &= E\Psi \\ II \quad x > 0 \\ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi}{dx^2} + V\Psi &= E\Psi \end{aligned}$$

Rozwiązanie równania w obszarze I będzie miało postać

$$\Psi_I = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}, \text{ gdzie } k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$$

Rozwiązanie równania w obszarze II ma postać:

$$\Psi_{II} = Ce^{-\kappa x} + De^{\kappa x}, \text{ gdzie } \kappa = \sqrt{\frac{2m(V-E)}{\hbar^2}}$$

Moduły stałych A, B i C nie mogą przekraczać jedności ze względu na to, że kwadrat modułu funkcji falowej oznacza gęstość prawdopodobieństwa znalezienia cząstki, natomiast stała D musi być równa zero ($e^{\kappa x} \rightarrow \infty$). Ostatecznie mamy rozwiązania:

$$\Psi_I = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$$

Ae^{ikx} - Fala padająca, Be^{-ikx} - Fala odbita

$\Psi_{II} = Ce^{-\kappa x}$ - Fala wnikażąca w głąb bariery

$T(E) \sim e^{-L}$ prawdopodobieństwo tunelowania cząstki jest eksponentalnie zależne od szerokości bariery

Wnioski z przedstawionego modelu:

- Istnieje niezerowe prawdopodobieństwo wnिकnięcia fali do wnętrza bariery, mimo energii kinetycznej cząstki mniejszej od energii bariery (Takiego efektu mechanika klasyczna nie przewidywała)
- Istnienie niezerowego prawdopodobieństwa wnikania fali stwarza możliwość przenikania cząstki przez wysokie bariery o skończonej grubości, czyli tunelowego przejścia cząstek przez bariery. Mechanika kwantowa przewiduje takie zjawiska i potwierdza to eksperyment

- Istnieje w przyrodzie szereg zjawisk tunelowych, na przykład emisja cząstek alfa, przechodzenie swobodnych nośników w półprzewodnikach z pasma podstawowego do pasma przewodnictwa bez zmiany energii

Kwantowomechaniczny opis atomu wodoru Atom wodoru (układ trójwymiarowy)
- pierwszy układ, do którego Schrodinger zastosował swoją teorię kwantową i który stanowił pierwszą jej weryfikację

$$\frac{\partial^2 \Psi(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi(x, y, z)}{\partial z^2} = -\frac{2m_e}{\hbar^2} [E - U(x, y, z)] \Psi$$

m_e - masa czego? atomu wodoru/elektronu???

Energia potencjalna dwóch ładunków punktowych (elektronu i protonu), znajdujących się w odległości r jest dana wyrażeniem:

$$U(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

We współrzędnych sferycznych można przedstawić funkcję falową najogólniej jako iloczyn dwóch funkcji: funkcji radialnej ($R(r)$ zależnej tylko od promienia r oraz funkcji kątowej $Y(\theta, \varphi)$ zależnej tylko od kątów (przejście ze współrzędnych prostokątnych na sferyczne - energia potencjalna funkcją tylko r)

Rozwiązanie równania Schrodingera dla atomu wodoru:

$$\Psi_{n,l,m_l}(r, \theta, \varphi) = R_{n,l} Y_{l,m_l}(\theta, \varphi)$$

Trójwymiarowa funkcja falowa zależy od trzech liczb kwantowych (ruch cząstki w przestrzeni jest opisany przez trzy niezależnie zmienne: na każdą współrzędną przestrzenną przypada jedna liczba kwantowa)

nazwa	symbol	wartość	oznacza:
Główna liczba kwantowa	n	1,2,3...	numer orbity
Poboczna liczba kwantowa	l	0,1,2,...,n-1	wartość bezwzględna orbitalnego momentu pędu
magnetyczna liczba kwantowa	m_l	od -1 do 1	rzut orbitalnego momentu pędu na wybraną oś
spinowa liczba kwantowa	m_s	$\pm \frac{1}{2}$	spin elektronu

Gęstość prawdopodobieństwa znalezienia cząstki w danym punkcie przestrzeni:

$$|\Psi_{n,l,m_l}(r, \theta, \varphi)|^2 = |R_{n,l}(r)|^2 |Y_{l,m_l}(\theta, \varphi)|^2$$

$|R_{n,l}(r)|^2$ - Radialna gęstość prawdopodobieństwa, $|Y_{l,m_l}(\theta, \varphi)|^2$ - Kątowa gęstość prawdopodobieństwa

Kątowe rozkłady prawdopodobieństwa - orbitale , dla $l = 0$ orbital s, $l = 1$ orbital p itd
Orbitale można traktować jako rozkłady ładunku elektronu wokół jądra (chmura elektronowa).

Liczby kwantowe i ich znaczenie :

- Kwantyzacja właściwie wszystkich wielkości fizycznych, mierzonych w mikroświecie atomów i cząsteczek (wielkości mogą przyjmować tylko pewne ściśle określone wartości)
- Elektrony w atomie znajdują się na ściśle określonych orbitach
- Każdej orbicie elektronowej odpowiada pewna energia
- Bliższe badania pokazały, że w podobny sposób zachowują się także inne wielkości np pęd, moment pędu czy moment magnetyczny (kwantowaniu podlega tu nie tylko wartość, ale i położenie wektora w przestrzeni albo jego rzutu na wybraną oś) \Rightarrow Ponumerowanie wszystkich możliwych wartości np energii czy momentu pędu, te numery to właśnie liczby kwantowe

6 Laser

Laser - kwantowy generator światła, wzmocnienie światła przez wymuszoną emisję promieniowania

Emisja wymuszona - zjawisko przyspieszenia wypromieniowania energii przez oświetlenie atomów wzbudzonych promieniowaniem o energii równej różnicy energii poziomów energetycznych.

W emisji spontanicznej mamy do czynienia z fotonami, których fazy i kierunki są rozłożone przypadkowo. Foton wysyłany w procesie emisji wymuszonej ma taką samą fazę oraz taki sam kierunek ruchu jak foton wymuszający.

Szansa na uzyskanie promieniowania spójnego (właściwości takie same jak fale spójne + taka sama płaszczyzna polaryzacji).

Obsadzenie poziomów Obsadzenie = liczba atomów wzbudzonych do poziomu i. N_i - obsadzenie poziomu i Obsadzenie poziomów energetycznych zbioru atomów w stanie termodynamicznie ustalonym: Im wyższy poziom energetyczny tym mniejsze prawdopodobieństwo obsadzenia

Rozkład Boltzmanna

$$N_i \propto N_0 \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \quad N_0 = \sum_i N_i$$

$A \propto B$ - A jest wprostproporcjonalne do B, E_i - energia i-tego poziomu, k - stała Boltzmann'a, T - temperatura [K]

- W danej temperaturze liczba atomów w stanie podstawowym jest większa niż liczba atomów w stanach o wyższej energii
- Oświetlenie układu odpowiednim promieniowaniem – światło padające jest silnie absorbowane, emisja wymuszona znikoma
- Żeby przeważała emisja wymuszona - w układzie o wyższym stanie energetycznym powinno znajdować się więcej atomów (cząsteczek) niż w stanie niższym (rozkład musi być antyboltzmannowski).
- Realizacja: zderzenia z innymi atomami lub tzw. pompowanie - wzbudzania atomów na wyższe poziomy energetyczne przez ich oświetlanie

Pompowanie :

- Do substancji czynnej, którą może być ciecz, gaz lub ciało stałe, znajdującej się w stanie podstawowym E_0 dostarczana jest energia w postaci promieniowania (proces ten nazywamy pompowaniem)
- Poprzez absorpcję fotonów elektrony zwiększają swoją energię. Znajdują się na poziomie energetycznym E_1

Czas życia elektronów w stanie E_1 jest krótki (około 10^{-9} s), wobec tego następuje bezpromieniste przejście do stanu energetycznego E_2 (na którym długość życia elektronów jest rzędu mikro- a nawet milisekund) nazywanego stanem metastabilnym.

Rezonansowy foton wyzwala emisję wielu fotonów naraz o tej samej fazie i częstotliwości – promieniowanie spójne

Sposoby pompowania lasera : błysk lampy błyskowej, błysk innego lasera, przepływ prądu w gazie, reakcja chemiczna, zderzenia atomów, wstrzelenia wiązki elektronów do substancji

Oscylacyjna propagacja promieniowania w rezonatorze tworzy zbiór interferujących wiązek: ich wzmacnianie jest możliwe tylko przy pełnej zgodności faz między nimi. Lawinowy rozwój emisji wymuszonej zachodzi jeśli foton pozostanie w układzie pomiędzy zwierciadłami lasera w odległości $\frac{n\lambda}{2}$

Rozkłady pola nie spełniające warunku zgodności faz są tłumione

Przez częściowo przepuszczalne zwierciadło wyprowadzana jest wiązka użyteczna λ_{las}

Pompowanie lasera rubinowego (optyczne) : W wielkim skrócie: W wyniku oświetlania lampą błyskową prętu rubinowego, przez który przebiega tam i z powrotem promień światła fotony wzbudzane są do stanu metastabilnego. Wytwarza się przy tym bardzo duża ilość ciepła

Pompowanie lasera gazowego (np. helowo-neonowego) (pompowanie elektronowe)

: W wyniku podłączenia generatora o wysokiej częstotliwości do rury zawierającej mieszanekę gazów: helu i neonu w proporcji 10:1, wzbudzane są

wyładowania elektryczne. Podczas tych wyładowań elektrony zostają rozpędzone do dużej prędkości. Elektrony podczas wędrówki napotykają więcej atomów helu i zderzają się z nimi niesprężysto. W trakcie zderzenia dochodzi do przekazania energii kinetycznej, co wzbudza atomy helu do przejścia na wyższe, metastabilne poziomy energetyczne. Atomy helu zderzają się z atomami neonu i przekazują im w zderzeniach energię wzbudzenia, w wyniku czego atomy helu wracają do stanu podstawowego, a atomy neonu wzbudzone do stanów metatrwałych o energii nieco mniejszej od energii wzbudzenia atomu helu. W wyniku wzbudzenia atomów neonu może dojść do emisji wiązki światła czerwonego lub podczerwonego.

Własności światła laserowego :

- Minimalna rozbieżność wiązki, równoległość – promieniowanie lasera rozchodzi się w jednym wyznaczonym przez oś rezonatora kierunku, a średnica wiązki rośnie niezwykle powoli z odległością od okna rezonatora. Kąt rozbieżności wiązki przyjmuje wartości od łamka miliradiana dla laserów gazowych i na ciele stałym do ułamka radiana w przypadku laserów półprzewodnikowych
- Spójność, koherencja – generowane w laserze fale elektromagnetyczne rozchodzą się zachowując tę samą fazę co odróżnia je od całkowicie niespójnego promieniowania spontanicznego
- Monochromatyczność – wąski zakres widmowy
- Duża gęstość mocy

Podział laserów :

1. W zależności od mocy lasera: laser małej mocy (do 6mW, np. drukarka laserowa, napędy CD/DVD), średniej mocy (moc do 500mW), dużej mocy (od 500mW do 10kW, używane w przemyśle do cięcia i spawania)
2. W zależności od sposobu pracy: lasery pracy ciągłej (emitujące promieniowanie o stałym natężeniu), lasery impulsowe (emitujące impulsy światła), szczególnym rodzajem lasera impulsowego jest laser femtosekundowy
3. W zależności od ośrodka czynnego: ośrodek czynny decyduje od najważniejszych parametrach lasera, określa długość emitowanej fali, jej moc, sposób pompowania, możliwe zastosowania lasera.
 - Lasery gazowe (np He-Ne, argonowy),
 - cieczowe (bazwinkowe, chylatowe),
 - na ciele stałym (rubinowy, neodymowy na szkle),
 - półprzewodnikowe: obszarem czynnym jest półprzewodnik, najczęściej w postaci złącza p-n, pompowanie przez przepływający

przez złącze prąd elektryczny. Najbardziej perspektywiczne lasery z punktu widzenia ich zastosowań w fotonice. Zalety: małe wymiary, wysokie moce, łatwość modulacji prądem sterującym o wysokiej częstotliwości, możliwość uzyskania promieniowania od pasma bliskiej podczerwieni do skraj fioletowego pasma widzialnego

- na swobodnych elektronach (laser promieniowania X)

4. W zależności od widma promieniowania, w których laser pracuje: lasery w podczerwieni, w części widzialnej, w nadfiolecie

Zastosowania laserów :

- Przemysł (poligrafia, znakowanie produktów, cięcie/spawanie/obróbka cieplna metali)
- Technologia wojskowa
- Medycyna
- Telekomunikacja
- Efekty wizualne i geodezja

7 Ciało stałe

Ciało stałe :

- atomy bądź cząsteczki ciała stałego są ściśle upakowane w przestrzeni
- odległości między cząsteczkami są stałe i ściśle określone
- przy zastosowaniu odpowiedniej siły ułożenie cząstek w sieci krystalicznej może ulec trwałej deformacji
- cząsteczki ciała stałego drgają wokół położenia równowagi w sieci krystalicznej

Podział ciał stałych :

- O strukturze krystalicznej - wykazują daleko zasięgowe uporządkowanie atomowe, są to monokryształy i polikryształy
- O strukturze bezpostaciowej (amorficznej) - wykazują brak uporządkowania atomowego dalekiego zasięgu, charakteryzuje je nieporządek (chaos) topologiczny i chemiczny. Może występować częściowe uporządkowanie krótkozasięgowe. Ciała stałe amorficzne to szkło, materiały tlenkowe. Metale i stopy przeprowadzone w stan stały za pomocą szybkiego chłodzenia

Rodzaje kryształów (rodzaje wiązań atomowych) :

- Krysztaly cząsteczkowe (molekularne) – kryształ, w którym sieć krystaliczną tworzą dobrze zdefiniowane cząsteczki powiązane słabymi oddziaływaniami międzycząsteczkowymi (np siłami van der Waalsa). Niskie temperatury topnienia, niewielka twardość i wytrzymałość mechaniczna, nie przewodzą prądu elektrycznego, rozpuszczalne w rozpuszczalnikach niepolarnych
- Krysztaly o wiązaniach wodorowych: atomu wodoru tworzą silne wiązania z atomami pierwiastków elektroujemnych takich jak np tlen czy azot. Występują np w cząsteczkach kwasu DNA.
- Krysztaly jonowe – węzły sieci są obsadzone przez jony. Jony (kationy i aniony) oddziałują na siebie siłami elektrostatycznymi. Liczba jonów przeciwnego znaku otaczających jon danego znaku to liczba koordynacyjna. Wysokie temp topnienia, duża twardość i wytrzymałość mechaniczna, w stanie stopionym i w roztworze wodnym przewodzą prąd, rozpuszczają się na ogół dobrze w rozpuszczalnikach polarnych
- Krysztaly kowalencyjne (atomowe) – węzły sieci są zajęte przez obojętne atomy, atomy połączone są wiązaniami kowalencyjnymi (mocne wiązania) realizowane poprzez wymianę wspólnych elektronów walencyjnych. Wysokie temp topnienia, bardzo twarde, duża wytrzymałość mechaniczna, nie przewodzą prądu elektrycznego w stanie czystym, → domieszki nadają im cechy półprzewodników, nierozpuszczalne w rozpuszczalnikach polarnych i niepolarnych
- Krysztaly metaliczne – węzły sieci są obsadzone dodatnio naładowanymi zrębami atomowymi, pomiędzy którymi poruszają się wolne elektrony tzw. “gaz elektronowy”. Po przyłożeniu ładunku zewnętrznego ruch elektronów staje się uporządkowany i mamy do czynienia z przepływem prądu elektrycznego. Kationy metali oddziałują siłami elektrostatycznymi ze swobodnie poruszającymi się elektronami (gaz elektronowy). Cechy: Połysk metaliczny, ciągliwe, kowalne, przewodnictwo cieplne i elektryczne, temp topnienia zróżnicowane, wytrzymałość zróżnicowana

Teoria pasmowa ciała stałego – teoria kwantowa opisująca stany energetyczne elektronów w kryształach.

W odróżnieniu od atomów (dozwolone stany energetyczne elektronów stanowią zbiór poziomów dyskretnych) w kryształach dozwolone elektronowe stany energetyczne mają charakter pasm o szerokości kilku elektronowoltów

Model pasmowy ciała stałego :

- Atomy (elektrony) znajdują się w określonych stanach energetycznych:
 - pasmo walencyjne – zakres energii jaką posiadają elektrony najslabiej związane z jądrem atomu

- pasmo przewodnictwa – zakres energii, jaką posiadają elektrony uwolnione z atomu, będące wówczas nośnikami swobodnymi w ciele stałym
- Dozwolone stany energetyczne oddzielone są strefami zabronionymi (przerwami energetycznymi) E_g

$$E_g = E_C - E_V$$

E_C - najniższa energia pasma przewodzenia, E_V - najwyższa energia pasma walencyjnego

- Atom (elektron) może zmienić swoją energię tylko skokowo - wiąże się to z pobraniem/oddaniem przez atom energii określonej przerwą energetyczną
- Minimalny poziom energetyczny E_C jest energią potencjalną elektronów w paśmie przewodnictwa, każdy nadmiar ponad E_C jest energią kinetyczną w całkowitej energii E prawie swobodnie przemieszczającego się elektronu w przestrzeniach międzywęzłowych sieci krystalicznej półprzewodnika

$$E = E_c + \frac{m_e v_{th}^2}{2}$$

m_e - tzw masa efektywna elektrony, czyli masa, która uwzględnia także oddziaływanie periodycznego pola sieci krystalicznej na elektron, v_{th} - średnia prędkość termiczna elektronu

- Oba pasma podstawowe i przewodnictwa obsadzone są przez elektrony walencyjne
- Pozostałe elektrony są silnie związane z atomem i całkowicie wypełniają powłoki (orbity) w liczbie $2n^2$. Odłączenie ich od atomu powoduje jego zniszczenie
- W niecałkowicie zapełnionym paśmie pole elektryczne może spowodować przeniesienie elektronu na sąsiedni poziom energetyczny, tj. wywołać przepływ prądu
- W całkowicie zapełnionym paśmie pole elektryczne nie może zmieniać ani położenia ani pędu elektronu, więc nie wywołuje przepływu prądu
- Wzajemne położenie pasm podstawowego i przewodnictwa oraz liczba elektronów walencyjnych decydują o właściwościach elektrycznych ciała stałego

Podział ciał stałych :

- Izolator: z szeroką przerwą energetyczną ($\gg 2\text{eV}$), walencyjne pasmo zapełnione, pasmo przewodnictwa puste – nie przewodzi prądu
- Półprzewodnik: z wąską przerwą energetyczną ($< 2\text{ eV}$), przewodzi prąd

- Metal/Przewodnik: pasma walencyjne i przewodnictwa zachodzą na siebie, niepełne pasmo walencyjne – dobrze przewodzi prąd

Izolatory (dielektryki) Podstawowe cechy:

- Mała konduktywność
- Pasma podstawowe całkowicie obsadzone przez elektrony
- Brak elektronów swobodnych (walencyjnych)
- Elektrony nie występują w pasmie przewodnictwa
- Duża szerokość pasma zabronionego
- Niemożność przejścia elektronu do pasma przewodnictwa
- Pod wpływem wysokiego napięcia dielektryk ulega przebiciu i zniszczeniu

Przewodniki Podstawowe cechy:

- Duża konduktywność
- Brak pasma zabronionego
- W pasmie przewodnictwa znajduje się bardzo dużo elektronów swobodnych
- Przyłożenie niewielkiego napięcia powoduje przepływ prądu
- Wzrost temperatury powoduje wzrost rezystancji

Najlepszymi przewodnikami są metale – ciała stałe o budowie krystalicznej, zawierające elektrony swobodne

Półprzewodniki Podstawowe cechy:

- Konduktywność pomiędzy przewodnikami a izolatorami
- Przerwa energetyczna 0.1-2eV
- W temperaturze pokojowej występują elektrony w pasmie przewodnictwa
- Wraz ze wzrostem temperatury rezystancja półprzewodnika maleje
- Działając na półprzewodnik ciepłem, promieniowaniem, polami elektrycznym lub magnetycznym łatwo jest przenieść elektron z pasma podstawowego do pasma przewodnictwa

Półprzewodniki - dziury i elektrony Zerwanie wiązania elektronowego jest równoznaczne z pojawieniem się luki w sieci wiązań międzyatomowych.

Przejście pomiędzy pasmami – generacja i rekombinacja pary dziura-elektron

Prąd w półprzewodniku: *elektronowy* w pasmie przewodnictwa w kierunku elektrody dodatniej, *dziurowy* w pasmie podstawowym w kierunku elektrody ujemnej

- Ruchliwość dziur jest znacznie mniejsza od ruchliwości elektronów
- O przewodności półprzewodnika decyduje liczba jego elektronów i dziur
- Nośniki większościowe – decydują o prądzie w półprzewodniku (większy wkład w przepływ prądu)
- Nośniki mniejszościowe – mające mniejszy wpływ na przepływ prądu przez półprzewodnik
- W zależności od technologii wykonania nośnikami większościowymi mogą dziury lub elektrony

Przewodnictwo elektronowe (typu n) - przenoszenie ładunku elektrycznego przez ciało pod działaniem zewnętrznego pola elektrycznego. W modelu pasmowym krystalicznych ciał stałych zjawisko polegające na tym, że elektrony zajmujące stany kwantowe w obrębie pasma przewodnictwa przesuwają się do sąsiednich, nie obsadzonych stanów kwantowych w obrębie tego pasma, w kierunku przeciwnym do kierunku pola elektrycznego

Przewodnictwo dziurowe (typu p) – przenoszenie ładunku elektrycznego przez kryształ pod działaniem zewnętrznego pola elektrycznego, polegające na tym, że elektrony pozostające w niecałkowicie zapełnionym paśmie podstawowym przesuwają się do niezajętych poziomów kwantowych (dziur elektronowych) w obrębie tego pasma w kierunku przeciwnym do wektora pola elektrycznego, co formalnie odpowiada przesuwaniu się ładunków dodatnich zgodnie z kierunkiem pola elektrycznego

Materiały półprzewodnikowe :

- Półprzewodniki - grupa materiałów, które ze względu na przewodnictwo elektryczne zajmują pośrednie miejsce pomiędzy metalami a izolatorami.
- W dostatecznie niskich temperaturach półprzewodnik staje się izolatorem.
- W temperaturze zera bezwzględnego mają całkowicie obsadzone pasmo walencyjne i całkowicie puste pasmo przewodnictwa
- Zmiana elektryczna w wyniku niewielkich zmian ich składu
- Dzielą się na samoistne i niesamoistne (typu p i n)

Przewodniki samoistne Półprzewodnik idealnie czysty bez żadnych domieszek ani defektów sieci krystalicznej (niedomieszkowane); w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego (koncentracja elektronów jest równa koncentracji dziur). Obejmują pierwiastki IV grupy układu okresowego: węgiel, krzem, german

Zależność konduktywności półprzewodnika samoistnego od odwrotności temperatury

$$\sigma_s = \sigma_{0s} e^{\frac{-E_g}{2kT}}$$

σ_{0s} - konduktywność dla zera bezwzględnego, E_g - szerokość przerwy zabronionej, k - stała Boltzmanna, T - temperatura

Konduktywność:

$$\sigma = |e| (n\mu_e + p\mu_h)$$

gdzie m , μ_e , p , μ_h są odpowiednio koncentracjami i ruchliwościami elektronów i dziur

Półprzewodniki niesamoistne, domieszkowe W sieci krystalicznej monokryształu zamiast atomów pierwiastka materiału półprzewodnikowego znajduje się inny atom - półprzewodnik domieszkowany. Wprowadzony atom - *domieszka donorowa* (przeważają nośniki elektronowe – półprzewodnik typu n) i *akceptorowa* (przeważają nośniki typu dziurowego – półprzewodnik typu p)
Celem domieszkowania jest zmiana własności elektrycznych materiałów półprzewodnikowych

Półprzewodniki typu n Domieszka pierwiastka pięciowartościowego – pięciowartościowy atom As zastępuje w sieci atom Si, cztery z pięciu elektronów walencyjnych As biorą udział w wiązaniu. Pozostały piąty elektron nie uczestniczy w wiązaniu (związany z dodatnim polem domieszki siłami kulombowskimi) W temperaturach większych od 0 bezwzględnego jonizacja atomów domieszki, powstanie wolnych elektronów, elektrony z pasma donorowego (E_d - odległość poziomu domieszkowania od krawędzi pasma przewodnictwa) małym nakładem energii przedostają się do pasma przewodzenia – przepływ prądu
Zależność konduktywności półprzewodnika typu n od odwrotności temperatury

$$\sigma_d = \sigma_{0d} = e^{\frac{-E_d}{2kT}}$$

Oznaczenia analogiczne

Półprzewodnik typu p Domieszka pierwiastka trójwartościowego (np glinu, galu) – jedno z wiązań pozostaje niewysyczone, gdyż atom taki ma o jeden elektron mniej niż atom Si. Wiązanie to może być uzupełnione dowolnym elektronem z innego Si. Przejście takie wymaga bardzo małej ilości energii. Elektrony z pasma walencyjnego przedostają się na poziom akceptorowy E_a . Elektron, który wysycza wiązanie w atomie domieszki zostawia jednocześnie dziurę w tym węźle. Miejsce to może zająć nowy elektron. W rezultacie takich procesów dziura będzie się przesuwać w kierunku przeciwnym względem ruchu elektronu. W ujęciu struktury pałkowej oznacza to pojawienie się dziury w paśmie walencyjnym. Elektrony związane z atomami domieszki

tracą możliwość przemieszczania się.

Zależność konduktywności półprzewodnika typu p od odwrotności temperatury

$$\sigma_d = \sigma_{0d} = e \frac{-E_d}{2kT}$$

E_d - odległość poziomu domieszki od krawędzi pasma walencyjnego

Półprzewodniki – koncentracja nośników. Elektrony są tzw. fermionami (cząstki o połówkowym spinie, podlegają funkcji rozkładu Fermiego-Diraca).

Prawdopodobieństwo obsadzenia stanu o energii E (dozwolonego kwantowymi prawami wyboru) przez elektron, w półprzewodniku o temperaturze T , jest wyrażone funkcją Fermiego-Diraca (prawdopodobieństwo obsadzenia stanu fermionem):

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}$$

E_F – poziom Fermiego, charakteryzuje koncentrację swobodnych nośników ładunku w półprzewodniku dla danej temperatury. Jest to poziom energetyczny, którego prawdopodobieństwo obsadzenia przez elektron wynosi $\frac{1}{2}$, k - stała Boltzmanna

Dla $T=0K$:

$$f(E) = \begin{cases} 1 & \text{jeśli } E < E_F \\ 0 & \text{jeśli } E > E_F \end{cases}$$

Czyli wypełnione są wszystkie stany o energiach poniżej E_F .

Dla dowolnej temperatury prawdopodobieństwo wypełnienia stanu o energii E_F wynosi $\frac{1}{2}$

Koncentracja elektronów i dziur w stanie równowagi termodynamicznej. W półprzewodnikach samoistnych w warunkach równowagi termodynamicznej elektrony w paśmie przewodnictwa pojawiają się wyłącznie wskutek wzbudzenia z pasma walencyjnego. Oprócz widma energetycznego układu elektronów ważną charakterystyką układu jest gęstość stanów energetycznych.

Funkcja gęstości stanów $N(E)$ – określa liczbę stanów przypadającą na daną wartość energii. Odnosi się ona do jednostkowej objętości ciała stałego i jest miarą ilości stanów w przedziale energii $E, E+dE$.

$$N(E)dE = \frac{m^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2}\pi^2\hbar^3} E^{\frac{1}{2}}, E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$

Niech gęstość stanów = $N_e(E)$ zaś prawdopodobieństwo, że zostaną zajęte elektronami = $f_e(E)$, wówczas koncentracja elektronów (n_e):

$$n_e = \int_{E_g}^{\infty} N_e(E) f_e(E) dE$$

Wiemy, że dla $E - E_F \gg kT$ (niskie temperatury) rozkład Fermiego-Diraca dla elektronów:

$$f_e(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}}} \approx \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}}} = e^{\frac{E_F-E}{kT}}$$

Liczba stanów dla elektronów:

$$N_e(E)dE = \frac{1}{\sqrt{2}\pi^2} \left(\frac{m_e}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} (E - E_g)^{\frac{1}{2}} dE$$

$$n_e = \frac{1}{\sqrt{2}\pi^2} \left(\frac{m_e}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{E_F}{kT}} \int_{E_g}^{\infty} (E - E_g)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E}{kT}} dE$$

$$n_e = e \left(\frac{2\pi m n_e^* kT}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{E_F - E_g}{kT}}$$

gdzie: $\left(\frac{2\pi m n_e^* kT}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} - N_c$, efektywna gęstość stanów w paśmie przewodnictwa w $[m^{-3}]$, wszystkie stany są zastąpione stanami na dnie pasma przewodnictwa
 $e^{\frac{E_F - E_g}{kT}}$ - funkcja Fermiego

Koncentracja dziur w paśmie walencyjnym - kolejne w chuj długie wyprowadzenie, nie chce mi się, slajd wykład 12, godzina 16.35

N_V - efektywna gęstość stanów w paśmie walencyjnym

Mnożąc przez siebie wyrażenia na koncentrację elektronów i dziu mamy:

$$n_e n_v = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

Iloczyn ten jest taki sam dla półprzewodnika samoistnego jak i domieszkowanego

Poziom Fermiego w półprzewodniku samoistnym W danej temperaturze T $n_e n_v = \text{const} \Rightarrow (n * p = \text{const})$. Wprowadzenie domieszki przy zwiększeniu n spowoduje zmniejszenie p . (Tutaj też odpuszczam kosmiczne wzory)

W temperaturze 0K poziom Fermiego przypada dokładnie w środku przerwy energetycznej i nie zmienia się ze zmianą temperatury, o ile $m_e^* = m_h^*$

Jeżeli masy efektywne są różne poziom Fermiego przesuwają się przy wzroście temperatury w kierunku pasma, któremu odpowiada mniejsza masa efektywna

$$E_F = \frac{E_g}{2}$$

E_g - szerokość przerwy energetycznej

Równanie jest spełnione dla półprzewodników samoistnych z wąską przerwą energetyczną.

Masa Efektywna - masa, jaką należy przypisać elektronowi w kryształach, aby pod wpływem siły zewnętrznej uzyskał takie samo przyspieszenie jak elektron swobodny. Masa efektywna elektronu swobodnego jest równa jego masie. Masa efektywna elektronu swobodnego jest równa jego masie. Masa efektywna charakteryzuje pasmo, zależy od gęstości poziomów energetycznych w paśmie (gęstość jest mała, gdy energia szybko rośnie z wektorem k). Jest wielkością anizotropową (masa efektywna podłużna i poprzeczna). Elektrony znajdujące się przy wierzchołku pasma mają ujemną masę efektywną lub mówimy o dziurach o dodatniej masie efektywnej. Pojęcie masy efektywnej wprowadzono by opisać ruch elektronu, na który oprócz ewentualnej siły zewnętrznej oddziałuje sieć, w której ten elektron się znajduje.

$$m^* = \hbar^2 \left(\frac{d^2 E}{dk^2} \right)^{-1}$$

Półprzewodniki – koncentracja nośników w półprzewodniku domieszkowanym

Dla silnie domieszkowanego półprzewodnika typu n:

- Koncentracja elektronów:

$$n_d \approx N_d - N_a$$

- Koncentracja dziur:

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n}$$

gdzie: N_d - koncentracja domieszek donorowych, N_a - koncentracja domieszek akceptorowych, n_i - koncentracja elektronów w półprzewodniku samoistnym

Prąd dyfuzji – prąd wywołany przez chaotyczny ruch rozproszonych nośników nadmiarowych, z obszarów o większej koncentracji do obszarów o mniejszej koncentracji, w sieci krystalicznej półprzewodnika (występuje oprócz rekombinacji)

Gęstość prądu dyfuzji elektronów: $J_{nD} = qD_n \text{grad}(n)$

Gęstość prądu dyfuzji dziur: $J_{pD} = -qD_p \text{grad}(p)$

D_n, D_p – współczynniki dyfuzji, n, p – koncentracja elektronów/dziur w danym obszarze półprzewodnika

Prąd unoszenia (konwekcji) – prąd wywołany ruchem ładunków elektrycznych, pod wpływem np. istniejącego pola elektrycznego, nie związanych z cząstkami elementarnymi ośrodka, w którym się poruszają. Pole elektryczne wytwarza przyłożone do ośrodka (półprzewodnika) napięcie

Gęstość prądu unoszenia elektronów: $J_{nu} = q\mu_n nE$

Gęstość prądu unoszenia dziur: $J_{pu} = q\mu_p pE$

gdzie ruchliwość ładunków dana jest równaniami (Einsteina): $\mu_n = \frac{q}{kT} D_n$,
 $\mu_p = \frac{q}{kT} D_p$

Całkowita gęstość prądu elektronów: $J_n = J_{nD} + J_{nu}$, analogicznie dla dziur.

Całkowity prąd w półprzewodniku: $J = J_n + J_p$

Złącze p-n – pojedynczy kryształ półprzewodnika, w którym jeden obszar domieszkowany jest tak, aby powstał półprzewodnik typu n, a drugi, sąsiadujący z nim obszar domieszkowany jest tak, aby powstał półprzewodnik typu p.

W obszarze typu n nośniki większościowe ujemne (elektrony) oraz unieruchomione w siatce krystalicznej dodatnie przez domieszki donorowe

W obszarze typu p nośniki większościowe dodatnie (dziury) oraz ujemne jony domieszki akceptorowej

W półprzewodnikach obu typów występują także nośniki mniejszościowe przeciwnego znaku niż większościowe, koncentracja nośników mniejszościowych « koncentracja nośników większościowych

Na styku obszarów p i n przemieszczanie (dyfuzja) swobodnych nośników większościowych na skutek różnicy koncentracji nośników: elektrony do obszaru typu p, dziury do obszaru typu n (stają się nośnikami mniejszościowymi)

Rekombinacja z nośnikami większościowymi, które nie przeszły na drugą stronę złącza

Redukcja nośników po obu stronach złącza:

- Obecność nieruchomych jonów ujemnych: akceptorów (w p) i dodatnich donorów (w n)
- Powstanie wewnętrznego pola elektrycznego, które zapobiega dalszej dyfuzji nośników większościowych, sprzyja przepływowi nośników mniejszościowych
- Powstanie warstwy ładunku przestrzennego (warstwa zubożona, warstwa zaporową), nieposiadającej swobodnych nośników

Stan równowagi termicznej złącza – powstanie różnicy potencjałów wzdłuż złącza o typowej wartości równej 1V (potencjał jest wyższy po stronie materiału typu n)

Przez złącze p-n płyną dwa prądy: prąd dyfuzyjny J_D oraz prąd wsteczny J_W

Prąd dyfuzyjny J_D utworzony przez ruch nośników większościowych elektronów z „n” do „p” i dziur z „p” do „n”. Zależy od wartości i znaku zewnętrznego potencjału

Prąd wsteczny J_W to ruch nośników mniejszościowych: dziur z „n” do „p”,

elektronów z „p” do „n”. Wartość prądu wstecznego praktycznie nie zależy od wartości przyłożonego napięcia, zależy natomiast od temperatury i własności materiału (parametry mające wpływ na ilość nośników mniejszościowych)

W stanie równowagi termicznej natężenie J_D i J_W są sobie równe

Polaryzacja w kierunku przewodzenia :

- Zmniejszenie bariery potencjału o wartość zewnętrznego napięcia U
- Rośnie prawdopodobieństwo przejścia nośników większościowych przez warstwę zaporową
- Prąd dyfuzji elektronów z obszaru n do p i dziur z obszaru p do n
- Prąd dysuzji nośników większościowych znacznie większy niż prąd unoszenia nośników mniejszościowych
- Zmniejszenie szerokości obszaru zubożonego
- Maleje opór wewnętrzny

Polaryzacja w kierunku zaporowym :

- Wzrost bariery potencjału o wartość napięcia zewnętrznego U
- Swobodne nośniki większościowe, pod działaniem sił pola elektrycznego, odpływają z obszaru otaczającego warstwę zaporową
- Zwiększenie szerokości obszaru zubożonego
- Ruch nośników większościowych przez złącze praktycznie niemożliwy, płynie tylko niewielki prąd unoszenia (prąd wsteczny)
- Wzrost oporu wewnętrznego złącza

Podstawowe półprzewodnikowe elementy elektroniczne – diody :

- Dioda prostownicza – najczęściej krzemowa lub germanowa wykorzystywana w układach prostowników. Dioda przeznaczona głównie do prostowania prądu przemiennego o małej częstotliwości, której głównym zastosowaniem jest dostarczenie odpowiednio dużej mocy prądu stałego.
Złącze działa jak przełącznik, który dla jednego znaku napięcia wejściowego jest zamknięty, a dla drugiego jest otwarty
- Dioda świecąca LED – jest spolaryzowanym w kierunku przewodzenia złączem p=n
Wymaga dużej liczby elektronów w paśmie przewodnictwa i dużej liczby dziur w paśmie walencyjnym, tj. silnie domieszkowanego złącza p-n oraz prostej przerwy energetycznej
Elektrony są wstrzykiwane do obszaru typu n a dziury do p. Światło jest emitowane z wąskiego obszaru zubożonego podczas rekombinacji

elektronu z dziurą (rekombinacja promienista)

Dioda zaliczana jest do półprzewodnikowych przyrządów optoelektronicznych, emitujących promieniowanie w zakresie światła widzialnego, jak i podczerwieni

- Dioda Zenera – stosowana w układach stabilizacji napięcia, przeznaczona do pracy przy polaryzacji w kierunku zaporowym.
- Dioda pojemnościowa (warikap) – zmiana pojemności złącza PN pod wpływem doprowadzonego napięcia. Wykorzystywana do strojenia obwodów rezonansowych
- Fotodioda – Jonizacja materiału półprzewodnikowego pod wpływem światła (zmiana natężenia padającego światła powoduje zmianę parametrów elektrycznych)

Podstawowe półprzewodnikowe elementy elektroniczne – tranzystory :

- Tranzystory bipolarne – umożliwiają sterowanie przepływem dużego prądu za pomocą prądu znacznie mniejszego, służą do wzmacniania sygnałów. Tranzystor bipolarny ma 3 warstwy NPN lub PNP, a więc są 2 złącza PN. Skrajne warstwy: kolektor i emiter, warstwa środkowa – baza
Wzmocnienie prądowe tranzystora (stosunek zmian prądu kolektora do zmian prądu bazy): $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

8 Nadprzewodnictwo

Nadprzewodnictwo – pewne szczególne połączenie własności elektrycznych i magnetycznych, które uwiadamiają się w niektórych substancjach po ich ochłodzeniu poniżej temperatury charakterystycznej:

- Zanik oporu elektrycznego
- Zanik indukcji magnetycznej wewnątrz nadprzewodnika
- Kwantowanie strumienia magnetycznego w nadprzewodniku

Podstawowe właściwości stanu nadprzewodzącego :

- Efekt Meissnera-Ochsenfelda – wypychanie pola magnetycznego z nadprzewodnika. Nadprzewodnik jest wtedy doskonałym diamagnetykiem, umieszczony w polu magnetycznym wytwarza w swoim wnętrzu pole przeciwne do pola zewnętrznego. Półprzewodnik jest wtedy w tzw. *fazie Meissnera*
- Zerowy opór elektryczny – W nadprzewodnikach w pewnej temperaturze T_C zwanej temperaturą krytyczną opór zmniejsza się do zera, mimo

obecności domieszek w próbce. Zanik oporu następuje w bardzo wąskim przedziale temperatur

- Istnienie krytycznego strumienia indukcji magnetycznej, powyżej której znika nadprzewodnictwo. Efekt ten zależy od temperatury wg następującej zależności:

$$B_C(T) = const \left[1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^2 \right]$$

- Wkład w ciepło właściwe od elektronów przewodnictwa nadprzewodnika zależy od temperatury:

$$C_v^{el} \approx const \cdot e^{-\frac{\Delta}{kT}}$$

Δ - stała mniejsza od energii Fermiego o 10^4 razy

- Wykazują efekt izotopowy – temperatura krytyczna dla różnych izotopów danego pierwiastka zależy od masy izotopu M jak:

$$T_C \approx \frac{1}{\sqrt{M}}$$

- Strumień pola magnetycznego przechodzącego przez pole powierzchni pierścienia nadprzewodzącego jest wielkością skwantowaną

Podział nadprzewodników ze względu na reakcję na zewnętrzne pole magnetyczne :

I rodzaju :

- Związki pierwiastków nadprzewodzących i niektóre czyste metale
- Jedna określona wartość krytyczna H_C , poniżej której nadprzewodnik jest idealnym diamagnetykiem (*efekt Meissnera*)

Wraz ze wzrostem przyłożonego pola worteksów przybywa, aż wreszcie w polu krytycznym tworzą one gęsto upakowaną sieć, gdzie odległość między worteksami równa jest długości koherencji (odległość, na której nie może wystąpić istotna zmiana koncentracji nośników prądu w nadprzewodniku znajdującym się w niejednorodnym polu magnetycznym). Dalsze zwiększanie upakowania worteksów nie jest możliwe, ponieważ odległość między nimi musiałaby spaść poniżej długości koherencji, a więc rozmiaru pary Coopera. Dlatego wraz z przekroczeniem Pola krytycznego materiał przechodzi w stan normalny

Nośniki prądu – pary elektronów (pary Coopera) Składają się z dwóch elektronów o przeciwnie skierowanych rzutach spinu. Sumaryczny spin pary wynosi zero

Jak powstają pary Coopera :

- Elektrony tworzące parę Coopera są związane ze sobą słabym oddziaływaniem przyciągającym
- Oddziaływanie przyciągające wynika z deformacji sieci krystalicznej – pierwszy elektron deformuje sieć krystaliczną powodując lokalny wzrost koncentracji dodatniego ładunku jonów, co powoduje przyciąganie drugiego elektronu
- Deformację sieci przez elektron można traktować jak superpozycję fononów (kwantów energii drgań sieci krystalicznej). Pary Coopera można sobie wyobrazić jako dwa elektrony wymieniające nieustannie między sobą wirtualne fonony tak, że pędy składających się na parę elektronów nieustannie się zmieniają zachowują jednak stały pęd pary
- Pęd pary Coopera przy braku przepływu prądu wynosi zero
- Pary Coopera to Bozony (cząstki przenoszące oddziaływania, o całkowitym spinie) – mogą kondensować. W przeciwieństwie do Fermionów nie obowiązuje zakaz Pauliego i dążą do zajęcia tego samego poziomu energetycznego. Dowolna liczba bozonów może dzielić ten sam stan kwantowy
- Tworzenie się par Coopera jest zjawiskiem kolektywnym, w którym bierze udział jednocześnie duża liczba cząstek
- Par nie można traktować jako cząstki niezależnie, gdyż przeplatają się one w przestrzeni
- Pary Coopera są tworzone jedynie przez elektrony znajdujące się w pobliżu energii Fermiego

Dlaczego pary Coopera nadprzewodzą :

- Pojawienie się oporu elektrycznego oznaczałoby, że elektrony ulegają rozpraszaniu, czyli zmieniają swój pęd w zderzenia z fononami lub defektami struktury krystalicznej
- W procesie łączenia się w pary Coopera uczestniczą elektrony o przeciwnych pędach np K i $-K$, co w sumie daje zero. Para biorąca udział w przepływie prądu ma sumaryczny pęd różny od zera równy np $2P$. Elektrony pary mają zatem pędy $K+P$ i $-K+P$. Gdyby jeden z elektronów pary uległ rozproszeniu, jego pęd zmieniłby się o wartość, np Q , wynosiłby powiedzmy $-K+P+Q$; taki elektron nie mógłby już korelować z elektronem o pędzie $K+P$, czyli para uległaby rozerwaniu. To zaś zwiększyłoby energię układu o 2Δ , co byłoby niekorzystne (zasada minimum energii)
- Istnienie w parze 2 elektronów z energetycznego punktu widzenia jest korzystniejsze od niezależnego trwania.

Pomimo zderzeń np. z defektami sieci, pary Coopera, w przeciwieństwie do pojedynczych elektronów nie są rozpraszane (ich przepływ odbywa się bez tarcia – BRAK OPORU)!!!

- Wiązanie się elektronów w pary Coopera powoduje obniżanie się energii układu i zmianę rozkładu stanów energetycznych dostępnych dla elektronów w pobliżu poziomu Fermiego
- Stan podstawowy oddzielony jest od pierwszego stanu wzbudzonego (polegającego na rozerwaniu pary Coopera) przerwą energetyczną E_g
- Wartość E_g zależy od temperatury .
W temp 0K:

$$E_g(0) = 2\Delta(0) = 3.5kT_c$$

blisko T_c :

$$\Delta(T) \approx 3.2kT_c \sqrt{1 - \frac{T}{T_c}}$$

- Rozproszenie pary Coopera może nastąpić w wyniku dostarczenia energii przekraczającej szerokość przerwy energetycznej
- Stan nadprzewodzący może być zniszczony, oprócz przyłożenia silnego pola magnetycznego lub podgrzania, również przez przepływ odpowiednio dużego prądu. Przepływ prądu powoduje wzrost en. kinetycznej elektronów tworzących parę Coopera. Nadprzewodnictwo znika, gdy suma przyrostów en. kinetycznej tych elektronów przekroczy podwojoną wartość E_g

Tunelowanie – zjawisko kwantowe, w którym elektrony przenikają z jednego materiału do drugiego poprzez wąską barierę, np. warstwę izolatora

Zjawisko Josephsona – tunelowanie par Coopera przez warstwę izolatora z jednego nadprzewodnika do drugiego, potwierdza kwantowy charakter strumienia pola magnetycznego (zaproponowane przez Londona)

Przez złącze może płynąć prąd nawet bez zewnętrznego pola elektrycznego. Tunelowanie par Coopera przez cienką barierę pomiędzy nadprzewodnikami. Można obserwować dwa zjawiska Josephsona:

- stałoprądowe (prąd stały płynie przez złącze bez zewnętrznego napięcia)
- zmiennoprądowe (stałe napięcie przyłożone do złącza powoduje oscylacje natężenia prądu płynące przez złącze)

Stałoprądowe zjawisko Josephsona Funkcje falowe par Coopera Ψ_1 i Ψ_2 pary po obu stronach złącza:

$$\psi_1 = n_1^{\frac{1}{2}} e^{i\theta_1}, \text{ a } \psi_2 = n_2^{\frac{1}{2}} e^{i\theta_2}$$

n_1, n_2 - koncentracje nośników

θ_1, θ_2 - fazy funkcji falowych

Stały prąd par Coopera przez dielektryczne złącze, który płynie przy zerowym napięciu na złączu, zależy tylko od różnicy faz par Coopera w dwóch obszarach.

Natężenie J prądu stałego może mieć różne wartości zależnie od różnicy faz δ funkcji falowych Ψ_1 i Ψ_2 po obu stronach złącza:

$$J = J_0 \sin \delta = J_0 \sin(\theta_2 - \theta_1)$$

J_0 - maksymalny prąd dla $U=0$

Zmiennoprądowe zjawisko Josephsona Po przyłożeniu różnicy potencjałów V do złącza zmienia się energia par po obu stronach złącza. W tym przypadku para Coopera tunelująca przez złącze napotyka różnicę energii potencjalnej

$$qV (q = -2e)$$

Możemy przyjąć, że para po jednej stronie ma energię potencjalną eV , a po drugiej stronie złącza $-eV$. Dodatkowo zaczyna zmieniać się w czasie różnica faz funkcji falowych, tym szybciej im większe jest napięcie V :

$$\delta(t) = \delta(0) - \frac{2eVt}{\hbar}$$

Płynący prąd staje się prądem przemiennym, oscylującym z częstością ω

$$J = J_0 \sin \left| \delta(0) - \frac{2eVt}{\hbar} \right|$$

$\omega = \frac{2eV}{\hbar}$ - częstość oscylacji prądu nadprzewodzącego

Napięcie na złączu $V=1\mu V$ wywołuje oscylacje o częstości 483.6 MHz

Nadprzewodzący Interferometr kwantowy (SQUID) Strumień magnetyczny w pierścieniu Φ =strumień od pola zewnętrznego (Φ_{ext}) + strumień od prądu nadprzewodzącego płynącego po powierzchni pierścienia (Φ_{sc})

Φ jest skwantowany

Φ – brak warunku skwantowania dla Φ_{ext} , dlatego Φ_{sc} przybiera takie wartości, aby Φ mógł być skwantowany

Doświadczalnie stwierdzono, że całkowity strumień przechodzący przez nadprzewodzący pierścień może przybierać tylko skwantowane wartości, które są całkowitymi wielkościami kwantu strumienia Φ_0 (flukson)

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} \approx 2.07 \cdot 10^{-15} [Tm^2]$$

Pętla z dwoma złączami Josephsona w zewnętrznym polu magnetycznym Przez pętlę przepuszcza się prąd o natężeniu J przy $U=0$

Strumień magnetyczny $\Phi = B \cdot S$ zmienia fazy funkcji falowych par Coopera płynących w gałęziach a i b:

$$\delta_b = \delta_0 + \frac{e}{\hbar c} \Phi, \delta_a = \delta_0 - \frac{e}{\hbar c} \Phi$$

Prąd J jest sumą prądów z obu gałęzi:

$$J = J_0 \left[\sin \left(\delta_0 + \frac{e}{\hbar c} \Phi \right) + \sin \left(\delta_0 - \frac{e}{\hbar c} \Phi \right) \right] = 2J_0 \sin \delta_0 \cos \frac{e\Phi}{\hbar c}$$

Natężenie prądu jest periodyczną funkcją strumienia Φ . Maksima występują dla warunku: $\frac{e\Phi}{\hbar c} = s\pi$, gdzie s jest liczbą całkowitą

Magnetometry SQUID – wykorzystywane do pomiaru nawet najślabszych pól magnetycznych

Zastosowanie nadprzewodników :

- Łożyska nadprzewodzące – do konstrukcji łożysk nadprzewodzących wykorzystuje się zjawisko lewitacji magnesu nad nadprzewodnikiem. Łożyska takie cechują się bardzo dobrą stabilnością oraz małymi stratami. Znajduje zastosowanie w wielu urządzeniach, na przykład w pompach próżniowych.
- Przewody i druty nadprzewodzące – druty projektuje się tak, aby odprowadzanie ciepła było zawsze szybsze niż jego wytwarzanie. Dlatego też włókna nadprzewodzące muszą mieć bardzo małą średnicę rzędu 0.01mm, aby wytworzyć przewody stosuje się podłoże z elastycznego materiału, zawierające ścieżkę nadprzewodzącą. Najprostszy przewód nadprzewodzący stanowi pręt lub rura miedziana pokryta warstwą nadprzewodnika. Inną wersją przewodu jest pokryta warstwą nadprzewodzącą taśma stalowa lub miedziana
- Zastosowanie przemysłowe – Brak strat energii na wydzielanie ciepła w trakcie przepływu prądu elektrycznego w nadprzewodniku stwarza możliwości praktycznego zastosowania nadprzewodników (np. Elektromagnesy)
- Kolej magnetyczna to kolej, w której tradycyjnej torowisko zostało zastąpione układem elektromagnesów. Dzięki polu magnetycznemu kolej ta nie ma kontaktu z powierzchnią tory, gdyż cały czas unosi się nad nim. Do realizacji tego zadania wykorzystuje się elektromagnesy wykonane z nadprzewodników lub konwencjonalne. Mogą przez to rozwijać duże prędkości. Dzięki zastosowaniu magnesów eliminowane jest tarcie kół. Dzięki temu zbliżają się do 600 km/h

Nadprzewodniki wysokotemperaturowe – nadprzewodniki o wysokiej temp. krytycznej $> 77K$ – nadprzewodnictwo osiągalne przy chłodzeniu ciekłym azotem

Nadprzewodniki wysokotemperaturowe – własności :

- Pary ładunku e są nośnikami prądu nadprzewodzącego
- Są to anizotropowe kryształy jonowe o budowie warstwowej, które w zależności od domieszkowania są izolatorami lub nadprzewodnikami o bardzo nietypowych własnościach w stanie normalnym, głównie tlenki Cu

Fullereny – trzecia poza diamentem i grafitem stabilna forma węgla. Tworzą je cząsteczki przypominające kształtem klatki. Podstawową formą jest C_{60} . Związki fullerenów z metalami alkalicznymi są nadprzewodnikami. Na przykład związek K_3C_{60} w którym potas znajduje się w położeniach oktaedrycznych komórki regularnej jest nadprzewodnikiem o temperaturze krytycznej $T_C = 19.2K$

- Mają temperatury krytyczne ok 100K, czyli o rząd większe niż w przypadku nadprzewodników klasycznych
- Są nadprzewodnikami II rodzaju
- Kwant strumienia w nadprzewodnikach wysokotemperaturowych jest identyczny z Φ_0 odkrytym w klasycznych nadprzewodnikach

Na nowo odkrywanych materiałach nadprzewodzących przeprowadza się testy obejmujące: badanie efektu Meissnera, zmiennoprądowe zjawisko Josepha, trwałe prądy i zerowy opór elektryczny

Choć wiadomo, że mechanizm fononowy odgrywa pewną rolę, brak jest jednak kompletnej teorii mikroskopowej opisującej nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe